

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Boudiaf De M'sila

Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur

Département De Génie Civil

MEMOIRE

Présenté par

ELBAHI BOUBAKEUR SEDDIK

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : matériaux

Sujet de la thèse

Influence des paramètres de formulation et des conditions de mise en œuvre et de conservation sur la perméabilité à l'eau d'un béton

Thèse soutenue le : 06/07/2004

Devant la commission d'examen composée de :

Dr Khmissa Mohamed:	Maître de conférence	Président	U.M.B. M'sila
Dr Bencheikh Mohamed:	Maître de conférence	Promoteur	U.M.B. M'sila
Dr Boudaoud Zein-eddine:	Maître de conférence	Examineur	U.M.B. M'sila
Dr Bibi Mekki:	Maître de conférence	Examineur	U.M.B. M'sila

REMERCIEMENT

Nous remercions le dieu qui nous a donné le pouvoir et qui nous a aidé a terminer avec succès ce modeste travail.

*Nous tenons a remercier vivement et très fort notre promoteur :
M. BENCHEIKH, pour ses conseils judicieux et sa longue patience.*

Nous remercions monsieur A.LOUNIS responsable du laboratoire M.D.C de département de génie civil à M'sila.

Nous remercions monsieur H.YOUCEF responsable du laboratoire développement des géomatériaux de département de génie civil à M'sila.

Nous remercions tous les enseignants de génie civil.

Nous tenons a remercier tous ceux qui ont participé à la réussite de mon stage et particulièrement :

Ginette Arliguie :Directrice du laboratoire matériaux et durabilité des constructions à l'INSA de Toulouse

Pierre Clastres :

Myriam Carcasses : ma tutrice de stage au laboratoire matériaux et durabilité des constructions, à l'INSA de toulouse, pour l'accueil au sein de son équipe

Jérôme Verdier:

Behime Mourad

Marc Bégué :technicien au laboratoire matériaux et durabilité des constructions

Mme Simone Julien

Ainsi que tous ceux que je n'ai pas cité expressément.

DEDICACE

JE DEDIE CE TRAVAIL :

A MON PERE.

A MA MERE.

A MES FRERES.

A MES SŒURS.

A TOUS MES AMIS.

Influence des paramètres de formulation et des conditions de mise en œuvre et de conservation sur la perméabilité à l'eau d'un béton.

Résumé

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer à remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité. Cette qualité peut être caractérisée notamment par deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité.

Il est donc évident qu'une connaissance détaillée de la perméabilité des bétons, ainsi que des facteurs qui la contrôlent est fondamentale à une meilleure maîtrise de la durabilité des constructions.

Ce présent travail expose une méthode expérimentale d'évaluation de la durabilité basée sur la mesure de la perméabilité à l'eau d'un béton. Le coefficient de perméabilité est évalué par la loi de Darcy. Les éprouvettes soumises à l'essai sont de forme cylindrique pleine de 160mm de diamètre et 160mm de hauteur.

L'objectif essentiel de ce travail est d'évaluer l'influence des facteurs de composition et de mise en œuvre d'un béton à base des matériaux locaux de la région de M'sila sur sa perméabilité à l'eau.

Les facteurs pris en compte sont :

- ❖ Rapport Eau / Ciment
- ❖ Rapport Gravier / Sable
- ❖ Durée de vibration
- ❖ Mode de conservation

Il s'agit ensuite d'établir une corrélation entre la perméabilité à l'eau du béton étudié, les conditions de mise en œuvre et les facteurs de composition afin de fixer des exigences d'utilisation dans un environnement local préjudiciable.

Influence parameters of formulation and conditions of implementation and conservation on the permeability to water of a concrete.

Summary

It is essential that each concrete structure can preserve its resistance and continue to fulfill its function throughout its useful lifespan. One says of such a concrete that it has a good durability. This quality can be characterized in particular by two physical sizes: the permeability and diffusivity.

It is thus obvious that a detailed knowledge of the permeability of the concretes, as of the factors which control it is fundamental with a better control of the durability of constructions.

This present work exposes an experimental method of evaluation of the durability based to the measure of the permeability to water of a concrete. The coefficient of permeability is evaluated by the law of Darcy. The test-tubes submitted for testing are of cylindrical form full with 160mm of diameter and 160mm height.

The essential objective of this work is to evaluate the influence of the factors of composition and placement of a concrete at base of local materials of the area of M' sila on its permeability to water.

The factors taken into account are:

- ❖ Water Ratio/Cement
- ❖ Gravel Ratio/Sand
- ❖ Duration of vibration
- ❖ Mode of conservation

It is then a question of establishing a correlation between the permeability to water of the studied concrete, the conditions of implementation and the factors of composition in order to fix requirements of use in a local environment prejudicial.

تأثير عوامل التركيبة و شروط الإنجاز والتخزين على نفاذية الخرسانة

ملخص

عندما تتميز البناية بمقاومة عالية و تواصل في مقاومتها لمدة طويلة نقول بان البناية لها ديمومة جيدة هناك عاملين فيزيائيين يمكنهما التحكم في هذه الميزة هما النفاذية و الانتشارية

وبما ان ديمومة الخرسانة مرتبطة بمقاومتها و بعدم نفاذيتها فان من المهم جدا دراسة هذه الخاصية النفاذية دراسة معمقة وكذا العوامل التي تتحكم فيها

تهدف هذه المذكرة إلى وصف طريقة عملية لتحديد معامل النفاذية لخرسانة مصنوعة من مواد محلية منطقة المسيلة معامل النفاذية يتم حسابه بواسطة قانون دارسي

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير عوامل التركيبة و شروط التحضير و التخزين على نفاذية الخرسانة

هذه العوامل هي

◆ النسبة ماء/ إسمنت

◆ النسبة حصى/ رمل

◆ مدة الرج

◆ نوع التخزين

النتائج المحصل عليها تستغل لاقتراح طرق عمل من أجل استعمال المواد المحلية أخذين بعين الاعتبار طبيعة المحيط المحلي.

SOMMAIRE :

INTRODUCTION.....	01
OBJECTIF DE L'ETUDE.....	02

CHAPITRE I

LES FACTEURS DE DURABILITE DU BETON

I.1- CRITERES GENERAUX ET CAUSES D'UNE MAUVAISE DURABILITE.....	03
I-1-1 CRITERES GENERAUX DE DURABILITE.....	03
<u>I.1.1.1 RESISTANCE</u> :	03
<u>I.1.1.2 RAPPORT E/C</u> :	03
<u>I.1.1.3- DOSAGE EN CIMENT</u> :	05
I.1.2- CAUSE D'UNE MAUVAISE DURABILITE.....	06
I.2- NOTION SUR LA MICROSTRUCTURE DES CIMENTS HYDRATES ET LA STRUCTURE POREUSE DES MORTIERS ET BETONS	07
I.2.1- L'ETAT DE L'EAU DE GACHAGE DANS LA PATE DE CIMENT :.....	07
I.2.2- STRUCTURE DE LA PATE DE CIMENT HYDRATE :.....	08
I.2.2.1- LES PRINCIPAUX HYDRATES :.....	09
I.2.2.1.1- LES C-S-H :.....	09
I.2.2.1.2- LA CHAUX HYDRATEE (CH OU PORTLANDITE) :.....	10
I.2.2.1.3- LES ALUMINATES HYDRATES :.....	10
I.2.2.2- POROSITE DE LA PATE DE CIMENT :.....	10
I.2.2.3- DISTRIBUTION POROSIMETRIQUE DE LA PATE DE CIMENT HYDRATE :.....	11
I.2.2.4- ROLE DES ADDITIONS MINERALES :.....	13
I.2.3- LA STRUCTURE POREUSE DES MORTIERS ET BETONS :.....	15
I.2.4- IMPORTANCE DE LA PEAU DU BETON :.....	16
I.3- LA PERMEABILITE A L'EAU DU BETON :.....	17
I.3.1- LA PERMEABILITE ET LA DIFFUSIVITE :.....	17
I.3.2- PERMEABILITE ET GEOMETRIE DES PORES :.....	18
1.3.2.1- <u>LE MODELE STATISTIQUE DE DIENNES [26]</u> :	18
1.3.2.2- <u>LE MODELE DE KATZ-THOMSON [27]</u> :	18
I.3.3- LES PARAMETRES D'INFLUENCE SUR LA PERMEABILITE DU BETON :...20	
I.3.3.1- INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DU RESEAU CAPILLAIRE :20	
I.3.3.1.1- <u>LA POROSITE</u> :	20
I.3.3.1.2- <u>LA TORTUOSITE OU LA CONNECTIVITE</u> :	20
I.3.3.1.3- <u>LE DEGRE DE SATURATION</u> :	22
I.3.3.2- INFLUENCE DE LA RESISTANCE MECANIQUE, DU RAPPORT E/C SUR LA PERMEABILITE A L'EAU :.....	22
I.3.3.3- INFLUENCE DE LA NATURE DU LIANT ET DES ADDITIONS MINERALES :	23
I.3.3.4- INFLUENCE DES GRANULATS :	24
I.3.3.4.1- LA ZONE D'INTERFACE PATE-GRANULATS :.....	24
I.3.3.5- INFLUENCE DE LA CURE :	25
I.3.3.6- INFLUENCE DE L'AGE :.....	27
I.3.3.7- INFLUENCE DE LA TEMPERATURE :.....	28
I.3.4- MESURE DE LA PERMEABILITE A L'EAU :.....	28

I.3.4.1- PAR QUELLE MESURE DE LA PERMEABILITE CARACTERISER UN BETON ?.....	28
I.3.4.2- DEFINITION ET METROLOGIE DE L'ESSAI DE PERMEABILITE :.....	29
I.3.4.3- HYPOTHESES ET LOI D'ECOULEMENT DU FLUIDE :.....	30
I.3.4.3.1- LOI DE DARCY :.....	30
I.3.4.3.2- CONDITION DE VALIDITE DE LA LOI DE DARCY :.....	31
I.3.4.3.3- PRINCIPE DE L'ESSAI :.....	32
I.3.4.3.4- UNITES DE MESURE :.....	33
I.3.4.4- PROCEDURE ET METHODES D'ESSAIS DE LA PERMEABILITE A L'EAU :.....	33
I.4- CONCLUSION DE LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE :.....	35

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

II.1- INTRODUCTION	38
II.2- CARACTERISTIQUES DU SABLE UTILISE	38
II.2.1- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SABLE	38
II.2.2- CARACTERISTIQUES CHIMIQUE DU SABLE.....	38
II.2.3- ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE	39
II.2.4- MODULE DE FINESSE	40
II.3- CARACTERISTIQUES DU GRAVIER UTILISE	42
II.3.1- ORIGINE DU GRAVIER UTILISE	42
II.3.2- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU GRAVIER UTILISE	42
II.3.3- CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU GRAVIER	42
II.3.4- L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER	43
II.4- CARACTERISTIQUES DU CIMENT UTILISE	44
II.4.1- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU CIMENT	44
II.4.2- CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU CIMENT UTILISE	44
II.4.2.1- LA COMPOSITION MINERALOGIQUE	45
II.5- EAU DE GACHAGE	45
II.6- METHODE DE COMPOSITION DE BETON	45

CHAPITRE III

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1- INTRODUCTION	46
III.2- DESCRIPTION GENERALE DU PERMEAMETRE	46
(LABORATOIRE DE L'UNIVERSITE DE M'SILA)	
III.3- PREPARATION DES EPROUVETTES.....	48
III.4- PREPARATION DU MONTAGE	48
III.5- MESURE DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE A L'EAU	48
(UNIVERSITE DE M'SILA)	
III.5.1- CALCUL DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE A L'EAU	49
III.6- MESURE DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	50
III.7- ESSAIS COMPLEMENTAIRES	50
(LABORATOIRE LMDC, UPS, TOULOUSE)	
III.7.1- LES MATERIAUX TESTES	50
III.7.1.1- LA COMPOSITION DU BETON TESTE.....	51

III.7.2- MESURE DE LA PERMEABILITE A L'EAU.....	51
III.7.2.1- DESCRIPTION GENERALE DU PERMEAMETRE	51
(LABORATOIRE LMDC ,UPS,TOULOUSE)	
III.7.2.2- PROTOCOLE DE MISE EN MARCHÉ DU PERMÉAMÈTRE A L'EAU.....	53
III.7.2.2.1- PREPARATION DE L'ECHANTILLON	53
III.7.2.2.2- PREPARATION DU MONTAGE	54
III.7.2.2.3- REMPLISSAGE EN EAU DE L'ACCUMULATEUR	54
III.7.2.2.4- CONFINEMENT LATERAL DE LA CELLULE.....	54
III.7.2.2.5- MISE EN PRESSION DE L'ACCUMULATEUR	54
III.7.2.2.6- FIN DE MANIPULATION	54
III.7.3- DIFFRACTION DES RAYONS X.....	55
III.7.3.1- PRINCIPE DE LA METHODE.....	55

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1- INTRODUCTION	56
IV.2- INFLUENCE DU RAPPORT E/C	57
IV.2.1- INFLUENCE DU RAPPORT E/C SUR LA PERMEABILITE	57
IV.2.2- INFLUENCE DU RAPPORT E/C SUR LA RESISTANCE	59
CONCLUSION.....	61
IV.3- INFLUENCE DU RAPPORT G/S	62
IV.3.1- INFLUENCE DU RAPPORT G/S SUR LA PERMEABILITE	62
IV.3.2- INFLUENCE DU RAPPORT G/S SUR LA RESISTANCE	64
CONCLUSION.....	65
IV.4- INFLUENCE DE LA DUREE DE VIBRATION	66
IV.4.1- INFLUENCE DE LA DUREE DE VIBRATION SUR LA PERMEABILITE ..	66
IV.4.2- INFLUENCE DE LA DUREE DE VIBRATION SUR LA RESISTANCE	68
CONCLUSION.....	70
IV.5- INFLUENCE DU MODE DE CONSERVATION	71
IV.5.1- INFLUENCE DU MODE DE CONSERVATION SUR LA PERMEABILITE	71
IV.5.2- INFLUENCE DU MODE DE CONSERVATION SUR LA RESISTANCE.....	73
CONCLUSION.....	74
CONCLUSION GENERALE.....	75

Introduction :

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer à remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé, on dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité. [1]

L'expression durabilité est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique [2]. La nature, l'intensité et les mécanismes concernés dans chacun des cas ainsi que les différents impacts peuvent varier considérablement. L'expression durabilité du béton est donc parfois perçue comme un concept beaucoup trop vague. D'ailleurs, aucune méthode normalisée ne permet de mesurer la durabilité d'un béton ; il n'y a pas d'unité pour évaluer la durabilité du béton comme il en existe lorsque l'on veut mesurer la résistance à la compression [3]. Il est utile d'ajouter que le concept de durabilité ne signifie pas une durée de vie infinie, pas plus qu'il ne signifie que le béton doit résister à n'importe quelle agression.

Deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs : la perméabilité et la diffusivité [4]. Ces deux grandeurs correspondent à deux mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement qui se produit sous gradient de pression et la diffusion un transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration.

La durabilité d'un ouvrage est étroitement liée à la durabilité du matériau avec lequel il est réalisé. En ce qui concerne les bétons, celle-ci s'explique par la résistance à la pénétration d'agents extérieurs. Les écoulements de fluide, transportant des agents agressifs sont donc préjudiciables à une bonne durabilité. Ainsi, l'attaque chimique par les sulfates, la corrosion des armatures due à l'attaque par les chlorures et la résistance au gel et au feu sont directement sensibles à la perméabilité du béton employé. Des études [5] ont montré que le carré de la profondeur de carbonatation d'un béton âgé d'un an dépend linéairement de sa perméabilité à l'air.

Il est donc évident qu'une connaissance détaillée de la perméabilité des bétons, ainsi que des facteurs qui la contrôlent est fondamentale à une meilleure maîtrise de la durabilité des constructions. L'influence de ces paramètres, sur lesquels pourra jouer le concepteur, comme la valeur du rapport E/C, les conditions de cure ou les additions minérales, gagne à être mieux connue. La perméabilité est également un bon indicateur de l'endommagement des ouvrages, on pourra donc évaluer celui-ci par les carottages in situ. Dans cette optique, l'intérêt d'un moyen de mesure fiable et précis, permettant une détermination relativement rapide de la perméabilité, apparaît immédiatement.

Objectif :

- Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état.
- Il existe aussi de très nombreux cas où une mauvaise durabilité a provoqué la ruine complète ou partielle des ouvrages.
- Il est clair qu'une structure de béton évaluera de manière très différente en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs.

En plus des facteurs climatiques et environnementaux, les dégradations qui affectent les structures en béton peuvent avoir plusieurs autres origines. On peut généralement regrouper ces autres facteurs en trois grandes familles :

1/- les facteurs reliés à la conception de l'ouvrage.

2/- les facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage.

3/- les facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton.

Donc, Est ce que on peut dire que « Le béton peut constituer un matériau de construction présentant une durabilité exceptionnelle sans qu'il soit nécessaire de recourir à des mesures de protection de surfaces spécifiques, sous réserve que sa **composition** soit **correcte** et sa **mise en œuvre** réalisée avec **soin** ».

L'objectif essentiel de ce travail est d'évaluer l'influence des facteurs de composition et de mise en œuvre d'un béton à base des matériaux locaux de la région de M'sila sur sa perméabilité à l'eau.

Les facteurs pris en compte sont :

- Rapport Eau / Ciment
- Rapport Gravier / Sable
- Durée de vibration
- Mode de conservation

Il s'agit ensuite d'établir une corrélation entre la perméabilité à l'eau du béton étudié, les conditions de mise en œuvre et les facteurs de composition afin de fixer des exigences d'utilisation dans un environnement local préjudiciable.

CHAPITRE I

LES FACTEURS DE DURABILITE DU BETON

I.1-Critères généraux et causes d'une mauvaise durabilité

I-1-1 Critères généraux de durabilité

Plusieurs chercheurs [4] trouvent qu'il existe trois critères qui servent à limiter la «capacité de transfert» du béton, exprimé par un coefficient de perméabilité ou de diffusion. Ces trois critères sont :

I.1.1.1 Résistance :

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Entre cette résistance et la porosité capillaire existe une relation : plus faible est la porosité, plus grande est la résistance. Ainsi, il existe un lien entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression du béton,

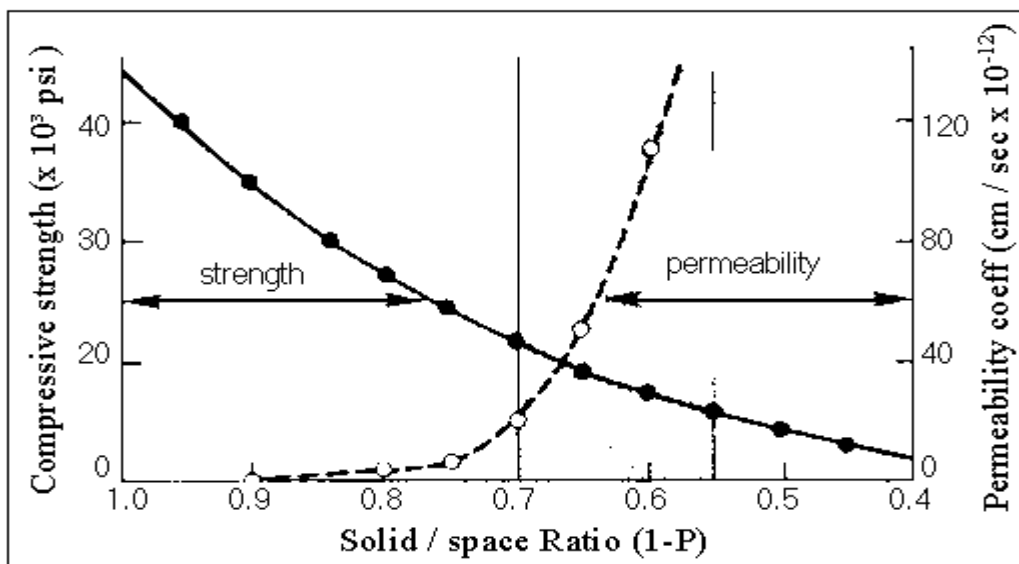


Figure I-1 : La relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.

[Metha, 1986 Concrete structure, properties, and materials, Prentice-Hall],[6].

La figure (I-1) présente la relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. On remarque qu'il y a une relation très nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance.

I.1.1.2 Rapport E/C :

Le rapport E/C est l'une des valeurs caractéristiques les plus importantes du béton frais et du béton durci. Lorsque le rapport E/C augmente, le béton frais devient plus plastique et son ouvrabilité ainsi que sa compactibilité s'améliorent. Par contre, la qualité d'un béton après durcissement est d'autant meilleure que le rapport E/C est faible.

En partant de l'hypothèse d'une hydratation complète, une quantité d'eau proportionnellement faible est nécessaire au durcissement du béton. Le ciment ne peut lier

qu'une quantité d'eau environ équivalente à 40 % de sa masse (env. 25 % chimiquement et 15 % physiquement). Ceci correspond à un rapport E/C de 0.40, [7]. Un béton possédant un rapport E/C de 0.40 n'est cependant pas ouvrable. En pratique, on augmente, par conséquent, la quantité d'eau, ce qui améliore l'ouvrabilité et la compactabilité du béton. Le ciment n'est toutefois pas en mesure de lier cet excédent d'eau, désormais présente dans le béton. Le volume occupé par l'excédent d'eau dans le béton est appelé volume de pores capillaires.

Avec l'augmentation du volume d'eau, le rapport E/C augmente. La figure (I-2) représente l'influence du rapport E/C sur des propriétés sélectionnées du béton.

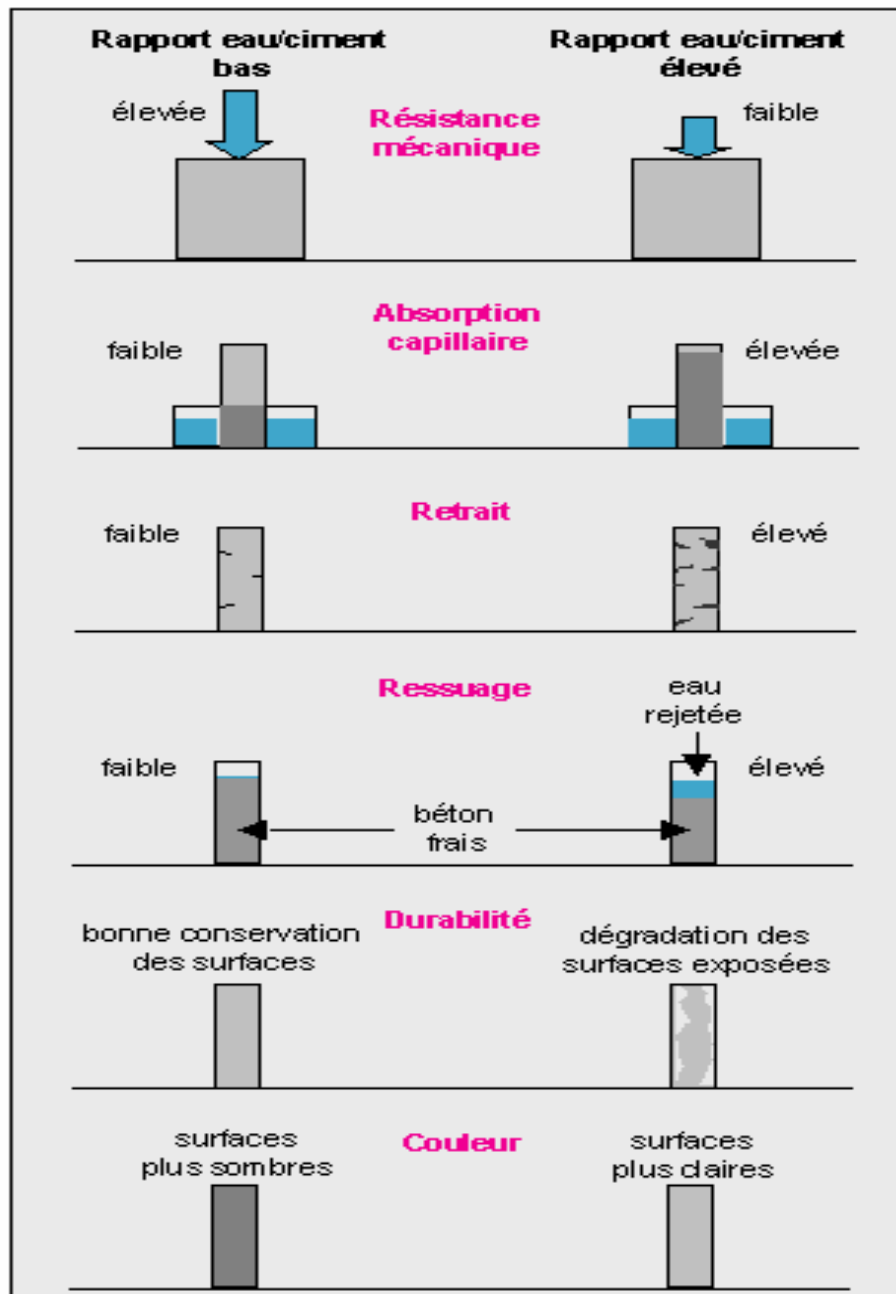


Figure I-2: Influence du rapport E/C sur les propriétés du béton [8].

Selon [7], On peut retenir les valeurs indicatives suivantes :

1/- la résistance à la compression diminue en fonction de l'accroissement du rapport E/C. La résistance à la compression d'un béton présentant un rapport E/C = 0.40 est fixée à 100 %.

Rapport E/C	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Résistance à la compression [%]	100	87	70	55	44

Le béton possédant un rapport E/C élevé aspire plus rapidement un volume d'eau plus important.

2/- l'absorption d'eau augmente en fonction de l'accroissement du rapport E/C. L'aspiration capillaire d'eau pour un béton présentant un rapport E/C = 0.40 est fixée à 100 %.

Rapport E/C	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Absorption d'eau [%]	100	220	375	550	750

Le béton avec un rapport E/C élevé dégage plus d'eau dans l'environnement lors du séchage et se caractérise par un retrait plus important. Il en résulte des tensions élevées qui provoquent des fissures.

3/- le retrait final augmente en fonction de l'accroissement du rapport E/C. Le retrait définitif pour un béton présentant un rapport E/C = 0.40 est fixée à 100 %.

Rapport E/C	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Retrait définitif [%]	100	140	180	220	260

Le béton frais avec un rapport E/C élevé, (c'est à dire un béton avec une pâte de ciment riche en eau ou fluide). Un tel béton est atteint par la ségrégation et il en résulte un poudrage de la surface.

Lorsque le rapport E/C augmente, la résistance du béton diminue. Le risque de corrosion de l'acier d'armature augmente. Les éclatements consécutifs aux effets du gel surviennent plus rapidement.

Le béton présentant un rapport E/C élevé se caractérise par une couleur claire, parce que la partie de ciment non-hydratant est très faible.

I.1.1.3- Dosage en ciment :

Le moyen d'accroître les résistances à court terme d'un béton peut être d'augmenter son dosage en ciment. En effet, pour augmenter la résistance et diminuer la porosité, cela conduit à diminuer le E/C c'est à dire augmenter le dosage en ciment. Donc, plus le béton sera dosé en ciment plus l'exothermie sera importante, ce qui devrait se traduire par des gains résistance à courts termes plus importants, c'est pour cela que le dosage en ciment est considéré comme une condition de sécurité et comme un critère général de durabilité [9].

I.1.2- Cause d'une mauvaise durabilité

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes au béton. Les différentes actions peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques. Les dommages d'origine mécaniques sont causés par les chocs, l'abrasion, l'érosion ou la cavitation.

Les attaques chimiques externes sont principalement causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates ou le gaz carbonique ainsi que par de nombreux liquides et gaz d'origine naturelle ou industrielle. L'action destructrice est de nature très variée et peut se manifester de façon directe ou indirecte.

Les causes physiques de détérioration comprennent les effets d'une température élevée ou des différences de dilatation thermique des granulats et de la pâte de ciment durci.

Les cycles répétés de gel-dégel et l'action des sels fondants qui leur sont souvent associés sont les causes importantes de détérioration, On peut observer un effet de synergie entre les processus physiques et chimiques de détérioration.

Il convient de noter avant toute chose que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause : Le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences mais, lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apparaîtront. Pour cette raison, il est quelques fois difficile d'attribuer la détérioration à une cause particulière, mais la qualité du béton, au sens le plus large du terme (quoique la perméabilité mérite une attention spéciale), doit presque toujours être prise en considération. En effet, à l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes associés à la durabilité font intervenir l'écoulement de fluides (liquide ou gaz) à travers le béton. Il est donc nécessaire de bien comprendre ce phénomène lorsque la durabilité du béton est en cause.

[1]

I.2- Notion sur la Microstructure des ciments hydratés et la structure poreuse des mortiers et bétons

I.2.1- L'état de l'eau de gâchage dans la pâte de ciment :

L'eau de gâchage est nécessaire à la fabrication du béton. L'eau totale de gâchage correspond à la somme résultant de l'eau ajoutée au mélange et de l'humidité de la surface des granulats.

La norme EN 206 [10], définit une teneur en eau efficace. Cette teneur est définie comme étant la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée par les granulats. La quantité d'eau totale correspond à la quantité d'eau ajoutée, plus l'eau déjà contenue dans les granulats ou à leur surface, plus la quantité d'eau contenue dans les adjuvants ou les ajouts utilisés sous forme de coulis, plus la quantité d'eau provenant de la glace ajoutée ou du chauffage à la vapeur.

Grâce à l'eau de gâchage, le mélange de béton frais peut être mis en œuvre avec une ouvrabilité contrôlée. Le durcissement du béton frais s'effectue par la réaction chimique (hydratation) du ciment avec une partie de l'eau de gâchage. L'eau potable peut être utilisée sans contrôle préalable pour la fabrication du béton. Pour les autres eaux, il convient de s'assurer qu'elles ne contiennent pas d'impuretés nuisibles [11]. En effet l'eau de gâchage ne doit pas comporter d'impuretés organiques.

La teneur en sulfates et en chlorures joue également un rôle prépondérant. Conformément à [12] il est interdit d'utiliser des eaux résiduelles comme eau de gâchage pour tous les types de béton avec entraîneurs d'air.

Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes. Cette eau interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état (figure. I-3)

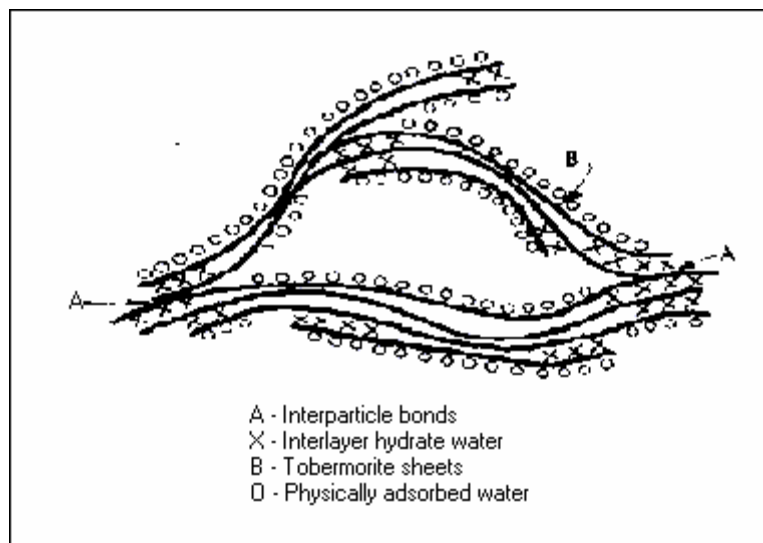
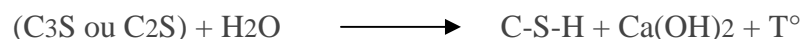


Figure I-3 : Représentation schématique des feuillets de C-S-H
[Mailvaganam N.P.1991, Repair and protection of
concrete structures, CRC Press][13]

- L'eau combinée chimiquement : Cette eau fait partie intégrante des C-S-H, elle représente environ 23% du poids de ciment qui a réagi. Elle est très stable et on ne peut l'évaporer qu'en décomposant le C-S-H à haute température.
- L'eau zéolitique : Cette eau n'est pas chimiquement combinée dans la structure des C-S-H, mais elle est retenue entre les feuillettes de C-S-H par des liens hydrogène. Pour l'évaporer il faut que le taux d'humidité s'abaisse au-dessous de 30%, ce qui provoque un très fort retrait de la pâte.
- L'eau adsorbée : Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides (surtout sur les parois des capillaires ou des pores de gel). On croit qu'une couche d'environ 6 molécules d'eau (15Å) peut être retenue par des liens hydrogène. Une grande partie de l'eau adsorbée peut être retirée si le taux d'humidité est inférieur à 50%. Cette perte d'eau est en grande partie responsable du retrait de la pâte ou du béton.
- L'eau des capillaires : Il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment. Selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface [14].
 - Eau libre : L'eau libre est contenue dans les plus gros capillaires (> 0.05µm). Son départ ne cause pas de changement de volume important (retrait).
 - Non libre : Cette eau est contenue dans les plus petits capillaires (0.05µm à 0.005µm). Elle y est retenue par des tensions capillaires. Il faut abaisser le taux d'humidité en dessous de 90% pour qu'elle commence à s'évaporer. Elle a beaucoup d'influence sur le retrait de la pâte.

I.2.2- Structure de la pâte de ciment hydraté :

La pâte de ciment est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment (la réaction d'hydratation). C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps. C'est surtout l'hydratation du C₃S, et du C₂S qui participent le plus au développement de la résistance en produisant des C-S-H suivant la réaction d'hydratation suivante :



La pâte de ciment hydraté est formée par

- les hydrates (C-S-H, Ca(OH)₂, sulfoaluminates)
- des grains de ciment non hydraté
- des espaces capillaires
- des bulles d'air.

La figure I-4 montre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydratée. On y retrouve :

- des grains de ciment (10 à 80 µm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates.
- des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau.
- des hydrates (surtout des C-S-H et de la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment.
- les pores de gel ne sont pas représentés (trop petits) et les bulles d'air sont trop grandes pour apparaître sur cette figure (I-4).

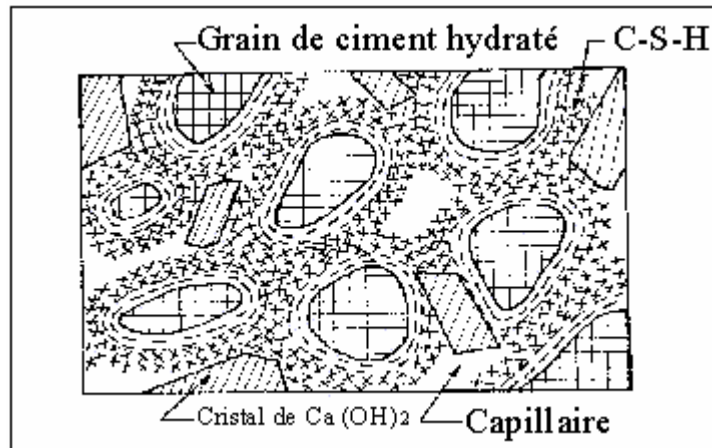


Figure I-4 : Représentation schématique de la Pâte de ciment hydraté
 [Pigeon 1981 compositions et hydratation du ciment portland,
 Séminaire progrès dans le domaine du béton, Québec, septembre 1981, p. 36-72]. [15]

I.2.2.1- Les principaux hydrates :

Les hydrates comprennent :

- les silicates de calcium hydratés (C-S-H)
- les aluminates hydratés
- la chaux hydratée (portlandite)
- de l'eau adsorbée sur certains cristaux
- des impuretés.

I.2.2.1.1- Les C-S-H :

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

Il a une structure en feuillet, formée de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique des C-S-H est due, en partie, aux forces de Vander Walls entre les particules colloïdales des C-S-H (figure I-5)

- Le pH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13). A des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca^{2+} . Les C-S-H subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.
- Le gel de C-S-H est poreux.
- les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillets.
- Ils sont très petits (20Å à 30Å)
- La porosité du gel de C-S-H représente environ 28% du volume total du gel.
- L'eau des pores de gel n'est pas libre car elle est fortement retenue sur les feuillets par des forces de surface. Puisque les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.

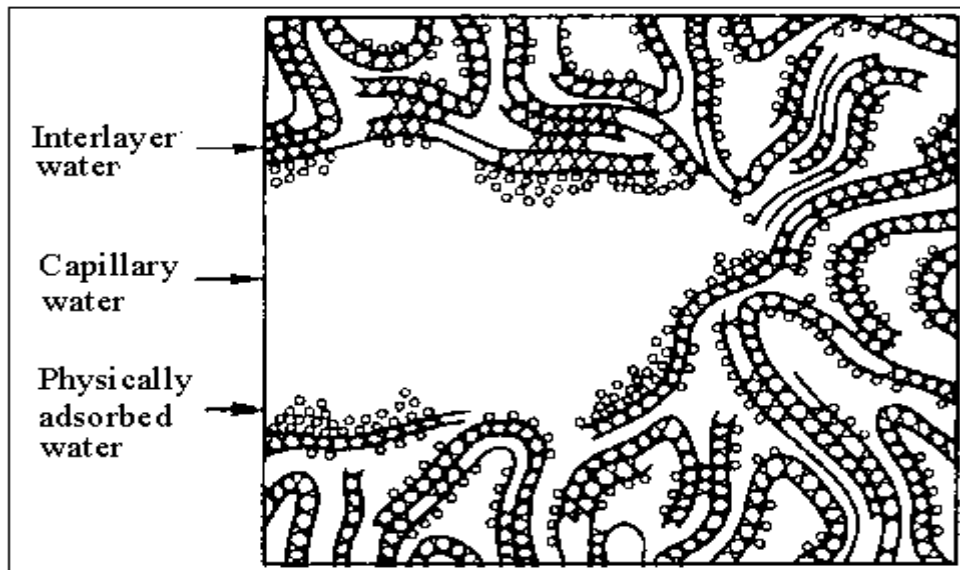


Figure I-5 : Représentation schématique du C-S-H et de l'état de l'eau qui y est associé.
 [Metha, 1986 concrete structure, properties, and materials, Prentice - Hall, 450 p.][6].

I.2.2.1.2- La chaux hydratée (CH ou portlandite) :

Elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique (la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition du béton. Elle est produite à la suite de l'hydratation de C₃S et C₂S. Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le PH devient inférieur à environ de 12,5. Elle participe peu au développement de la résistance du béton

I.2.2.1.3- Les aluminates hydratés :

Ils occupent de 15 à 20% du volume solide de la pâte de ciment hydraté. On les retrouve généralement sous deux formes :

- Ettringite (tri sulfoaluminates) aiguilles prismatiques
- Mono Sulfoaluminates (plaquette hexagonales).

I.2.2.2- Porosité de la pâte de ciment :

En cours d'hydratation, le matériau qui se présente initialement à l'état pâteux (grains de ciment plus ou moins floclés dans l'eau) se transforme progressivement en un solide poreux. La porosité est classiquement décrite en deux familles [16] :

- La porosité capillaire : en cours d'hydratation on constate un accroissement du volume apparent des hydrates par rapport au volume des anhydres (1cm³ d'anhydres produit environ 2.13 cm³ d'hydrates). Les pores capillaires sont les reliquats des espaces intergranulaires initiaux non emplis par les hydrates.
- La porosité des hydrates : les hydrates présentent une porosité interne due principalement aux C-S-H. Elle est approximativement constante quel que soit le degré d'hydratation (environ 28%).

La porosité capillaire dépend de l'avancement des réactions d'hydratation et de la porosité initiale de la pâte de ciment c'est à dire du rapport E/C des masses de ciment et d'eau

de gâchage. Le modèle d'hydratation de POWERS [16] décrit, pour des ciments de type CEM I, l'évolution des volumes au sein d'une pâte de ciment en cours d'hydratation

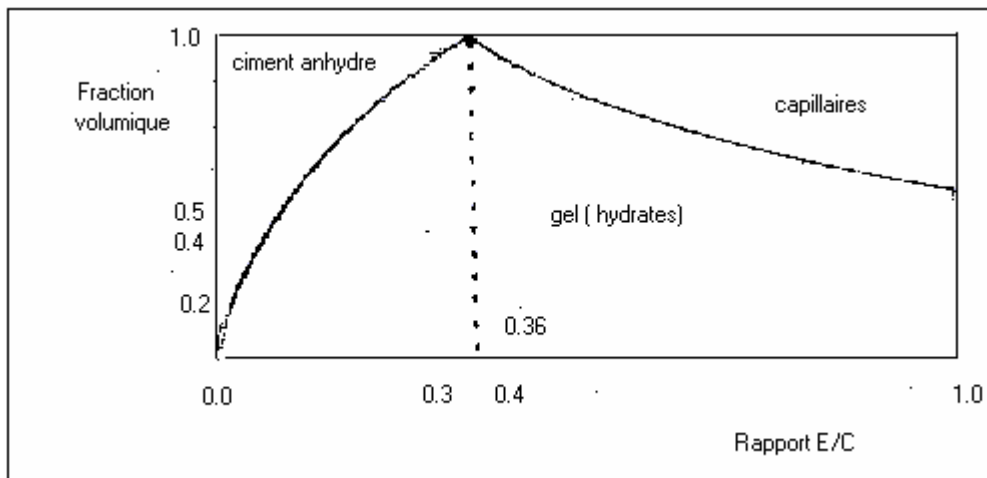


Figure I-6 : Composition volumique d'une pâte de ciment portland totalement hydratée [17].

I.2.2.3- Distribution porosimétrique de la pâte de ciment hydraté :

La structure porosimétrique des pâtes de ciment est étudiée le plus souvent au moyen du porosimètre à mercure. La taille des pores est très variable au sein des pâtes de ciment et diverses terminologies sont utilisées pour désigner les pores. Il convient de remarquer que la structure poreuse peut être schématiquement décrite avec les deux familles présentées à la partie précédente : les pores capillaires, les plus gros et les pores des hydrates de très petites tailles [16]. D'autres espaces poreux dus à l'air entraîné au moment du malaxage existent : ce sont des pores peu nombreux, isolés et de grande dimension.

La figure I-7 représente la distribution porosimétrique de pâte de ciment CPA-CEM I en fonction du rapport E/C

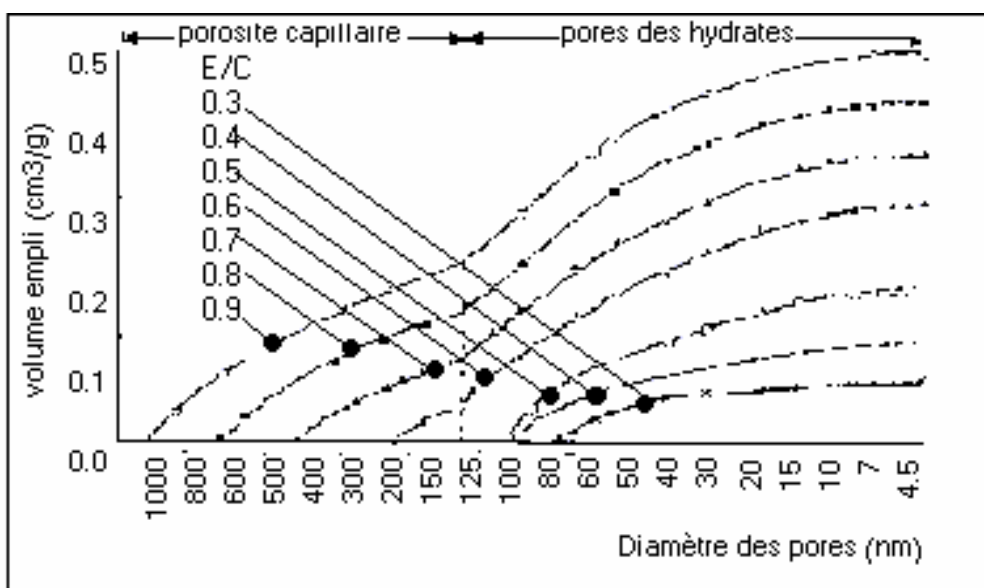


Figure I-7 : Influence du rapport E/C sur la structure porosimétrique (28 jours) [17]

L'hydratation progressive de ciment au cours du temps se traduit par une diminution de la porosité capillaire et de la taille des pores (figure I-7) au jeune âge (28 jours), un «mode poreux» centré vers 15 μm est observé pour tous les rapport E/C et un second mode poreux centré vers 200 à 300 nm apparaît pour les rapport E/C supérieurs à 0.35. [14].

A l'âge de 28 jours, la porosité est d'autant plus faible que le rapport E/C est petit. Cette même figure montre aussi que la dimension des pores les plus gros diminue avec le rapport E/C. La distribution porosimétrique fournie par le porosimètre à mercure indique la distribution des «cols d'accès» aux pores, ainsi des pores capillaires isolés seront comptabilisés comme des pores de dimension égale à celle des hydrates qui segmentent la porosité capillaire. Du point de vue des propriétés de transfert et de la durabilité, la continuité ou la segmentation du réseau capillaire sont d'une importance considérable. La figure I-8 donne la valeur du degré d'hydratation minimum entraînant la segmentation des capillaires. On voit que pour des rapports E/C supérieurs à 0.70, les pores capillaires seront toujours interconnectés.

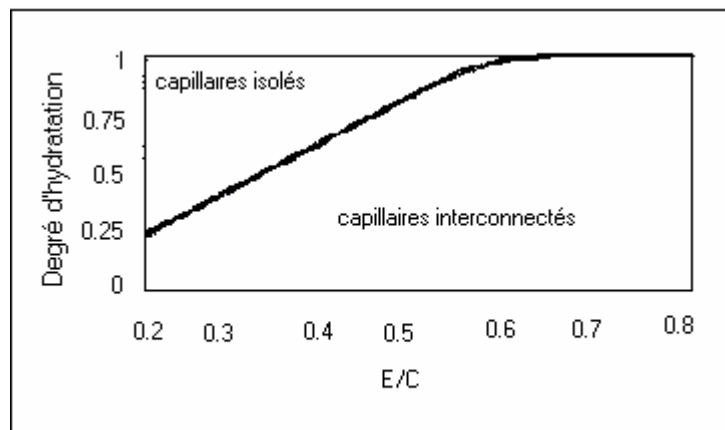


Figure I-8 : Segmentation de la porosité capillaire

L'interconnexion de la porosité capillaire a été étudiée par Bentz et Garboczi [18] : La figure I-9 présente les résultats :

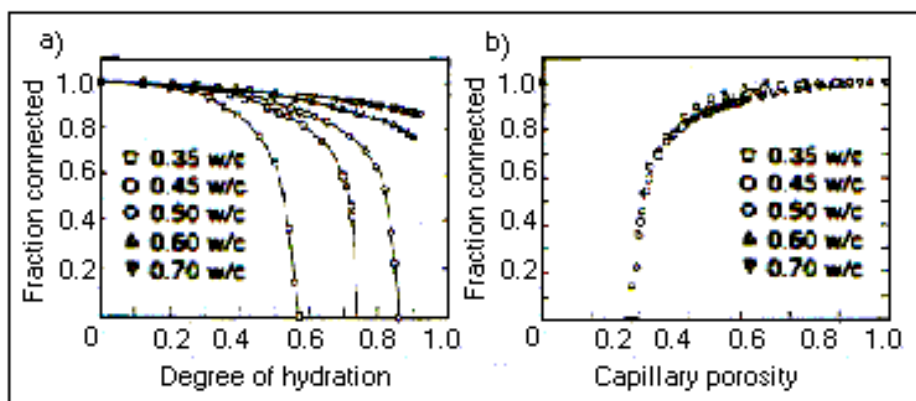


Figure I-9 : Interconnexion de la porosité capillaire

Lorsque la porosité capillaire est inférieure à 20%, les pores correspondant sont isolés et ceci quel que soit le rapport E/C de gâchage. En deçà de ce seuil les pores capillaires

n'étant plus connectés, les transferts au travers du matériau sont plus difficiles. La figure I-9 montre que ce seuil peut être atteint pour différents degrés d'hydratation avec des rapports $E/C \leq 0.50$. [16]

I.2.2.4- Rôle des additions minérales :

Les fumées de silice sont des particules de dimension moyenne de l'ordre de $0.2 \mu\text{m}$. leur emploi conjoint avec un fluidifiant permet de réduire considérablement la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance donnée. La porosité est ainsi fortement réduite. Les fumées de silice réduisent aussi la dimension des pores les plus gros (pores capillaires). En plus de cet effet géométrique, les fumées de silice ont un effet chimique qui modifie la structure des C-S-H néoformés par réaction pouzzolanique : à long terme la taille des pores des C-S-H diminue (figure. I-10).

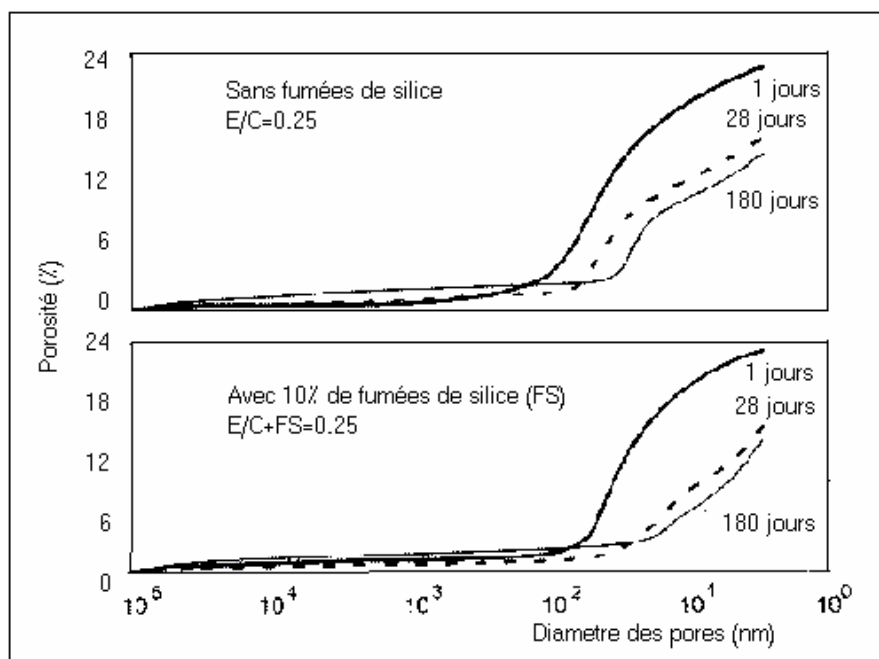


Figure I-10 : Influence de fumées de silice en présence de fluidifiant sur la structure poreuse des pâtes de ciment [19]

Les cendres volantes et le laitier entraînent un accroissement de la porosité et de la taille aux premiers âges à cause d'un ralentissement des réactions d'hydratations (fig. I-11). A plus long terme, sous l'effet de la réactivité hydraulique du laitier ou de l'activité pouzzolanique des cendres, les effets de l'hydratation du clinker sont renforcés ce qui conduit à une porosité du même ordre mais à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats positifs ne sont obtenus que si l'humidité de conservation est suffisamment élevée pour permettre la réaction des additions minérales

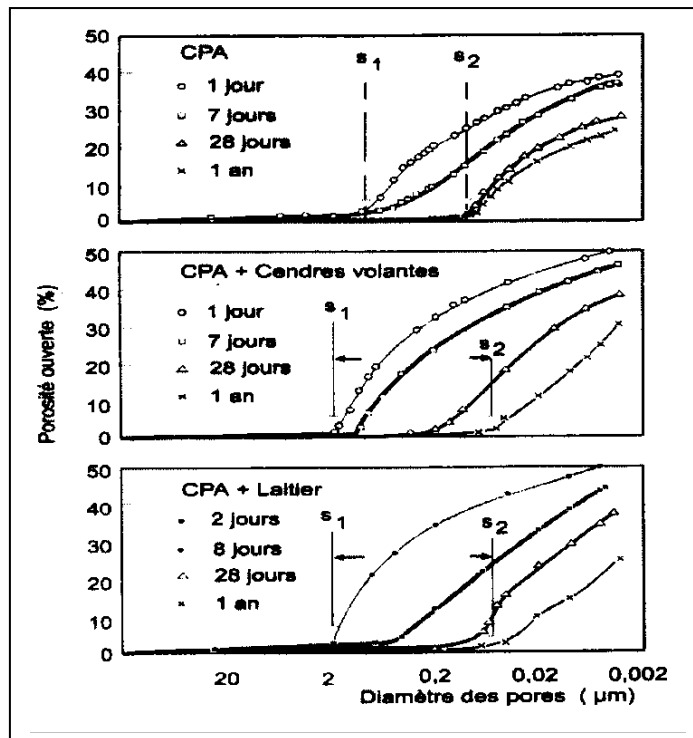


Figure I-11 : Influence des additions minérales sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [20].

I. 2.3- La structure poreuse des mortiers et bétons :

Les mortiers et bétons sont généralement modélisés comme matériaux composites pour expliquer leur comportement physique ou chimique. Les granulats associés à la pâte de ciment ont couramment une porosité inférieure à celle de la pâte de ciment, sauf dans le cas des bétons de «granulats légers».

Une modélisation bi-phasique n'est généralement pas pertinente car on ne peut pas considérer la pâte de ciment comme homogène [16]. Localement, la microstructure de la pâte de ciment peut être modifiée au voisinage des granulats. Cette zone perturbée est appelée auréole de transition ou interfacial transition zone (ITZ).

Cette auréole de transition se forme généralement au moment de la mise en œuvre du matériau à l'état frais, les granulats modifiant localement l'arrangement des grains de ciment par un effet de paroi [21] et par conséquent la distribution de l'eau dans le mélange. On peut ainsi avoir localement de profondes modifications du rapport E/C.

A l'état durci l'auréole de transition est une zone où la porosité est plus élevée et la taille des pores est plus importante que dans le reste de la pâte plus distante des granulats, du fait de l'accumulation d'eau au contact des granulats.

La porosité est ainsi redistribuée dans l'espace par rapport à celle des pâtes pures, les zones proches des granulats sont plus poreuses et les zones éloignées moins poreuses. Ceci se traduit par une modification de la distribution de la taille des pores comme le montre la (figure I-12) [22].

Une nouvelle famille de pores dont la taille est de l'ordre de celle des pores capillaires apparaît. La porosimétrie au mercure ne rend compte de cette modification qu'à la condition que les auréoles de transition entourant les granulats soient interconnectées ce qui dépend de la fraction volumique des grains ainsi que de l'épaisseur des auréoles de transition. Les conditions d'interconnexion sont illustrées à la figure (I-13).

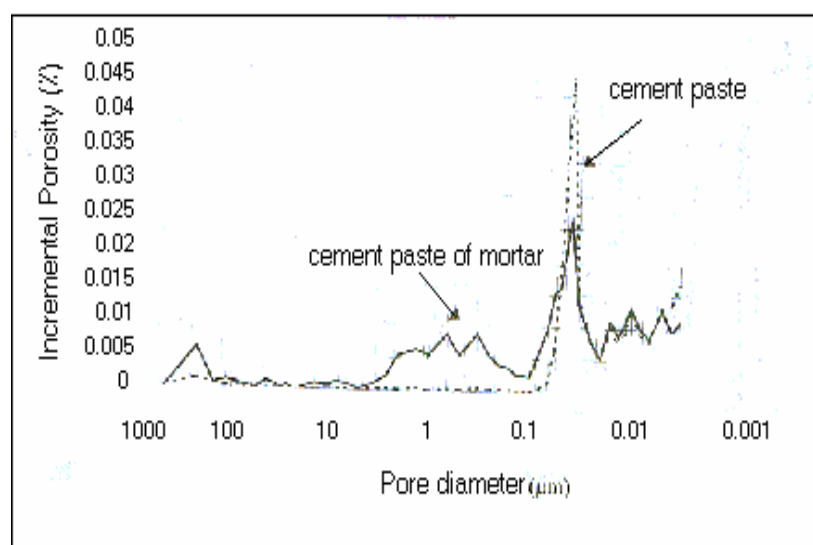


Figure I-12 : Structure poreuse d'une pâte de ciment et d'un mortier âgés de trois mois (E/C=0.4). le volume des pores du mortier est rapporté au volume de pâte.[22]

I.2.4- Importance de la peau du béton :

Le béton est trop souvent perçu comme un matériau homogène et isotrope. Quelques concepteurs vont même jusqu'à réduire le béton uniquement à sa résistance à la compression à 28 jours. Dans de très rare cas, et pas à n'importe quelle échelle, un béton, quel qu'il soit, peut être considéré comme un matériau homogène. Les concepteurs admettent une certaine hétérogénéité au béton seulement dans le cas d'une différence d'adhérence entre l'acier et le béton selon la position des armatures par rapport à la direction de la coulée, de façon à tenir compte du ressuage interne et des effets qu'il produit sur l'adhérence. Alors que, à l'échelle du mètre ou du décimètre, le béton peut être considéré comme un matériau homogène, à l'échelle de centimètre, il est définitivement hétérogène.

Pendant très longtemps, le béton a été considéré comme un matériau qui ne comportait que deux phases, de la pâte de ciment hydraté et des granulats, dont les propriétés étaient essentiellement gouvernées par le rapport eau/liant de la pâte. Ce modèle simple était accepté universellement jusqu'à ce que l'on réalise que la zone de contact entre les granulats et la pâte de ciment constituait une zone spéciale ayant des propriétés très différentes de la pâte de ciment hydraté, que l'on retrouve dans la masse du béton. Cette zone spéciale appelée zone de transition, est très importante du point de vue durabilité parce qu'elle est très faible que la pâte de ciment hydraté que l'on retrouve dans la masse de béton.

Quand la zone de transition durcit, le véritable rapport eau/liant y est plus élevé que celui du reste de la pâte, et aussi que celui qui est calculé en devisant simplement la quantité d'eau par la quantité de liant utilisée lors de la fabrication du béton. Cette valeur plus élevée du rapport eau/liant autour des gros granulats est causée par une forme de ressuage interne. Les granulats, qui peuvent être considérés comme des inclusions rigides non absorbantes dans la pâte fraîche, piègent de l'eau autour d'eux.

Lors de la vibration du béton, les gros granulats se mettent à vibrer et compactent le mortier autour d'eux jusqu'à en extraire une certaine quantité d'eau. Une partie de cette eau ainsi extraite du mortier ressuée à la surface du béton, mais une autre partie reste piégée dans le mortier plus dense et crée ainsi une zone de rapport eau/ciment plus élevé autour du gros granulats. Des observations au microscope électronique ont montré que des cristaux de portlandite orientés, de grandes aiguilles d'ettringite et une très forte porosité dans cette zone de transition de plus en plus, on considère donc que le béton est en fait un matériau à trois phases.

La présence d'une telle zone de faiblesse autour des gros granulats peut expliquer les relations que l'on développe entre les différentes propriétés mécaniques du béton explique aussi les mécanismes de détérioration que l'on observe dans les bétons exposés à des agents agressifs. Pendant un certain temps [3].

I.3- La perméabilité à l'eau du béton :

I.3-1- La perméabilité et la diffusivité :

Les transferts de matière au sein d'un milieu poreux peuvent se réaliser suivant deux mécanismes distincts, dans un béton durci ces transferts s'établissent par l'intermédiaire du réseau poreux, mais également par le réseau de fissures qui résulte du fonctionnement normal des structures en béton armé ou d'éventuelles causes accidentelles. Wang et al, [5], ont montré que la fissuration peut avoir une grande influence sur la perméabilité des bétons.

La diffusion consiste en un transport moléculaire sous gradient de concentration, c'est le mode prépondérant de transport des gaz dans les bétons. On peut citer pour exemple la dessiccation d'un béton partiellement séché, qui est un transfert de vapeur d'eau dans l'air contenu par les pores, et la pénétration de gaz agressifs, comme le dioxyde de carbone. Ce processus est décrit par la première et la deuxième loi de Fick, et on définit la diffusivité D d'une espèce dans un milieu poreux [23].

La perméabilité quantifie quant à elle l'aptitude d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide. Elle caractérise un écoulement visqueux sous gradient de pression. Cet écoulement peut se produire dans un béton de barrage par exemple, ou encore dans un béton de fondation par Ascension capillaire due à une variation du niveau de nappe. Ce processus est décrit par la loi phénoménologique de Darcy.

La perméabilité d'un matériau dépend bien sur de sa porosité, c'est à dire du volume des pores par unité de volume, mais aussi de la taille des pores et de la distribution de leur taille ou répartition porosimétrique, il existe des corrélations, théoriques et expérimentales entre les paramètres géométriques du réseau poreux, et la perméabilité. Citons pour exemple l'approche de Hugues [24], qui considère un écoulement visqueux dans un réseau 3D de pores cylindriques, et qui établit la relation :

$$V = \frac{P}{32n^2\mu} r^2 gradH$$

Ou : P : porosité du matériau
 n^2 : facteur de tortuosité
 r : rayon moyen des pores (m)

Se reporter au paragraphe sur la loi de darcy pour la signification des autres termes.

Toutefois, la réalité est bien plus complexe, et Powers et al. [4] ont montré que sous certaines conditions de composition et de cure, la perméabilité des bétons n'est plus contrôlée par la porosité capillaire, dont le réseau n'est plus interconnecté, mais par celle des hydrates, ce qui conduit à une perméabilité du matériau beaucoup plus faible. De plus la perméabilité d'une pâte de ciment, d'un mortier et d'un béton est très différente, car l'interface pâte granulat joue un grand rôle dans les mécanismes de transport. Young [5] montre par exemple que la perméabilité d'une pâte de ciment est de plus de deux ordres de grandeur plus faible que celle d'un béton.

I.3.2- Perméabilité et géométrie des pores :

Il n'existe pas de relation simple entre la porosité des bétons et leur perméabilité. D'une manière générale, on peut dire que l'ensemble des caractéristiques de la structure poreuse détermine la perméabilité : forme, taille et interconnexion des pores.

Divers modèles visant à relier la perméabilité d'un matériau poreux et les caractéristiques de sa microstructures ont été proposés. Ils visent tous à dégager l'influence de deux paramètres essentiels : la taille des vides et leur interconnexion. Dans le cas des matériaux consolidés tels que les bétons deux approches paraissent intéressantes : la modélisation statistique et les modèles utilisant les données classiques de la pométrie au mercure [25].

1.3.2.1- Le modèle statistique de Diennes [26] :

Les pores sont assimilés à des tubes cylindriques dans lesquels le fluide s'écoule en régime laminaire. Une autre modélisation concerne les matériaux fissurés : les fissures sont modélisées par des disques minces. Les tubes ou fissures sont répartis uniformément dans l'espace et leurs caractéristiques géométriques sont des variables statistiques. En introduisant la porosité, la théorie de la percolation permet de calculer la perméabilité. Pour les matériaux poreux, K est relié au rayon moyen, r , des tubes modèles :

$$K = \frac{fr^2 p}{32}$$

Pour les matériaux fissurés, K est relié à l'ouverture moyenne, w , des fissures :

$$K = \frac{2}{15} (fw^2 p)$$

Dans ces deux relations, f , représente la fraction des pores ou fissures interconnectées.

1.3.2-2 . Le modèle de Katz-Thomson [27] :

La modélisation proposée par ces deux auteurs relie la perméabilité à un seuil de pénétration déterminé dans l'essai de pométrie au mercure. Ce seuil correspond au point d'inflexion (diamètre D_c) de la courbe de pénétration de mercure (figure.I-13). La perméabilité est calculée selon :

$$K = \frac{D_c^2}{226F}$$

Ou : F : Est le «facteur de formation», rapport entre la conductivité du béton saturé et celle de la solution interstitielle.

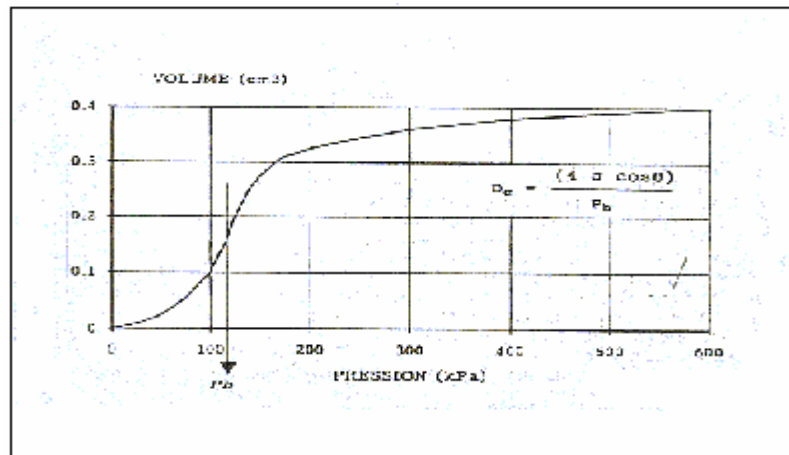


Figure I-13 : définition du seuil D_c dans la théorie de Katz-Thomson

I.3.3- les paramètres d'influence sur la perméabilité du béton :

I.3.3.1- Influence des caractéristiques du réseau capillaire :

La perméabilité du béton est celle de la pâte de ciment hydraté est liée aux caractéristiques du réseau de pores capillaires. Les principales caractéristiques du réseau de pores capillaires qui influencent la perméabilité sont :

- la porosité
- la tortuosité et la connectivité
- le degré de saturation

I.3.3.1.1- la porosité :

C'est le rapport entre le volume de vides et le volume total d'un corps donné. La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide (fig. I-14).

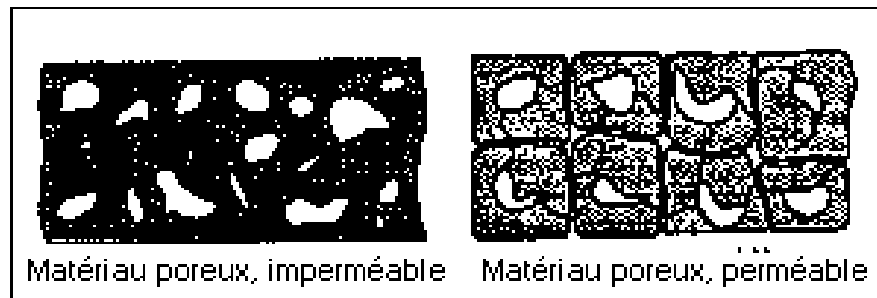


Figure I-14 : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité.
[Nehdi, M. 1993 Mécanismes de transfert de masse dans le béton comme critère de durabilité : Application in situ aux bétons de barrage. Thèse de maîtrise, département de génie civil, université de Sherbrooke, 127p.] [28]

I.3.3.1.2- La tortuosité ou la connectivité :

La connectivité est un paramètre topologique qui définit le degré avec lequel une structure poreuse est connectée. La tortuosité T_0 est définie comme la longueur moyenne relative du parcours d'une particule de fluide d'une extrémité à l'autre d'un corps poreux.

$$T_0 = \left(\frac{L}{L_0}\right)^2$$

Avec L longueur moyenne du parcours
 L_0 longueur de l'échantillon

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

Le degré d'interconnexion des pores dépend du rapport E/C et du degré d'avancement de l'hydratation.

A mesure que progresse la réaction entre l'eau et le ciment, des hydrates se forment à la surface des grains de ciment ou précipitent dans les espaces intergranulaires. Après un certains temps, tous les espaces entre les grains seront segmentés par une paroi d'hydrates (la porosité capillaire devient discontinue), ce qui produit une chute brutale de la perméabilité.

Le tableau (I-1) présente la durée de l'hydratation nécessaire pour produire un réseau de pores discontinu, en fonction du rapport E/C de la pâte.

Rapport E/C	Durée de l'hydratation
0.40	3 jours
0.45	7 jours
0.50	14 jours
0.60	6 mois
0.70	1 an
>0.70	Impossible

Tableau I-1 : Relation entre le rapport E/C et le temps de segmentation du réseau capillaire des pâtes de ciment portland, [Powers, T.C. 1959 Capillary continuity or discontinuity in cement paste, Journal of the PCA research and development laboratories, Vol. 1, N° 2, p38-48][29]

- Plus le rapport E/C est faible moins il est nécessaire de former des hydrates pour segmenter la porosité capillaire (fig. I-15)

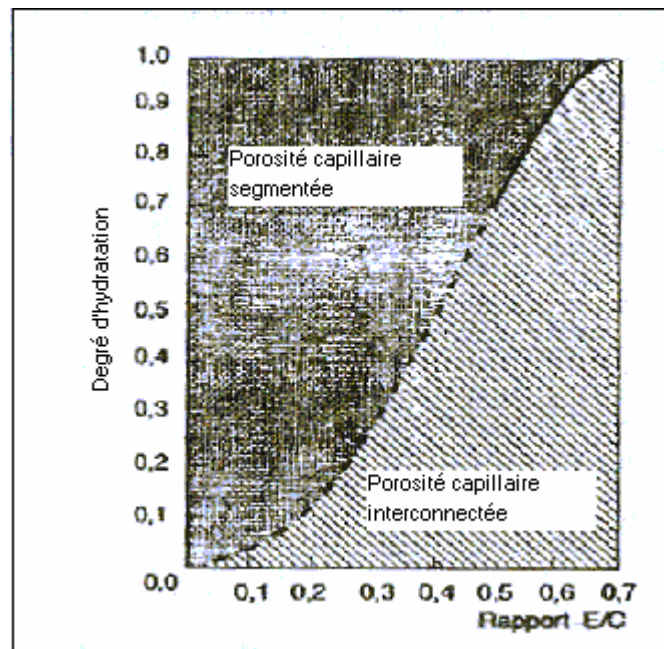


Figure I-15 : Degré d'hydratation nécessaire à l'interruption de la continuité capillaire. [Powers, T.C. 1959 Capillary continuity or discontinuity in cement paste, Journal of the PCA research and development laboratories, Vol. 1, N° 2, p38-48]. [29]

I.3.3.1.3- le degré de saturation :

Le degré de saturation du réseau de pores capillaires exerce une grande influence sur les perméabilités du béton (figure. I-16).

- Un réseau de pores capillaires faiblement saturé (stade a, b et c) facilite le passage des gaz par diffusion en phase gazeuse. (Diffusion de vapeur, O₂ ou CO₂). L'écoulement de la phase liquide et la diffusion ionique sont très lents.
- Plus le degré de saturation du réseau de pores s'accroît, plus le passage des gaz est difficile car, en certains endroits, la diffusion doit se faire à travers la phase liquide. Un réseau de pores fortement saturé (stade e) devient pratiquement imperméable aux gaz.
- Dans les réseaux de pores fortement saturés (stade e, f et g) l'écoulement de la phase liquide (eau) devient beaucoup plus facile et la diffusion des ions en solution est beaucoup plus rapide en raison de la grande disponibilité de la phase liquide.

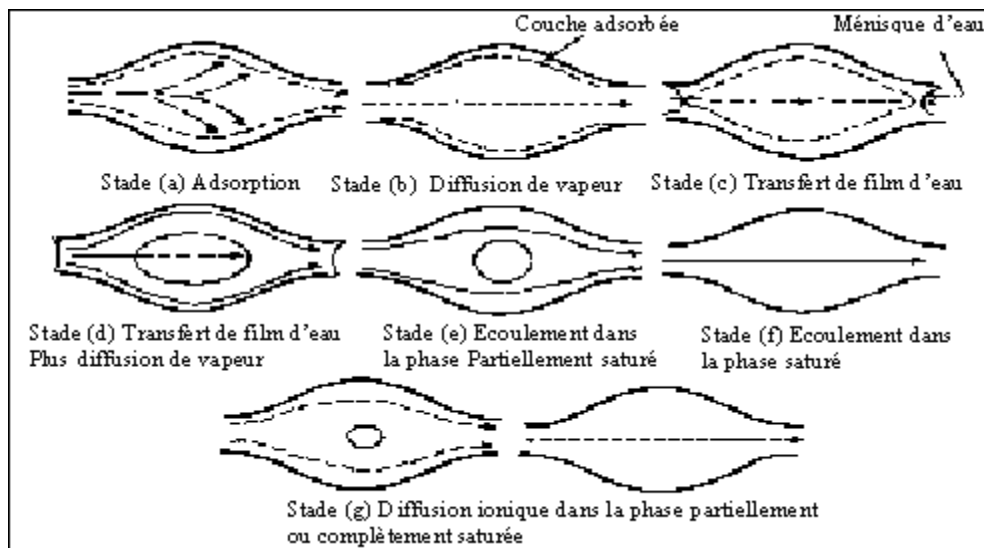


Figure I-16 : Modèles idéalisés du mouvement de l'eau et des ions dans les pores du béton.

[Report of a Concrete Society Working Party, 1988, permeability testing of site concrete: a review of methods and experience, Concrete society technical report no 31, London, 131 p.] [30]

I.3.3.2-Influence de la résistance mécanique, du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau :

Il est généralement admis que les propriétés de transferts couramment associés à la durabilité des bétons augmentent avec leur résistance mécanique. En ce qui concerne la perméabilité, les choses ne sont pas aussi claires ou univoques.

Les résultats regroupés par Lawrence [31] (figure I-17) pour différents bétons en témoignent. La tendance, notée par Powers [32] (figure I-18), de la perméabilité à l'eau à augmenter avec le rapport E/C est confirmée. Toutefois, la dispersion de ces résultats illustre

les précautions indiquées en préambule concernant les mesures de perméabilité. La relation entre le rapport E/C et la perméabilité n'est donc pas une relation univoque.

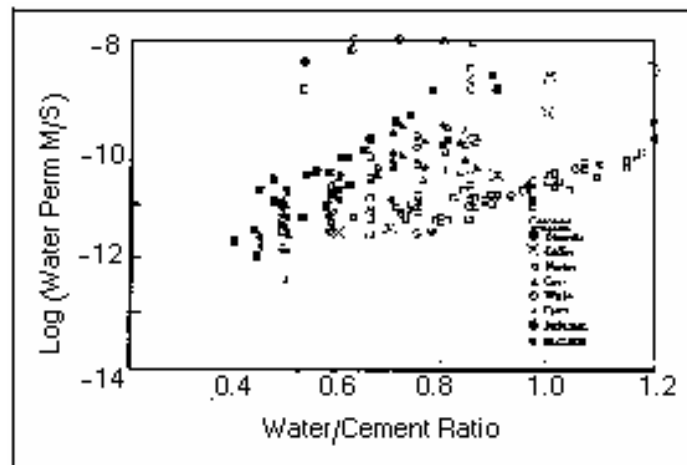


Figure I-17 : Perméabilité à l'eau de différents bétons [31]

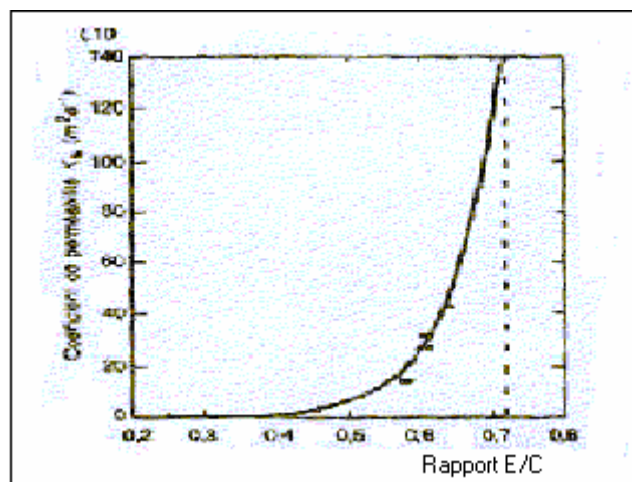


Figure I-18 : variation de la perméabilité à l'eau en fonction de rapport E/C [32]

I.3.3.3- Influence de la nature du liant et des additions minérales :

Les additions minérales (cendres, fumées de silice, pouzzolanes) jouent un rôle important dans le développement de la microstructure des matériaux cimentaires. On peut donc s'attendre à une influence significative de ce type de paramètre de formulation sur la perméabilité des matériaux.

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Cet effet s'explique, une fois de plus, par le fractionnement de la porosité capillaire. Il y a des études qui ont été faites, ils ont trouvés que le remplacement 10% du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton fabriqué avec un rapport E/C de 0.45 [14].

Les cendres volantes n'ont pas toujours un effet positif sur la perméabilité à l'eau du béton. Après 28 jours de mûrissement, les cendres volantes (20% à 30%) provoquent généralement une augmentation de la perméabilité à l'eau (par rapport à un béton de référence). Cependant, à plus long terme (quelques mois), la perméabilité des bétons avec les cendres volantes devient généralement plus faible que celle du béton de référence.

I.3.3.4- Influence des granulats :

La microstructure des matériaux cimentaires est fortement influencée par la présence de particules (granulats) dans les bétons et mortiers. La répartition en taille des granulats s'avère être un paramètre qui va influencer les propriétés de transferts du matériau. Outre le comblement d'une partie de la porosité par les particules les plus fines, la création d'une interface pâte-granulats (appelée auréole de transition) de porosité plus élevée que le reste de la pâte [33].

Très peu d'études ont été consacrées à l'influence de la nature des granulats sur la perméabilité. Quelques essais assez anciens ont été réalisés par Figg [34]. Il a étudié l'évolution de la perméabilité à l'eau et à l'air de bétons en fonction du rapport E/C pour trois granulats de natures différentes (des silex, des calcaires et du basaltes). Les résultats montrent des différences de comportement assez faibles entre calcaires et silex et une baisse de perméabilité dans le cas de basaltes.

Carcasses et al [35] ont analysé l'influence de la fraction volumique de sable sur la perméabilité à l'air des mortiers de rapport E/C=0.50 (figure I-19). Dans le cas des mortiers, on aurait aussi une diminution de la perméabilité avec l'augmentation de la fraction de sable dans le matériau. L'effet lié à une perméabilité des granulats inférieure à celle de la pâte serait donc prépondérant par rapport à celle, inverse, lié à l'auréole de transition. D'autres auteurs rapportent toutefois une évolution inverse de celle-ci [36].

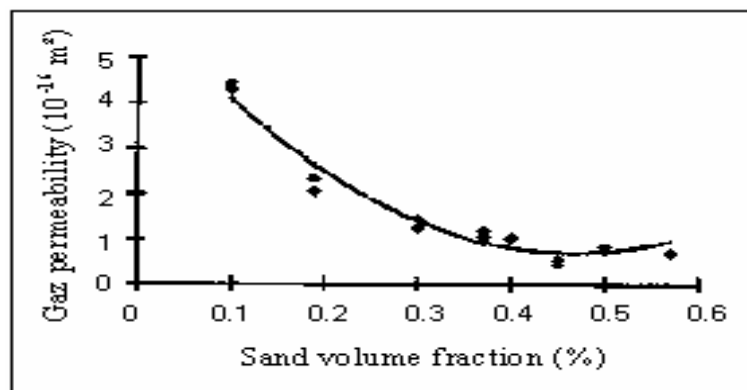


Figure I-19 : Influence de la teneur en sable sur la perméabilité à l'air de mortiers [35].

I.3.3.4.1- La zone d'interface pâte-granulats :

Pour un même rapport E/C, la perméabilité à l'eau du mortier ou du béton est généralement supérieure à celle de la pâte en raison de la zone d'interface pâte granulats (figure. I-27). La zone d'interface pâte granulats est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Elle présente souvent une plus grande densité de microfissures. Cette zone offre donc un chemin préférentiel pour le passage de l'eau, des gaz ou des ions.

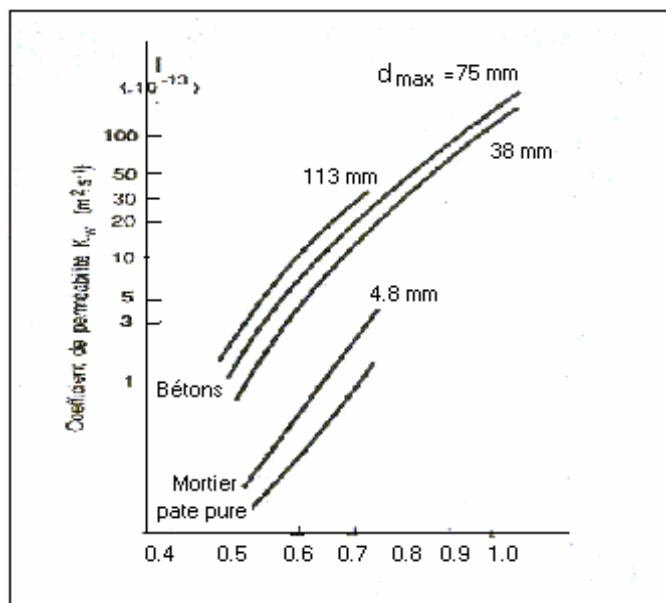


Figure I-20 : Influence de E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de Perméabilité à l'eau des bétons.

[Concrete Manuel, 8th Edition, U.S. Bureau of Reclamation, 1975, p. 37.][36]

I.3.3.5- Influence de la cure :

Parmi les paramètres contrôlant la perméabilité, le taux de saturation des matériaux, de même que leur microstructure, jouent un rôle important. Ces deux paramètres peuvent être partiellement contrôlés et en tout cas modifiés lors de la cure du liant.

Afin de limiter les effets d'une dessiccation, la solution consiste à placer le matériau, au moins pendant les premiers temps qui suivent sa mise en place, dans un milieu à forte hygrométrie afin d'éviter les départs d'eau.

La durée de cure initiale influence fortement la perméabilité à l'eau du béton, l'effet est bien visible sur la figure (I-21) où on voit bien que qu'une période de cure plus longue diminue toujours très significativement la perméabilité à l'eau. L'influence de la durée de cure devient de moins en moins importante à mesure que le rapport E/C diminue.

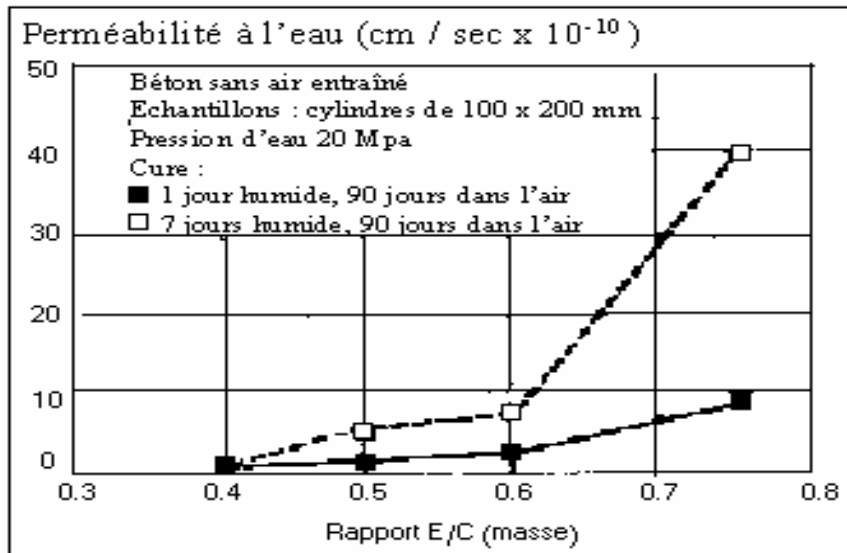


Figure I-21 : Relation entre la perméabilité à l'eau, le rapport E/C et la durée de la cure initiale. [Tiré de Whiting, D. 1988 Permeability of selected concretes, Permeability of concrete ACI SP-108, p. 195-222.][37]

Les mesures de perméabilité à l'air effectuées par Yssorche [38] ont été réalisées après dessiccation complète. Les différents bétons étudiés ont subi deux durées de cure humide : 1 jours ou 28 jours, préalablement à la dessiccation et les mesures de perméabilité à l'air ont été réalisées à l'âge de 28 jours (figure. I-22).

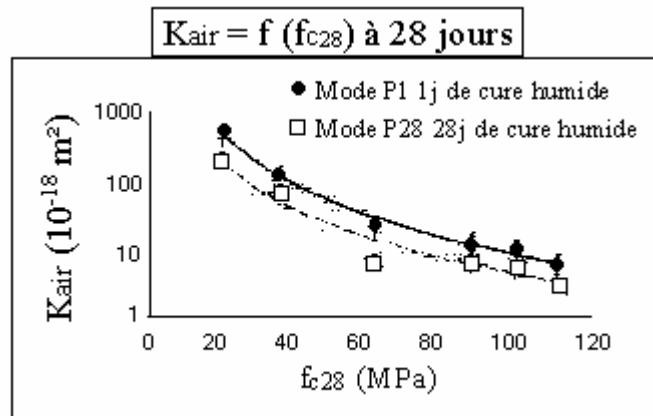


Figure I-22 : variation de la perméabilité à l'air en fonction de la résistance mécanique en compression à 28 jours : influence de la durée de cure humide [38]

Ces résultats montrent l'influence bénéfique d'une durée de cure humide initiale prolongée de 1 à 28 jours sur la perméabilité à l'air des bétons. Cette influence est toutefois d'autant plus significative que la résistance moyenne en compression des bétons diminue.

Dhir et al [39] confirment, que l'augmentation de la durée de cure humide initiale se traduit par une diminution de la perméabilité mais que ce bénéfice est beaucoup moins important pour les bétons préparés avec de faible dosage en eau (figure. I-23).

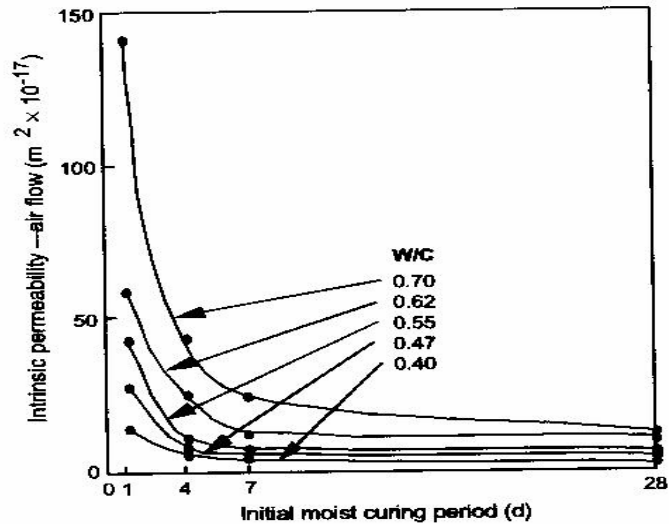


Figure I-23 : Influence de la durée de cure humide initiale sur la perméabilité à l'air de bétons, mesurée à 28 jours et gâchés à différent rapport E/C [39]

I.3.3.6- Influence de l'âge :

De la même manière que les conditions de cure, on peut concevoir que l'âge des matériaux peut avoir une influence sur le développement et l'évolution de leurs propriétés. Pour la perméabilité ceci est surtout sensible sur les périodes courtes (hors prise en compte de dégradation du matériaux). Ainsi, les résultats obtenus par Yssorche [38] montrent qu'il n'y a plus de variation significative de la perméabilité à l'air entre 28 jours, 1 an et 3 ans (figure I 24).

Lorsque les conditions de conservation des échantillons empêchent tout échange avec l'extérieur. Cette observation est à pondérer par le fait qu'il s'agit de ciment pour lequel l'hydratation est relativement rapide. Dans le cas de ciments à hydratation très lente (comme les ciments aux laitiers) il est probable qu'une évolution serait relevée à plus long terme.

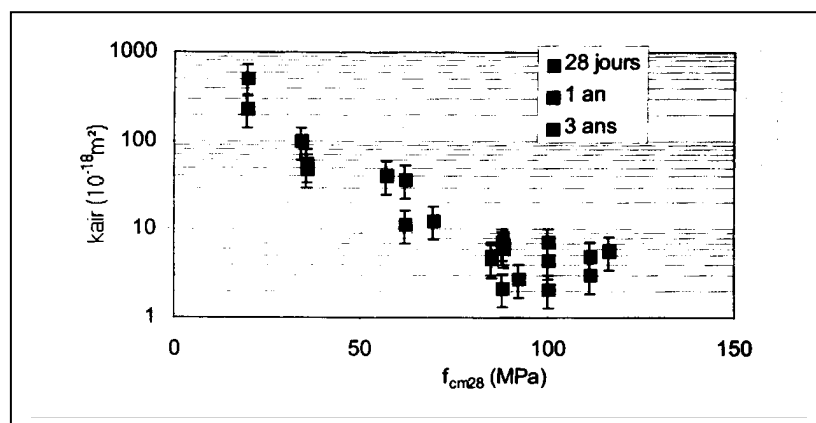


Figure I-24 : variation de la perméabilité à l'air en fonction de f_{cm28} pour le mode de conservation en sac étanche : influence de l'âge [38].

I.3.3.7- Influence de la température :

Lorsque la température d'un fluide véhiculé sous gradient de pression change, la viscosité est modifiée. Si l'écoulement reste laminaire, la loi de Darcy reste applicable et seul le débit devrait changer, la perméabilité restant constante. Dans les faits, ce n'est pas aussi simple.[16]

Dans le cas de la perméabilité à l'eau, la conductivité hydraulique sera fonction des variations avec la température, de la viscosité et de la masse volumique du fluide.

Les relations qui existent entre la masse volumique d'un fluide et la température sont généralement des ajustements réalisés de manière empirique et liés à une gamme de température précise. A des températures comprises entre 5°C et 200°C Perry & Chilton [40] proposent la relation suivante :

$$\rho = \rho^* \left[\frac{T_C - T}{T_C - T^*} \right]^{0.2}$$

Avec : ρ : la masse volumique de l'eau à température donnée ;
 ρ^* : la masse volumique «de référence», soit 996,59 kg/m³ pour l'eau ;
T : la température ;
T_c : la température critique du fluide, soit 647,3 K pour l'eau ;
T* : la température de 300 K.

En plus de l'influence de la température sur les grandeurs physiques elles même, l'analyse des données expérimentales obtenues sur les matériaux cimentaires doit prendre en considération plusieurs autres éléments.

Une étude plus détaillée de l'évolution de la structure poreuse montre, pour des matériaux courants (E/C=0,50), qu'entre 105 et 400°C, seule la quantité des pores de dimension entre 0,2 et 10 µm augmente de façon significative, les pores plus petits conservant un volume stable.

I.3.4- Mesure de la perméabilité à l'eau :

I.3.4.1- Par quelle mesure de la perméabilité caractériser un béton ?

Question fondamentale et qui doit recevoir une solution satisfaisante si l'on veut qu'une mesure faite en laboratoire rende effectivement compte de la propriété réelle du béton en service dans un ouvrage.

Trop souvent encore, on se contente de mesurer la perméabilité d'un béton alors que cette pratique est abandonnée depuis longtemps en ce qui concerne le comportement du béton, dont il ne viendrait plus à l'idée de personne de la caractériser par résistance mécanique. Le schéma suivant, établi d'après une (figure I-25) de la référence [11], illustre bien la multiplicité des processus de transfert de fluides dans un ouvrage réel.

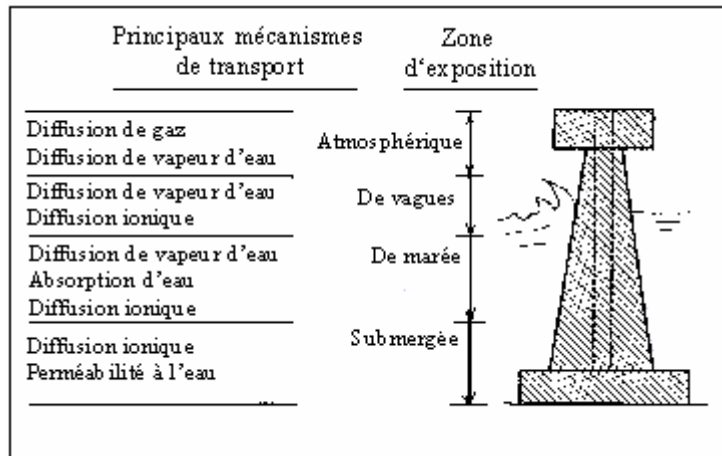


Figure I-25 : Les processus de transfert de fluides dans un ouvrage réel

La réponse à la question posée est donc celle-ci : pour un béton donné, mesurer sa perméabilité au fluide intervenant réellement in situ. L'expérience montre que les résultats d'essais pratiques sur un même béton selon des techniques différentes, conduisent à définir autant de coefficient de perméabilité que de mécanismes analysés. Il est donc parfaitement vain d'escompter définir un béton par un coefficient de perméabilité intrinsèque.

I.3.4.2- Définition et métrologie de l'essai de perméabilité :

La perméabilité d'un matériau caractérise son aptitude à être traversé par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression : ce transport est décrit par la loi de Darcy. Cette loi est basée sur les hypothèses suivantes :

- Il n'y a pas d'interaction entre le fluide et le milieu
- Le régime d'écoulement est laminaire dans un milieu continu, homogène et isotrope.

La loi de Darcy indique, en fonction du gradient de pression hydrostatique, la « vitesse » d'écoulement du fluide. Le coefficient de proportionnalité est la perméabilité du solide poreux au fluide employé (en $m^3 \cdot s/kg$). La perméabilité est rapportée à la masse volumique du fluide pour obtenir la valeur de la perméabilité du matériau K (m/s) ou conductivité hydraulique. On définit en outre une perméabilité intrinsèque, indépendante du fluide, valeur de la perméabilité corrigée de la viscosité du fluide k (m^2).

Avec: K : la conductivité hydraulique (m/s)
 k : la perméabilité intrinsèque (m^2)
 ρ : la masse volumique du fluide (kg/m^3)
 μ : la viscosité dynamique du fluide (pa.s)
 g : l'accélération de la pesanteur ($9.807 m/s^2$)

Ainsi, dans sa représentation la plus simple, la loi de Darcy exprime la vitesse d'écoulement d'un fluide V_d (m/s) en fonction du flux Q (m^3/s) au travers d'une section de matériau S (m^2). Cette loi relie encore le flux d'eau Q passant au travers d'une section S à la conductivité hydraulique du milieu K et au gradient de charge hydraulique. Sous sa forme la plus simple elle s'explique par la relation :

$$V_d = \frac{Q}{S} = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Ou :

Δh : représente la perte de charge hydraulique (m)

ΔL : est la distance (m) ;

$\Delta h/\Delta l$: est le gradient de charge hydraulique.

La vitesse de Darcy est en fait une vitesse fictive, calculée comme si toute la section S était offerte à l'écoulement. Pour obtenir la vitesse réelle v_f , il faut tenir compte de la section réelle à travers laquelle l'eau passe. Le rapport de cette section réelle à la section totale S correspond à ce que l'on appelle couramment la porosité effective (ou porosité cinématique).

Dans le cas des bétons, la perméabilité n'est pas une propriété intrinsèque du matériau. En effet, la valeur obtenue dépend du fluide utilisé et les hypothèses énoncées plus haut ne sont pas toujours vérifiées loin s'en faut. On trouve en général deux ordres de grandeurs d'écart entre la perméabilité au gaz et la perméabilité à l'eau [17]. Il convient de s'intéresser aux aspects métrologiques liés à ces essais, en particulier ceux susceptibles de modifier le regard que l'on porte sur les résultats présents dans la littérature.

En ce qui concerne la perméabilité à l'eau, c'est la première hypothèse de la loi de Darcy qui n'est pas toujours vérifiée : il peut y avoir interaction entre l'eau et la matière cimentaire.

On ne trouve en effet, pas de mesures de perméabilité à l'eau réalisées avec des solutions en équilibre avec les matériaux cimentaires, permettant de minimiser les perturbations chimiques liées à la circulation d'eau dans le matériau. Des études ont mis en évidence une diminution de la perméabilité à l'eau en cours d'essai attribuée à une réhydratation du ciment [41].

Ces observations sont favorisées par la durée importante de ce type d'essai (les mesures se faisant en régime permanent). A contrario, il arrive que l'on assiste à une lixiviation de la pâte de ciment lors d'essais à l'eau désionisée. Dans ces deux cas, le matériau est susceptible d'évoluer au cours de l'essai et la mesure obtenue ne caractérisera donc pas seulement et simplement la perméabilité à l'eau. D'autre part, les pressions d'essais sont très élevées (de l'ordre de Mpa), ce qui peut entraîner des modifications de la micro-structure et donc modifier les mesures.

Autant pour les mesures de perméabilité au gaz qu'à l'eau, il convient de garder ces différentes remarques à l'esprit lorsque l'on examine des résultats. des écarts ou une dispersion de résultats, a priori comparables, peut avoir pour origine la non maîtrise certains de ces points et fausser ainsi les interprétations.

I.3.4.3- Hypothèses et loi d'écoulement du fluide :

I.3.4.3.1- Loi de Darcy :

Darcy a établi au 19^{ème} siècle, une relation expérimentale entre le débit traversant une surface unité d'échantillon, et la perte de charge entre deux points d'une ligne de courant. Cette relation s'écrit :

$$V = -k \cdot gradH \quad (1)$$

Ou : V : vitesse de filtration (m/s)
 K : Conductivité hydraulique (m/s)
 H : charge hydraulique (m)

Dans cette expression, k n'est pas une caractéristique propre du matériau, et dépend du fluide percolant. L'équation (1) peut se mettre sous la forme :

$$V = - \frac{K}{\mu} (\text{grad}P + \rho \cdot g \cdot \text{grad}Z) \quad (2)$$

Ou : K : perméabilité intrinsèque du milieu (m^2)
 μ : viscosité du fluide (Pa.s)
 P : pression du fluide (Pa)
 Z : altitude par rapport à un niveau de référence (m)
 ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3)
 g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

on fait alors apparaître K , qui ne dépend pas des propriétés du fluide saturant. Ces deux paramètres sont reliés par :

$$K = k \frac{\mu}{P \cdot g} \quad (3)$$

Pour l'eau, on prenant pour valeurs approximatives : $\mu=10^{-3}$ Pa.s, $P=10^3$ kg/m³, et $g =10$ m/s², on obtient $K= 10^{-7} k$.

Si on fait de plus l'hypothèse d'un gradient de pression suffisamment élevé, on pourra négliger le terme $\rho g \text{ grad} Z$, et (3) devient :

$$V = - \frac{K}{\mu} (\text{grad}P) \quad (4)$$

Par la suite, on désignera par la loi de Darcy l'équation (4), qui se généralise au cas des matériaux anisotropes par :

$$V = - \frac{\overline{K}}{\mu} \text{grad}P \quad (5)$$

Ou : \overline{K} : désigne le tenseur symétrique de perméabilité intrinsèque du milieu.

I.3.4.3.2- Condition de validité de la loi de Darcy :

On devra veiller, lors de la conception d'un dispositif expérimental de détermination de la perméabilité, à rester dans le cadre de la loi de Darcy sous sa forme simplifiée (4). Les conditions de validité de cette dernière sont les suivantes :

L'échantillon doit être parfaitement saturé par le fluide percolant. Si dans le cas de matériaux relativement perméables, les temps de saturation ne sont pas très longs, ceux-ci peuvent devenir rédhibitoires pour les bétons de très bonne qualité. Le respect de cette condition est fondamental, car dans le cas contraire, la perméabilité mesurée n'est pas la perméabilité intrinsèque du matériau, mais une perméabilité relative eau-air qui peut être très différentes.

Le régime permanent doit être atteint. On s'assurera simplement de la validité de cette hypothèse par mesure du débit de fluide, l'essai à proprement parlé ne devant commencer que lorsque celui-ci reste sensiblement constant au cours du temps. La durée du régime transitoire peut être extrêmement longue pour les très faibles perméabilités, rendant ce type d'essai inadapté.

L'écoulement doit être laminaire. Dans la pratique, pour les liquides, les faibles perméabilités des matériaux testés, et donc les très faibles vitesses d'écoulement, font que cette hypothèse est toujours vérifiée. En effet le nombre de Reynolds d'un écoulement unidimensionnel d'eau dans un milieu poreux de longueur L, et donc le diamètre moyen des pores supposés cylindriques d, est considéré comme longueur caractéristique est donné par :

$$\eta = \frac{\rho \cdot Vd}{\mu} \quad (6)$$

Soit en appliquant la loi de Darcy

$$\eta = \frac{\rho K \cdot d \cdot \Delta P}{\mu^2 L} \quad (7)$$

En prenant comme ordre de grandeur : $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $K = 10^{-12} \text{ m}^2$, $d = 10^{-6} \text{ m}$, $\mu = 10^{-3} \text{ Pa.s}$, $\Delta P = 10^6 \text{ Pa}$, et $L = 10^{-1} \text{ m}$, on obtient $\eta = 10^{-2}$, ce qui garanti un écoulement laminaire.

Le terme ($\rho \cdot g \cdot \text{grad} Z$) doit pouvoir être négligé devant le gradient de pression. Encore une fois, c'est toujours le cas dans la pratique, car pour les valeurs représentatives de

$\Delta P = 10^6 \text{ Pa}$, et $L = 10^{-1} \text{ m}$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, on a :

$$\frac{\rho \cdot g \cdot \text{grad} Z}{\text{grad} P} = 10^{-3}$$

I.3.4.3.3- Principe de l'essai :

La mesure de perméabilité à l'eau en régime permanent consiste à appliquer une différence de pression entre deux des faces de l'échantillon, et à mesurer le débit qui traverse la surface de l'échantillon, l'application de la loi de Darcy donne alors, si ces conditions d'application sont vérifiées, directement la perméabilité. Le profil de pression dans l'échantillon sera déduit de l'équation de continuité :

$$\text{div } \rho V + \frac{dm}{dt} = 0$$

m représente l'apport de masse fluide par unité de volume initial du matériau, et ou $dm/dt=0$, en régime permanent d'injection. En couplant l'équation (9) avec la loi de Darcy, et en supposant que la masse volumique et la viscosité du fluide, ainsi que la perméabilité du matériau sont homogènes dans tout l'échantillon, on obtient :

$$\nabla^2 P = 0$$

D'où l'on tire dans le cas d'un écoulement unidimensionnel :

$$P(X) = P_1 + \frac{P_0 - P_1}{L} X$$

On peut alors appliquer la loi de Darcy pour calculer la perméabilité :

$$K = \frac{\mu QL}{A \Delta P}$$

Ou :

Q : débit du fluide traversant l'échantillon (m³/s)

A : section de l'échantillon (m²)

L : longueur de l'échantillon (m)

ΔP : différence de pression appliquée sur l'échantillon (Pa)

On constate donc que, connaissant les dimensions de l'échantillon, la viscosité du fluide, et la différence de pression appliquée, la mesure du débit permet de remonter à la perméabilité.

I.3.4.3.4- Unités de mesure :

En toute rigueur l'exploitation de l'équation généralisée :

$$Q = K \frac{A}{\mu} \frac{dP}{dZ}$$

doit conduire à exprimer le coefficient de perméabilité k en terme de surface : m² pour le système SI. L'usage s'est établi, à la suite des pétroliers, d'employer un sous multiple : le Darcy qui vaut 10⁻¹² m² ou encore le millidarcy. Qui vaut 10⁻¹⁵ m².

Des confusions peuvent naître de l'emploi de la loi de Darcy sous sa forme initiale $V=k.i$ (avec V : vitesse apparente de l'écoulement, sous un gradient hydraulique $i = dH/dL$) : dans ce cas, la perméabilité k est homogène à une vitesse et s'exprime en m/s (ou en cm/s).[25]

I.3.4.4- Procédure et méthodes d'essais de la perméabilité à l'eau :

Il n'existe pas de procédure standardisée pour mesurer la perméabilité à l'eau du béton. Chaque laboratoire possède sa propre procédure utilisant des appareils différents. Malgré tout, presque toutes les procédures sont basées sur le même principe qui consiste à appliquer une pression hydraulique à une extrémité d'un échantillon cylindrique et à mesurer le débit de percolation en régime permanent (figure I-26).

A partir du débit de percolation et des dimensions de l'échantillon, on peut déterminer la perméabilité (K) selon la loi de Darcy et finalement en tirer le coefficient de perméabilité (K_w).

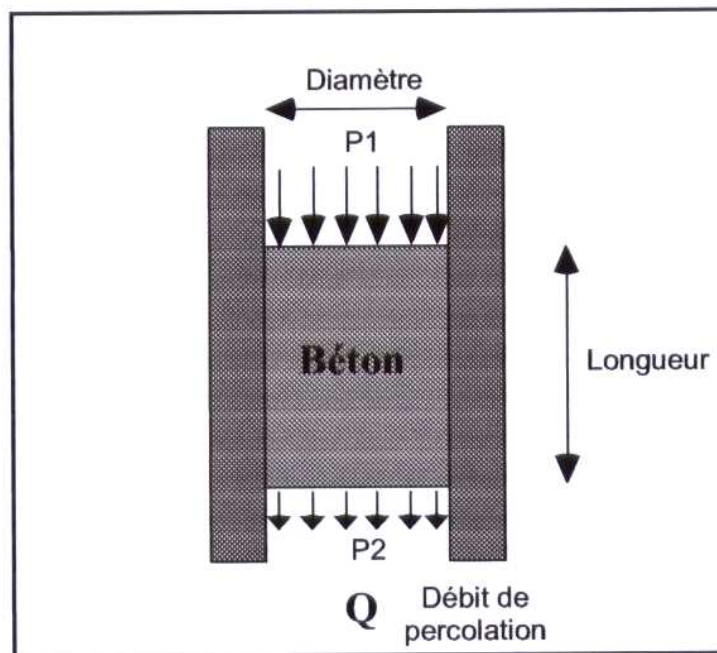


Figure I-26 : principe de fonctionnement d'un appareil de mesure de la perméabilité à l'eau.

Le Perméamètre utilisé à l'université de Sherbrooke est dérivé d'un appareil similaire couramment utilisé en mécanique des roches. Ce type de Perméamètre a l'avantage d'accommoder des éprouvettes de béton (carottes ou cylindres) de 150 mm de diamètre et de 300 mm de longueur (figure I-27)

Etant donné que cette appareil utilise des éprouvettes de béton de grande dimension, il permet d'avoir une mesure plus représentative de l'ensemble du béton, particulièrement si celui-ci a été fabriqué en utilisant des granulats relativement gros (diamètre maximal > 30 mm).

L'essai consiste à forcer un écoulement d'eau (radial) au travers de la structure d'une éprouvette de béton, et de mesurer, pour un gradient de pression donné, le débit d'eau percolé (voir le schéma de l'appareil).

A partir de débit mesuré et du gradient de pression appliqué, on peut ensuite évaluer le coefficient de perméabilité à l'eau (K_w).

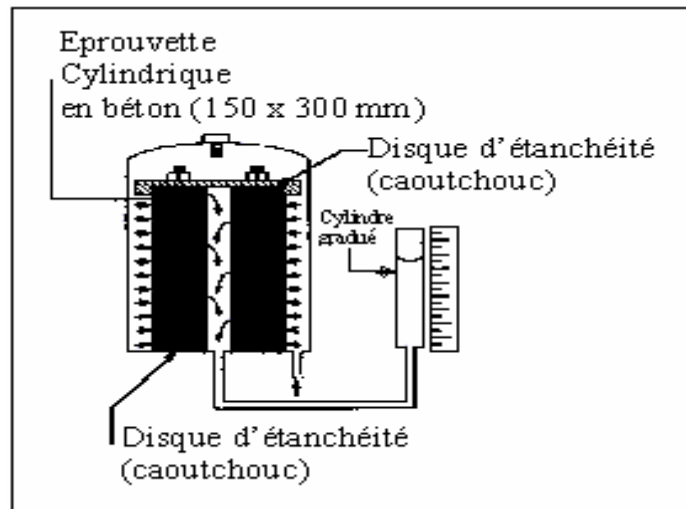


Figure I-27 : principe de fonctionnement de l'appareil de mesure de la perméabilité à l'eau utilisé à l'Université de Sherbrooke.

I.4- Conclusion de la synthèse bibliographique :

Cette étude bibliographique nous amène à récapituler les suivants :

- 1/- L'expression durabilité est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique
- 2/- Aucune méthode normalisée ne permet de mesurer la durabilité d'un béton ; il n'y a pas d'unité pour évaluer la durabilité du béton comme il en existe lorsque l'on veut mesurer la résistance à la compression.[3]
- 3/- Deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs : la perméabilité et la diffusivité [4].
- 4/- Il est donc évident qu'une connaissance détaillée de la perméabilité des bétons, ainsi que des facteurs qui la contrôlent est fondamentale à une meilleure maîtrise de la durabilité des constructions.
- 5/- Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes au béton. Les différentes actions peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques.
- 6/- La porosité est un facteur de premier ordre contrôlant la durabilité du béton.
- 7/- L'eau potable peut être utilisée sans contrôle préalable pour la fabrication du béton. Pour les autres eaux, il convient de s'assurer qu'elles ne contiennent pas d'impuretés nuisibles [12]. En effet l'eau de gâchage ne doit pas comporter d'impuretés organiques.
- 8/- Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes. Cette eau interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état (figure. I-3) :

- L'eau combinée chimiquement
- L'eau zéolitique
- L'eau adsorbée
- L'eau des capillaires

9/- La pâte de ciment hydraté est formée par :

- des hydrates (C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfoaluminates)
- des grains de ciment non hydraté
- des espaces capillaires
- des bulles d'air.

10/- Les principaux hydrates comprennent :

- les silicates de calcium hydratés (C-S-H)
- les aluminates hydratés
- la chaux hydratée (portlandite)
- de l'eau adsorbée sur certains cristaux
- des impuretés.

11/- l'auréole de transition se forme généralement au moment de la mise en œuvre du matériau à l'état frais, les granulats modifiant localement l'arrangement des grains de ciment par un effet de paroi [22].

12/- la perméabilité d'une pâte de ciment, d'un mortier et d'un béton sont très différentes, car l'interface pâte granulat joue un grand rôle dans les mécanismes de transport. Young [5] montre par exemple que la perméabilité d'une pâte de ciment est de plus de deux ordres de grandeur plus faible que celle d'un béton.

13/- La perméabilité est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures.

14/- C'est surtout la perméabilité de la peau du béton qui est la plus étroitement liée à la durabilité. En effet, c'est véritablement cette peau qui bloque ou ralentit le passage des agents agressifs (liquides, gaz, ions) qui peuvent corroder la masse du béton ou les aciers d'armatures.

15/- La perméabilité d'un matériau dépend bien sûr de sa porosité, c'est à dire du volume des pores par unité de volume, mais aussi de la taille des pores et de la distribution de leur taille.

16/- Parmi les paramètres contrôlant la perméabilité, le taux de saturation des matériaux, de même que leur microstructure, jouent un rôle important. Ces deux paramètres peuvent être partiellement contrôlés et en tout cas modifiés lors de la cure du liant.

17/- La durée de cure initiale influence fortement la perméabilité à l'eau du béton, l'effet est bien visible sur la figure I-21 où on voit bien que qu'une période de cure plus longue diminue toujours très significativement la perméabilité à l'eau. L'influence de la durée de cure devient de moins en moins importante à mesure que le rapport E/C diminue.

18/- De la même manière que les conditions de cure, on peut concevoir que l'âge des matériaux peut avoir une influence sur le développement et l'évolution de leurs propriétés.

19/- Lorsque la température d'un fluide véhiculé sous gradient de pression change, la viscosité est modifiée. Si l'écoulement reste laminaire, la loi de Darcy reste applicable et seul le débit devrait changer, la perméabilité restant constante. Dans les faits, ce n'est pas aussi simple [17].

20/- Dans le cas de la perméabilité à l'eau, la conductivité hydraulique sera fonction des variations avec la température, de la viscosité et de la masse volumique du fluide.

21/- La perméabilité d'un matériau caractérise son aptitude à être traversé par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression : ce transport est décrit par la loi de Darcy. Cette loi est basée sur les hypothèses suivantes

- Il n'y a pas d'interaction entre le fluide et le milieu ;
- Le régime d'écoulement est laminaire dans un milieu continu, homogène et isotrope.

22/- En ce qui concerne la perméabilité à l'eau, c'est la première hypothèse de la loi de Darcy qui n'est pas toujours vérifiée : il peut y avoir interaction entre l'eau et la matière cimentaire.

23/- On devra veiller, lors de la conception d'un dispositif expérimental de détermination de la perméabilité, à rester dans le cadre de la loi de Darcy sous sa forme simplifiée (4). Les conditions de validité de cette dernière sont les suivantes :

■ L'échantillon doit être parfaitement saturé par le fluide percolant. Si dans le cas de matériaux relativement perméables, les temps de saturation ne sont pas très longs, ceux-ci peuvent devenir rédhibitoires pour les bétons de très bonne qualité. Le respect de cette condition est fondamental, car dans le cas contraire, la perméabilité mesurée n'est pas la perméabilité intrinsèque du matériau, mais une perméabilité relative eau-air qui peut être très différentes.

■ Le régime permanent doit être atteint. On s'assurera simplement de la validité de cette hypothèse par mesure du débit de fluide, l'essai à proprement parlé ne devant commencer que lorsque celui-ci reste sensiblement constant au cours du temps. La durée du régime transitoire peut être extrêmement longue pour les très faibles perméabilités, rendant ce type d'essai inadapté.

■ L'écoulement doit être de laminaire. Dans la pratique, pour les liquides, les faibles perméabilités des matériaux testés, et donc les très faibles vitesses d'écoulement, font que cette hypothèse est toujours vérifiée.

24/- Il n'existe pas de procédure standardisée pour mesurer la perméabilité à l'eau du béton. Chaque laboratoire possède sa propre procédure utilisant des appareils différents. Malgré tout, presque toutes les procédures sont basées sur le même principe qui consiste à appliquer une pression hydraulique à une extrémité d'un échantillon cylindrique et à mesurer le débit de percolation en régime permanent (figure I-26). A partir du débit de percolation et des dimensions de l'échantillon, on peut déterminer la perméabilité (K) selon la loi de Darcy et finalement en tirer le coefficient de perméabilité (K_w).

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

II.1- Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Nous avons utilisé pour la confection du béton les matériaux locaux suivants :

- Le sable de dune d'origine siliceux vient de BOU SAADA (OUED MAITER).
- Trois fractions de gravier (3/8, 8/15, 15/25) d'origine calcaire de carrière COSIDER
- Le ciment de CPJ 45 provient de la cimenterie De Ain El kbira
- L'eau potable.

II.2- Caractéristiques du sable utilisé :

II.2.1- Caractéristiques physiques du sable :

Nous avons utilisé pour la confection du béton, un sable dont les caractéristiques physiques sont déterminés expérimentalement, au niveau de laboratoire de génie civil de l'université de M'sila, suivant les normes françaises AFNOR

Les résultats d'essais sont exposés dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Caractéristiques physiques du sable utilisé.

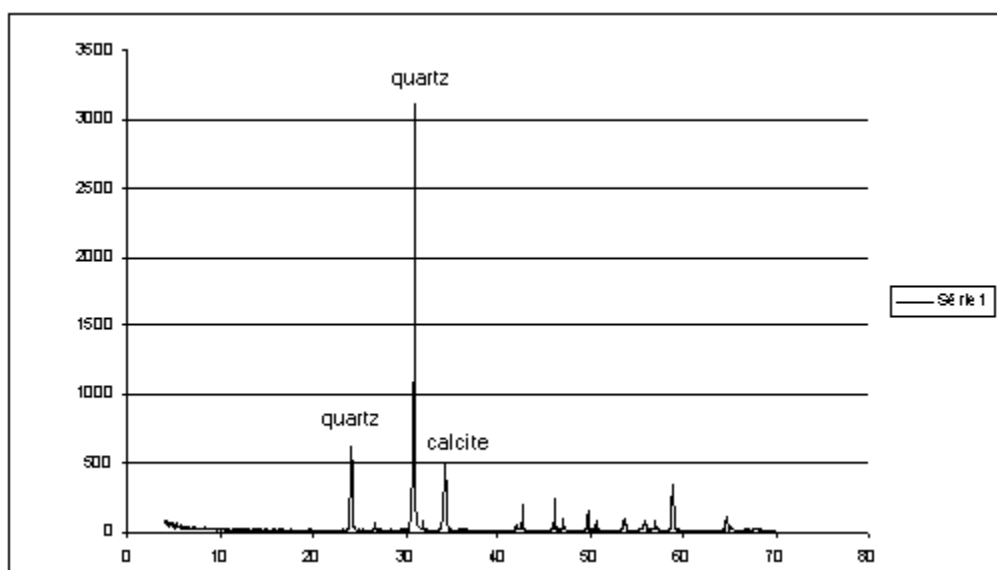
Caractéristiques		Sable	Normes
Masse spécifique(g/cm ³)		2.57	NF P 18-555
Compacité		68.43	NF P 18-554
Masse vol App (g/cm ³)	A l'état lâche	1.50	NF P 18-555
	A l'état compacte	1.62	NF P 18-555
Equivalent de sable	E.S.V (%)	73.70	NF P 18-598
	E.S.P (%)	70.36	NF P 18-598
Porosité	Etat lâche (%)	32.11	NF P 18-554
	Etat compact (%)	25.50	NF P 18-554
Teneur en eau (%)		0.01	NF P 18-555
Degré d'absorption d'eau (%)		1.60	NF P 18-555

II.2.2- Caractéristiques chimique du sable :

Nous avons utilisé pour la confection du béton, un sable siliceux. la composition chimique du sable utilisé est déterminée expérimentalement, par la diffraction des rayons X en octobre 2003 au niveau de Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse.

Les résultats d'essais sont exposés dans la figure II-1.

figure II-1 : composition chimique du sable utilisé.



Remarque :

Notre sable est un sable pur à haute teneur en silice

II.2.3- Analyse granulométrique du sable :

l'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents familles de grains constituant l'échantillon, la distribution en poids des particules d'un granulats suivant leurs dimensions permet de déterminer sa continuité.

Les résultats d'essais sont rassemblés dans les tableau II-2 :

Tableau II-2 : Analyse granulométrique du sable utilisé.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	196	196	9.8	90.2
1.25	133	329	16.45	83.55
0.63	210	539	26.95	73.05
0.315	475	1014	50.7	49.3
0.125	910	1924	96.2	3.8
0.08	65	1989	99.45	0.55
Fond	11	2000	100	0

II.2.4- Module de finesse :

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm) sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

avec : R_c : refus cumulé.

$$M_f = 1.9$$

Donc, notre sable est considéré comme un sable fin.

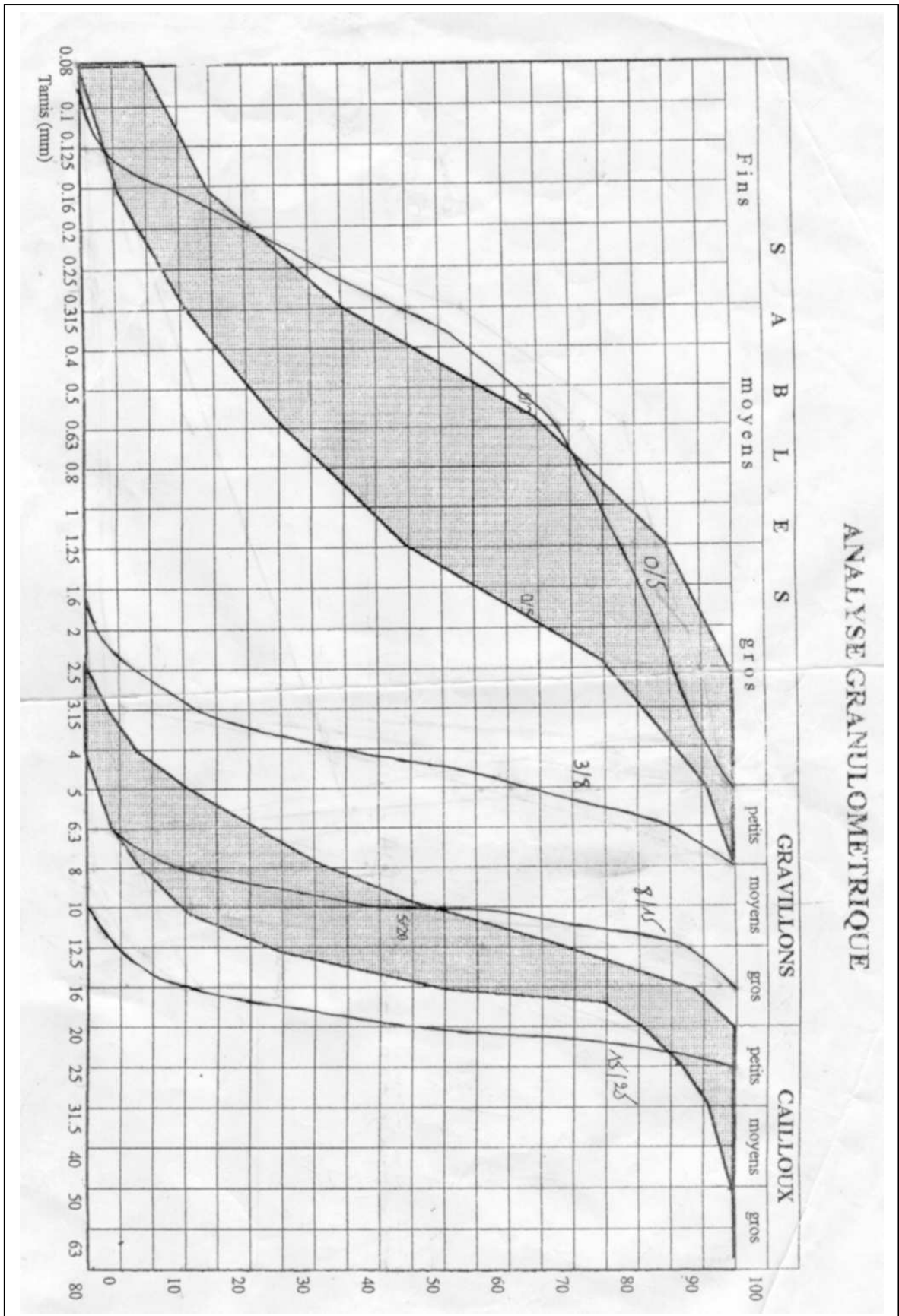


Figure II-2 : Analyse granulométrique du sable utilisé

II.3- Caractéristiques du gravier utilisé :

II.3.1- Origine du gravier utilisé :

Les graviers utilisés sont de différentes fractions et proviennent de la carrière de COSIDER. Dans notre recherche, nous avons utilisé trois fractions de gravier :

- Fraction 3/8
- Fraction 8/15
- Fraction 15/25

II.3.2- Caractéristiques physiques du gravier utilisé :

les caractéristiques du gravier sont illustrés au tableau II-3 :

Tableau II-3: Caractéristiques physiques du gravier utilisé.

Caractéristiques	Gruvier			Normes
	Fraction			
	3/8	8/15	15/25	
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.59	2.61	2.62	NF P18- 554
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.29	1.34	1.35	NF P18-554
Porosité (%)	50.22	48.92	48.50	NF P18-554
Degré d'absorption d'eau (%)	1.76	1.33	1.07	NF P18-554
Teneur en eau du gravier (%)	0.18	0.25	0.33	NF P18-554

II.3.3- Caractéristiques chimiques du gravier :

La composition chimique du gravier utilisé est établie en 2003, à la cimenterie de Ain Touta de BETNA. *Les résultats d'essais sont exposés dans le tableau 05.*

Tableau II-4 : Analyse chimique du gravier

Constituants		Gruvier concassé
Elément	Symbole teneur (%)	
Silice	SiO ₂	36.82
Chaux	CaO	32.32
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	1.43
Alumine	Al ₂ O ₃	4.59
Oxyde de magnésium	MgO	2.03
Perte au feu	P.A.F	17.81

II.3.4- l'Analyse granulométrique du gravier :

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ci-dessous :

- Fraction 3/8 (3,5Kg)

Tableau II-5: Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	0	0	0	100
6.3	370	370	10.57	89.42
5	727	1097	31.34	68.65
4	952	2049	58.54	41.45
3.15	840	2889	82.54	17.45
2	562	3451	98.6	1.4
Fond	49	3500	100	0

- Fraction 8/15 (3,5Kg)

Tableau II-6 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	0	0	0	100
12.5	231.5	231.5	6.61	93.39
10	1606	1837.5	52.5	47.5
8	1142.5	2980	85.14	14.86
6.3	411.5	3391.5	96.9	3.1
Fond	108.5	3500	100	0

- Fraction 15/25 (3,5Kg)

Tableau II-7 : Analyse granulométrique du gravier 15/25.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	0	0	0	100
20	1740	1740	49.71	50.29
16	1230.5	2970.5	84.87	15.13
12.5	359.5	3330	95.14	4.85
10	151	3481	99.45	0.54
Fond	19	3500	100	0

II.4- Caractéristiques du ciment utilisé :

Le liant utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé fabriqué à la cimenterie De Ain El kbira (wilaya de Sétif). Il est commercialisé comme étant un CPJ 450.

II.4.1- Caractéristiques physiques du ciment :

Les différentes caractéristiques physiques mesurées au laboratoire de l'université de M'SILA, sont regroupés sous dessous, au tableau II-8.

Tableau II-8 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

Caractéristiques physiques	Ciment CPJ45
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.10
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.85
Surface spécifique (cm ² /g)	2691.31

NB : l'essai de la S.S.B est réalisé au laboratoire de la cimenterie de Ain touta.

II.4.2- Caractéristiques chimiques du ciment utilisé :

La composition chimique est établie au niveau du laboratoire de la cimenterie de Ain Touta. Elle, est présentée au tableau II-9.

Tableau II-9 : Composition chimique du CPJ 45.

Eléments	Teneur(%)
SiO ₂	22.9
Al ₂ O ₃	4.37
Fe ₂ O ₃	3.75
CaO	63.3
MgO	1.80
K ₂ O	0.31
Na ₂ O	0.16
P.A.F	5.73

II.4.2.1- La composition minéralogique :

Cette composition minéralogique est obtenue par le rayon X, au niveau de la cimenterie de Ain touta.

$C_3S = 51.55 \%$

$C_2S = 30.85 \%$

$C_3A = 05.56 \%$

$C_4AF = 12.08\%$

II.5- Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable fournie au laboratoire de génie civil.

II.6- Méthode de composition de béton :

La méthode adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition du béton est celle du « dreux-gorisse »

La composition d'un m^3 de béton est la suivante :

-sable.....606.6 Kg/ m^3 .
-gravier 3/8.....182.4 Kg/ m^3 .
-gravier 8/15.....194.4 Kg/ m^3 .
-gravier 15/25.....813.0 Kg/ m^3 .

CHAPITRE III

***TECHNIQUES
EXPERIMENTALES***

III.1- Introduction :

Il n'existe pas de procédure standardisée pour mesurer la perméabilité à l'eau du béton. Chaque laboratoire possède sa propre procédure utilisant des appareils différents. Malgré tout, presque toutes les procédures sont basées sur le même principe.

Ce chapitre consiste à présenter la technique utilisée pour l'évaluation du coefficient de perméabilité à l'eau au niveau de deux laboratoires (Laboratoire de Développement des Géomatériaux à M'sila et Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions à Toulouse), ainsi que d'autres méthodes pour la détermination de la résistance à la compression, le degré d'hydratation, et la diffraction des rayons x.

III.2- Description générale du Perméamètre : (laboratoire de l'université de M'sila)

le dispositif de mesure disponible au niveau du laboratoire de l'université de M'sila est schématisé à la (figure III-1), il se compose de :

- 1/- Trois cellules graduées de capacité 1000 ml, pour la mise en place de l'eau. Elles sont liées par deux conduites, une pour le remplissage d'eau et l'autre pour l'air.
- 2/- Trois emplacements, pour le maintien des éprouvettes cylindriques 16 cm x 16 cm munis d'un joint, pour assurer l'étanchéité.
- 3/- Une Conduite d'eau et d'air en pression.
- 4/- Un régulateur de pression.
- 5/- Un Compresseur à air de capacité de 10 bars.

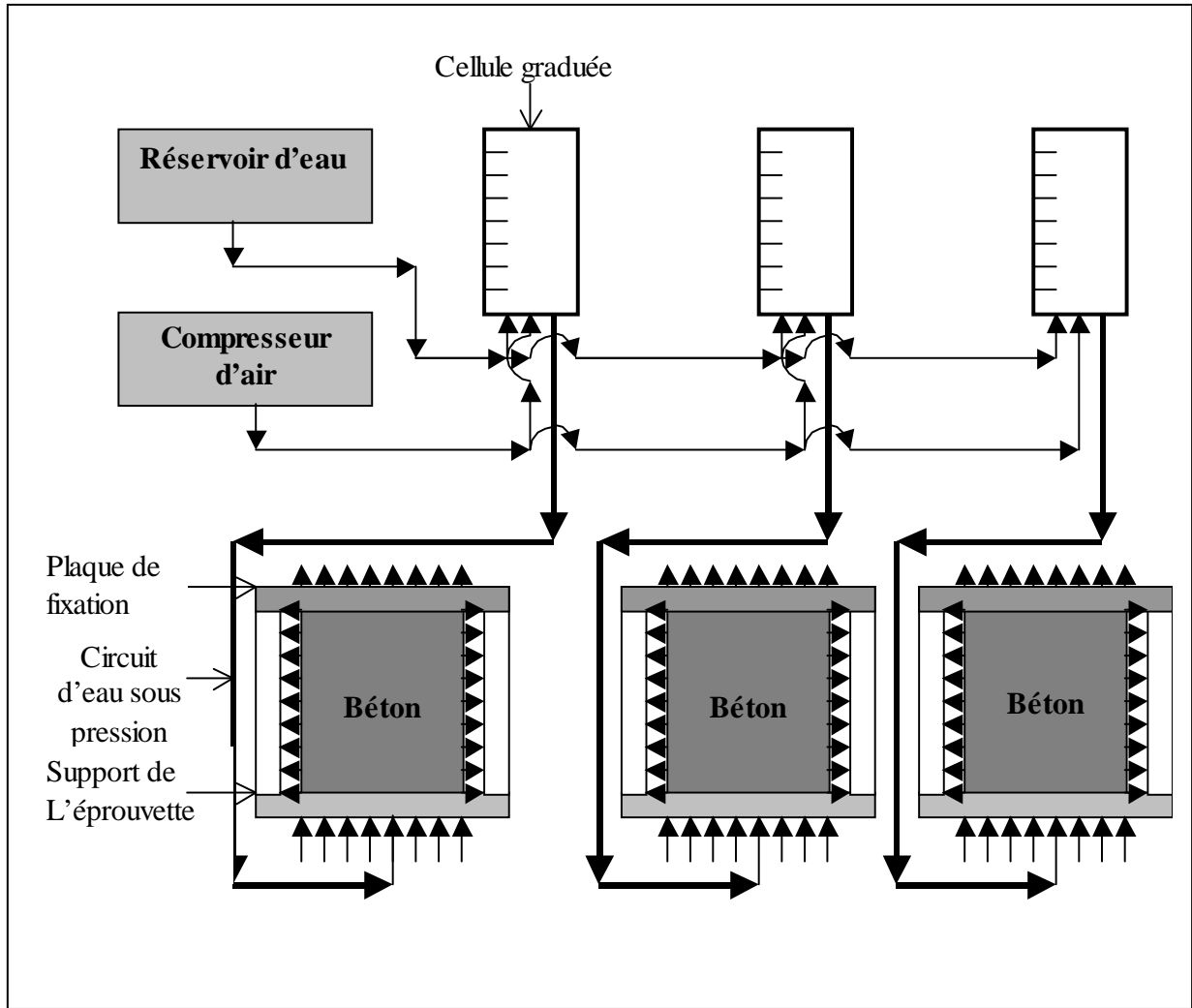


Figure III-1 : Coupe schématique du perméamètre à l'eau
(Université de M'sila)

III.3- Préparation des éprouvettes

Afin d'étudier l'influence des paramètres de composition, conditions de mise en œuvre et de conservation sur la perméabilité à l'eau d'un béton. Quatre séries d'essais ont été effectuées pour les facteurs suivants :

- 1/- le rapport E/C, avec les niveaux : 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, et 0.6
- 2/- le rapport G/S, avec les niveaux : 1.6, 1.8, 2, 2.4 et 2.6
- 3/- la durée de vibration, avec les niveaux : 10, 30, 45 et 120 s
- 4/- le mode de conservation avec les niveaux : l'air et l'eau

les dimensions des éprouvettes cylindriques coulées ont été $\Phi 160 \times 320$ mm. elles sont ensuite sciées en deux pour obtenir des échantillons de dimensions $\Phi 160 \times 160$ mm. Elles sont gardées pendant trois mois dans l'eau, pour empêcher tout échange d'eau avec l'environnement

les mesures de perméabilité ont été effectuées à différents âges : 7, 14, 21, 28, 45 et 90 jours. les résultats obtenus à partir de l'essai de perméabilité à l'eau sur les éprouvettes cylindriques de dimensions $\Phi 160 \times 160$ mm sont la moyenne de trois résultats.

III.4- Préparation du montage

- 1/- Ouvrir les deux conduites de l'air et l'eau pour remplir la cellule en eau.
- 2/- Remplir la plaque inférieure en eau.
- 3/- Placer l'échantillon entre les deux plaques de serrage.
- 4/- Visser le tous progressivement et simultanément par les écrous de fixation.
- 5/- Fermer le robinet d'eau et de l'air après le remplissage des cellules.
- 6/- Mise en pression de 6 bars.
- 7/- Ouvrir les deux robinets d'eau et d'air pour commencer.
- 8/- A la fin de la manipulation, fermer les deux robinets d'eau et d'air, puis dévisser les écrous de fixation.

NB: l'échantillon doit être saturé.

III.5- Mesure du coefficient de perméabilité à l'eau (Université de M'sila)

La vitesse de l'écoulement est déterminée par le calcul du rapport entre le volume d'eau écoulé et le temps d'écoulement.

les éprouvettes utilisés pour l'essai de perméabilité, sont de forme cylindriques, et de dimension 16 cm de diamètre et 16 cm de longueur.

III.5.1- Calcul du coefficient de perméabilité à l'eau

L'essai consiste à appliquer une pression hydraulique de 6 bars à une extrémité d'un échantillon cylindrique et à mesurer le débit de percolation en régime permanent (figure III-2).

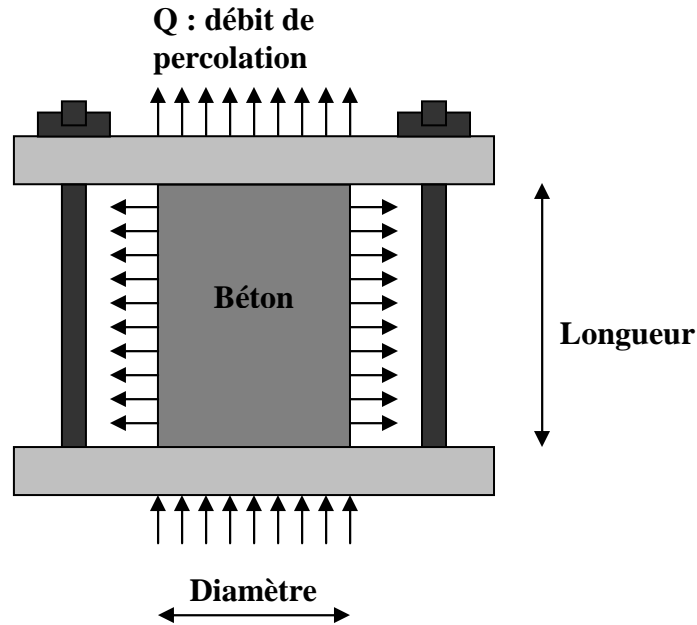


Figure III-2 : principe de fonctionnement du perméamètre à l'eau (laboratoire LDG, M'sila)

A partir du débit de percolation et des dimensions de l'échantillon, on peut déterminer le coefficient de perméabilité (K) selon la loi de Darcy :

$$Q = A \cdot K \cdot I$$

où :

Q : le volume d'eau par unité de temps.

A : section traversée par l'eau.

K : coefficient de perméabilité.

I : gradient hydraulique à travers le spécimen (m/m).

(Pression à l'intérieur de l'éprouvette - pression extérieure) / épaisseur de l'éprouvette.

La pression à l'extérieure est équivalente à la pression atmosphérique. Elle est prise égale à 101.3 KPa. Elle peut être exprimée comme un équivalent d'une colonne d'eau de hauteur de 10.34 m.

La pression à l'intérieur de l'éprouvette de béton est égale à 0.6 MPa. Elle peut être exprimée comme suit :

$$\frac{0.6 \cdot 1000 \text{ kPa}}{101.3 \text{ kPa}} \cdot 10.34 \text{ m} = 61.243 \text{ m (eau)}$$

III.6- Mesure de la résistance à la compression :

La résistance mécanique des bétons est caractérisée par un essai de compression simple réalisé sur au minimum 3 éprouvettes dont les dimensions dépendent de la taille des plus gros granulats (normes NFP 18-400), la préparation des bétons et la réalisation de l'essai sont parfaitement définies par les normes NFP 18-404 , 18-421 à 423.

Dans notre étude, nous avons confectionné des éprouvettes cubiques de dimension 10x10x10 cm³ pour réaliser l'essai de la résistance à la compression. On retient pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et on calcule la résistance (R) par la relation suivante :

$$R = \frac{F}{S}$$

Où :

F : est la charge maximale (en N).

S: est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carré.

R: la résistance à la compression exprimée en MPa.

NB : les résultats obtenus à partir de l'essai de la résistance à la compression sur des éprouvettes 10.10.10 cm³ sont multipliés par coefficient de 0.81, (*R_{cy}*/ *R_{cub}*). Ce coefficient est déterminé expérimentalement.

III.7- Essais complémentaires : (laboratoire LMDC, UPS, Toulouse)

Dans le cadre du thème « la durabilité de bétons à base des matériaux locaux dans un environnement local préjudiciable » d'un accord programme franco-algérien n°03 MDU-594 , une mission d'une durée d'un mois m'a été confiée. Cette mission consiste à :

- Tester deux échantillons de béton en mesurant leur coefficient de perméabilité à l'eau en fonction du rapport.
- Comparer les différents résultats obtenus au niveau des deux laboratoires, à M'Sila et à Toulouse, et voir s'il est nécessaire de développer notre appareillage ou l'adapter.
- Décrire le matériau durci au moyen d'études microstructurales telles que la diffraction des rayons X

III.7.1- Les matériaux testés :

Nous avons utilisé pour la confection du béton les matériaux locaux suivants :
le ciment de CPJ 45 provient de la cimenterie De Ain El KBIRA
Le sable de dune d'origine siliceux vient de BOU SAADA (OUED MAITER).
le gravier d'origine calcaire d'une carrière COSIDER
L'eau potable.

Dont, les caractéristiques sont bien détaillées dans le chapitre II

III.7.1.1- la Composition du béton testé :

La composition d'un m³ de béton est la suivante, déterminée par la méthode de DREUX-GORISSE :

- sable -----606.6 Kg/m³.
- gravier 3/8-----182.4 Kg/m³.
- gravier 8/15-----194.4 Kg/m³.
- gravier 15/25-----.813.0 Kg/m³.
- ciment CPJ45----- 350.0 Kg/m³

NB : le béton testé a été réalisé au niveau du laboratoire de l'université de M'sila.

III.7.2- Mesure de la perméabilité à l'eau :

les essais de perméabilité à l'eau, effectués au laboratoire matériaux et durabilité des constructions à Toulouse, ont été réalisés sur deux types de béton de rapports E/C différents: 0.50 et 0.60.

les éprouvettes utilisés pour l'essai de perméabilité, sont de forme cylindriques, et de dimension 11 cm de diamètre et 22 cm de longueur.

III.7.2.1- Description générale du Perméamètre : (laboratoire LMDC ,UPS,Toulouse)

le dispositif de mesure disponible au niveau du laboratoire matériaux et durabilité des constructions à Toulouse est schématisé à la (figure III-3), il se compose de quatre éléments principaux :

- 1/- La cellule proprement dite .
- 2/- Un circuit hydraulique permettant la mise sous pression du fluide et son injection
- 3/- Un circuit pneumatique assurant le confinement de l'échantillon et l'étanchéité latérale
- 4/- Un dispositif de mesure du volume expulsé.

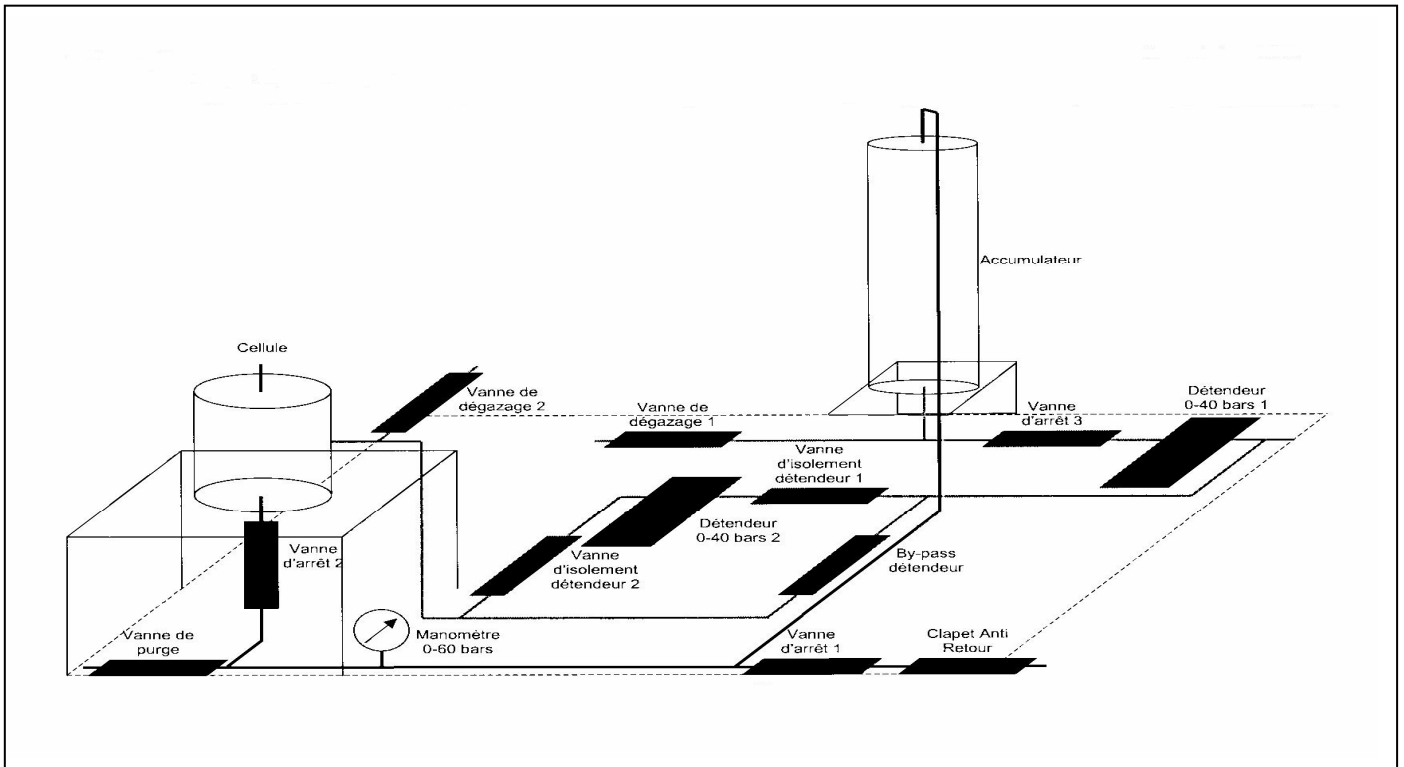


Figure III-3: Schéma hydraulique et pneumatique du Perméamètre à l'eau (laboratoire LMDC, UPS, Toulouse).

On trouvera à la suite, une coupe schématique de la cellule (figure III-4), celle est composée d'un corps cylindrique en acier (1) sur lequel se positionnent un chapeau inférieur (2) et un chapeau supérieur (3), l'étanchéité entre ces trois éléments est réalisée par l'intermédiaire de joints plats (4), dont la compression est assurée par les tirants (5) qui permettent par ailleurs le maintien en position des chapeaux sur le corps. L'échantillon (6) est placé entre deux embases (7), dont la conception permet une injection homogène du fluide sur la surface de l'éprouvette. Un jeu de cales de réglage (8) permet l'utilisation d'échantillons de hauteurs différentes, et l'ensemble est placé dans une manchette (9) qui permet d'assurer l'étanchéité latérale.

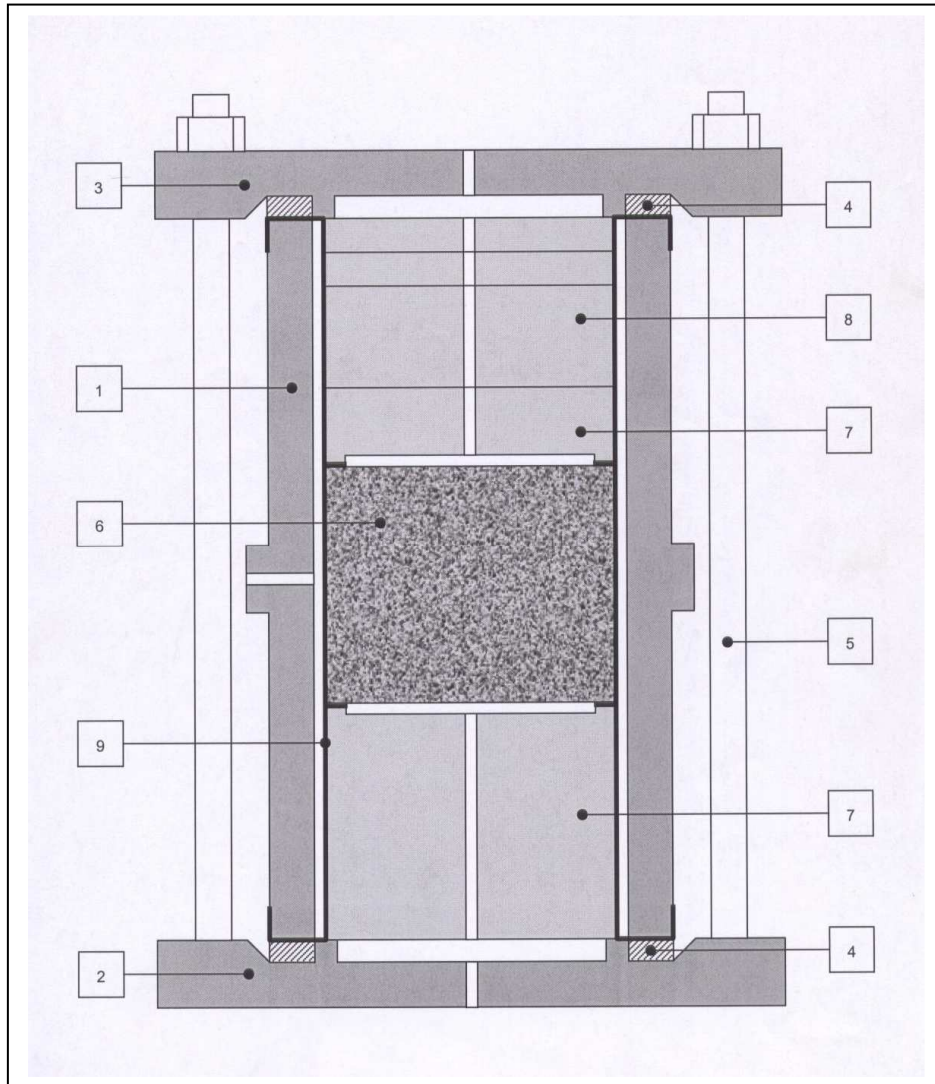


Figure III-4 : Coupe schématique de la cellule

III.7.2.2- Protocole de mise en marche du Perméamètre à l'eau : (laboratoire LMDC, UPS, Toulouse)

Avant le début de la manipulation, il faut vérifier que les vannes des manomètres sont totalement dévissées.

III.7.2.2.1- Préparation de l'échantillon :

- 1/- L'échantillon doit être chanfreiné, résiné latéralement et saturé en eau
- 2/- Placer l'échantillon entre les cales en aluminium
- 3/- Scotcher le tout en minimisant les aspérités
- 4/- Enfiler délicatement le manchon et le rabattre
- 5/- Scotcher le toue du manchon
- 6/- Enfiler le tout dans le fut de la cellule
- 7/- Siliconer l'espace entre les cales et le manchon en haut et en bas
- 8/- Mettre en haut la cale en caoutchouc.

III.7.2.2.2- Préparation du montage :

- 1/- Mise à niveau l'eau au fond de la cellule : remplir d'eau jusqu'au niveau des trous de la grille.
- 2/- Poser sur la grille le fut de la cellule
- 3/- Visser, mais pas totalement, l'arrivée d'air pour le confinement latéral.
- 4/- Poser le chapeau supérieur et visser embrases progressivement et simultanément.
- 5/- Bien revisser l'arrivée d'air.

III.7.2.2.3- Remplissage en eau de l'accumulateur :

- 1/- Ouvrir E1(position perpendiculaire par rapport au mur)
- 2/- Ouvrir E5 et E2 \Rightarrow les tuyaux du circuit d'eau se remplissent d'eau et l'air est chassé
- 3/- Fermer E2 et E5
- 4/- Ouvrir E3 puis E2 : de l'eau s'écoule par le tuyaux en haut de l'accumulateur
- 5/- En fermant E3 l'eau pénètre dans l'accumulateur
- 6/- Le remplir jusqu'à 2 bars lus sur ME2.ne pas dépasser cette valeur de pression en eau pour ne pas détériorer la membrane de l'accumulateur
- 7/- Fermer E1
- 8/- Le circuit d'eau est alors isolé et prêt
- 9/- Pour vérifier qu'il y a de l'eau dans l'accumulateur : ouvrir E5 et voir si de l'eau coule.

III.7.2.2.4- Confinement latéral de la cellule :

- 1/- Régler la pression en sortie de la bouteille (visser le détendeur) jusqu'à lire sur MA1 une pression légèrement supérieure a celle voulue pour le confinement latéral
 - 2/- Ouvrir A3 et A4
 - 3/- Visser le détendeur de MA3 pour lire au manomètre la pression voulue , le confinement latéral est alors effectué.
- Si cette pression est dépassée, dégazer légèrement ouvrant délicatement A6
- 4/- Revisser le manomètre pour ajuster la pression.

III.7.2.2.5- Mise en pression de l'accumulateur

- 1/- Vérifier que toutes les vannes du circuit d'air sont fermées.
- 2/- Ouvrir la bouteille d'air d'environ $\frac{1}{4}$ de tour pour commencer . le manomètre en sortie de la bouteille MA1 doit être réglé a une pression légèrement supérieure a celle voulue pour la mise en pression d'eau . la pression est réglée avec le détendeur en sortir de bouteille

III.7.2.2.6- Fin de manipulation

- 1/- Fermer la sortie de la bouteille et dévisser le détendeur du manomètre de la bouteille MA1 totalement.
 - 2/- Fermer les vannes A1 et A3.
- La pression en eau doit être la première a arriver à zéro.
- Etape A : vidange circuit eau
- Ouvrir doucement A2. la chute de pression se contrôle en ME2.
- Etape B : dégazage circuit air
- La vanne A4 ouverte. Faire diminuer progressivement et lentement la pression en ouvrant la vanne de purge A6

III.7.3- Diffraction des rayons X :

Les analyses du rayon X ont été réalisées sur le sable de dune de Bousaâda, sous forme de poudre. Ces analyses permettent d'indiquer les différents composants de notre sable.

III.7.3.1- Principe de la méthode :

Le principe consiste à utiliser le phénomène de diffraction des rayons X (en raison de leur longueur d'onde) pour caractériser les substances à caractère cristallin (sels, minéraux, etc.).

les radiations X possèdent la propriété de traverser un matériau et d'être diffractées par les atomes : le degré de diffraction dépend de l'énergie du rayonnement incident et de la distribution atomique (structure plus ou moins cristalline). Le spectre de diffraction constitue l'empreinte caractéristique de la structure des substances cristallines analysées. Les mesures sont effectuées avec un appareil, constitué par un tube à rayons X et un système échantillon-détecteur posé sur une unité géométrique. La technique est principalement utilisée pour des substances de structure cristalline et plus spécialement minérale. Elle peut parfois être utilisée pour des produits organiques, néanmoins organisés spatialement, tels que les hauts polymères naturels et synthétiques, les cires cristallines, etc. Les spectres de diffraction peuvent être obtenus directement à partir d'un fragment solide, ou de petites quantités de poudre (spectre de poudre). Cette dernière méthodologie est particulièrement utile pour l'identification des produits de corrosion des divers matériaux (pierre, métal, verre), de pigments de peinture, etc.

:

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV-1 INTRODUCTION :

Ce chapitre présente les résultats obtenus au laboratoire développement des géomatériaux à M'sila, concernant La perméabilité, et la résistance du béton en fonction des différents paramètres de composition et de mise en œuvre tel que :

- Rapport E/C..
- Rapport G/S
- Durée de vibration
- Mode de conservation.

Avant d'exposer les différents résultats obtenues, il est essentiel de souligner que, parmi les objectifs visés dans le stage effectué au niveau du laboratoire matériaux et durabilité des constructions à Toulouse est de :

- 01- tester deux échantillons de béton en mesurant leur coefficient de perméabilité à l'eau en fonction du rapport E/C.
- 02- comparer les différents coefficient obtenus au niveau des deux laboratoires , à M'Sila et à Toulouse, et voir s'il est nécessaire de développer notre appareillage ou l'adapter.

Les tableaux IV-1 et IV-2 récapitulent les différents résultats obtenues.

Tableau IV-1: Résultats de la perméabilité à l'eau en fonction du rapport E/C (laboratoire de développement des géomatériaux, LDG, M'SILA)

<i>Coefficient de Perméabilité en (m/s)</i>	2.853 E-12	6.547 E-11
<i>Rapport E/C</i>	0.50	0.60

Tableau IV-2: Résultats de la perméabilité à l'eau en fonction du rapport E/C (laboratoire LMDC, UPS ,Toulouse)

<i>Coefficient de Perméabilité en (m/s)</i>	8,29646 E-13	1,40556 E-12
<i>Rapport E/C</i>	0.50	0.60

Remarque :

En comparant les valeurs du coefficients de perméabilité présentés ci dessus, entre les deux laboratoires. On peut constater qu'il n'y a pas une grande différence.

En ce qui concerne la variation des résultats , il est essentiel de souligner, d'après notre avis, qu'ils sont tout à fait acceptables.

ces résultats confirment le choix du protocole expérimental retenu.

IV-2 l'influence du rapport E/C :

Le rapport E/C est l'une des valeurs caractéristiques les plus importantes du béton frais et du béton durci. Lorsque le rapport E/C augmente, le béton frais devient plus plastique et son ouvrabilité ainsi que sa compactibilité s'améliorent.

Nous avons essayé de déterminer l'influence de la variation de ce paramètre sur les deux grandeurs à savoir la perméabilité et la résistance, et de fixer, des exigences par la suite.

Les résultats obtenus sont illustrés au tableaux IV-3 et représentés sur les figures IV-1 et IV-2.

IV.2.1- Influence du rapport E/C sur la perméabilité :

Tableau IV-3 : la perméabilité (m/s) en fonction du rapport E/C.

Temps (jours) \ Rapport (E/C)	7	14	21	28	45	90
0.40	$7.62.10^{-12}$	$5.33.10^{-12}$	$4.40.10^{-12}$	$3.25.10^{-12}$	$2.50.10^{-12}$	$1.22.10^{-12}$
0.45	$10.54.10^{-12}$	$9.20.10^{-12}$	$7.75.10^{-12}$	$5.92.10^{-12}$	$3.33.10^{-12}$	$2.70.10^{-12}$
0.50	$17.88.10^{-12}$	$14.22.10^{-12}$	$11.36.10^{-12}$	$8.89.10^{-12}$	$6.72.10^{-12}$	$4.13.10^{-12}$
0.55	$42.11.10^{-12}$	$35.60.10^{-12}$	$26.43.10^{-12}$	$19.21.10^{-12}$	$13.81.10^{-12}$	$11.11.10^{-12}$
0.60	$70.45.10^{-12}$	$65.12.10^{-12}$	$62.10.10^{-12}$	$58.66.10^{-12}$	$56.75.10^{-12}$	$51.81.10^{-12}$

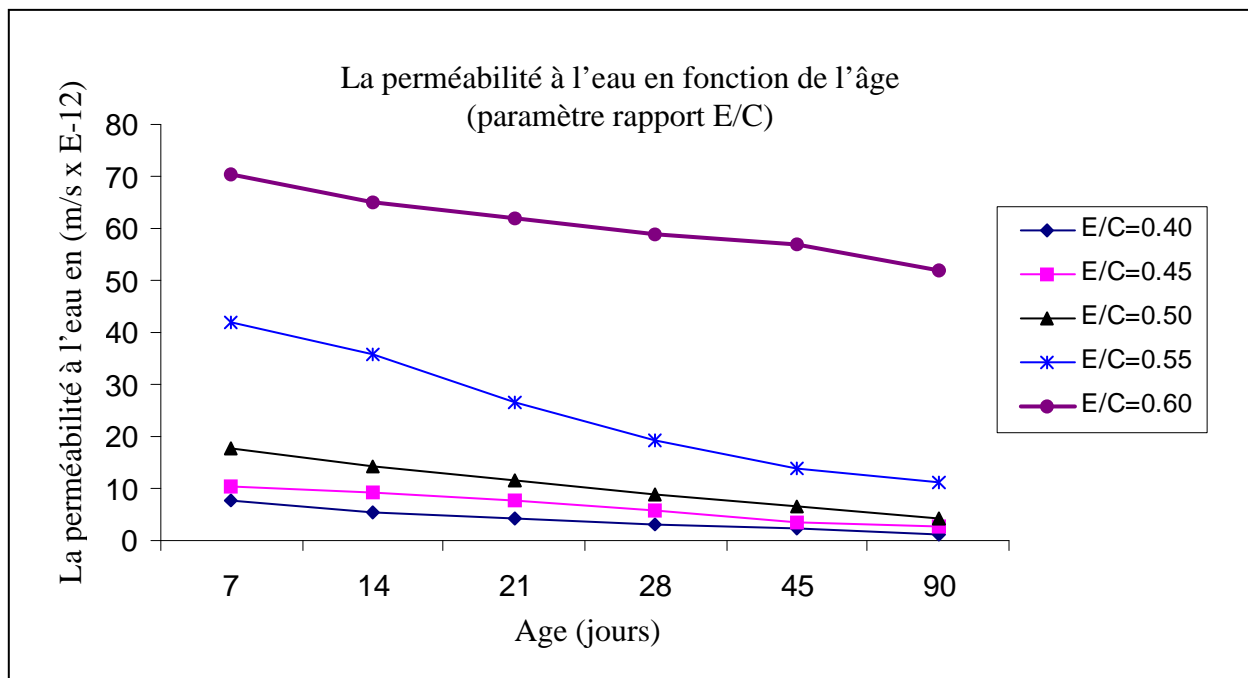


Figure IV-1 : la perméabilité à l'eau en fonction de l'âge

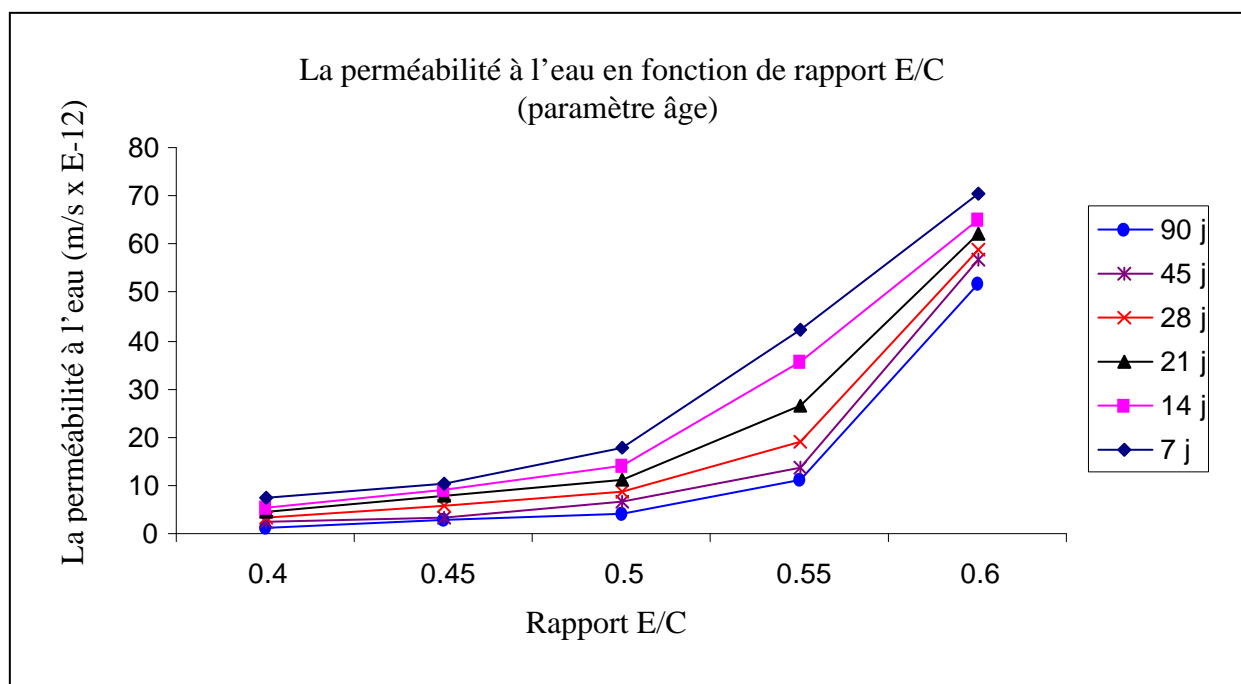


Figure IV-2 : la perméabilité à l'eau en fonction rapport E/C

Commentaire :

Pour le rapport E/C=0.4, on remarque qu'il y a une diminution de coefficient de perméabilité assez important entre l'intervalle (7j – 14j) caractérisé par une pente importante (figure IV-1). Cette pente diminue progressivement dans les intervalles (14j – 21j) et (21j – 28j), on peut donc constater selon les connaissances de la cinétique des réactions chimiques que dans les premiers temps, la vitesse d'hydratation est rapide, causée par la formation importante des hydrates et traduit par une chute de coefficient de perméabilité remarquable.

Après le 28^{ème} jour, la diminution de coefficient de perméabilité est extrêmement lente par rapport à celle des premiers temps, parce que la majorité des hydrates sont déjà formées aux premiers temps.

Pour les rapports E/C =0.45, 0.5, 0.55, et 0.6 on observe une augmentation du coefficient de perméabilité en fonction de rapport E/C. Selon, [42] à partir d'un rapport E/C d'environ 0.40, l'excédent d'eau dans le béton frais est tel que la totalité de l'eau ne peut plus être liée par voie chimique ou physique lors du durcissement. L'excédent d'eau reste dans le béton en durcissement et donne ainsi lieu à une formation de pores capillaires relativement grands, de forme oblongue et reliés en réseau. c'est à dire qu'il y a plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater complètement tout le ciment. Après que tout le ciment se soit hydraté, ce surplus d'eau demeurera dans des pores capillaires (eau libre).

La vitesse d'hydratation pour le rapport E/C =0.45 dans l'intervalle (7j – 14j) est supérieure à celle constaté pour l'intervalle (14j – 21j) et (21j – 28j), c'est le même phénomène se produit pour E/C =0.4

Pour les rapports E/C=0.5, E/C=0.55 et E/C=0.6 c'est presque le même phénomène se produit, une augmentation de vitesse d'hydratation importante traduit par une pente élevé dans les intervalles (7j – 14j) à cause de l'influence de la quantité d'eau ajouté, puis une diminution de

coefficient de perméabilité très faible au delà du 28^{ème} jours parceque la plupart des éléments principaux du ciment sont complètement hydraté.

IV.2.2- Influence du rapport E/C sur la résistance :

Tableau IV-4 : Résultats d'essais de la résistance (MPa) en fonction du rapport E/C.

Temps (jours) \ Rapport (E/C)	7	14	21	28	45	90
0.40	32.8	37.52	40.5	45.36	46.57	48.6
0.45	27.8	29.56	31.59	36.17	37.52	41
0.50	23.21	24.57	27.54	32	34.02	36.72
0.55	19.56	21.06	24.7	28.75	30	32.12
0.60	14.71	16.47	19.16	21.06	23.08	25.37

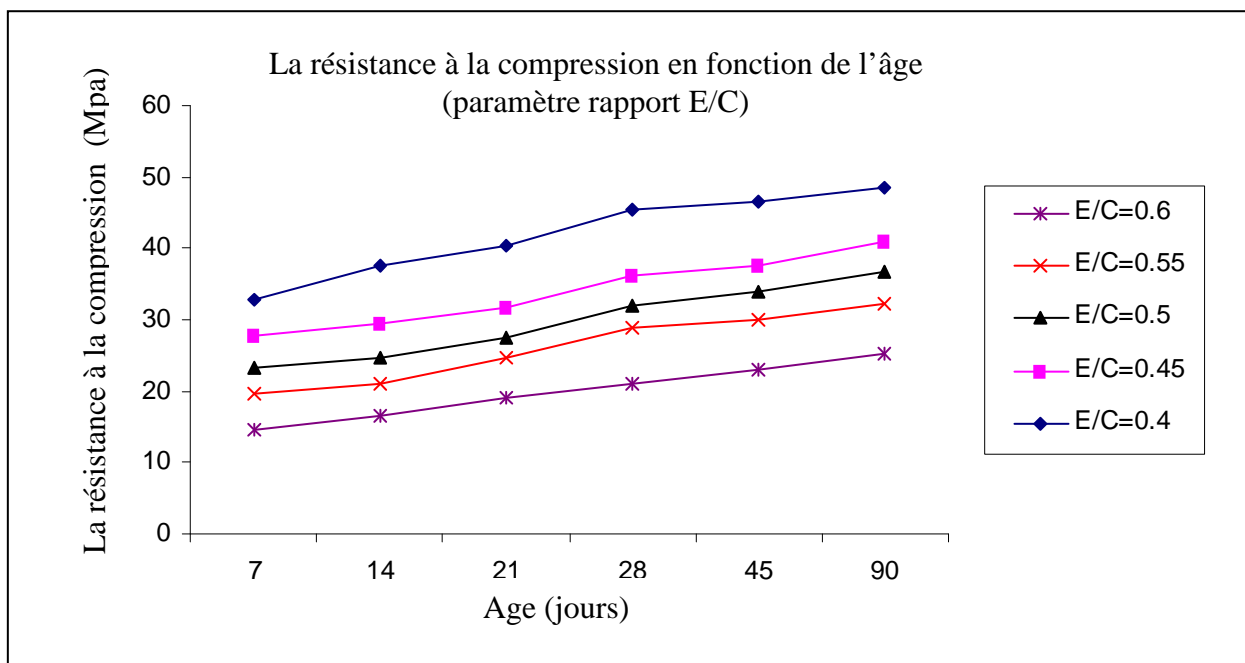


Figure IV-3 : la résistance à la compression en fonction de l'âge

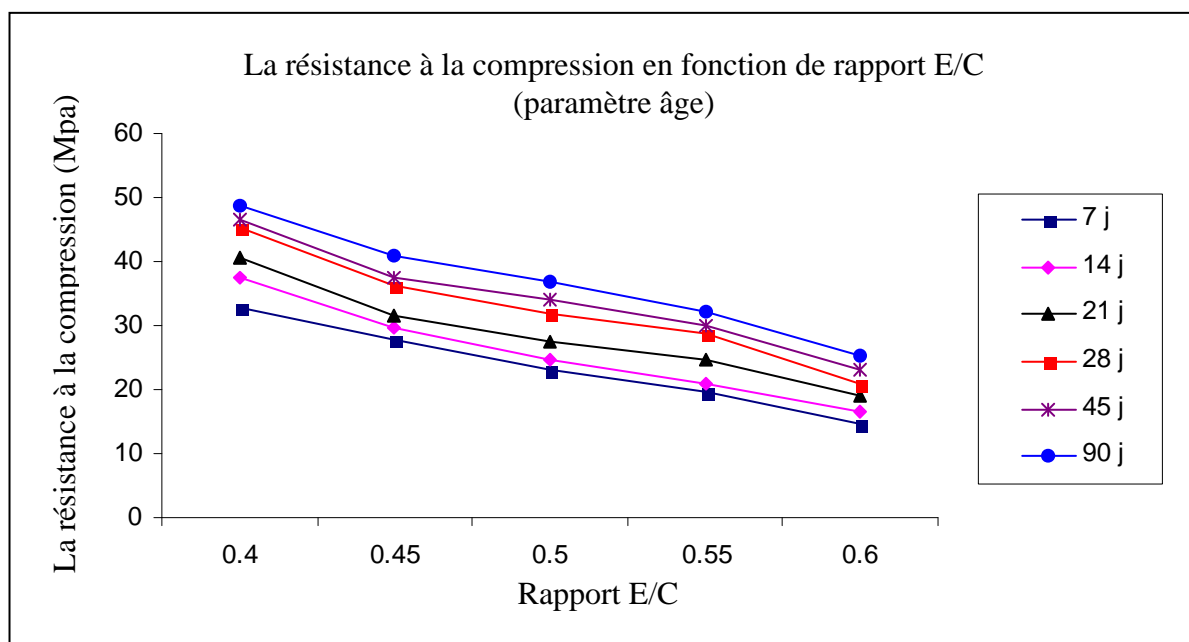


Figure IV-4 : la résistance à la compression en fonction de rapport E/C

Commentaire :

La diminution de la résistance en fonction de l'augmentation de rapport E/C est essentiellement à une manque de formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) qui participe le plus au développement de la résistance.

Le béton est un matériau qui évolue dans le temps, dont les caractéristiques se modifient rapidement aux jeunes âges (environ de 3 jours) [16]. En suite on note un ralentissement dans le développement des propriétés, en particulier les propriétés mécaniques, ainsi, l'accroissement des résistances mécaniques devient faibles au delà de 28^{ème} jours, en effet, les réactions d'hydratations ralentissent avec le temps, à la fois avec la diminution de la disponibilité de l'eau dans le matériau et de l'accroissement de l'épaisseur d'hydrates autour des grains anhydres limitant par la même les échanges diffusionnels entre les cœurs des grains anhydres et la solution interstitielle .

Cependant les réactions d'hydratations peuvent se poursuivre pendant plusieurs années surtout pour des bétons de faibles rapport E/C conservé en ambiance humide.

Pour le rapport E/C =0.4, on remarque qu'il y a une augmentation de la résistance très remarquable surtout dans l'intervalle (21j – 28j), caractérisé par une pente élevé (figure IV-3), au delà du 28^{ème} jours, on constate une évolution quasiment faible de la résistance, ceci est du essentiellement à la quantité des hydrates formées qui est plus grande dans l'intervalle (21j – 28j). au delà du 28^{ème} jour, la quantité d'hydrates formées diminue considérablement avec l'augmentation de l'âge de béton. Ceci s'explique par le fait que la quantité d'eau utilisée initialement est insuffisante pour le déroulement de toutes les réactions d'hydratations, en effet, il existe une manque de formation d'hydrates par rapport à celle obtenue dans l'intervalle (21j – 28j).

Conclusion :

La relation entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression est très nette. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évoluera très peu et atteint un niveau très faible.

Le rapport E/C exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car in gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

Plus le rapport E/C est faible, plus initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler les espaces intergranulaires. C'est en partie ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement leur résistance.

Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau pour une très faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et après d'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du béton sera très grande et ces propriétés mécaniques seront très faibles.

Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire. La perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées.

L'hydratation n'est jamais complète car les plus gros grains de ciment ne s'hydratent jamais complètement. A un certain stade de leur hydratation, ils sont recouverts d'une coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante. C'est pour cette raison qu'en pratique, même dans les pâtes fabriquées avec un rapport E/C très faible (E/C=0.25) il subsiste toujours une certaine porosité capillaire.

La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un rapport E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu.

IV-3 L'INFLUENCE DU RAPPORT G/S :

Le rapport G/S est un rapport entre la masse du gravier et la masse du sable. Dans notre étude, on a fait varier ce rapport de telle façon qu'on a une densité théorique constante. Ce rapport prend les valeurs suivantes : 1.6, 1.8, 2.0, 2.4, 2.6.

Les résultats obtenus sont illustrés ci-dessous au tableau IV-5 et IV-6 et schématisés sur les figures IV-3 et IV-4..

IV.3.1- Influence du rapport G/S sur la perméabilité :

Tableau IV-5 : la perméabilité (m/s) en fonction du rapport G/S.

Temps (jours) \ Rapport (G/S)	7	14	21	28	45	90
1.60	$201.3 \cdot 10^{-12}$	$156.7 \cdot 10^{-12}$	$132.4 \cdot 10^{-12}$	$98.3 \cdot 10^{-12}$	$88.8 \cdot 10^{-12}$	$82.1 \cdot 10^{-12}$
1.80	$51.3 \cdot 10^{-12}$	$47.5 \cdot 10^{-12}$	$39.3 \cdot 10^{-12}$	$31.0 \cdot 10^{-12}$	$28.1 \cdot 10^{-12}$	$24.4 \cdot 10^{-12}$
2.00	$9.89 \cdot 10^{-12}$	$8.30 \cdot 10^{-12}$	$6.98 \cdot 10^{-12}$	$5.33 \cdot 10^{-12}$	$4.27 \cdot 10^{-12}$	$3.45 \cdot 10^{-12}$
2.40	$25.4 \cdot 10^{-12}$	$21.1 \cdot 10^{-12}$	$17.2 \cdot 10^{-12}$	$14.8 \cdot 10^{-12}$	$13.5 \cdot 10^{-12}$	$10.8 \cdot 10^{-12}$
2.60	$37.2 \cdot 10^{-12}$	$34.4 \cdot 10^{-12}$	$28.7 \cdot 10^{-12}$	$25.9 \cdot 10^{-12}$	$19.7 \cdot 10^{-12}$	$16.8 \cdot 10^{-12}$

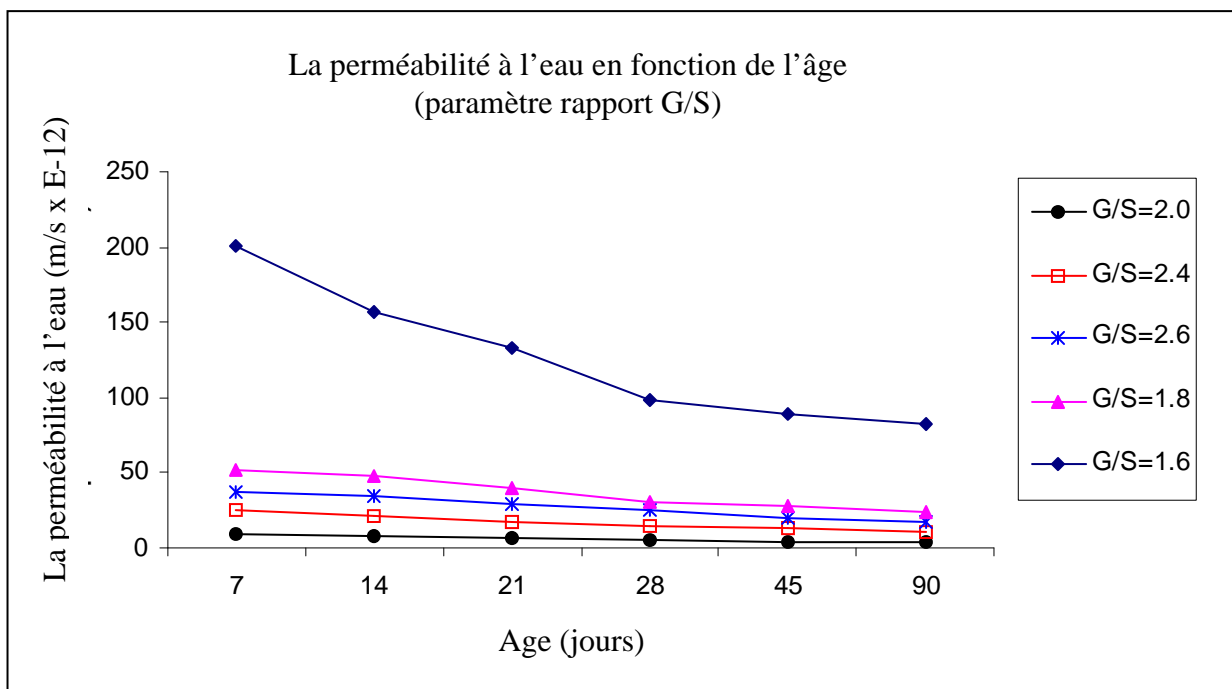


Figure IV-5 : la perméabilité à l'eau en fonction de l'âge

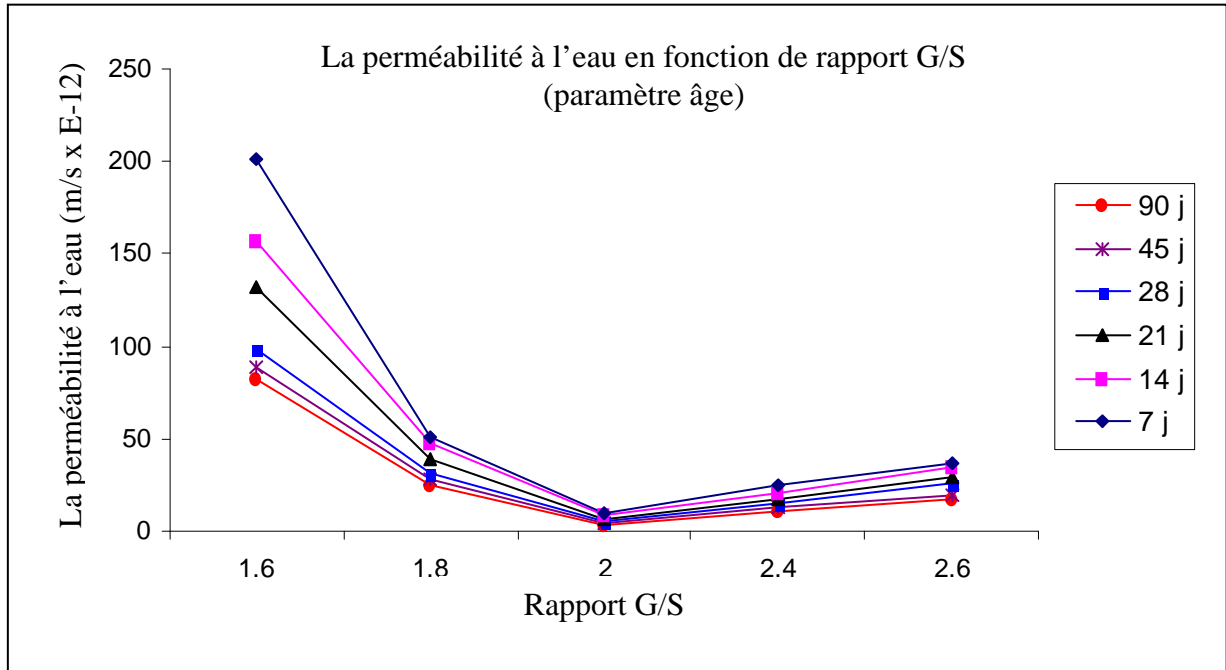


Figure IV-6 : la perméabilité à l'eau en fonction de rapport G/S

Commentaire :

Très peu d'études ont été consacrées à l'influence de ce paramètre sur la perméabilité. D'après la (figure IV-5) on constate qu'il y a une diminution de la perméabilité en fonction de l'augmentation du rapport G/S jusqu'à la valeur de rapport G/S =2. Au delà de cette valeur (G/S =2), la perméabilité commence à augmenter.

Les valeurs les plus élevées de la perméabilité sont obtenus pour le rapport G/S =1.6, ceci est du peut être à la présence d'une quantité de sable assez grande par rapport à la quantité de ciment, ce qui offre un chemin préférentiel pour le passage de l'eau.

Au delà de la valeur de rapport G/S =2, la perméabilité commence à augmenter, ceci est du essentiellement à la présence d'une interface pâte-granulats qui est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Elle présente souvent une plus grande densité de micro fissures.

IV.3.2- Influence du rapport G/S sur la résistance :

Tableau IV-6 : la résistance (MPa) en fonction du rapport G/S.

Temps (jours) \ Rapport (G/S)	7	14	21	28	45	90
1.60	13.1	14.98	17.01	18.22	18.9	20
1.80	17.01	19.03	21.33	23.9	25.23	26.73
2.00	21.46	22.95	26.45	30.37	31.6	32.8
2.40	22.94	24.7	26.86	31.18	32.8	35.36
2.60	25.11	26.18	28.75	32.52	35.36	37.53

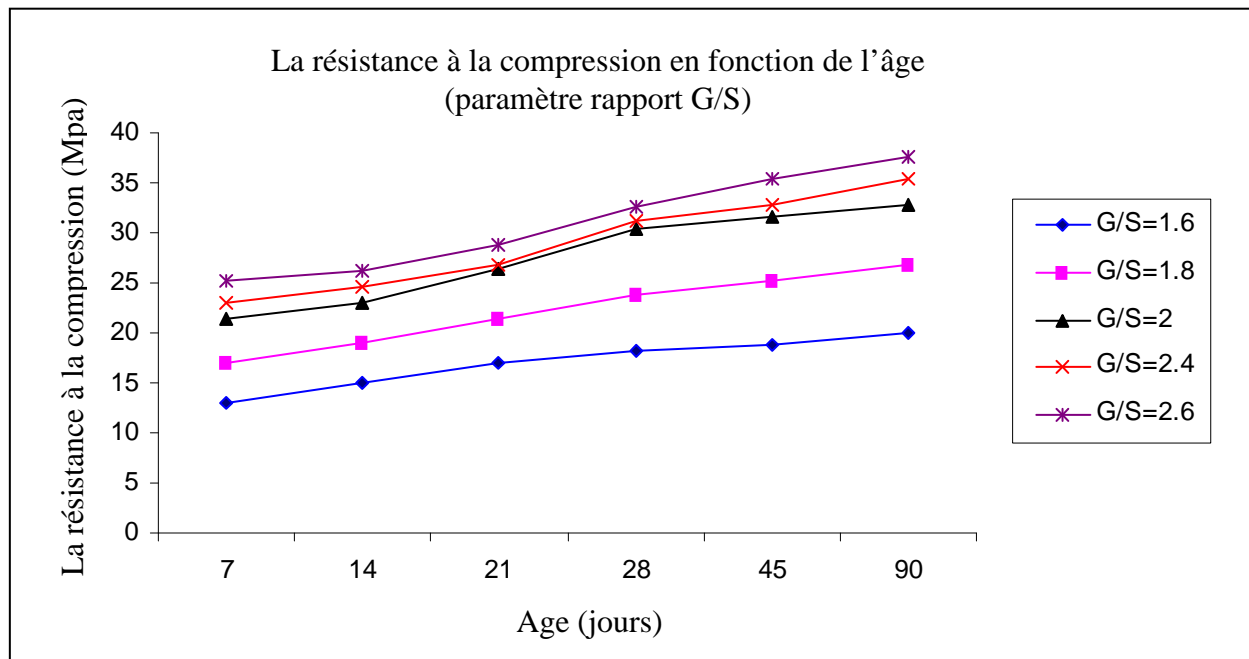


Figure IV-7 : la résistance à la compression en fonction de l'âge

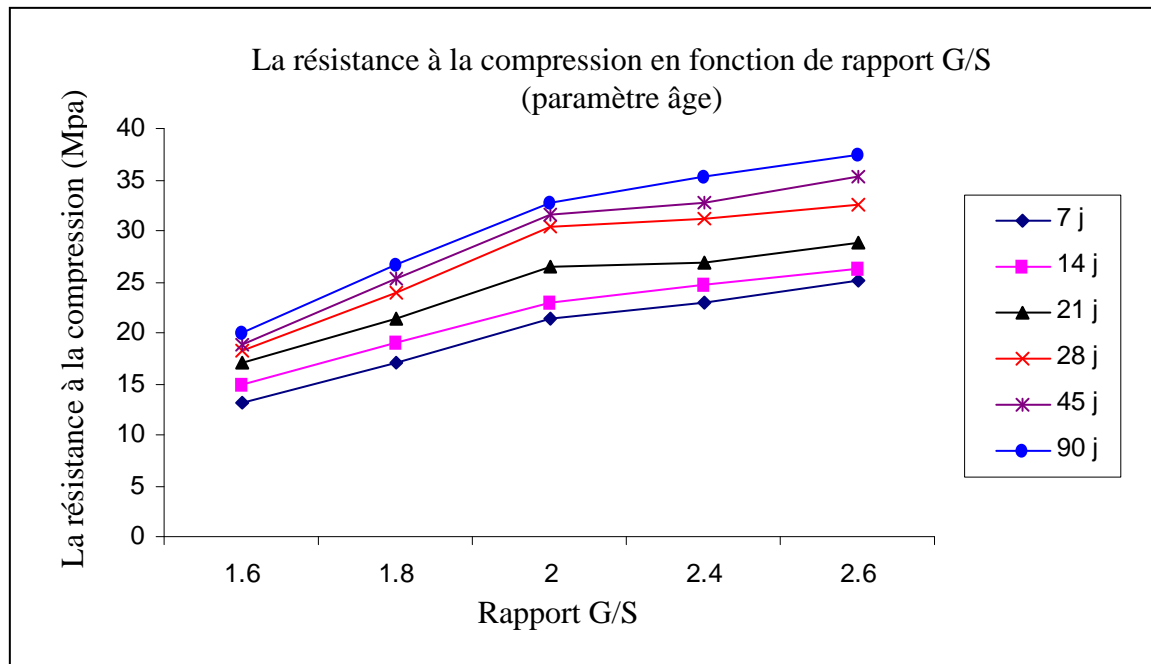


figure IV-8 : la résistance à la compression en fonction de rapport G/S

Commentaire :

D'après les figures IV-7 et IV-8 on observe qu'il y a une augmentation de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation de rapport G/S. ce phénomène est dû essentiellement à la présence d'une quantité importante du gravier qui offre au béton une résistance très remarquable.

L'allure des courbes illustrées sur les figures mentionnées ci-dessus est la même que celle obtenue pour le béton témoin. Ceci s'explique par les mêmes causes citées pour un béton témoin, ce qui confirme que le rapport G/S n'influe pas généralement sur le mécanisme d'hydratation au cours du temps.

Conclusion :

Dans la littérature, très peu d'études ont été consacrées à l'influence de ce paramètre sur la perméabilité. Nous avons montré l'influence de rapport gravier / sable sur la perméabilité et la résistance du béton.

Il est généralement admis que les propriétés de transfert couramment associées à la durabilité des bétons augmentent avec leur résistance mécanique. En ce qui concerne la perméabilité, les choses ne sont pas aussi claires ou univoques. Ce qui est confirmé par les résultats illustrés au tableau IV-5 et IV-6 et schématisés dans les figures IV-5, IV-6, IV-7, et IV-8 qui montrent que pour un rapport $G/S \leq 2$, la perméabilité décroît avec l'augmentation de la résistance, par contre, pour un rapport $G/S \geq 2$, la perméabilité croît avec l'augmentation de la résistance.

En ce qui concerne le rapport G/S, on remarque qu'il a un effet très remarquable sur la résistance à la compression du béton

IV-4 L'INFLUENCE DE LA DUREE DE VIBRATION :

La mise en oeuvre du béton frais se compose des étapes suivantes : mise en place, compactage et traitement ultérieur. Le béton frais doit être entièrement compacté, c'est à dire qu'il convient d'en extraire l'air afin qu'il forme une structure fermée, pour obtenir d'excellentes caractéristiques du béton durci et assurer ainsi la protection anticorrosion de l'armature. Ces conditions sont satisfaites lorsque le béton remplit entièrement le coffrage, entoure bien l'armature et ne présente pas de nids ou d'endroits non-étanches.

La vibration est le moyen le plus couramment utilisé pour assurer la mise en place du béton en coffrage. Elle a pour effet de liquéfier le béton autour de la zone d'action de vibrateur ce qui réduit considérablement les frottement internes des grains constituant le béton et permet un parfait remplissage des moules.

Dans cette partie, nous avons essayé d'étudier l'influence de durée de vibration sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton tel que la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression.

Les résultats d'essais sont illustrés ci dessous aux tableaux IV-7, IV-8 et schématisées sur les figures IV-9, IV-10, IV-11 et IV-12.

IV.4.1- Influence de la durée de vibration sur la perméabilité :

Tableau IV-7 : la perméabilité (m/s) en fonction du mode de vibration

durée de vibration Temps (jours)	Faible (10 s)	Moyenne (30 s)	Forte (45)	Très forte (120)
7	$381.5.10^{-12}$	$56.44.10^{-12}$	$43.97.10^{-12}$	$1730.3.10^{-12}$
14	$294.1.10^{-12}$	$42.11.10^{-12}$	$25.66.10^{-12}$	$1296.8.10^{-12}$
21	$252.2.10^{-12}$	$33.36.10^{-12}$	$16.17.10^{-12}$	$983.1.10^{-12}$
28	$181.7.10^{-12}$	$25.74.10^{-12}$	$8.55.10^{-12}$	$704.9.10^{-12}$
45	$115.6.10^{-12}$	$19.13.10^{-12}$	$5.40.10^{-12}$	$614.2.10^{-12}$
90	$94.8.10^{-12}$	$15.89.10^{-12}$	$3.05.10^{-12}$	$553.7.10^{-12}$

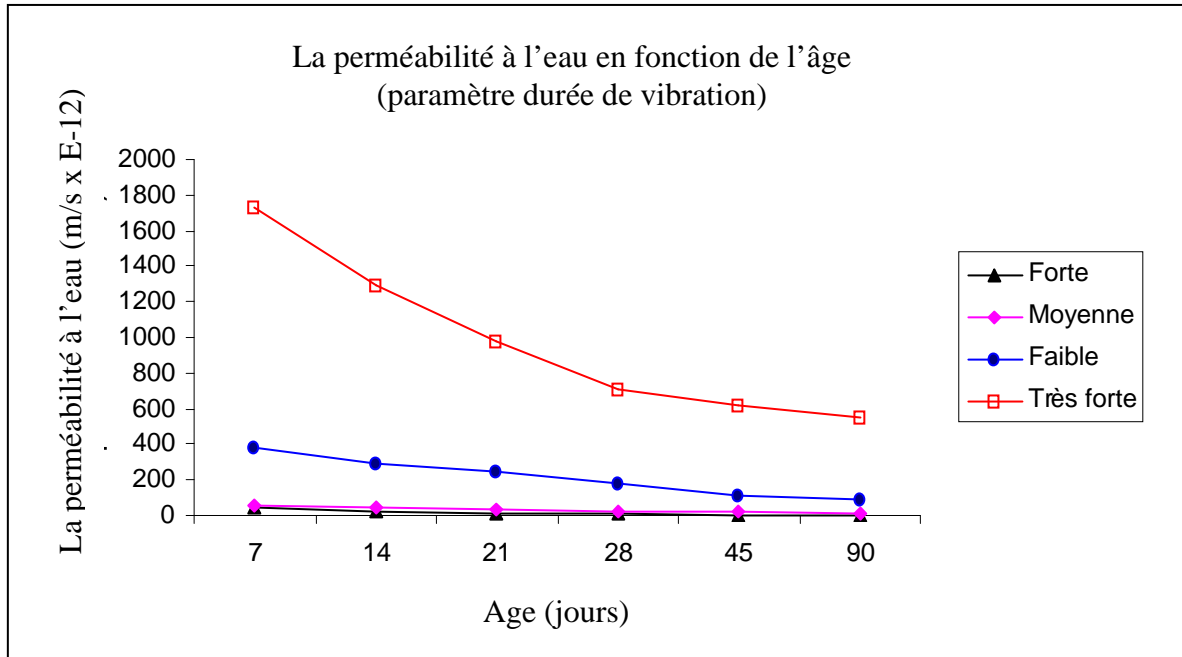


Figure IV-9 : la perméabilité à l'eau en fonction de l'âge

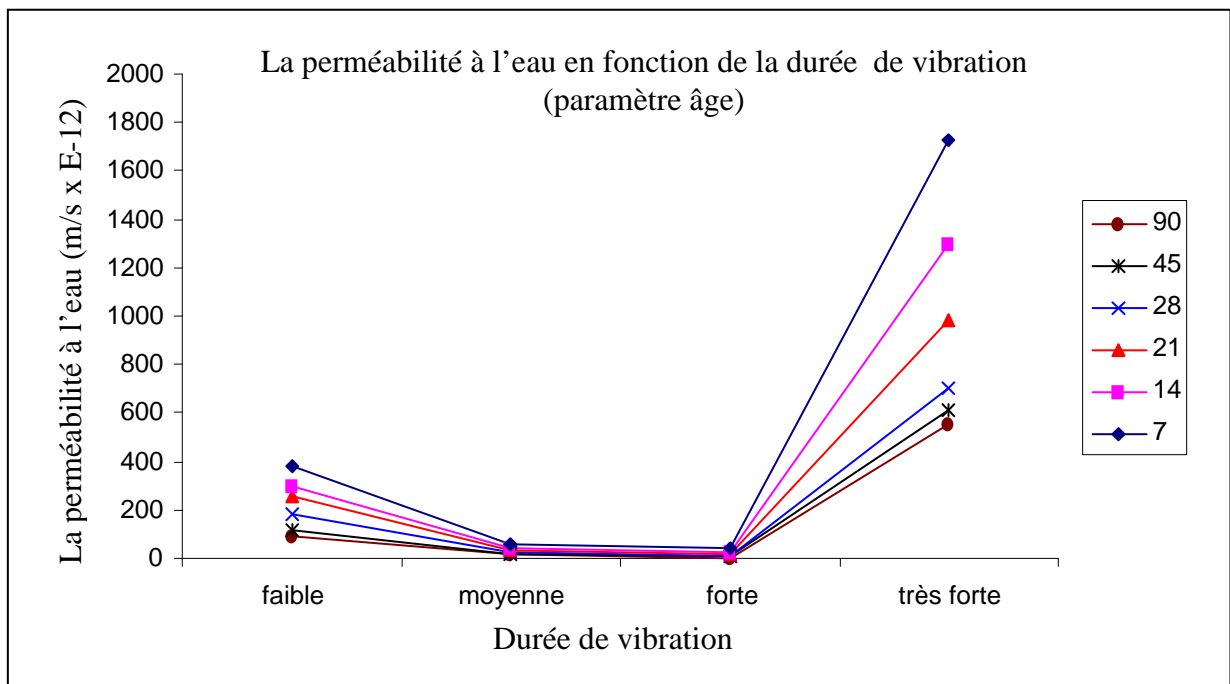


Figure IV-10 : la perméabilité à l'eau en fonction du durée de vibration

Commentaire :

Les résultats obtenus montrent que le temps de vibration influe considérablement sur la perméabilité du béton

Pour une vibration faible, on remarque qu'il y a une augmentation de perméabilité assez importante du essentiellement à une vibration insuffisante, qui provoque une mauvaise compacité ou par création des pores de compactages.

Cette perméabilité commence à diminuer en fonction de l'accroissement de temps de vibration jusqu'à un certain temps donné, au delà de cette limite, on observe une augmentation de perméabilité très remarquable. Ce phénomène est du essentiellement à une ségrégation interne, c'est à dire les éléments les plus lourds tendent à descendre, alors, qu'inversement l'eau remonte en surface entraînant le ciment.

IV.4.2- Influence de la durée de vibration sur la résistance :

Tableau IV-8 : la résistance en fonction du mode de vibration

Durée de vibration Temps (jours)	Faible (10 s)	Moyenne (30 s)	Forte (45 s)	Très forte (120 s)
7	15.33	24.33	26.50	10.50
14	17.50	26.83	29.33	13.33
21	20.43	34.66	35.83	15.33
28	21.66	39.5	44.00	16.66
45	23.33	42.83	47.33	18.83
90	24.75	44.33	48.50	19.16

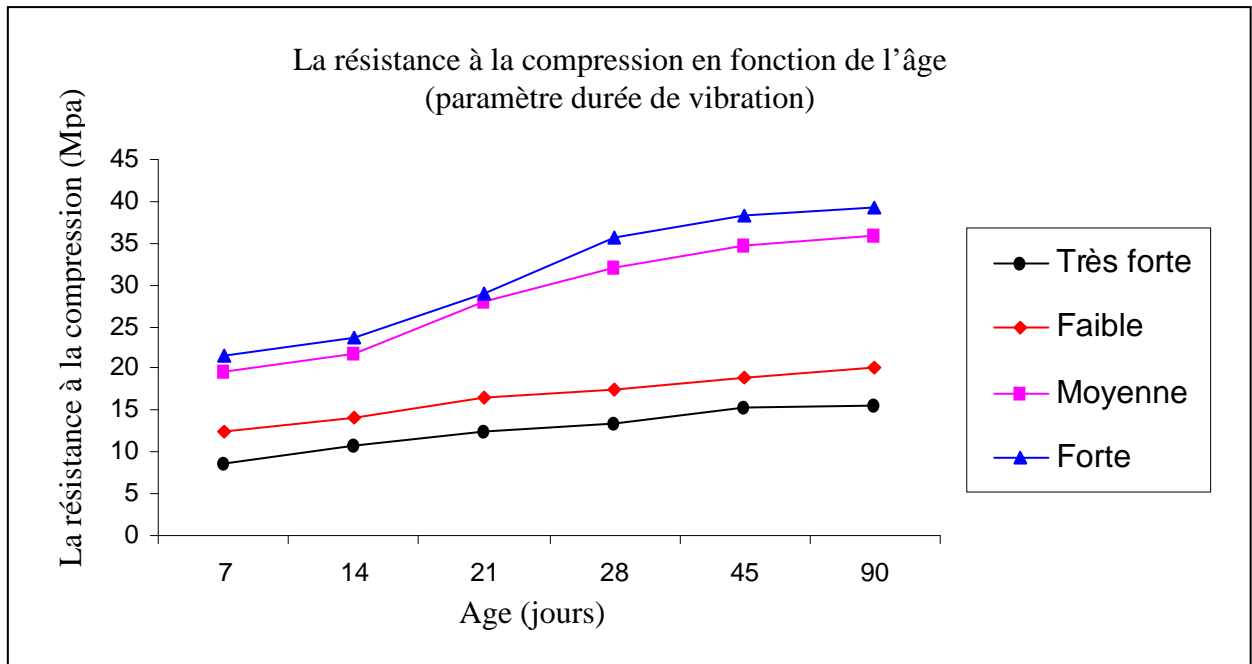


figure IV-11 : la résistance à la compression en fonction de l'âge

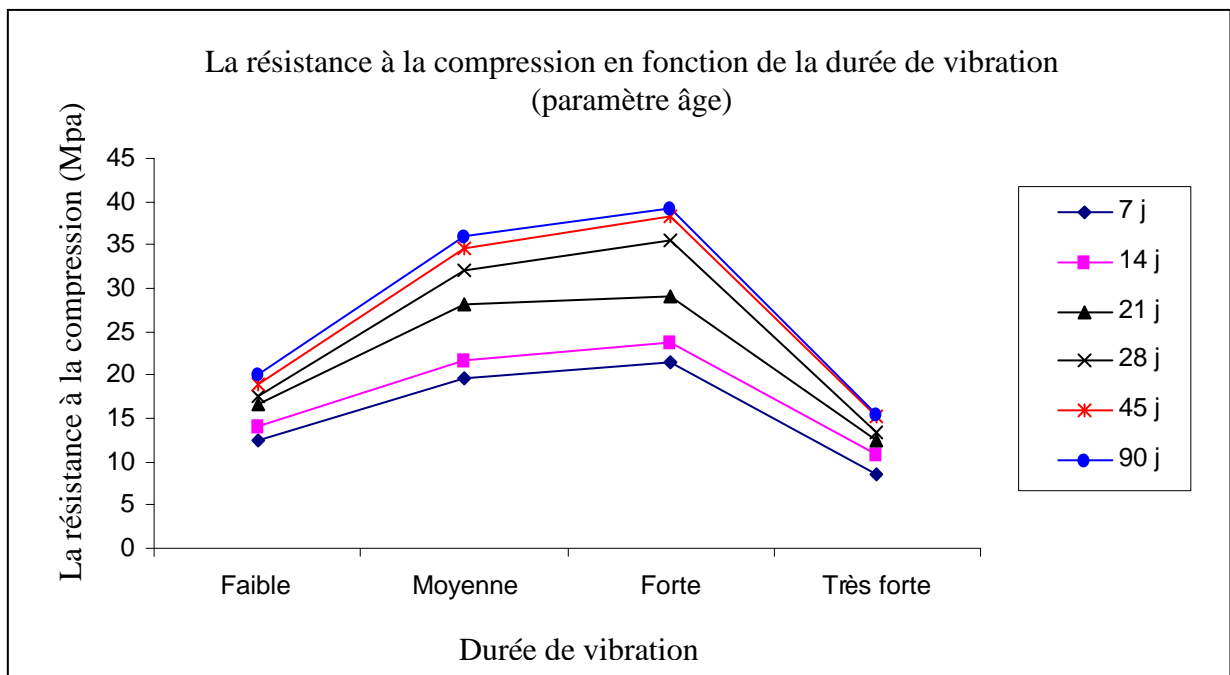


Figure IV-12 : la résistance à la compression en fonction de mode de vibration

Commentaire :

D'après les résultats présentés au tableau IV-8, et schématisés dans les figures IV-11 et IV-12, on remarque que le temps de vibration influe sur la résistance du béton.

Pour une vibration faible, la résistance diminue progressivement à cause d'une vibration insuffisante, qui provoque les pores de compactage dans le béton.

La valeur minimale de la résistance est obtenue pour une vibration très forte, ce phénomène est dû essentiellement à un excès de vibration qui provoque la ségrégation.

Conclusion :

Les résultats mentionnés ci-dessus, nous amènent à conclure ce qui suit :

La durée de vibration doit être suffisante pour assurer le serrage du béton, mais ne doit pas être prolongée au-delà du temps nécessaire sous peine de provoquer un début de ségrégation. En effet, la vibration agit très rapidement et efficacement dès qu'elle entre en action pour atteindre un palier limite, après quoi, l'air étant expulsé et les granulats serrés. Non seulement le prolongement de cette action n'améliore plus le résultat mais a un effet négatif, la laitance remontant en surface et les éléments les plus gros se ségrégant et cela d'autant plus rapidement que la plasticité du béton est plus grande.

La relation est très nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évaluera très peu et atteint un niveau très faible.

IV-5 L'INFLUENCE DU MODE DE CONSERVATION :

Le mode de conservation est un facteur très important, parce qu'il influe directement sur la vitesse de durcissement des bétons et aussi sur leur structuration.

Dans cette partie, nous allons voir l'influence du mode de conservation sur les caractéristiques mécaniques et physiques du béton, tel que la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression.

Les résultats d'essais sont regroupés ci dessous aux tableaux IV-9 et IV-10, et schématisés sur les figures IV-13 et IV-14.

IV.5.1- Influence du mode de conservation sur la perméabilité :

Tableau IV-9 : La perméabilité en (m/s) en fonction de mode de conservation

Mode de conservation Temps (jours)	A l'air	A l'eau
7	$873.59.10^{-12}$	$65.2.10^{-12}$
14	$627.54.10^{-12}$	$51.36.10^{-12}$
21	$518.36.10^{-12}$	$43.58.10^{-12}$
28	$456.73.10^{-12}$	$35.74.10^{-12}$
45	$845.14.10^{-12}$	$27.98.10^{-12}$
90	$1893.25.10^{-12}$	$21.27.10^{-12}$

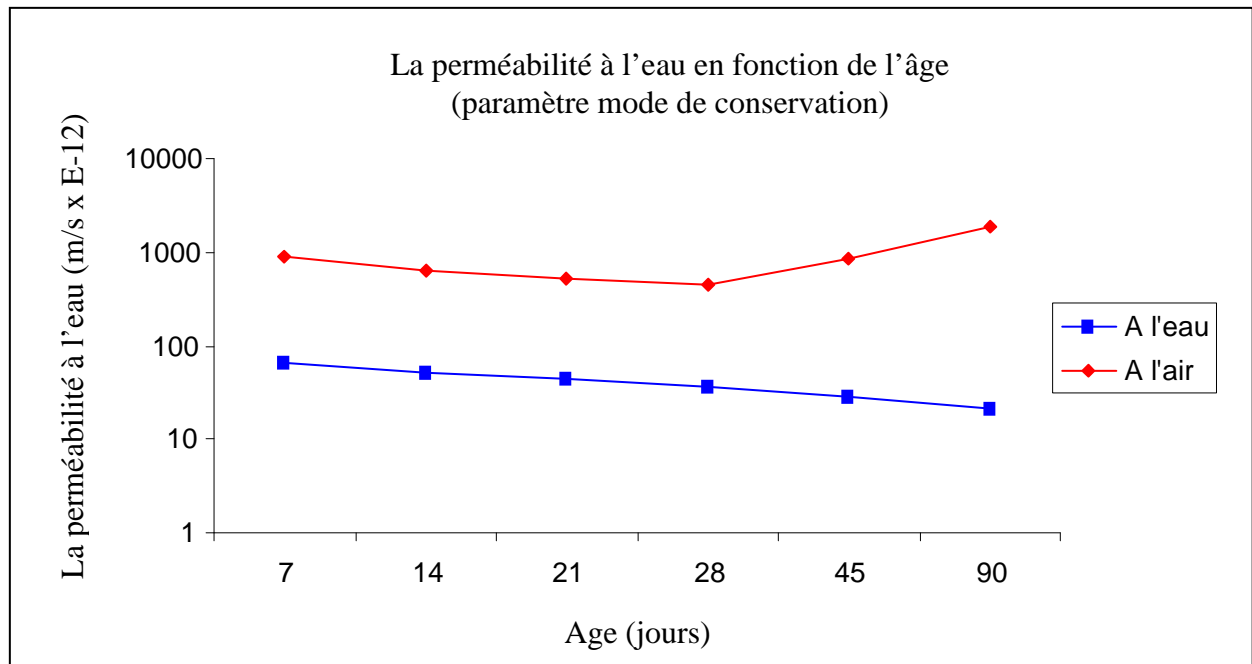


Figure IV-13 : la perméabilité à l'eau en fonction de l'âge

Commentaire :

D'après la figure illustrée ci dessus, on remarque qu'il y a un grand écart entre la perméabilité d'un béton conservé à l'eau, et un béton conservé à l'air, d'ou on trouve que pour un béton conservé l'air, la perméabilité diminue en fonction de temps jusqu'au 28^{ème} jours, au delà de cette limite, la perméabilité commence a augmenter. Ceci, peut être expliqué par le fait que, le béton conservé à l'air perdent une grande quantité de son eau avant le 28^{ème} jours, ce qui empêche l'hydratation du ciment, ce phénomène traduit par une forte valeur de perméabilité.

Par contre, pour un béton conservé à l'eau, il n' y a plus de départ d'eau, et l'hydratation de ciment peut se poursuivre pour former les hydrates.

IV-5-2- Influence du mode de conservation sur la résistance :

Tableau IV-10 : La résistance à la compression en fonction de mode de conservation :

Mode de conservation Temps (jours)	A l'air	A l'eau
7	16.78	21.36
14	18.52	24.41
21	21.39	28.21
28	22.68	31.57
45	18.19	33.85
90	14.97	35.67

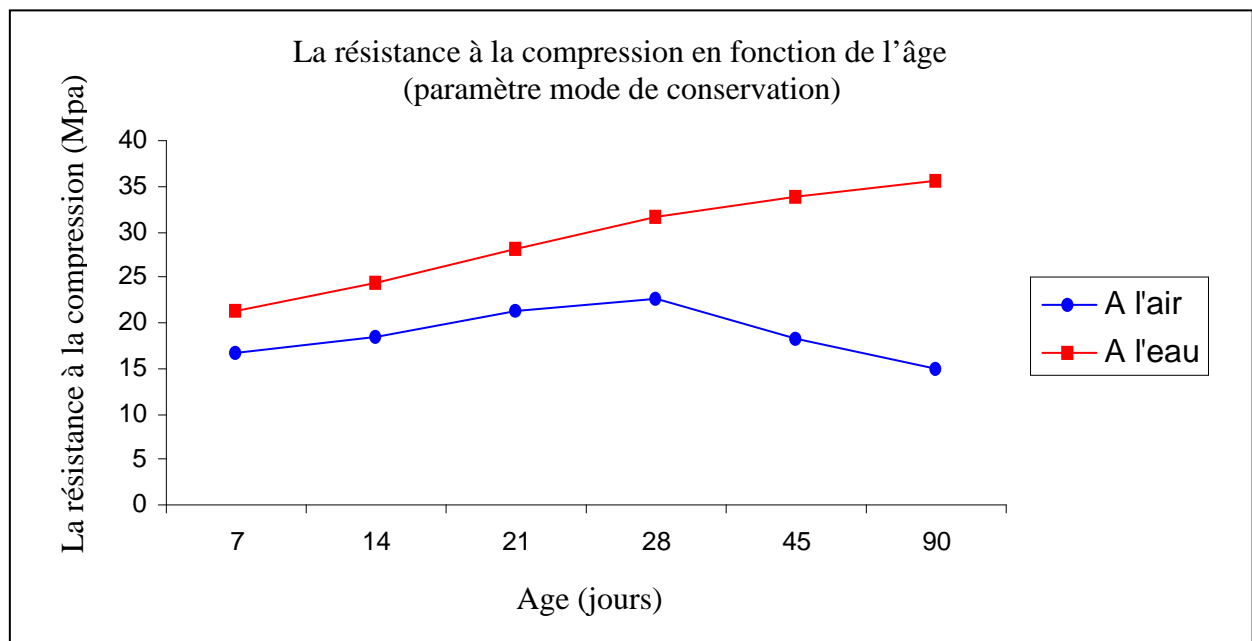


Figure IV-14 : la résistance à la compression en fonction de l'âge

Commentaire :

D'après la figure illustrée ci dessus, on remarque qu'il y a un grand écart entre les deux modes de conservation. D'où on trouve comme il été indiqué précédemment, que la résistance d'un béton conservé à l'eau augmente en fonction du temps, et atteint des valeurs très élevées. Ce phénomène est du essentiellement par le fait que le béton est bénéficie d'être conservé à l'eau pendant la période d'hydratation c'est à dire il n'y a plus de départ d'eau, qui empêche l'hydratation du ciment. Par contre, le béton conservé à l'air, perd son eau pendant la période de l'hydratation ce qui empêche l'hydratation de ce continuer, ceci peut être expliqué par le fait que la quantité des hydrates formées est très faible ce qui influe sur la structure interne du béton.

Conclusion :

Il s'avère donc, que le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quant ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite. Donc, l'humidité interne d'un béton varie dans le même sens que celle du milieu ambiant. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau. C'est à dire un degré d'humidité de 100%.

La relation est très nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évoluera très peu et atteint un niveau très faible.

Conclusion générale :

Notre travail avait un objectif principal qui était l'étude de l'influence des facteurs de composition et de mise en œuvre d'un béton à base des matériaux locaux de la région de M'sila Sur ça perméabilité à l'eau et ça résistance.

Les facteurs pris en compte sont :

- Rapport Eau / Ciment
- Rapport Gravier / Sable
- Durée de vibration
- Mode de conservation

Il s'agit ensuite d'établir une corrélation entre la perméabilité à l'eau du béton étudié, les conditions de mise en œuvre et les facteurs de composition afin de fixer des exigences d'utilisation dans un environnement local préjudiciable (climat chaud et milieu agressif).

Après l'identification expérimentale de ces paramètres et leurs effets sur la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression, nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

1/- La perméabilité à l'eau d'un béton augmente proportionnellement avec le rapport E/C. Lorsque le rapport E/C augmente, le béton frais devient plus plastique et son ouvrabilité ainsi que sa compactibilité s'améliorent. Par contre, la qualité d'un béton après durcissement est d'autant meilleure que le rapport E/C est faible.

2/- D'une façon générale, la relation entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression est très nette. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance, cependant pour des résistances très élevées, la perméabilité évaluera très peu et atteint un niveau très faible.

3/- la résistance à la compression augmente proportionnellement avec le rapport G/S. Donc, la présence d'une quantité importante du gravier, offre au béton une résistance très remarquable.

4/- la perméabilité à l'eau d'un béton diminue avec l'augmentation du rapport G/S, jusqu'à la valeur $G/S=2$. au delà de cette valeur, la perméabilité commence à augmenter.

5/- La durée de vibration doit être suffisante pour assurer le serrage du béton, mais ne doit pas être prolongée au delà du temps nécessaire sous peine de provoquer un début de ségrégation. En effet la vibration agit très rapidement et efficacement dès qu'elle entre en action pour atteindre un palier limite, après quoi, l'air étant expulsé et les granulats serrés, non seulement le prolongement de cette action n'améliore plus le résultat mais a un effet négatif, la laitance remontant en surface et les éléments les plus gros se ségrégant et cela d'autant plus rapidement que la plasticité du béton est plus grande.

6/- le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quant ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau. C'est à dire le degré d'humidité est 100%.

Pour atteindre notre objectif, et fixer des exigences d'utilisation dans un environnement local préjudiciable, nous proposons les recommandations suivantes :

1/- contrôler la composition du béton choisie et de la consistance prévue à partir des exigences auxquelles doivent satisfaire le béton frais et le béton durci compte tenu des conditions du chantier concerné. Si l'on utilise, comme cela se fait souvent dans la pratique, des granulats humides, il convient de diminuer la teneur en eau déterminée pour le projet de mélange, afin de réduire l'eau de surface des granulats

2/- Utiliser des granulats présentant une meilleure composition granulométrique

3/- choisir un rapport $E/C \leq 0.4$, En partant de l'hypothèse d'une hydratation complète une quantité d'eau proportionnellement faible est nécessaire au durcissement du béton. Le ciment ne peut lier qu'une quantité d'eau environ équivalente à 40 % de sa masse (env. 25 % chimiquement et 15 % physiquement). Ceci correspond à un rapport E/C de 0.40. Un béton possédant un rapport E/C de 0.40 n'est cependant pas ouvrable. En pratique, on introduit un adjuvant, pour améliorer l'ouvrabilité et la compactibilité du béton.

4/- protéger le béton jeune contre les pertes d'eau, au moins pendant les premiers temps qui suivent sa mise en place, jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance suffisante par l'adjonction d'un retardateur de durcissement.

5/- La durée de vibration doit être suffisante pour assurer le serrage du béton, mais ne doit pas être prolongée au delà du temps nécessaire sous peine de provoquer un début de ségrégation.

6/- Pour remédier tous ces problèmes, et constituer un béton présentant une durabilité exceptionnelle, il suffit, d'assurer que sa composition soit correcte et sa mise en oeuvre réalisée avec soin.

Références Bibliographiques :

- [1] propriétés des bétons ADAM M.NEVILLE p 463
- [2] la résistance du béton aux altérations physiques et chimiques, dans le béton hydraulique, édité par j, Baron et R. Sauterey, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2 85978-033-5, p 513-530
- [3] bétons Haute performance PIERRE – CLAUDE AITCIN P 535
- [4] la durabilité des bétons : conception des bétons. La structure poreuse M. Buil et j-p. Ollivier
- [5] K. WANG, D.C. JANSEN, S.P.SHAN : Permeability Study of Cracked Concrete, Cement and Concrete Research, Vol, 27 , N°3, 1997 , pp. 381-393
- [6] [tiré de metha, 1986 concrete structure, properties, and materials, prentice-hall, 450 p.]
- [7] www.ch.skw-mbt.com/french/lexikon/wz.htm
- [8] Weber, Schwara, Tegelaar, Soller, "Guter Beton", Betonverlag, Düsseldorf, 1995
- [9] Séminaire International Geomat, M'sila, Algérie 10-11 Mars 2003
- [10] EN 206, "Béton - Part 1: Spécification, performances, production et conformité", Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles, 1999
- [11] Norme SIA 162/1, "Ouvrages en béton - Essais des matériaux", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1989
- [12] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, "DAfStb-Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel", 1995
- [13] [Tiré de Mailvaganam N.P.1991, Repair and protection of concrete structures, CRC Press]
- [14] durabilité et réparation du béton GCI-714 Université de cherbrooke.
- [15] [tiré de pigeon 1981 composition et hydratation du ciment portland, séminaire progrès dans le domaine du béton, Québec, septembre 1981, p. 36-72]
- [16] les matériaux cimentaires ANDRA Référentiel matériaux tome 03
- [17] BARON J.& OLLIVIER J.P.(1992) – la durabilité des bétons. Presse de l'ENPC.
- [18] BENTZ D. et GARBOCZI E. (1992) – modelling the leaching of calcium hydroxyde from cement paste : effects on pore space percolation and diffusivity. Materials and structures. 25, 523-533.
- [19] FELDMAN R.F. et HUANG CHENG-HY (1985) – properties of Portland cement-silica fume pastes. 1, porosity and surface properties, cem.concr.Res., 15,765-774
- [20] FELDMAN R.F (1983) – significance of porosity measurement on blended cement performance. 1st inter.conf. on use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, Montebello, V.M. malhotra Ed., ACI, SP 79, 1, 415-433
- [21] OLLIVIER J.P. (1981) – contribution à l'étude de l'hydratation de la pate de ciment portland au voisinage des granulats, thèse de l'INSA de Toulouse.
- [22] BOURDETTE B. , RINGOT E. et OLLIVIER J.P. (1995) – modelling of the transition zone porosity. Cem.concr.Res.25,741-751.
- [23] Rapport de stage de DEA Sébastien Gorka université de Lille 2002

- [24] D.C HUGUES : pore structure and permeability of hardened cement paste – magazine of concrete research, vol, 37, N°133, December 1985, pp. 227-233.
- [25] BHP . YVES MALIER, presse ponts et chaussées. Juin 97
- [26] DIENES J.K , permeability , percolation and statistical crack mechanics issues in rock mechanics american institute of mining, metallurgical and petroleum engineers N.Y . R.E goodman
- [27] KATZ A. J. THOMSON A.H. (1986) . A quantitative prediction of permeability in porous rocks . phys B.vol.24. pp. 8179.8181.
- [28][Tiré de Nehdi, M. 1993 Mécanismes de transfert de masse dans le béton comme critère de durabilité : Application in situ aux bétons de barrage. Thèse de maîtrise, département de génie civil, université de Sherbrooke, 127p.]
- [29] [Tiré de Powers, T.C. 1959 Capillary continuity or discontinuity in cement paste, Journal of the PCA research and development laboratories, Vol. 1, N° 2,p38-48]
- [30] [Tiré de Report of a Concrete Society Working Party, 1988, permeability testing of site concrete: a review of methods and experience, Concrete society technical report no 31, London, 131 p.]
- [31] LAWRENCE C.D. (1985) – water permeability of concrete. Concrete society materials research seminar – serviability of concrete- , slough.
- [32] POWERS T.C.COPELAND L.E. HAYES J.C. et MANN H.M.(1954) – permeability of Portland cement paste .j. Amer . concr. Inst., 51,3,285-298.
- [33] MASO J.C. (1996) – interfacial transition zone in concrete. RILEM report 11, E et FN SPON , Ed. chapman and hall
- [34] FIGG J.W. (1973) – methods of measuring the air and water permeability of concrete 25. N° 85, 213-219.
- [35] CARCASSES M., PETIT J.Y. & OLLIVIER J.P. (1998) – Gaz permeability of mortars in relation with the microstructure of interfacial transition zone (ITZ). RILEM international conference on the interfacial transition zone in cementitious composites, 8-12 mars 98, Haifa (Israel).
- [36] CONCRETE MANUAL (1975) – 8th edition ,U,S bureau of reclamation.
- [37] [Tiré de Whiting, D. 1988 Permeability of selected concretes, Permeability of concrete ACI SP-108, p. 195-222.]
- [38] YSSORCHE M.P. (1995) – microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances. Thèses de doctorat de L'INSA de toulouse.
- [39] DHIR R.K HEWLETT P.C & CHAN Y.N .(1989) –Near surface characteristics of concrete : intrinsic permeability . mag, concr, res, 41n° 147,87-97
- [40] PERRY R.H. & CHILTON C.H. (1973) – chemical engineer's handbook 5th edition. Mc Graw Hill Eds.
- [41] GLANVILLE W.H. (1931) – the permeability of portland cement concrete london, HMSO, 62 pp., department of scientific and industrial research, building research, technical paper n°3.
- [42] Weigler H., Karl S., "Beton / Arten-Herstellung-Eigenschaften", Ernst, Berlin, 1989.