



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

**THÈSE**

Présentée pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en sciences

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux

Par

**Abderrachid AMRIOU**

Intitulée

***EVALUATION DE LA DURABILITE DU BETON PAR ESSAIS DE PERMEABILITE A L'EAU SOUS CONDITIONS CLIMATIQUES ET CHIMIQUES PREJUDICIALES***

Soutenue publiquement le 19/03/2018, devant le jury :

Dr. KHEMISSA Mohamed,	Prof,	Université de M'sila,	Président
Dr. BENCHEIKH Mohamed,	Prof,	Université de Msila,	Rapporteur
Dr. BOUDAUD Zine Eddine,	Prof,	Université d'Oum El Bouaghi,	Examinateur
Dr. MESSAOUDENE Ibrahim,	M.C.A,	Université de B.B.Arréridj,	Examinateur
Dr. RAHMOUNI Zine-El- Abidine,	Prof,	Université de M'sila,	Examinateur

Année : 2017/2018

## Avant-Propos

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du laboratoire du développement des Géo matériaux à l'université de Msila (Algérie).

Dans le but de réaliser ce document et le travail qu'il comporte, j'ai largement bénéficié de l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse BENCHEIKH Mohamed pour avoir guidé mes pas tout au long de cette recherche. Ses conseils, son encouragement et son soutien précieux et indispensable. Je voudrais également remercier les membres de mon jury de thèse, Messieurs KHEMISSA Mohamed, BOUDAUD Zine Ed-dine, MESSAOUDENE Ibrahim et RAHMOUNI Zine El Abidine pour l'attention qu'ils ont bien voulu porter à cette thèse.

Je remercie les membres du laboratoire du développement des Géo matériaux à l'université de Msila et en particulier Monsieur le Directeur pour leurs aides en mettant à ma disposition les outils qui m'ont permis de terminer le présent travail.

Je voudrais également remercier mes amis Messieurs Seddiki AHMED, MEKKI Lakhder et BENAICHI Elhadj pour leurs encouragements et leurs soutiens précieux.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je remercie enfin tous les membres de ma famille et mes amis pour leur indispensable et chaleureux soutien tout au long des années de travail de cette thèse.

*À mes très chers parents,  
À tous ceux qui m'ont aidé  
À tous ceux qui me sont chers*

**RESUME**

La durabilité peut être évaluée par la perméabilité qui est fonction de la facilité avec laquelle les fluides (eau ou gaz) peuvent pénétrer et déplacer à travers le béton.

Dans la première partie de ce travail, nous présentons l'étude des effets climatiques préjudiciables caractérisés par l'élévation de température pendant la saison de l'été et de l'humidité du climat sur la perméabilité à l'eau du béton. Ensuite, l'influence des effets précédents sur la porosité accessible à l'eau et sur la résistance à la compression du béton. Ainsi, on présente l'effet de la porosité et la résistance à la compression sur la perméabilité à l'eau du béton.

L'étude expérimentale a été réalisée sur des échantillons de béton avec un rapport E/C variable afin d'obtenir un béton ferme et un béton très plastique. Une partie des échantillons a subi une cure standard à l'eau, alors qu'une seconde partie a été conservée à l'air libre.

La deuxième partie de ce travail consiste à l'étude de l'influence des conditions chimiques sur la perméabilité à l'eau du béton. L'étude expérimentale comporte des échantillons de béton conservés dans l'acide sulfurique, le sulfate de magnésium et le sulfate d'ammonium. Les résultats obtenus seront comparés avec ceux d'un béton qui a subi une cure standard à l'eau.

Afin d'évaluer le coefficient de perméabilité à l'eau du béton, nous proposons dans cette thèse une nouvelle méthode expérimentale basée sur l'écoulement latéral de l'eau à travers une éprouvette cylindrique creuse.

À travers cette étude expérimentale, nous avons abouti à une relation qui relie le rapport E/C et le mode de conservation à la perméabilité à l'eau du béton. Ensuite, une relation entre la perméabilité à l'eau et la porosité accessible à l'eau du béton d'une part et d'autre part entre cette perméabilité et la résistance à la compression du béton.

Une conservation du béton dans un acide ou un sulfate peut ralentir à court terme la pénétration des fluides par la précipitation du gypse à travers la surface des échantillons, mais à long terme la réaction de ce gypse avec les hydrates du ciment peut conduire à la formation de composés nocifs pour le béton.

Mots clés :

Durabilité – Perméabilité à l'eau – Porosité – Essai de perméabilité – Cure- Acides – Sulfates

### *Abstract*

The durability can be assessed by the permeability that is a function of the ease with which fluids (water or gas) can penetrate and move through the concrete.

In the first part of this work, we present the study of adverse climatic effects characterized by the rise of temperature during the summer season, solar radiation and wind, on the water permeability of concrete. Then, the influence of previous effects on the porosity accessible to water and on the compressive strength of concrete. Thus, the effect of porosity and compressive strength on the water permeability of concrete is presented. The experimental study is carried out on concrete samples with a variable E / C ratio to obtain a firm concrete and a very plastic concrete. Some of the samples underwent a standard water cure, while a second part was kept in the open air outside the laboratory.

The second part of this work consists in studying the influence of chemical conditions on the water permeability of concrete. The experimental study has samples concretes preserved in sulfuric acid, magnesium sulphate and ammonium sulphate. The results obtained will be compared with those of a concrete which has undergone a standard cure with water.

The water permeability tests are carried out using a new experimental method based on a transverse flow of water through a hollow cylindrical test piece.

Experimental results have shown that the E / C ratio and cure mode significantly affect the water permeability of concrete. Between this permeability and the porosity accessible to water and the compressive strength of concrete, there is a direct relationship. In the end, acids and sulfates can have a beneficial effect with respect to porosity and permeability by gypsum precipitation at the surface and in the porosity of the concrete.

Keywords :

Durability - Permeability to water - Porosity - Permeability test - Cure - Acids – Sulfates

## الملخص

ديمومة الخرسانة يمكن تقييمها بواسطة النفاذية المرتبطة بالسهولة التي يتم بها السوائل والغازات من النفاذ والجريان من خلال الخرسانة.

في الجزء الأول من هذا العمل نقدم دراسة تأثيرات العوامل المناخية المضرة والمتعلقة أساسا بارتفاع درجة الحرارة خلال فصل الصيف والمناخ الجاف على نفاذية الخرسانة للماء. ثم نقوم بدراسة تأثير نفس العوامل على الفراغات التي تسمح بجريان المياه عبر الخرسانة وكذا على مقاومة الخرسانة للضغط.

الدراسة التجريبية تمت على عينات من الخرسانة محضرة بمعامل (الماء/الإسمنت) متغيرة بهدف الحصول على خرسانة يابسة وسائلة أي سهلة الوضع. جزء من العينات تم حفظها في الماء وجزء آخر في الهواء الطلق خارج المخبر.

الجزء الثاني من هذا العمل يتمحور حول دراسة تأثير الخصائص الكيميائية على نفاذية الخرسانة للماء. الدراسة التجريبية تمت على عينات من الخرسانة محفوظة في ثلاث وسائط كيميائية (حمضية أو كبريتية) والنتائج المتحصل عليها يتم مقارنتها مع خرسانة محفوظة بطريقة مرجعية في الماء.

التجارب على نفاذية الخرسانة تمت بطريقة تجريبية جديدة تعتمد على السيلان الأفقي للماء من خلال عينة اسطوانية من الخرسانة مثقوبة طوليا.

النتائج المتحصل عليها بينت أولا أن نفاذية الخرسانة للماء تتأثر كثيرا بكمية الماء المستعمل أثناء الخلط وبطريقة الحفظ. ثانيا، بين النفاذية ونسبة جريان المياه ومقاومة الخرسانة توجد علاقة مباشرة.

الوسائط الحمضية والكبريتية يمكن أن تؤثر إيجابيا في المدى القريب على نفاذية الخرسانة وهذا من خلال ترسب الجبس على المساحة الخارجية وفي الفراغات السطحية للخرسانة.

### الكلمات المفتاحية:

الديمومة - النفاذية للماء - الفراغات - تجارب النفاذية - حفظ الخرسانة - الأحماض - الكبريتات

## INTRODUCTION GENERALE

### *Problématique*

Tous les effets néfastes associés la durabilité du béton font intervenir l'écoulement de liquides ou de gaz à travers les parois de ce matériau. La perméabilité du béton représente sa capacité à être traversé par un fluide sous un gradient de pression. Ainsi, la perméabilité concerne l'écoulement de fluides dans le réseau poreux du matériau, elle dépend de la nature de ce réseau poreux et de sa continuation.

La porosité d'un matériau mesure le pourcentage de son volume occupé par les pores. Si la porosité est élevée et que les pores sont interconnectés, ils contribuent au passage de fluides à travers le béton en sorte que la perméabilité sera élevée. La perméabilité à l'eau du béton est influencée principalement par la quantité d'eau de gâchage, le dosage en ciment et le mode de conservation. Le rapport E/C représente alors un paramètre important qui doit être pris en considération. Vient ensuite le mode de conservation qui affecte énormément la progression de l'hydratation du ciment. Cette hydratation participe à la production du gel qui remplit graduellement les espaces initialement remplis d'eau de gâchage. La perméabilité dépend alors de la dimension, de la forme et de la concentration des particules de gel qui influent la continuité ou la discontinuité des pores capillaires.

Les causes de dégradation du béton sont variées. On peut citer par exemple, l'effet d'une température élevée dans le cas d'un climat chaud sur le béton frais et durcit, le changement de température entre le jour et la nuit dans plusieurs régions de notre pays ainsi que l'effet du vent élevé et en fin les attaques chimiques externes causées par la présence d'ions agressifs tels que les sulfates, les acides et le gaz carbonique.

Pendant la confection du béton, le non-contrôle de la quantité d'eau de gâchage ou le non-respect de la formulation prescrit par les études de formulation s'ils existent constituent les principaux problèmes rencontrés dans plusieurs chantiers de nos projets. Une quantité importante d'eau ajoutée pendant le malaxage du béton peut être préjudiciable en ce qui concerne ses qualités. Principalement, la porosité, la perméabilité et la résistance mécanique à la compression et finalement sa durabilité. L'effet négatif d'une quantité importante d'eau sera doublé dans le cas d'une température élevée comme celle de la zone de M'Sila ou cette température pourra atteindre les 50 °C pendant la saison de l'été ainsi que le changement cyclique de température entre le jour et la nuit, une humidité relative faible, un rayonnement solaire et d'une vitesse de vent élevé. Ces paramètres peuvent influencer grandement les qualités du béton, une élévation de température accélère énormément la vitesse de l'évaporation d'eau du béton frais, réduit le temps de prise et influe le processus de l'hydratation du ciment. Ils provoquent une augmentation de la perméabilité qui est un paramètre pouvant influencer indirectement la durabilité des structures en béton en gouvernant la vitesse de pénétration d'agents agressifs.

Les essais de détermination du coefficient de perméabilité à l'eau du béton sont variés. Chaque laboratoire utilise sa propre procédure utilisant des appareils différents. Cependant, presque toutes les procédures sont basées sur le même principe qui consiste à appliquer l'eau sous une pression hydraulique à une extrémité d'un échantillon et à mesurer le débit de percolation en régime permanent sur l'autre extrémité qui est libre à la pression atmosphérique. Le coefficient de perméabilité (K) est déterminé ainsi selon la loi de Darcy. Malgré que ces méthodes sont relativement simples à réaliser, ils peuvent prendre un certain temps qui peut atteindre plusieurs semaines. L'hydratation au cours de cette longue période de test peut changer la structure poreuse du matériau qui pourrait conduire à des changements de la perméabilité. Dans le but de réduire le temps de mesure nécessaire, les recherches proposent d'appliquer une grande pression. Mais, en raison d'une pression élevée, la probabilité de fuite au niveau de l'interface entre l'échantillon et les cellules de l'appareil de test peut être plus grande. Cette fuite influe énormément sur le résultat final.

### *Cadre de la thèse*

Dans le contexte de recherche, l'objectif de cette thèse est d'évaluer expérimentalement la durabilité du béton par des essais de perméabilité à l'eau dans les conditions climatiques associées à l'effet d'un climat chaud et dans des solutions agressives d'acides et de sulfates.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'intéressent en premier lieu à l'étude des caractéristiques des bétons liés à son environnement : influence du mode de conservation caractérisé par l'effet d'une haute température sur la perméabilité, la porosité et la résistance mécanique à la compression. En second lieu, l'étude comporte l'influence de solution d'acide et de sulfates principalement sur la perméabilité à l'eau du béton et comparaison des résultats obtenus avec ceux d'un béton qui a subi une cure dans l'eau.

- La perméabilité à l'eau du béton est évaluée en fonction de la quantité d'eau de gâchage, de la quantité du ciment (c'est-à-dire en fonction du rapport E/C) et du mode de conservation : douze types de bétons ont été confectionnés avec un rapport E/C variable à fin d'avoir un béton ferme et un béton très plastique. Les échantillons ont été conservés soit à l'air libre ou à l'eau.
- La porosité et la résistance à la compression sont évaluées par l'étude de huit bétons de rapport E/C variable (bétons fermes et très plastiques). Ces bétons ont été conservés soit à l'air libre ou dans à l'eau.
- L'évaluation de l'effet des solutions chimiques agressives sur le béton est réalisée par l'étude d'un bétons plastiques conservés dans l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , le sulfate de magnésium  $MgSO_4$  et le sulfate d'ammonium  $(NH_4)_2 SO_4$  et les résultats obtenus seront comparés à ceux d'un béton qui a été conservé dans l'eau.

### *Organisation de la thèse*

L'objectif de cette thèse étant l'évaluation expérimentale de la perméabilité à l'eau, de la porosité et de la résistance à la compression du béton de structure, avec les effets du rapport E/C, du mode de conservation et en fin l'influence des solutions d'acide et de sulfates sur la perméabilité à l'eau. Pour présenter les méthodes et les outils retenus, ainsi que les résultats obtenus au cours de la thèse, ce mémoire se décompose en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique qui permet de présenter l'état des connaissances de la structure poreuse et de la perméabilité à l'eau du béton. Cette synthèse permet d'avoir une idée sur la structure poreuse et sur les principaux hydrates du ciment : nous étudierons en particulier l'influence du réseau poreux sur la porosité et sur la perméabilité du béton. On parle ensuite des paramètres influençant la porosité, la perméabilité et les caractéristiques mécaniques du béton.

- Le deuxième chapitre présente les principales méthodes d'essai de perméabilité du béton. On parle des divers appareils à travers le monde, destinés aux essais de perméabilité à l'eau et aux gaz. Nous présentons ensuite les inconvénients rencontrés dans les appareils courants de perméabilité à l'eau du béton.

- Dans le troisième chapitre, on présente le comportement du béton vis-à-vis des milieux agressifs. On présente ainsi des mécanismes de dégradation du béton et des paramètres influents le comportement du béton vis-à-vis des différents agents agressifs. Nous citons ensuite les principaux milieux agressifs aux bétons.

- Enfin, le quatrième chapitre présente une étude expérimentale sur divers types de béton. Les paramètres d'étude sont le rapport E/C, le mode de conservation et l'influence de solution d'acide et de sulfates sur la perméabilité à l'eau du béton. Nous présentons dans cette partie une nouvelle procédure d'essai qui permette de déterminer la perméabilité à l'eau du béton.

Nous terminerons ce mémoire de thèse par une conclusion générale de nos travaux, ainsi que les améliorations apportées par la nouvelle procédure d'essai de perméabilité à l'eau.

<b>Introduction générale</b>		
<b><i>I</i></b>	<b><i>STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE A L'EAU DU BETON</i></b>	
I.1	Introduction	01
I.2	Hydratation et structure poreuse de la pâte de ciment	01
I.2.1	Structure du béton	02
I.2.2	Composition des ciments	02
I.2.3	Hydratation et Principaux hydrates du ciment	03
I.2.3.1	L'hydratation des silicates de calcium	03
I.2.3.2	L'hydratation des aluminates de calcium et action du gypse	04
I.2.4	Structure de la pâte du ciment hydraté	04
I.2.5	Les propriétés de la portlandite et des C-S-H	05
I.2.5.1	La portlandite	05
I.2.5.2	Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)	06
I.2.6	Propriétés de la microstructure de la pâte de ciment hydratée	06
I.3	La structure poreuse et les propriétés de transfert dans les bétons	07
I.3.1	Introduction	07
I.3.2	Description de la structure poreuse du béton	07
I.3.3	Influence du réseau poreux sur la durabilité du béton	09
I.3.4	Différents formes d'eau dans la pâte de ciment hydratée	09
I.3.4.1	L'eau combinée chimiquement	09
I.3.4.2	L'eau inter couche ou zéolitique	09
I.3.4.3	L'eau absorbée	09
I.3.4.4	L'eau des capillaires	09
I.3.5	Influence du rapport E/C sur la porosité de la pâte du ciment	09
I.3.6	Influence de la durée de l'hydratation sur la porosité de la pâte du ciment	10
I.3.7	Effet du degré d'hydratation sur l'interconnexion des pores capillaires	11
I.3.8	Effet du pourcentage des pores capillaires sur leurs interconnexions	11
I.3.9	Influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur l'interconnexion des pores capillaires	12
I.3.10	Méthodes de caractérisation de la porosité du béton	13
I.3.10.1	Mesure de la porosité accessible à l'eau : Peau	13
I.3.10.2	Méthode d'analyse d'images	13
I.3.10.3	Méthode dite la porosimétrie au mercure	14
I.4	Ecoulement des fluides dans le béton	14
I.5	La perméabilité à l'eau des bétons	14
I.5.1	Introduction	14
I.5.2	Définition de la perméabilité	15
I.5.3	Relation entre la porosité capillaire et perméabilité	16
I.5.4	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau	16
I.5.5	Influence de la durée de cure sur la perméabilité	17
I.5.6	Influence des granulats sur la perméabilité	18
I.5.7	Relation entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression	20
I.5.8	Influence des ajouts minéraux sur la perméabilité du béton	20
I.6	Diffusion	21
I.7	Absorption	21
I.8	La perméabilité au gaz du béton	21
I.9	La résistance à la compression du béton	22
I.9.1	Introduction	22

I.9.2	Facteurs influents la résistance à la compression du béton	22
I.9.2.1	Rapport E/C	22
I.9.2.2	Rapport Gel / Vide du ciment hydraté	23
I.9.2.3	Porosité	24
I.10	Influence du murissement sur les caractéristiques du béton	25
I.11	Influence de la température sur le béton	25
I.12	problèmes liés au bétonnage pendant un temps chaud	27
I.13	Conclusion	27
<b>II</b>	<b><i>DIFFERENTES METHODES D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON</i></b>	
II.1	Introduction	28
II.2	Vue générale sur les méthodes de mesure de perméabilité du béton	28
II.3	Perméabilité à l'eau du béton	29
II.3.1	Appareil de mesure de la perméabilité à l'eau	30
II.3.1.1	Appareils mesurant l'écoulement à travers un béton saturé	30
II.3.1.2	Appareils basé sur la mesure de la hauteur de pénétration de l'eau	32
II.3.1.3	Appareils basant sur la chute de pression	32
II.3.1.4	Autres types d'appareil de mesure de perméabilité à l'eau du béton	34
II.3.1.4.1	Appareil utilisé par l'université de Sherbrooke	34
II.3.1.4.2	Appareil permettant la mesure de perméabilité à l'eau et à l'oxygène	35
II.3.1.4.3	Appareillages utilisés au niveau du laboratoire développement des Géomatériaux - l'université de M'Sila- (Algérie)	36
II.4	Inconvénients rencontrés dans les appareils courants de perméabilité à l'eau	38
II.4.1	La taille d'échantillon	38
II.4.2	Quantité d'écoulement du fluide	38
II.4.3	Fuite de fluide autour de l'échantillon	38
II.4.4	Air emprisonné dans l'échantillon pendant l'essai	38
II.5	Perméabilité aux gaz du béton	38
II.5.1	Introduction	38
II.5.2	Appareil de mesure de la perméabilité à l'air des bétons	39
II.5.2.1	Permémètre à air des roches	40
II.5.2.2	Permémètre de l'université de sherbrooke (Canada)	40
II.5.2.3	Permémètre basée sur l'écoulement latérale du gaz	40
II.5.2.4	Dispositif d'essai dit Cembureau (NF P 18 – 463)	41
II.6	Conclusion	42
<b>III</b>	<b><i>COMPORTEMENT DU BETON VIS-A-VIS DES MILIEUX AGRESSIFS</i></b>	
III.1	Introduction	43
III.2	Comportement du béton suite aux attaques chimiques	44
III.2.1	Mécanismes des attaques chimiques du béton	44
III.2.2	Effets des attaques chimiques sur le béton	44
III.3	Paramètres influents le comportement du béton vis-à-vis des différents agresseurs chimiques	45
III.3.1	Paramètres liés à la composition du ciment	45
III.3.2	Paramètres liés à la formulation et aux propriétés de transfert du béton	46
III.3.3	Paramètres liés à l'environnement	46
III.3.4	Paramètres liés à la structure du projet	47
III.4	Revue sur les principaux milieux agressifs aux bétons	47
III.4.1	Introduction	47
III.4.2	Interaction entre les agents agressifs et les constituants du béton	48

## Sommaire

III.4.2.1	La dissolution	48
III.4.2.2	Hydrolyse	49
III.4.2.3	Le lessivage	49
III.5	Comportement des bétons dans les milieux acides (dissolution et précipitation)	49
III.5.1	Eaux naturelles	50
III.5.2	Eaux pures et les eaux douces	51
III.5.3	Pluies acides (cas extrême des eaux douces)	52
III.5.4	Les acides minéraux	52
III.5.5	Les acides organiques	53
III.6	Précautions à prendre contre les attaques acides	53
III.7	Milieux sulfatiques : dissolution/précipitation/risques d'expansion	54
III.7.1	Origine des sulfates	54
III.7.2	Mécanismes de dégradation du béton par les sulfates	55
III.7.3	Types d'ettringite dans le béton	55
III.8	Étude de l'influence quelques sulfates sur le béton	56
III.8.1	Les sulfates de calcium	56
III.8.2	les sulfates de magnésium	56
III.8.3	les sulfates d'ammonium	57
III.9	Influence de l'acide sulfurique sur le béton	58
III.10	Action de l'eau de mer sur le béton	59
III.11	Conclusion	61
<b>VI</b>	<b><i>EVALU TION EXPERIMENTALE DE LA DURABILITE DU BETON PAR LES ESSAIS DE PERMEABILITE A L'EAU</i></b>	
VI.1	Introduction	62
VI.2	Programme expérimental	63
VI.2.1	Matériau utilisé	63
VI.2.1.1	ciment utilisé	63
VI.2.1.2	Le sable	65
VI.2.1.3	Les granulats	66
VI.2.2	Composition du béton	68
VI.2.3	Programme expérimental	68
VI.2.4	Malaxage et cure appliquée aux bétons	69
VI.3	Etude de l'effet d'une température élevée (environ 50 °C) sur la perméabilité à l'eau du béton	70
VI.3.1	Introduction	70
VI.3.2	Composition des bétons	70
VI.3.3	Méthode expérimentale proposée pour l'évaluation de la perméabilité à l'eau du béton	71
VI.3.4	Montage expérimental	71
VI.3.5	Coefficient de perméabilité	73
VI.3.6	Résultats obtenus	74
VI.3.6.1	Variation du coefficient de perméabilité en fonction du temps	74
VI.3.6.2	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau du béton	78
VI.3.6.3	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau du béton	80
VI.3.7	Discutions des résultats obtenus	80
VI.4	Etude de l'effet d'une température élevée (environ 50 °C) sur la porosité et sur la résistance mécanique à la compression du béton	82
VI.4.1	Introduction	82

## Sommaire

---

VI.4.2	Composition des bétons	82
VI.4.3	Méthodes expérimentales	83
VI.4.3.1	Essai de résistance à la compression	83
VI.4.3.2	Écart type et dispersion des résultats	83
VI.4.3.3	La porosité accessible à l'eau : Peau	84
VI.4.4	Résultats obtenus	84
VI.4.4.1	Effet du mode de conservation sur la résistance à la compression	84
VI.4.4.2	Effet du rapport E/C sur la porosité	85
VI.4.4.3	Résistance à la compression en fonction de la porosité	86
VI.4.4.4	Perméabilité à l'eau en fonction du rapport E/C	86
VI.4.4.5	Effet de la porosité à l'eau sur la perméabilité à l'eau	87
VI.4.4.6	Effet de la perméabilité à l'eau sur la résistance à la compression	88
VI.4.5	Discutions des résultats obtenus	89
VI.5	Etude de l'influence des milieux agressifs (sulfates et acide) sur la perméabilité à l'eau du béton	90
VI.5.1	Introduction	90
VI.5.2	Attaque du béton par les sulfates	90
VI.5.3	Sources des sulfates	91
VI.5.4	Mécanisme d'attaque du béton par les sulfate	91
VI.5.5	Attaque du béton par les acides	92
VI.5.6	Méthodologie expérimentale	92
VI.5.6.1	Composition des bétons	92
VI.5.6.2	Cure du béton	92
VI.5.6.3	Milieux agressifs de traitement	93
VI.5.6.4	Evaluation de la résistance du béton aux agressions chimiques	95
VI.6	Conclusion	98
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	

## LISTE DES FIGURES

### **Chapitre 1-**

Figure I.1	Représentation schématique de la formation et de l'hydratation du ciment	03
Figure I.2	Modèle simplifié d'une pâte de ciment hydraté	04
Figure I.3	Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H	05
Figure I.4	Image en microscopie électronique à balayage de cristaux de portlandite	05
Figure I.5	Image en microscopie électronique à balayage de la morphologie du C-S-H	06
Figure I.6	Schéma des pores dans un matériau	07
Figure I.7	Influence du degré d'inter connectivité sur l'écoulement de fluides	08
Figure I.8	Influence du rapport E/C sur la porosité de pâtes de ciment	10
Figure I.9	Influence de la durée de l'hydratation sur l'évolution de la porosité d'une pâte de ciment Portland de rapport E/C = 0.7	10
Figure I.10	influence du degré d'hydratation sur l'interconnexion des pores capillaires	11
Figure I.11	Influence de la porosité capillaire sur leurs interconnexions	11
Figure I.12	Influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la continuité des pores capillaires	12
Figure I.13	Microstructure du béton (image par le microscope électronique à balayage)	13
Figure I.14	Flux linéaire de l'eau à travers l'échantillon	15
Figure I.15	Relation entre la porosité capillaire et la perméabilité à l'eau d'une pâte de ciment	16
Figure I.16	Relation entre la perméabilité à l'eau et le rapport E/C d'une pâte de ciment hydraté à 93 %	17
Figure I.17	Influence de la durée de cure humide initiale sur la perméabilité au gaz de bétons gâchés par différents teneurs en eau	18
Figure I.18	Influence du E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons	19
Figure I.19	Relation entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression	20
Figure I.20	Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C d'un béton	22
Figure I.21	Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C d'un béton	23
Figure I.22	Relation entre la résistance à la compression de mortier et le rapport gel/vidé	24
Figure I.23	Relation entre la résistance à la compression et la porosité	24
Figure I.24	Influence du degré d'humidité de l'air sur la perte d'eau de bétons	25
Figure I.25	Influence de la température de l'air et du béton sur la perte d'eau de bétons	26

### **Chapitre 2 –**

Figure II.1	Principe de fonctionnement des appareils de mesure de la perméabilité à l'eau	29
Figure II.2	Perméamètre à l'eau d'après Hean	31
Figure II.3	Perméamètre à l'eau d'après Meletiou et coll	32
Figure II.4	Perméamètre à l'eau par mesure de pression	33
Figure II.5	Perméamètre à l'eau par mesure de pression selon Janssen	33

Figure II.6	Principe de fonctionnement de l'appareil de mesure de la perméabilité à l'eau utilisée à l'université de Sherbrooke (Canada)	34
Figure II.7	Schéma de l'appareil de perméabilité à l'eau	35
Figure II.8	Appareil de mesure de perméabilité à l'eau et l'oxygène de l'université de Leeds (U.K.)	36
Figure II.9	Perméabilimètre à trois cellules (Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)	36
Figure II.10	Principe de fixation des éprouvettes cellules de l'appareil de perméabilité	37
Figure II.11	Régulateur de pression jusqu'à 16 bars	37
Figure II.12	Perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes (Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)	37
Figure II.13	Appareil de mesure de la perméabilité à l'air des roches selon la norme ASTM D4525-85	39
Figure II.14	Principe de fonctionnement du perméamètre à l'air utilisé l'université de Sherbrooke	40
Figure II.15	Principe de fonctionnement du montage expérimental utilisé à l'université de Nantes	40
Figure II.16	Une vue d'ensemble du perméamètre (Cembureau)	41

### Chapitre 3 –

Figure III.1	Couplage environnement/contraintes mécaniques/actions physico-chimiques influentes la durabilité du béton	45
Figure III.2	Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques	48
Figure III.3	Mode d'action du $CO_2$	50
Figure III.4	Ettringite primaire bien cristallisée ne provoquant pas d'expansion : précipitation dans les espaces vides à partir de la solution	55
Figure III.5	Ettringite secondaire massive mal cristallisée qui provoque le gonflement et la dégradation du béton	56
Figure III.6	Échantillon d'un béton exposé à un environnement très agressif de sulfate de magnésium	57
Figure III.7	Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par le sulfate d'ammonium	58
Figure III.8	Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par l'acide sulfurique	59
Figure III.9	Action des chlorures sur le béton	59
Figure III.11	Action des sulfates sur le béton	60
Figure III.11	Action du dioxyde de carbone sur le béton	60

### Chapitre 4 –

Figure IV.1	Courbes granulométriques du sable et des granulats	67
Figure IV.2	Schéma de l'appareil d'essai de perméabilité	72
Figure IV.3	Détail de l'éprouvette d'essai	72
Figure IV.4	Forme des éprouvettes	72
Figure IV.5	Appareil de mesure de perméabilité à l'eau	73
Figure IV.6	Ecoulement d'eau sous pression vers l'extérieur de l'éprouvette	73
Figure IV.7	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)	74

Figure IV.8	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)	74
Figure IV.9	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)	75
Figure IV.10	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)	75
Figure IV.11	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)	76
Figure IV.12	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)	76
Figure IV.13	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)	77
Figure IV.14	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)	77
Figure IV.15	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)	78
Figure IV.16	Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)	78
Figure IV.17	Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'eau	79
Figure IV.18	Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air	79
Figure IV.19	Effet du mode de conservation sur la perméabilité à l'eau des différents bétons	80
Figure IV.20	Effet du mode de conservation et du dosage en ciment sur la résistance à la compression des bétons	84
Figure IV.21	Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression des bétons	85
Figure IV.22	Effet du rapport E/C sur la porosité des bétons	85
Figure IV.23	Effet de la porosité sur la résistance à la compression des bétons	86
Figure IV.24	Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'eau	86
Figure IV.25	Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air	87
Figure IV.26	Effet de la porosité sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'eau	87
Figure IV.27	Effet de la porosité sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air	88
Figure IV.28	Effet de la perméabilité à l'eau des sur la résistance à la compression des bétons conservés à l'eau	88
Figure IV.29	Effet de la perméabilité à l'eau des sur la résistance à la compression Des bétons conservés à l'air	89
Figure IV.30	Bétons conservés dans la solution acide 5% de $H_2SO_4$	93
Figure IV.31	Dégradation des surfaces des éprouvettes sous l'effet de $H_2SO_4$	94
Figure IV.32	Bétons conservés dans la solution acide 5% de $(NH_4)_2 SO_4$	94
Figure IV.33	Bétons conservés dans la solution acide 5% de $MgSO_4$	94
Figure IV.34	Coefficient de perméabilité à l'eau en fonction du temps	96

## LISTE DES TABLEAUX

### **Chapitre 1-**

Tableau I.1	Principaux constituants du ciment portland	02
Tableau I.2	Composition chimique du ciment portland	02
Tableau I.3	Relation entre le rapport E/C et la durée d'hydratation du ciment portland	12
Tableau I.4	Réduction du coefficient de perméabilité d'une pâte de ciment à différents âges pour un rapport E/C de 0.7	17
Tableau 1.5	Comparaison de la perméabilité de différents types de roches et de pâtes de ciment	19

### **Chapitre 3 –**

Tableau III.1	Composition d'eau de pluie en mg/l	50
---------------	------------------------------------	----

### **Chapitre4 –**

Tableau IV.1	caractéristiques chimique du ciment	64
Tableau IV.2	composition minéralogique du clincker	65
Tableau IV.3	Propriétés physiques du ciment	65
Tableau IV.4	temps de prise à 20 °C	65
Tableau IV.5	Résistance mécanique à la compression	65
Tableau IV.6	Analyse granulométrique du sable utilisé	66
Tableau IV.7	Caractéristiques physiques du gravier utilisé	66
Tableau IV.8	Analyse granulométrique du gravier 3/8	67
Tableau IV.9	Analyse granulométrique du gravier 3/16	67
Tableau IV.10	Proportion de matériaux pour les différents types de bétons	70
Tableau IV.11	Proportion de matériaux pour les différents types de bétons	82
Tableau IV.12	Proportion de matériaux pour les différents types de bétons	92
Tableau IV.13	Milieux agressifs de conservation	93
Tableau IV.14	perte de masse des échantillons conservés dans $H_2SO_4$	95
Tableau IV.15	Gain de masse des échantillons conservés dans $MgSO_4$	95
Tableau IV.16	Gain de masse des échantillons conservés dans $(NH_4)_2 SO_4$	95

# *Chapitre I*

## *Structure poreuse et perméabilité*

### *à l'eau du béton*

## CHAPITRE I

### STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE A L'EAU DU BETON

#### I.1. Introduction

Le béton, constitué de ciment, d'agrégats, d'adjuvants, d'additifs minéraux et d'eau, comprend en quantité la plus grande de tous les matériaux synthétisés. Le constituant actif du béton est la pâte de ciment. La performance du béton est largement déterminée par la nature de cette pâte de ciment. Les adjuvants sont des produits chimiques qui sont ajoutés au béton pour obtenir des effets bénéfiques tels qu'une meilleure résistance, une durabilité, une accélération, un retard, un entraînement de l'air, une réduction de l'eau, une plasticité, etc. Des ajouts minéraux tels que les scories du haut fourneau, les cendres volantes, les fumées de silice et d'autres, sont également incorporés au béton pour améliorer ces qualités [1].

Le béton est un matériau hétérogène composé de granulats maintenu par un liant poreux appelé « pâte de ciment hydraté » qui est la phase continue du composite. La porosité de cette phase est critique en ce qui concerne le mouvement de l'eau et des substances chimiques dans le béton. Le mouvement des fluides est une caractéristique intéressante pour la durabilité des matériaux cimentaires principalement le béton [2].

Dans ce chapitre, on présente dans la première partie les phases issues de l'hydratation du ciment avant d'entamer la structure poreuse et les propriétés de transfert dans le béton, ensuite, on discute les paramètres influençant la durabilité du béton, principalement la porosité et la perméabilité à l'eau. Dans la deuxième partie, on discute de la porosité en citant les paramètres influençant cette propriété ainsi que les essais les plus utilisés pour déterminer la porosité du béton. La partie suivante sera consacrée à la perméabilité à l'eau du béton en développant la relation entre la porosité et la perméabilité des bétons, avant de passer à l'étude des paramètres qui influent sur cette perméabilité, en particulier l'élévation de température, la durée de cure et le rapport E/C. On présente ensuite de la diffusion dans le béton, de l'absorption et de la résistance à la compression du béton.

#### I.2. Hydratation et structure poreuse de la pâte de ciment

##### I.2.1. Structure du béton

La perméabilité du béton est relative au déplacement des fluides qui dépend de la taille des espaces poreux et leur interconnexion. L'ensemble de pores influent la perméabilité du béton sont caractérisés par les pores capillaires et les espaces inter granulaires laissés par l'hydratation du ciment. Le béton est composé d'une pâte poreuse de ciment et une phase solide formée de sable et graviers. Le volume des deux phases influence la structure poreuse du béton. [3]

La performance et la durabilité du béton dépendent de la qualité des différents composants et de leurs proportions. Principalement, la quantité d'eau de mélange qui influe sur le comportement physico-chimique de la pâte de ciment durcie, en outre, le type de ciment, la nature des agrégats fins et grossiers, la température pendant le gâchage, le mode de cure et l'environnement du béton. Ces paramètres peuvent affecter énormément les aspects physiques, chimiques et durables du béton. [3]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

**I.2.2. Composition des ciments**

Le ciment Portland est une poudre obtenue par combinaison de 95 % de clinker et 5% de gypse ( $CaSO_4, 2H_2O$ ). Le clinker est le résultat d'une cuisson de 80% de calcaire ( $CaCO_3$ ) et 20% d'argile vers 1450 °C dans des fours rotatifs. Le clinker est refroidi puis broyé en poudre fine, opération au cours de laquelle, on ajoute une quantité de gypse. Ainsi, le ciment est fabriqué essentiellement à partir de matière calcaire comme le calcaire ou la craie et à partir d'alumine et de silice présente dans l'argile et les schistes argileux. [4]

Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment contiennent principalement de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer. Ces composés se réagissent au cours de la cuisson dans le four pour donner une série de produits assez complexes. [4]

Les quatre composés considérés comme les principaux constituants du ciment sont donnés dans le tableau 1.1

Composé	Composition	Abréviation	% massique
Silicate tricalcique	3CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	60-65 %
Silicate bicalcique	2CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	10-20 %
Aluminate tricalcique	3CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	8-12 %
Aluminoferrite tétracalcique	4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	8-10 %

Tableau I.1: Principaux constituants du ciment portland. [5]

Les notations abrégées utilisées par les chimistes de l'industrie de ciment, décrit chaque oxyde par une lettre : CaO=C ; SiO<sub>2</sub>=S ; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=A ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=F. [4]

Les silicates des ciments ne sont pas des composés purs, ils contiennent des oxydes en quantités mineures en solution solide qui ne dépassent pas quelques pourcentages de la masse de ciment. Le tableau I.2 donne une indication de la composition des oxydes majeurs et mineurs dans le ciment. Les proportions des différentes phases varient considérablement d'un ciment à l'autre. [4]

Désignation	Oxydes majeurs				Oxydes mineurs				
	C	S	A	F	M	$\bar{S}$	N	K	T
Oxydes	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Alcalis (Na <sub>2</sub> O)	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Teneur %	60-67	17-25	3-8	0.5-6.0	0.5-4.0	2.0-3.5	0.3-1.2		

Tableau I.2: Composition chimique du ciment portland. [4]

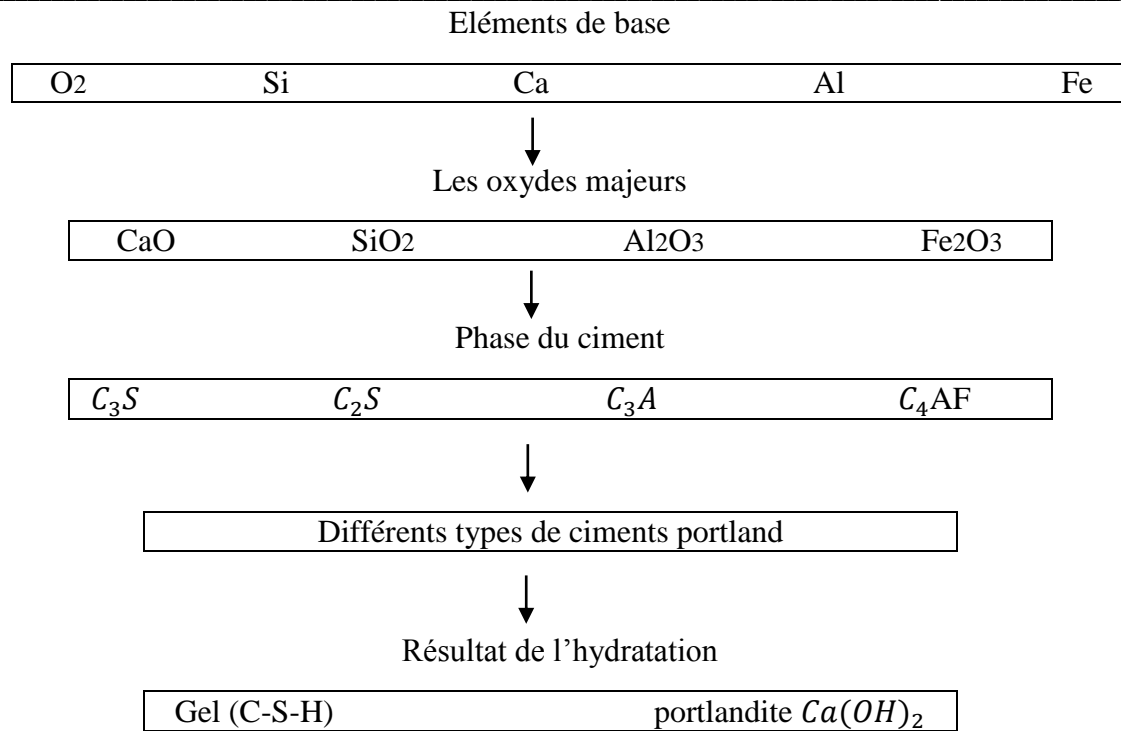


Figure I.1: Représentation schématique de la composition et de l'hydratation du ciment. [4]

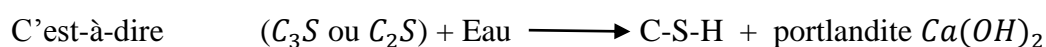
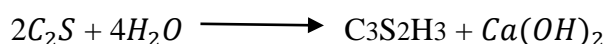
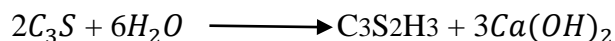
### I.2.3. Hydratation et principaux hydrates du ciment

Le mot hydratation décrit d'une manière générale, l'ensemble des réactions qui interviennent dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau. [3]

#### I.2.3.1. L'hydratation des silicates de calcium

La réaction des grains de ciment avec l'eau forme les produits d'hydratation qui donnent avec le temps la pâte de ciment hydratée. Ainsi, la phase solide de cette phase est formée de grains de ciment hydraté. Les produits d'hydratation obtenus sont les silicates de calcium hydratés, noté C-S-H, la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> et des cristaux de trisulfoaluminates de calcium hydratés appelés ettringite. [4]

Pendant la période initiale de gâchage, c'est à dire dès que l'eau est en contact avec le ciment anhydre, l'hydratation commence. La réaction du silicate tricalcique C<sub>3</sub>S et du silicate bicalcique C<sub>2</sub>S donne naissance au silicate de calcium hydraté C-S-H et de la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> selon les réactions en notation cimentaire suivantes : [4,5]



Les quantités du silicate de calcium hydraté (C-S-H) et de portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de la réaction d'hydratation. [4]

**I.2.3.2. L'hydratation des aluminates de calcium et action du gypse**

La quantité de  $C_3A$  dans les ciments est faible, mais le résultat de sa réaction avec les autres composés du ciment fait que ce composé est très intéressant. La réaction du  $C_3A$  avec l'eau conduit à une prise rapide. C'est la raison de l'ajout au clinker d'une quantité du sulfate de calcium sous forme de gypse ( $CaSO_4, 2H_2O$ ), de plâtre ou hémihydrate ( $CaSO_4, 0.5H_2O$ ) ou d'anhydrite ( $CaSO_4$ ), comme régulateur de prise. [4]

La réaction du  $C_3A$  avec le gypse produit le sulfoaluminate de calcium insoluble ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$ ) appelé ettringite. C'est cette phase qui se forme tant que la concentration en sulfate en solution est suffisante. Lorsque toute la quantité de sulfates sont épuisés, d'autres produits tels que les hydroaluminates de calcium comme  $C_4AH_{13}$  qui précipitent. [4]

L'hydratation du  $C_4AF$  conduit à la précipitation du même type de composés que ceux qui sont formés après réaction du  $C_3A$ . Cependant, le  $C_4AF$  réagit beaucoup plus lentement que  $C_3A$  en présence de gypse. En d'autres termes, le gypse retarde l'hydratation de  $C_4AF$  plus efficacement que  $C_3A$ . [4]

La quantité du gypse ajoutée au clinker doit être surveillée : un excès de gypse provoque une expansion conduisant à la dégradation de la pâte de ciment. C'est-à-dire que la quantité du gypse augmente avec la teneur en  $C_3A$  du ciment. [4,5]

**I.2.4. Structure de la pâte du ciment hydraté**

À n'importe quel stade de l'hydratation, la pâte de ciment est constituée d'un gel (C-S-H), de cristaux de portlandite ( $Ca(OH)_2$ ), de quelques composants mineurs, de grains de ciment non hydraté et des espaces remplis ou non d'eau. Ces espaces sont appelés pores capillaires. Le gel à son tour comporte des vides interstitiels, appelés pores de gel. La figure ci-dessous présente ces deux types de pores. [4]

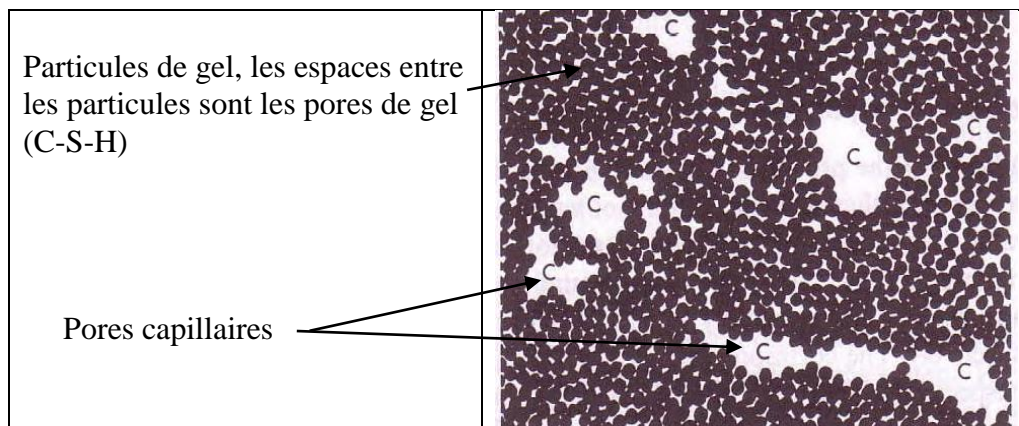


Figure I.2: Modèle simplifié d'une pâte de ciment hydraté. [4]

La porosité capillaire de la pâte dépend à la fois du rapport E/C et du degré d'hydratation influencé par le type de ciment. Ces pores capillaires de forme variée sont de l'ordre de 1.3  $\mu m$ . Ils forment un système interconnecté distribué aléatoirement au travers de la pâte de ciment. Ces pores interconnectés sont principalement la cause de la perméabilité du béton et de sa vulnérabilité face au cycle de gel dégel. Le traitement du problème de continuité des pores capillaires est établi par un apport E/C adéquat et d'un murissement suffisamment long, ces paramètres peuvent assurer la segmentation des pores par le gel. [4]

Le gel est poreux puisqu'il peut retenir une grande quantité d'eau évaporable. Les pores de gel sont des vides interstitiels interconnectés entre les particules de gel en forme d'aiguille, de plaque ou de feuillet. Ces pores sont plus petits que les pores capillaires, leur diamètre est d'environ 3 nm. [4]

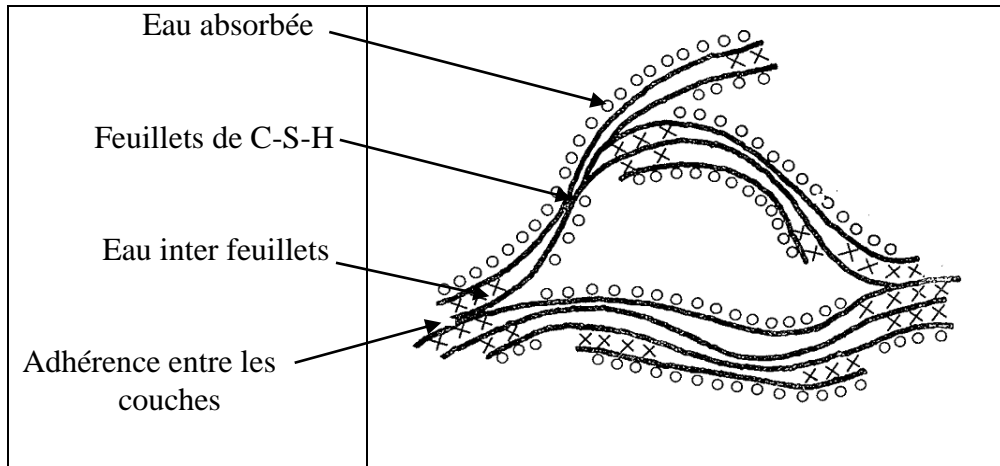


Figure I.3: Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H. [4]

## I.2.5. Les propriétés de la portlandite et des C-S-H

### I.2.5.1. La portlandite

La portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé  $Ca(OH)_2$ . Il provient de la réaction d'hydratation du ciment. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. La solubilité de la portlandite dans l'eau est de 22 mol/L à 25 °C soit environ 1,6 g/L, il a un PH d'environ 12.6. Sa présence dans la pâte de ciment hydraté permet de maintenir le PH élevé. [81]

La portlandite est la phase la plus cristallisée dans la pâte de ciment. Ces cristaux sont de forme hexagonale, ils sont représentés dans la figure I.4.

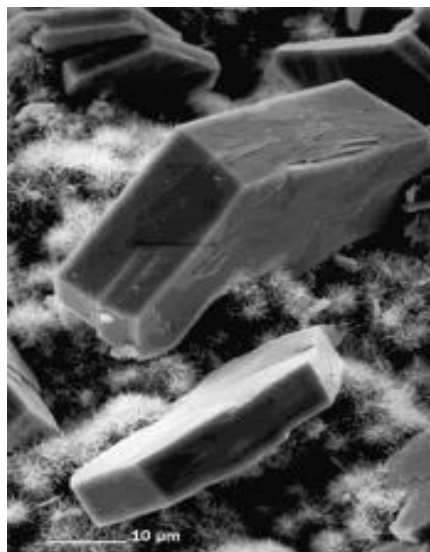


Figure I.4: Image en microscopie électronique à balayage des cristaux de portlandite [81]

### I.2.5.2. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Les C-S-H sont un gel qui constitue la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment (Figure I.5). Les fibres de C-S-H ont la propriété de se souder entre elles et aux cristaux voisins. Il constitue la colle du béton, on peut dire que les C-S-H sont l'origine de la résistance mécanique du béton. [95]

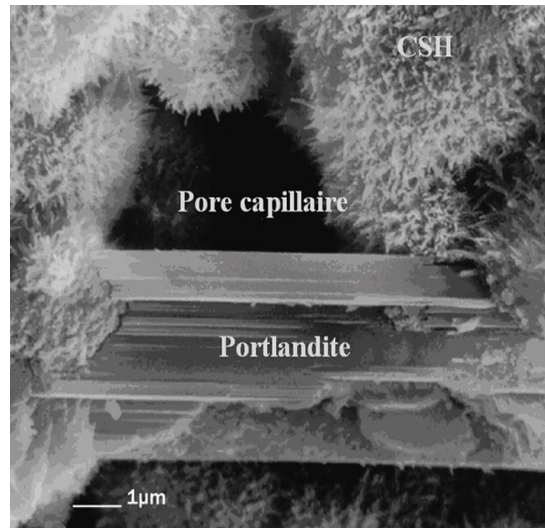


Figure I.5 : Image en microscopie électronique à balayage de la morphologie du C-S-H [95]

### I.2.6. Propriétés de la microstructure de la pâte de ciment hydratée

La porosité capillaire est l'espace entre les grains de ciment hydraté. Cette porosité est caractérisée par son volume et sa connectivité. Le volume de la porosité capillaire dépend de trois paramètres : [2]

- La formulation du matériau cimentaire ;
- La distribution granulométrique ;
- Le degré d'hydratation.

Pour la formulation du béton, on parle principalement du rapport E/C ; pour une quantité de ciment définie, plus le volume d'eau de gâchage est grand, plus l'espace initial entre les grains de ciment hydraté est important, ce qui produit une porosité capillaire plus grande. [2]

En ce qui concerne la distribution granulométrique des particules dans le matériau cimentaire : la porosité capillaire peut être réduite si les particules plus fines sont capables de combler l'espace entre les plus gros grains. [2]

Pour le degré d'hydratation, on peut dire que l'espace occupé par le solide va augmenter au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit et que la porosité capillaire diminue. Cependant, il peut toujours subsister une porosité capillaire résiduelle si le rapport eau sur ciment est trop grand même à hydratation complète. [2]

Le volume de la porosité capillaire est un paramètre déterminant pour la résistance de la pâte de ciment et donc du béton alors que la connectivité du réseau capillaire qui touche principalement la perméabilité du matériau est un paramètre particulièrement important pour la durabilité du matériau. [3]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

La porosité capillaire interconnectée permet la pénétration des agents agressifs extérieurs provoquant ainsi la dégradation du béton. La connectivité de ces pores diminue au fur et à mesure de l'hydratation se poursuivra et les hydrates développés sont susceptibles de boucher les entrées des pores. [3]

**I.3. La structure poreuse et les propriétés de transfert dans les bétons**

**I.3.1. Introduction**

Les pores capillaires interconnectés influencent fortement les propriétés de transfert dans les bétons. Pour réduire l'influence de ces pores capillaires et leur interconnexion, il faut réduire le rapport E/C et avoir une cure soignée qui garantit une hydratation complète. [3]

La recherche d'un béton durable passe par une recherche d'une forte compacité. Le béton est un matériau composite, construit d'une phase solide formée de granulats et une phase liante formée en général du ciment. Ainsi, la fabrication d'un béton durable consistera à une optimisation du squelette granulaire avec une phase liante suffisamment dense sans oublier les autres paramètres tels que la cure et les conditions de la mise en œuvre. [5]

**I.3.2. Description de la structure poreuse du béton**

La durabilité du béton est liée aux capacités d'échanges de ce matériau avec le milieu extérieur qui sont fonction des caractéristiques poreuses.

Le béton est un matériau composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. La partie solide est constituée de granulats, d'une partie hydratée et de grains de ciment non hydrater plus une partie gazeuse. [5]

Les pores dans le béton peuvent être représentés selon le schéma de la figure I.6 suivante

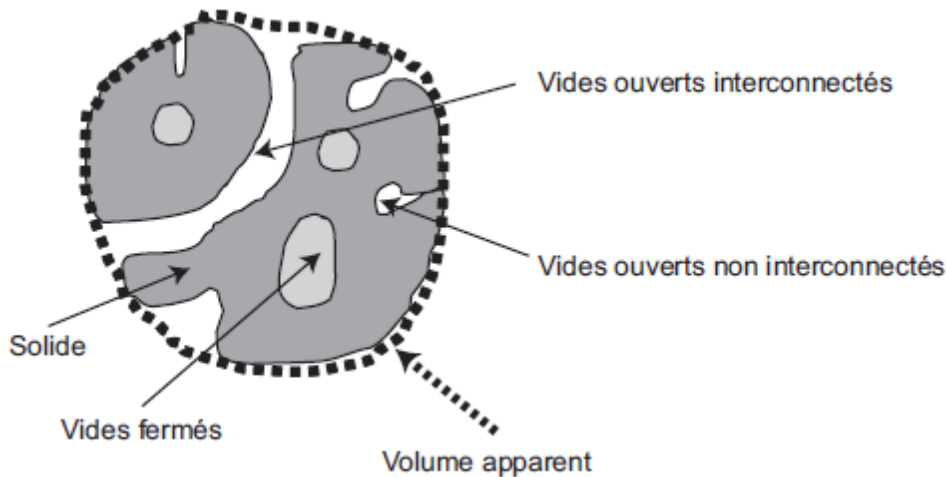


Figure I.6 : Schéma des pores dans un matériau [5]

Ces pores sont décrits de la manière suivante :

- $V_a$ , le volume apparent du matériau ;
- $V_s$ , le volume de la partie solide du matériau ;
- $V_o$ , le volume des pores ouverts communicants avec l'extérieur ;

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

- $V_{o,i}$ , le volume des pores ouverts interconnectés avec lesquelles un fluide peut traverser le matériau ;
- $V_{o,ni}$ , le volume des pores ouverts non interconnectés ;
- $V_f$ , le volume des pores fermés.

On peut donner la relation suivante qui relie les volumes :

$$V = V_o + V_f \tag{I.1}$$

$$V_o = V_{o,i} + V_{o,ni} \tag{I.2}$$

Le tableau suivant représente les relations reliant les différents volumes : [5]

Porosité ouverte interconnectée	$P_{o,i} = V_{o,i} / V_a$	(I.3)
Porosité ouverte non interconnectée	$P_{o,ni} = V_{o,ni} / V_a$	(I.4)
porosité ouverte	$P_o = V_o / V_a$ $= P_{o,i} + P_{o,ni}$	(I.5)
porosité fermée	$P_f = V_f / V_a$	(I.6)
porosité totale	$P = V / V_a$ $= P_o + P_f$	(I.7)

La porosité d'un béton courant est de l'ordre de 15 % à 28 jours, pour un béton à hautes performances, elle est de 10 à 12 %. Celle d'un béton à très hautes performances, cette porosité peut varier entre 7 % et 9 %. [5]

La durabilité des bétons dépend de la porosité ouverte et plus particulièrement de la porosité ouverte interconnectée. Celle qui facilite la pénétration des agents agressifs extérieurs à travers le béton. Les pores aveugles à leur tour sont connectés avec l'extérieur, mais ne participent pas au transport de matière à travers le matériau. En fin, les pores isolés ou fermés qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur. La figure I.7 présente l'effet de la connectivité des pores sur l'écoulement des fluides à travers un matériau poreux. [79]

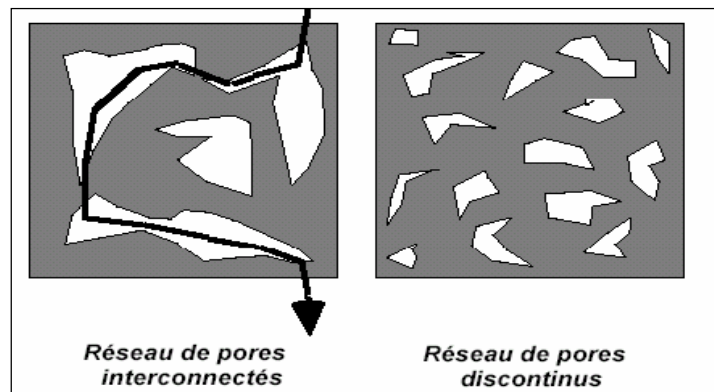


Figure I.7 : Influence du degré d'inter connectivité sur l'écoulement de fluides [79]

### I.3.3. Influence du réseau poreux sur la durabilité du béton

La nature du réseau poreux de la pâte de ciment et à l'interface entre cette pâte et les granulats influent significativement sur la perméabilité du matériau. L'interface entre la pâte de ciment hydraté et les granulats représente un volume important. Elle est la zone des premières microfissures. [4]

Les granulats peuvent aussi contenir des pores, mais ces derniers ne sont pas interconnectés. De plus, les granulats sont enrobés par la pâte de ciment de manière que ses pores ne participent pas à la perméabilité du béton. [4]

La porosité exprime le pourcentage des vides dans un volume total du béton. Si cette porosité est élevée et ses pores sont interconnectés, ils permettent un transport important de fluide à travers le béton, conduisant ainsi à une perméabilité élevée. Si par contre, la porosité est très élevée et que les pores sont discontinus et ne permettent pas le passage de fluide. La perméabilité sera faible même avec une porosité élevée. [4]

### I.3.4. Différentes formes d'eau dans la pâte de ciment hydratée

La présence d'eau dans la pâte de ciment est sous différentes formes. Cette présence d'eau dépend des pores existants dans la pâte de ciment et de l'humidité du milieu ambiant. En fonction de sa localisation et de son état, l'eau influe différemment sur la durabilité. Les pores capillaires caractérisés par une grande taille se vident et perdent leur eau lorsque l'humidité est inférieure à 45%. Au contraire, l'eau absorbée dans les pores de gel demeure dans ces pores même pour une humidité ambiante très basse. On peut classer l'eau de la pâte de ciment hydraté sous les formes suivantes : [4]

#### I.3.4.1 L'eau combinée chimiquement

Cette eau existe dans les pores des silicates de calcium hydratés (C-S-H), elle représente environ 23% du poids du ciment qui a fait la réaction. Ce type d'eau est très stable et nécessite une haute température pour l'évaporer en décomposant les C-S-H. [4]

#### I.3.4.2 L'eau inter couche ou zéolitique

Ce type d'eau se trouve entre les feuillets de C-S-H. pour évaporer l'eau zéolitique, il faut que l'humidité s'abaisse au-dessous de 30%. [4]

#### I.3.4.3 L'eau absorbée

Cette eau est liée à la surface de la paroi du solide. Un pourcentage important peut-être perdu sous une humidité inférieure à 50%. Cette perte d'eau est la cause principale du retrait de la pâte de ciment ou du béton. [4]

#### I.3.4.4 L'eau des capillaires

L'eau des capillaires est l'eau qui n'a pas réagi avec les grains de ciment. Ce type d'eau peut être un surplus du besoin nécessaire et il est plus au moins important selon la taille des capillaires. Dans les gros capillaires ( $> 0,05 \mu\text{m}$ ), on parle de l'eau libre alors que l'eau non libre est contenue dans les plus petits capillaires ( $0,05 \mu\text{m}$  à  $0,005 \mu\text{m}$ ). [4]

### I.3.5. Influence du rapport E/C sur la porosité de la pâte de ciment

Les courbes de la figure I.8 représentent l'influence de la teneur d'eau sur la porosité d'une pâte de ciment à 28 jours. Ces courbes montrent que les pores capillaires de dimension

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

supérieur à 100 nm ne subsistent plus que dans les cas de pâtes de ciment avec E/C supérieur à 0.5.

En ordonné, les volumes sont donnés par rapport à l'unité de masse du solide de la pâte de ciment, ils sont exprimés en  $cm^3/g$ . En abscisse, les diamètres des pores sont représentés en nm. D'après ces courbes, on peut remarquer que : [7]

- La porosité diminue avec le rapport E/C.
- La diminution de la dimension des pores en fonction du rapport E/C.

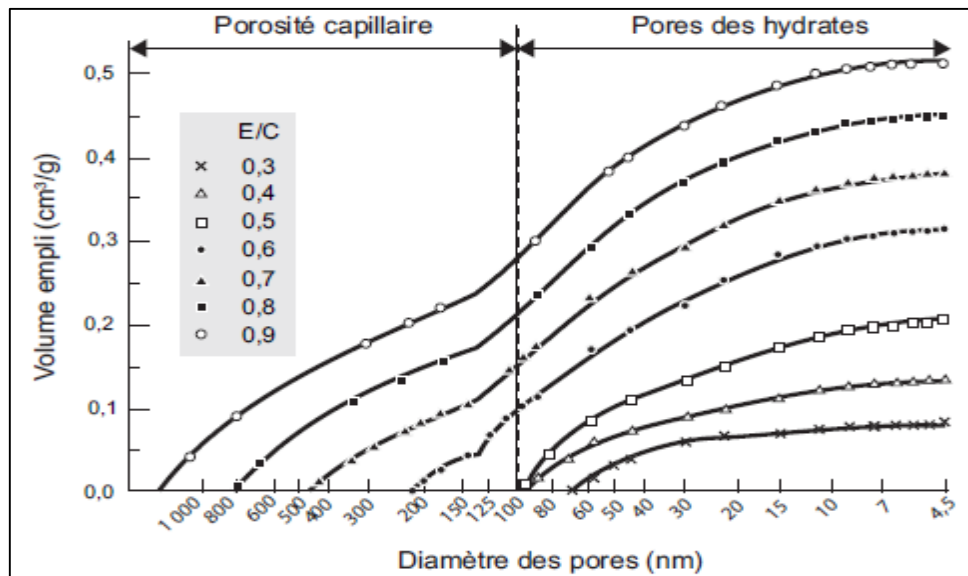


Figure I.8 : Influence du rapport E/C sur la porosité de pâtes de ciment. [7]

**I.3.6. Influence de la durée de l'hydratation sur la porosité de la pâte du ciment**

Les courbes de la figure I.9 nous renseignent sur l'évolution de la structure poreuse en fonction de la durée d'hydratation d'une pâte de ciment pour un rapport E/C égale à 0.7. [7]

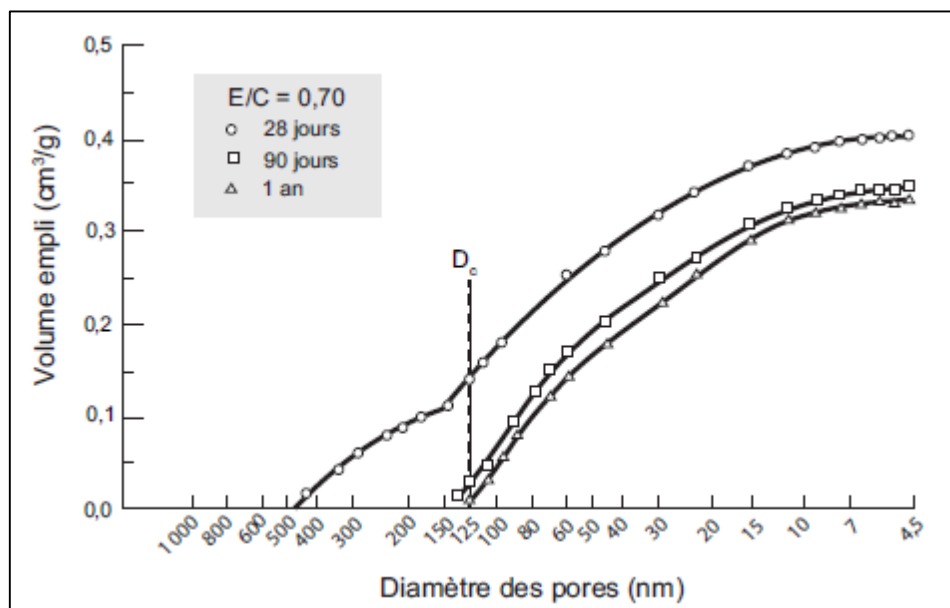


Figure I.9 : Influence de la durée de l'hydratation sur l'évolution de la porosité d'une pâte de ciment Portland de rapport E/C = 0.7. [7]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

D'après la figure 1.9, on observe qu'il y a une faible évolution de la taille des pores entre 90 jours et 1 an. Sa valeur maximale est représentée par le diamètre critique  $D_c$ . Les valeurs du diamètre des pores sont élevées en raison de la forte valeur du rapport E/C.

**I.3.7. Effet du degré d'hydratation sur l'interconnexion des pores capillaires**

Les possibilités de transfert dans le béton sont influencées par l'interconnexion des pores capillaires. La dimension des espaces de pénétration des agents agressifs est fortement modifiée par l'interconnexion ou la non-interconnexion de ces pores.

La figure I.10 présente la variation du pourcentage des capillaires interconnectés en fonction du degré d'hydratation pour différents rapports E/C. les pores capillaires peuvent être segmentés pour des degrés d'hydratation inférieurs à 1. Plus le rapport E/C augmente, plus le degré d'hydratation conduisant à la segmentation des capillaires est élevé. [8]

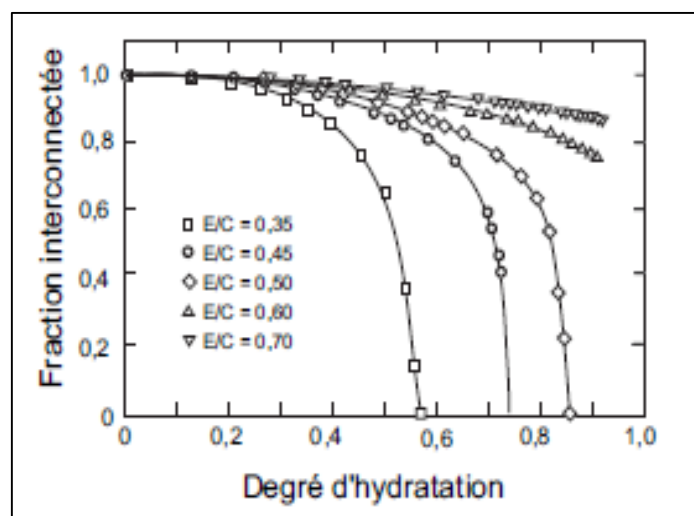


Figure I.10 : Influence du degré d'hydratation sur l'interconnexion des pores capillaires. [8]

**I.3.8. Effet du pourcentage des pores capillaires sur leurs interconnexions**

La figure I.11 montre que l'interconnexion des pores capillaires ne dépend que de la porosité capillaire. En dessous d'une porosité capillaire de 18 %, les pores capillaires ne sont plus interconnectés. [8]

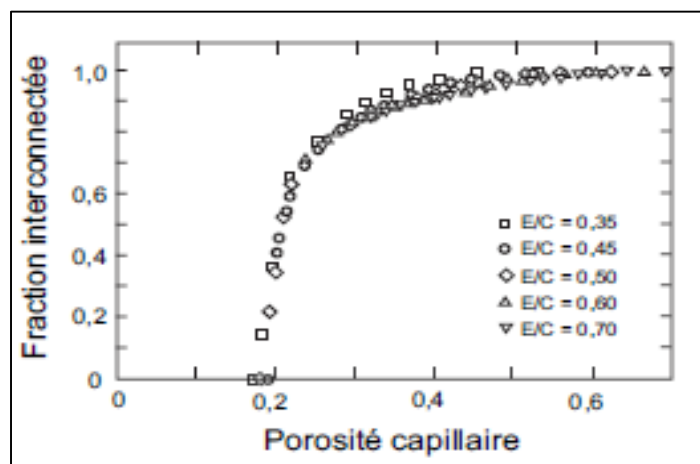


Figure I.11 : Influence de la porosité capillaire sur leurs interconnexions. [8]

**I.3.9. Influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur l'interconnexion des pores capillaires**

La figure I.12 illustre l'influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur l'interconnexion des capillaires. Dans cette figure, on peut voir que pour des rapports E/C supérieurs à 0.7, la porosité capillaire est toujours interconnectée, même après une hydratation complète du ciment. Donc, le transfert de fluide dans le matériau se fait à travers un système interconnecté de pores capillaires, quel que soit le degré d'hydratation donc, quel que soit l'âge. La valeur de 0.7 pour le rapport E/C constitue la valeur critique pour l'interconnexion des pores capillaires. Lorsque ce rapport diminue en dessous de 0.7, la segmentation du réseau capillaire s'obtient à des degrés d'hydratation plus faibles. [9]

Les bétons de faible rapport E/C peuvent résister beaucoup mieux à la pénétration des agents agressifs. La norme sur les bétons NF EN 206 donne des valeurs limites du rapport E/C d'autant plus faible que le milieu est plus sévère. [3,5]

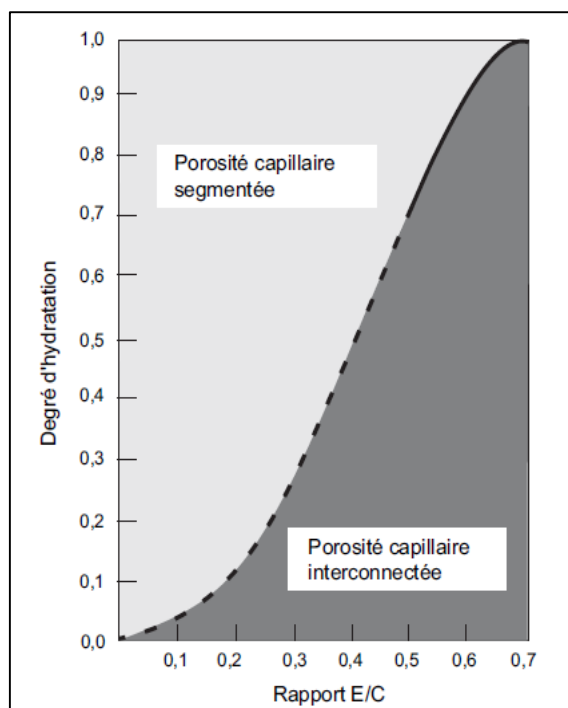


Figure I.12 : Influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la continuité des pores capillaires. [9]

Le tableau I.3 indique la relation entre le rapport E/C et la durée de segmentation (durée d'hydratation) du réseau capillaire des pâtes de ciment Portland.

Rapport E/C	Durée de l'hydratation
0.4	3 jours
0.45	7 jours
0.5	14 jours
0.6	6 mois
0.7	1 an
>0.7	impossible

Tableau I.3: Relation entre le rapport E/C et la durée d'hydratation du ciment portland [9]

### I.3.10. Méthodes de caractérisation de la porosité du béton

Plusieurs méthodes sont utilisées pour caractériser la structure poreuse des bétons. Il ne faut pas confondre entre la porosité avec la porosité ouverte et la porosité ouverte interconnectée. La détermination de la taille des pores est beaucoup plus complexe. Parmi les méthodes de caractérisation de la porosité des matériaux cimentaires, on peut citer : [5]

#### I.3.10.1 Mesure de la porosité accessible à l'eau : Peau

Cette méthode consiste à saturer le matériau sous vide. Le volume apparent est déterminé alors au moyen d'une pesée hydrostatique, et le volume des vides est obtenu par différence entre la masse de l'échantillon saturé et celle mesurée après séchage dans une étuve à 105 °C jusqu'à masse constante. La procédure de cette méthode est illustrée dans la norme (NF EN 18-459) ainsi que la recommandation qui fixe en particulier la taille minimale de l'échantillon et les modalités du séchage [10]. Cette méthode est particulièrement utilisée pour caractériser les pores dont le rayon est de l'ordre de la dizaine de nm. [5]

#### I.3.10.2 Méthode d'analyse d'images

Cette méthode est basée sur l'analyse d'images numériques sur des échantillons de béton en utilisant microscopie électronique à balayage. La porosité est connue par les vides observés sur l'image obtenue [11]. On peut utiliser cette méthode pour connaître les teneurs volumiques des différents hydrates et le degré d'hydratation. [12]

La figure I.13 présente une image de la microstructure d'un béton en utilisant une microscopie électronique à balayage. Dans cette image, on peut voir la partie du ciment non hydrater en gris clair, les hydrates sont en gris moyens, les granulats en gris sombre et les microfissures en noir. [13]

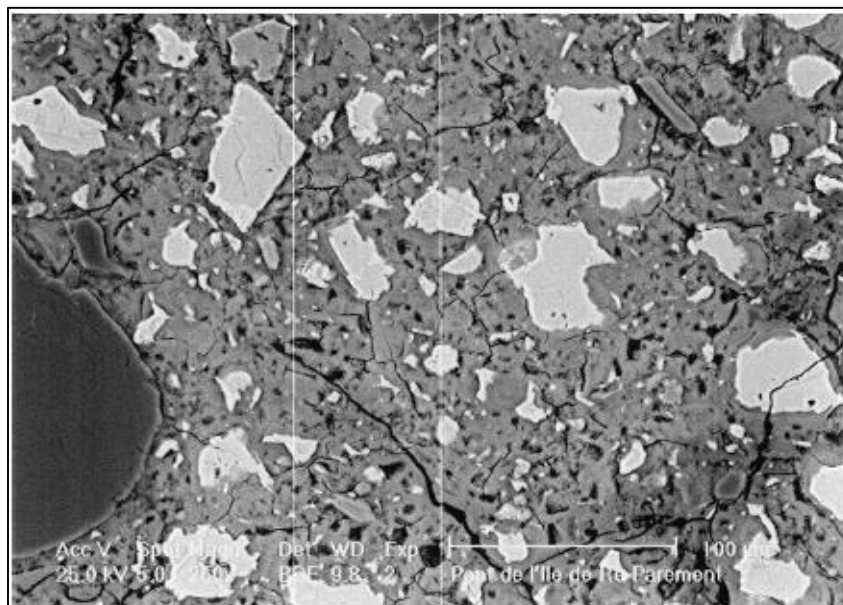


Figure I.13 : Microstructure du béton (image par le microscope électronique à balayage) [13].

En utilisant l'analyse d'image, la mesure des pores ne se mesure pas facilement, car les plus petits pores des hydrates sont de l'ordre du nanomètre. Ce qui nécessite de disposer d'images à fort grandissement. Cette méthode est alors peu adaptée à l'étude de la structure poreuse des bétons, car elle nécessite des quantités d'images considérables pour disposer d'une représentation significative. [5]

### I.3.10.3 Méthode dite la porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure est la méthode la plus utilisée pour caractériser la structure poreuse des bétons. Dans cette méthode, un échantillon préalablement séché est soumis à des pressions croissantes de mercure. Ce liquide non mouillant pénètre progressivement dans le matériau. [5]

Cette méthode nécessite un séchage préalable de l'échantillon qui risque de modifier sa microstructure. L'Association française de génie civil a proposé une recommandation pour la préparation des échantillons lors des essais. [14]

La porosimétrie à mercure permet aussi d'évaluer la porosité ouverte, le volume des vides ouverts étant calculé en utilisant le volume total de mercure injecté à travers l'échantillon sous une haute pression. Les valeurs obtenues par cette méthode sont ainsi inférieures à celles mesurées à l'eau [15, 16]. Ce résultat est généralement expliqué par le fait que la porosimétrie à mercure ne comptabilise pas les très petits pores, car la pression maximale appliquée est limitée alors que tous les pores sont en principe facilement accessibles à l'eau. [3]

## I.4. Écoulement des fluides dans le béton

Les principaux fluides qui peuvent pénétrer et déplacer à travers le béton sont l'eau pure ou agressive, le gaz carbonique et l'oxygène. Le déplacement de ces fluides dans le béton dépend de la structure de la pâte de ciment hydraté. La durabilité du béton dépend alors de la facilité du déplacement de ces fluides dans le béton. La pénétration de fluide dans le béton se fait par diffusion, d'absorption et d'écoulement. [4]

Dans le béton, il existe plusieurs types de pores qu'ils peuvent contribuer ou non à la perméabilité. La porosité exprimée en pourcentage mesure la proportion du volume total de béton occupé par les pores. Si la porosité est élevée et les pores sont interconnectés, le transport de fluide à travers le béton est important d'où une perméabilité élevée. Si par contre, la porosité est élevée, mais les pores sont discontinus, le passage de fluide est faible ce qui produit une perméabilité réduite. [4]

La perméabilité se fait par un écoulement du fluide à travers le béton sous un gradient de pression. La diffusion est le déplacement du fluide sous un gradient de concentration, alors que l'absorption est la conséquence des mouvements capillaires dans les pores ouverts sur le milieu ambiant. [4]

## I.5. La perméabilité à l'eau des bétons

### I.5.1. Introduction

Chaque structure en béton doit conserver ces qualités et continuer de remplir ces fonctions au cours du temps. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé. [4]

La détérioration des bétons résulte de facteurs externes ou de facteurs internes au béton. Les actions sur le béton peuvent être mécaniques, chimiques ou physiques. [4]

- Les dommages d'origine mécaniques comprennent les chocs, l'érosion ...

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

- Les causes chimiques comportent les agressions par les chlorures, les sulfates, le gaz carbonique et les liquides et gaz d'origine naturelle ou industrielle ...
- Les causes physiques de détérioration comprennent l'élévation de température, les cycles de gel-dégel ...

A l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes associés à la durabilité font intervenir l'écoulement d'un fluide (liquide ou gaz) à travers le béton. Il est donc nécessaire de bien comprendre ce phénomène lorsque la durabilité est en cause. [4]

**I.5.2. Définition de la perméabilité**

La perméabilité du béton est sa capacité d'être traversé par des fluides sous un gradient de pression. Les fissures interconnectées provoquent une augmentation de la perméabilité en facilitant la pénétration d'agent agressif. Ainsi, la durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquide et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton. [3]

La perméabilité est une propriété macroscopique pour les matériaux contenant des pores interconnectés. Le débit qui traverse le béton résulte des écoulements à travers les pores du matériau. Les bétons durables sont, en général, des bétons de faible perméabilité dans la mesure où cette faible perméabilité limite la pénétration des agents agressifs au sein du béton. [3]

Le coefficient de perméabilité d'un matériau  $K$  est défini par la relation de Darcy. Cette relation exprime le débit volumique  $Q$  du liquide de viscosité  $\mu$  traversant une épaisseur  $dx$  du matériau de section  $A$  sous un gradient de pression  $dp$ . Cette relation suppose un régime d'écoulement permanent dans les pores du matériau. [3,5]

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{dp}{dx} \tag{I.8}$$

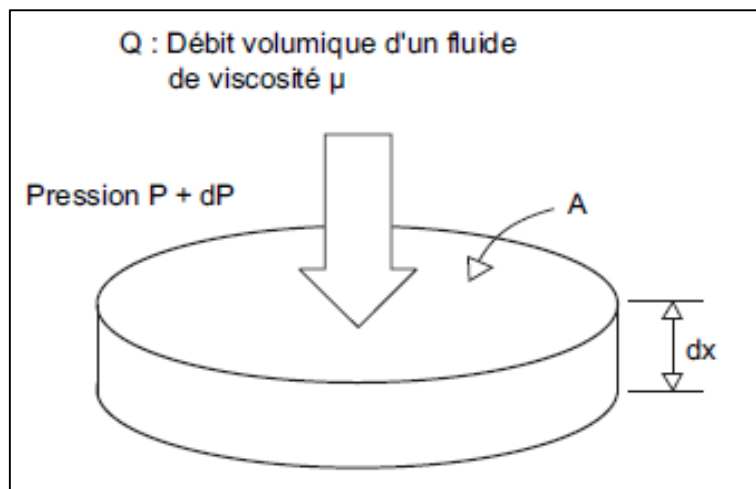


Figure I.14 : Flux linéaire de l'eau à travers l'échantillon [3,5]

La relation (I.8) suppose que le régime d'écoulement est laminaire dans les pores du matériau et que le fluide est inerte vis-à-vis du matériau. Lorsque le fluide qui s'écoulant à

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

travers le matériau est l'eau, on emploie une autre grandeur notée  $K_w$  et appelée « coefficient de perméabilité à l'eau ». [3,5]

On exprime alors la vitesse apparente de l'eau  $u_a$ , rapport entre le débit volumique et la section apparente du matériau, et on introduit le gradient hydraulique : [3,5]

$$\frac{dh}{dx} \left( \frac{dp}{dx} = \frac{dh \rho_{\text{eau}} g}{dx} \right) \tag{I.9}$$

Où  $\rho_{\text{eau}}$  est la masse volumique de l'eau).

La relation (I.8) peut alors s'écrire :

$$u_a = \frac{Q}{A} = \frac{k \rho_{\text{eau}} g}{\mu_{\text{eau}}} \cdot \frac{dh}{dx} = K_w \frac{dh}{dx} \tag{I.10}$$

$K_w$  est défini par la relation :

$$K_w = \frac{k \rho_{\text{eau}} g}{\mu_{\text{eau}}} \tag{I.11}$$

Le coefficient de perméabilité  $K_w$  est homogène à une vitesse et s'exprime en m/s dans le système international. Ce n'est plus une grandeur intrinsèque puisqu'elle dépend du matériau, mais aussi des caractéristiques de l'eau. [3,5]

D'après la définition de  $K_w$ , on peut montrer qu'une perméabilité de  $1 \text{ m}^2$ , correspond à un coefficient de perméabilité de  $10^7 \text{ m/s}$  à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . [3,5]

**I.5.3. Relation entre la porosité capillaire et perméabilité**

La perméabilité du béton dépend de la dimension, de la distribution, de la forme et de la continuité des pores. la porosité du gel de ciment est de 28%, sa perméabilité est seulement de  $7 \times 10^{-16} \text{ m/s}$ . L'eau s'écoule alors beaucoup plus facilement à travers les pores capillaires plus gros en comparant avec les pores de gel plus petits. la pâte de ciment tout entière est de 20 à 200 fois plus perméable que le gel. Il en résulte que la perméabilité de la pâte de ciment hydraté est déterminée par sa porosité capillaire. [20]

La relation entre la porosité capillaire et la perméabilité à l'eau d'une pâte de ciment est donnée dans la figure I.15 ci-dessous.

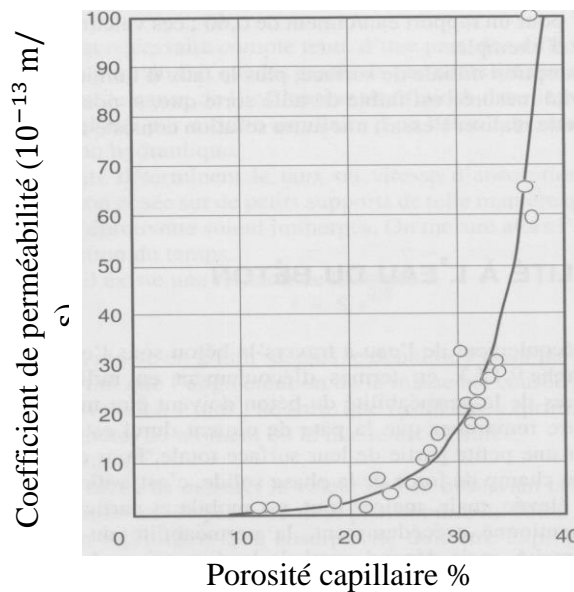


Figure I.15 : Relation entre la porosité capillaire et la perméabilité à l'eau d'une pâte de ciment [20].

**I.5.4. Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau**

Le coefficient de perméabilité à l'eau diminue avec le rapport E/C. Pour des pâtes de ciment de même degré d'hydratation, la perméabilité diminue lorsque le dosage en ciment augmente, c'est à dire lorsque le rapport E/C diminue [4]. La figure I.16 montre la variation de la perméabilité à l'eau d'une pâte de ciment avec le rapport E/C. Dans cette figure, on peut constater qu'une réduction du rapport E/C de 0.7 à 0.3 réduit considérablement le coefficient de perméabilité. [17]

Les données de la figure 1.16 confirment bien le rôle de l'interconnexion des capillaires. Les capillaires sont toujours interconnectés pour des rapports E/C supérieurs à 0,7. Dans ce cas, la perméabilité augmente très vite avec la quantité d'eau de gâchage. [17]

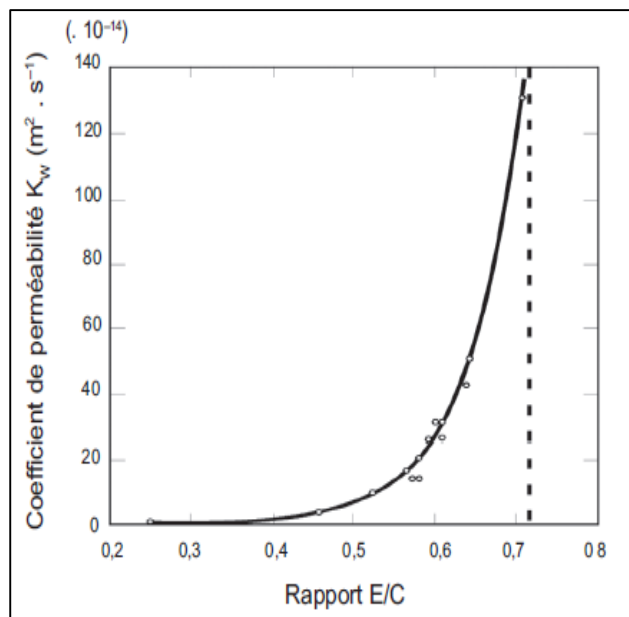


Figure I.16 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau et le rapport E/C d'une pâte de ciment hydraté à 93 % [17].

**I.5.5. Influence de la durée de cure humide initiale sur la perméabilité**

La progression de l'hydratation influe considérablement sur la perméabilité d'une pâte de ciment. Lorsque la pâte est fraîche, l'écoulement de l'eau est influé par les grains de ciment anhydre. Lorsque l'hydratation progresse, la perméabilité décroît rapidement parce que le gel remplit l'espace occupé par l'eau de gâchage [4]. Le tableau I.4 présente les valeurs du coefficient de perméabilité d'une pâte de ciment à différents âges pour un rapport E/C de 0.7.

Age (jours)	Coefficient de perméabilité K(m/s)
Frais	$2 \times 10^{-6}$
5	$4 \times 10^{-10}$
6	$1 \times 10^{-10}$
8	$4 \times 10^{-11}$
13	$5 \times 10^{-12}$
24	$1 \times 10^{-12}$
final	$6 \times 10^{-13}$

Tableau I.4 Réduction du coefficient de perméabilité d'une pâte de ciment à différents âges pour un rapport E/C de 0.7. [17]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

L'hydratation de la peau du béton exposée à l'air atmosphérique peut être empêché et la segmentation de la porosité capillaire peut être interrompue même pour un rapport E/C faible. [4] La figure I.17 montre le rôle de la durée de cure sur la perméabilité et les propriétés de transfert dans le béton.

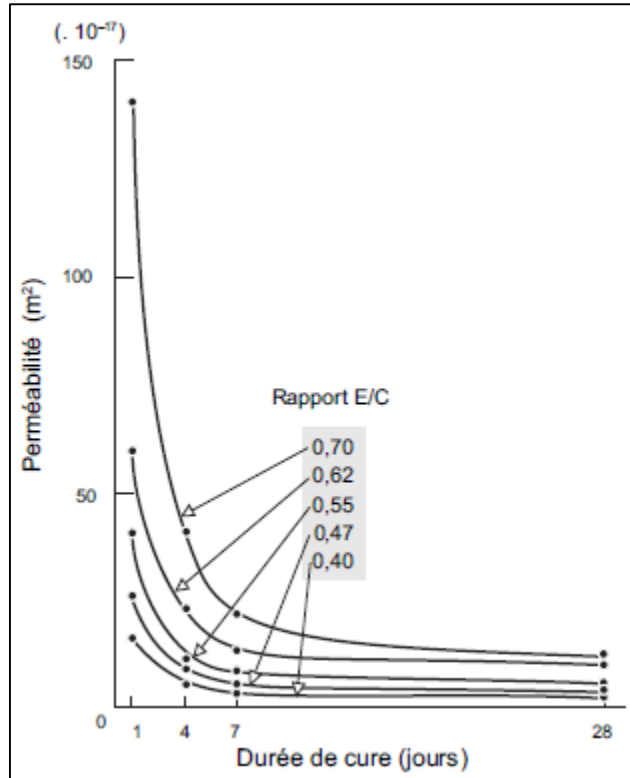


Figure I.17 : Influence de la durée de cure humide initiale sur la perméabilité au gaz de bétons gâchés par différentes teneurs en eau [18].

**I.5.6. Influence des granulats sur la perméabilité**

La différence entre une pâte de ciment et un béton est la présence de granulats. La perméabilité des granulats influe le comportement du béton et principalement sa perméabilité. Alors, si les granulats ont une faible perméabilité, cela réduit la surface à travers laquelle l'eau peut s'écouler et l'eau doit contourner les granulats pour passer dans le béton. Ainsi, le trajet parcouru par l'eau devient plus long ce qui réduit considérablement la perméabilité. [4]

Ainsi, dans un béton, l'influence du dosage en granulats sur la perméabilité est faible du fait que ces granulats sont enrobés par la pâte de ciment et la zone d'interface ne contribue pas à l'écoulement. Alors, c'est la pâte de ciment qui a une grande influence sur la perméabilité du béton. [4]

Les recherches expérimentales montrent que les perméabilités des bétons et des mortiers préparés avec le même rapport E/C et des granulats peu poreux sont du même ordre de grandeur. Sur le plan pratique, le résultat principal concerne l'influence de la taille maximale des granulats sur la perméabilité des bétons. Pour un D max variant de 10 à 20 mm, il n'y a pas de variation significative de perméabilité aussi bien pour des bétons courants que pour des bétons à hautes performances (BHP) formulés en optimisant leur squelette granulaire. [3,19]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

Le tableau I.5 représente le résultat d'une recherche sur la perméabilité à l'eau de quelques roches en comparaison avec des pâtes de ciment de même coefficient de perméabilité à l'eau [20].

Types de roche	Coefficient de perméabilité (m/s)	Rapport E/C des pâtes de ciment de même perméabilité
Basalte danse	$2.47 \times 10^{-14}$	0.38
Quartz	$8.24 \times 10^{-14}$	0.42
Marbre 1	$2.39 \times 10^{-13}$	0.48
Marbre 2	$5.77 \times 10^{-12}$	0.66
Granite 1	$5.35 \times 10^{-11}$	0.70
Grès	$1.23 \times 10^{-10}$	0.71
Granite 2	$1.56 \times 10^{-10}$	0.71

Tableau I.5: Comparaison de la perméabilité de différents types de roches et de pâtes de ciment [20].

La perméabilité à l'eau du mortier ou du béton est généralement supérieur à celle de la pâte pour un même rapport E/C à cause de zones d'interface pâte – granulat. Cette zone est moins dense et plus poreuse que le reste de la partie formée par la pâte de ciment hydraté. Cette zone d'interface présente alors une grande partie de microfissures, ce qui offre un chemin de passage facile à l'eau et aux gaz. [3]

La figure I.18 présente l'influence du rapport E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons [96].

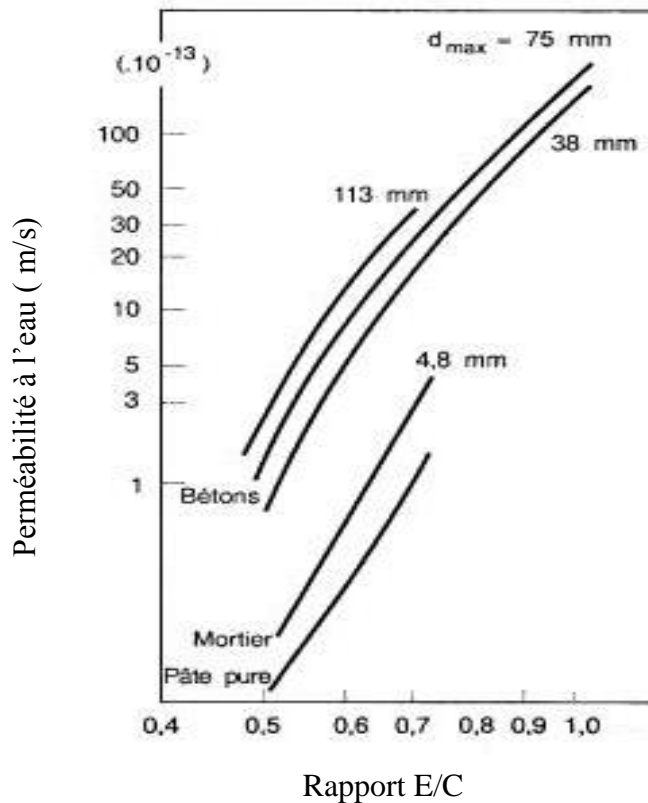


Figure I.18 : Influence de E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons. [96]

**I.5.7. Relation entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression**

Les courbes de la figure I.19 montrent qu'il y a une relation très nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression du béton. L'étude est réalisée sur plusieurs types de béton confectionnés avec ou sans ajout minéral (fumée de silice ou cendre volante). La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance. Cependant, pour des résistances supérieures à 55 MPa, la perméabilité évolue très peu et atteint un niveau très faible. [22]

D'après les résultats représentés sur les courbes, on peut voir que pour des rapports de E/L inférieur à 0,3, la perméabilité est très faible (inférieure à  $5 \times 10^{-14}$  m/s. Ces bétons de valeurs de perméabilité faibles sont considérés comme imperméables à l'eau. [22]

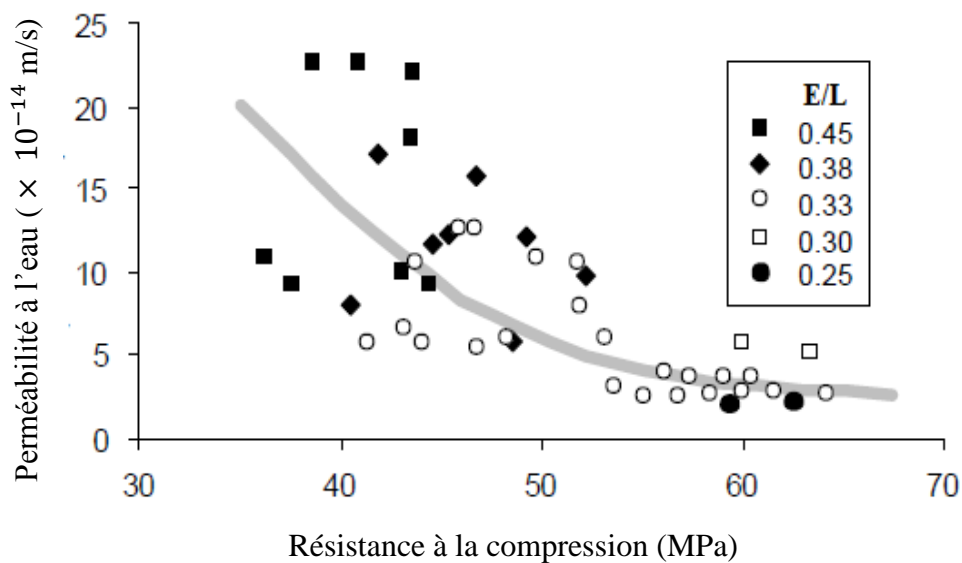


Figure I.19 : Relation entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression [21,22].

**I.5.8. Influence des ajouts minéraux sur la perméabilité du béton**

Les ajouts minéraux et les adjuvants sont de plus en plus utilisés dans les bétons. Les fillers calcaires, les laitiers de haut-fourneau et les cendres volantes peuvent aussi se trouver dans les ciments composés. [4,22]

La fumée de silice en influant sur la porosité capillaire peut réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice rend le béton imperméable lorsque ce béton est fabriqué avec un rapport E/L de 0,45. [22]

Les cendres volantes n'ont pas toujours un effet positif pour la perméabilité à l'eau du béton. Après 28 jours de mûrissement, les cendres volantes avec des pourcentages de 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 des cendres volantes devient généralement plus faible que celle du béton de référence. [4,22]

## I.6 Diffusion

La diffusion est le résultat de transport de gaz ou de la vapeur à travers le béton sous un gradient de concentration et non un gradient de pression. Les principaux éléments qui peuvent être diffusés dans le béton sont le gaz carbonique et l'oxygène. Le gaz carbonique conduit à la carbonatation de la pâte de ciment hydratée alors que l'oxygène détériore les armatures suite à la corrosion des aciers enrobés. Il faut noter que l'oxygène diffuse 1.17 fois plus rapidement que le gaz carbonique. [4]

La diffusion désigne alors le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. Une différence de concentration entre les deux milieux engendre un transport du constituant considéré de la zone la plus concentrée vers la moins concentrée jusqu'à ce qu'il y ait équilibre des concentrations. Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide ou en phase gazeuse. [3]

La phase liquide de transport intervient par exemple dans le cas de l'attaque du béton par les sulfates de l'eau de mer ou par l'acide carbonique d'un sol riche en matières organiques.

Le déplacement de gaz dans le béton ne se fait pas par écoulement (sous l'effet de différences de pression) mais plutôt par diffusion dans l'air contenu dans les pores ou les fissures du matériau. [3]

## I.7 Absorption

L'absorption est le résultat des mouvements capillaires des fluides dans les fissures du matériau ouvertes sur le milieu extérieur. Il en résulte que l'absorption ne peut se produire que sur un matériau partiellement sec. [4]

L'absorption se mesure habituellement en séchant une éprouvette de béton jusqu'à masse constante, en l'immergeant ensuite dans l'eau et en mesurant ensuite l'augmentation de la masse exprimée en pourcentage de la masse sèche. La norme ASTM C 642-90 utilisée sur petits fragments de béton, prescrit un séchage à une température de 100 à 110 °C et une immersion en eau à 21°C pendant au moins 48 heures. Pour les éprouvettes de béton, l'essai le plus utilisé consiste à un séchage à 105 °C pendant 72 heures et immersion dans l'eau pendant 24 heures. [4]

## I.8 La perméabilité aux gaz du béton

La facilité avec laquelle les gaz, l'air et la vapeur d'eau peuvent pénétrer dans le béton sont liés à sa durabilité. Les perméabilités des bétons sont généralement faibles. Pour faciliter la mesure de perméabilité des bétons, on utilise les gaz au lieu des liquides (eau). Les gaz ont une viscosité faible par rapport à l'eau. [5]

La perméabilité au gaz du béton est fortement influencée par son degré d'humidité. La perméabilité au gaz d'un béton saturé par rapport à un même béton séché dans une étuve augmente de près de deux ordres de grandeur. [4]

Théoriquement, le coefficient de perméabilité intrinsèque d'un béton doit être le même si on utilise un gaz ou un liquide pour les essais. Mais, les gaz donnent des valeurs du coefficient plus élevées en raison du phénomène de glissement à travers le matériau. Le rapport entre la perméabilité au gaz et la perméabilité à l'eau varie environ entre 6 et 100. [4]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

La perméabilité à l'air est grandement influencée par le type de murissement et par son degré d'humidité, le coefficient de perméabilité au gaz d'un béton séché au four est environ double qu'un béton saturé. Pour cette raison l'état des échantillons de béton doit être défini avant les essais. [4]

Pour faciliter les essais, le séchage au four est préférable. Cependant, le séchage ne donne pas un béton représentatif de celui d'un béton de service. La perméabilité du béton à l'oxygène dans son état réel qui est alors importante vis-à-vis de la corrosion des armatures. [4]

Les gaz se déplacent à travers le béton par diffusion ou par écoulement sous pression (perméabilité). Le gaz étant compressible, le débit volumique varie au sein de l'éprouvette et la perméabilité est calculée par la relation : [5]

$$k = \frac{2\mu Q_s P_s L}{A(P_e^2 - P_s^2)} \quad (I.12)$$

Où  $P_e$  et  $P_s$  sont les pressions à l'entrée et à la sortie de l'éprouvette, la viscosité du gaz et  $Q_s$  le débit volumique mesuré à la sortie de l'éprouvette, c'est-à-dire à la pression  $P_s$  (égale à la pression atmosphérique).

Le mode opératoire précise le mode de pré-conditionnement de l'éprouvette. Cette étape vise à contrôler l'humidité du béton. Il s'agit en effet d'un paramètre important de la mesure car la solution interstitielle contenue dans les pores s'oppose au passage du gaz et le débit mesuré, donc la perméabilité calculée dépend de l'état de saturation du béton. [5]

**I.9 La résistance à la compression du béton**

**I.9.1. Introduction**

La résistance à la compression du béton est sa propriété la plus importante, elle projette une image globale de la qualité du matériau puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. Cette résistance est l'élément clé lors de la conception et la réalisation des structures en béton armé. [4]

**I.9.2. Facteurs influents la résistance à la compression du béton**

Plusieurs facteurs influent la résistance à la compression du béton. Parmi ces facteurs, on peut citer le rapport E/C, la présence de vides, rapport Gel/Vide, la porosité, la grosseur des granulats, l'âge du béton. [4]

**I.9.2.1. Rapport E/C**

La résistance à la compression est inversement proportionnelle au rapport E/C. l'allure générale de la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C est donné sur la courbe de la figure I.20.

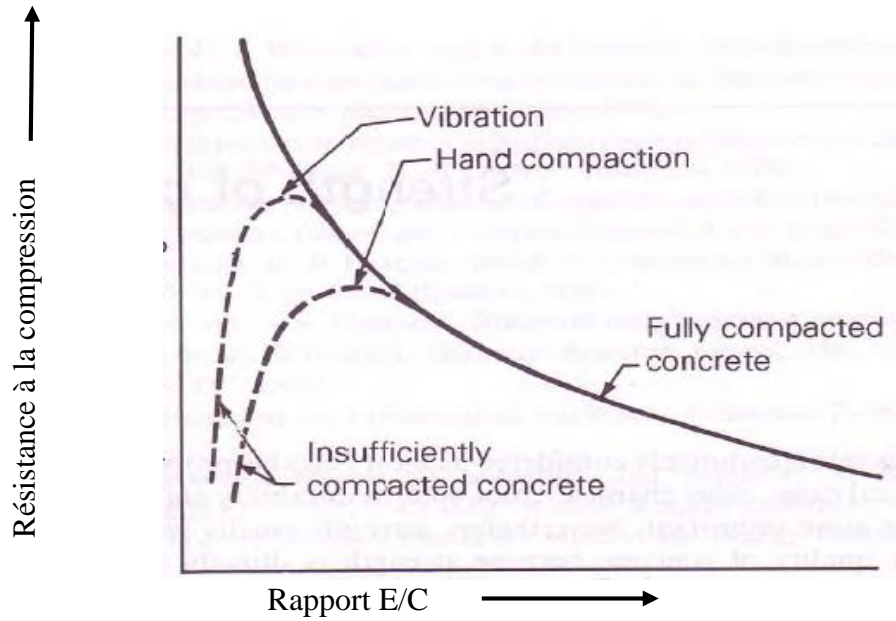


Figure I.20 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C d'un béton. [4]

Pour un ciment donné et pour des granulats acceptables, la résistance à la compression qui peut développer dans un béton maniable confectionné dans des conditions identiques de malaxage, de mise en œuvre, de conservation et d'essai, est influencé par : [4,23]

- Le rapport massique entre le ciment et l'eau de gâchage ;
- Le rapport massique entre le ciment et les granulats ;
- La granulométrie, la texture, la forme, la résistance et la dureté des granulats ;
- La dimension maximale des granulats.

La figure I.21 montre que la courbe qui représente la résistance en fonction du rapport E/C. Elle a la forme d'une hyperbole.

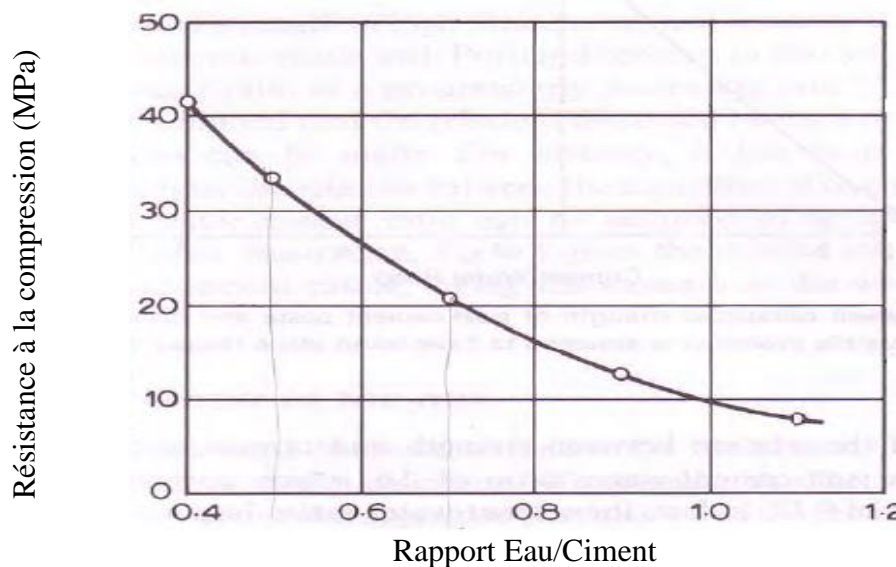


Figure I.21 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C d'un béton [4].

**I.9.2.2. Rapport Gel / Vide du ciment hydraté**

La résistance à la compression ne dépend pas seulement du rapport E/C. pour un béton ayant un rapport E/C donné. La résistance à la compression dépend du degré d'hydratation du ciment, de la température de murissement, du dosage en ciment et des propriétés de l'interface pâte- granulat. [4]

Il y a une relation entre le développement de la résistance à la compression et le rapport gel/vide qui représente le rapport entre le volume occupé par la pâte de ciment hydratée et le volume total occupé par le ciment hydraté et les pores capillaires. [4]

La relation entre la résistance à la compression et le rapport gel/vide pour trois mélange de béton, est représentée sur la figure I.22

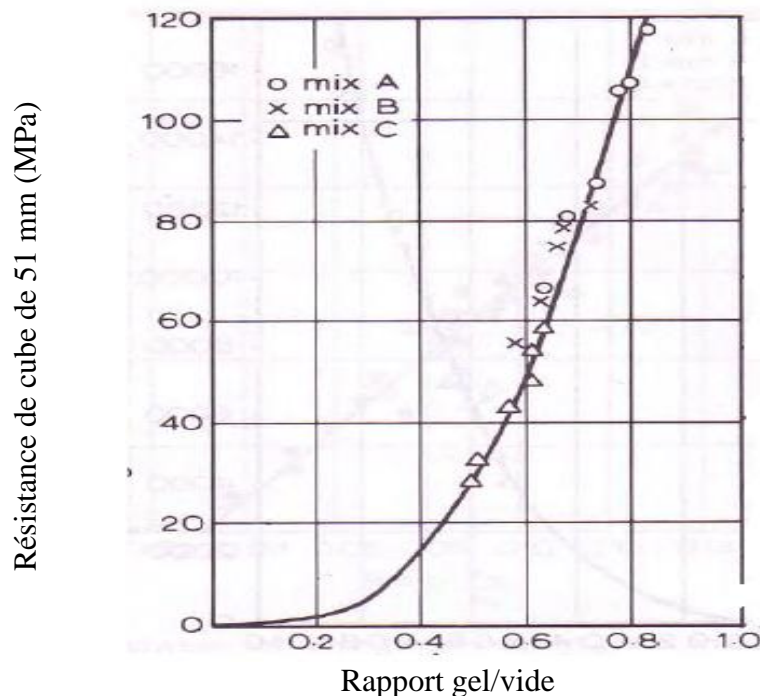


Figure I.22 : Relation entre la résistance à la compression de mortier et le rapport gel/vide [24].

**I.9.2.3. Porosité**

La résistance à la compression du béton dépend grandement du volume des vides qu'il comporte. La porosité définie comme étant le volume total de l'ensemble des vides exprimé en pourcentage du volume global de la pâte de ciment hydraté. Elle est l'un des facteurs principaux influents la résistance à la compression de la pâte de ciment [4]. La figure I.23 représente une relation linéaire entre la résistance et la porosité pour des valeurs de porosité de 5 à 28 %. Les vides pris en compte sont supérieurs à ceux des vides de gel (diamètre supérieur à 20 nm). L'effet des vides de diamètre inférieur à 20 nm est négligeable. D'après cette figure, on peut voir qu'une diminution des pores entraîne une augmentation de la résistance. [25]

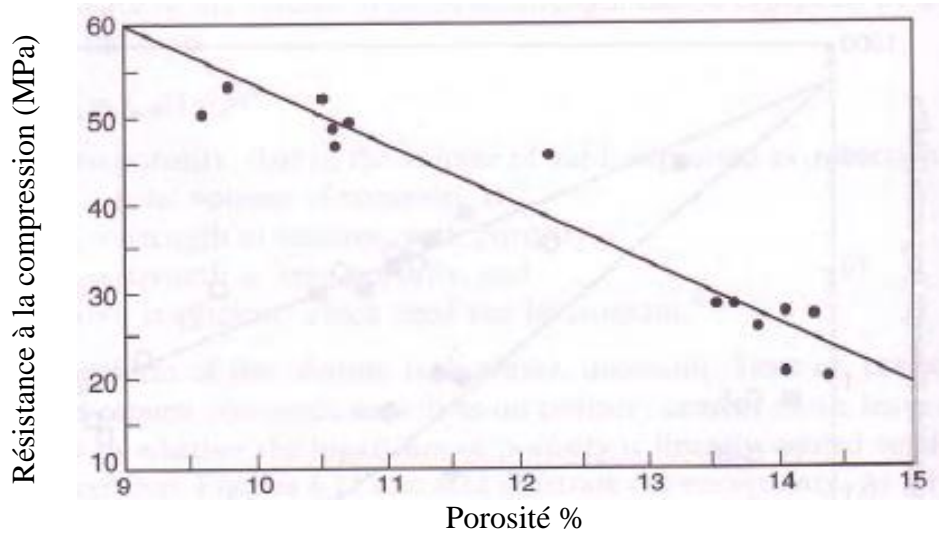


Figure I.23 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité [25]

### I.10 Influence du murissement sur les caractéristiques du béton

Pour l'obtention d'un bon béton, sa composition doit être étudiée et sa mise en œuvre correcte et en fin un murissement dans un environnement adéquat surtout pendant les premiers jours de durcissement. Le murissement est l'ensemble des précautions prises pour favoriser l'hydratation complète du ciment. Ces précautions concernent le contrôle de la température et de l'humidité autour du béton dans le but principal d'empêcher le départ d'eau de gâchage. [4]

La figure I.24 donne une indication sur l'influence de l'humidité relative de l'air sur la perte d'eau de gâchage du béton juste après sa mise en place (la température de l'air est 21 °C et la vitesse du vent est de 4.5m/s). [4]

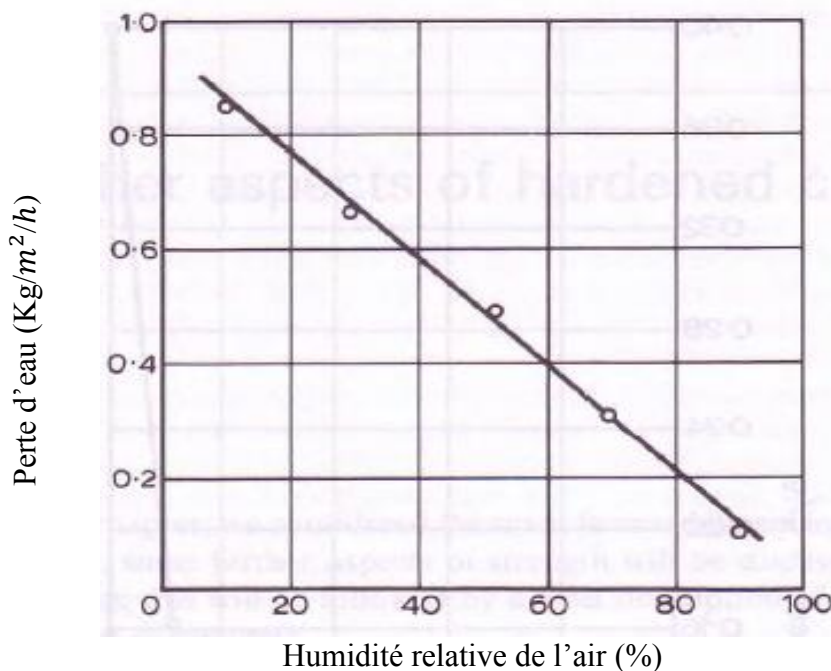


Figure I.24 : Influence du degré d'humidité de l'air sur la Perte d'eau de bétons [4]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

Ainsi, pour que l'hydratation du ciment se poursuive, il faut que l'humidité relative du béton doive être au moins 80 %. Une perte d'eau affecte négativement le développement de la résistance, elle entraîne le développement du retrait plastique et augmente la perméabilité du béton. [4]

**I.11 Influence de la température ambiante sur le béton**

Les essais réalisés dans le laboratoire sont généralement sous une température contrôlée, elle est comprise entre 18°C et 20 °C. Cependant, dans la pratique, le béton est réalisé dans des températures variées. [4]

Un murissement incorrect affecte grandement la résistance à la compression surtout dans les cas d'un rapport E/C élevé. Les méthodes de murissement sur chantier sont basées sur un arrosage continuellement de la surface du béton pendant une durée déterminée, soit en recouvrant la surface avec du sable humide ou en utilisant des tuyaux d'arrosage continuellement de la surface du béton. [4]

La figure I.25 représente l'effet de la température de l'air et du béton sur la perte d'eau juste après sa mise en place (H.R 70% et vitesse du vent 4.5m/s).

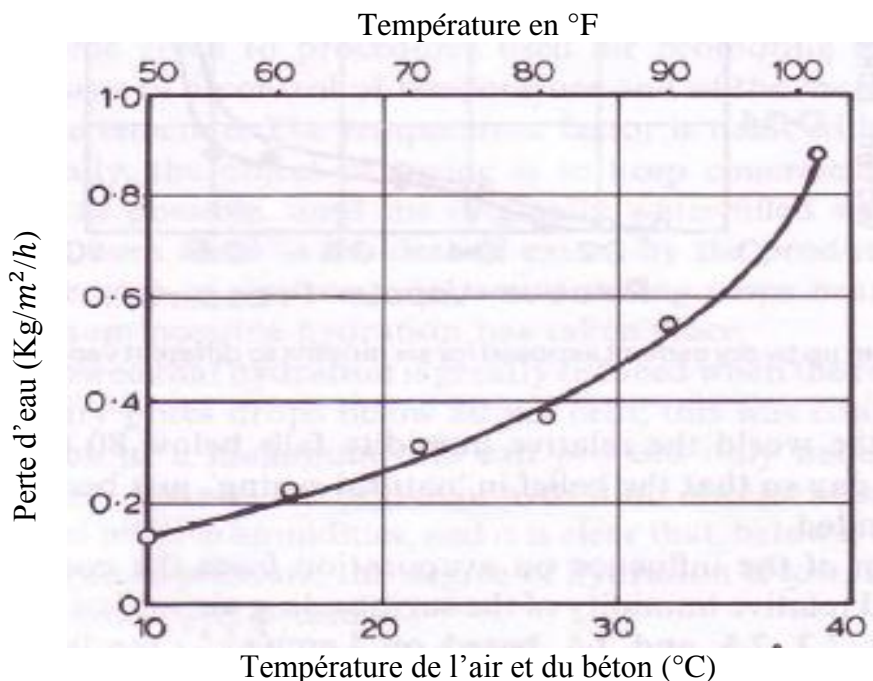


Figure I.25 : Influence de la température de l'air et du béton sur la perte d'eau de bétons [4]

Une température élevée durant la mise en place et pendant la phase de prise conduit à une augmentation de la résistance au très jeune âge. Cependant, elle peut avoir un effet inverse après 7 jours. Une haute température provoque une hydratation initiale rapide qui peut conduire à la formation de produit d'hydratation présentant une structure physique moins compacte de sorte qu'il restera une partie des pores non remplis comparés avec un ciment qui a subi une hydratation lente. Dans le cas d'une vitesse d'hydratation élevée, il y a concentration de produit d'hydratation autour des grains et n'auront pas le temps de se précipiter loin de ces grains pour avoir une distribution uniforme ce qui affecte la résistance à long terme. [2]

**STRUCTURE POREUSE ET PERMEABILITE DU BETON**

---

L'effet de la température sur la pâte de ciment au tout jeune âge (à partir de 24 heures) sur la structure de la pâte de ciment hydraté a été démontré par les deux chercheurs Goto et Roy, qui ont trouvé qu'un mûrissement à 60 °C entraîne la formation d'un volume de pores dépassant 150 mm de diamètre beaucoup plus élevé que lors d'un mûrissement à 27 °C. Ainsi la perméabilité est contrôlée par les gros pores [4].

En ce qui concerne l'influence d'une température élevée durant les premiers jours sur les caractéristiques du béton. Les résultats de recherches ont permis de conclure qu'une température de 38 °C au cours des premières 24 heures, entraînent une perte de résistance du béton à 28 jours de l'ordre de 9 à 12 % par rapport à un même béton mûri à 23 °C [4].

L'examen de l'effet d'une température élevée pendant les premiers jours sur la résistance à la compression, à montrer une réduction significative de la résistance à 28 jours de sorte qu'une température de 38 °C pendant un jour conduit à une perte de 10%, alors une même température pendant trois jours produits une perte de résistance de 38 % à 28 jours. [4]

**I.12 Problèmes liés au bétonnage pendant un temps chaud**

Les problèmes liés au bétonnage pendant un climat chaud se résument principalement à l'effet de la température plus élevée du béton et à l'accélération de l'évaporation de l'eau de gâchage dans le béton frais. Ces problèmes concernent la période de malaxage, de la mise en œuvre et du mûrissement du béton. [4]

Dans le cas d'un climat chaud, il faut prendre certaines précautions en ce qui concerne une température ambiante élevée, une température de béton élevée, une humidité faible, une vitesse de vent et un rayonnement solaire élevés. [4]

Une température élevée accélère le temps de prise du béton ce qui nécessite une plus grande quantité d'eau. Cette élévation de température entraîne une accélération de prise et une hydratation plus rapide conduisant ainsi à une résistance plus faible à long terme. Cependant, une évaporation rapide d'eau provoque de la fissuration. [4]

Une vitesse de vent qui dépasse 4.5 m/s et les rayonnements solaires peuvent être nuisible pour le béton, une protection contre le vent et des dispositions contre les rayons du soleil sont utile et doivent être prises pour protéger le béton. [4]

### 1.13 Conclusion

- ❖ La performance et la durabilité du béton dépendent de la qualité des différents composants, de leurs proportions. Principalement, la quantité d'eau de mélange qui influe sur le comportement physico-chimique de la pâte de ciment durcie. En outre, le type de ciment, la nature des agrégats fins et grossiers, la température pendant le mélange, le mode de cure et l'environnement du béton.
- ❖ La pâte de ciment est constituée d'un gel (C-S-H), de cristaux de portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), de quelques composants mineurs, de grains de ciment non hydraté et des espaces remplis ou non d'eau. Ces espaces sont appelés pores capillaires.
- ❖ La porosité capillaire de la pâte dépend à la fois du rapport E/C et du degré d'hydratation influencé par le type de ciment. Ces pores capillaires de forme variée sont de l'ordre de 1.3  $\mu\text{m}$ . Ils sont principalement la cause de la perméabilité du béton.
- ❖ Pour une quantité de ciment définie, plus le volume d'eau de gâchage est grand, plus l'espace initial entre les grains de ciment hydraté est important, ce qui produit une porosité capillaire plus grand.
- ❖ La durabilité des bétons dépend de la porosité ouverte et plus particulièrement de la porosité ouverte interconnectée. Celle qui facilite la pénétration des agents agressifs extérieurs à travers le béton.
- ❖ Le coefficient de perméabilité à l'eau diminue avec le rapport E/C. Pour des pâtes de ciment de même degré d'hydratation, la perméabilité diminue lorsque le dosage en ciment augmente, c'est à dire lorsque le rapport E/C diminue.
- ❖ L'hydratation de la peau du béton exposée à l'air atmosphérique peut être empêché et la segmentation de la porosité capillaire peut être interrompue même pour un rapport E/C faible.
- ❖ Pour l'obtention d'un bon béton, sa composition doit être étudiée et suivie d'une mise en œuvre correcte et en fin un murissement dans un environnement adéquat surtout pendant les premiers jours de durcissement. Le murissement est l'ensemble des précautions prises pour favoriser l'hydratation complète du ciment.

## *Chapitre II*

### *Différentes méthodes d'essais*

#### *de perméabilité du béton*

## CHAPITRE II

### DIFFERENTES MÉTHODES D'ESSAIS DE PERMÉABILITÉ DU BÉTON

#### II.1. Introduction

La détérioration du béton est reliée au transport des matières à travers les pores dans la structure de la pâte de ciment durcie. La corrosion des armatures, les problèmes de gel, les attaques par les sulfates, la carbonatation... sont augmentés par une forte perméabilité. [3]

Plusieurs chercheurs, Banthia et Mindess [1989], Figg [1992], Roy et coll. [1992], Tanahashi et coll. [1987] ont justifié qu'avec les tests de perméabilité, on peut prédire assez correctement la durabilité du béton [36,37].

Vu l'importance de cette qualité en ce qui concerne la durabilité du béton, plusieurs techniques et tests de perméabilité à l'eau, aux ions de chlore et aux gaz ont été développés.

La perméabilité est définie par la facilité avec laquelle les gaz et les liquides peuvent pénétrer et déplacée à l'intérieur du béton [26]. Un béton de haute perméabilité favorise la pénétration des agents agressifs causant ainsi la détérioration rapide du béton et la corrosion des armatures de renforcement [27,28]. Les essais de perméabilité peuvent réaliser en utilisant de l'eau, du gaz comme l'oxygène ou l'air.

Les essais de perméabilité à l'eau du béton n'ont généralement pas été normalisés [4]. De nombreuses méthodes d'essais permettant de déterminer la perméabilité à l'eau du béton ont été proposées. Dans ces essais tels qu'ils sont utilisés, le débit de l'écoulement sous l'influence d'une pression appliquée est mesuré. Ainsi, le coefficient de perméabilité  $K$  est calculé à partir de la loi de Darcy [4, 29,30]. Afin de mesurer la perméabilité des matériaux cimentaires, il est nécessaire d'utiliser une méthode souple, assez simple à appliquer, d'un temps de mesure court et avec une haute précision [31].

Dans ce chapitre, après avoir donné un rappel théorique concernant la détermination du coefficient de la perméabilité à l'eau du béton, nous présentons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour déterminer cette perméabilité.

#### II.2. Vue générale sur les méthodes de mesure de perméabilité du béton

L'importance de la durabilité des matériaux cimentaires envers la perméabilité a été longuement discutée. Malgré le grand intérêt de la perméabilité à l'eau du béton, il n'existe pas de méthode standard de test de perméabilité autre que les méthodes indirectes, par exemple le British initial surface Absorption Test (ISAT) (BS 1881) [51], Test de perméabilité rapide au chlorure (AASHTO T 277) [52]. Ces deux méthodes mesurent indirectement la perméabilité du béton. Pour réaliser des tests directs de perméabilité, chaque laboratoire a développé sa propre méthode avec différentes configurations en ce qui concerne, le fluide d'essai, la préparation des échantillons et le mode opératoire. Cela rend la comparaison des résultats obtenus impossible dans la plupart des cas [53]. De plus, plusieurs inconvénients ont été remarqués dans les méthodes d'essai actuelles que Janssen [54] a identifiées pour des exigences de la taille de l'échantillon d'essai, la faible débit d'écoulement du fluide, les fuites observées autour de

**DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON**

l'échantillon, les perturbations dans les résultats expérimentaux en raison de la présence d'air, le coût des appareils et la difficulté de réalisation des essais.

Nombreuses études [55] - [59], ont abordé le problème de la fuite du liquide, ces études ont proposé la méthode de scellement de l'échantillon, certains chercheurs [60] - [62], ont proposé une haute pression triaxiale pour augmenter la quantité de débit d'écoulement et des précisions des mesures. Cependant, du point de vue économique, ces cellules triaxiales sont des appareils coûteux et le coût des appareils doit être pris en considération.

La majorité des méthodes utilisées pour déterminer la perméabilité des matériaux poreux reposent sur la loi de Darcy. Dans la forme de base de cette loi, le fluide s'écoule à travers un échantillon formé de disque sous un gradient de pression. Le fluide est appliqué sous pression sur un côté de l'échantillon en maintenant l'autre côté libre à la pression atmosphérique. La perméabilité est calculée ainsi directement en appliquant la formule proposée par Darcy [32,33]. Malgré que ces méthodes sont relativement simples à réaliser, ils peuvent prendre un certain temps qui peut atteindre plusieurs semaines. L'hydratation au cours de cette longue période de test peut changer la structure poreuse du matériau qui pourrait conduire à des changements de la perméabilité. Dans le but de réduire le temps de mesure nécessaire, les recherches proposent d'appliquer une grande pression [34]. Mais, en raison d'une pression élevée, la probabilité de fuite au niveau de l'interface entre l'échantillon et les cellules de l'appareil de test peut être plus grande. Cette fuite influe énormément sur le résultat final [32].

**II.3. Perméabilité à l'eau du béton :**

Il n'existe pas de procédure standardisée pour mesurer la perméabilité à l'eau du béton. Chaque laboratoire possède sa propre procédure en 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 II.1) [6].

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

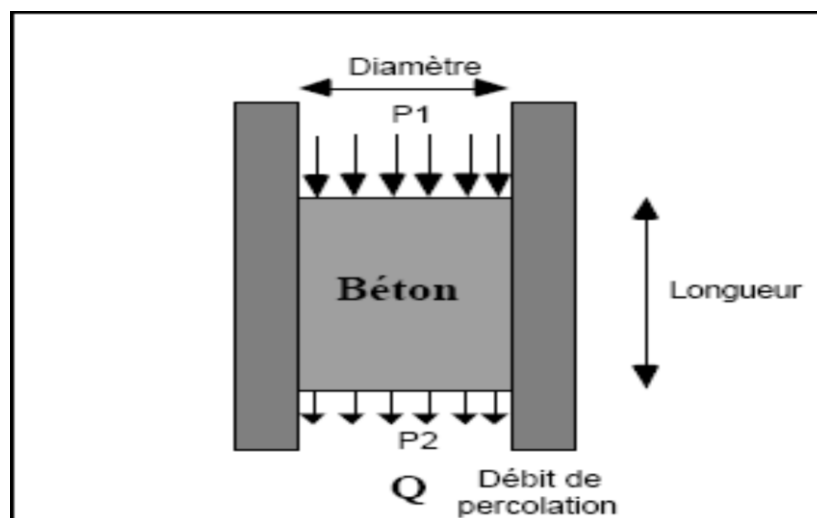


Figure II.1 : Principe de fonctionnement des appareils de mesure de la perméabilité à l'eau [6].

**DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON**

Le Bureau United states of Réclamation recommande une procédure qui utilise une pression d'eau de 2,76 MPa, ce qui correspond à une colonne d'eau de 2,82 m. Il existe aussi des essais canadiens et allemand. Dans ces essais, la pression sous laquelle l'eau est forcée de s'écouler à travers le béton est élevée, ce qui peut modifier l'état naturel du béton ; l'obstruction certains pores par colmatage est également possibles. De plus, pendant l'essai, certains grains de ciment anhydres peuvent s'hydrater en sorte que le coefficient de perméabilité qui est alors calculé diminue avec le temps [4].

**II.3.1. Appareil de mesure de la perméabilité à l'eau du béton**

D'après les travaux réalisés en 1989 par Banthia et Mindess, la perméabilité à l'eau dépend souvent de l'expérimentation et les résultats obtenus sont parfois dispersés. L'appareillage est une des causes de cet état de fait sans oublier la préparation des éprouvettes surtout dans le cas du béton [36,37].

La littérature propose plusieurs types de perméamètres, tout valables selon les auteurs, mais chacun possédant leur propre mode de fonctionnement et leurs propres limites et utilise une forme d'échantillon spéciale [36].

Selon les études de Jensen en 1988, il existe trois principaux modes permettant de mesurer la perméabilité à l'eau des bétons [38] :

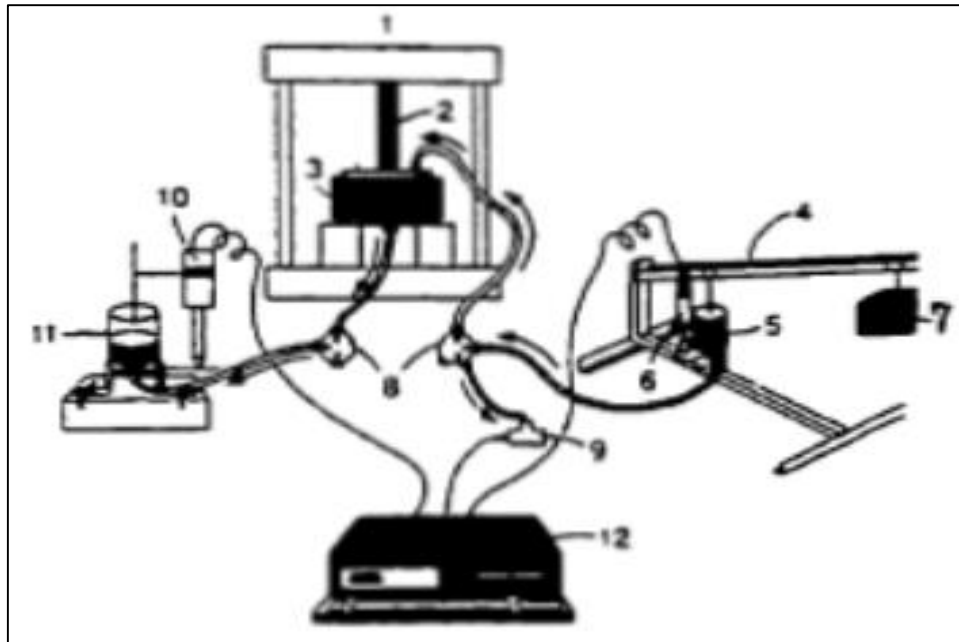
- La mesure de l'écoulement à travers un béton saturé ;
- La mesure de la pénétration d'eau dans le béton ;
- L'étude de la chute d'une pression appliquée sur une éprouvette de béton.

**II.3.1.1. Appareils mesurant l'écoulement à travers un béton saturé :**

La figure II.2 présente un appareil utilisé par Hean en 1991 [40]. Cet appareil permet d'enregistrer la quantité de fluide traversant l'éprouvette sous une pression appliquée par un poids (7). La réservation d'alimentation en eau (5) est reliée à un système d'acquisition (12) qui enregistre les quantités d'eau par mesure des variations du niveau d'eau à l'entrée de l'échantillon (6).

L'eau pénètre à travers une cellule et s'écoule dans l'échantillon. Le débit d'eau à la sortie de l'échantillon (11) est comptabilisé par l'acquisition (10). Ainsi, le régime est supposément établi lorsque la quantité d'eau qui entre dans l'échantillon est égale à la quantité qui sort [40].

Cet appareil permet de réduire considérablement le temps de l'essai à une semaine au maximum. On peut connaître à quel instant précis l'équilibre sera atteint si l'échantillon est bien saturé. L'inconvénient principal de ce système expérimental est son cout un peu plus élevé par rapport à d'autres instruments. Cependant, ce système ne demande aucune prise de lecture ni manipulation en cours de test et de plus celui-ci est très court [40].



- 1- Boîtier.
- 2- Applicateur de pression mécanique.
- 3- Cellule contenant l'échantillon.
- 4- Bras d'application de pression hydraulique.
- 5- Cylindre contenant un piston et l'eau entrant sous pression.
- 6- Dispositif d'enregistrement du débit entrant.
- 7- Masse servant à l'application de charge.
- 8- Valve d'entrée et de sortie.
- 9- Lecteur de pression.
- 10- Dispositif d'enregistrement du débit sortant.
- 11- Cylindre contenant un piston et l'eau sortant.
- 12- Unité d'acquisition de données

Figure II.2 : perméamètre à l'eau d'après Hean [40].

En 1985, Lawrence a proposé pour la première fois un appareil muni d'unités de lecture à l'aval et à l'amont de la cellule. Cette installation est fort simple et s'avère selon l'auteur très efficace. Son fonctionnement est le même que le système de N. Hearn, sauf que les lectures doivent être prises par un opérateur, ce qui en réduit le coût [41].

D'autres chercheurs ont travaillé sur des systèmes de l'écoulement du liquide d'un côté de l'éprouvette dont Ludirdja et Coll en 1989, Banthia et Mindess en 1989, Perraton et Coll en 1988, Hope et coll en 1984 et en fin Barnforth en 1991. Dans ces systèmes, la saturation est supposée être adéquate et les mesures sont prises lors de la stabilisation du débit qui peut prendre jusqu'à deux semaines [42].

En 1992, Meletiou et coll [42] ont développé un appareil de mesure de perméabilité à l'eau in situ. Le principe est simple et prometteur. Un trou est carotté dans la surface d'une structure bétonnée, on y introduit l'appareil, des éléments scellant limitent la surface de pénétration de l'eau et on débute la poussée d'eau sur une section radiale en notant la quantité d'eau qui entre. Selon les auteurs, le système donne de bons résultats. La difficulté majeure rencontrée est la saturation de la surface du trou. Le schéma de cet appareil est représenté dans la figure II.3.

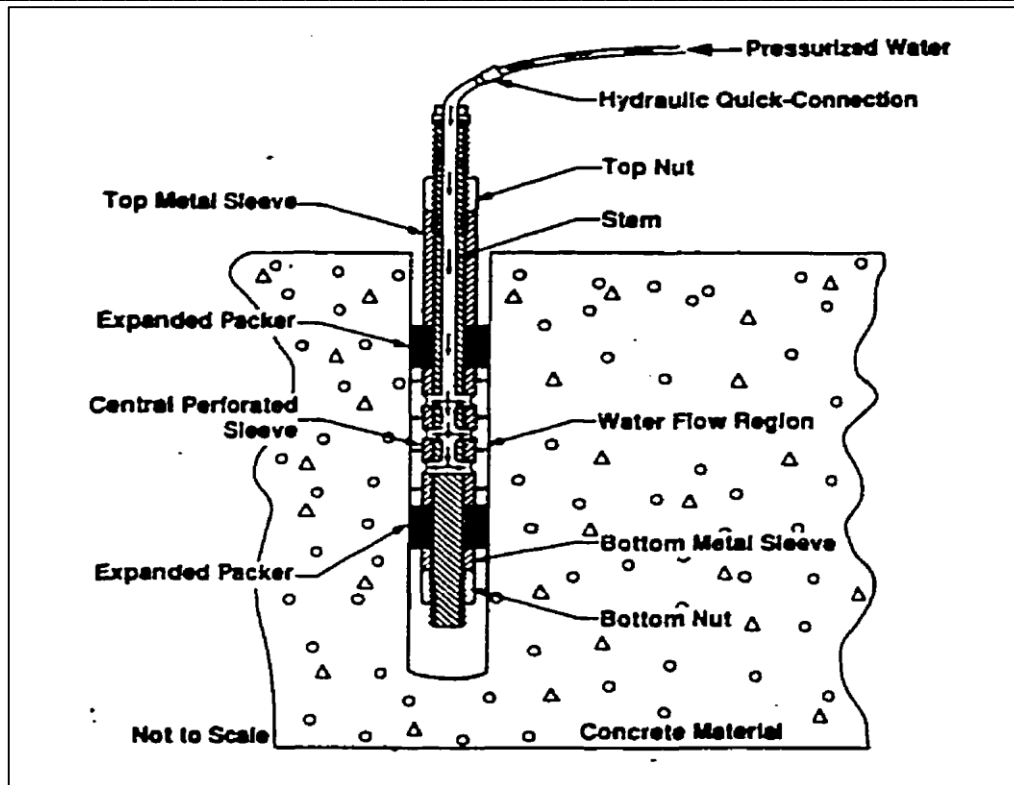


Figure II.3 Perméamètre à l'eau d'après Meletiou et coll [42].

### II.3.1.2. Appareils basés sur la mesure de la pénétration d'eau

Le principe de mesure dans ces appareils est dépendant de la capacité d'absorption d'eau du matériau. En mesurant la différence de masse avant et après l'absorption, on peut avoir un indice sur la porosité qui peut être apporté par la suite en coefficient de perméabilité. L'emploi de la pénétration de l'eau pour tirer le coefficient de perméabilité à partir de la porosité est utilisé par plusieurs chercheurs. Cependant ces techniques demeurent des corrélations établies à partir de résultats et ne sont pas des mesures directes de la perméabilité à l'eau des bétons [38].

En 1973, Figg [43] a proposé un appareil portable permettant la mesure de la perméabilité de la surface d'un béton. Le principe de cet appareil est de noter le temps requis pour que l'eau parcoure une hauteur de 50 mm dans le béton et on en tire directement le coefficient de perméabilité  $K$ . L'inconvénient de ce dispositif est que l'étude porte seulement sur une mince couche de surface (environ 10 mm), peu représentative du comportement qu'aurait une masse de béton de structure.

### II.3.1.3 Appareils basant sur la chute de pression

Hooten et Wakeley en 1989, Via Roy et coll en 1992 [44] ont présenté l'appareil de la figure II.4. Cet appareil est inspiré d'un appareil servant à mesurer de faibles perméabilités sur les roches. Le principe de fonctionnement est basé sur le rétablissement de la pression et est donc à pression variable. L'éprouvette est située entre deux réservoirs. Ces réservoirs sont sous pression  $P_u$  et  $P_l$ . l'éprouvette est saturée et confinée sous une pression  $P_c$  supérieure aux  $P_u$  et  $P_l$ . En début d'expérimentation, on augmente  $P_u$  ou  $P_l$  et on note les changements de pression  $P_c$  en fonction du temps.

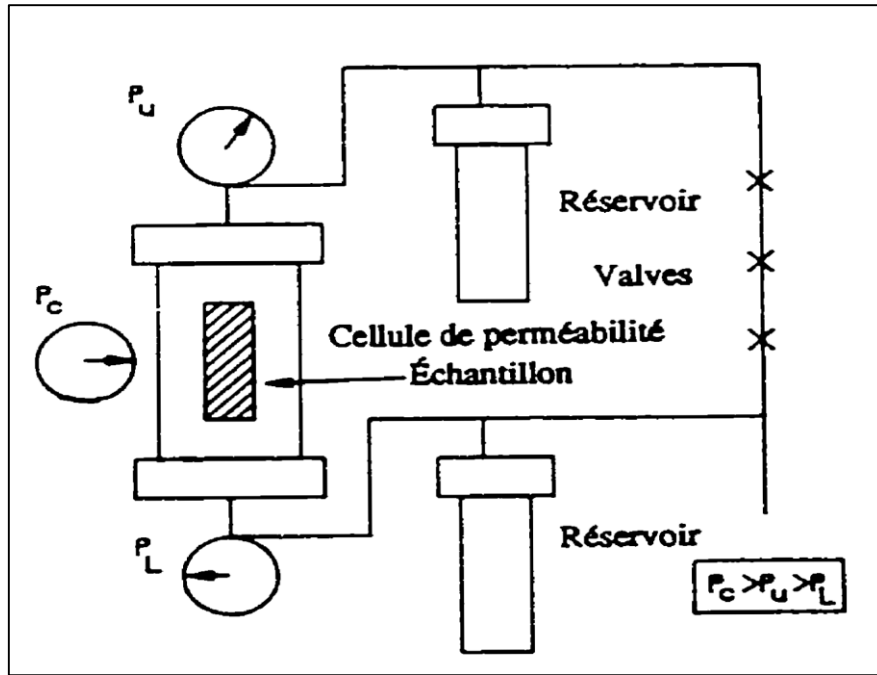


Figure II.4 Peméamètre à l'eau par mesure de pression [44].

Un autre perméamètre de fonctionnement semblable au précédent, représenté sur la figure II.5, proposée par Janssen en 1988 [45]. L'eau est poussée dans la cellule à l'aide d'une pression qu'on peut évaluer grâce au manomètre à mercure. L'eau pénètre et circulant dans l'éprouvette cause le rétablissement de pression de part et d'autre du manomètre et le test se déroule à pression non constante, le coefficient de perméabilité est ainsi calculé en utilisant les valeurs par lecture sur l'appareil.

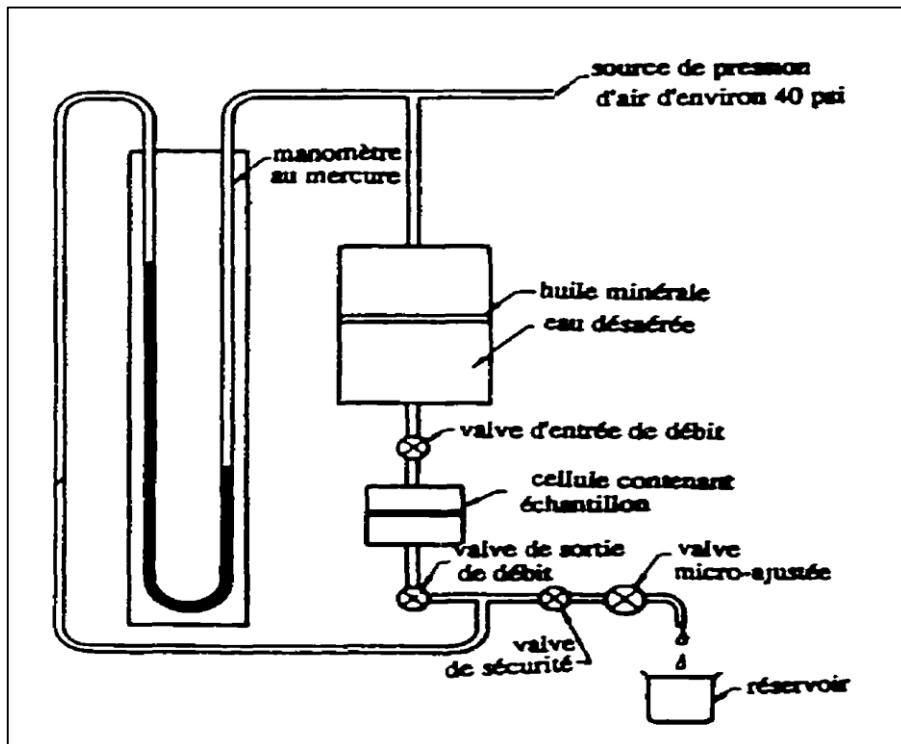


Figure II.5 Peméamètre à l'eau par mesure de pression selon Janssen [45].

## DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON

## II.3.1.4. Autres types d'appareil de mesure de perméabilité à l'eau du béton

## II.3.1.4.1. Appareil utilisé par l'université de Sherbrooke (Canada)

Le perméamètre de la figure II.6, utilisé à l'Université de Sherbrooke (Canada). Il est dérivé d'un appareil similaire couramment utilisé en mécanique des roches. Ce type de perméamètre a l'avantage d'utiliser des éprouvettes de béton (carottes ou cylindres) de 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur [22].

Étant donné que cet 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.

À partir du débit mesuré et du gradient de pression appliqué, on peut évaluer le coefficient de perméabilité à l'eau ( $K_w$ ) [22].

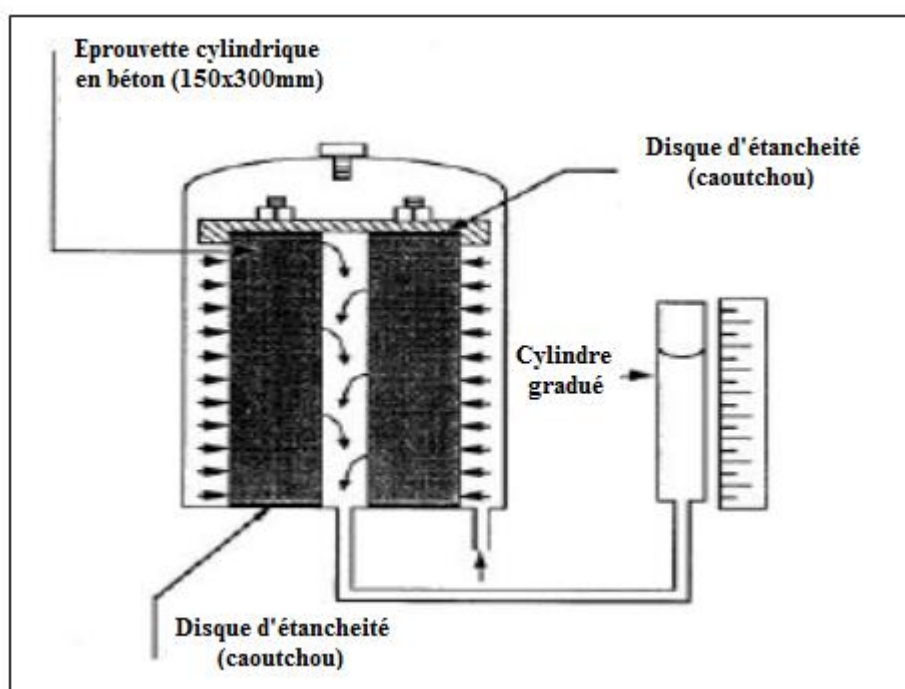


Figure II.6 Principe de fonctionnement de l'appareil de mesure de la perméabilité à l'eau utilisée à l'université de Sherbrooke (Canada) [22].

Un autre appareil similaire à celle de l'université de Sherbrooke, proposé par C. S. Sanjaya en 2007 à l'université de Singapour [51]. Le principe de cet appareil consiste essentiellement en un petit récipient sous pression dans lequel une éprouvette cylindrique creuse est placée comme représenté sur la Figure II.7. Le concept de base impliqué dans la conception de l'appareil de perméabilité proposé était de placer l'échantillon sur la surface de la plaque de base avec un joint de silicone entre les deux, mettre le couvercle sur le dessus de l'échantillon et un autre joint de silicone, mettre l'eau et serrer à l'aide d'un boulon, et enfin appliquer une pression élevée pour forcer l'eau à traverser la masse de béton environnante de manière radiale. Une fois le débit est mesuré, on peut déterminer le coefficient de perméabilité en utilisant la loi de Darcy.

## DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON

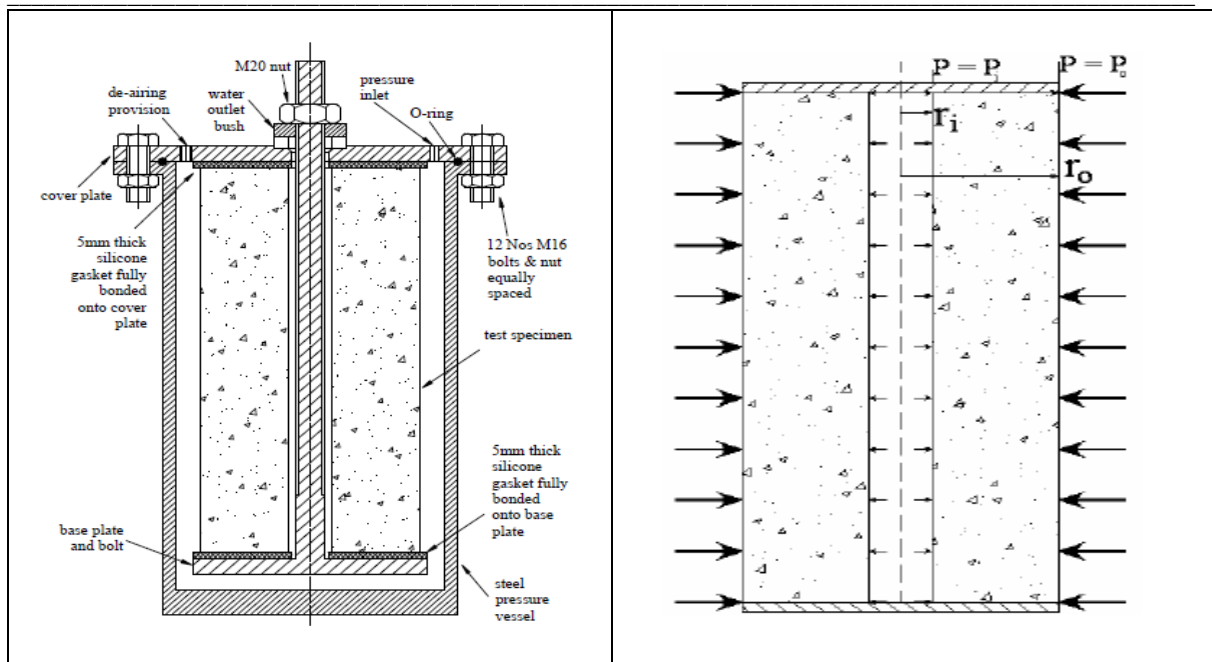


Figure II.7. Schéma de l'appareil de perméabilité à l'eau [51].

Dans l'appareil de perméabilité proposé, il n'est pas nécessaire d'avoir des exigences aussi strictes dans les dimensions. Ainsi, des échantillons de tailles différentes peuvent être testés. La seule chose qui doit être considérée dans cette méthode d'essai est d'avoir une surface plane et parallèle aux deux extrémités et ceci peut être facilement réalisé en meulant les deux extrémités de l'échantillon. Cette mesure supporte le mécanisme étanche [51].

#### II.3.1.4.2. Appareil basé sur la mesure de perméabilité à l'eau et à l'oxygène

Certains laboratoires utilisent une cellule de perméabilité développée à l'Université de Leeds (U.K.) [46, 47]. Cet appareil est largement utilisé pour déterminer la perméabilité à l'oxygène et à l'eau des bétons et des mortiers.

Les essais sont réalisés généralement sur des échantillons cylindriques de 5 cm de diamètre et 4 cm de hauteur. Les dimensions des cellules de l'appareil qui portent les échantillons déterminent la forme et la dimension de ces échantillons. Ces cellules permettent d'utiliser des échantillons de différentes dimensions par exemple (2,5 cm de hauteur et 10 cm de diamètre).

Les échantillons de test peuvent être en roche pour les agrégats ou en béton [48,49]. Le coefficient de perméabilité à l'eau est déterminé ensuite par l'expression de Valenta [50]. L'appareil est représenté dans la figure II.8 ci-dessous.

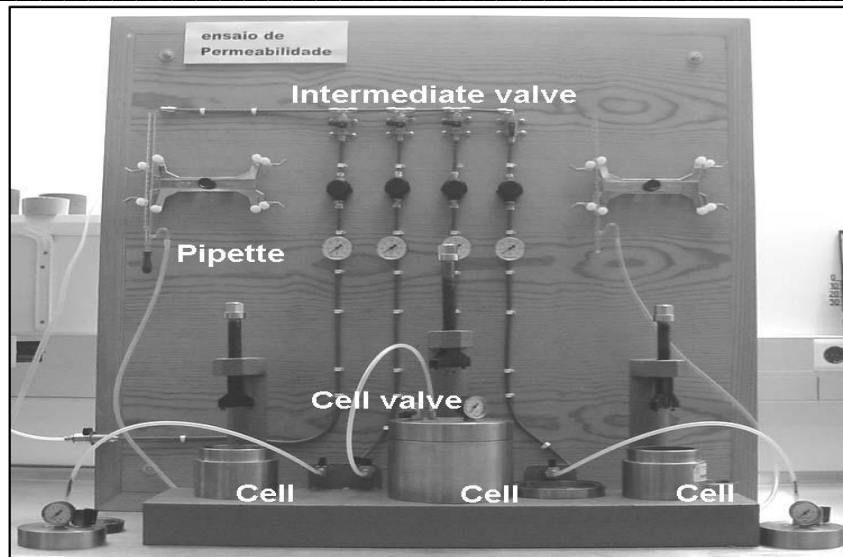


Figure II.8 Appareil de mesure de perméabilité à l'eau et l'oxygène de l'université de Leeds (U.K.) [47].

#### II.3.1.4.3. Appareillages existant au niveau du laboratoire développement des Géomatériaux - l'université de M'Sila- (Algérie)

Le laboratoire du développement des Géomatériaux de l'Université de M'Sila dispose de deux appareils permettant de réaliser les essais de perméabilité à l'eau du béton. Dans ces appareils, l'eau s'écoule sous pression constante à travers des échantillons de béton et le coefficient de perméabilité est déterminé en appliquant la loi de Darcy. Ces appareils sont schématisés comme suit :

##### a/ Perméamètre à trois (3) cellules :

Cet appareil permet de porter trois éprouvettes. Les trois cellules en verre de capacité 1l d'eau chacune, permettent la lecture du débit d'eau écoulé. La fixation des éprouvettes est assurée par serrage de boulons sur le dispositif de maintien des échantillons.



Figure II.9 : perméabilimètre à trois cellules (Laboratoire du développement des Géomatériaux – université de Msila)



Figure II.10 : principe de fixation des éprouvettes cellules de l'appareil de perméabilité



Figure II.11 régulateur de pression jusqu'à 16 bars

**b/ Perméamètre à six (6) cellules :**

Le dispositif d'essai ci-dessous permet de porter six échantillons de béton à la fois. La lecture du débit d'eau écoulé pour chaque éprouvette est assurée sur des cellules (six cellules) en verre de 1.5 l d'eau de capacité chacune. Le maintien des éprouvettes est assuré par un système de serrage manuel.



Figure II.12 : perméabilimètre permettant les tests de six éprouvettes

Les éprouvettes qui peuvent être utilisés sont des cylindres de diamètre 160 mm et de hauteur variable. La technique expérimentale est basée sur l'écoulement de l'eau, c'est-à-dire l'eau traverse l'éprouvette en béton sous l'effet d'une pression appliquée.

Les composants de l'appareil sont :

- Six emplacements pour la mise en place des éprouvettes avec un système de fixation.
- Des joints en silicone en haut et en bas.
- Un régulateur de pression.
- six cellules graduées de capacité 1500 ml pour la mise en place de l'eau et la lecture du débit d'eau écoulée.
- Compresseur d'air automatique de capacité de 10 bars.

## II.4. Inconvénients rencontrés dans les appareils courants de perméabilité à l'eau

Les inconvénients les plus courants rencontrés lors de la réalisation de tests de perméabilité en laboratoire sur des échantillons de béton sont illustrés comme suit :

### II.4.1. La taille d'échantillon

Plusieurs tests de perméabilité nécessitant des exigences strictes en ce qui concerne les dimensions pour résoudre les problèmes d'étanchéité ce qui n'est pas toujours possible avec des échantillons obtenus à partir d'échantillons prélevés in situ. [54]

La plupart des appareils de perméabilité actuels nécessitent une forme cylindrique. Mais, puisque l'écoulement de fluide est linéaire par l'une des extrémités plates ce qui rend difficile d'éviter les fuites du liquide.

Dans le cas d'application d'une haute pression sur l'échantillon, une autre question concernant la rigidité suffisante de l'éprouvette doit être prise en considération.

### II.4.2. Quantité d'écoulement du fluide

D'après Janssen [54], pour des gradients hydrauliques faibles et des tailles d'échantillon moyennes, on peut s'attendre à ce que la quantité d'écoulement du fluide  $Q$  à travers un échantillon soit faible. En cas d'application d'une haute pression, il est nécessaire d'augmenter les dimensions de l'échantillon. Cela nécessite de longues périodes de temps pour réaliser l'essai.

### II.4.3. Fuite de fluide autour de l'échantillon

Les problèmes de fuite du fluide autour de l'échantillon sont couramment rencontrés. Le procédé de scellage latéral de l'échantillon est nécessaire ; le maintien des joints étanches autour de l'éprouvette semble être difficile et nécessite un grand effort. De plus, une mauvaise confection et la non-conformité de l'échantillon peuvent contribuer à la fuite du fluide [54].

### II.4.4. Air emprisonné dans l'échantillon pendant l'essai

La présence d'air emprisonné dans l'échantillon ou dans l'appareil rend difficile l'écoulement du fluide ce qui peut influencer considérablement sur les résultats obtenus et conduirait à une diminution de la perméabilité au fil du temps. Au début des essais, il est nécessaire de purger les bulles d'air ce qui n'est pas toujours facile à réaliser [54].

## II.5. Perméabilité aux gaz du béton

### II.5.1. Introduction

La perméabilité au gaz constitue une propriété importante en ce qui concerne les matériaux cimentaires. Par exemple, dans le cas des réservoirs de gaz naturel ou dans les enceintes de confinement des centrales nucléaires. Les essais de perméabilité au gaz sont utilisés pour caractériser la perméabilité des matériaux réactifs avec l'eau (béton) ou dans le cas des bétons très faiblement perméables (béton à hautes performances) [4,22].

## DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON

Pour un gaz qui pénètre dans un échantillon de béton de longueur  $L$  sous une pression  $P_1$  à l'entrée, et qui s'échappe sous une pression  $P_2$  à la sortie avec  $P_2 < P_1$ . Le flux de gaz  $Q$  est régi par l'équation de Darcy en y ajoutant un terme qui tient compte de la compressibilité des gaz [22].

Dans le cas du déplacement du gaz dans le béton, on doit faire une distinction entre le cas où le gaz se déplace sous l'effet d'une pression différentielle. On parle alors de la perméabilité. Le deuxième cas concerne la situation où la pression est la température, dans ce cas les gaz se déplacent à travers le béton par diffusion [22].

Théoriquement, le coefficient de perméabilité intrinsèque d'un béton doit être le même dans les deux cas, il est indépendamment du fait qu'on utilise un liquide ou un gaz pendant l'essai. Mais, les coefficients de perméabilité au gaz sont plus élevés que celles obtenues en utilisant l'eau en raison d'un phénomène de glissement du gaz par rapport à l'eau. [4]

La perméabilité à l'air (gaz) du béton est fortement influencée par son degré d'humidité ; c'est pour cette raison que l'état de l'échantillon doit être défini avant les tests. L'humidité du béton constitue un paramètre important de la mesure, car la solution interstitielle contenue dans les pores s'oppose au passage du gaz. Ainsi, le débit mesuré c'est-à-dire la perméabilité calculée dépend de l'état de saturation du béton. [3]

### II.5.2. Appareil de mesure de la perméabilité à l'air des bétons

Il existe diverses méthodes d'essai de perméabilité aux gaz du béton. Dans la plupart des laboratoires, la perméabilité à l'oxygène est déterminée par un appareil mis au point par Cembureau (NF P 18 – 463) [4].

#### II.5.2.1. Perméamètre à air des roches

Cet appareil est utilisé pour mesurer la perméabilité à l'air des roches (ASTM D 4525 - 85, Permeability of Rocks by Flowing Air) [22]. Cette procédure est couramment utilisée pour déterminer la perméabilité à l'air du béton. Un schéma du dispositif d'essai est représenté dans la figure II.13.

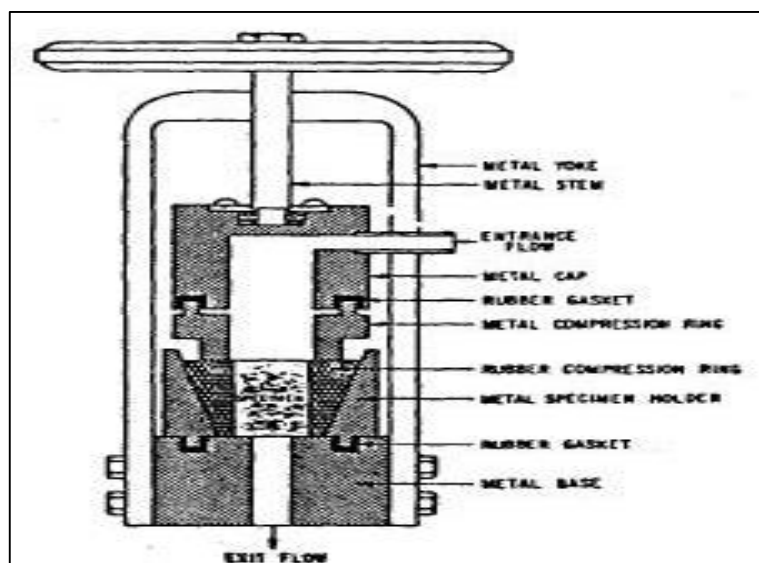


Figure II.13. Appareil de mesure de la perméabilité à l'air des roches selon la norme ASTM D4525-85. [22]

## DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON

## II.5.2.2. Perméamètre de l'université de sherbrooke (Canada)

À L'Université de Sherbrooke (figure II.14), on utilise un perméamètre mis au point par Daniel Perraton. L'appareil permet de faire des essais sur des échantillons de 38 ou 95 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur. [22]

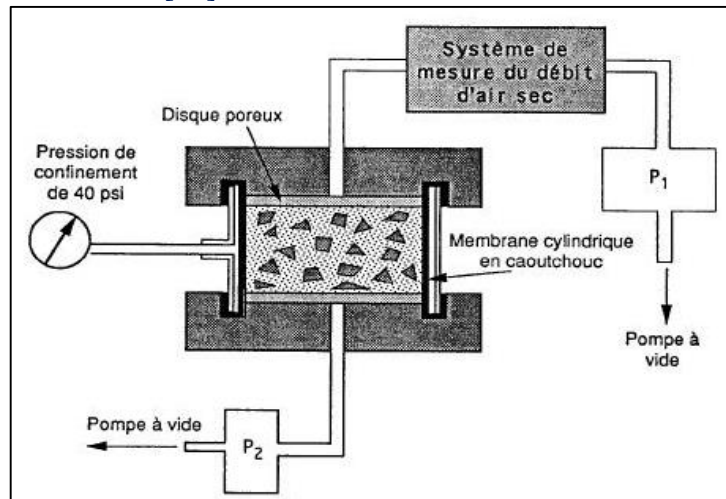


Figure II.14. Principe de fonctionnement du perméamètre à l'air utilisé l'université de Sherbrooke [22]

## II.5.2.3. Perméamètre basée sur l'écoulement latérale du gaz

C'est un montage expérimental utilisé à l'école Centrale de Nantes de Nantes (France) [63]. Dans ce procédé, le gaz est injecté par la surface intérieure de l'éprouvette à l'aide d'un plateau métallique percé et adapté au diamètre d'une éprouvette cylindrique creuse. Ainsi, l'écoulement obtenu est radial. La figure II.15 ci-dessous représente le principe de fonctionnement de cet appareil. [63]

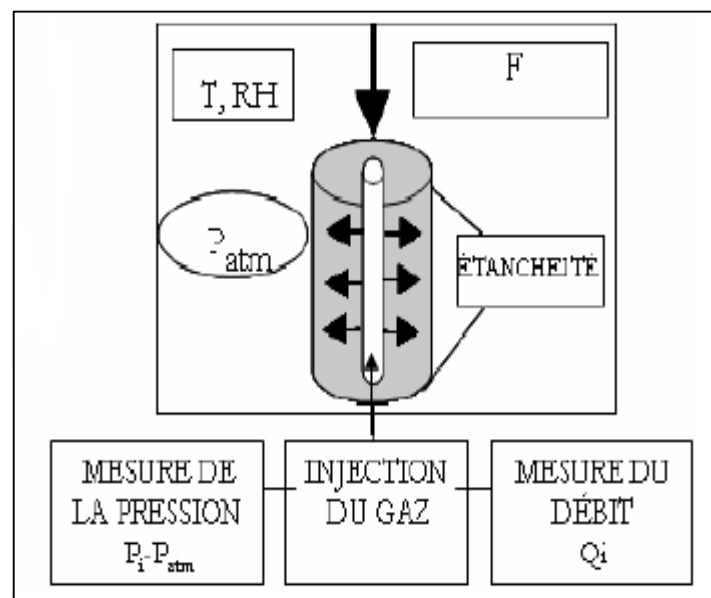


Figure II.15. Principe de fonctionnement du montage expérimental utilisé à l'université de Nantes (France) [63].

**DIFFERENTS METHODE D'ESSAIS DE PERMEABILITE DU BETON****II.5.2.4. Dispositif d'essai dit Cembureau (NF P 18 – 463)**

Le dispositif normalisé le plus utilisé est celui dit perméamètre Cembureau (NF P 18 - 463). Cet appareil permet de mesurer la perméabilité à l'azote, à l'oxygène ou à l'air (suivant l'alimentation en gaz choisie). Le gaz le plus couramment utilisé pour la mesure est l'oxygène. Il s'agit d'une méthode de laboratoire, applicable aux éprouvettes moulées et aux carottes issues d'ouvrages, dans les limites des tolérances dimensionnelles imposées par les cellules de mesure de l'appareil. Il est possible de mesurer des valeurs de perméabilité comprises entre  $5 \times 10^{-19} m^2$  et  $5 \times 10^{-15} m^2$ . Ainsi, cette méthode s'applique à la plupart des bétons ordinaires et à hautes performances. [3]

L'éprouvette du béton à tester est de forme cylindrique de 15 cm de diamètre et 5 cm de hauteur. Elle est emprisonnée dans une cellule où une chambre à air qui permet d'assurer l'étanchéité latérale. Le gaz (oxygène) traverse le béton sous une différence de pression de quelques centaines de kPa, et son débit volumique est mesuré à la sortie. [63]

Le perméamètre doit être installé dans une salle climatisée ( $T = 20 \pm 1^\circ C$  et  $HR = 65 \pm 5 \%$ ), sans courant d'air au voisinage de l'appareil.

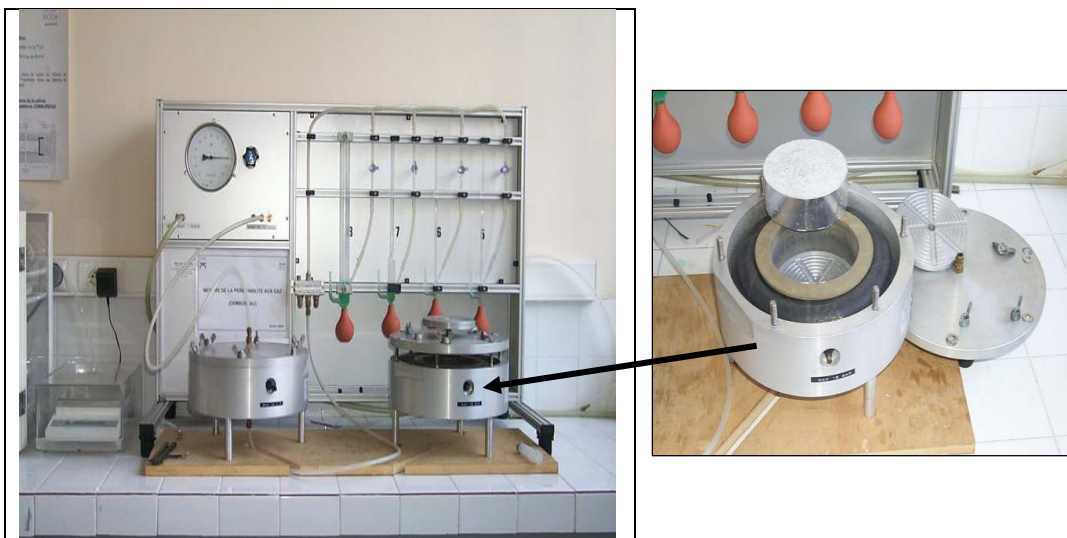


Figure II.16. Une vue d'ensemble du perméamètre Cembureau). [63]

**II.6. Conclusion**

- ❖ Les essais de perméabilité à l'eau du béton n'ont généralement pas été normalisés. De nombreuses méthodes d'essais permettant de déterminer la perméabilité à l'eau du béton ont été proposées. Malgré le grand intérêt de la perméabilité à l'eau du béton, il n'existe pas de méthode standard de test de perméabilité autre que les méthodes indirectes,
- ❖ Pour réaliser des tests directs de perméabilité, chaque laboratoire a développé sa propre méthode avec différentes configurations en ce qui concerne, le fluide d'essai, la préparation des échantillons et le mode opératoire. Cela rend la comparaison des résultats obtenus impossible dans la plupart des cas
- ❖ La majorité des méthodes utilisées pour déterminer la perméabilité des matériaux poreux reposent sur la loi de Darcy. Dans la forme de base de cette loi, le fluide s'écoule à travers un échantillon formé de disque sous un gradient de pression. Le fluide est appliqué sous pression sur un côté de l'échantillon en maintenant l'autre côté libre à la pression atmosphérique.
- ❖ Les inconvénients les plus courants rencontrés lors de la réalisation de tests de perméabilité en laboratoire sur des échantillons de béton sont : la durée des essais, la taille de l'échantillon, la quantité d'écoulement du fluide, les fuites autour de l'échantillon et l'air emprisonné dans l'échantillon pendant l'essai.

## *Chapitre III*

### *Comportement du béton vis-à-vis*

#### *des milieux agressifs*

## CHAPITRE III

### COMPORTEMENT DU BÉTON VIS-A-VIS DES MILIEUX AGRESSIFS

#### III.1. Introduction

La durabilité des structures en béton est un des facteurs les plus importants dans le domaine du génie civil. Ainsi, un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations, c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps [3,5].

La détérioration du béton est reliée au transport des matières à travers les pores de la structure de la pâte de ciment durci. La corrosion des armatures, les problèmes de gel, les attaques par les sulfates et les acides sont augmentés par une forte perméabilité. Les altérations du béton peuvent atteindre soit la matrice cimentaire soit les armatures, parfois les deux en même temps. Ces altérations sont l'origine du béton lui-même depuis la phase de la formulation jusqu'à la mise en œuvre ou provenant de l'agressivité de l'environnement [3,5].

Les altérations chimiques sont dues au transport des ions en solution entre le matériau et son environnement, sous gradient de concentration ou de pression. Le transport des ions agressifs se fait principalement par la perméabilité des gaz et des liquides et par diffusion ionique. Le processus de diffusion se fait sous gradient de concentration alors que celui de la perméation correspondant au déplacement du fluide sous gradient de pression. Ce dernier est régi par la loi de Darcy qui permet de quantifier le débit du fluide à travers le béton en fonction de la perméabilité du matériau. Ainsi, la perméabilité et la diffusivité, qui dépendent de la compacité du béton, sont deux indicateurs essentiels de la durabilité des bétons [4].

La durée de vie d'une structure en béton est très souvent liée à sa capacité à empêcher les agents agressifs à infiltrer dans ses pores. La capacité des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces paramètres sont considérés comme des indicateurs de la durabilité [3].

La perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou de gaz) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion [3]. Par contre, la diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores, mais de leur interconnexion [3]. Alors que, l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires, elle dépend des pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant.

Parmi les environnements les plus agressifs pour le béton qui peuvent occasionner des attaques acides ou sulfatique importantes, des gonflements et éclatement du béton, on peut citer les environnements marins et les environnements chimiques en particulier des éclatements dans les milieux industriels et agricoles [3,5].

## III.2. Comportement du béton suite aux attaques chimiques

### III.2.1. Mécanismes des attaques chimiques du béton

Lorsque l'attaque chimique du béton se présente, des réactions de dissolution ou de précipitation se produisent. Ainsi, de nouveaux composés se précipitent qui peuvent être nocifs pour le béton [3].

Les bétons fabriqués et mis en place conformément aux règles de l'art sont des matériaux normalement durables si ses qualités intrinsèques (compacité, perméabilité, diffusivité) sont adaptées aux milieux auquel ils sont exposés pendant la durée d'utilisation des structures. C'est-à-dire si les bétons sont bien adaptés à leur usage et à leur environnement, et s'ils sont fabriqués et mis en œuvre suivant les règles de l'art (norme NF EN 206-1), ces bétons sont résistants chimiquement et durables et leur durée de vie présumée est d'au moins cinquante ans [3].

Le béton constitue un système très complexe formé d'un squelette granulaire solidarisé par des hydrates (C-S-H, hydroxyde de calcium, aluminates...). Ce béton qui a un PH de l'ordre de 13, lorsqu'il est plongé dans un milieu différent de son milieu naturel, les équilibres chimiques des hydrates vont être déplacés vers un nouvel équilibre qui se traduit généralement par une première étape de décomposition de la partie superficielle du matériau [4].

Par exemple, l'action de l'acide carbonique sur les composés calciques du béton  $Ca(OH)_2$  et C-S-H conduit à la précipitation du carbonate de calcium  $CaCO_3$  provoquant ainsi une réduction de porosité de la peau du béton qui peut constituer dans un premier temps une barrière plus ou moins protectrice vis-à-vis de la pénétration des substances agressives dans le matériau [64]. Cependant, la précipitation tardive d'ettringite dans certaines conditions spécifiques peut s'avérer nocive par le gonflement qu'elle entraîne. Alors que la précipitation de cette même ettringite formée aux premiers stades de l'hydratation par la réaction du sulfate de calcium, régulateur de prise, avec l'aluminate tricalcique du ciment, est parfaitement inoffensive [64].

### III.2.2. Effets des attaques chimiques sur le béton

Suite aux attaques du béton par des solutions agressives, une dissolution des hydrates accompagne ou non de la précipitation de nouveaux composés, se produit. Cette précipitation a deux effets majeurs sur le béton : [3,5].

- Augmentation de la porosité du béton conduisant à un accroissement de la perméabilité et de la diffusivité. Cette augmentation se traduit par une dégradation des caractéristiques mécaniques (résistance et module d'élasticité) [85].
- La solubilité et la précipitation de nouveaux composés conduisant à un gonflement et une fissuration du matériau. C'est le cas par exemple de formation d'ettringite suite à une attaque par des sulfates d'origine extérieure.

Le phénomène de dissolution des hydrates et de la précipitation de nouveaux produits peuvent conduire à des dégradations. Ces dégradations peuvent être parfois surfacique et dans d'autres cas plus profondes de sorte qu'ils mettent en danger l'état de l'ouvrage. Les actions chimiques sont associées au même temps aux actions environnementales et mécaniques liées au fonctionnement de l'ouvrage. La figure III.1 ci-dessous donne une vue sur le couplage des paramètres influents la durabilité du béton [65].

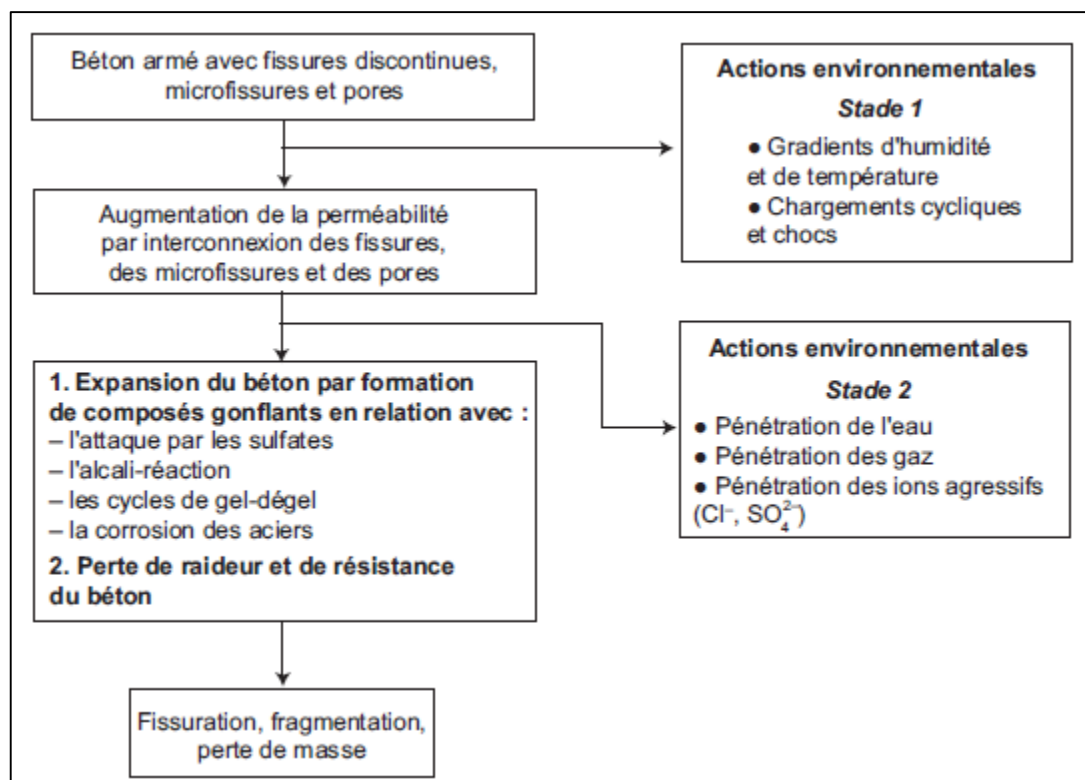


Figure III.1 : Couplage environnement/contraintes mécaniques/actions physico-chimiques influentes la durabilité du béton [65].

**Première étape :** dans le béton naturellement poreux et microfissuré, la perméabilité augmente sous l'action des contraintes environnementales et de service.

**Deuxième étape :** la pénétration des agents agressifs et à la réaction de ces agents avec les hydrates provoque des dégradations du matériau et de ses caractéristiques mécaniques.

### III.3. Paramètres influents le comportement du béton vis-à-vis des différents agresseurs chimiques

Les principaux paramètres qui doivent être pris en compte lors de l'examen du comportement du béton vis-à-vis des différents agresseurs chimiques sont décrits ci-dessous

#### III.3.1. Paramètres liés à la composition du ciment

La portlandite est le composé le plus facilement soluble vis-à-vis des attaques chimiques (eaux pures, acides, sulfates...). Pour résister à l'attaque des agents chimiques extérieurs agressifs du béton, il est nécessaire de réduire la quantité de  $Ca(OH)_2$  dans la pâte de ciment en utilisant un ciment à base de laitier de haut fourneau ou de pouzzolane. Ces produits ont la possibilité d'une part à réagir avec le  $Ca(OH)_2$  de sorte que celui-ci est consommé et il n'est plus disponible pour réagir avec les solutions agressives. D'autre part, une quantité de ciment composé dans un mètre cube de béton produit moins de  $Ca(OH)_2$  par rapport à une même quantité de ciment portland. On peut conclure que la teneur en hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$  dans un ciment est considérée comme un indicateur majeur de durabilité : plus la teneur en chaux est faible, plus la résistance chimique est bonne [66].

Pendant l'hydratation du ciment et en particulier lors de la prise, la réaction entre l'aluminat de calcium  $C_3A$  et le gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), permet de régler l'hydratation rapide de ces aluminates ou la prise rapide du ciment. Le résultat de cette réaction est la formation de cristaux d'ettringite (dite ettringite primaire). La teneur en gypse des ciments étant limitée par les normes, il y a donc en général un excès de  $C_3A$  par rapport au gypse. La quantité de  $C_3A$  anhydre qui n'a pas fait la réaction avec le gypse régulateur de prise peut transformer en ettringite expansive. La solution à ce phénomène réside dans l'utilisation d'un ciment ayant un faible pourcentage de  $C_3A$  [3].

### III.3.2. Paramètres liés à la formulation et aux propriétés de transfert du béton

Il est important de prévenir la pénétration des agents agressifs dans le béton : on y parvient en confectionnant un béton aussi dense dont la perméabilité est aussi faible que possible.

L'utilisation des laitiers de haut-fourneau, cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice comme constituants des ciments ou comme additions dans les bétons. Ces fines sont favorables pour la résistance chimique du béton en augmentant sa compacité [87].

### III.3.3. Paramètres liés à l'environnement

Les paramètres liés à l'environnement qui doivent être pris en compte sont : [3,5]

**a/** La nature physique de l'agent chimiquement agressif peut être liquide, gazeux ou solide. Cependant sans action de l'eau apportée par le milieu extérieur, les milieux gazeux et solide ne seront pas agressifs et ne provoquent aucune dégradation.

Pour les milieux liquides, on peut citer essentiellement les eaux pures, les solutions d'acide, de bases et de sels d'origine naturelle ou artificielle.

Les milieux gazeux sont d'origine naturelle, industrielle ou domestique. On peut citer par exemple le  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  dans les ouvrages d'assainissement. Selon le fascicule de documentation FD P18-011, l'action de ces gaz se fait par oxydation en présence d'humidité. En général, l'agressivité des gaz est faible dans les environnements d'humidité relative inférieure à 65 %, la diffusion des gaz est faible dans les bétons saturés. Par exemple, dans le cas de la carbonatation, l'action du  $CO_2$  est faible lorsque l'humidité relative du béton est élevée, et elle est maximale lorsque le taux d'humidité est de l'ordre de 65 %.

Les milieux solides comportent généralement les sols ou les remblais contenant des substances nocives. Dans ce cas aussi, le passage en solution de l'agent agressif et son transfert dans le béton se fait par la présence d'eau plus ou moins en mouvement dans le sol ;

**b/** la nature chimique de l'agent chimiquement agressif concerne principalement sa concentration, dissolution ou précipitation de nouveaux composés expansifs ou non ;

**c/** les conditions climatiques naturelles ou artificielles, locales ou générales : exposition atmosphérique, immersion totale, semi-immersion ;

**d/** L'humidité relative du milieu, une humidité relative  $< 65\%$  étant peu favorables au développement des réactions ;

e/ L'influence de la température qui est un facteur important en ce qui concerne l'accélération des réactions, on peut rappeler toutefois que la solubilité de la portlandite  $Ca(OH)_2$  diminue quand la température augmente ;

f/ L'action du changement cyclique de température et les cycles humidification/séchage qui peuvent accélérer considérablement les dégradations du béton. ;

g/ Le renouvellement ou la mobilité du milieu agressif (liquides et gaz) qui peut provoquer un effet mécanique supplémentaire aggravant (érosion, chocs).

### III.3.4. Paramètres liés à la structure du projet

Ces paramètres concernent les contraintes mécaniques liées au fonctionnement de l'ouvrage : chargements, fatigue, dilatations et retraits différentiels..., qui doivent être pris en compte. Ces contraintes peuvent engendrer des fissurations qui sont susceptibles d'accélérer les attaques chimiques et affaiblir la structure [3,5].

## III.4. Revue sur les principaux milieux agressifs aux bétons

### III.4.1. Introduction

Le béton est un solide naturellement poreux qui a un caractère basique, ce matériau renferme [3] :

- 15 % à 20 % d'une base forte dite portlandite ;
- Environ 70 % de C-S-H ;
- 10 à 15 % d'aluminates et sulfoaluminates de calcium hydraté ;
- Une solution interstitielle dans les pores et les capillaires dont le PH varie de 12.5 à 13.5.

La réaction entre les composés du béton et les solutions chimiques agresseurs, conduit à une dissolution de l'hydroxyde de calcium ou une précipitation de nouveaux composés nocifs ou non pour le béton. Les éléments agressifs pénètrent au sein du béton par diffusion ionique ou par perméation. Ces solutions agressives ont une influence sur le béton suivant la composition minéralogique du ciment et de la microstructure du matériau, dont dépendent les propriétés de transfert (perméabilité, diffusivité) [3].

Parmi les principaux agents agressifs, on peut citer : eau pure, acide, sulfates, eau de mer, eaux usées, les nitrates et les chlorures. Ces agents chimiquement agressifs pour le béton peuvent être classés en quatre catégories : [3]

- Les gaz d'origine naturel ou artificiel provenant de la pollution atmosphérique. Les gaz les plus rencontrés sont les dioxydes de carbone, de soufre et d'azote, l'hydrogène sulfuré, les vapeurs chlorées et l'ammoniac.
- Les liquides ioniques ou organiques qui agissent par leur caractère basique ou acide.
- Les solides, principalement les sols et les déchets.
- Les milieux biologiques formés par les fermentations bactériennes par exemple des champignons qui conduisent à la formation d'acides ou des attaques par certains organismes présents dans l'eau de mer.

### III.4.2. Interaction entre les agents agressifs et les constituants du béton

En général, le béton est en contact avec le milieu extérieur avec lequel se produisent des échanges importants dans les deux sens (vapeur d'eau, gaz carbonique, acide, sulfates, etc.). Certains de ces échanges de ces milieux avec le béton peuvent conduire à une dégradation, voire une destruction du béton à plus ou moins long terme [3,5].

Les mécanismes fondamentaux d'altération des bétons par réactions chimiques, ainsi que leurs effets résultants sont représentés sur la figure III.2 ci-dessous [67]. Dans cette figure, on trouve trois types de réactions : hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durcie, réactions d'échange entre le milieu agressif et les composés hydratés du ciment et enfin la réaction entraînant la formation de nouveau produite expansive.

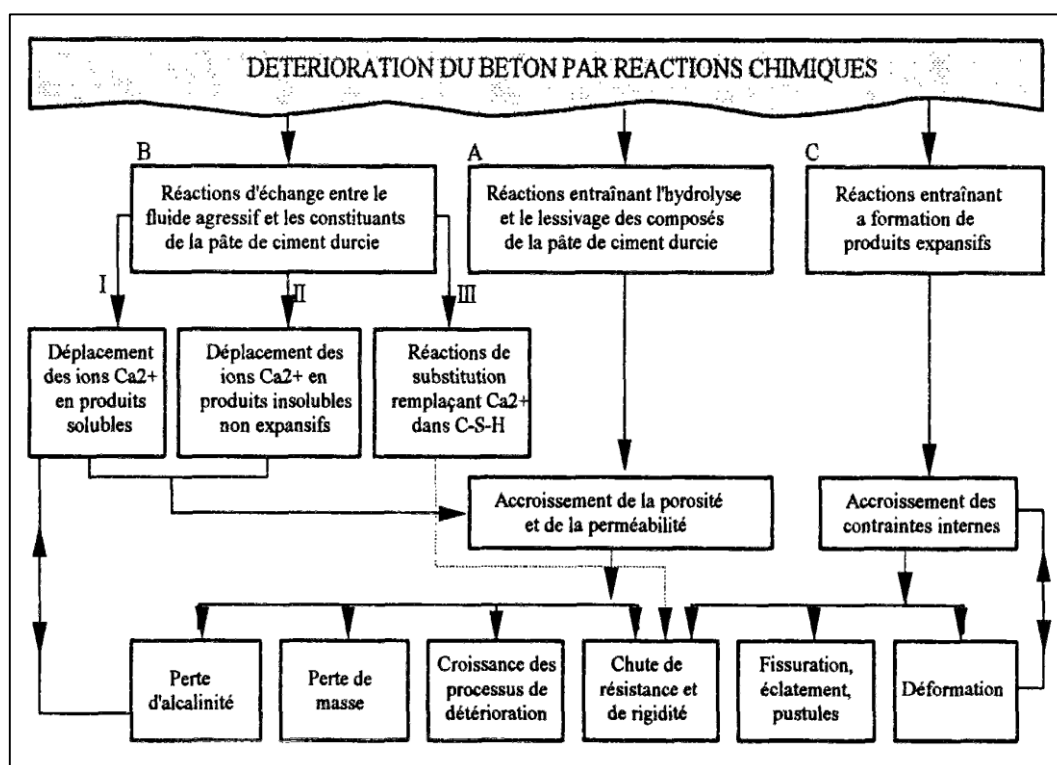


Figure III.2 : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [67].

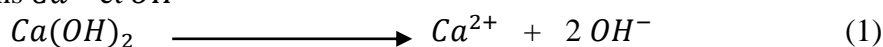
Les mécanismes élémentaires de l'interaction entre les agents agressifs et les constituants du ciment lors d'une attaque chimique se font par :

- Dissolution, hydrolyse et lessivage des composés hydratés ;
- Réaction d'échange entre le milieu agressif et les constituants du ciment ;
- Précipitation de nouveaux produits expansifs.

#### III.4.2.1. La dissolution

La dissolution d'un acide, d'une base ou d'un sel dans l'eau est une réaction de dissociation totale ou partielle en ions. La dissociation d'un acide fort, d'une base forte, des sels d'un acide fort et d'une base forte est complète ou presque complète. Dans le cas d'un acide faible ou d'une base faible, la dissolution n'est que partielle [3].

la portlandite (l'hydroxyde de calcium)  $Ca(OH)_2$  qui est une base forte dont la dissociation dans l'eau est complète, sa solubilité dans l'eau à 25 °C est 1.15 g/l et il n'y a pas de molécule de portlandite dans la solution, car la dissolution est complète. La portlandite se dissocie en ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$



#### III.4.2.2. Hydrolyse

La dissolution d'un composé dans l'eau peut être accompagnée du phénomène d'hydrolyse qui est une réaction particulière qui se produit lors de la dissolution dans l'eau d'un sel d'acide fort et de base faible (exemple : le chlorure d'ammonium  $NH_4Cl$ ) ou dans le cas d'un sel de base forte et d'acide faible (exemple : C-S-H) [3].

Ainsi, en présence d'eau, les C-S-H se décomposent en  $Ca(OH)_2$ , base forte, et en acide silicique  $H_4SiO_4^{2-}$ , avec dissociation de l'eau : la base forte est complètement dissociée en  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$ , l'acide silicique est faiblement dissocié en  $H_2SiO_4^{2-}$  et  $H^+$  (ou  $H_3O^+$ ). Du fait de la dissociation de l'eau, la concentration des ions  $H^+$  est inférieure à celle des ions  $OH^-$ , ce qui confère un pH basique à la solution.

Les phénomènes de dissolution et d'hydrolyse se trouvent dans le cas de la circulation des eaux douces renouvelées au contact du béton. La portlandite se dissout en premier en raison de sa solubilité relativement élevée. À plus long terme, les autres composés hydratés qui sont des sels d'acide faible et de base forte se décomposent sous l'action de l'eau.

#### III.4.2.3. Le lessivage

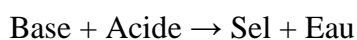
Pour le béton, on parle souvent de lessivage ou de lixiviation qui correspond à une opération qui consiste à faire passer lentement un solvant à travers un matériau d'une certaine épaisseur, afin d'en extraire un ou plusieurs constituants solubles. Ce terme est employé pour décrire l'extraction progressive des ions calcium (dissolution de  $Ca(OH)_2$  et décalcification des C-S-H) lors de la percolation des solutions agressives dans le béton. La lixiviation peut être décrite comme une dissolution progressive résultant d'une succession d'états d'équilibre entre les hydrates et la solution [3].

À titre d'exemple, la précipitation du carbonate de calcium  $CaCO_3$ , due à l'action de l'acide carbonique sur les composés calciques du béton  $Ca(OH)_2$  et C-S-H, réduit la porosité de la peau du béton et peut constituer une barrière plus ou moins protectrice vis-à-vis de la pénétration des substances agressives dans le matériau [68].

### III.5. Comportement des bétons dans les milieux acides (dissolution et précipitation)

Le béton est un milieu basique qui a un PH de l'ordre de 13. La plupart des milieux fluides naturels présentent un caractère acide envers ce matériau. Les milieux acides susceptibles d'être agressifs pour le béton comportent les eaux naturelles agressives, eaux pures, les eaux douces peu ou chargées de dioxyde de carbone, les pluies acides, les minérales et organiques [3,5].

Ainsi, le béton qui est un matériau basique, est très sensible aux milieux acides avec lesquels il réagit suivant la réaction bien connue :



La nocivité d'un acide dépend de la solubilité du sel qu'il forme lors de la réaction avec les hydrates du ciment.

Le produit final qui résulte de la dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et al. [69], peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. La concentration des agents agressifs influe énormément sur les conditions de transport de ces agents [69].

### III.5.1. Eaux naturelles

L'agressivité d'une eau naturelle est en fonction de trois paramètres interdépendants : le pH, la dureté et la teneur en dioxyde de carbone agressif.

#### a/ Le PH

Le pH d'une eau traduit son caractère acide ou basique. Cette eau sera acide si elle renferme du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou organiques (acides humiques), ou encore des sels d'acides forts et de base faible (par exemple  $NH_4NO_3$ ) dont l'hydrolyse génère des protons  $H^+$  (ou  $H_3O^+$ ) responsables de l'acidité [3,5].

#### b/ La dureté

La dureté est un facteur chimique qui correspond à la somme des concentrations en cation métalliques. Elle est définie par le degré hydrotimétrique TH qui correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux de l'hydrogène et des métaux alcalins : [3,5]

$$TH = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [\text{autres cations métalliques Fe, Al, Mn, Sr}] \quad (7)$$

Le degré hydrotimétrique français (°F) vaut 10 mg de  $CaCO_3$ , 4 mg de Ca et 2,43 mg de Mg.

La dureté peut être définie également par le titre alcalimétrique complet (TAC) qui indique la teneur en hydroxydes libres ( $OH^-$ ), carbonates ( $CO_3^{2-}$ ) et bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) alcalins ou alcalino-terreux. Le titre alcalimétrique est exprimé en milliéquivalent par litre ( $me.L^{-1}$ )

$$TAC = [OH^-] + [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] \quad (8)$$

#### c/ Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone agressif représente une partie du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) dissous dans l'eau naturelle. Le schéma suivant donne une explication de ce phénomène [3,5].

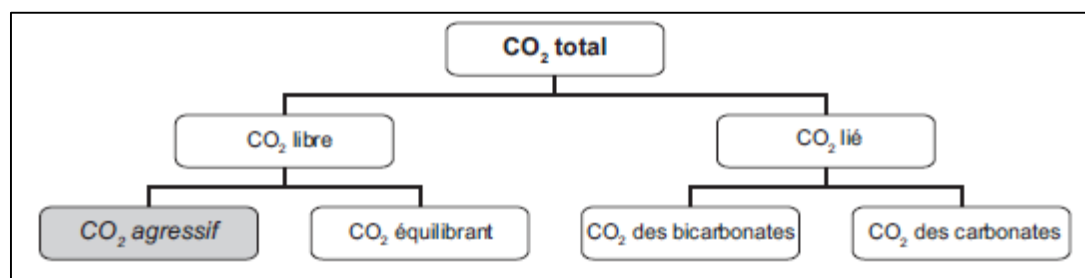
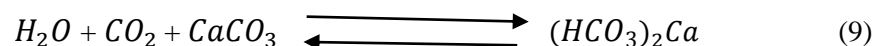


Figure III.3: Mode d'action du  $CO_2$  [3,5].

Le dioxyde de carbone équilibrant est la quantité de dioxyde de carbone libre nécessaire pour maintenir les bicarbonates en solution. Selon la réaction ci-dessous,



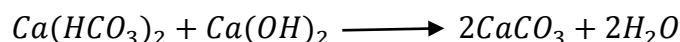
Le dioxyde de carbone agressif représente l'éventuel surplus de dioxyde de carbone libre par rapport au dioxyde de carbone équilibrant.

- Si le dioxyde de carbone libre est supérieur à la teneur du dioxyde de carbone équilibrant, la loi de Le Chatelier indique que l'équilibre est alors déplacé vers la gauche : il y a dissolution du carbonate, d'où le nom de dioxyde de carbone agressif. Une telle eau est corrosive.

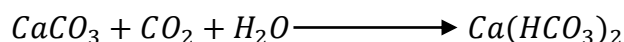
- Si au contraire, la teneur en dioxyde de carbone libre est inférieure à celle du dioxyde de carbone équilibrant, l'équilibre se déplace vers la droite : il y a précipitation de carbonate. Une telle eau n'est pas corrosive.

Lorsque l'eau est chargée en dioxyde de carbone agressif le processus de dégradation se déroule selon un mécanisme de dissolution/précipitation [88] : l'eau pénètre à travers le béton, se sature progressivement en bicarbonates en raison de la dissolution de la portlandite et en degré moins, des C-SH.

Les bicarbonates solubles correspondent à une zone de dégradation du béton. Lorsque la solution de bicarbonates vient en contact avec d'autres cristaux de portlandite, le carbonate de calcium, très peu soluble, précipite, ce qui accroît momentanément la compacité du béton : [5].



Ainsi, la précipitation de carbonate de calcium permet à nouveau la formation de bicarbonate et le cycle lixiviation de la chaux, formation de bicarbonates, précipitation de carbonates se répète jusqu'à épuisement de la chaux :



### III.5.2. Eaux pures et les eaux douces

Les bétons compacts sont généralement peu sensibles à ces milieux. Les attaques par les eaux pures et les eaux douces se réduisent souvent à une érosion superficielle millimétrique ou sous forme d'efflorescences sur les parements. On peut citer le cas par exemple, des eaux très peu minéralisées, de titre alcalimétrique complet (TAC) inférieur ou égal à 1 (mé/L), de teneur en dioxyde de carbone agressif compris entre 15 et 30 mg/l et de PH = 5.5 à 6.5, ces eaux sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs chimique (P18-011) [3]

Le processus d'attaque du béton par les eaux pures et douces est caractérisé soit par une érosion superficielle du béton provoquée par la circulation d'eau à sa surface, soit à une percolation du liquide sous gradient de pression hydraulique à travers le matériau (par exemple dans le cas des tunnels). Ces attaques peuvent conduire à des pertes de masse et d'alcalinité dues en particulier à la lixiviation du calcium des hydrates, qui induit une augmentation de la porosité et de la perméabilité. La dégradation peut se traduire également par une diminution des résistances mécaniques. Le lessivage des ions calcium se manifeste souvent visuellement, par la

**COMPORTEMENT DU BETON VIS-A-VIS DES MILIEUX AGRESSIFS**

formation de concrétions, de stalactites, de coulures ou d'efflorescences blanchâtres. Ces formations sont dues à la précipitation, à la surface du béton, de carbonate de calcium à partir de la solution percolant riche en calcium venu au contact du CO<sub>2</sub> atmosphérique [3].

Les ciments moins riches en chaux sont résistants à l'attaque par les eaux douces. C'est le cas des ciments contenant des constituants minéraux tels que les laitiers, les cendres silico-alumineuses, les pouzzolanes naturelles, les fumées de silice. L'hydratation de ces ciments libère peu de portlandite et produit des C-S-H abondants de rapports molaires CaO/SiO<sub>2</sub> plus faibles [3,5].

**III.5.3. Pluies acides (cas extrême des eaux douces)**

Les pluies non agressives dites « propres » ont un PH compris entre 5, 6 et 7. Ces pluies n'ont pas un effet nocif sur le béton. Les pluies acides ou agressives ont un PH inférieur ou égale à 4. L'acidité de ces pluies résulte principalement de la pollution par les oxydes de soufre d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère [3,5].

Le processus d'attaque par les pluies acides est la formation d'acide sulfurique qui se condense en gouttelettes qui peuvent contenir des métaux (mercure, plomb, argent) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). La composition et le PH peuvent changer en fonction de la saison et milieu [3]. Le tableau III.1 ci-dessous présente à titre indicatif la composition d'eaux de pluie, relevées en Europe [70].

Composés ioniques	Kiruna (Suède Nord)	Plönnige (Suède Sud)	Ukkel (Belgique)	Francfort (Allemagne)	De Bilt (Pays-Bas)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,0	4,9	6,0	16,3	7,4
Cl <sup>-</sup>	0,4	3,5	2,0	3,9	2,8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,3	2,0	2,3	2,8	2,7
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,1	0,9	0,5	3,2	0,7
Na <sup>+</sup>	0,3	2,0	1,0	1,1	2,1
K <sup>+</sup>	0,2	0,3	0,2	-	0,2
Mg <sup>2+</sup>	0,1	0,4	0,4	-	0,4
Ca <sup>2+</sup>	0,6	0,8	1,3	1,9	1,0
Total	4,0	14,8	13,7	29,2	17,3
Nombre d'échantillons	180	180	189	138	83
Période	1955-1969	1955-1969	1956-1969	1960-1961	1956-1962

Tableau III.1 : Compositions d'eaux de pluie en mg/L [70].

Le résultat de l'attaque par les pluies acides se résume à des dégradations superficielles par le phénomène de dissolution dû aux acides ou par une expansion due à la cristallisation des sels ou d'ettringite [3].

**III.5.4. Les acides minéraux**

Parmi les acides minéraux qui ont une attaque sévère sur le béton, on peut citer les acides chlorhydrique et nitrique. La réaction de ces acides avec la chaux du ciment peut former le

**COMPORTEMENT DU BETON VIS-A-VIS DES MILIEUX AGRESSIFS**

chlorure de calcium  $CaCl_2$  et le nitrate de calcium  $(NO_3)_2Ca$  qui sont des sels très solubles, donc très agressifs pour le béton [71,72].

L'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , formé lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du  $SO_2$  atmosphérique [89]. Cet acide a un double effet agressif par son acidité et par l'anion  $SO_4^{2-}$ , il peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite [5].

L'acide phosphorique  $H_3PO_4$  entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, il a une agressivité faible en provoquant une destruction lente du béton [5].

**III.5.5. Les acides organiques**

Les acides organiques proviennent généralement des produits rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigeries, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...). Ces acides sont moins agressifs que les acides minéraux et peuvent parfois donner un effet favorable par colmatage du béton. Cependant, certains acides tels que les acides acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, peuvent attaquer les constituants calciques du ciment [3].

Dans les milieux agricoles, des dégradations importantes du béton ont pu être observées dans les silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers, purins et sur des dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, pertes de masses, mises à nu des aciers...) [3].

D'après les études réalisées sur la dégradation de dalles en béton dans des porcheries [90]. Ces résultats montrent que le matériau était fortement attaqué par l'acide lactique et l'acide acétique provenant des aliments fermentés. Les déjections animales (purins, fumiers) contiennent également les acides acétique, propionique, butyrique, tous agressifs [74].

L'attaque du béton par les acides organiques peut être de même nature que celui qui a été observé dans le cas des acides forts : essentiellement dissolution des composés calciques avec production de sels de calcium solubles. Il faut ajouter qu'aux dégradations d'origine chimique peuvent s'ajouter des phénomènes d'abrasion dus à la circulation des animaux [73,74]. Les déjections animales (purins, fumiers) peuvent contenir également de l'acide acétique agressif [74].

**III.6. Précautions à prendre contre les attaques acides**

Autres les moyens supplémentaires de protection (résines, bitumes et autres revêtements), les mesures à prendre pour réduire les risques d'attaque par les acides sont résumés comme suit : [3]

- Identifier la nature, la concentration et le mode d'action des acides (mobilité, renouvellement, température...);
- Utiliser un ciment à faible teneur en chaux ou ciment avec ajouts minéraux consommateurs de chaux (laitiers, cendres volantes silico-alumineuses, pouzzolanes réactives, fumées de silice).
- Réaliser un béton de haute compacité qui peut ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton ce qui constitue également une bonne mesure de protection.

### III.7. Milieux sulfatiques : dissolution/précipitation/risques d'expansion

L'action des sulfates sur le béton est fonction de plusieurs paramètres (type de sulfate, type de ciment utilisé, formulation du béton, classe d'exposition...). La réaction chimique des sulfates avec les hydrates de ciment peut conduire principalement à une augmentation de la porosité et un phénomène d'expansion provoquant ainsi des dégradations plus ou moins importantes. Les risques des attaques du béton par les sulfates ont été l'objet des préoccupations de nombreux chercheurs depuis Vicat, Le Chatelier [75], Thorvaldson [76] et tous ceux qui ont suivi ces pionniers [3].

Pour minimiser les risques des attaques chimiques qui peuvent endommager les structures en béton, il faut appliquer les directives des normes, en particulier les normes NF EN 206-1 et P18-011 [3,5].

#### III.7.1. Origine des sulfates

Les sulfates peuvent provenir de l'intérieur du béton ou comme un agent agressif extérieur qui attaque les composants du ciment [3,5].

- Les sulfates peuvent être d'origine les produits ajoutés au ciment pendant sa fabrication comme régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite), ou ceux contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite  $K_2SO_4$ , aphtitalite  $K_3Na(SO_4)_2$ , langbeinite  $Ca_2K_2(SO_4)_3$  [77]). Dans les ciments, la teneur en  $SO_3$  est limitée par la norme NF EN 197-1 à 3,3 % ou 4 % selon la classe de résistance [3] ;
- Les granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites), peuvent être l'origine de sulfates. La norme NF XP P18-545 donne les limites de la teneur en soufre total dans les granulats naturels pour béton [3] ;
- Les sulfates peuvent être issus du milieu extérieur où se trouvent sous forme de solides (sols gypseux), liquide (eaux naturelles qui s'écoulent à travers les sols contenant des sulfates), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le  $(SO_2)$  [3] :

- Les sulfates se trouvent avec des concentrations supérieures à 5% dans les sols contenant du gypse  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ou de l'anhydrite  $CaSO_4$ . Ils peuvent être le résultat de la décomposition biologique aérobie des matières organiques, l'utilisation d'engrais peut être également une source de sulfates. Le sulfate d'ammonium  $SO_4(NH_4)_2$  provenant des engrais est particulièrement très agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.

- Dans les environnements industriels, la pollution des sols et les eaux d'infiltration au contact des sols ou des remblais contenant des sulfates peuvent contenir des concentrations en sulfates correspondant à des niveaux très élevés d'agressivité.

- l'atmosphère des environnements industriels peut contenir de l'anhydride sulfureux  $SO_4^{2-}$  provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). Ces gaz peuvent s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif en présence d'humidité.

### III.7.2. Mécanismes de dégradation du béton par les sulfates

L'action des sulfates sur le béton est mise en jeu suivant deux mécanismes : le premier correspond à une mise en solution des ions calcium de l'hydroxyde de calcium,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , et des C-S-H provoquant des dégradations qui se traduisent par un accroissement de la porosité du matériau. Ainsi, une augmentation de la perméabilité et de la diffusivité permet une accélération du transfert des ions agressifs dans le matériau. Le second mécanisme qui a une relation avec le premier correspond à la formation de sels tels que le trisulfoaluminate de calcium hydraté ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) appelé ettringite. Ce sel peut conduire à des gonflements et des fissurations plus ou moins importantes du béton [3,5].

Toutes les réactions qui se produisent à l'intérieur du béton entre les agents agressifs et les composants du ciment se traduisent sur l'ouvrage par des endommagements du béton. Ces endommagements sont caractérisés par la formation de fissures plus ou moins importantes, par perte de résistance et un accroissement de la perméabilité dû à la fissuration du matériau.

### III.7.3. Types d'ettringite dans le béton

On distingue deux types catégories d'ettringite : ettringite expansive et ettringite non expansive [3,5].

- Ettringite dite primaire qui est le produit normal de l'hydratation du ciment dû à la réaction du  $\text{C}_3\text{A}$  avec le régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) ainsi que les sulfates contenus dans le clinker proprement dit. Ce type d'ettringite qui a une pression de cristallisation faible, elle n'a aucun effet néfaste sur le béton ;
- Ettringite dite secondaire qui peut provoquer des gonflements. Cette ettringite est en relation avec l'attaque par des solutions de sulfates externe sur des bétons confectionnés avec des ciments non résistants aux sulfates (ciments à teneur élevée en  $\text{C}_3\text{A}$  et en  $\text{C}_3\text{S}$ ). Cette ettringite est caractérisée par une pression de cristallisation élevée qui permet le développement de contraintes localisées conduisant à la fissuration du matériau.

Les deux figures III.4 et III.5 représentent respectivement des images de l'ettringite primaire et secondaire qui peuvent être formées suite à la réaction des composés du ciment avec les sulfates.

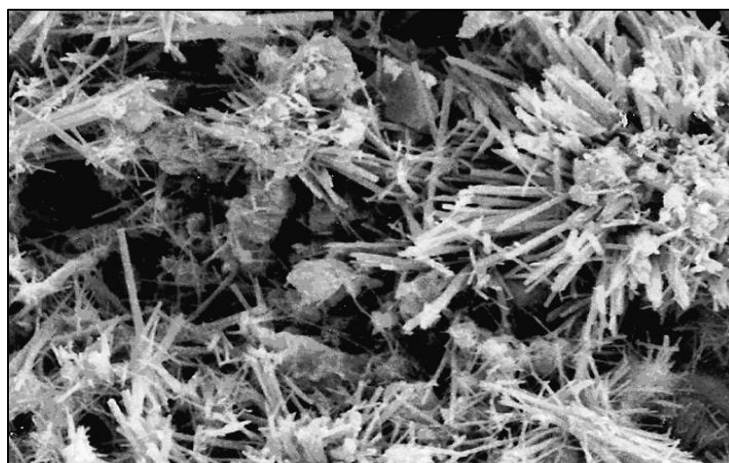


Figure III.4 : Ettringite primaire bien cristallisée ne provoquant pas d'expansion : précipitation dans les espaces vides à partir de la solution [3].

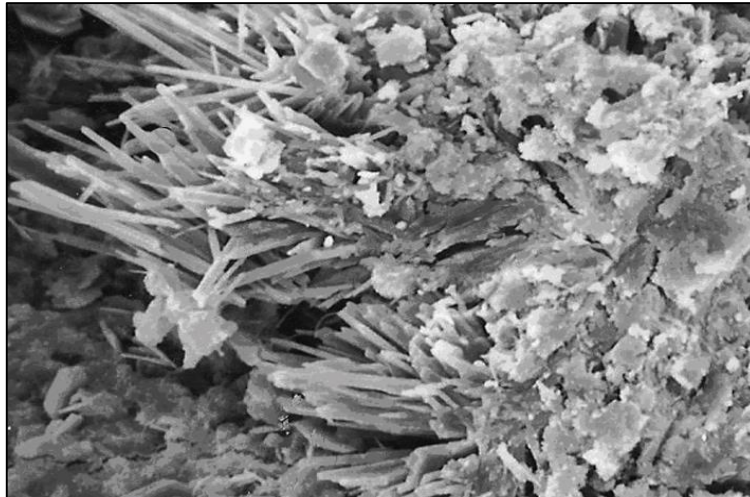


Figure III.5: Ettringite secondaire massive mal cristallisée qui provoque le gonflement et la dégradation du béton [3].

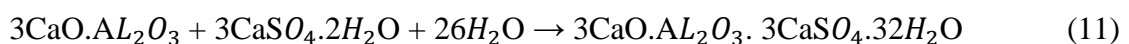
### III.8. Étude de l'influence quelques sulfates sur le béton

#### III.8.1. Les sulfates de calcium :

L'attaque du béton par les sulfates de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{CaSO}_4$ ) présents dans les sols est plus lente en raison de sa faible solubilité. Les sulfates de calcium n'attaquent que l'aluminate de calcium hydraté  $\text{C}_3\text{A}$  pour former de l'ettringite expansive  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . Le nombre de molécules d'eau peut être de 31 ou de 32 selon la pression de vapeur ambiante.

Dans les sols, on peut trouver les sulfates avec de faibles concentrations (0.01 à 0.05 % du sol sec). Et on peut trouver dans des régions des concentrations qui dépassent 5% dans les sols qui contiennent du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou de l'anhydrite  $\text{CaSO}_4$  [3,5].

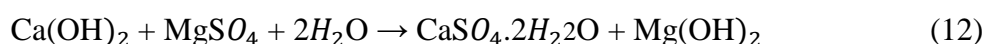
La réaction de  $\text{C}_3\text{A}$  avec le gypse est représenté ci-dessous



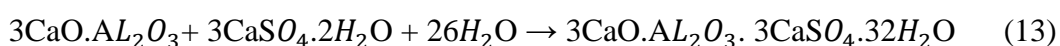
#### III.8.2. Les sulfates de magnésium :

Les eaux souterraines et l'eau de mer sont riches en sulfates de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ). Le sulfate de magnésium est très soluble et extrêmement agressif, il conduit à des réactions plus complexes faisant intervenir des échanges  $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$  avec formation de brucite  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  [3,5].

- La portlandite réagit avec  $\text{MgSO}_4$  pour donner du gypse et de la brucite



- Le gypse réagit avec le  $\text{C}_3\text{A}$  ou les aluminates hydratés du liant pour former de l'ettringite



Les C-S-H sont progressivement dégradés par formation de gypse, de brucite et d'un silicate hydraté calco-magnésien de type (C,M)-S-H dans lequel le calcium est remplacé plus ou moins complètement par le magnésium. Le produit résultant final peut être un mélange de brucite et d'un gel de silice.



La figure III.6 ci-dessous représente un échantillon de béton conservé dans une solution de sulfate de magnésium.



Figure III.6: Échantillon d'un béton exposé à un environnement très agressif de sulfate de magnésium

### III.8.3. Les sulfates d'ammonium :

Les sulfates d'ammonium sont présents dans les engrais, sont probablement le plus agressif de tous les sulfates vis-à-vis du ciment Portland. La réaction de base peut s'écrire : [3,5].



Les sulfates d'ammonium sont très solubles dans l'eau. L'attaque du béton par ces sulfates peut conduire à la formation du sel de calcium avec un dégagement gazeux d'ammoniac. Ces sulfates réagissent avec la portlandite pour former du gypse qui réagit à son tour avec les aluminates pour donner de l'ettringite expansive.

L'analyse d'échantillon de mortier conservé dans le sulfate d'ammonium, a montré une couche extérieure de fibres transparentes à l'œil nu qui a ressemblé à une surface aciculaire (piquante). La longueur de ces cristaux était souvent de l'ordre des millimètres et de leur section, de l'ordre des dizaines de microns. L'analyse a confirmé que ces cristaux étaient du gypse. La forme, l'orientation et la longueur de ces cristaux favorisent l'élargissement des microfissures et facilitent la pénétration des agents agressifs à l'intérieur du béton. Ainsi, les échantillons exposés au sulfate d'ammonium ont éprouvé une détérioration significative avec formation de fissures profondes. La figure III.7 représente une image en utilisant un microscope électronique sur un mortier conservé dans le sulfate d'ammonium [97].

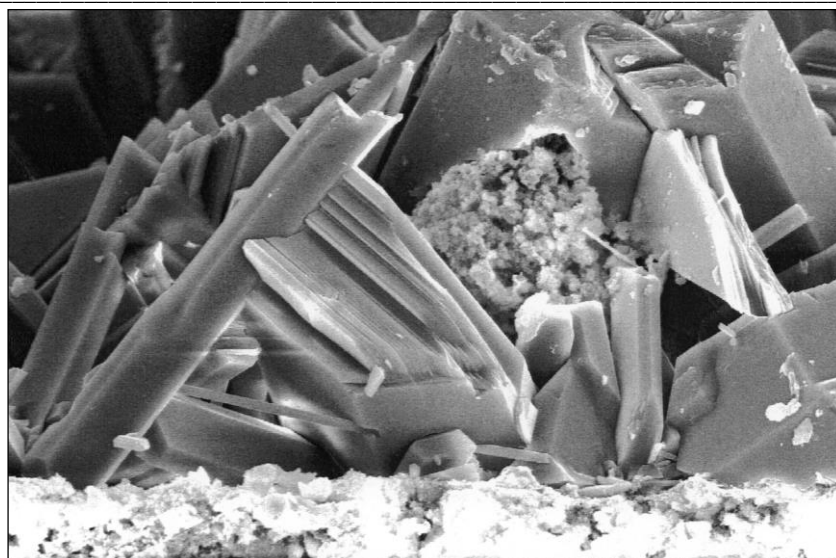
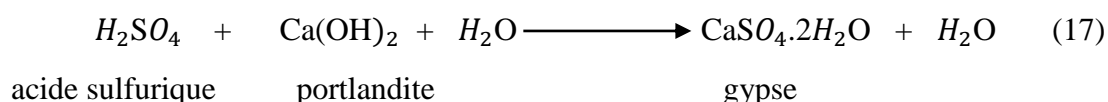
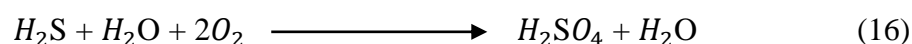


Figure III.7: Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par le sulfate d'ammonium [97]

### III.9. Influence de l'acide sulfurique sur le béton

Dans les tuyaux d'égouts, certaines bactéries anaérobies libèrent du  $H_2S$  lorsqu'elles décomposent les matières organiques. Au contact avec l'air, le  $H_2S$  s'oxyde et se transforme en acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui attaque principalement la portlandite  $Ca(OH)_2$  selon les réactions suivantes : [3,5]



Les études de l'influence des solutions d'acide sulfurique sur le béton montrent que les échantillons qui ont été exposés à ce type d'attaque chimique présentent une couche blanche de gypse à la surface de ces échantillons. Cette couche agit comme une couche protectrice. La longueur des cristaux du gypse était moins importante que celles obtenues dans l'attaque par le sulfate d'ammonium. L'orientation de ces cristaux offre aux bétons une protection contre la pénétration des agents agressifs.

Le gypse ainsi formé occupe de plus en plus un volume plus grand que la portlandite, sa formation causant progressivement le gonflement et la fissuration de la pâte. Lorsque la concentration en sulfates est assez élevée, le gypse restera stable et de nouveaux cristaux de gypse continueront à se former. Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions  $SO_4^{2-}$  qui, en réagissant avec des aluminates, formera de l'ettringite qui cause l'expansion [3]. La figure III.8 représente la forme des cristaux dans une attaque par l'acide sulfurique [98].

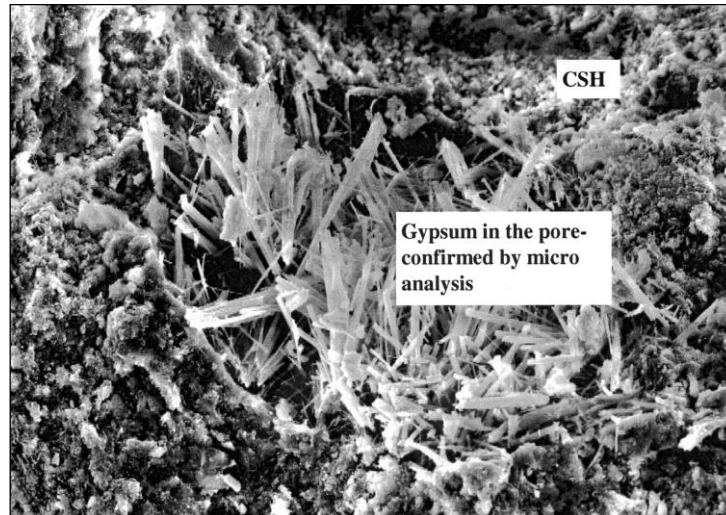


Figure III.8 : Forme des cristaux du gypse dans le cas d'attaque par l'acide sulfurique [98]

### III.10. Action de l'eau de mer sur le béton

L'attaque des bétons par l'eau de mer découle d'un ensemble de phénomènes chimiques plus ou moins simultanés et interdépendants. Ces phénomènes se résument par les figures ci-dessous [5].

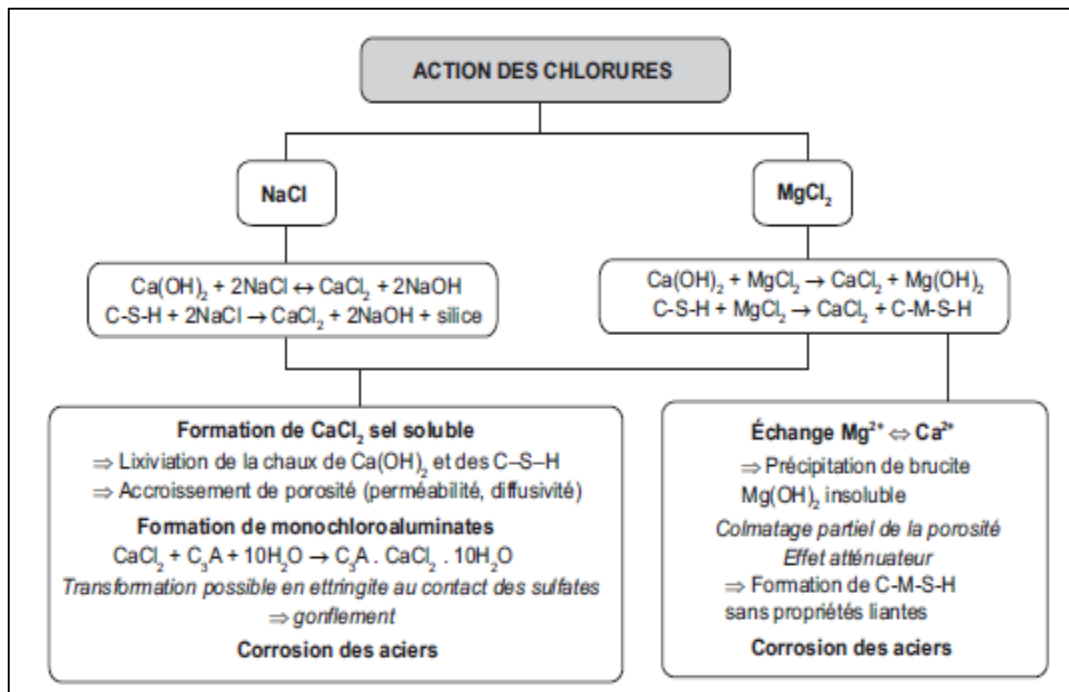


Figure III.9: Action des chlorures sur le béton [5]

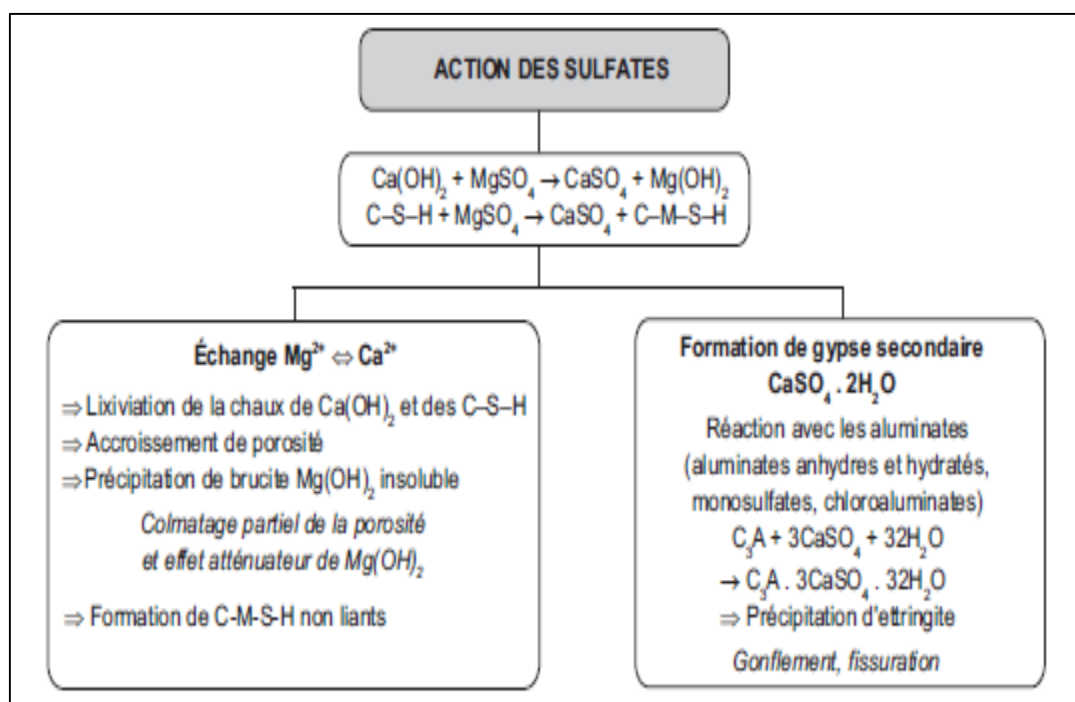


Figure III.10: Action des sulfates sur le béton [5]

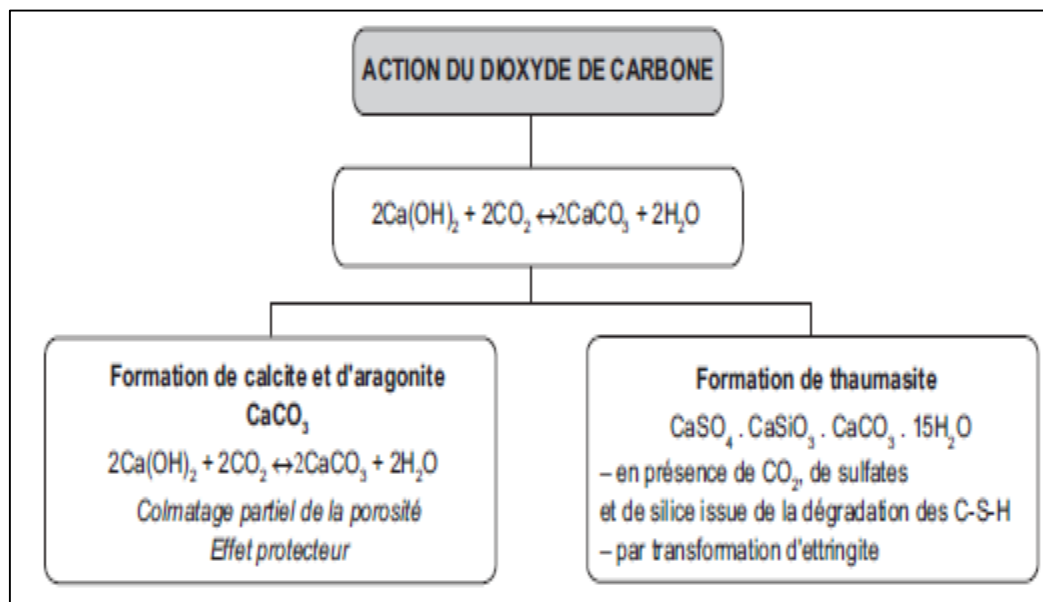


Figure III.11: Action du dioxyde de carbone sur le béton [5]

## III.11. Conclusion

- ❖ La détérioration du béton est reliée au transport des matières à travers les pores de la structure de la pâte de ciment durci. La corrosion des armatures, les problèmes de gel, les attaques par les sulfates sont augmentés par une forte perméabilité.
- ❖ La durée de vie d'une structure en béton est très souvent liée à sa capacité à empêcher agents agressifs à infiltrer dans sa porosité. La capacité des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption.
- ❖ Parmi les environnements les plus agressifs pour le béton qui peuvent occasionner des attaques acides ou sulfatique importantes, des gonflements et l'éclatement du béton. On peut citer les environnements marins et les environnements chimiques en particulier les milieux industriels et agricoles.
- ❖ Suite aux attaques du béton par des solutions agressives, une dissolution des hydrates accompagne ou non de la précipitation de nouveaux composés, se produit. Cette précipitation a deux effets majeurs sur le béton :
  - Augmentation de la porosité du béton conduisant à un accroissement de la perméabilité et de la diffusivité. Cette augmentation se traduit par une dégradation des caractéristiques mécaniques (résistance et module d'élasticité).
  - La solubilité et la précipitation de nouveaux composés conduisant à un gonflement et une fissuration du matériau. C'est le cas par exemple de formation d'ettringite suite à une attaque par des sulfates d'origine extérieure.
- ❖ Les principaux paramètres qui doivent être pris en compte lors de l'examen du comportement du béton vis-à-vis des différents agresseurs chimiques sont : les paramètres liés au matériau béton, les paramètres liés à l'environnement et les paramètres liés à la structure du projet.
- ❖ Parmi les principaux agents agressifs, on peut citer : eau pure, acide, sulfates, eau de mer, eaux usées, les nitrates et les chlorures. Ces agents chimiquement agressifs pour le béton peuvent être classés en quatre catégories.
- ❖ Les mécanismes élémentaires de l'interaction entre les agents agressifs et les constituants du ciment lors d'une attaque chimique se font par :
  - Dissolution, hydrolyse et lessivage des composés hydratés ;
  - Réaction d'échange entre le milieu agressif et les constituants du ciment ;
  - Précipitation de nouveaux produits expansifs.
- ❖ Le résultat des attaques du béton par les acides est principalement le phénomène de dissolution qui peut être accompagné de la précipitation de sel. Si ce sel est peu soluble, il peut avoir un effet colmatant et peut ralentir les réactions de dissolution. Ainsi, le résultat final de la dégradation du béton sous l'effet d'un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui peut avoir un rôle de protection à la surface du béton et servir comme ralentisseur de la réaction.
- ❖ L'action des sulfates sur le béton est mise en jeu suivant deux mécanismes : le premier correspond à une mise en solution des ions calcium de l'hydroxyde de calcium,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , et des C-S-H provoquant des dégradations qui se traduits par un accroissement de la porosité du matériau. Ainsi, une augmentation de la perméabilité et de la diffusivité permet une accélération du transfert des ions agressifs dans le matériau. Le second mécanisme qui a une relation avec le premier correspond à la formation de sels tels que le trisulfoaluminate de calcium hydraté ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) appelé ettringite. Ce sel peut conduire à des gonflements et des fissurations plus ou moins importantes du béton.

## *Chapitre IV*

# *Evaluation expérimentale de la durabilité du béton par les essais de perméabilité à l'eau*

## CHAPITRE IV

### EVALUATION EXPERIMENTALE DE LA DURABILITE DU BETON PAR LES ESSAIS DE PERMEABILITE A L'EAU

#### IV.1. Introduction

La durabilité des structures en béton est un facteur essentiel pour la durée de vie du bâtiment. Chaque structure en béton doit conserver sa résistance et continuer de remplir ces fonctions au cours du temps. Elle doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration subits soit par les actions mécaniques ou par les agents agressifs divers [4].

Les dommages du béton causés par actions mécaniques englobent les charges cycliques ou statiques, les chocs, l'abrasion et l'érosion alors que ceux des actions chimiques comportent les attaques chimiques, les réactions d'alcali-carbonate, les chlorures, etc. [3]

Les causes physiques de détérioration comprennent les effets de température élevée ou le changement cyclique de température, les cycles répétés de gel-dégel, etc. [4]

La durabilité du béton est le maintien de ses qualités au cours du temps. Elle peut être évaluée par la perméabilité qui est fonction de la facilité avec lesquelles les fluides (eau ou gaz) peuvent pénétrer et déplacer à travers le béton. La perméabilité est liée à la nature du réseau poreux à la surface et au cœur du béton. [3]

La porosité est le paramètre de premier ordre qui doit être pris en compte lors de l'étude de la durabilité et principalement la perméabilité du béton. La résistance aux efforts de compression est la propriété principale observée et cherchée pour un béton. C'est elle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Généralement, un béton résistant est un béton durable. [3]

Le présent chapitre a pour but d'évaluer expérimentalement l'influence des conditions climatiques (température élevée) et chimiques (sulfates et acide) sur la perméabilité à l'eau du béton. Ensuite, étudier l'effet de l'élévation de température sur la porosité et sur la résistance mécanique à la compression. En fin, les résultats obtenus sont comparés avec ceux d'un béton qui a subi une cure standard dans l'eau.

L'étude expérimentale de la perméabilité à l'eau est menée sur des éprouvettes cylindriques creuses saturées d'eau de 16 cm de diamètre et 14 cm de hauteur. Cependant, celle de la résistance à la compression et de porosité est réalisée sur des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup>.

Le procédé expérimental utilisé pour les essais de perméabilité à l'eau permet une grande surface de contact du fluide avec les parois de l'échantillon creux ce qui permet d'avoir un débit important d'eau. Le fluide est introduit sous pression à l'intérieur de l'échantillon, il est évacué latéralement à travers ses parois.

## IV.2. Programme expérimental

Dans ce qui suit, nous présentons en premier lieu la caractérisation des matériaux utilisés au cours de notre étude expérimentale, principalement, le ciment, les granulats, la composition des bétons et le mode de conservation. En second lieu, nous exposons la procédure expérimentale développée pour l'évaluation de la perméabilité à l'eau du béton. Dans cette partie, nous décrivons le principe de cette configuration expérimentale. Nous présentons ensuite les procédés expérimentaux utilisés pour déterminer la résistance à la compression et de la porosité des bétons étudiés. En dernier lieu, l'étude expérimentale concernant l'attaque chimique des échantillons et l'influence de ces agressions chimiques sur la perméabilité à l'eau du béton, est présentée.

### IV.2.1. Matériau étudié

L'étude de l'influence des effets climatiques et chimiques sur la perméabilité du béton est réalisée sur des cylindres creux de 14 cm de hauteur et de 16 cm de diamètre. Cependant, les essais de résistance et de porosité sont réalisés sur des éprouvettes cubiques  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ .

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans la confection des divers bétons sont les suivants :

- ❖ Un sable concassé (SC) de couleur grise provenant de la carrière.
- ❖ Deux fractions de gravier (3/8, 8/16) d'origine calcaire.
- ❖ Le ciment CPJ – CEM II / B 42.5 N (-Cimenterie LAFARGE de M'sila-)
- ❖ Eau de robinet pour le gâchage.

#### IV.2.1.1 ciment utilisé

Le ciment utilisé est un ciment (CPJ-CEM II B 42.5 N) : c'est un ciment de couleur grise conçu principalement pour les bétons de haute-performance. Ce ciment est certifié conformément aux normes algérienne (NA 442) et européenne (EN CE 197-1), et destiné à la construction des ouvrages qui nécessitent de hautes résistances mécaniques. D'après la fiche technique du ciment utilisé, les avantages du ciment sont : [91]

- ❖ Une résistance initiale élevée pour réaliser des préfabriques lourdes (poutres, voutes, ...).
- ❖ Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie.
- ❖ Une classe vraie qui offre une haute performance au béton.
- ❖ Meilleure durabilité du béton.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont représentées dans les tableaux IV.1 et IV.2. Les principales caractéristiques physiques, caractéristiques complémentaires et résistances à la compression sont synthétisées dans les tableaux IV.3, IV.4 et IV.5.

Composantes	Valeurs en %
Teneur en sulfates $SO_3$	2.00 à 2.70
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.00 à 2.00
Teneur en chlorure	0.01 à 0.05
Teneur en équivalent en alcalis	0.3 à 0.75
Perte au feu	7.50 à 12.00
Résidus insolubles	0.7 à 2.00

Tableau IV.1. Caractéristique chimique du ciment [91]

Composantes	Valeurs en %
Silicates tricalciques $C_3S$	58 à 64
Silicates bicalciques $C_2S$	12 à 18
Aluminates tricalciques $C_3A$	6.00 à 8.00
Alumino ferrites tétracalciques $C_4AF$	10.00 à 12.00

Tableau IV.2 Compositions minéralogiques du clinker [91]

Propriétés	Valeurs
Consistance normale	28 à 28.50 (%)
Surface spécifique Blaine	3750 à 5250 c
Retrait à 28 jours	< 1000 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
Expansion	0.3 à 2.5 (mm)
Masse volumique apparente	1.005 ( $\text{Kg}/\text{dm}^3$ )
Masse volumique spécifique	3.02 ( $\text{Kg}/\text{dm}^3$ )

Tableau IV.3 Propriétés physiques du ciment [91]

Temps de prise	Temps en (min)
Début de prise	140 à 195
Fin de prise	195 à 290

Tableau IV.4 temps de prise à 20 °C [91]

Âge de l'éprouvette	Résistance à la compression (MPa)
02 jours	$\geq 10.0$
28 jours	$\geq 42.5$

Tableau IV.5 Résistance mécanique à la compression du ciment [91]

#### IV.2.1.2 Le sable

##### a/ Origine

Le sable utilisé pour la confection des différents bétons est un sable naturel concassé de carrière, issu de roche calcaire.

Un sable de bonne granulométrie doit contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se dispersent entre les intersections des gros grains dans le but de combler les vides. Certains sables sont à éviter tels que les sables très fins, les sables grossiers qui manque de fines et les sables qui contiennent les sels néfastes pour les bétons.

**b/ Analyse granulométrique du sable**

La granularité du sable est déterminée selon la norme NF P18-304 et les résultats sont représentés dans le tableau suivant.

Les essais sur le sable et les graviers sont réalisés au laboratoire géo matériaux de l'université de M'sila.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulées		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
6.3	2,3	2,3	0	100,0
5.0	7,2	9,5	0,5	99,5
4.0	29	38,5	1,9	98,1
2.5	305	343,5	17,2	82,8
1.25	599	942,5	47,1	52,9
0.63	491	1433,5	71,7	28,3
0.315	311	1744,5	87,2	12,8
0.16	159	1903,5	95,2	4,8
0.08	76,5	1980	99,0	1,0
Fond	20	2000	100,0	0,0

Tableau IV.6 : Analyse granulométrique du sable utilisé

**C/ Module de finesse :**

Pour notre sable : ( $M_f = 3.18$ ) correspond à un sable un peu trop grossier qui peut être à utiliser pour la recherche de résistances élevées, mais on aura, en général, une ouvrabilité faible [92].

Pour éviter les problèmes d'ouvrabilité pendant la confection et de ségrégation pendant la mise en place. Les sables de ce type nécessitent des correction en utilisant un sable plus fin par exemple celui de Bousaada. Dans notre étude, nous avons utilisé le sable dans son état naturel. C'est-à-dire sans faire des corrections.

**IV.2.1.3 Les granulats**

Les granulats employés sont constitués deux fractions de gravier (3/8) et (8/16). Il s'agit de granulats calcaires concassés de couleur grise.

**a/ Caractéristiques physiques:**

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Fraction 3/8	Fraction 8/16	Normes
Masse volumique absolue ( $g/cm^3$ )	2.58	2.60	NFP18 - 554
Masse volumique apparente ( $g/cm^3$ )	1.31	1.34	
% Porosité	48.7	47.9	
% Degré d'absorption	1.80	1.35	
% Teneur en eau	0.21	0.27	

Tableau IV.7 : Caractéristiques physiques du gravier utilisé

**b/ Analyse granulométrique des graviers :**

**\* Gravier 3/8 :**

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	32	32	0	100
6.3	635	667	26.86	73.32
5	862	1529	61.16	38.84
4	534	2063	82.52	17.48
2.5	381	2444	97.76	2.24
1.25	32	2476	99.04	0.96
0.63	15	2491	99.64	0.36
Fond	9	2500	100	0

Tableau IV.8 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

**\* Gravier 8/16 :**

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	11	11	0	100
12.5	560	571	17.84	82.17
10	875	1446	45.18	54.81
8	1079	2525	78.91	21.09
6.3	509	3034	94.81	5.19
5	101	3435	97.70	2.03
4	28	3163	98.84	1.16
Fond	37	3200	100	0

Tableau IV.9 : Analyse granulométrique du gravier 8/16

D'après les analyses granulométriques effectuées sur les graviers 3/8 et 8/16, on remarque la présence de grains fins inférieurs à 3 mm dans le premier et des grains inférieurs à 8 mm dans le second.

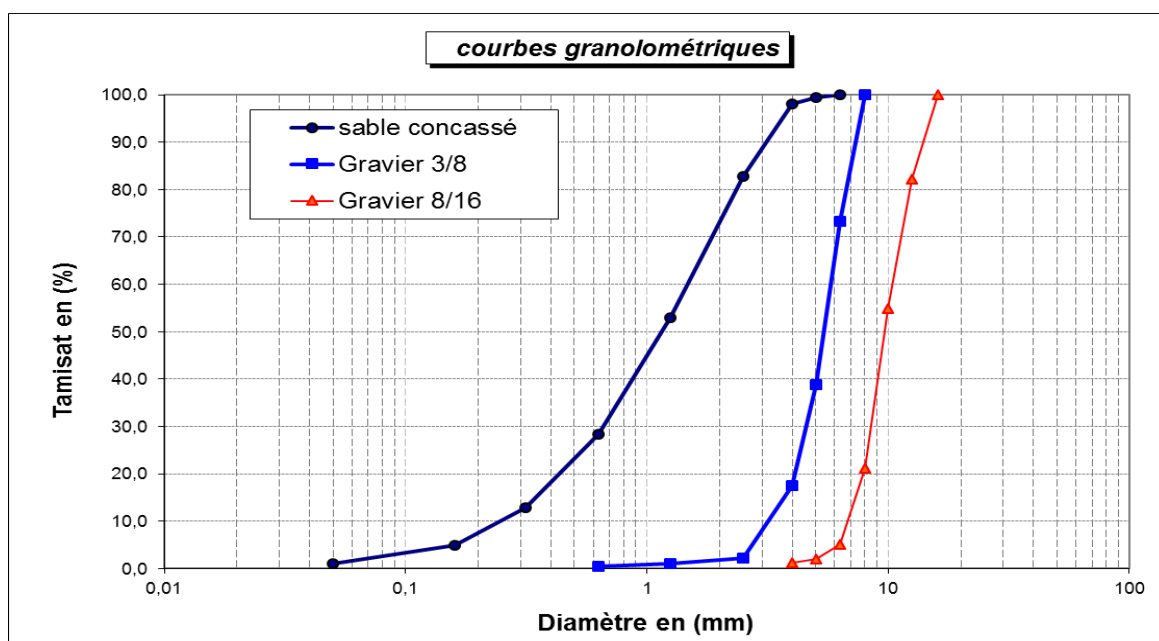


Figure IV.1 : Courbes granulométriques du sable et des granulates

#### IV.2.2 Composition du béton

La composition du béton consiste à définir le mélange optimal des granulats, du ciment et d'eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées en ce qui concerne l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité.

La composition des bétons de notre étude a été déterminée en utilisant une méthode de composition élaborée dans le laboratoire des Géo matériaux de l'université de M'sila [93]. Cette méthode de composition est établie en basant sur la procédure de BARON- LESAGE qui est une procédure purement expérimentale. Cette procédure comporte 03 étapes distinctes [80,93].

1 - Réalisation de plusieurs gâchées ayant des rapports de S/G variables et un rapport C/E constant. On détermine par approximation successive les constituants solides pour lesquels, à dosage en ciment et en eau fixe, le béton s'écoule le plus rapidement dans le maniabilimètre.

2- Le rapport S/G étant connu, on détermine ensuite le dosage en eau (et éventuellement en adjuvant) nécessaire pour que le béton s'écoule en un temps donné qui est fixé d'après le type de béton et le mode de mise en œuvre.

3- Confection de bétons ayant différents dosages en ciments en assurant la maniabilité voulue.

4- Etude de l'influence du dosage en ciment sur la résistance mécanique par des essais d'écrasement à 28 jours sur l'ensemble des éprouvettes.

En fin, en utilisant les résultats obtenus et les différents paramètres pris en compte ; des abaques ont été tracés pour faciliter le calcul des formulations des bétons selon les paramètres voulus.

D'après ces abaques, les formules suivantes reliant les différents paramètres ont été établies :

❖ Relation entre l'affaissement A, la quantité de ciment et le rapport E/C :

$$E/C = ((2.9 A + 142) / C) - (0.002 A - 0.168) \quad (4.1)$$

❖ Relation entre la résistance mécanique à la compression à 28 jours et le rapport (C/E)

$$f_{c_{28}} = 28.6 (C/E) - 17.8 \quad (4.2)$$

Avec : A en cm, E et C en Kg/m<sup>3</sup>

#### IV.2.3 Programme expérimental

Le programme expérimental se compose de trois parties :

##### Partie 1 :

- *Etude de l'effet d'une température élevée (environ 50 °C) sur la perméabilité à l'eau du béton.*

Cette partie de l'étude comporte la formulation de douze (12) types de bétons en faisant varier le rapport (E/C) de sorte que pour chaque dosage en ciment, on a deux types de béton : un béton ferme S1 (affaissement de 1 à 4 cm) et un béton très plastique S3 (affaissement de 10 à 15 cm). Les essais de perméabilité à l'eau ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques creuses de 16 cm de hauteur et 14 cm de diamètre. Ces éprouvettes sont conservées soit à l'air

libre pendant trois mois (la saison de l'été), ou dans l'eau à l'intérieur du laboratoire pendant 28 jours.

**Partie 2 :**

*- Etude de l'effet d'une température élevée (environ 50 °C) sur la porosité et la résistance mécanique à la compression.*

L'étude comporte de huit (8) types de bétons avec un rapport (E/C) variable. Cette variation permet l'obtention d'un béton ferme S1 (affaissement de 1 à 4 cm) et un béton très plastique S3 (affaissement de 10 à 15 cm). Les essais de porosité et ceux de résistance à la compression ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ . De même que la partie précédente, les éprouvettes ont été conservées à l'eau pendant 28 jours ou à l'air libre pendant trois mois ( la saison de l'été).

Dans les partie 1 et 2 de cette étude, le choix est fait sur un béton ferme (affaissement de 1 à 4 cm) et un béton très plastique (affaissement de 10 à 15 cm) pour pouvoir comparer les résultats et évaluer l'influence d'un rapport E/C élevé sur les caractéristiques mécaniques et principalement sur la perméabilité à l'eau et la porosité du béton.

**Partie 3 :**

*- Etude de l'influence des milieux agressifs (sulfates et acide) sur la perméabilité à l'eau du béton.*

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes confectionnées par un béton plastique S2 (affaissement de 5 à 9 cm) avec un dosage en ciment de  $360 \text{ Kg/m}^3$ . Ces éprouvettes ont été conservées pendant 28 jours dans l'eau ensuite dans trois milieux agressifs : acide sulfurique  $H_2SO_4$ , sulfate de magnésium  $MgSO_4$  et de sulfate d'ammonium  $(NH_4)_2 SO_4$  avec une concentration de 5% pendant 28 jours. La présente étude consiste à une évaluation de la perméabilité à l'eau et comparaison des résultats obtenus avec ceux d'un béton qui a été conservé à l'eau pendant 28 jours.

Les essais ont été fait sur un béton plastique avec un dosage de  $360 \text{ Kg/m}^3$  qui est un béton le plus généralement utilisé pour la confection de la plupart des éléments des structures dans nos chantiers.

**IV.2.4 Malaxage et cure appliquée aux bétons : (norme NF P18-404)**

Les constituants du béton ont été mélangés à sec pendant une minute après avoir été introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie (gros élément, liant, sable). L'eau a été ensuite introduite et le malaxage est poursuivi durant 2 minutes.

Les échantillons ont été confectionnés par gâches permettant d'obtenir six éprouvettes pour chaque type de béton (trois éprouvettes seront conservées à l'eau et trois autres éprouvettes conservées à l'air). Les éprouvettes des essais de perméabilité à l'eau ont la forme cylindrique creuse alors que ceux des essais de porosité et résistance à la compression ont été coulés dans des moules ( $10 \times 10 \times 10$ )  $\text{cm}^3$ .

Après une période initiale de conservation de 24 heures, les échantillons ont été démoulés. Une partie de ces éprouvettes ont été plongées directement dans l'eau à  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  pendant

28 jours. Une autre partie des éprouvettes ont été conservées à l'air libre à l'extérieur du laboratoire sous une température allant jusqu'à 50 °C pendant trois mois (la saison de l'été). En ce qui concerne l'étude de l'effet des milieux agressifs sur la perméabilité à l'eau du béton, les échantillons ont été conservés dans des solutions d'acide et de sulfates avec une concentration de 5% pendant 28 jours.

### IV.3. Etude de l'effet d'une température élevée (environ 50 °C) sur la perméabilité à l'eau du béton.

#### IV.3.1 Introduction

Une grande partie des problèmes de durabilité rencontrés dans la région de M'sila résulte de l'élévation de température pendant la saison de l'été ainsi que la présence de sulfates dans le sol de plusieurs régions.

Les effets climatiques résultent principalement de l'élévation de température et du changement cyclique de cette dernière entre le jour et la nuit surtout pendant la saison de l'été où la température peut atteindre plus de 50°C pendant le jour et 18°C dans la nuit ainsi que l'effet du vent et des rayonnements solaires. Ces paramètres affectent énormément les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton et en particulier sa perméabilité à l'eau.

Cette partie est menée pour l'étude de la perméabilité à l'eau des bétons confectionnés à base de matériaux locaux et de ciment CPJ – CEM II / B 42.5 N . Ces bétons ont été conservés à l'air libre pendant trois mois et les résultats obtenus ont été comparés avec ceux des bétons qui ont subi une cure standard à l'eau pendant 28 jours.

#### IV.3.2. Composition des bétons

Le tableau suivant représente les dosages en granulats, ciment et eau de gâchage pour les 12 bétons des différents essais de cette partie de l'étude.

Nº	Types de béton	Ciment Kg/m <sup>3</sup>	Sable 0/5 Kg/m <sup>3</sup>	Gravier 3/8 Kg/m <sup>3</sup>	Gravier 8/15 Kg/m <sup>3</sup>	Eau Kg/m <sup>3</sup>	E/C	Ouvrabilité
01	B1	300	757	392	775	196	0.65	ferme
02	B2	300	718	366	736	217	0.72	Très plastique
03	B3	320	745	384	763	199	0.63	ferme
04	B4	320	710	360	728	212	0.66	Très plastique
05	B5	340	738	379	758	205	0.60	ferme
06	B6	340	702	356	720	222	0.65	Très plastique
07	B7	360	726	376	744	203	0.56	ferme
08	B8	360	693	350	712	221	0.61	Très plastique
09	B9	380	720	370	736	207	0.54	ferme
10	B10	380	687	344	704	226	0.59	Très plastique
11	B11	400	714	366	728	213	0.53	ferme
12	B12	400	680	341	696	222	0.55	Très plastique

Tableau IV.10. Proportion de matériaux pour les différents types de bétons.

Pour chaque dosage en ciment, on a confectionné deux types de bétons en changeant la quantité d'eau pour avoir un béton ferme et un béton très plastique, le rapport E/C est déterminé alors par un rapport entre la quantité d'eau utilisée et le dosage en ciment pour chaque cas d'ouvrabilité. Les classes de l'ouvrabilité sont mentionnées dans la norme EN206 :1990. L'ouvrabilité est vérifiée par l'essai d'affaissement au slump-test.

Avant la mise en place dans l'appareil de l'essai de perméabilité, les échantillons ont été immergés dans l'eau jusqu'à saturation complète.

### **IV.3.3. Méthode expérimentale proposée pour l'évaluation de la perméabilité à l'eau du béton**

Généralement, il n'existe pas une méthode standard normalisée pour la mesure de la perméabilité à l'eau du béton [4]. Plusieurs méthodes d'essais permettant la mesure de cette propriété ont été proposées. Dans ces essais tels qu'ils sont utilisés, le débit de l'écoulement sous l'influence d'une pression appliquée est mesuré et le coefficient de perméabilité K est calculé à partir de la loi de Darcy [1,4,5]. Dans le but de déterminer la perméabilité des matériaux cimentaires, il est nécessaire d'utiliser une méthode souple, d'une courte durée d'essai, de haute précision et assez simple à réaliser [6,9].

Dans la présente thèse, nous présentons une nouvelle méthode expérimentale, permettant la détermination du coefficient de perméabilité à l'eau du béton par l'utilisation de la loi de Darcy appliquée sur un béton saturé. Les essais sont effectués sur des échantillons cylindriques creux soumis à l'action de l'eau sous une pression allant jusqu'à 5 bars.

L'appareillage utilisé est celui du laboratoire de développement des géomatériaux de l'université de M'sila. Les échantillons de mesure ont un diamètre de 16 cm et 14 cm de hauteur avec une ouverture longitudinale de 6.3 cm de diamètre.

L'appareil utilisé permet le montage de 6 échantillons à la fois dans un seul essai, la fixation de ces échantillons est assurée par un système de serrage mécanique manuel. L'eau alimente l'éprouvette par sa partie basse et traverse latéralement cette dernière sous l'effet de la pression appliquée. Avant la mise en place, les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant 24 heures pour assurer une saturation complète. La pression appliquée est de 5 bars, cette pression reste constante tout au cours des essais par l'utilisation d'un compresseur d'air automatique. La lecture des débits d'eau écoulée est établie sur les cellules graduées de l'appareil chaque 24 heures pendant une durée de 13 jours.

### **IV.3.4. Montage expérimental**

Deux vues schématiques et une photo de la configuration expérimentale sont présentées dans les figures IV.2, IV.3 et IV.4. L'appareil de perméabilité est composé de six emplacements pour les échantillons avec un système de joints dans la partie basse de chaque emplacement.

Dans les parties hautes des échantillons, des joints en silicones ont été ajoutés pour éviter la fuite d'eau sous pression. Le maintien des échantillons est assuré par le système de fixation de l'appareil. Six cellules graduées en verre de capacité de 1.5 litre chacune permettent la lecture des quantités d'eau écoulées. La pression d'air est obtenue par un compresseur automatiquement de capacité de 10 bars. Le contrôle de pression est fait par un régulateur de pression de l'appareil.

L'essai de perméabilité consiste à :

- La mise en place et la fixation des échantillons dans l'appareil ;

- Remplissage des creux vides des échantillons par l'eau en assurant l'absence de toutes fuites à travers les joints ;
- Vérification des quantités d'eau dans les cellules graduées de l'appareil ;
- La mise de l'eau sous une pression de 5 bars en ouvrant les vannes d'air comprimé ;
- La lecture des débits d'eau écoulés dans les cellules toutes les 24 heures.

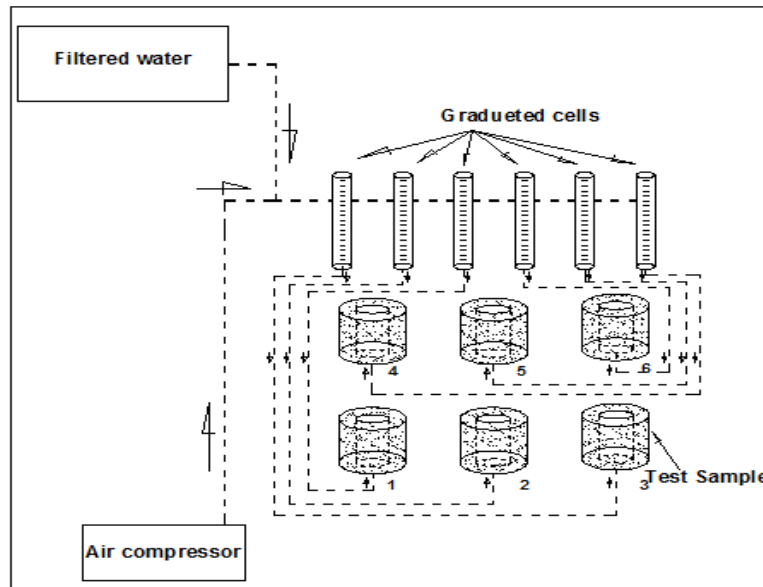


Figure IV.2: schéma de l'appareil d'essai de perméabilité

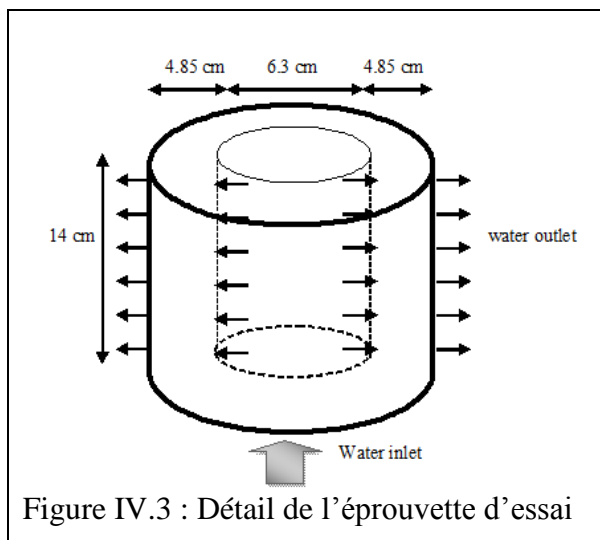


Figure IV.3 : Détail de l'éprouvette d'essai



Figure IV.4 : Forme des éprouvettes

Deux images représentées sur les figures IV.5 et IV.6 ci-dessous, la première concerne l'appareillage de mesure, alors que la seconde donne une vue sur la sortie d'eau sous pression à travers les parois d'un échantillon.



Figure IV.5 : Appareil de mesure de perméabilité à l'eau



Figure IV.6 Ecoulement d'eau sous pression vers l'extérieur de l'éprouvette

### IV.3.5. Coefficient de perméabilité

La perméabilité d'un matériau caractérise son aptitude à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression. Le coefficient de perméabilité  $K$  est défini par la loi de Darcy [6]. Ce coefficient est donné par une relation qui exprime le débit volumique  $Q$  d'un fluide de viscosité  $\mu$ . Ce débit volumique traverse une épaisseur  $dZ$  d'un matériau de section apparente  $A$  sous la différence de pression  $dP$ . Cette relation suppose un régime d'écoulement laminaire et permanent dans les pores du matériau [3].

Le principe de l'essai consiste à déterminer les volumes d'eau écoulés à travers un échantillon pendant une certaine durée de temps. Ces volumes d'eau sont délimités par des graduations des cellules de l'appareil. En d'autres termes, il s'agit de préciser le niveau atteint par l'eau dans chaque cellule au bout d'un certain temps. La vitesse d'écoulement  $Q$  est déterminée par le calcul du rapport entre le volume d'eau écoulé et le temps d'écoulement.

La perméabilité est déterminée par une loi simple de DARCY :

$$Q = A \cdot K \cdot i \quad (4.4)$$

Avec  $Q$  : le volume d'eau par unité de temps (vitesse d'écoulement)

$A$  : section traversée par l'eau

Dans notre cas  $A = \pi \cdot D \cdot H$  avec ( $D = 6.3 \text{ cm}$ ,  $H = 14 \text{ cm}$ )

$K$  : coefficient de perméabilité

$i$  : gradient hydraulique à travers le spécimen (m/m)

$$i = (\text{la pression à l'intérieur de L'éprouvette} - \text{la pression à l'extérieur}) / \text{épaisseur du béton}$$

La pression à l'extérieur 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 10.34m. La pression à l'intérieur est prise égale à 0.5 Mpa (5 bars), elle est équivalente à 51.0163 m.

On peut avoir alors :

$$K = 0,043 Q \quad \text{en (m/s)} \quad (4.5)$$

IV.3.6. Résultats obtenus

IV.3.6.1. Variation du coefficient de perméabilité en fonction du temps

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous qui donnent l'allure des courbes du coefficient de perméabilité en fonction du temps. Ces courbes expriment l'influence du dosage en ciment et de la quantité d'eau de gâchage et du mode de cure sur la perméabilité à l'eau du béton.

a/ Cas du dosage en ciment de 300 et 320 Kg/m<sup>3</sup>

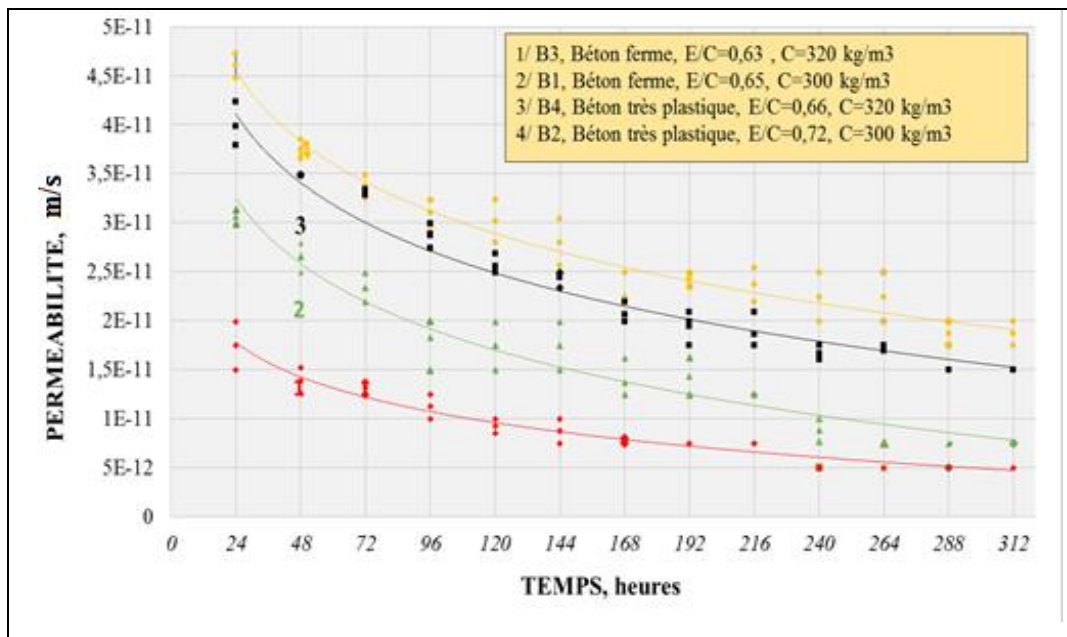


Figure IV.7 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)

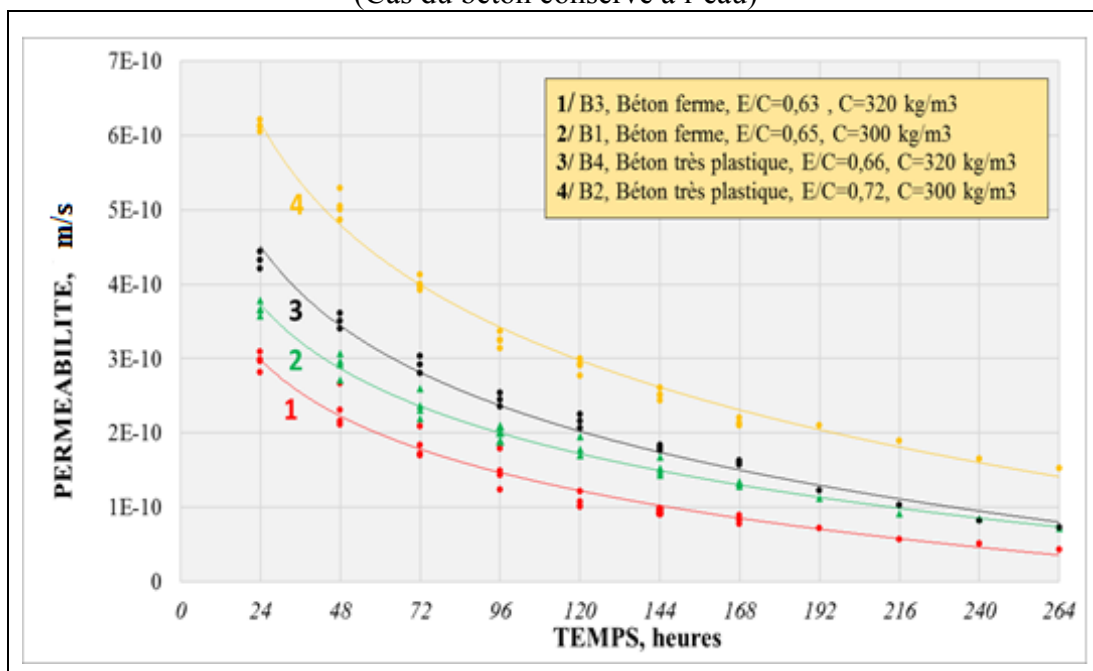


Figure IV.8 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)

b/ Cas du dosage en ciment de 340 et 360 Kg/m<sup>3</sup>

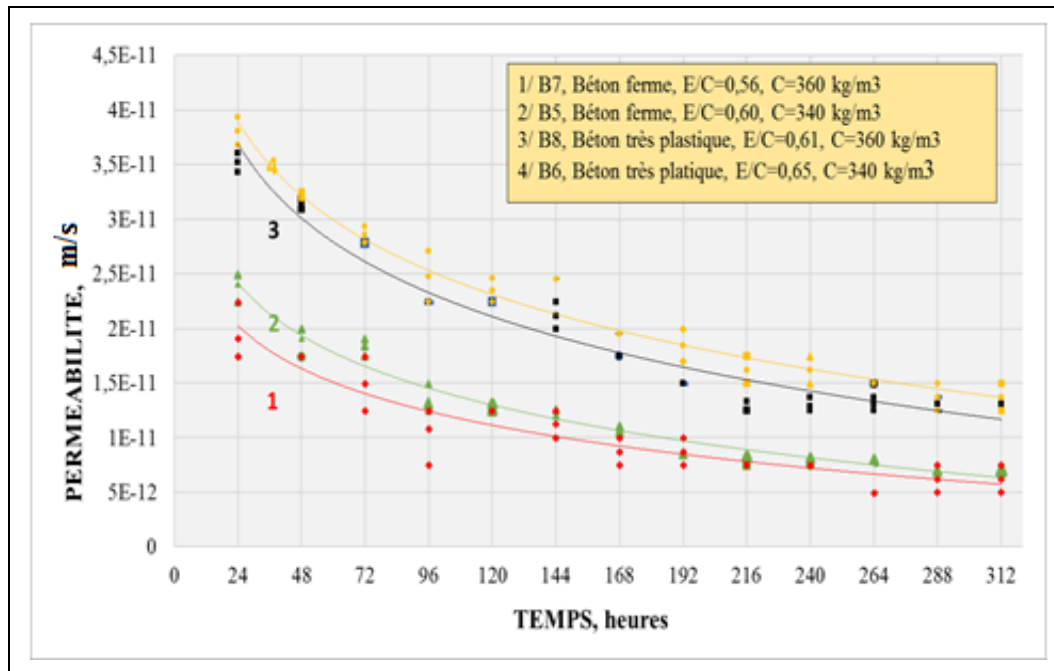


Figure IV.9 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps  
(Cas du béton conservé à l'eau)

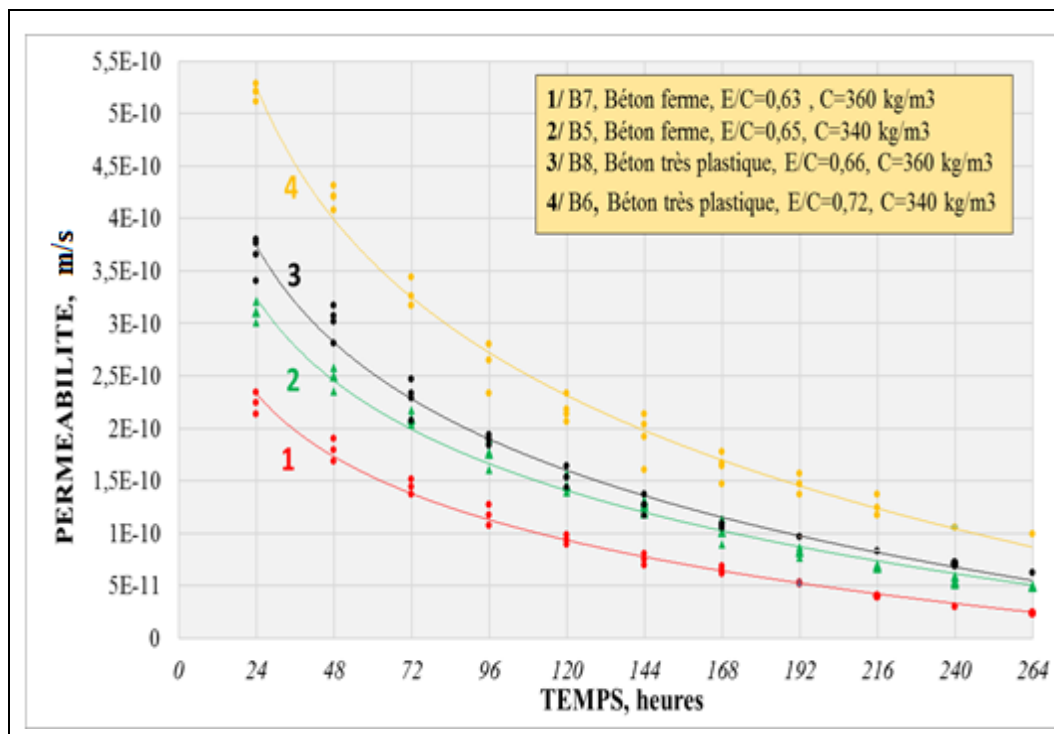


Figure IV.10 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps  
(Cas du béton conservé à l'air)

c/ Cas du dosage en ciment de 380 et 400 Kg/m<sup>3</sup>

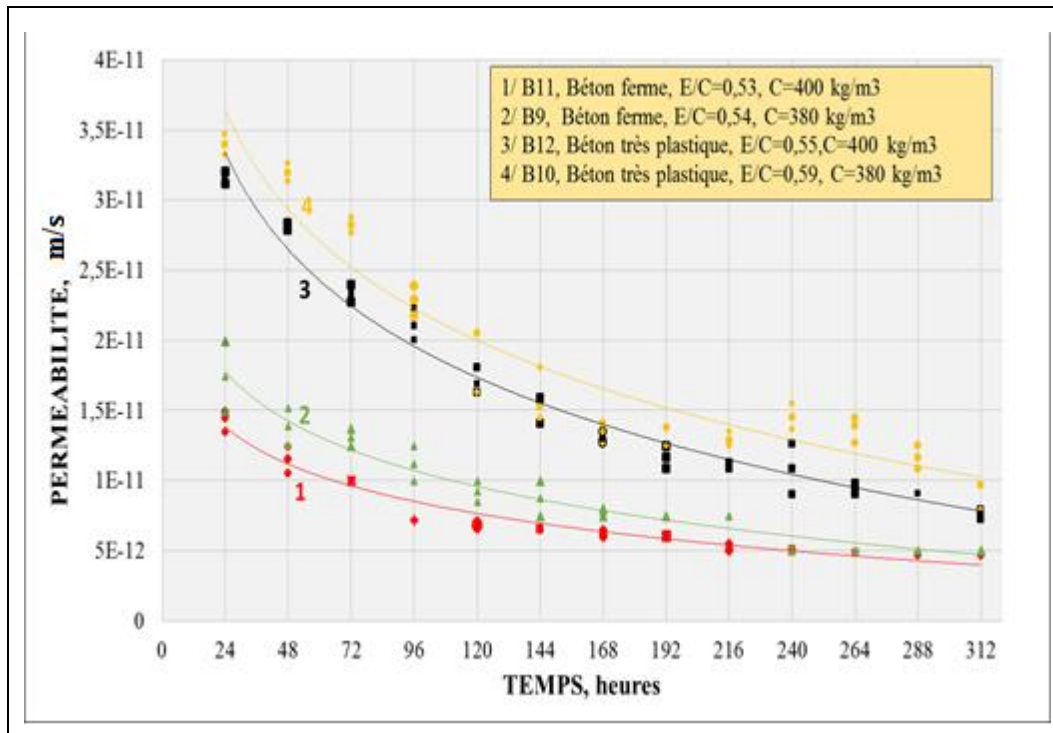


Figure IV.11 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)

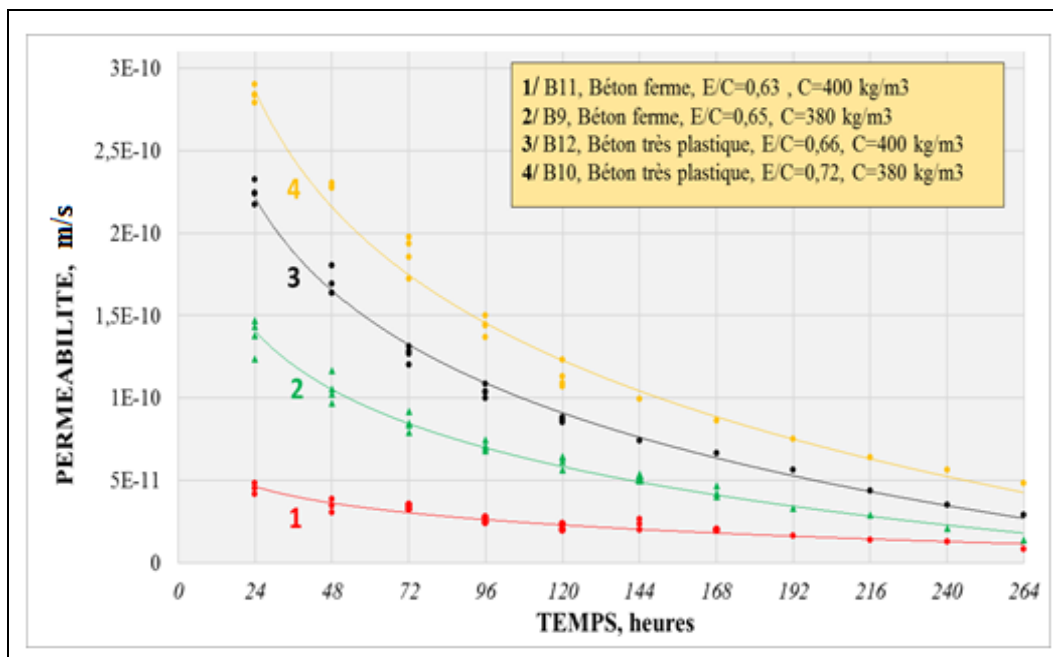


Figure IV.12 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)

Les figures de IV.7 à IV.12, représentent chacune quatre types de bétons (ferme, très plastique avec deux dosages en ciment pour chaque type). Dans les courbes de ces figures, on peut voir clairement l'influence du rapport E/C, de la quantité du ciment et du mode de cure caractérisé par une conservation à l'eau et à l'air libre, sur la perméabilité à l'eau du béton.

D'après ces courbes, on peut voir clairement que la quantité d'eau de gâchage et le dosage en ciment exprimé par le rapport E/C, influent grandement la perméabilité à l'eau du béton. De même pour le mode de conservation, la perméabilité des bétons conservés à l'eau présente des coefficients de perméabilité nettement faibles à ceux qui ont été conservés à l'air.

d/ Cas du dosage en ciment de 300 à 400 Kg/m<sup>3</sup> ( Bétons fermes)

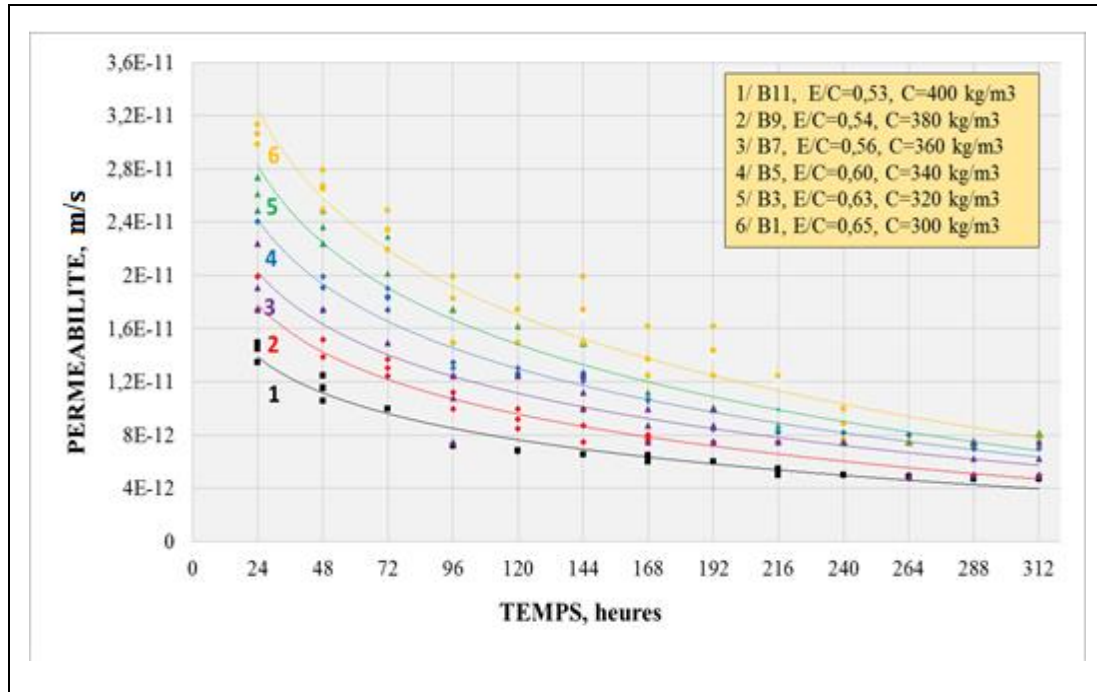


Figure IV.13 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)

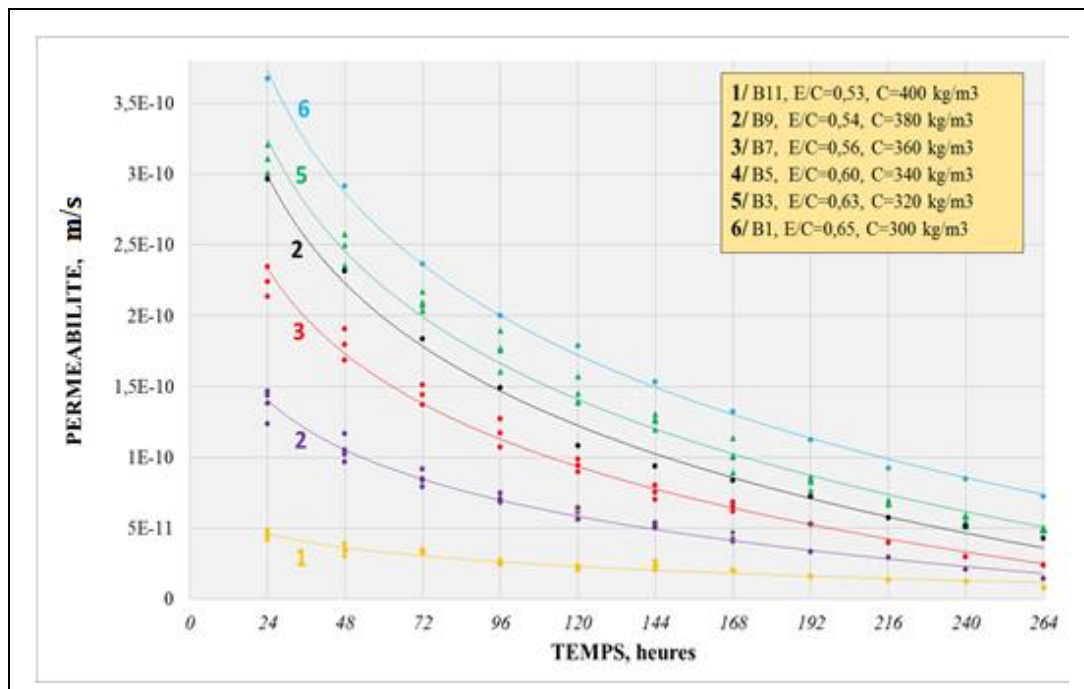


Figure IV.14 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)

e/ Cas du dosage en ciment de 300 et 400 Kg/m<sup>3</sup> ( Bétons très plastiques)

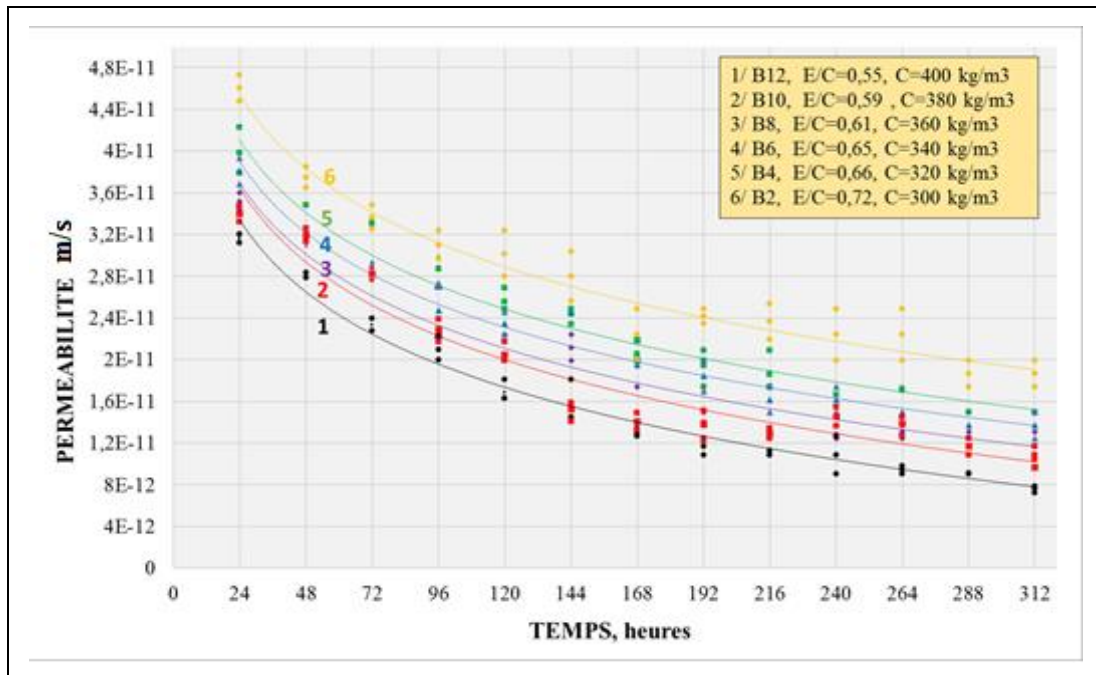


Figure IV.15 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'eau)

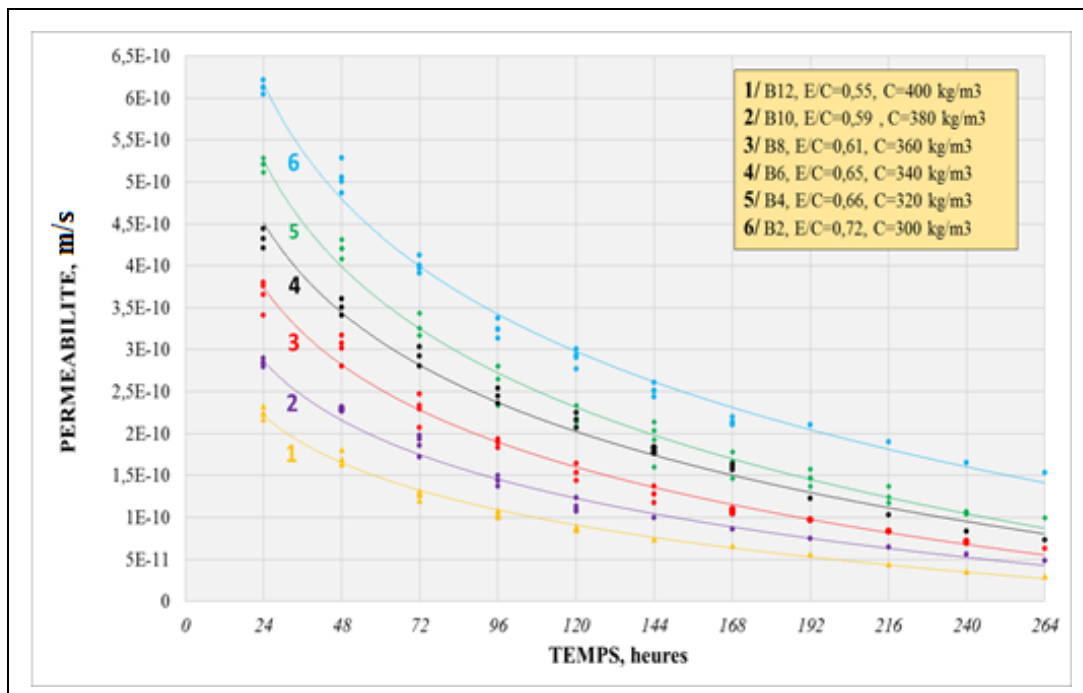


Figure IV.16 : Coefficient de perméabilité en fonction du temps (Cas du béton conservé à l'air)

Les figure de IV.13 à IV.16, représentent respectivement l'influence du dosage en ciment sur la perméabilité à l'eau du béton pour les bétons d'une ouvrabilité ferme et très plastique, conservés à l'eau et à l'air.

D'après ces courbes, on peut voir clairement que le dosage en ciment influe sur la perméabilité à l'eau du béton : la perméabilité à l'eau diminue lorsque le dosage en ciment augmente. Ces courbes montrent aussi bien l'influence du mode de conservation sur la perméabilité des bétons. La perméabilité à l'eau des bétons qui ont subi une cure dans l'eau est nettement faible par rapport à ceux qui ont été conservés à l'air.

IV.3.6.2. Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau du béton

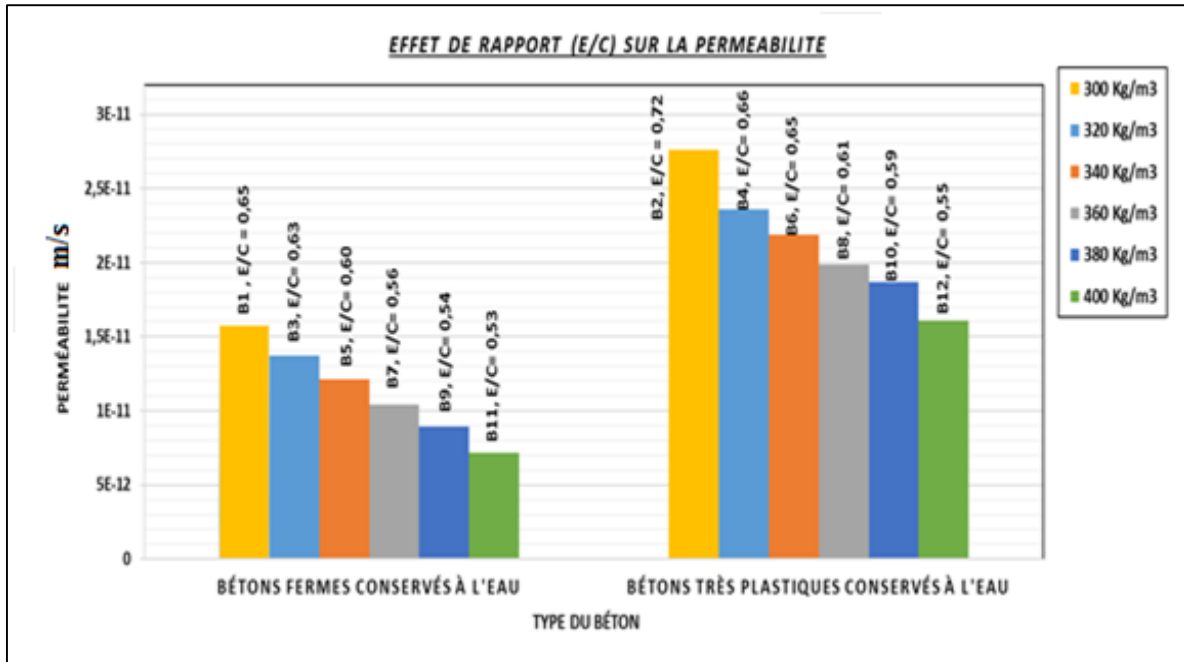


Figure IV.17 : Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'eau

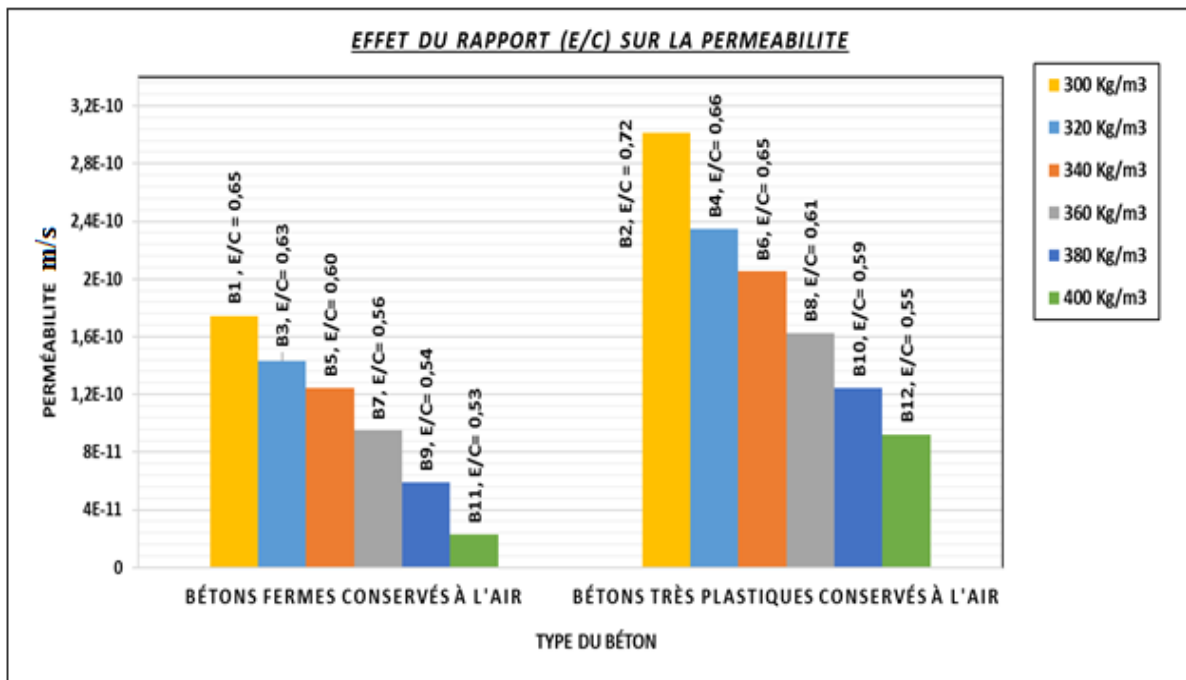


Figure IV.18 : Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air

IV.3.6.3. Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau du béton

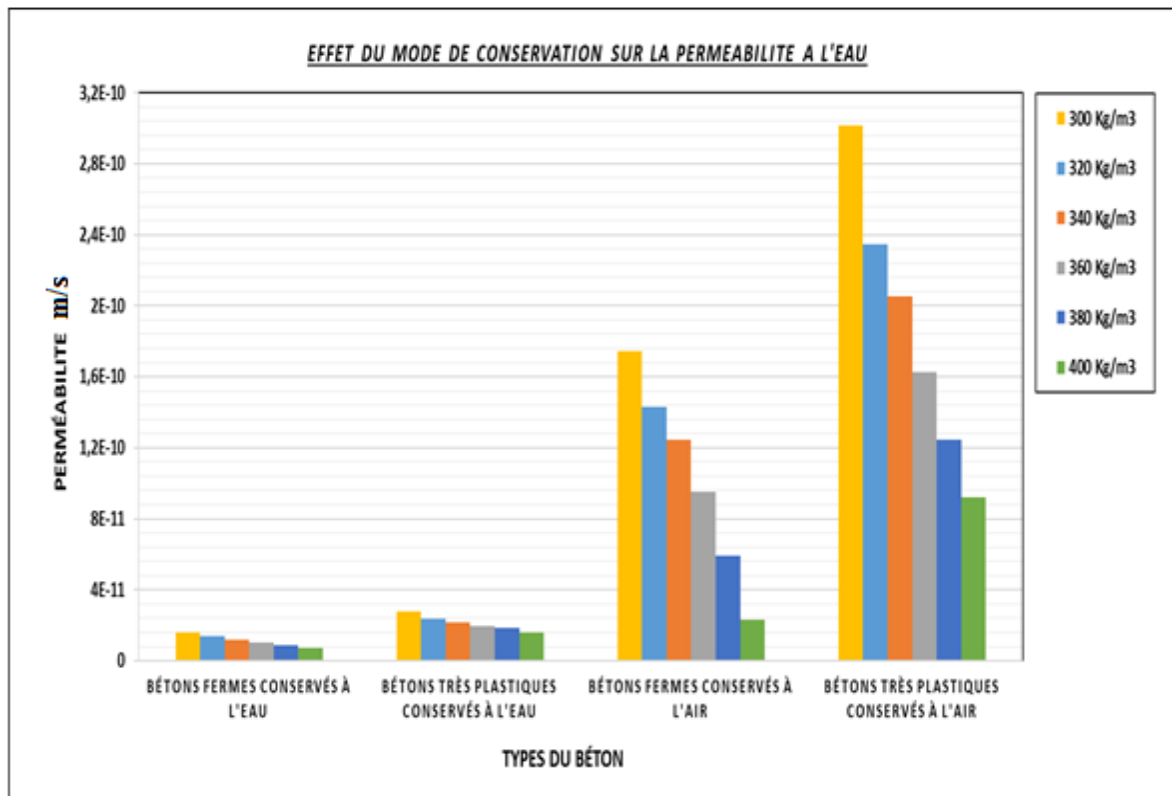


Figure IV.19 : Effet du mode de conservation sur la perméabilité à l'eau des différents bétons

Les figures IV.17, IV.18 et IV.19 représentent l'influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau pour les bétons conservés dans l'eau et ceux qui ont été conservés à l'air. Ces courbes montrent l'effet de la quantité d'eau et dosage en ciment. Les bétons fermes sont moins perméables en comparaison avec les bétons très plastiques. Pour un même type de béton, la perméabilité diminue lorsque le dosage en ciment augmente.

Les courbes de la figure IV.19 montrent bien l'influence du mode de conservation sur la perméabilité à l'eau entre un béton ferme et un béton très plastique. D'après les résultats représentés sur ces courbes, la perméabilité des bétons conservés à l'air était d'environ onze (11) fois supérieures à celle des bétons qui ont été conservés à l'eau.

IV.3.7. Discussions des résultats obtenus.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes

\*\*\* La perméabilité à l'eau du béton diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C. la structure poreuse du ciment est constituée de pores capillaires et des pores d'hydrates. Les pores capillaires qui sont les plus gros, influent fortement les propriétés de transfert des bétons surtout lorsqu'ils sont interconnectés. Pour diminuer cette porosité capillaire et son interconnexion, il faut réduire le rapport E/C et avoir une conservation humide du béton aussi longue que possible surtout pendant les premiers jours.

L'hydratation d'une pâte de ciment peut s'arrêter lorsque toute l'eau capillaire est consommée ou lorsque tout le ciment est hydraté. Il existe un seuil critique pour le rapport E/C pour lequel la quantité de ciment peut s'hydrater complètement, ainsi il ne subsiste plus de porosité capillaire à hydratation complète. Cependant, pour des quantités d'eau supérieures au besoin de l'hydratation du ciment. La pâte complètement hydratée contient encore des pores capillaires. Alors que, si le rapport E/C est inférieur au besoin de l'hydratation, le ciment ne peut pas s'hydrater complètement [8].

En conclusion, La formation d'hydrates en cours d'hydratation comble progressivement la porosité capillaire. Pour un rapport E/C faible, la totalité du ciment ne peut pas s'hydrater par manque d'eau, par contre, pour les bétons courant le rapport E/C est généralement élevé par manque de contrôle de la quantité d'eau de gâchage. Dans ce cas, tout le ciment peut s'hydrater et il subsiste de la porosité capillaire en fin d'hydratation.

\*\*\* En ce qui concerne l'influence du mode de conservation sur la perméabilité à l'eau du béton. On constate que les perméabilités des bétons conservés à l'air sous une température élevée (de l'ordre de 50 °C), sont très élevées en comparaison avec les bétons qui ont subi une cure standard à l'eau. Cette élévation est d'environ 11 fois.

Pour obtenir un bon béton, la mise en œuvre optimale doit être suivie d'un ensemble de précautions pour favoriser l'hydratation du ciment. En particulier, un contrôle de température et des mouvements d'humidité autour et à l'intérieur du béton : Maintenir un béton saturé, ou aussi saturé que possible, jusqu'à ce que les pores remplis d'eau à l'origine dans la pâte fraîche de ciment soient remplis par les produits d'hydratation. Dans le cas d'une élévation de température, l'hydratation complète du ciment n'aura pas lieu suite à l'évaporation d'une quantité importante d'eau de gâchage surtout dans le cas des bétons de fort rapport E/C [3,4].

Dans le cas d'une conservation à l'air libre sous une température allant jusqu'à 50 °C le jour et 18 °C la nuit et une humidité relative faible. Ces conditions affectent énormément les caractéristiques du béton. Une évaporation d'une quantité d'eau de gâchage influe le développement de l'hydratation du ciment, car l'hydratation du ciment ne peut se développer que dans des capillaires remplis d'eau. Il faut donc éviter que l'eau des capillaires ne s'évapore par une cure suffisamment saturée que possible [4].

Dans les courbes des figures IV.7 à la figure IV.16, on remarque une diminution de la perméabilité à l'eau en fonction du temps. Cette réduction est attribuée à la partie externe du béton, appelée béton de peau. C'est la partie la plus sensible, car le séchage y est plus rapide et elle est plus poreuse que le cœur du béton. La structure des premiers centimètres du béton au voisinage des parois est modifiée par plusieurs causes : influence du coffrage, ségrégation, fissuration, fissuration excessive... Il en résulte que lors du déplacement de l'eau de la surface externe vers le cœur du béton, on remarque l'apparition des débits importante dans les premiers centimètres de la peau de béton : le squelette granulaire du béton frais est décompacté au voisinage des coffrages par un effet de paroi. Il en résulte une hétérogénéité du béton qui se caractérise par un accroissement de la teneur en pâte de ciment et donc de la porosité dans la partie externe des ouvrages. Ceci peut être dû à un rapport E/C localement plus élevé ou à des conditions d'hydratation moins favorables que le cœur du béton [4].

**IV.4. Etude de l'effet d'une température élevée (environ 50 °C) sur la porosité et sur la résistance mécanique à la compression du béton.**

**IV.4.1 Introduction**

La résistance à la compression du béton est la propriété la plus importante qu'il faut prendre en compte. C'est elle qui permet son utilisation comme matériaux de construction. La résistance à la compression du béton est liée directement à la structure de la pâte de ciment hydraté. Le rapport E/C est le facteur le plus important qui influe la résistance à la compression du béton. Entre cette résistance et porosité existe une relation directe, le volume des vides dans un matériau affecte les propriétés de transfert et la résistance à la compression du béton. Presque toutes les propriétés du béton dépendent de la porosité, c'est le paramètre du premier ordre en ce qui concerne la durabilité de ce matériau [3,4].

Le climat chaud ainsi que l'élévation et la baisse et de température constituent des paramètres néfastes en ce qui concerne la durabilité des bétons. Dans la présente partie de l'étude, l'influence de ces paramètres est évaluée par l'évaluation de la porosité accessible à l'eau, de la résistance à la compression et de la perméabilité à l'eau sur des bétons conservés à l'air et les résultats obtenus sont comparés avec ceux des bétons qui ont été conservés à l'eau.

**IV.4.2. Composition des bétons**

Les essais de porosité et de résistance ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup>. Ces éprouvettes sont confectionnées par un ciment (CPJ – CEM II / B 42.5 N), un sable concassé et deux fractions de graviers (3/8) et (8/16). Deux types de béton (ferme et très plastique) ont été réalisés. Ces bétons sont obtenus par la variation du rapport (E/C). Ce rapport est déterminé par un rapport entre la quantité d'eau et le dosage en ciment utilisé. La conservation des éprouvettes est réalisée à l'eau à une température de 23 ± 1°C pendant 28 jours. D'autres éprouvettes des mêmes bétons ont été conservées à l'air libre pendant trois mois (saison de l'été).

Le tableau suivant représente les dosages en granulats, ciment et eau de gâchage pour les huit (8) bétons pour les différents essais.

N°	Types de béton	Ciment Kg/m <sup>3</sup>	Sable Kg/m <sup>3</sup>	Gravier 3/8 Kg/m <sup>3</sup>	Gravier 8/15 Kg/m <sup>3</sup>	Eau Kg/m <sup>3</sup>	E/C	Ouvrabilité
01	B1	300	757	392	775	196	0.65	Ferme
02	B2	300	718	366	736	217	0.72	Très plastique
03	B3	320	745	384	763	199	0.63	Ferme
04	B4	320	710	360	728	212	0.66	Très plastique
05	B5	340	738	379	758	205	0.60	Ferme
06	B6	340	702	356	720	222	0.65	Très plastique
07	B9	380	720	370	736	207	0.54	Ferme
08	B10	380	687	344	704	226	0.59	Très plastique

Tableau IV.11. Proportion de matériaux pour les différents types de bétons

### IV.4.3. Méthodes expérimentales

#### IV.4.3.1. Essai de résistance à la compression :

Les essais de compression sont réalisés suivant la norme (NF P 18-406) : l'essai consiste à soumettre l'éprouvette étudiée à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section de l'éprouvette. Le charge est effectuée à raison de 0.5 Mpa/s. l'appareil d'essai utilisé est de capacité de 3000 KN, cet appareil est disponible au laboratoire des Géomatériaux de l'université de M'sila.

#### IV.4.3.2. Écart type et dispersion des résultats :

Les résultats des essais de résistance de compression du béton présentent toujours une certaine dispersion même pour des éprouvettes réalisées au laboratoire. Une dispersion exagérée des résultats ne permet pas de juger de la qualité du béton d'une manière suffisante.

La dispersion des résultats peut provenir de la mise en œuvre des échantillons ou de la manipulation de l'essai. Cette dispersion augmente lorsque l'on passe du laboratoire au chantier ou elle peut atteindre 15 à 18 % sur une même gâchée. Si on passe d'une gâchée à l'autre, la dispersion augmente encore. On peut donner les écarts acceptés suivants [16] :

- Ecart entre les gâchées du même chantier : 20 à 25 %
- Ecart entre les cubes du même gâchée sur : 12 à 15 %
- Ecart entre les cubes du même gâchée au laboratoire : 5 à 6 %
- Ecart dû à l'essai proprement dit : 6 à 8 %

Les recherches montrent que non seulement la dispersion d'une gâchée à l'autre est importante, mais que, à la sortie d'une même bétonnière, la composition peut être variable d'un endroit à un autre ; ceci permet de contrôler l'efficacité d'une bétonnière, l'importance de l'ordre d'introduction des agrégats et du temps de malaxage [82].

La deuxième cause de dispersion réside dans le moulage des échantillons de béton destinés aux essais. Les conditions de vibration appliquées aux moules doivent être toujours constantes et déterminées en fréquence et en durée.

Pendant l'essai proprement dit. Il faut que les charges soient uniformément réparties sur les faces, les faces non planes influencent considérablement les résultats.

Un dernier problème qui est la mise en charge. Les résistances augmentent quand la vitesse de changement augmente. Il paraît donc nécessaire d'appliquer une vitesse de mise en charge uniforme en respectant les normes des essais.

La dispersion de la résistance autour de la moyenne est fonction de l'écart type. L'écart type est défini comme suit :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - m)^2}{n - 1}} \quad (4.6)$$

Où  $m$  : la moyenne arithmétique des résistances

$$m = \frac{\sum_i X_i}{n} = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (4.7)$$

L'écart type est exprimé dans les mêmes unités que Xi. Mais, pour des raisons pratiques, il est préférable d'exprimer la dispersion des résultats en pourcentage. On prend alors le rapport  $(\sigma/m) \times 100$ , qui est appelé coefficient de variation ou de dispersion.

#### IV.4.3.3. La porosité accessible à l'eau : Peau

Les essais de porosité accessible à l'eau sont réalisés selon la norme (NF EN 18-459). L'objectif de cet essai est la mesure du le pourcentage de vide connecté à la surface du béton. Le principe de l'essai est basé sur une série de pesées à l'air et hydrostatique des échantillons. On obtient alors :

- Pesée hydrostatique ( $M_{eau}$ )
- Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau ( $M_{air}$ )
- Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche ( $M_{sec}$ ).

Le séchage des éprouvettes est réalisé dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à obtenir une masse constante (la masse ne varie pas de plus de 0,05 % entre deux pesées espacées de 24h).

La porosité accessible à l'eau est calculée par la relation suivante :

$$Peau = \{(M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau})\} \times 100 \quad (4.8)$$

#### IV.4.4. Résultats obtenus

##### IV.4.4.1. Effet du mode de conservation sur la résistance à la compression

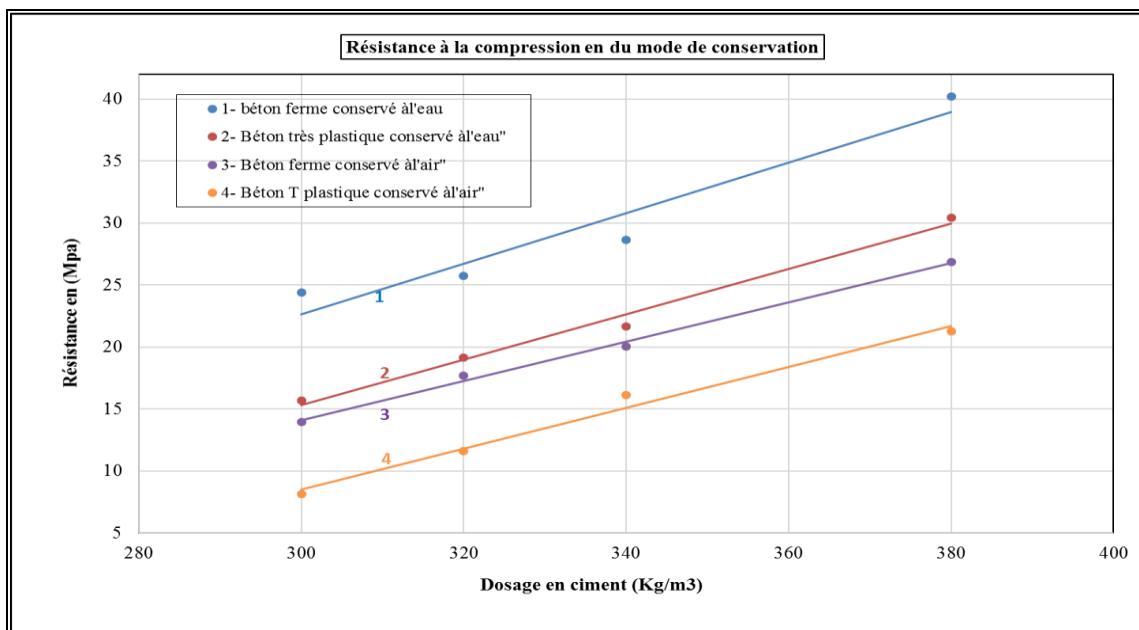


Figure IV.20 : Effet du mode de conservation et du dosage en ciment sur la résistance à la compression des bétons

Les courbes de la figure IV.20 présentent la résistance en compression en fonction du dosage en ciment. Ces courbes confirment les résultats déjà connus sur le rôle du dosage en ciment concernant la résistance à la compression du béton. En ce qui concerne l'influence du mode de conservation, on voit que les résistances à la compression des bétons qui ont subi une cure dans l'eau sont nettement supérieures par rapport aux bétons qui ont été conservés à l'air. Cela est lié à l'influence d'une haute température qui entraîne une accélération de prise et une hydratation plus rapide conduisant ainsi à une résistance plus faible suite à l'évaporation rapide de l'eau de gâchage dans le béton frais.

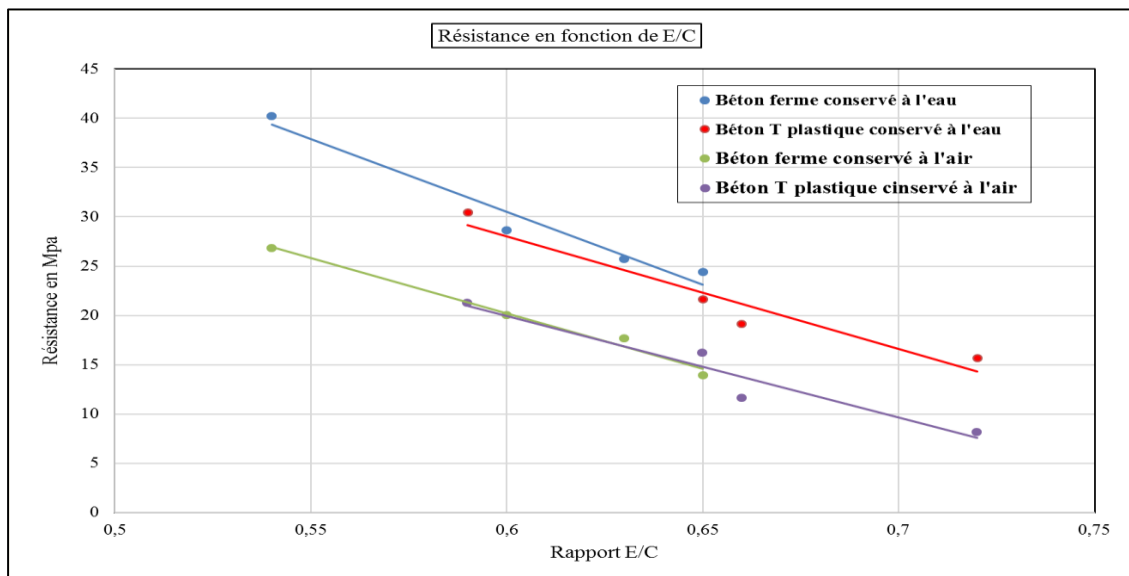


Figure IV.21 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression des bétons.

Dans la courbe IV.21, on remarque que la résistance à la compression diminue lorsque le rapport E/C augmente. La perte de résistance est directement liée à la perte d'une quantité d'eau de gâchage surtout dans le cas des bétons qui ont été conservés à l'air.

#### IV.4.4.2. Effet du rapport E/C sur la porosité

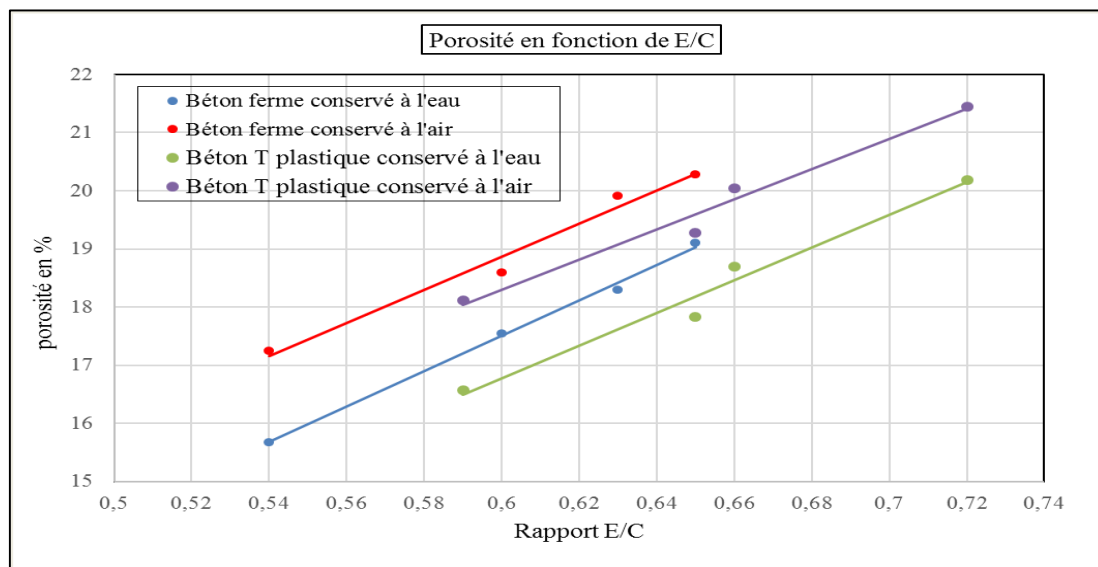


Figure IV.22 : Effet du rapport E/C sur la porosité des bétons

D'après les Coubes de la figure IV.22 ci-dessus, on constate qu'une augmentation du rapport E/C conduit à une porosité élevée. La porosité des bétons qui ont subi une cure dans l'eau est nettement inférieure à celle des bétons conservés à l'air. Cette réduction est liée à la quantité d'eau de gâchage qui entre en réaction pour produire les hydrates qui remplissent les vides initialement remplis d'eau et de grains de ciment anhydre.

**IV.4.4.3. Résistance à la compression en fonction de la porosité**

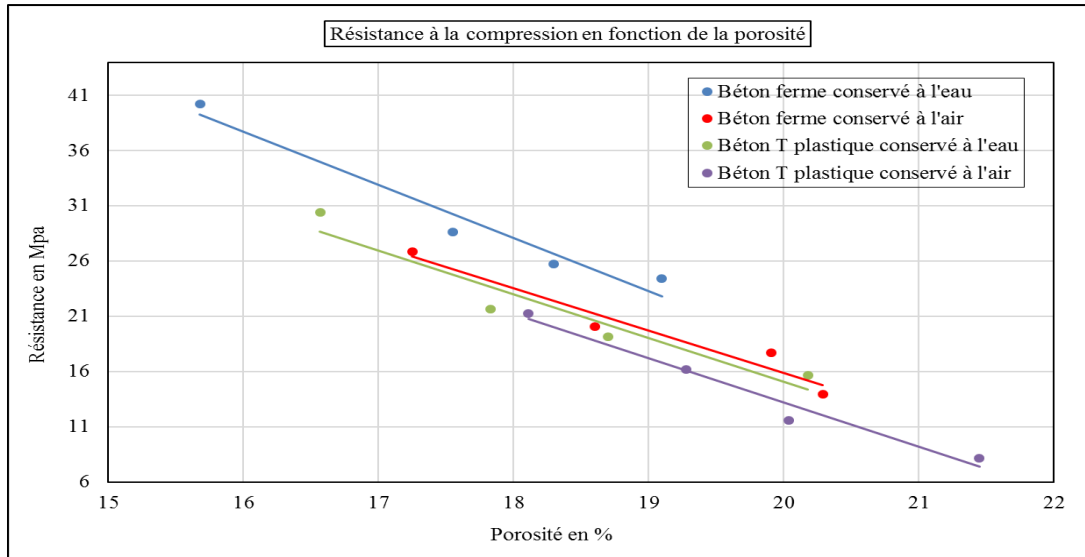


Figure IV.23 : Effet de la porosité sur la résistance à la compression des bétons

L'influence de la porosité de pâte de ciment, du mortier ou du béton sur la résistance à la compression, a fait l'objet de plusieurs recherches qui confirment que la résistance à la compression est fondamentalement dépendue du volume des vides qu'il comporte [4]. La figure IV.23 montre l'influence de la porosité accessible à l'eau sur la résistance à la compression : lorsque la porosité augmente, la résistance à la compression diminue.

**IV.4.4.4. Perméabilité à l'eau en fonction du rapport E/C**

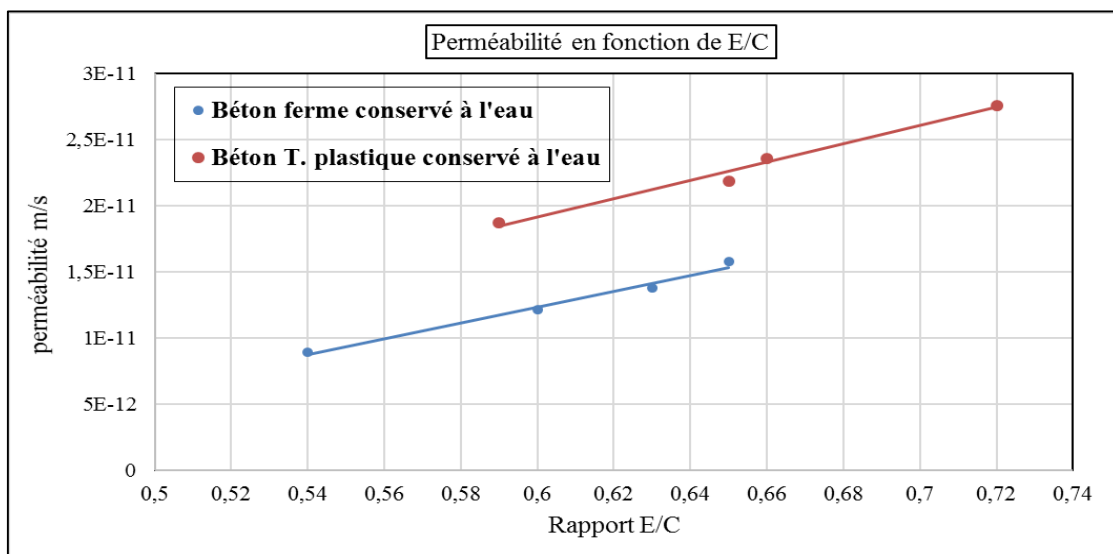


Figure IV.24 : Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'eau

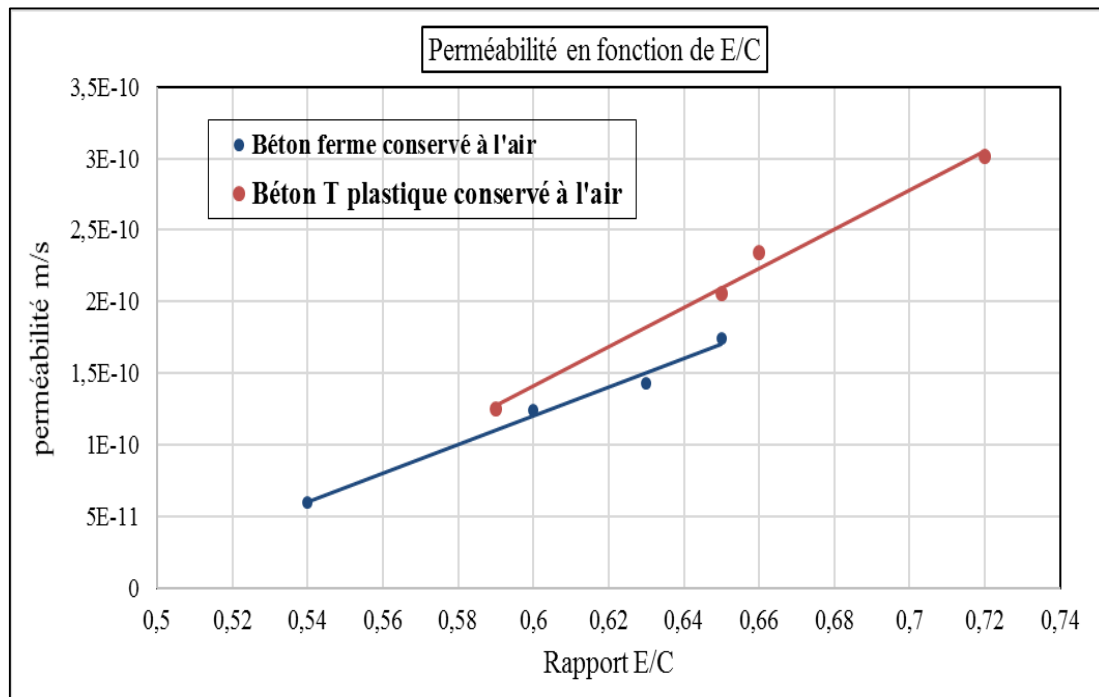


Figure IV.25 : Effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air

Les figures des figures IV.24 et IV.25 présentent l'influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau du béton. D'après ces courbes, on voit qu'un rapport E/C supérieur conduit à une perméabilité élevée.

IV.4.4.5. Effet de la porosité à l'eau sur la perméabilité à l'eau

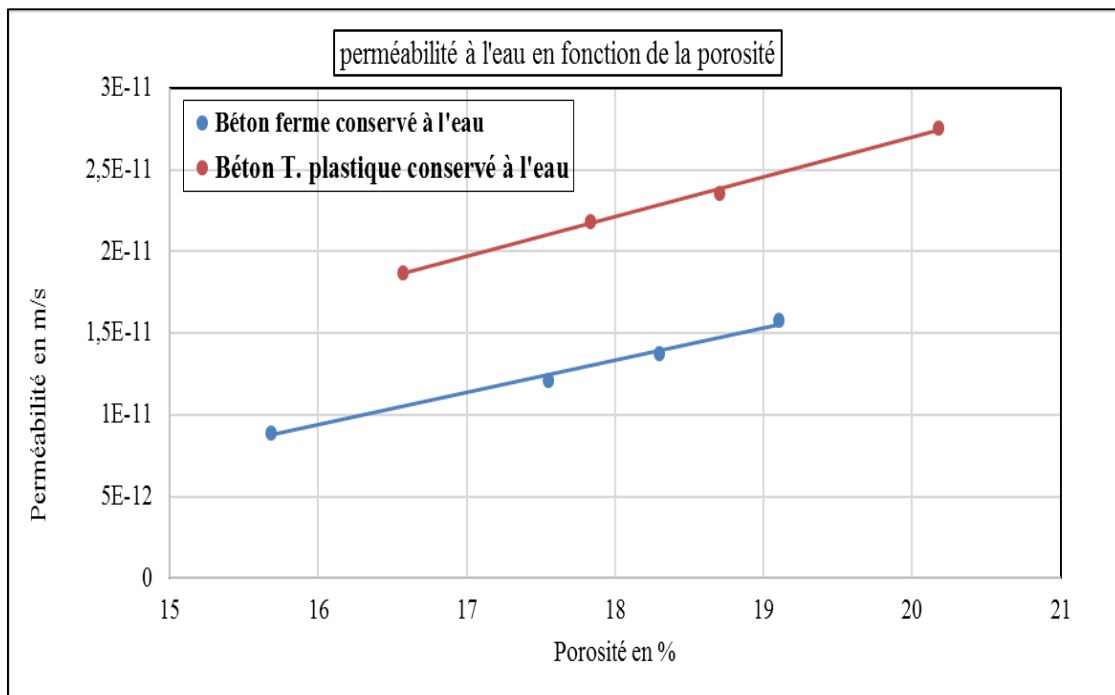


Figure IV.26 : Effet de la porosité sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'eau

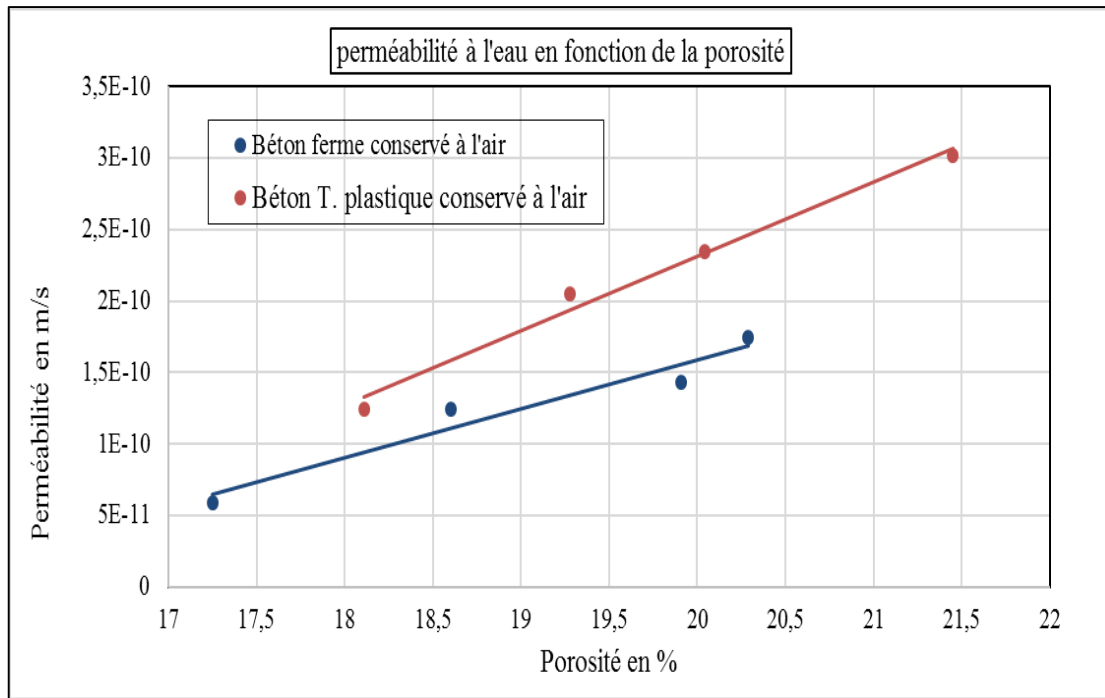


Figure IV.27 : Effet de la porosité sur la perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air

Les figures IV.26 et IV.27 présentent l'effet de la porosité sur la perméabilité à l'eau du béton. L'écoulement d'eau est contrôlé par la progression de l'hydratation qui occupe les espaces remplis initialement par l'eau de gâchage. Ainsi, la perméabilité dépend de la dimension, de la forme et de la concentration des particules de gel du fait que ces particules influent la présence et la continuité des pores capillaires dans le béton.

**IV.4.4.6. Effet de la perméabilité à l'eau sur la résistance à la compression**

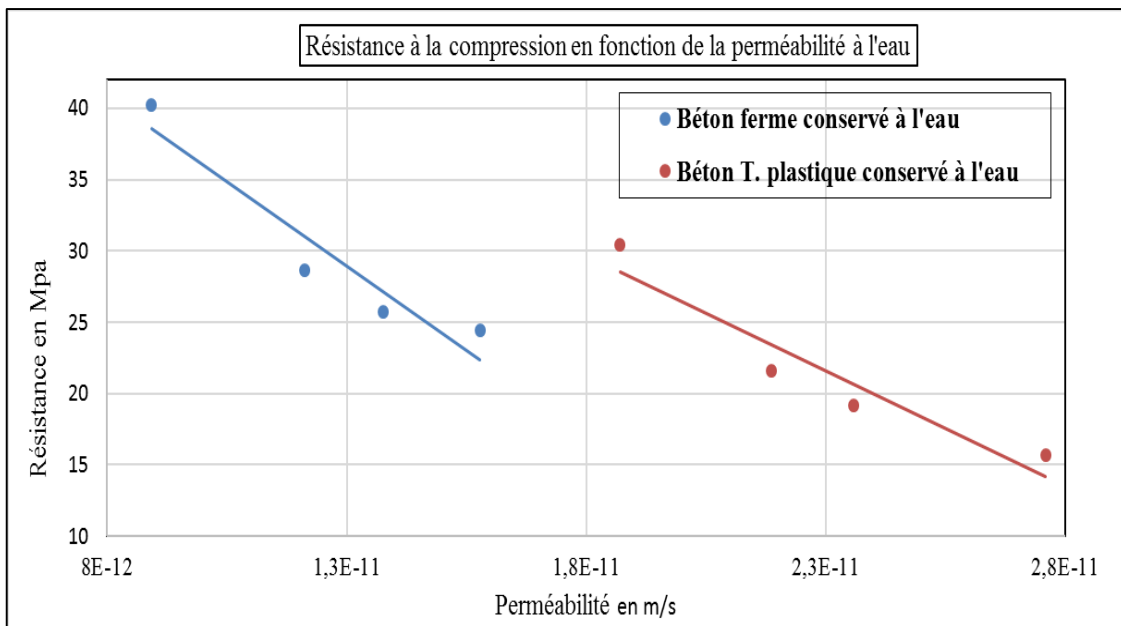


Figure IV.28 : Effet de la perméabilité à l'eau des sur la résistance à la compression des bétons conservés à l'eau

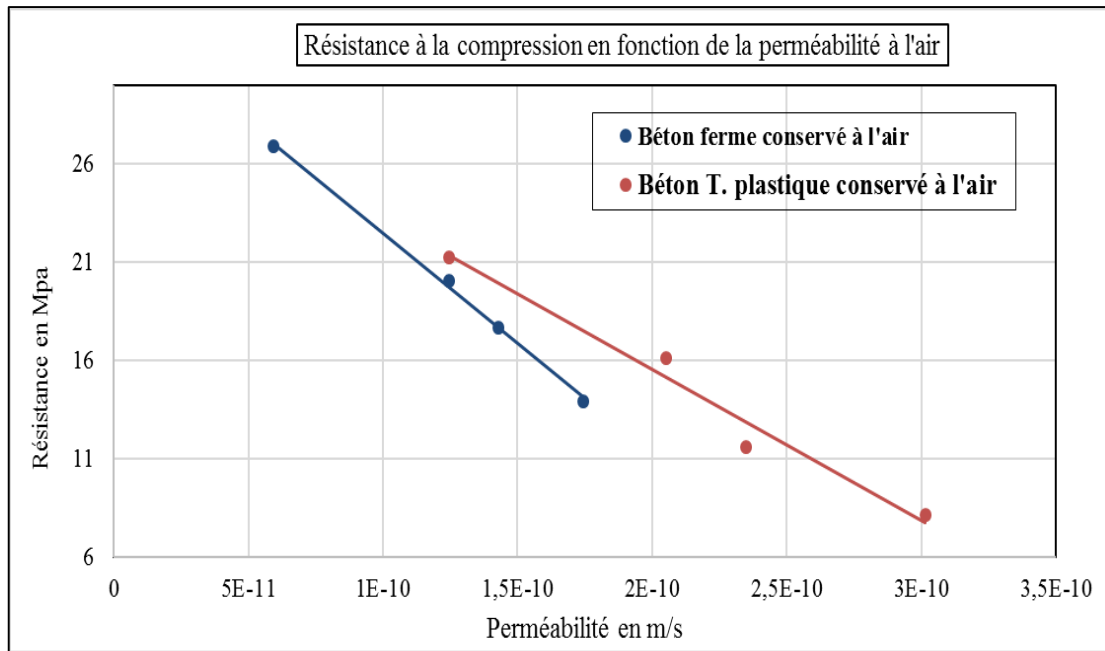


Figure IV.29 : Effet de la perméabilité à l'eau des sur la résistance à la compression  
Des bétons conservés à l'air

D'après les courbes des figures IV.28 et IV.29, on remarque que l'augmentation de la perméabilité conduit à une résistance à la compression faible. La perméabilité qui est liée à l'écoulement de l'eau dans la porosité capillaire interconnecté dans le béton. Cette porosité qui se trouve entre les particules de gel du ciment hydraté, affectent énormément la liaison et la cohésion de ces particules. Le gel est formé principalement par les C-S-H qui constituent la colle du béton. Ainsi, les fibres de C-S-H sont l'origine de la résistance mécanique du béton seront affectés par des pores capillaires interconnectés qui augmente la perméabilité du matériau et affaiblir sa résistance à la compression.

#### IV.4.5. Discussions des résultats obtenus.

Le volume de la porosité capillaire dépend de la formulation du matériau cimentaire. Le paramètre principal est le rapport E/C ; pour une quantité de ciment donnée, plus la quantité d'eau est grande, plus l'espace entre les grains de ciment est grand et plus la porosité capillaire est grande. Cette porosité capillaire affecte grandement les caractéristiques du gel du ciment hydraté ce qui influent la résistance du béton. Si ces pores capillaires sont interconnectés, ils influent énormément la perméabilité du béton.

L'hydratation du ciment est influée par le mode de cure du béton. L'espace occupé par le solide augmente au fur et à mesure que l'hydratation progresse et la porosité capillaire diminue. La quantité d'eau mise en jeu pendant le gâchage du béton affecte directement la porosité : si le rapport E/C est trop grand, il subsiste une porosité capillaire résiduelle même à hydratation complète surtout dans le cas d'une haute température qui entraîne une évaporation importante d'eau de gâchage provoquant ainsi un volume important de pores.

La plus grande partie de la matière hydratée de la pâte de ciment est constituée par les C-S-H qui constituent la colle entre les particules, principalement la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Les C-S-H sont la source de la résistance mécanique du béton. Si cette phase est affectée par la porosité capillaire, cela influent négativement la résistance et la perméabilité du béton.

## IV.5. Etude de l'influence des milieux agressifs (sulfates et acide) sur la perméabilité à l'eau du béton.

### IV.5.1 Introduction

La durabilité du béton est très souvent liée à la capacité de ce matériau à résister à l'intrusion des agents agressifs à travers sa porosité. Parmi les environnements agressifs qui peuvent provoquer des attaques acides ou sulfates, on peut citer les environnements marins, les milieux industriels et agricoles, les zones soumises au gel sans oublier l'effet du  $CO_2$  contenant dans l'air. Ces agents peuvent conduire à l'érosion, le gonflement ou à l'éclatement du béton. [4]

Les causes de dégradations de plusieurs ouvrages (barrages, ponts...) sont généralement dues à des réactions pathologiques principalement suite aux réactions des sulfates ou d'acides. Les sulfates sont présents naturellement dans les sols de plusieurs régions d'Algérie surtout dans les régions qui contiennent du gypse  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ . Les eaux souterraines, les eaux d'infiltration ainsi que les eaux des égouts d'assainissement peuvent aussi contenir les sulfates et les acides. [3]

L'objectif de cette étude est d'étudier l'effet de la conservation dans des solutions de sulfates et d'acides sur la perméabilité à l'eau du béton. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes en béton confectionnées à base de ciment CPJ, conservé dans des solutions de sulfate de magnésium, sulfate d'ammonium et d'acide sulfurique avec une concentration de 5%. En fin, comparaison des résultats obtenus avec ceux d'un béton conservé à l'eau.

### IV.5.2. Attaque du béton par les sulfates :

Le ciment est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux  $CaO$  avec les silicates  $SiO_2$ , l'alumine  $Al_2O_3$ , l'oxyde de fer  $Fe_2O_3$ . Après chauffage dans un four, on obtient les silicates bi- et tri- calciques ( $C_2S$  et  $C_3S$ ), les aluminates  $C_3A$  et les aluminoferrites de chaux  $C_4AF$ . La réaction de  $C_2S$  et  $C_3S$  avec l'eau donne le silicate de calcium hydraté C-S-H et de la portlandite  $Ca(OH)_2$ .

L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit entre les ions des sulfates et la portlandite dans la première phase. Le résultat de cette réaction est la formation du gypse secondaire en solution ou cristallisé dans les espaces libres de la pâte de ciment durcie.

En seconde phase, la réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment qui donne naissance à l'ettringite secondaire qui est nocive pour le béton en provoquant des gonflements.

Ainsi, les conséquences de l'attaque par les sulfates sont des fissurations multidirectionnelles provoquant une chute de résistance du béton due à une perte de cohésion de la pâte de ciment hydraté et à une désagrégation entre la pâte et les granulats. La dégradation s'effectue progressivement du parement vers le cœur des éléments, jusqu'à ce que le béton devienne friable. [2]

### IV.5.3 Sources des sulfates :

Les sels solides n'attaquent pas le béton, mais lorsque ces sels sont en solution peuvent réagir avec les hydrates du ciment. Les sols et les eaux souterraines peuvent contenir du sulfate de potassium, de sodium, de magnésium et de calcium. Les sulfates contenus dans les eaux

souterraines se réagissent non seulement avec la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , mais aussi avec les autres produits d'hydratation du ciment tel que le silicate de calcium hydraté C-S-H.

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution industrielle. Ils peuvent contenir du sulfate d'ammonium qui fait réaction avec les hydrates du ciment pour former du gypse secondaire. Certains sites industriels en particulier les usines qui fonctionnent au gaz peuvent contenir des substances agressives. Les sols peuvent contenir du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) avec des concentrations plus au moins élevées.

Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :

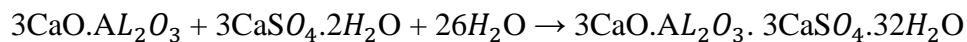
- contamination des granulats par du plâtre,
- granulats gypseux,
- sulfures dans certains granulats.

Dans les sols souterrains, les concentrations plus élevées en sulfates sont généralement dues à la présence de sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ) ou de sulfates alcalins ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ - $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Les sulfates d'ammonium ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) se retrouvent fréquemment dans les sols et les eaux en milieux agraires. [3,4,83]

#### IV.5.4 Mécanisme d'attaque du béton par les sulfates :

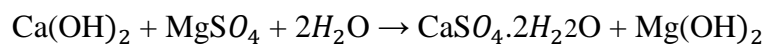
\* L'attaque par le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{CaSO}_4$  dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Le sulfate de calcium n'attaque que l'aluminate de calcium hydraté ( $\text{C}_3\text{A}$ ) pour former de l'ettringite expansive  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . Le nombre de molécules d'eau peut être de 32 ou de 31 selon la pression de vapeur ambiante.

La réaction de  $\text{C}_3\text{A}$  avec le gypse est représenté ci-dessous

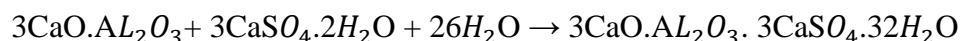


\* Le sulfate de magnésium est très agressif (double action). En premier lieu, il y a formation du gypse secondaire cristallisé et précipitation de la brucite  $\text{Mg(OH)}_2$ . Ce gypse secondaire réagit avec le  $\text{C}_3\text{A}$  pour former l'ettringite expansive. En second lieu, réaction du  $\text{MgSO}_4$  avec les C-S-H pour former le silicate de magnésium hydraté (Mg-S-H). Ce produit n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente.

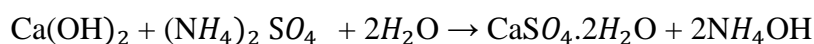
- La portlandite réagit avec  $\text{MgSO}_4$  pour donner du gypse et de la brucite



- Le gypse réagit avec le  $\text{C}_3\text{A}$  ou les aluminates hydratés du liant pour former de l'ettringite secondaire ou expansive



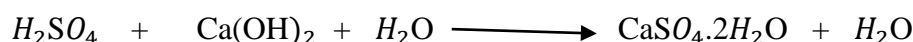
\* La réaction du sulfate d'ammonium avec la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  et les C-S-H conduit à former du gypse qui réagit à son tour avec les aluminates en donnant de l'ettringite expansive. [3,22]. La réaction de base peut s'écrire :



#### IV.5.5 Attaque du béton par les acides :

Les milieux acides qui peuvent être agressifs pour le béton sont constitués des eaux pures, eaux douces chargées dioxyde de carbone, les eaux de pluie acides, les acides minéraux et organiques.

Dans les tuyaux d'égouts, la décomposition de certaines bactéries anaérobies peut conduire à la formation du gaz  $H_2S$ . Au contact avec l'air, le  $H_2S$  s'oxyde et se transforme en acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui, à son tour, attaque les hydrates, particulièrement la portlandite  $Ca(OH)_2$  pour former du gypse. La réaction du gypse secondaire avec les aluminates formera l'ettringite secondaire ou expansive causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte [83]. La réaction du béton avec les composés du ciment est comme suite :



La réaction du gypse avec les aluminates de calcium hydraté ( $C_3A$ ) donne naissance à l'ettringite expansive.

#### IV.5.6. Méthodologie expérimentale :

##### IV.5.6.1. Composition des bétons :

Des éprouvettes cylindriques creuses ont été confectionnées en utilisant un béton plastique, le dosage en ciment est de  $360 \text{ Kg/m}^3$ .

N°	Types de béton	Ciment $\text{Kg/m}^3$	Sable $\text{Kg/m}^3$	Gravier 3/8 $\text{Kg/m}^3$	Gravier 8/15 $\text{Kg/m}^3$	Eau $\text{Kg/m}^3$	E/C	Classe d'ouvrabilité
								Béton classe S2
01	B7	360	726	376	744	203	0.56	x

Tableau IV.12. Proportion de matériaux pour les différents types de bétons

##### IV.5.6.2. Cure du béton :

La durée de cure est un facteur très important pour la durabilité. Après 24 heures du coulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  pendant 28 jours.

Après la durée de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse des échantillons de béton avant leur mise dans les solutions agressives (acides ou sulfates) pendant 28 jours.

##### IV.5.6.3. Milieux agressifs de traitement :

les éprouvettes ont été conservées dans trois milieux agressifs avec une concentration de 5%: d'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , de sulfate de magnésium  $MgSO_4$  et de sulfate d'ammonium  $(NH_4)_2 SO_4$ . L'étude consiste à une évaluation des coefficients de perméabilité à l'eau pour les

trois milieux de conservation et comparaison des résultats avec un béton qui a subi une cure standard dans l'eau.

Les concentrations sont choisies souvent dans la littérature. L'utilisation de faibles concentrations de solution agressives demanderait beaucoup de temps de conservation, c'est pourquoi le choix s'est porté sur celle de 5% qui représente le seuil maximal pour un milieu très agressif. La durée de conservation était de 28 jours.

Le PH de la solution d'agressivité est contrôlé chaque semaine pour garder ce PH constant pendant la durée de conservation.

milieux de conservation	Concentration	Nombre d'éprouvettes
Eau	/	03
Acide sulfurique $H_2SO_4$	5 %	03
Sulfate d'ammonium $(NH_4)_2 SO_4$	5 %	03
Sulfate de magnésium $MgSO_4$	5 %	03

Tableau IV.13 : Milieux agressifs de conservation

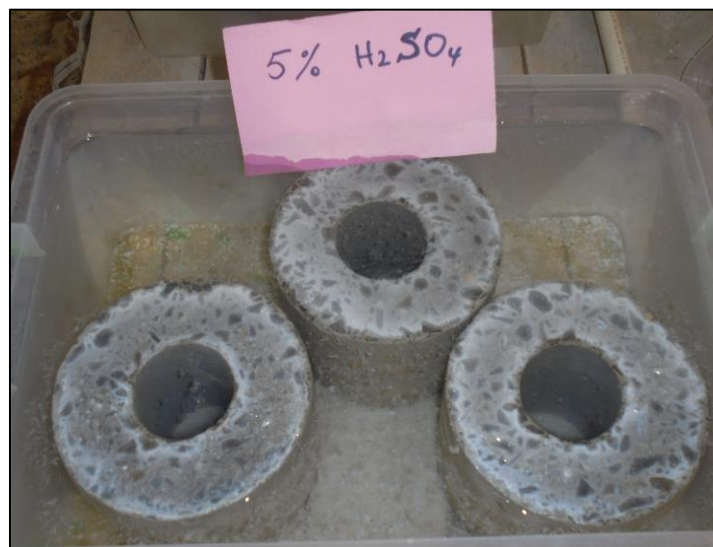


Figure IV.30 : Bétons conservés dans la solution acide 5% de  $H_2SO_4$



Figure IV.31: Dégradation des surfaces des éprouvettes sous l'effet de  $H_2SO_4$



Figure IV.32 : Bétons conservés dans la solution acide 5% de  $(NH_4)_2 SO_4$ .



Figure IV.33 : Bétons conservés dans la solution acide 5% de  $MgSO_4$

**IV.5.6.4. Evaluation de la résistance du béton aux agressions chimiques :**

**a/ Evaluation de la perte de masse**

La résistance aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans les solutions acides est évaluée selon la norme ASTM C 267 en mesurant la perte de masse [84].

L'évaluation s'effectuera en mesurant la perte de masse des échantillons par la formule suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1 - M2) / M1] \times 100 \quad (4.9)$$

Où : M1 est la masse de l'éprouvette avant immersion.

M2 est la masse de l'éprouvette nettoyée et séchée après immersion.

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau de robinet pour éliminer le béton altéré et laisser sécher pendant 30 mn. Après cette durée, une pesée est enregistrée. La balance utilisée set d'une précision 0,01 gr.

**1/ Eprouvettes conservées dans  $H_2SO_4$  :**

Nº	Masse M1 (g)	Masse M2 (g)	Perte de masse (%)	Moy	Ecart type	% de dispersion
EP1	5780	5723	0,99	0,91	0,08	8,44
EP2	5766	5718	0,83			
EP3	5725,5	5673	0,92			

Tableau IV.14 : perte de masse des échantillons conservés dans  $H_2SO_4$

**2/ Eprouvettes conservées dans  $MgSO_4$  :**

Nº	Masse M1 (g)	Masse M2 (g)	Gain de masse (%)	Moy	Ecart type	% de dispersion
EP1	5753,5	5766	0,22	0,21	0,02	8,64
EP2	5715	5726	0,19			
EP3	5692	5705	0,23			

Tableau IV.15 : Gain de masse des échantillons conservés dans  $MgSO_4$

**3/ Eprouvettes conservées dans  $(NH_4)_2 SO_4$  :**

Nº	Masse M1 (g)	Masse M2 (g)	Gain de masse (%)	Moy	Ecart type	% de dispersion
EP1	5753,5	5772	0,32	0,34	0,03	8,75
EP2	5714,5	5736	0,38			
EP3	5641,5	5660	0,33			

Tableau IV.16 : Gain de masse des échantillons conservés dans  $(NH_4)_2 SO_4$

Avec :

M1 : Pesée après 28 jours de conservation des éprouvettes dans l'eau et avant leur mise en place dans les solutions agressives.

M2 : Pesée après 28 jours de conservation dans les solutions agressives.

**b/ Examen visuel des échantillons:**

L'examen visuel des échantillons de béton qui ont subi des attaques chimiques avec les différents agents agressifs dans la présente étude, est un moyen pour évaluer la détérioration physique et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes et de comparer les résultats obtenus.

L'état des échantillons après conservation dans la solution acide sulfurique pendant 28 jours, est caractérisé en première vue par une dégradation de la surface externe des échantillons et une réduction dans le volume en comparaison avec des échantillons conservés dans de l'eau, figure IV.31. Ces échantillons forment une couche blanchâtre sur la surface extérieure. Il s'agit du dépôt du gypse secondaire, qui résulte de la réaction entre la portlandite et la solution d'attaque (5%  $H_2SO_4$ ). En plus de la réaction avec la portlandite, l'acide sulfurique décompose la matrice cimentaire par la décalcification du silicate de calcium hydraté [C-S-H], ce qui contribue ainsi à la perte en masse des échantillons immergés dans ce type d'acide et donc une réduction de forme déjà observée.

En ce qui concerne l'effet des solutions du sulfate d'ammonium et du sulfate de magnésium sur les échantillons de béton. On observe la présence d'une couche blanche légère sur la surface externe des éprouvettes qui est le résultat du dépôt du gypse secondaire. Cependant l'état externe de ces échantillons n'a pas subi de dégradation en comparant avec le cas de l'acide sulfurique. On pense que le gain de masse obtenu dans le cas du sulfate d'ammonium et du sulfate de magnésium est attribué à la présence du gypse à la surface des éprouvettes et dans les pores de la peau du béton. D'après les travaux de Tian et al [94] qui ont montré que des échantillons de ciment mis en contact avec des sulfates, présentés de la précipitation du gypse et des gonflements suite à la réaction du gypse à long terme avec les hydrates du ciment.

**c/ Evaluation de la perméabilité à l'eau des échantillons dégradés:**

Les essais de perméabilité à l'eau ont été réalisés sur les trois types de bétons conservés dans les solutions agressives. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux d'un béton qui a subi une cure standard dans l'eau pendant 28 jours. Les résultats représentés dans les courbes ci –après montrent l'influence de la conservation dans un milieu agressif sur la perméabilité à l'eau du béton.

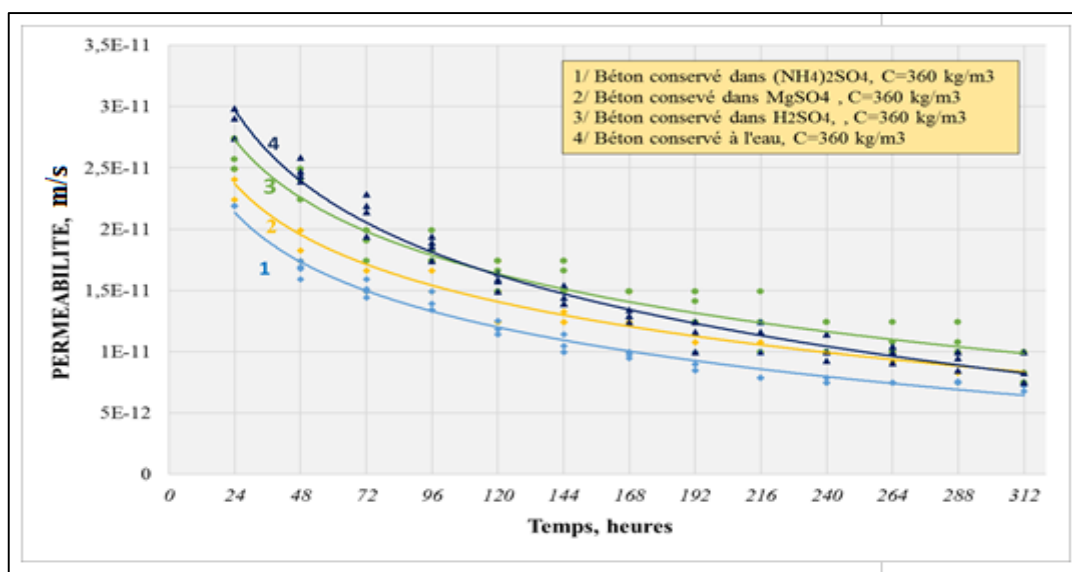


Figure IV.34 : Coefficient de perméabilité à l'eau en fonction du temps

La figure IV.34 présente l'allure des courbes de perméabilité à l'eau en fonction du temps des échantillons de bétons conservés dans l'acide sulfurique, le sulfate de magnésium et d'ammonium et en fin dans l'eau. D'après ces courbes, on remarque que les bétons conservés dans les différentes solutions agressives étaient légèrement moins perméables qu'un béton conservé à l'eau pendant les premiers jours. Après cette durée initiale, la perméabilité des différents bétons devient de plus en plus stable. C'est-à-dire en allant de la peau vers le cœur du béton non dégradé, la perméabilité devient de plus en plus stable.

On pense que cette réduction de perméabilité dans les premiers jours de l'essai est attribuée à la précipitation du gypse secondaire dans les couches de surface des échantillons et dans les pores de la peau du béton. Ce gypse qui se forme suite à la réaction de la portlandite et à la décalcification progressive des C-S-H sous l'effet des solutions agressives. Cette précipitation du gypse colmate les micros fissures qui existe normalement dans la peau du béton. Ce gypse est la première phase produite suite à l'attaque du béton par les acides et les sulfates, la deuxième phase qui se produit à long terme est la réaction de ce gypse avec les autres composés du ciment et principalement le  $C_3A$  pour produire des composés expansifs nocifs pour le béton (ettringite).

En autre terme, la peau du béton constituée par sa surface, est poreux ce qui favorise la pénétration des agents extérieurs au cœur du béton. La formation du gypse au premier stade des attaques chimiques est caractérisée par une couche blanche à la surface et dans les pores de surface des échantillons. Cette couche agit à court terme comme une couche protectrice qui favorise la défense du béton contre la pénétration des agents agressifs. Cependant, à long terme, la réaction de ce gypse avec les aluminates du ciment forme l'ettringite expansive qui accroît la porosité et conduit à une chute de résistance, une augmentation considérable de la perméabilité et finalement à la dégradation totale du béton.

En ce qui concerne la procédure de mesure de la perméabilité. Cette thèse propose une nouvelle méthode expérimentale pour mesurer la perméabilité à l'eau des bétons. Elle est basée sur l'écoulement transversal de l'eau sous pression à travers les parois d'un l'échantillon cylindrique creux de l'intérieur de l'éprouvette vers l'extérieur. L'éprouvette ne subit aucune pression axiale. Cependant, le système manuel de fixation de l'appareil assure le maintien de l'éprouvette et garantit avec les joints en silicone l'étanchéité contre la fuite d'eau.

Les essais de perméabilité ont été réalisés sur plusieurs types de bétons de rapport E/C variables. Les résultats obtenus montrent l'écart et la sensibilité des valeurs du débit d'écoulement en fonction du rapport E/C. les valeurs sont comparables à d'autres travaux de recherche dans le domaine [49,50]. Ces résultats nous permettent d'admettre que la procédure proposée peut être adoptée comme un système d'évaluation de la perméabilité à l'eau des bétons. On estime que la présente méthode proposée est plus fiable et plus sensible que la méthode d'écoulement axial classique.

#### IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié dans la première partie l'influence du rapport E/C et du mode de conservation sur la porosité, la résistance à la compression et sur la perméabilité à l'eau du béton. Dans la deuxième partie, l'étude comporte l'influence de la conservation du béton dans des solutions d'acide et de sulfates sur la perméabilité à l'eau du béton.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que :

- ❖ La perméabilité à l'eau du béton diminue lorsque le rapport E/C décroît.
- ❖ Lorsque le dosage en ciment augmente, la perméabilité à l'eau diminue.
- ❖ Le mode de conservation influe considérablement la perméabilité à l'eau du béton : la perméabilité des bétons conservés à l'air était d'environ onze (11) fois supérieures à celle des bétons qui ont été conservés à l'eau.
- ❖ La résistance à la compression et accessible à l'eau des bétons qui ont subi une cure dans l'eau sont supérieures par rapport aux bétons qui ont été conservés à l'air
- ❖ Une augmentation de la perméabilité à l'eau conduit à une résistance à la compression faible.
- ❖ L'état des échantillons conservés dans les différentes solutions agressives présente une couche blanche de gypse sur la surface externe.
- ❖ L'état des échantillons après conservation dans la solution acide sulfurique pendant 28 jours, est caractérisé en première vue par une dégradation de la partie en contact avec la solution d'acide.
- ❖ La formation du gypse secondaire au premier stade des attaques chimiques est caractérisée par une couche blanche à la surface et dans les pores de la peau des échantillons. Cette couche agit à court terme comme une couche protectrice qui favorise la défense du béton contre la pénétration des agents agressifs, mais à long terme, la réaction de ce gypse avec le  $C_3A$  produit de l'ettringite expansive qui conduit à la détérioration du béton et à une perméabilité élevée.

## ***Conclusion générale***

## CONCLUSION GENERALE

Chaque structure en béton doit conserver ces qualités et continuer de remplir ces fonctions au cours du temps. La détérioration des bétons résulte de facteurs externes ou de facteurs internes au béton. Les actions sur le béton peuvent être mécaniques, chimiques ou physiques. À l'exception des sollicitations mécaniques, tous les effets néfastes associés à la durabilité font intervenir l'écoulement d'un fluide (liquide ou gaz) à travers le béton.

La perméabilité à l'eau du béton est un indicateur général de durabilité. C'est un paramètre qui apparaît comme fondamental dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation. Il est important alors de quantifier ce paramètre à partir d'essais de laboratoire réalisés sur des éprouvettes ou sur des prélèvements selon des modes opératoires bien définis.

Les pores capillaires existent normalement dans une pâte de ciment à n'importe quel stade de l'hydratation. Cette porosité capillaire de la pâte dépend à la fois du rapport E/C et du degré d'hydratation. Ces pores capillaires de forme variée sont de l'ordre de 1.3  $\mu\text{m}$ . S'ils sont interconnectés, ils sont principalement la cause de la perméabilité du béton. La porosité capillaire interconnectée permet la pénétration des agents agressifs extérieurs provoquant ainsi la dégradation du béton. La connectivité de ces pores diminue au fur et à mesure de l'hydratation se poursuivra et les hydrates développés sont susceptibles de boucher les entrées des pores. Ainsi, la perméabilité du béton est sa capacité d'être traversé par des fluides sous un gradient de pression est liée au processus et à l'avancement d'hydratation du ciment. Les pores interconnectés provoquent une augmentation de la perméabilité en facilitant la pénétration d'agent agressif. En conséquence, la durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquide et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton.

Les essais de perméabilité à l'eau du béton n'ont généralement pas été normalisés. De nombreuses méthodes d'essais permettant de déterminer la perméabilité à l'eau du béton ont été proposées. Dans ces essais tels qu'ils sont utilisés, le débit de l'écoulement sous l'influence d'une pression appliquée est mesuré. Ainsi, le coefficient de perméabilité K est calculé à partir de la loi de Darcy. Afin de mesurer la perméabilité des matériaux cimentaires, il est nécessaire d'utiliser une méthode souple, assez simple à appliquer, d'un temps de mesure court et avec une haute précision.

La durée de vie d'une structure en béton est très souvent liée à sa capacité à empêcher agents agressifs extérieurs à infiltrer dans sa porosité. La capacité d'un béton à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par sa perméabilité. Parmi les environnements les plus agressifs pour le béton qui peuvent occasionner des attaques acides ou sulfatique importantes, des gonflements et l'éclatement du béton, on peut citer les environnements marins et les environnements chimiques en particulier dans les milieux industriels et agricoles. Suite aux attaques du béton par des solutions agressives, une dissolution des hydrates accompagne ou non de la précipitation de nouveaux composés, se produit. Le phénomène de dissolution des hydrates et de la précipitation de nouveaux produits peuvent conduire à des dégradations. Ces dégradations peuvent être parfois surfacique et dans d'autres cas plus profonds de sorte qu'ils mettent en danger l'état de l'ouvrage.

Ce travail de thèse a été consacré à l'évaluation de la perméabilité à l'eau sous conditions climatiques et chimiques préjudiciables. Les conditions climatiques sont caractérisées par une température élevée et un climat sec. Tandis que, les conditions chimiques concernent l'influence des acides et des sulfates sur la perméabilité à l'eau du béton. La première partie de ce travail est consacrée à l'étude de la perméabilité à l'eau alors que la deuxième partie est destinée à l'étude

de la porosité et la résistance à la compression. Ces bétons sont confectionnés avec un rapport E/C variable. Ils ont eu un mode de conservation dans l'eau pendant 28 jours et à l'air libre pendant la saison de l'été (trois mois) sous une température allant jusqu'à 50°C. Dans la troisième partie, des échantillons de bétons ont été conservés dans des solutions d'acides et de sulfates dont le but d'évaluer l'influence de ces agents agressifs sur la perméabilité à l'eau du béton et comparaison des résultats obtenus avec ceux d'un béton qui a reçu une cure standard dans l'eau pendant 28 jours.

Dans le but d'évaluer le coefficient de perméabilité à l'eau du béton, on propose une nouvelle méthode expérimentale basée sur l'écoulement latéral du liquide à travers un échantillon creux sous l'effet de la pression appliquée. Les essais réalisés sur plusieurs types de béton ont permis de déduire les remarques suivantes :

- D'après les coefficients de perméabilité à l'eau obtenus pour les bétons étudiés. Les valeurs trouvées sont comparables à ceux d'autres études malgré certaines variations. Ces variations sont causées principalement par le type de ciment, la forme de l'échantillon et aux conditions d'essais.

- La perméabilité à l'eau diminue avec le rapport E/C décroissant. En général, on s'attend à ce que la porosité capillaire totale du béton diminue lorsque son rapport E/C est réduit. La diminution de la porosité capillaire composée d'un grand nombre de pores connectés, conduit à une réduction des voies dans le béton durci. Ceci est traduit par une perméabilité réduite.

- Lorsque le dosage en ciment de la pâte augmente c'est-à-dire que le rapport E/C diminue. Ce dosage influe d'une manière significative sur la perméabilité à l'eau du béton. Pendant l'hydratation, le volume des hydrates augmente suite à la réaction des phases primaires composés de ciment anhydre et eau. Les espaces inter granulaires initialement remplis d'eau de gâchage se combleront et la porosité diminue [8]. Ainsi, l'écoulement de l'eau dans le béton est contrôlé par les grains de ciment anhydres et par la quantité d'eau de gâchage.

- La perméabilité à l'eau des bétons conservés à l'air est nettement supérieure à ceux qui ont subi une cure dans l'eau. D'après les résultats obtenus sur ces courbes, la perméabilité des bétons conservés à l'air était d'environ onze (11) fois supérieures à celle des bétons qui ont été conservés à l'eau.

- La résistance à la compression et porosité des bétons qui ont subi une cure dans l'eau sont clairement inférieures à celle des bétons conservés à l'air.

- Les échantillons conservés dans la solution acide sulfurique sont caractérisés par une dégradation de la surface externe et une réduction dans le volume en comparaison avec des échantillons conservés dans de l'eau. Cependant l'état externe des échantillons qui ont été conservés dans sulfate d'ammonium et du sulfate de magnésium, n'ont pas subi de dégradation en comparant avec le cas de l'acide sulfurique.

- Le coefficient de perméabilité à l'eau diminue avec le temps. Cette diminution est attribuée à la partie externe du béton, appelée béton de peau. C'est la partie la plus sensible, car le séchage y est plus rapide et elle est plus poreuse que le cœur du béton. Ceci peut être dû à un rapport E/C localement plus élevé ou à des conditions d'hydratation moins favorables que le cœur du béton.

- Les bétons conservés dans les différentes solutions agressives étaient moins perméables qu'un béton conservé à l'eau pendant les premiers jours. Après cette durée initiale, la perméabilité des différents bétons devient de plus en plus stable. Cette réduction de perméabilité dans les premiers jours de l'essai est attribuée à la précipitation du gypse dans les couches de surface des échantillons et dans les pores de la peau du béton.

## ***Références bibliographiques***

## Références bibliographiques

[1]	V.S. Ramachandran, Ralph M. Paroli, James J. Beaudoin, and Ana H. Handbook of thermal analysis of construction materials, Institute for Research in Construction, Canada, 2002. ISBN 0-8155-1487-5
[2]	C. L. Page, M. M. Page. Durability of concrete and cement composites, CRC Press Boca Raton Boston New York Washington, DC, 2007. ISBN 978-0-8493-9129-3
[3]	Baron J, Ollivier JP. La durabilité des bétons, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, in French, Paris, 1992. ISBN : 2-85978-184-6.
[4]	Neville AM. Properties of concrete, Edition Eyrolles, 4th ed. Longman Group Limited, England, 2000. ISBN : 2-212-01320-5.
[5]	A.Vichot, J. P. Ollivier. La durabilité des bétons, Presses ENPC, 2008. ISBN : 978-2-85978-34-8.
[6]	The durability of concrete, the permeabilities. <a href="http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2_2.pdf">http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2_2.pdf</a> (accessed 10.06.17)
[7]	MEHTA P.K., MANMOHAN D. Pore size distribution and permeability of hardened cement paste. 7e Congrès international de la Chimie des ciments, Paris, 3, 7.1, 1980, p. 1-11.
[8]	BENTZ D.P., GARBOCZI E.J. – “Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model”. Cement and Concrete Research, vol. 21, 1991, p. 325-344.
[9]	POWERS T.C. – “Capillary continuity or discontinuity in cement pastes”. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, 1, 2, 1959, p. 38-48.
[10]	Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, Toulouse, 11-12 décembre 1997.
[11]	UNDERWOOD E.E. – Quantitative stereology. Reading (MA), Addison-Mesley publishing company, 1968.
[12]	SCRIVENER K.L., BENTUR A., PRATT P.L. – “Quantitative characterisation of the transition zone in high-strength concrete”. Advances in Cement Research., vol. 1, n° 4, 1988, p. 230-237.
[13]	BAROGHEL-BOUNY V. – « La durabilité des BHP ». Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses des Ponts et Chaussées, 2005.
[14]	AFGC-RGCU – « Modes opératoires recommandés par GranDuBé ». Gran- DuBé, Grandeurs associées à la durabilité des bétons, ss la dir. de G. Arliguie et H. Hornain, Presses des Ponts et Chaussées, 2007.
[15]	BAROGHEL-BOUNY V., AMMOUCHE A., HORNAIN H. – « Matrices cimentaires. Analyse de la microstructure et propriétés de transfert ». Revue française de génie civil, vol. 5, n°s 2-3, 2001.
[16]	GALLÉ C. – “Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying”. Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 10, 2001, p. 1467-1477.
[17]	POWERS T.C, COPELAND L.E., HAYES J.C., MANN H.M. – “Permeability of Portland cement paste”. J. Amer. Concr. Inst., 51, 3, 1954, p. 285-298.
[18]	DHIR R.K., HEWLETT P.C., CHAN Y.N. – “Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability”. Mag. Concr. Res., 41, 147, 1989, p. 87-97.
[19]	LOBET A.– Influence des paramètres de composition des matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert. Thèse de doctorat INSA Toulouse, 2003.
[20]	POWERS T.C. – “Structure and physical properties of hardened Portland cement paste”. J. Amer. Ceram. Soc., 41, 1958, p. 1-6

## Références bibliographiques

[21]	Armaghani, J. M; Romano, D. C. et Larsen, T. J. Strength and Durability of Concrete in Florida. Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, Montreal, 1991, V.M. Malhotra Editor, pp. 723-748.
[22]	The durability of concrete, the permeabilities. <a href="http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2_2.pdf">http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/Chap2_2.pdf</a> (accessed 10.06.17).
[23]	H.J.Gilky. Water/cement ratio versus strength. <i>Concr.inst</i> , part 2, 58, pp. 1881-78 (Dec 1961)
[24]	T.C.Powers. The physical structure and engineering properties of concrete, <i>Portl. Cem.Res Dept. Bull.90</i> (chicago, july 1958)
[25]	R.Sersale, R.Cioffi, G.Frigione and F.Zenone. Relationship between gypsum content, porosity, and strength of cement, <i>Cement and Concrete Research</i> , 21, n 2, pp. 120-6 (1991).
[26]	Mohr P, Hansen W, Jensen E, Pane I. The influence Transport properties of concrete pavements with excellent long-term in-service performance. <i>CCR 2000</i> ; 30:1903–910.
[27]	Shamsad Ahmad. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. <i>Cem Concr Compo 2003</i> ; 25:459–471.
[28]	Galle C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. <i>Cem Concr Res 2001</i> ; 31:1467–477.
[29]	Faucon P, Adenot F, Jacquinet JF, Petit JC, Cabrillac R, Jorda M. Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physico-chemical mechanisms of water degradation. <i>Cem Concr Res 1998</i> ;28(6):847–57.
[30]	Dewaele PJ, Reardon EJ, Dayal R. Permeability and porosity changes associated with cement grout carbonation. <i>Cem Concr Res 1991</i> ;21(4):441–54.
[31]	Picandet V, Rangeard D, Perrot A, Lecompte T. Permeability measurement of fresh cement paste. <i>Cem Concr Res 2011</i> ;41(3):330–8.
[32]	Phung Quoc Tri, Maes Norbert, Schutter Geert De, Jacques Diederik, Ye Guang.Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method. <i>Constr Build Mater 2013</i> ; 47:1888–96.
[33]	Ludirdja D, Berger RL, Young JF. Simple method for measuring water permeability of concrete. <i>ACI Mater J 1989</i> ;86(5):433–9.
[34]	Vichit-Vadakan W, Scherer GW. Measuring permeability of rigid materials by a beam-bending method: III, cement paste. <i>J Am Ceram Soc 2002</i> ;85(6):1537–44.
[35]	FRANÇOIS DE LARRARD, « Structure granulaires et formulation des bétons », Document publié par le LCPC, ISBN 2-7208-2006-8,Avril 2000 , pp 320, 380
[36]	BANTHIAN. MINDESSS. (1989) Efect of ENF reezing on Permeability of Cernent Paste , <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> , vol. 1, no 3, août.
[37]	FIGG, J.W. (1992) Early Age Permeability Measurements for Predicrion of Concrete Durability, <i>Amencan Concrete Institute, SP- 13 1</i> , p.289-297.
[38]	JANSSEN, D.J. (1989) Laboratory Permeability Measuremnt, <i>American Concrete Institute, SP-108</i> , p.145-158.
[39]	WHITNG, D. (1988) Permeability of Selected Concrete, <i>American Concrete Institute, SP- 108</i> , p. 1 95-222.
[40]	BARNN. (1991) A Recording Permeurneter for measuring Tirne-Sensivite Permeability of Concrete <i>Ceramic Transactions, Advances in Cimentitious Materiais</i> , University of British Columbia.
[41]	LAWRENCE, C.D. (1985) Measuremnts of Permeability, <i>Cernent and Concrete As-sociation</i> , pp.29-33.

## Références bibliographiques

[42]	MELETIOUC. A., TIA, M., BLOO MQUISTD. (1992) Development of a Field Permeability Test Apparatus and Method for Concrete , ACI Materials Journal, vol. 89, no 1, janv-fév, p.83-89.
[43]	FIGGJ, .W. (1973) Methods of measuring the Air and Water Permeability of Concrete, Magazine of Concrete Research, vol. 25, no 85, décembre, p.213-219.
[44]	ROY, D.M., SHI, D ., SCHEETZB, ., BROWNP, .W. (1992) Concrete Microstructure and Its Relationships to Pore Structure, Permeability, and General Durability, American Concrete Institute, SP-131, p. 139-152.
[45]	JENSEN M, . (1988) La perméabilité du béton et sa mesure, La durabilité des structures en béton, L.C.P.C., Paris.
[46]	Cabrera, J.G.; Gowripalan, N. and Wainwright, P.J., An Assessment of Concrete Curing Efficiency Using Gas Permeability, Magazine of Concrete Research 41, (149) (1989) 193-198.
[47]	Cabrera J.G. and Lynsdale, C.J., A New Gas Permeameter for Measuring the Permeability of Mortar and Concrete, Magazine of Concrete Research. 40, (144) (1988) 177-182.
[48]	Castro Gomes, J.P., Pereira de Oliveira, L.A., Gonilho Pereira, C.N. and Pacheco Torgal, F., Absorption and Permeability tests of Aggregates «only available in Portuguese», in 10th Portuguese National Congress of Geotechnics, April, 2002, Lisbon, Portugal.
[49]	Castro Gomes, J.P.; Pereira de Oliveira, L.A.; Gonilho Pereira, C.N. and Torgal, F.M.A.S.P., Absorption and Permeability of Inert as Parameter of Evaluation of the Durability of the Concrete «only available in Portuguese», Engineering 2001, university of Beira Interior, Covilha, November, pp. 315-321.
[50]	Valenta, O., The permeability of concrete in aggressive conditions, in 'Large Dams', Proceedings of 10th International Congress, Montreal, 103-117.
[50]	C. S. Sanjaya, T. Tamilselvan, T. H. Wee. PERMEABILITY OF FOAMED CONCRETE. 32nd Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 28 - 29 August 2007, Singapore.
[51]	BS 1881, Test for Determining the Initial Surface Absorption of Concrete, British Standard 1991, Methods of Testing Concrete, Part 5. 1970.
[52]	AASHTO 277-83, Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete, Amer. Assoc. of Hwy. Trans. Officials, Std. Spec. Trans. Mat. Meth. Sampling and Testing, Part 2. 1988.
[53]	Hooton, R.D., and Wakeley, L.D. Influence of test conditions on water permeability of concrete in a triaxial cell, in Pore Structure and Permeability of Cementitious Materials. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 137, ed by L.R. Roberts and J.P. Skalny, Pittsburgh : Materials Research Society, pp.157-164. 1989.
[54]	Janssen, D.J. Laboratory Permeability Measurement, in Permeability of Concrete, ACI SP-108, D. Whiting and A. Walitt, ed., Detroit, Michigan, pp.145-158. 1988.
[55]	Meulen, G.J.R. and Dijk, J. A Permeability-Testing Apparatus for Concrete, Magazine of Concrete Research, 21, No. 6, pp.121-123. 1969.
[56]	Gjörv, O.E. and Löland, K.E. Effect of air on the hydraulic conductivity of concrete, ASTM Special Technical Publication 691, pp.410-422. 1980
[57]	Hope, B.B. and Malhotra, M.V. The Measurement of Concrete Permeability, Canadian Journal of Civil Engineering, 11, pp.287-292. 1984.
[58]	Bisiallon, A. and Malhotra, V.M. Permeability of concrete using a uniaxial water flow method, Permeability of Concrete, ACI SP-108, D. Whiting and A. Walitt, ed., Detroit, Michigan, pp.175- 193. 1988.
[59]	Li, Z.J. and Chau, C.K. New Permeability Test Scheme for Concrete, ACI Materials Journal, 97, No. 1, pp.84-90. 2000.

## Références bibliographiques

[60]	Dhir, R.K. and Byars E.A. Pulverised Fuel-Ash Concrete: Intrinsic Permeability, <i>ACI Materials Journal</i> , 90, No. 6, pp.571-580. 1993.
[61]	El-Dieb, A.S. and Hooton, R.D. A High Pressure Triaxial Cell with Improved Measurement Sensitivity for Saturated Water Permeability of High Performance Concrete, <i>Cement and Concrete Research</i> , 24, No. 5, pp.854-862. 1994.
[62]	Tsivilis, S., Tsantilas, J., Kakali, G., Chaniotakis, E. and Sakellariou, A. The Permeability of Portland Limestone Cement Concrete, <i>Cement and Concrete Research</i> , 33, No. 9, pp.1465- 1471. 2003.
[63]	Choinska Marta, Khelidj Abdelhafid, Chatzigeorgiou George, Cabot-Gilles Pijaudier. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete. <i>Cem Concr Res</i> 2007 ;37 :79–88.
[64]	REGOURD M. – « Carbonatation accélérée et résistance des ciments aux eaux agressives ». <i>Rilem Int. Symp.</i> , Cement and Concrete Association, Vexham Springs, 1976.
[65]	MEHTA P.K. – “Concrete technology at the crossroads. Problems and opportunity” P.K. Metha symposium on Durability of concrete, Nice, France, K.H. Khayat et P.C. Aïtcin eds, 1994, p. A3-A37.
[66]	LONGUET P., BURGLEN L., ZELWER A. – « La phase liquide du ciment hydraté ». <i>Rev. Mat. Constr.</i> , n° 676, janvier 1973, p. 35-41, <i>Revue technique CERILH</i> n° 219.
[67]	Mehta P. K. "Concrete - Structure, Properties and Materials", Prentice Hall, INC, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1986 ;
[68]	REGOURD M. – « Carbonatation accélérée et résistance des ciments aux eaux agressives ». <i>Rilem Int. Symp.</i> , Cement and Concrete Association, Vexham Springs, 1976.
[69]	GRUBE H., RECHENBERG W. – “Durability of concrete structures in acidic water”. <i>Cem. Concr. Res.</i> , vol. 19, n° 5, p 183-792. 1989
[70]	KREIJGER P.C. – “Environmental factors affecting building an its durability”. Séminaire Durabilité des bétons et des pierres, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, Cons. Int. de la langue française, Paris, 1983.
[71]	ZIVICA V., BAJZA A. – “Acidic attack of cement based materials - a review. Part 1: Principle of acidic attack”. <i>Construction and Building Materials</i> , 15, 2001, p. 331-340.
[72]	ZIVICA V., BAJZA A. – “Acidic attack of cement based materials - a review. Part 2: Factors of rate of acidic attack and protective measures”. <i>Construction and Building Materials</i> , 16, 2002, p. 215-222.
[73]	BERTRON A., ESCADEILLAS G., DUCHESNE J. – “Cement pastes alteration by liquid manure organic acids: chemical and mineralogical characterization”. <i>Cem. Concr. Res.</i> , vol. 34, n° 10, 2004, pp 1823-1835.
[74]	BERTRON A., DUCHESNE J., ESCADEILLAS G. – “Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure”. <i>Cement and Concrete Composites</i> , vol. 27, n° 10, 2005, p. 898-909.
[75]	LE CHATELIER H. – Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Thèse, Paris, 1887.
[76]	THORVALDSON T.– Symposium in Honour of Thorbergur Thorvaldson, Performance of concrete, Resistance of concrete to sulphate and other environmental conditions, E.G. Swenson Technical ed., Canadian Building Series, University of Toronto Press, 1968, 243 p.
[77]	TAYLOR H.F.W. – “Ettringite in cement paste and concrete”. <i>Int. Rilem Conf.</i> , Concrete: from material to structure, Arles, 11-12 sept. 1996, p. 55-76.
[78]	Joseph F. Lamond and James H. Pielert, Editors. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials.

## Références bibliographiques

[79]	R.H.BOGUE « Durcissement des pâtes de ciments », la chimie du ciment portland, Edition Eyrolles 1992, pp 510, 517
[80]	- George DREUX, Jean FESTA, « Nouveau guide du béton et ses constituants », Edition Eyrolles 1998, Huitième édition, ISBN 2-212-10231-3.
[81]	DAMIDOT D., GLASSER F.P. – “Investigation of the CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O system at 25 °C by thermodynamic calculations”. Cement and Concrete Research, vol. 25 n° 1, 1995, p. 22-28.
[82]	- KEDJOUR Nacer- Eddine, « Le laboratoire du béton », Office des publications universitaires, Algerie, Edition 2.03.4212, pp 206, 219.
[83]	O'Connell, M.; McNally, Ciaran; Richardson, Mark G. Biochemical attack on concrete in wastewater applications : a state of the art review. Cement and Concrete Composites 2010, 32 (7) : 479-485.
[84]	ASTM C 267-2001, Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer Concretes, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International (2001).
[85]	KAMALI S. – Comportement et simulation des matériaux cimentaires en environnements agressifs : lixiviation et température. Thèse de l'ENS Cachan-LMT n° 2003/4, 7 février 2003.
[86]	MEHTA P.K. – “Durability of Concrete. The Zigzag Course of Progress”. 7 th CAN-MET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal (Canada) , V.M. Malhotra ed., ACI SP-234, 2006, p. 1-16.
[87]	BARON J., OLLIVIER J.-P. – Les bétons, Bases et données pour leur formulation, Eyrolles, 1999, p. 51-52 et p. 205-207.
[88]	BICZOK I. – Concrete corrosion and concrete protection, Akadémiai Kiado, Budapest, 1972.
[89]	DUGNOLLE E. – « Corrosion biologique des bétons au contact avec les eaux résiduaires ». Revue CSTC, n° 4, 1973, p. 26-28.
[90]	DE BELIE N., DEBRUYCKERE M., VAN NIEWENBURG D., DE BLAERE B. – Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 68, n° 2, 1997, p 101-108.
[91]	fiche technique du ciment, <a href="http://www.lafargealgerie.com">http://www.lafargealgerie.com</a> .
[92]	George DREUX, Jean FESTA, « Nouveau guide du béton et ses constituants », Edition Eyrolles 1998, Huitième édition, ISBN 2-212-10231-3.
[93]	BEHOUT Fadhila, formulation expérimentale d'un béton à base de granulats locaux – validation d'une méthode de calcul », thèse d'ingénieur, université de M'sila 2005.
[94]	TIAN B, COHEN M.D. – “Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion ?” Cem. Concr. Res., vol. 30, 2000, p. 117-123.
[95]	REGOURD M., HORNAIN H. – « Applications de la microscopie électronique à balayage ». Revue des matériaux de construction, n° 693, 1975, p. 73-87.
[96]	Concrete manual, 8th edition, US. Bureau of reclamation, 1975, p.37
[97]	JAUBERTHIE.R ; RENDELL.F (2003). Physicochemical study of the alteration surface of concrete exposed to ammonium salts . Cement and Concrete Research, 33, 2003, p. 85-91.
[98]	RENDELL.F ; JAUBERTHIE.R (1999). The deterioration of mortar in sulphate environments . Cement and Concrete Research, 13, p. 321-327.
[99]	– AMRIOU Abderrachid, BENCHEIKH Mohamed. New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece. Construction and Building Materials, 151 (2017) 642-649.

## Références bibliographiques

---

100	BENCHEIKH Mohamed, BAALI Laid, « la perméabilité, la porosité et la résistance d'un béton à base de matériaux locaux comme critère de durabilité », article 2003, université de M'sila
101	BENCHEIKH Mohamed. « Effet des ajouts chimiques fabriqués en Algérie sur la perméabilité et la porosité d'un béton sous conditions climatiques », International conference for building and construction 2004, EGYPTE.
102	BENCHEIKH Mohamed, AMRIOU Abderrachid, " طريقة تجريبية لقياس نفاذية للخرسانة " للماء تأثير الطقس الحار " International Exhibition & conference for bulding & construction, INTER BUILD, CAIRO June 2007, EGYPTE.
103	EL BAHY Boubakeur Seddik, « in fluence des paramètres de formulation et des conditions de mise en œuvre et de conservation sur la perméabilité à l'eau à base de matériaux locaux, Mémoire de magistère, université de M'sila, 2004.
104	BAALI Laid, « la perméabilité, la porosité et la résistance d'un béton à base de matériaux locaux comme critère de sa durabilité », mémoire de magistère, université de M'sila , 2002.
105	R.Dupain, R. Lanchon, J.C.Saint Arroman. Granulats, sols, ciments et béton. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Ecole Française du béton. ISBN : 2-7135-2064-9. Edition CASTEILLA,2000.
106	Béton et constituants du béton. 5ème édition tome 1. ISBN : 2-12-131851-8. AFNOR 2002
107	Béton et constituants du béton. 5ème édition tome 2. ISBN : 2-12-131852-6. AFNOR 2002
108	Adjuvants du béton. ISBN : 2-12-134611-2. AFNOR 2002
109	Jacques Baron, Raymond Sauterey. Le Béton hydraulique-connaissance et pratique-Presses ENPC, 1995. ISBN : 2-85978-033-5.

**RESUME :** La durabilité peut être évaluée par la perméabilité qui est fonction de la facilité avec laquelle les fluides (eau ou gaz) peuvent pénétrer et déplacer à travers le béton.

Dans la première partie de ce travail, nous présentons l'étude des effets climatiques préjudiciables caractérisés par l'élévation de température pendant la saison de l'été et de l'humidité du climat sur la perméabilité à l'eau du béton. Ensuite, l'influence des effets précédents sur la porosité accessible à l'eau et sur la résistance à la compression du béton. Ainsi, on présente l'effet de la porosité et la résistance à la compression sur la perméabilité à l'eau du béton.

L'étude expérimentale a été réalisée sur des échantillons de béton avec un rapport E/C variable afin d'obtenir un béton ferme et un béton très plastique. Une partie des échantillons a subi une cure standard à l'eau, alors qu'une seconde partie a été conservée à l'air libre.

La deuxième partie de ce travail consiste à l'étude de l'influence des conditions chimiques sur la perméabilité à l'eau du béton. L'étude expérimentale comporte des échantillons de béton conservés dans l'acide sulfurique, le sulfate de magnésium et le sulfate d'ammonium. Les résultats obtenus seront comparés avec ceux d'un béton qui a subi une cure standard à l'eau.

Afin d'évaluer le coefficient de perméabilité à l'eau du béton, nous proposons dans cette thèse une nouvelle méthode expérimentale basée sur l'écoulement latéral de l'eau à travers une éprouvette cylindrique creuse.

À travers cette étude expérimentale, nous avons abouti à une relation qui relie le rapport E/C et le mode de conservation à la perméabilité à l'eau du béton. Ensuite, une relation entre la perméabilité à l'eau et la porosité accessible à l'eau du béton d'une part et d'autre part entre cette perméabilité et la résistance à la compression du béton.

Une conservation du béton dans un acide ou un sulfate peut ralentir à court terme la pénétration des fluides par la précipitation du gypse à travers la surface des échantillons, mais à long terme la réaction de ce gypse avec les hydrates du ciment peut conduire à la formation de composés nocifs pour le béton.

**Mots clés :** Durabilité – Perméabilité à l'eau – Porosité –Essai de perméabilité –Cure- Acides – Sulfates

**الملخص:** ديمومة الخرسانة يمكن تقييمها بواسطة النفاذية المرتبطة بالسهولة التي يتم بها السوائل والغازات من النفاذ والجريان من خلال الخرسانة. في الجزء الأول من هذا العمل نقدم دراسة تأثيرات العوامل المناخية المضرة والمتعلقة أساسا بارتفاع درجة الحرارة خلال فصل الصيف والمناخ الجاف على نفاذية الخرسانة للماء. ثم نقوم بدراسة تأثير نفس العوامل على الفراغات التي تسمح بجريان المياه عبر الخرسانة وكذا على مقاومة الخرسانة للضغط. الدراسة التجريبية تمت على عينات من الخرسانة محضرة بمعامل (الماء/الإسمنت) متغيرة بهدف الحصول على خرسانة يابسة وسائلة أي سهلة الوضع. جزء من العينات تم حفظها في الماء وجزء آخر في الهواء الطلق خارج المخبر.

الجزء الثاني من هذا العمل يتمحور حول دراسة تأثير الخصائص الكيميائية على نفاذية الخرسانة للماء. الدراسة التجريبية تمت على عينات من الخرسانة محفوظة في ثلاث وسائط كيميائية (حمضية أو كبريتية) والنتائج المتحصل عليها يتم مقارنتها مع خرسانة محفوظة بطريقة مرجعية في الماء. التجارب على نفاذية الخرسانة تمت بطريقة تجريبية جديدة تعتمد على السيلان الأفقي للماء من خلال عينة اسطوانية من الخرسانة مقبوبة طوليا. النتائج المتحصل عليها بينت أولا أن نفاذية الخرسانة للماء تتأثر كثيرا بكمية الماء المستعمل أثناء الخلط وبطريقة الحفظ. ثانيا، بين النفاذية ونسبة جريان المياه ومقاومة الخرسانة توجد علاقة مباشرة.

الوسائط الحمضية والكبريتية يمكن أن تؤثر إيجابيا في المدى القريب على نفاذية الخرسانة وهذا من خلال ترسب الجبس على المساحة الخارجية وفي الفراغات السطحية للخرسانة. **الكلمات المفتاحية:** الديمومة - النفاذية للماء - الفراغات - تجارب النفاذية - حفظ الخرسانة - الأحماض- الكبريتات

**Abstract :** The durability can be assessed by the permeability that is a function of the ease with which fluids (water or gas) can penetrate and move through the concrete.

In the first part of this work, we present the study of adverse climatic effects characterized by the temperature rise during the summer season and the dry climate on the water permeability of the concrete. Then, the influence of previous effects on the porosity accessible to water and on the compressive strength of concrete. Thus, the effect of porosity and compressive strength on the water permeability of concrete is presented.

The experimental study was carried out on concrete samples with a variable W/C ratio in order to obtain a firm concrete and a very plastic concrete. Some of the samples have a standard water cure, while a second part has been kept in the open air.

The second part of this work consists in studying the influence of chemical conditions on the water permeability of concrete. The experimental study includes concrete samples preserved in sulfuric acid, magnesium sulphate and ammonium sulphate. The results obtained will be compared with those of a concrete which has undergone a standard cure with water.

In order to evaluate the water permeability coefficient of concrete, we propose in this thesis a new experimental method based on the lateral flow of water through a hollow cylindrical specimen.

Through this experimental study, we have arrived at a relationship that links the W/C ratio and the mode of conservation to the water permeability of concrete. Then, a relation between the permeability to water and the porosity accessible to water of concrete on the one hand and on the other hand between this permeability and the compressive strength of concrete.

Preserving concrete in acid or sulphate can slow the penetration of fluids in the short term by precipitation of the gypsum through the surface of the samples, but in the long term the reaction of this gypsum with the hydrates of the cement can lead to the formation of harmful compounds for concrete.

**Keywords :** Durability - Permeability to water - Porosity - Permeability test - Cure - Acids- Sulfates.