

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider –Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et d'Hydraulique

Référence: ...../2019



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية و الري

...../2019 المرجع

## Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Voies et ouvrage d'art

Thème

**Étude de l'absorption de l'eau des bétons comme critères de leur durabilité application aux bétons des ouvrages d'arts**

Nom et Prénom de l'étudiant :

OUASSAF Naima

Encadreur :

Dr .Ben Ammar Ben Khadda

Promotion Juillet 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# TABLE DE MATIERE

TABLE DE MATIERE .....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
LISTE DES FIGURES .....	
ملخص .....	
RÉSUMÉ. ....	
INTRODUCTION GENERALE .....	10

## PARTIE A ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### CHAPITRE I: GENERALITES SUR LE BETON ET LES OUVRAGES D'ART

I.LES OUVRAGES D'ART: .....	12
I.1INTRODUCTION.....	12
I.2DEFINITION.....	12
I.3DIFFERENTES PARTIES DU PONT.....	13
I.4CLASSIFICATIONS DES PONTS .....	15
II.BETON .....	16
II.1INTRODUCTION.....	16
II.2DÉFINITION.....	16
II.3COMPOSITION DE BÉTON .....	17
II.4CONSTITUANTS DU BÉTON.....	19
II.4.1CIMENT.....	19
II.4.2LES GRANULATS.....	24
II.4.3LES ADJUVANTS.....	34
II.4.4L'EAU.....	36
II.5CONFECTION DE BETON.....	36
II.6PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU BÉTON .....	38

### CHAPITRE II : DURABILITE DES BETONS

I.INTRODUCTION.....	40
II.DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON .....	40
III.PRINCIPAUX DEGRADATIONS DE BETON.....	41
III.1CORROSION DES ARMATURES .....	41
III.2PHENOMENE DE CARBONATATION .....	42
III.3 PHÉNOMÈNE DE PÉNÉTRATION DES CHLORURES .....	43
III.4 PHENOMENES ATTAQUE GEL-DEGEL AVEC OU SANS SELS DE DEVERGLAÇAGE..	44
III.5 LIXIVIATION DU BÉTON.....	45
IV. MAITRISE DE DURABILITE DE BETON .....	46

<b>V. NOTION DE POROSITE ET L'ABSORPTION D'EAU .....</b>	<b>47</b>
V.1 INTRODUCTION.....	47
V.2 POROSITE DE BETON.....	48
V.3 PERMEABILITE DES BETONS.....	49
V.4 ABSORPTION D'EAU .....	50

## **PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE**

### **CHAPITRE I: CARACTERISATION ET FORMULATION DU BÉTON**

<b>I.INTRODUCTION.....</b>	<b>57</b>
<b>II. MATERIAUX DE BASE UTILISES .....</b>	<b>57</b>
II.1 PROVENANCE DE MATÉRIAUX .....	57
II.2 CIMENT UTILISÉ.....	57
II.3 EAU.....	59
II.4 SABLE.....	59
II.5GRAVIER.....	59
<b>III. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRANULATS .....</b>	<b>60</b>
<b>IV. PROPRIETES DES BETONS .....</b>	<b>66</b>
IV.1 PROPRIÉTÉS DE BÉTON FRAIS: .....	66
IV.2 PROPRIÉTÉS DE BÉTON DURCI: .....	68

### **CHAPITRE II: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS**

<b>I.INTRODUCTION.....</b>	<b>73</b>
<b>II. RESULTAT D'ESSAIS DE CARACTERISATION .....</b>	<b>73</b>
II.1 AFFAISSEMENT... ..	73
II.2 MASSES VOLUMIQUES APPARENTES DES BÉTONS .....	74
II.3 POROSITE.....	75
II.4 ABSORPTION DE L'EAU :.....	76
LE COEFFICIENT D'ABSORPTION EST CALCULÉ PAR LA FORMULE SUIVANTE : .....	76
II.5 RÉSISTANCES MÉCANIQUES DES BÉTONS .....	77
<b>III. INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>78</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>63</b>

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Constituants de béton en % .....	16
Tableau 2: Résistance à la compression .....	22
Tableau 3 : Valeur limites de résistance .....	22
Tableau 4 : Les intervalles d/D et O/D sont appelés classes granulaires.....	24
Tableau 5 : Les types de granulats.....	26
Tableau 6 : Caractéristiques physiques et mécaniques .....	58
Tableau 7 : Caractéristiques chimiques de ciment .....	58
Tableau 8 : Masse volumique de granulats .....	60
Tableau 9 : Analyse granulométrique des granulats .....	60
Tableau 10 : Autres caractéristiques physiques des granulats.....	61
Tableau 11 : Coefficients A et A <sub>1</sub> en fonction de la qualité des granulats et liant .....	62
Tableau 12 : Compositions de bétons de 1 m <sup>3</sup> (Kg/m <sup>3</sup> ).....	65
Tableau 13 : Compositions de bétons pour une éprouvette (g/m <sup>3</sup> ).....	65
Tableau 14 : Classes de consistance de béton.....	67
Tableau 15 : Résultat d'essai de cône d'Abrams .....	73
Tableau 16 : Variation de la masse volumique à l'état durci, des différents bétons .....	74
Tableau 17 : Résultats de l'essai de Porosité à 14 jours .....	75
Tableau 18 : Résultats de l'essai de Porosité à 28 jours.....	75
Tableau 19 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau à 14 jours.....	76
Tableau 20 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau à 28 jours.....	76
Tableau 21 : Résistance à la compression des bétons à 14 et 28 jours .....	77

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Elements constitutifs d'un pont .....	13
Figure 2 : Composants du béton.....	17
Figure 3 : Les constituants du béton. ....	17
Figure 4 : Différents granulats de béton .....	18
Figure 5 : Ciment.....	19
Figure 6 : Granulats .....	25
Figure 7 : Carrière de granulats.....	26
Figure 8 : Gravillons .....	27
Figure 9 : Exemple de courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons .....	28
Figure 10 : Tamis de granulométrie.....	29
Figure 11 : Essai équivalent sable .....	30
Figure 12 : Matériel de l'essai équivalent sable .....	30
Figure 13 : Essai au bleu de méthylène .....	31
Figure 14 : Matériel de l'essai de fragmentation (Los Angeles) .....	32
Figure 15 : Gravillons .....	33
Figure 16 : adjuvant béton .....	34
Figure 17 : Confection de béton.....	37
Figure 18 : Procédure de confection du béton au labo.....	37
Figure 19 : Corrosion des armatures.....	41
Figure 20 : Exemple de carbonatation de béton.....	42
Figure 21 : Principe de corrosion des armatures.....	43
Figure 22 : Phénomène d'attaque gel-dégel .....	44
Figure 23 : Aspect d'une surface en béton ayant été soumise au phénomène de lixiviation .45	
Figure 24 : Effet des paramètres influençant la perméabilité.....	49
Figure 25 : Cinétique d'absorption d'eau en fonction du temps et de racine carrée du temp...53	
Figure 26 : L'absorption d'eau unidirectionnelle et par succion capillaire gravitation. ....	54
Figure 27 : Ciment marin Lafarge .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 28 : Courbe granulométrique.....	61
Figure 29 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams. ....	67
Figure 30: Essai d'affaissement.....	67
Figure 31 : Eprouvettes de béton.....	68
Figure 32: Les moules et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression .....	68
Figure 33 : Essai de résistance à la compression .....	69
Figure 34: Pèse hydrostatique.....	69
Figure 35 : Eprouvettes de bétons destinées à l'essai de porosité par pesées hydrostatique....	71
Figure 36 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire de différents bétons.....	71
Figure 37 : Essai d'affaissement du béton .....	73
Figure 38 : Courbe de densité des bétons à 14 et 28 jours.....	74
Figure 39 : Courbe de Porosité des bétons à 14 et 28 jours .....	75
Figure 40 : Courbe d'absorption d'eau des bétons à 14 et 28 jours .....	76
Figure 41 : Essais de compression.....	77
Figure 42 : Courbe de résistance à la compression des bétons à 14 et 28 jours .....	78

## RÉSUMÉ

---

## ملخص :

الخرسانة مادة مسامية. بمعنى آخر ، لها مسام أو فراغات. هذه المسام ضرورية لقوة ومتانة الخرسانة. في الواقع، المسامية المنخفضة هي أفضل دفاع ملموس للخرسانة ضد كل العوامل العدوانية..

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير الماء (امتصاص الماء) على الخرسانات ومتانتها (الخواص الميكانيكية والكيميائية). تم صنع عدة خلطات خرسانية بقيم مختلفة من المحتوى المائي (كمية الماء المضافة) بعد ذلك تم تحليل الخرسانات المصنوعة من خلال الاختبارات في المختبر. وجد أنه حتى في حالة الحفاظ على نسبة (الماء / اسمنت) ثابتة تكون هناك زيادة في المقاومة الميكانيكية للخرسانة وينخفض الاستهلاك الشعري عندما يقل حجم الماء في الخلطة.

بنفس الطريقة، يكون الامتصاص الشعري أعلى حين تكون نسبة (الماء / اسمنت) مرتفعة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ، امتصاص الماء ، محتوى الماء ، المقاومة الميكانيكية ، المتانة.

## RÉSUMÉ.

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'eau (absorption de l'eau) sur les bétons et leur durabilité (propriétés mécaniques et chimiques). Des variations de mélanges ont confectionné avec des différentes valeurs de teneur en eau (quantité d'eau ajouté) après les bétons obtenues ont passé par les essais au labo. On constate que, même si le rapport  $E / C$  est maintenu constant, la résistance augmente et la dépréciation capillaire diminue lorsque le volume de l'eau diminue.

L'effet de teneur en eau sur la résistance est plus fort pour les rapports  $E / C$  faibles. De même, l'absorption capillaire est d'autant plus élevée que rapport  $E / C$  est élevé.

**Mots-Clés:** béton, Absorption de l'eau, Teneur en eau, Résistance mécanique, Durabilité.

# INTRODUCTION GENERALE

---

### Introduction Générale

La durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, aussi de l'agressivité de son environnement. Un élément en béton qui subit des cycles de chargement et de déchargement ou de mouillage et de séchage, par exemple, peut se fissurer à cause de ces cycles. Des agents agressifs extérieurs pénétreront facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées. Ces agents agressifs peuvent, par la suite, réagir avec les hydrates pour diminuer davantage la capacité portante de l'élément

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers...etc.) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La maîtrise et l'optimisation de la durabilité des structures et des produits en béton, qu'ils soient structurels ou architecturaux, constituent un enjeu majeur pour toute la profession. C'est pourquoi la durabilité occupe de nos jours une position déterminante dans le nouveau contexte normatif européen sur le béton.

La durabilité des ouvrages d'art en béton s'obtient par une conception soignée prenant en compte notamment les aspects liés à l'évacuation des eaux, la maîtrise de la fissuration, les dispositions d'enrobage, et par un choix approprié des matériaux, une bonne qualité d'exécution et des contrôles adaptés, une utilisation de la structure conforme aux hypothèses du projet et des opérations de maintenance courantes régulières.

La porosité est la conséquence naturelle de la quantité d'eau mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation et des vides éventuels présents dans les granulats. Le désagrément de cette porosité se marque à deux niveaux : sur la résistance mécanique et sur la durabilité du béton.

Le but de cette étude est d'évaluer la durabilité de béton (les propriétés mécanique et chimique du béton) à travers l'utilisation de l'absorption de l'eau comme critère de comparaison, le cas étudié va être le béton destiné à construire les ouvrages d'art.

PARTIE A :  
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

CHAPITRE I:  
GENERALITES SUR LE BETON  
ET LES OUVRAGES D'ART

## I. Les ouvrages d'art:

### I.1 Introduction

D'une façon générale, on appelle pont tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation.

Selon le cas, on distingue: pont-route, pont-rail, pont-canal.

Cette définition est un peu imprécise dans la mesure où elle ne se réfère à aucune notion de dimension, de forme ou de nature d'ouvrage. Pour les petits ponts hydrauliques, on parle couramment de ponceaux ou de dalots.

A l'inverse, on emploie de préférence le terme de viaduc lorsqu'il s'agit d'un ouvrage de grande longueur possédant de nombreuses travées et généralement situé en site terrestre. De même, une buse est un ouvrage de franchissement que l'on ne désigne jamais par le terme de pont, même si son ouverture est de dimension respectable.

Enfin, Certaines tranchées couvertes répondent à la définition d'un pont; cependant, elles ne sont pas traitées dans le cadre de ce cours, car ce sont des structures dont la conception, le calcul et les procédés d'exécution les rattachent à une famille de constructions assez différente de celle qui nous concerne. En résumé, on appellera pont tout ouvrage de franchissement en élévation construit in situ, ce qui exclut les buses totalement ou partiellement préfabriquées.

### I.2 Définition

Un pont est un ouvrage en élévation, permettant à une voie de circulation (voie portée) de franchir un obstacle naturel ou artificiel : rivière, vallée, route, voie ferrée,... etc. [1] La voie portée peut être:

- Une voie routière (pont-route),
- piétonne (passerelle).
- ferroviaire (pont-rail).

On distingue les différents types de d'ouvrages suivants :

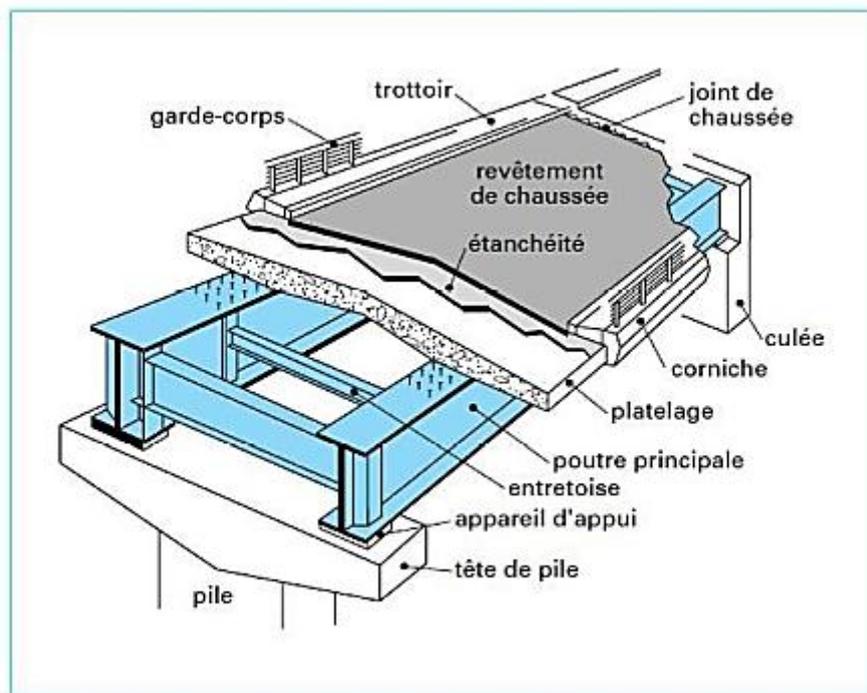
- ❖ ponceau ou dalot : pont de petites dimensions (quelques mètres).
- ❖ viaduc : ouvrage de franchissement à grande hauteur, généralement constitué de nombreux travées ;
- ❖ passerelle : ouvrage destiné aux piétons, exceptionnellement aux canalisations ou au gibier.

### I.3 Différentes parties du pont

Pour remplir sa fonction, le pont est constitué d'une structure résistante capable de porter la voie et ses charges d'exploitation. Il possède par ailleurs des équipements spécifiques concourant à son bon fonctionnement, à la sécurité des usagers et à la durabilité de l'ouvrage.

Les structures du pont doivent répondre aux données du projet. De formes multiples et variées, elles se réduisent finalement toujours à un tablier et un système porteur composé d'appuis et de suspensions éventuellement.

Les équipements respectent des standards propres à chaque type de voie concernée (route ou rail) et à son exploitation. Premier équipement : la structure de roulement qui est constituée par la chaussée pour la route et par le ballast et la voie pour le ferroviaire. Les équipements englobent aussi : les appareils d'appui, les joints de chaussée, les organes de sécurité (garde-corps, glissières de sécurité, barrières), les évacuations des eaux, l'étanchéité, la corniche, les circulations de visite, les matériels de voies (caténaires, poteaux, signalisation) .[1]



**Figure 1** : Elements constitutifs d'un pont

## ❖ Tablier

Est la partie quasi horizontale située sous la voie portée : il comprend les éléments porteurs dans le cas des ponts à poutre ou est supportée par eux dans le cas des ponts en arc ou des ponts à câbles. La couverture ou platelage est la partie supérieure du tablier destinée à supporter les efforts dû à la circulation (dalle en béton, dalle orthotrope etc.)

## ❖ Les appuis :

Parmi les appuis on distingue les culées qui sont les appuis d'extrémités (de rive) et les piles qui sont les appuis intermédiaires.

- Culée : qui joue généralement un rôle double d'appui de rive du tablier et de soutènement des remblais d'accès.
- Piles qui constituent les appuis intermédiaires

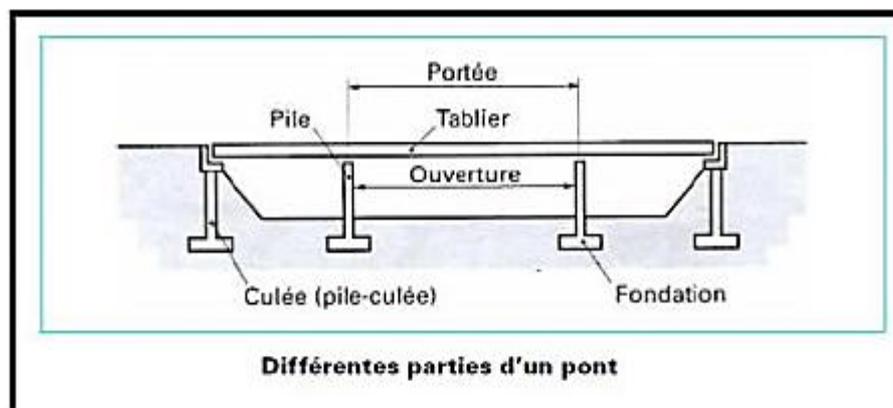
## ❖ Les fondations :

Qui peuvent être superficielles ou profondes.

## ❖ Les Equipements

Sont des éléments indispensables à l'utilisation au fonctionnement et à la durabilité du pont : appareils d'appui, garde-corps, joints, gargouilles etc... [1]

Appuis consécutifs, la portée de la travée correspondante. Il ne faut pas la confondre avec ouverture qui est la distance libre entre les parements des appuis, ni avec la longueur du pont.



## I.4 Classifications des ponts

### Critères de classification:

Les ponts existent dans une grande variété de formes et possèdent des architectures les plus diverses. Cette grande diversité des types de ponts amène à distinguer les critères selon lesquels ils peuvent être classés. La classification des ponts peut se faire selon l'un ou de plusieurs des critères suivants:

- ❖ Fonctionnement mécanique;
- ❖ Matériau principal (béton armé, béton précontraint, acier, bois, mixte).
- ❖ Fixité ou mobilité du tablier (pont fixe, pont mobile) ;
- ❖ Disposition en plan (pont droit, pont biais, pont courbe) ; Nature de la voie portée (pont-route, pont-rail, passerelle)
- ❖ Nature de l'obstacle à franchir (pont d'étagement, pont sur Rivière)
- ❖ Section transversale (pont dalle, pont à poutres : T, I, Caissons).
- ❖ position du tablier par rapport à l'ossature (pont à tablier supérieur, pont à tablier intermédiaire, pont à tablier inférieur).
- ❖ Durée de vie prévue (pont permanent, pont temporaire).
- ❖ Méthode de construction (pont construit sur cintre, pont à Poutres préfabriquées, pont à poutres lancées, ponts poussé, Pont construit par encorbellement, pont construit par Haubanage).

## II. Béton

### II.1 Introduction

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde : environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement.

La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sûr, des matériaux de base qui entrent dans la formulation mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation).

Il s'agit de déterminer la meilleure qualité du béton qu'on puisse obtenir. Pour ne citer que la résistance à la compression du béton qui reste, du point de vue de l'ingénieur, la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité, nous allons examiner ci-après les différents facteurs ayant une influence sur cette résistance, et sur lesquels on pourra compter pour l'amélioration de la qualité du béton.

### II.2 Définition

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m<sup>3</sup> ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5 µm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons).

Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée (tels que les Bétons à Hautes Performances, par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 µm (fillers, fumée de silice). De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m<sup>3</sup>.

La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci. [3]

**Tableau 1 : Constituants de béton en %**

<i>Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant</i>				
<b>Constituants</b>	<b>Eau</b>	<b>Air</b>	<b>Ciment</b>	<b>Granulats</b>
Volume (en %)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (en %)	5-9		9-18	65-85

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants. [3]

### II.3 Composition de béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leur masse volumique vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m<sup>3</sup> les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5  $\mu$ m (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales. [4]

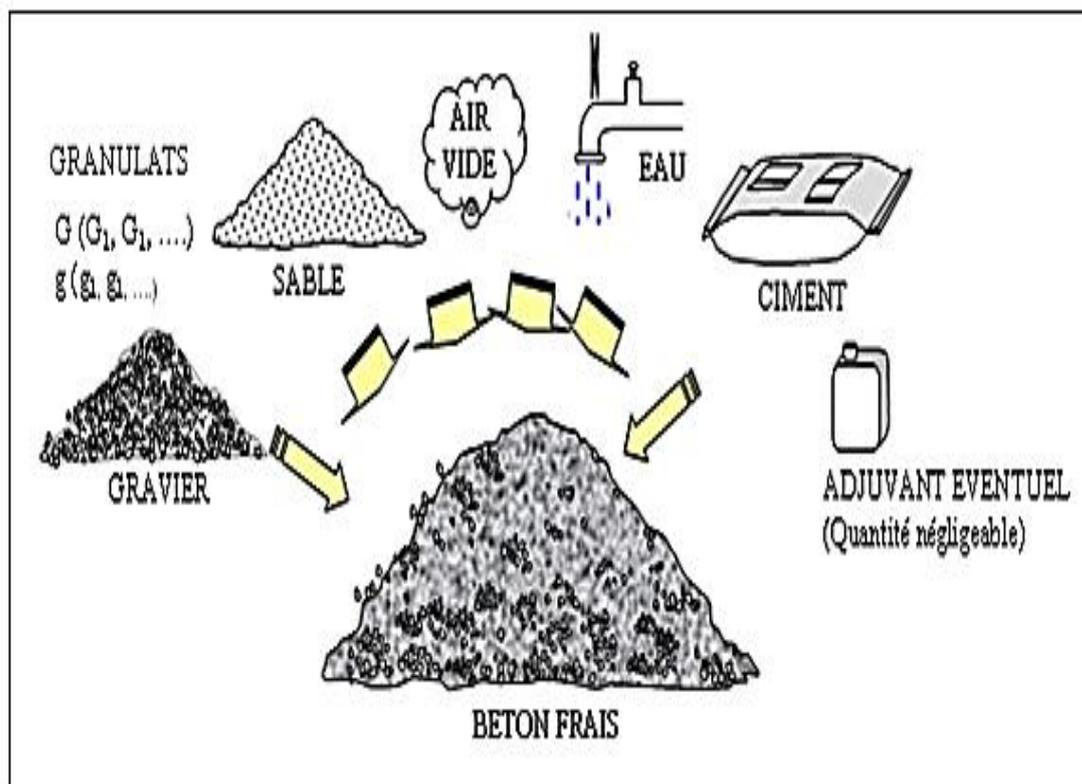


Figure 2 : Composants du béton

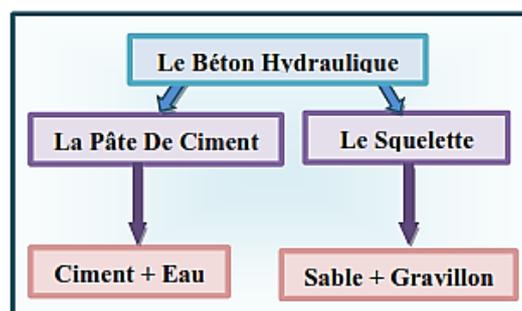


Figure 3 : Les constituants du béton. [1]

Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée (tels que les Bétons à Hautes Performances, par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de  $0,1 \mu\text{m}$  (fillers, fumée de silice). De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à  $100 \text{ kg/m}^3$ .

La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci. [1]

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.



**Figure 4 :** Différents granulats de béton

## II.4 CONSTITUANTS DU BÉTON

### II.4.1 CIMENT

#### ❖ DEFINITION



**Figure 5** : Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituant(s).

#### ❖ CONSTITUANTS DU CIMENT

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
- des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables ;
- des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.)

✓ **Clinker Portland (K)**

Le clinker Portland est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile fixé avec précision et contenant des proportions visées de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et F<sub>2</sub>O. Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants. [3]

✓ **Laitier granulé de haut fourneau (S)**

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment.

✓ **Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q)**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lors- 217 qu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.

✓ **Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)**

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées Au charbon pulvérisé.

✓ **Schistes calcinés (T)**

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

✓ **Calcaires (L, LL)**

Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO<sub>3</sub> – supérieure à 75 %.

✓ **Fumées de silice (D)**

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 µm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

✓ **Sulfate de calcium**

Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

❖ **CONSTITUANTS SECONDAIRES**

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus (sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment). Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment.

✓ **Additifs**

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs (à l'exception des pigments éventuellement ajoutés) doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment.

❖ **LES CINQ TYPES DE CIMENTS COURANTS**

✓ **Le ciment Portland : CEM I**

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

✓ **Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B**

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

✓ **Le ciment de haut fourneau: CEM III/A ou B...**

Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.

✓ **CEM III/C (anciennement ciment de laitier au clinker)**

Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

✓ **Le ciment composé : CEM V/A ou B (anciennement ciment au laitier et aux cendres)**

Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.

❖ **CLASSES DE RESISTANCE DES CIMENTS**✓ **Définition des classes de résistance**

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur Minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa (1 MPa = 1 N/mm = 10bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau

**Tableau 2:**Résistance à la compression

<i>Résistance à la compression (en MPa)</i>				
<i>Désignation de la classe de résistance</i>	<i>Résistance à court terme</i>		<i>Résistance courante</i>	
	<i>à 2 jours</i>	<i>à 7 jours</i>	<i>à 28 jours</i>	
<b>32,5 N</b>	–	≥ 16	≈ 32,5	≈ 52,5
<b>32,5 R</b>	≥ 10	–		
<b>42,5 N</b>	≥ 10	–	≈ 42,5	≈ 62,5
<b>42,5 R</b>	≥ 20	–		
<b>52,5 N</b>	≥ 20	–	≈ 52,5	–
<b>52,5 R</b>	≥ 30	–		

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une Classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R).

**Tableau 3 :** Valeur limites de résistance

<i>Valeurs limites applicables à chacun des résultats</i>						
<i>Échéances</i>	<i>Classe de résistance</i>					
	<i>32,5 N</i>	<i>32,5 R</i>	<i>42,5 N</i>	<i>42,5 R</i>	<i>52,5 N</i>	<i>52,5 R</i>
<b>2 jours</b>	–	8,0	8,0	18,0	18,0	28,0
<b>7 jours</b>	14,0	–	–	–	–	–
<b>28 jours</b>	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0

Valeurs limites applicables suivant les classes de résistance La conformité d'un lot de ciment est appréciée pour ce qui concerne la résistance à la compression en fonction des valeurs du tableau suivant qui sont des limites absolues applicables à chaque résultat d'essai.

**❖ LE CHOIX DU TYPE DE CIMENT**

Il dépend à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Sans détailler les critères de choix du ciment on peut rappeler quelques règles.

- Pour un béton courant, on utilise des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C, ou CEM V, alors que le ciment à maçonner et la chaux hydraulique sont réservés à la préparation de mortiers pour maçonneries.
  - Pour les bétons armés, la classe de résistance 32,5 est au minimum retenue.
  - Pour des travaux en ambiance agressive, on utilise des ciments pour travaux à la mer PM, norme NF P 15-317, ou des ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES, norme NF P 15-319.
  - Le ciment prompt naturel et le ciment d'aluminates de calcium fondu sont utilisés pour leur durcissement rapide (réparations, scellements), mais aussi pour leur résistance aux ambiances agressives.
  - La classe R est utilisée chaque fois que l'on cherche des résistances élevées au jeune âge: préfabrication avec cycle de démoulage court, bétonnage par temps froid. [3]
  - Les ciments blancs se prêtent bien à la réalisation de bétons architectoniques. Ils peuvent être également teintés à l'aide de pigments minéraux.
  - Les bétons courants 38
- | Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant | Constituants | Eau  | Air   | Ciment       | Granulats | Volume (en %) |
|---|--------------|------|-------|--------------|-----------|---------------|
| 14-22   | 1-6          | 7-14 | 60-78 | Poids (en %) | 5-9       | 9-18          |
| 65-85   |              |      |       |              |           |               |

## II.4.2 Les granulats

### ❖ Définition des granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

- fillers ;
- sablons ;
- sables ;
- graves ;
- gravillons ;
- ballast ;
- enrochements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition.

Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistances mécaniques, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulat répond à des critères Granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

- d: dimension inférieure du granulat
- D: dimension supérieure du granulat

**Tableau 4** : Les intervalles d/D et O/D sont appelés classes granulaires.

<i>Les granulats les plus utilisés</i>		
<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
<i>Fillers</i>	O/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
<i>Sables</i>	O/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
<i>Graves</i>	O/D	D ≥ 6,3 mm
<i>Gravillons</i>	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
<i>Ballasts</i>	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

- les fillers ;
- les sables ;
- les gravillons ;
- les graves.

Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à  $2 \text{ t/m}^3$  et léger si elle est inférieure à  $2 \text{ t/m}^3$

. Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration. Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques.

- Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple :
  - la masse volumique réelle ;
  - l'absorption d'eau et la porosité ;
  - la sensibilité au gel ;
  - la résistance à la fragmentation et au polissage ;
  - la gélivité.
- Des caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier:
  - la granularité ;
  - la forme (aplatissement) ;
  - la propreté des sables.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leurs familles (gravillons, sables, fillers) et font l'objet de méthode de détermination adaptée.



**Figure 6 : Granulats**

❖ Différents types de granulats**Figure 7** : Carrière de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être...

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

**Tableau 5** : Les types de granulats

<i>Différents types de granulats issus de roches massives</i>	
<i>Types de roches massives</i>	<i>Exemple de famille de granulats</i>
Roche magmatique Roche éruptive	Granite, rhyolite, porphyre, diorite, basalte, etc.
Roche sédimentaire	Grès, grès quartziques, silex, calcaires, etc.
Roche métamorphique	Gneiss, micaschistes, quartzites, etc.

Les spécifications concernent les caractéristiques détaillées ci-dessous.

• **Caractéristiques applicables aux gravillons**

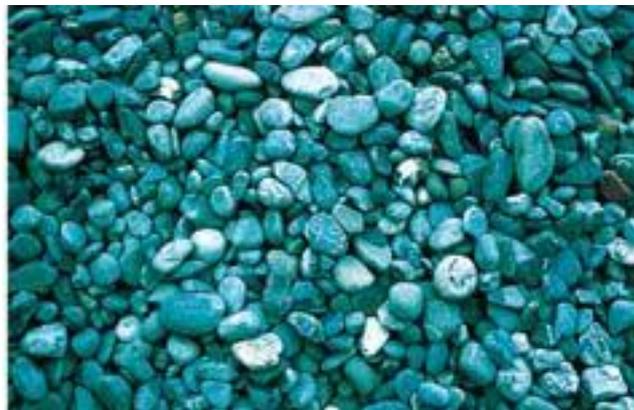
- Los Angeles : LA
- Sensibilité au gel-dégel : G
- Granularité et teneur en fines des gravillons : Gr
- Aplatissement : A
- Eléments coquilliers des gravillons d'origine
- marine : Cq
- Boulettes d'argiles

• **Caractéristiques applicables aux sables et graves**

- Granularité et teneur en fines : Gr
- Module de finesse : FM
- Propreté : P
- Polluants organiques

• **Caractéristiques applicables aux sables, graves et gravillons**

- Absorption d'eau : Ab
- Impuretés prohibées
- Alkali-réaction
- Soufre total : S
- Sulfates solubles dans l'acide : SA
- Chlorures



**Figure 8** : Gravillons

### ❖ Caractéristiques des granulats

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats (roulés ou concassés, teintes, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton (critère de maniabilité, enrobage).

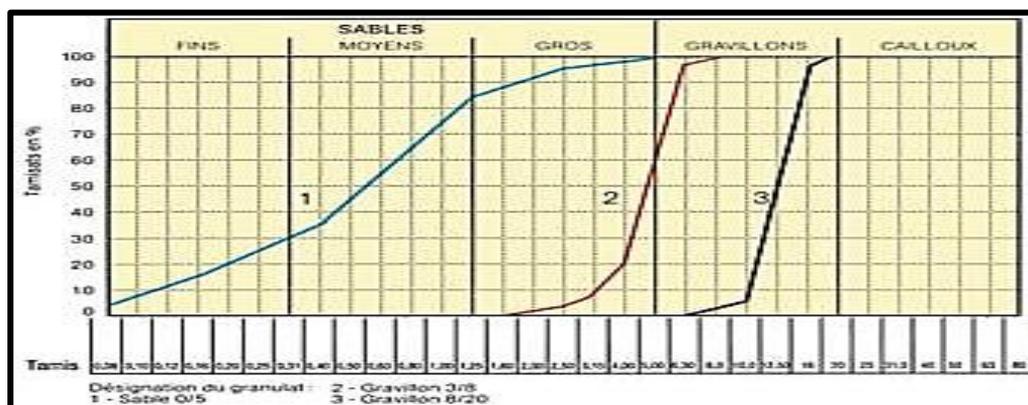
### ❖ Caractéristiques géométriques

#### • Classe granulaire

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d : dimension inférieure et D : dimension supérieure). L'intervalle d/D est appelé classe granulaire. Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm). Série de base : 1 / 2 / 4 / 8 / 16 / 31,5 / 63 Série de base + série 1 : 1 / 2 / 4 / 5,6 / 8 / 11,2 / 16 / 22,4 / 31,5 / 45 / 63 Série de base + série 2 : 1 / 2 / 4 / 6,3 / 8 / 10 / 12,5 / 14 / 16 / 20 / 31,5 / 40 / 63

#### • Granularité

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant.



**Figure 9** : Exemple de courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons

Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs.

- **Forme des gravillons**

**Coefficient d'aplatissement**

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats.

Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

**Module de finesse**

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granulat est égal au  $1/100$  e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis. Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.



**Figure 10 : Tamis de granulométrie**

## ❖ Caractéristiques physico-chimiques

### • Propreté des granulats

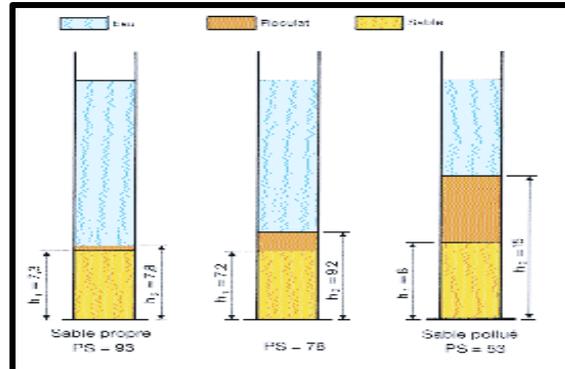
Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.

Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau).

Dans le cas des sables, la propreté (SE) est fournie par l'essai appelé « **équivalent de sable** » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau.

L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de SE est grande, plus le sable est propre).

Elle peut également être évaluée par l'essai au bleu de méthylène (VB) – plus la valeur de VB est petite, plus les sables sont propres.

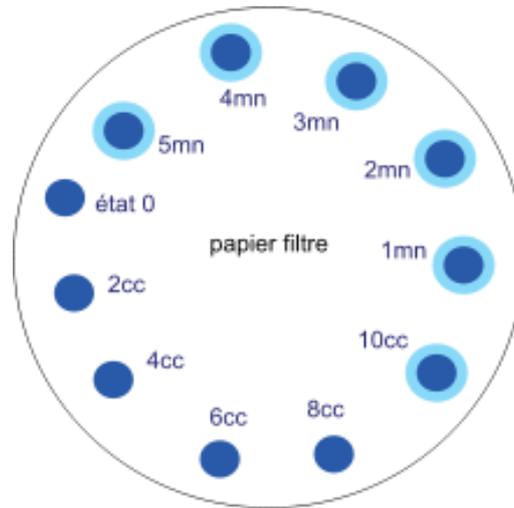


**Figure 11** : Essai équivalent sable



**Figure 12** : Matériel de l'essai équivalent sable

Le bleu de méthylène est adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer.



**Figure 13 :** Essai au bleu de méthylène

La valeur de bleu (VB) exprime la quantité de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines. Il faut souligner l'importance de la propreté des granulats sur la qualité du béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant à la mise en œuvre du béton qu'à ses performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats. D'autres impuretés telles que les particules organiques sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement

Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Les corps étrangers (lignites ou scories) sont à proscrire.

#### ❖ Caractéristiques physiques et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées par des essais visant à reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats. Elles sont donc spécifiées en fonction de leur emploi.

- Porosité

La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.

- Coefficient d'absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau  $A_b$  représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

- **Résistance à la fragmentation des gravillons**

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevée.



**Figure 14 :** Matériel de l'essai de fragmentation (Los Angeles)

- **Résistance à l'usure des gravillons**

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval

M qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient MDE est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

- **Masse volumique en vrac ou apparente**

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre  $1\,400\text{ kg/m}^3$  et  $1\,600\text{ kg/m}^3$  pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée : de  $2\,500$  à  $2\,600\text{ kg/m}^3$ .

**❖ Caractéristiques chimiques****• Teneur en ions chlorures**

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

**• Réactivités aux alcalis**

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali réaction peuvent provoquer un gonflement du béton.

Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimisme (PRP).



**Figure 15 :** Gravillons

**• Teneur en soufre et en sulfates**

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (SO) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %.

Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

### II.4.3 Les adjuvants

Les adjuvants fournissent aux entreprises de béton des possibilités pour modifier les propriétés rhéologiques du béton frais. Ils facilitent leur mise en œuvre et améliorent les propriétés du béton durci.

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, à l'état frais ou durci.



Figure 16 : adjuvant béton

#### ❖ Adjuvant plastifiant-réducteur d'eau

Il permet à consistance égale, une réduction du dosage en eau et, à dosage en eau constant, il permet une augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams. Il améliore l'ouvrabilité et diminue le ressuage du béton frais. Il augmente les performances mécaniques à court et à long terme du béton durci.

#### ❖ Adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau

Sa fonction est identique à celle du plastifiant réducteur d'eau mais la réduction du dosage en eau et l'augmentation de l'affaissement au cône sont plus marquées. Il diminue considérablement la teneur en eau. Il maintient l'ouvrabilité du béton frais dans le temps jusqu'à deux (2) heures. Il améliore les résistances mécaniques à court et long terme et diminue le retrait du béton (dû à la réduction du rapport E/C). Ils sont généralement utilisés dans les bétons courants, les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants, les bétons architectoniques, etc.

**❖ Adjuvant rétenteur d'eau**

Un adjuvant rétenteur d'eau permet de réduire le départ d'eau par ressuage. Le béton frais a tendance à se compacter légèrement et progressivement depuis le moment où il est mis en place dans les coffrages jusqu'au début de prise ; une partie de cette eau remonte en surface.

**Adjuvant entraîneur d'air**

Il permet la formation, au moment du malaxage du béton, d'un réseau uniforme de petites bulles d'air qui subsistent dans le béton durci. Ce type d'adjuvant protège le béton contre les cycles de gel/dégel, sel de déverglaçage. Il améliore la cohésion et diminue la ségrégation du béton. Il facilite la mise en place et améliore l'aspect du béton au décoffrage.

**❖ Adjuvant accélérateur de prise**

Il permet de diminuer le temps du début et le temps de fin de prise du béton. Les accélérateurs de prise servent surtout à maintenir un temps de prise raisonnable par temps froid ; mais réduisent aussi le temps de prise aux températures plus élevées, ce qui peut être un inconvénient lorsque ce temps est insuffisant pour transporter le béton et le mettre en place.

**Adjuvant accélérateur de durcissement**

Il permet d'augmenter la vitesse de développement des résistances initiales du béton. Les accélérateurs de durcissement servent, d'une façon générale, à réduire les délais d'exécution : décoffrage, manipulation des pièces, mise en précontrainte, chargement,

**Adjuvant retardateur de prise**

Il permet de retarder le début de prise et de prolonger l'état plastique où le béton est moulable. Les retardateurs de prise servent à augmenter la durée pendant laquelle le béton peut être transporté et mis en œuvre, à maintenir suffisamment longtemps la consistance recherchée du béton frais ou à améliorer la continuité des reprises de bétonnage.

**Adjuvant hydrofuge**

Il permet de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques. Il est utilisé dans les bétons de fondation, les bétons de radier, les bétons de réservoir.

#### **II.4.4 L'eau**

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation.

L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

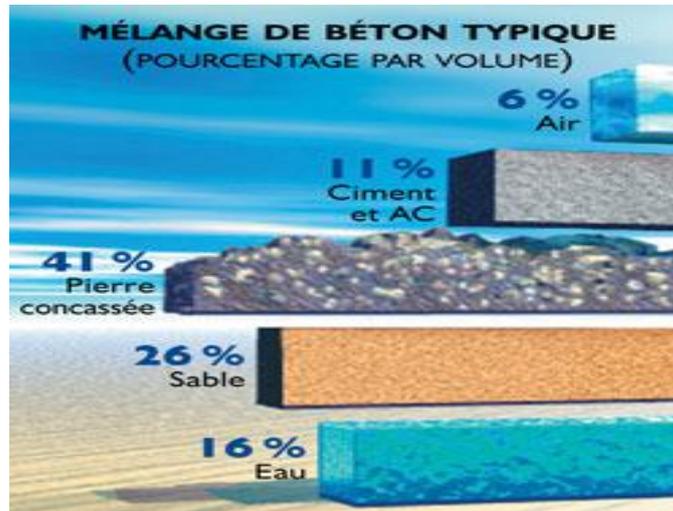
Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303, a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable. [3]

Le rapport E/C est un critère important des études de béton; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances: résistance mécanique à la compression, durabilité.

### **II.5 CONFECTION DE BETON**

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants. Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former,

Avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,...) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton. [4]



**Figure 17 :** Confection de béton

L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de superplastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à atteindre une fluidité suffisante.

Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange. [3]

Le béton peut être :

- Non armé ;
- Armé (béton armé) ;
- Précontraint (béton -précontraint) ou fibres.

La formulation de la majorité des bétons est généralement établie pour atteindre trois objectifs principaux :

- Obtenir une résistance mécanique acceptable ;
- Obtenir un bon écoulement ;
- Limiter les effets secondaires.



**Figure 18 :** Procédure de confection du béton au labo

## II.6 Principaux avantages et inconvénients du Béton

### ❖ Avantages du Béton

- ✚ Il est peu couteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- ✚ Il épouse toutes les formes qui lui sont donnés, des modificateurs et adaptations des projets sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- ✚ Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires .il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- ✚ Associé à des armatures en acier, il acquiert les propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé ; béton précontraint) ;
- ✚ Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

### ❖ Inconvénients du Béton

- ✚ Son poids propre élevé (densité de 2.4 environ peut être réduite à 1.8 dans le cas des bétons légers de structure et à moins de 1.0 dans le cas de béton léger d'isolation) ;
- ✚ Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux) ;
- ✚ Le coût élevé entrainé par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

## CHAPITRE II :

---

### DURABILITE DES BETONS

## I. Introduction

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. On peut distinguer différentes agressions chimiques, physico-chimiques, mécaniques ou thermiques.

L'aptitude des bétons à résister à ces agressions est caractérisée par plusieurs indicateurs de la durabilité (perméabilité à l'eau, perméabilité au gaz, diffusion des chlorures, carbonatation, porosité, résistance en compression, retrait des bétons,...), ces indicateurs de la durabilité correspondent à trois mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou de gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion.

## II. Durabilité des ouvrages en béton

La préoccupation principale, et quasi-exclusive, est de tous temps, la tenue des ouvrages aux efforts de diverses origines qu'ils sont amenés à subir. Mais, par le passé, leur tenue aux influences d'un environnement parfois hostile n'était pas spécialement étudiée ; les codes de conception et de calcul étaient censés avoir tenu compte de ces influences, et la notion de durée de vie était rarement mentionnée dans les appels d'offres. [7]

Pour assurer une durabilité adéquate de la structure, il faut prendre en compte les facteurs interdépendants suivants:

- son utilisation prévue et, éventuellement, une utilisation future différente;
- les critères de performance requis;
- les influences escomptées de l'environnement, c'est-à-dire l'ensemble des actions chimiques et physiques auxquelles est soumis la structure globale ainsi que ses éléments constitutifs, et dont les effets ne sont pas inclus dans les hypothèses de charge considérées lors du calcul structural;
- la composition, les propriétés et les performances des matériaux;
- le choix du système structural;
- la forme des éléments structuraux et les dispositions constructives;
- la qualité de la mise en œuvre et le niveau de contrôle;
- les mesures de protection spécifiques;
- la maintenance pendant la durée de vie escomptée.

La définition et les spécifications des bétons sont fixées par le prescripteur ; elles doivent entre autre prendre en compte :

- les agressions liées à la carbonatation et à la pénétration des chlorures (en présence de sels),
- la prévention des désordres dus aux gonflements internes du béton (alcali-réaction et réaction sulfatiques interne),
- la durabilité des bétons durcis soumis au gel en présence ou non de sels de déverglaçage. [5]

Les caractéristiques induites sont à contrôler à l'exécution pour assurer la durabilité de l'ouvrage.

### III. Principaux dégradations de béton

#### III.1 Corrosion des armatures

- Définition

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Les ouvrages en béton armé sont conçus et construits pour durer, mais ils se dégradent par le mécanisme de corrosion sous l'effet de l'agressivité de l'environnement au quel ils sont exposés.

La corrosion des aciers dans le béton est l'une des principales pathologies des ouvrages de génie civil. Elle entraîne des coûts très importants de maintenance, de réparation et peuvent dans certain cas mettre en cause la sécurité des structures et des usagers. [5]

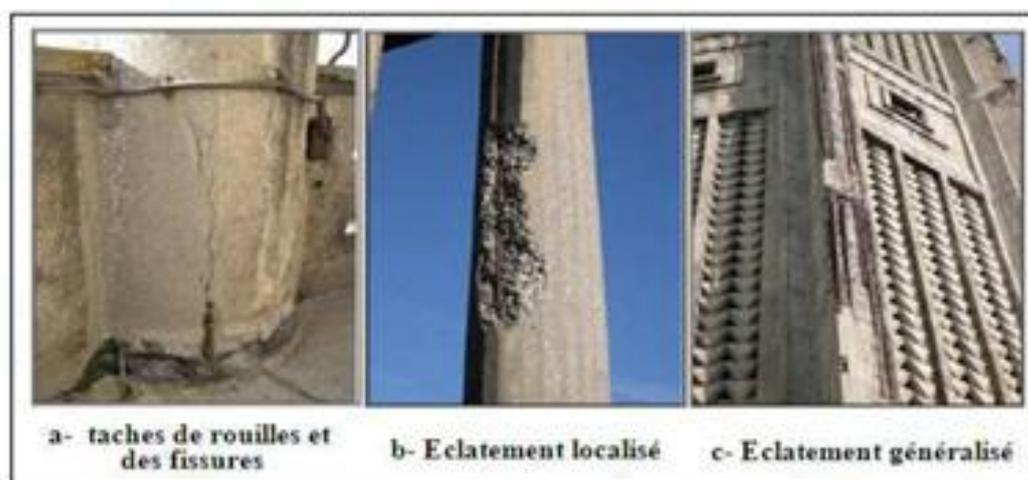


Figure 19 : Corrosion des armatures

- **Principe de corrosion des aciers dans le béton**

Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité des ouvrages dépend essentiellement du tenu des armatures à la corrosion. Afin de bien comprendre le phénomène de corrosion des aciers dans le béton, on définira le matériau béton armé et la corrosion, et on décrira le mécanisme de corrosion des aciers dans le béton. [5]

- **Le béton armé:**

Connue depuis l'antiquité romaine, le BA aujourd'hui est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. D'abord employé en complément ou en substitution de la pierre, la complémentarité entre béton-acier, à la fois mécanique et chimique a permet de construire de façon plus économique et fiable les ouvrages nécessaire de toutes les activités humaines.

- **La corrosion:**

Le terme corrosion provient de latin corroder qui signifier ranger, attaquer. la corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interaction physicochimique entre le métal et l'environnement provoquant des modifications de ces propriétés accompagnées d'une dégradation fonctionnelles de ce dernier (altération de ces propriétés mécaniques, électrique et esthétique).

### III.2 Phénomène de carbonatation

Le CO présent dans l'air pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures et, en présence d'eau dans les pores,

Abaisse le pH (initialement de 13) de la solution interstitielle du béton à 9 par réaction avec la pâte de ciment hydratée et notamment la portlandite :



**Figure 20 :** Exemple de carbonatation de béton

Au fur et à mesure de la progression du front de carbonatation, les armatures initialement protégées par une couche d'oxyde de fer (liée à l'alcalinité de la solution interstitielle) sont alors dépassivées et le phénomène de corrosion s'initie.

La carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est modérée (cycle séchage/humidité). Après environ 30 ans, la profondeur de carbonatation dans un béton d'ouvrage peut varier de 1 à 30 mm suivant la compacité du béton, la fissuration de peau et le milieu environnant.

### III.3 Phénomène de pénétration des chlorures

- En pénétrant dans le béton par diffusion, les chlorures réagissent avec les hydrates ( $\text{Ca}(\text{OH})$  notamment) de la pâte de ciment, ce qui conduit à la dépassivation et à la corrosion des armatures.
- La pénétration des chlorures est favorisée par des cycles séchage/humidité également.
- Distinction entre chlorures libres sous forme ionique dans la solution interstitielle (extractibles à l'eau) et chlorures totaux (extractibles à l'acide).
- Seuls les chlorures libres (solubles dans l'eau) peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de corrosion des armatures. [4]

La corrosion induite par la pénétration des chlorures est donc fonction de :

- La quantité initiale de chlorures dans le béton
- L'exposition des parements aux chlorures ET à l'eau
- La qualité du béton en place (compacité), et en parement avec l'absence de ségrégation, de bullage ou de fissuration (retrait gêné, dessiccation)
- L'enrobage du premier lit d'armature [4]



**Figure 21** : Principe de corrosion des armatures

La corrosion s'accompagne généralement d'un gonflement des armatures qui génère une fissuration accrue et des éclatements du béton en parement, ce qui accélère le processus de dégradation. [4].

### III.4 Phénomènes d'attaque gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage

L'action des cycles de gel-dégel produit deux principaux types de détériorations du béton:

- La fissuration interne.
- L'écaillage des surfaces.

Ces deux types de dégradations ont pour origine des processus différents et ne surviennent pas nécessairement en même temps lorsque les bétons sont exposés aux cycles de gel-dégel.

Le déroulement de phénomène : gel-dégel :

- Présence d'eau non combinée dans le réseau de capillaires du béton.
- Gel de l'eau vers - 3 à - 4°C (gros capillaires).
- Pression hydraulique sur l'eau des petits capillaires restée à l'état liquide, du fait de l'augmentation de volume (9%) lors de la transformation d'eau en glace.
- Pression osmotique liée à la diffusion des sels de déverglaçage dans le milieu interstitiel de la peau du béton.

Lorsque les pressions hydrauliques et/ou osmotiques deviennent supérieures à la résistance à la traction du béton, celui-ci se fissure : fissuration dans la masse (feuilletage parallèle aux faces) ou écaillage de surface. [4]



**Figure 22** : Phénomène d'attaque gel-dégel

### III.5 Lixiviation du béton

- **Définition**

Le phénomène de lixiviation des bétons correspond à un lessivage des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides. Les constituants hydratés de la pâte de ciment des bétons forment un milieu basique, le pH de leur solution interstitielle étant de l'ordre de 13.

Dans ces conditions, la majorité des milieux fluides présente un caractère acide vis-à-vis du béton, entraînant ainsi des déséquilibres chimiques susceptibles d'aboutir notamment à une mise en solution des hydrates. Les milieux, naturels ou pas, pouvant conduire à des phénomènes de lixiviation correspondent aux eaux pures, aux eaux douces, aux pluies acides et aux milieux plus franchement acides (acides minéraux et organiques, eaux résiduaires). Le pouvoir lixiviant d'un milieu est proportionnel à son acidité vis-à-vis du béton. [5]



Figure 23 : Aspect d'une surface en béton ayant été soumise au phénomène de lixiviation

- **Conséquences de la lixiviation**

Les conséquences de l'attaque des bétons par des eaux pures, des eaux douces ou des eaux solutions acides, peut conduire à une augmentation de la porosité due à la lixiviation des hydrates de la pâte de ciment, éventuellement associée au développement d'une microfissuration en relation, le cas échéant, avec la formation de composés expansifs tels que l'ettringite secondaire par exemple. [5]

Cette modification de la microstructure des bétons entraîne donc une modification des performances mécaniques dans la zone d'interaction entre le milieu agressive et le béton, par rapport aux caractéristiques d'origines du matériau :

- ❖ Diminution des résistances à la compression et à la traction.
- ❖ Diminution du module de Young.
- ❖ Augmentation du fluage.

- **Eaux agressives**

Dans le ciment, les agrégats sont solidarisés par des mélanges complexes de silicates de calcium et d'aluminium et de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . De tous les constituants hydratés du ciment, la chaux est le plus soluble. Les éléments agressifs la dissolvent et entraînent ainsi l'augmentation de la porosité du béton et la corrosion des armatures métalliques sous-jacentes.

Les eaux douces, caractérisées par un excès de  $\text{CO}_2$  libre, solubilisent donc la chaux et transforment les silicates de calcium hydratés en silicates plus pauvres en oxyde de calcium jusqu'à obtention d'un gel sans pouvoir liant. La vitesse de la dégradation augmente avec le temps car la porosité du béton s'accroît.

Inversement, les eaux incrustantes ont tendance à former, au contact du ciment basique, un dépôt de carbonate de calcium dans les pores du matériau. [5]

#### **IV. Maitrise de durabilité de béton**

La durabilité des bétons de ciment exige un contrôle efficace et effectif de tous les facteurs susceptibles d'affecter son comportement dans le temps. L'expérience montre que les facteurs d'influence, de très loin les plus importants en matière de durabilité et qui doivent donc faire l'objet d'un contrôle suivi, sont:

- La composition du béton (teneur en ciment et rapport eau-ciment)
- L'enrobage des armatures
- La compacité du béton
- La protection du béton frais en cours de durcissement.

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. Plus la résistance du béton augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité augmente.

Les transferts dans une pièce de béton durci s'établissent par l'intermédiaire :

- D'un réseau poreux, qui apparaît normalement dans la structuration de la pâte au cours de son hydratation.
- D'un réseau de fissure qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé (dalle, poutre). Dans ce cas la capacité de pénétration de ces agents dans le béton facilite la détérioration de la structure.

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.

La compacité du béton influence directement sa porosité. Cette dernière est généralement contrôlée sur béton durci par la mesure de l'absorption d'eau par immersion. En outre, la norme NBN B 15-001:2004 permet aujourd'hui de prescrire des bétons à performances en intégrant des spécifications d'absorption d'eau par immersion. Maîtriser l'absorption d'eau du béton peut paraître simple, mais encore faut-il que chacun apporte sa pierre à l'édifice. La durabilité des ouvrages en béton est pourtant à ce prix.

Les paramètres principaux permettant de garantir les critères d'absorption d'eau par immersion de la norme NBN B 15-001:2004. A la lumière des connaissances actuelles sur le sujet, cette étude va examiner l'absorption d'eau des bétons comme critère de leur durabilité application aux bétons des ouvrages d'arts.

## **V. Notion de porosité et l'absorption d'eau**

### **V.1 Introduction**

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

La porosité est la conséquence naturelle de la quantité d'eau mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation et des vides éventuels présents dans les granulats. Le désagrément de cette porosité se marque à deux niveaux : sur la résistance mécanique et sur la durabilité du béton. La quantité d'eau pouvant être liée chimiquement par un ciment Portland est d'environ 25 % de la masse de ciment.

L'eau liée physiquement s'évapore complètement dans une étuve à 105 °C, mais, malgré cette liaison libre, elle est incapable de réagir avec le ciment non encore lié.

De plus, les produits d'hydratation occupent un volume absolu inférieur à la somme des volumes absolus de l'eau et du ciment qui ont déjà réagi de l'espace s'est donc libéré : ce sont les pores capillaires. Ceux-ci sont vides ou remplis d'eau. En effet, pour une bonne ouvrabilité du béton, le facteur E/C Du béton est généralement supérieur à 0,40.

Une Partie de l'eau n'est donc pas liée chimiquement ni physiquement et s'installe dans les pores capillaires (eau interstitielle), d'où elle peut éventuellement s'évaporer ultérieurement. [7]

Cette formation de pores capillaires signifie un affaiblissement mécanique du béton. Etant donné que des substances agressives peuvent s'infiltrer aisément dans le béton via ce réseau capillaire, la durabilité s'en trouve influencée de manière négative.

La porosité d'un matériau représente le volume de tous les capillaires cumulés. Il est important de bien faire la distinction entre porosité et perméabilité. C'est ainsi qu'un matériau peut être peu poreux et à la fois très perméable (par exemple un béton à structure semi-caverneuse) ou, au contraire, être relativement poreux mais ne pas se laisser traverser par la moindre goutte d'eau (cas d'un béton compact mais de qualité très moyenne).

## **V.2 Porosité de béton**

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise le béton. Ce n'est pas l'unique paramètre mais c'est celui qu'il faut déterminer en premier lieu car il va conditionner toutes les propriétés du béton comme la résistance en compression mais aussi les indicateurs de durabilité.

Les bétons sont des matériaux à base cimentaire plus ou moins poreux dont la porosité diminue au fur et mesure de l'avancement de l'hydratation (remplissage des pores par les hydrates formés). Mais, la valeur de la porosité n'explique pas tous les phénomènes de transfert : la connaissance de la taille des pores est tout aussi essentielle. En effet, il existe deux catégories distinctes de pores:

- les pores capillaires dont le diamètre est supérieur à  $0,02 \mu\text{m}$  et qui sont les vestiges des espaces inter granulaires de la pâte à l'état frais ; la porosité capillaire est donc liée à l'hydratation et dépend du rapport E/C et de l'âge du matériau.
- les micropores ou pores de gel dont le diamètre est inférieur à  $0,02 \mu\text{m}$  et qui sont une caractéristique intrinsèque de l'hydrate ; cette microporosité, au contraire de la précédente dépend faiblement du rapport E/C et est essentiellement due aux C-S-H.

La pâte de ciment s'hydrate uniquement grâce à l'eau de la porosité capillaire car l'eau des micropores est peu réactive. De plus, il faut noter qu'il existe un réseau de pores à l'intérieur du matériau qui est relié à l'extérieur et permet des échanges : il y a donc des phénomènes de transfert entre le matériau et son environnement.

D'autre part, le réseau poreux ne se résume pas uniquement à la valeur de porosité et de taille de pores. En effet, le réseau poreux est beaucoup plus complexe qu'il n'y apparaît avec les termes de tortuosité et de connectivité. [14]

On peut classer les pores en trois familles :

- les pores interconnectés ou communicants, qui forment la porosité dite ouverte et qui permettent un passage continu à travers le réseau poreux et sont disponibles pour l'écoulement des fluides,
- les pores non interconnectés ou isolés, qui forment la porosité fermée, sans liaison avec le milieu extérieur,
- les pores aveugles ou bras morts, qui ne sont uniquement accessibles que par une extrémité ; bien qu'accessibles de l'extérieur, ils ne peuvent pas contribuer au transport par perméation. [14]

### V.3 Perméabilité des bétons

La perméabilité et la diffusivité sont complémentaires et traduisent la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous un gradient de pression motrice.

Bien que la perméabilité d'un milieu poreux dépende fortement de sa porosité, d'autres paramètres du réseau poreux l'influencent également. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : la connectivité, la tortuosité, ainsi que la constrictivité du réseau poreux liée à la taille des pores. L'effet de ces paramètres vis-à-vis de la résistance au flux est montré sur la Figure 2.9 d'après [Scrivener, 2001].

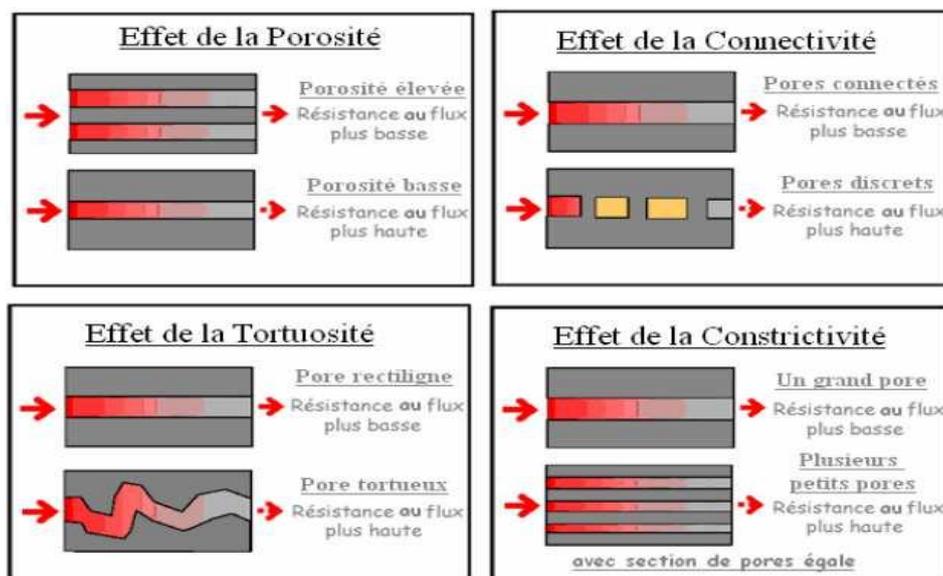


Figure 24 : Effet des paramètres influençant la perméabilité

La perméabilité du béton dépend de ses constituants (type, quantité) et est donc fonction :

- ✓ du rapport Eau / Ciment, directement lié à la porosité capillaire d'après [Hearn et al. 1997], toutefois, on ne connaît pas exactement l'influence des additifs dans la pâte de ciment (fumées de silice, laitiers ou cendres volantes) sur la perméabilité.
- ✓ de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent respectivement créer l'auréole de transition et modifier la tortuosité.

Par ailleurs [Abbas et al. 2000] ont démontré expérimentalement que les relations empiriques, qui ont pu être établies par d'autres chercheurs pour certains bétons entre la perméabilité et la résistance mécanique, ne peuvent pas être généralisées.

En effet, la résistance en compression est fonction de la porosité totale du matériau, tandis que la perméabilité dépend pour l'essentiel de la porosité connectée.

Lors de la percolation à travers un béton d'ouvrage fissuré, le flux peut se produire dans le réseau poreux, comportant des pores initiaux (cavités volumiques) ainsi que dans des fissures (cavités surfaciques) induites par le retrait au jeune âge, le séchage, les effets de sollicitations mécaniques, thermiques, environnementales (chimiques), différées, etc. subies au cours de la vie de l'ouvrage. Ces fissures augmentent et interconnectent généralement les chemins de percolation et diminuent ainsi la résistance du milieu au flux, provoquant une augmentation de la perméabilité. [14]

#### **V.4 Absorption d'eau**

Le transfert de liquides dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface dans les capillaires, est appelé l'absorption d'eau. L'absorption mesure le volume poreux du matériau, qui est indépendamment de la facilité avec laquelle un fluide peut le

Traverser [Krus 1997]. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides a lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton [AFPC 1997].

En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa

masse au cours du temps [**Norme 13369**]. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton [**AFPC 1997**].

Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire. Le mécanisme de l'absorption d'eau est décrit par l'équation :

$$i = (C) S t$$

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible même si dans ce cas d'étude l'éprouvette est pré-séchée. L'évaluation du comportement des bétons face à ce mécanisme de transfert permet de compléter et d'approfondir l'analyse des propriétés caractéristiques de leur durabilité.

Les écarts observés dans la mesure de l'absorption sont liés aux températures de séchages :

- températures ordinaires inefficaces pour retirer toute l'eau du béton.
- températures élevées peut retirer une partie de l'eau combinée chimiquement.

L'absorption ne peut pas être utilisée comme une mesure de la qualité du béton (absorption d'un bon béton est inférieure à 10% en masse). Les essais d'absorption utilisée souvent pour des mesures de contrôles de la qualité sur des produits préfabriqués d'après [**Hearn et al., 1997**].

- **Etat des connaissances sur la capillarite**

La capillarité intervient quand le béton est en contact avec une phase liquide. Ainsi, de l'eau peut être absorbé et retenue dans les pores du béton sous l'effet des forces des ménisques qui résultent des tensions interraciales solide/liquide/gaz.

Ayant une structure poreuse non uniforme qui évolue dans le temps et selon les conditions d'exposition, ainsi qu'un état hygrométrique difficile à établir, les bétons présentent un comportement hydrique difficilement modélisable. [**14**]

- **Modélisation du processus de capillarité**

Plusieurs approches du processus de capillarité des matériaux à matrice cimentaire ont été proposés pour les bétons, On peut voir qu'il existe un effet de ralentissement de l'absorption au cours du temps.

Les résultats de la cinétique d'absorption sont énoncés par les deux paramètres suivants : par la hauteur du front d'imbibition capillaire  $z(t)$  ; par la quantité d'eau absorbée par unité de surface  $\Delta m(t)/S$ . La figure 27 a représenté un exemple illustratif de la cinétique d'absorption en fonction du temps (en heures) exprimée en terme de  $z(t)$  et  $\Delta m(t)/S$  pour un béton ayant subi une cure dans l'eau pendant 3 jours.

La pente décroissante des deux courbes indique qu'au fur et à mesure de l'essai ce sont les capillaires de plus en plus fins qui sont intéressés par le processus d'absorption d'eau. En exprimant la variation de  $z(t)$  et de  $\Delta m(t)/S$  en fonction de la racine carrée du temps, les deux allures ont à peu près une tendance linéaire. En effet, deux paramètres peuvent être dégagés à partir de ces tracées [Balayssac et al. 1993].

La première partie des courbes située entre 0 et 1 h, traduit le remplissage des plus gros pores. On peut caractériser ces plus gros pores à partir de l'absorption initiale (quantité d'eau absorbée entre 0 et 1 h). La pente de la droite située entre 0 et 1 heure sera caractérisée par un coefficient  $A_{bi}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1/2} = \text{mm.h}^{-1/2}$ ) et  $z_i$  ( $\text{mm.h}^{-1/2}$ ).

On note ici que  $1\text{kg d'eau} = 10^{-3} \text{ m}^3$ . [14]

La seconde partie des courbes qui se prolonge au-delà d'une heure caractérise le remplissage des capillaires internes, ce processus de remplissage se fait des plus gros capillaires au plus fins. La pente de la droite dans cette partie caractérise d'après [Hall C et al. 1986], les coefficients de sportivité (ou absorptivité) et de capillarité  $k_c$  ( $\text{mm.h}^{-1/2}$ ) ( $\text{kg.m}$ ).

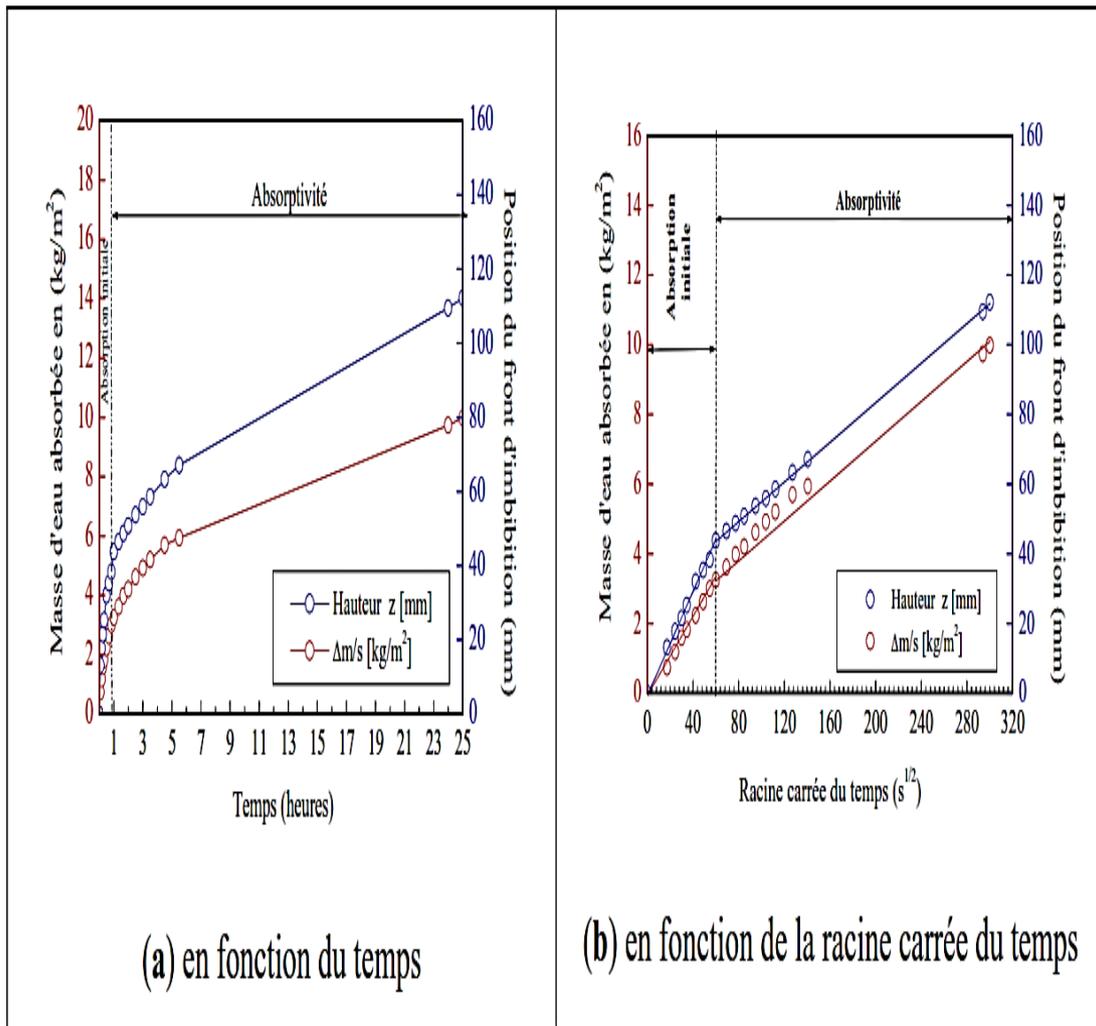
En se référant à La figure 25 b on montre bien l'évolution linéaire de la cinétique d'absorption d'eau du béton en fonction de la racine carrée du temps. Les équations des droites  $z(\sqrt{t})$  et  $i(\sqrt{t})$  sont exprimées par:

$$z(t) = k_c \times \sqrt{t} + z_0$$

$$i(t) = \Delta m(t)/S = S_c \times \sqrt{t} + i_0$$

Où  $k_c$  représente le coefficient de capillarité qui caractérise la cinétique d'avancement du front d'imbibition capillaire caractérise d'après [Hall et al. (1981 après le contact de

la surface d'éprouvette avec la nappe d'eau. Ce terme décroît en fonction de la compacité du béton.



**Figure 25 :** Cinétique d'absorption d'eau en fonction du temps et de la racine carrée du temps pour différents type de béton.

Il apparait possible qu'une contraction des pores gel de ciment soit responsable de la non linéarité de l'absorption de l'eau sur la racine carré du temps .

- Dans le cas d'une très faible succion, le gradient de potentiel de capillarité est comparable à celui de la gravitation.

Le modèle proposé par Shonlin d'après [Balayssac 1992] semble aussi être bien adapté au béton :

$$w = w_1 \cdot t^n$$

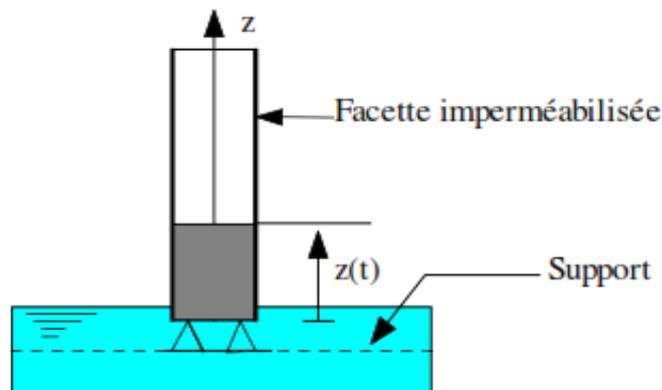
- $w$  est la quantité d'eau absorbé à l' instant  $t$  en kg,
- $w_1$  : est la quantité d'eau absorbée après 1 heure en kg,
- $t$  : est le temps en heure,
- $n$  : est un exposant caractéristique du béton testé.

Les conclusions principales qui ressortent de la littérature sont les suivantes :

- 1) La quantité d'eau absorbé par capillarite est fortement conditionne par la répartition pomométrique dans le domaine des gros pores. L'examen des courbes d'absorption d'eau permet donc de classer les matériaux en fonction de la taille moyenne de leurs plus gros capillaires;
- 2) Les capillaires des bétons ont des rayons moyens compris entre environ 0,01 et 100  $\mu\text{m}$ , domaine qui correspond à l'absorption d'eau par capillarité. L'essai permet donc de suivre l'évolution de la porosité globale d'un béton [Balayssac 1992];
- 3) Le remplissage d'un capillaire est d'autant plus rapide que son diamètre est important. Sur la courbe « masse d'eau absorbé - racine carré du temps », [14]

On peut distinguer deux parties :

L'absorptivité est représentative du développement de la microstructure de la phase liante du béton. Voir la figure 32



**Figure 26** : L'absorption d'eau unidirectionnelle par des matériaux poreux :  
l'absorption d'eau par succion capillaire est opposée à la gravitation.

- **Méthodes de mesure de la capillarité**

Une partie des normes impose un séchage préalable des échantillons à des températures élevées (norme britannique, norme belge). En revanche, la

Recommandation de la [**Rilem Recommendations 1994**] exige que la détermination de l'absorption capillaire soit effectué après une stabilisation de la masse des éprouvettes (conservées 28 jours, 20°C et H.R. = 55%).

L'absorption est déterminée lors d'une immersion totale dans l'eau ou par succion d'une seule face. Les variations de la masse sont suivies par des pesées successives selon une période de mesures variant entre 30 et 72 heures [**Krus 1997**],[**Butler 1997**]. Un appareil d'essai construit récemment l'Université de Glamorgan en Grande

Bretagne, permet d'enregistrer automatiquement sur un micro-ordinateur le gain de masse d'une éprouvette en contact avec l'eau et de calculer l'absorptivité .

Cette méthode pourrait permettre d'éviter la perturbation de la succion capillaire liée aux déplacements de l'éprouvette. [14]

PARTIE B :  
ETUDE EXPERIMENTALE

---

CHAPITRE I:  
CARACTERISATION ET FORMULATION DU BÉTON

## I. Introduction

Dans cette partie nous allons déterminer les caractéristiques essentielles des différents constituants entrant dans la composition du béton. La connaissance de ces caractéristiques est primordiale à toute recherche ou étude, puisque chacune de ces caractéristiques peut influencer sur les résultats de l'étude. C'est pour cette raison que nous allons procéder à la caractérisation de chaque constituant de notre béton.

On a abordé aussi dans ce chapitre, la composition des différents bétons en adoptant la méthode pour trouver la meilleure formulation de béton en terme stabilité et ouvrabilité maximale, avec présentation de tous les mélanges retenus dans cette étude.

## II. Matériaux de base utilisés

### II.1 Provenance de matériaux

Les matériaux de base utilisés sont de provenance suivante:

- Sable 0/3 : oued de Ouled Djelal wilaya Biskra ;
- Gravier 8/15 concassés : Carrière Foughala wilaya Biskra;
- Gravier 15/25 concassés : Carrière Foughala wilaya Biskra;
- Eau de gâchage : eau potable;
- Le ciment est de classe NA 442 CEM I 42.5N – SR3 Lafarge ;

### II.2 Ciment utilisé



Figure 27 : Ciment MOKAOUEM PLUS Lafarge

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail est désigné sous le nom de **MOKAOUEM PLUS**. Ce dernier est un ciment composé, de classe 42.5 et de sous classe A.

Il contient donc environ un tiers d'ajouts minéraux. [15]

Le ciment CEM I 42.5N – SR3 est spécialement recommandé pour la construction

- Les bétonnages par temps froid.
- La préfabrication.
- Le bâtiment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport, etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, station d'épuration, dessalement.) ;
- Secteur industriel. [16]

#### ❖ Fiche technique de Ciment utilisé (MATINE)

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail est un ciment composé, de classe 42.5 et de sous classe B. Il contient donc environ un tiers d'ajouts minéraux.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO<sub>2</sub>) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et le fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Sa composition chimique et minéralogique est résumée dans les tableaux suivants.

**Tableau 6** : Caractéristiques physiques et mécaniques

Caractéristiques physiques et mécaniques		
Surface spécifique Blaine		4200 cm <sup>2</sup> /g
Masse volumique		3.13 g/cm <sup>3</sup>
Demande en eau		28 %
Temps de début de prise		3 h 00
Résistance à la compression à		
	Moy.	Normes
1 jour	17 MPa	
2 jours	29 MPa	> 20 MPa
7 jours	44 MPa	
28 jours	55 MPa	> 42.5 MPa
Clarté		66 L*

**Tableau 7** : Caractéristiques chimiques de ciment

Caractéristiques chimiques		
	Moy.	Normes
SiO <sub>2</sub>	18.8 %	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.2 %	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1 %	
CaO	61.6 %	
MgO	2.1 %	
SO <sub>3</sub>	2.9 %	< 4 %
K <sub>2</sub> O	0.75 %	
Na <sub>2</sub> O	0.10 %	
Cl <sup>-</sup>	0.05 %	< 0.1 %
% Na <sub>2</sub> O eq	0.59 %	
Perte au feu	6.5 %	
Résidu insoluble	0.65 %	

Sa finesse et sa clarté en font un excellent ciment pour les voiles en béton apparent.

### II.3 Eau

L'eau utilisé est l'eau potable, distribuée par le réseau du service public de la ville de Biskra qui ne contient que peu de sulfate, et ayant une température de  $20 \pm 2$  °C. Sa qualité et ses caractéristiques sont conformes aux exigences de la norme NFP 18-404.

### II.4 Sable

Le sable utilisé (0/3 mm) est de la région de Djamaa (wilaya d'Oued). Densité apparente =  $1.590 \text{ kg/m}^3$  densité spécifique =  $2620 \text{ kg/m}^3$  module de finesse = 2,82 (sable convient pour une maniabilité satisfaisante et présente un risque limité à la ségrégation), son équivalent de sable (visible) = 91.00 (sable argileux de propreté acceptable pour les bétons de qualité courante).

### II.5 Gravier

Les fractions de gravier qui sont utilisés (8/15 et 15/25 mm), de la carrière de Biskra ) . la densité apparente =  $1340 \text{ kg/m}^3$  densité spécifique =  $2610 \text{ kg/m}^3$  et le coefficient de Los Angeles = 20% (roche dur).

#### Caractéristiques physiques de gravier :

- Pour gravier 8/15

La masse volumique

• apparente =  $1.26 \text{ g/cm}^3$  et  $1.26 \text{ g/cm}^3$  • absolu =  $2.66 \text{ g/cm}^3$

- Pour gravier 15/25

La masse volumique

• apparente =  $1.36 \text{ g/cm}^3$  et  $1.35 \text{ g/cm}^3$  • absolu =  $2.68 \text{ g/cm}^3$ .

### III. Caractéristiques physiques des granulats

#### • Masse volumique

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant.

**Tableau 8 : Masse volumique de granulats**

Constituants	Masse volumique Absolue (T/m <sup>3</sup> )	Masse volumique Apparente (T/m <sup>3</sup> )
<b>Sable 0/3</b>	2.61	1.34
<b>Gravier 8/15</b>	2.66	1.26
<b>Gravier 15/25</b>	2.68	1.36

#### • Analyse granulométrique

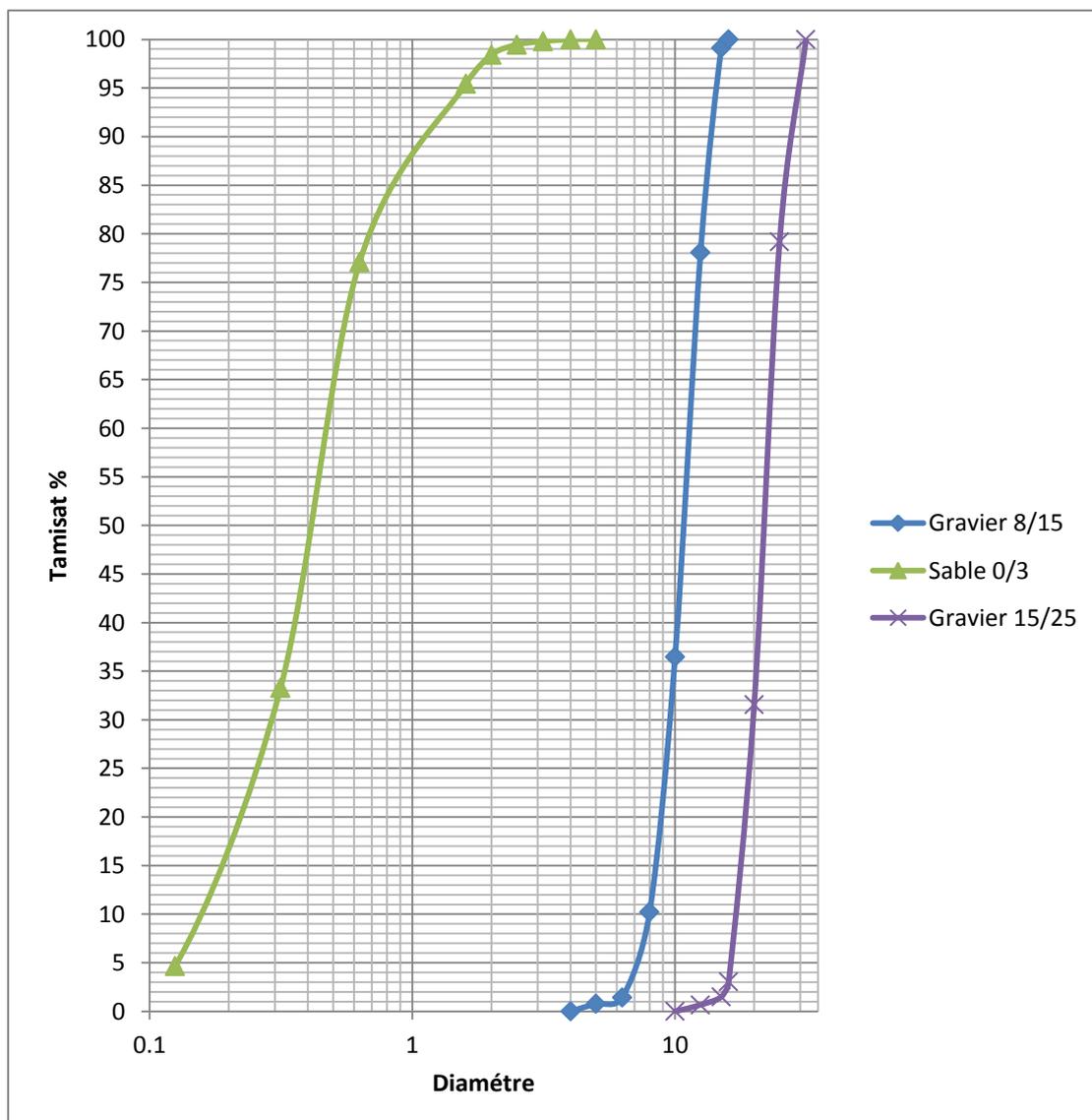
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant.

**Tableau 9 : Analyse granulométrique des granulats**

Diamètre	Sable 0/3	G 8/15	G 15/25
0	0		
0.063	1.40		
0.125	4.67		
0.315	33.29		
0.630	77.09		
1.6	95.44		
2	98.42		
2.5	99.45		
3.15	99.8		
4	100	0	
5	100	0.78	
6.3		1.43	
8		10.21	
10		36.48	0
12.5		78.07	0.67
15		99.13	2.91
16		100	3.06
20			31.56
25			79.18
31.5			100

**Tableau 10** : Autres caractéristiques physiques des granulats

ESSAI	Sable 0/3	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Taux de Fins (%)	8.33	0.97	0.58
Coefficient d'aplatissement ( Ap)	/	9.92	8.86
coefficient d'absorption(Ab)	0.93	0.52	0.47
Module de finesse (MF)	8.33	/	/
Equivalent de sable (%)	57.27	/	/
Valeur de BM (g/Kg)	1	/	/
Los angeles	/	23	24

**Figure 28** : Courbe granulométrique

### III.1 Etude de la composition du béton :

Une formulation de béton durable dans son environnement, c'est essentiellement un béton qui soit le plus possible compact et faiblement perméable. Les méthodes de formulation des bétons courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une consistance fixée.

Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition du béton, on a utilisé celle qui semble être la moins connue. C'est la méthode de B. Scramtaiv. Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé [MEZGHICHE 1989].

Cette méthode repose sur l'effet qu'un béton lourd, damé à l'état frais, se rapproche de la compacité absolue, ce qui signifie que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un m<sup>3</sup> est égale au volume de la composition du béton damé.

Les données d'origine servant à calculer la composition du béton sont :

- La classe de résistance requise (R)
- Le degré de fluidité ou de consistance ainsi que la caractéristique des matériaux d'origine.
  - 1- Activité (R<sub>cb</sub>) et masse spécifique du ciment ;
  - 2- Masses volumiques et spécifiques du sable, des granulats et la porosité des granulats.

#### Le calcul de la composition :

- La définition du rapport C/E :

Béton à :  $C/E < 2,5$   $R_b = A.R (C/E + 0,5)$ ;

Béton à :  $C/E > 2,5$   $R_b = A_{1c}.R_c (C/E + 0,5)$ .

A et A<sub>1</sub> : Coefficients définis dans le tableau suivant :

**Tableau 11** : Coefficients A et A<sub>1</sub> en fonction de la qualité des granulats et liant

Agrégat et liants	A	A <sub>1</sub>
Qualité supérieure	0.65	0.43
Qualité ordinaire	0.60	0.40
Qualité inférieure	0.55	0.37

• **La détermination de la dépense d'eau (E) :**

La quantité optimale d'eau dans un mélange de béton ( $l/m^3$ ) doit garantir la fluidité nécessaire du mélange et qui dépend de la qualité des matériaux d'origine, tel que : affaissement - maniabilité et grosseur du gravier, ceci pour les bétons au ciment portland, au sable et au gravier utilisé comme gros agrégat dans des conditions différentes. La quantité d'eau augmente en cas d'utilisation d'un ciment portland Pouzzolanique de 15 à 20  $l/m^3$ , pour le gravier de 10  $l/m^3$  et pour le sable fin de 10  $l/m^3$ .

• **La détermination de la dépense en ciment (C),  $C : C = (C/E).E$**

Cette dépense ne peut être inférieure aux limites minimales admises par les normes, si la dépense de ciment est inférieure à la quantité admise, il faut augmenter jusqu'à la norme on introduit un adjuvant finement broyé.

• **la détermination de la dépense en agrégats PC**

(Graviers et sable par  $m^3$  de béton), On doit remplir deux conditions :

- 1- La somme des volumes absolus de tous les composants du béton est égale à 1m<sup>3</sup> (1000 l) du mélange de béton damé :

$$C/\rho_c + E/\rho_e + S/\rho_s + PC/\rho_{pc} = 1000$$

C, E, S, PC étant le contenu de ciment, d'eau, de sable et de gravier, en kg/m<sup>3</sup>

;  $\rho_c, \rho_e, \rho_s, \rho_{pc}$  respectivement les masses spécifiques de ces matériaux, en kg/m<sup>3</sup>

- 2- La solution ciment sable remplira les vides dans les gros agrégats avec un certain écartement des grains.

$$C/\rho_c + S/\rho_s + E = V_{cav\ pc\ (gr)} \cdot PC\ (granulat) \cdot \alpha/\gamma_{vol\ pc\ (gr)}$$

En résolvant ces deux équations, on trouve :

$$PC\ (gr) = 1000 / (V_{cav\ pc\ (gr)} \cdot \alpha/\gamma_{vol\ pc\ (gr)} + 1/\rho_{pc\ (gr)})$$

- $V_{cav\ pc\ (gr)}$  étant la porosité des graviers à l'état meuble (valeur relative).
- $\gamma_{vol\ pc\ (gr)}$  : la masse volumique du gravier en kg/l.
- $\rho_{pc\ (gr)}$  : la masse spécifique du gravier en kg/l.
- $\alpha$  : le coefficient d'écartement des grains des granulats.

On déduit la dépense de sable comme la différence entre le volume du mélange de béton établi par le projet et la somme de volumes absolus de l'agrégat gros, du ciment et d'eau.

$$S = [1000 - (C/\rho_c + E + PC\ (gr)/\rho_{pc\ (gr)})] \cdot \rho_s$$

Afin de répondre à notre objectif, six séries de béton ont été confectionnées en faisant varier le Rapport (eau/ciment) de 0.4 à 0.6.

Nous avons fixé le même critère d'ouvrabilité à tous les bétons confectionnés afin de mener une étude rationnelle. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme NF P 18-451 est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables, de variabilité restreinte. En fonction des affaissements obtenus, la classe d'ouvrabilité des différents bétons est plastique (l'affaissement varie de 6 à 7 cm).

### **Application :**

Exemple pour  $E/C = 0.4$

- Pour  $E/C = 0.4$  :
  - ⇒  $C = 200/0.4 = 500$ ;
  - ⇒  $\alpha = 1.52$
  - ⇒  $P_c = 1036 \text{ kg/m}^3$
  - ⇒  $S = 683$ .

### **Pour une éprouvette cubique $V = 0.012 \text{ m}^3$ on trouve**

$$\text{Pour } C = 500. \quad \frac{500}{1000} \cdot 1 \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad X = 0.6 \text{ kg}$$

$$X \cdot 1000 = 0.012$$

- Sable  $S = \frac{683}{1000} \cdot 1 \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad X = 0.795 \text{ kg}$
$$X \cdot 1000 = 0.012$$

- Eau  $E = \frac{200}{1000} \cdot 1 \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad X = 0.24 \text{ kg}$
$$X \cdot 1000 = 0.012$$

- Gravier  $G = \frac{1036}{1000} \cdot 1 \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad X = 1.24 \text{ kg}$
$$X \cdot 1000 = 0.012$$

- Gravier 8/15 =  $0.65 \cdot 1.24 = 0.806 \text{ Kg}$

- Gravier 15/25 =  $0.35 \cdot 1.24 = 0.434 \text{ Kg}$

La composition de béton pour  $1 \text{ m}^3$  est reportée dans le tableau 12.

**Tableau 12 :** Compositions de bétons de 1 m<sup>3</sup> (Kg/m<sup>3</sup>)

N	Eau (l)	Ciment (kg)	Sable 0/3 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Gravier 15/25 (kg)	E/C
B <sub>40</sub>	200	500	683	691	372	0.4
B <sub>50</sub>	200	400	721	709	381	0.5
B <sub>60</sub>	200	333	748	709	381	0.6

- B<sub>40</sub> : Béton à base de CEM II/B 42.5 (rapport eau/ciment = 0.4)
- B<sub>50</sub> : Béton à base de CEM II/B 42.5 (rapport eau/ciment = 0.5)
- B<sub>60</sub> : Béton à base de CEM II/B 42.5 (rapport eau/ciment = 0.6)

La composition de béton (épreuve V= 0.012 m<sup>3</sup>) sont reportées dans le tableau 3.

**Tableau 13 :** Compositions de bétons pour une éprouvette (g/m<sup>3</sup>)

N	Eau (l)	Ciment (g)	Sable 0/3 (g)	Gravier 8/15 (g)	Gravier 15/25 (g)	E/C
B <sub>40</sub>	240	600	795	806	434	0.4
B <sub>50</sub>	240	480	865	825.5	444.5	0.5
B <sub>60</sub>	240	399	898	845	455	0.6

- B<sub>40</sub> : Béton à base de CEM II/B 42.5 (rapport eau/ciment = 0.4)
- B<sub>50</sub> : Béton à base de CEM II/B 42.5 (rapport eau/ciment = 0.5)
- B<sub>60</sub> : Béton à base de CEM II/B 42.5 (rapport eau/ciment = 0.6)

## **IV. Propriétés des bétons**

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés: d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire les années. [4]

### **IV.1 Propriétés de béton frais:**

#### **A. Ouvrabilité**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour:

- Le remplissage parfait du coffrage.
- L'enrobage complet du ferrailage.

L'ouvrabilité doit être maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire, elle est principalement influencée par:

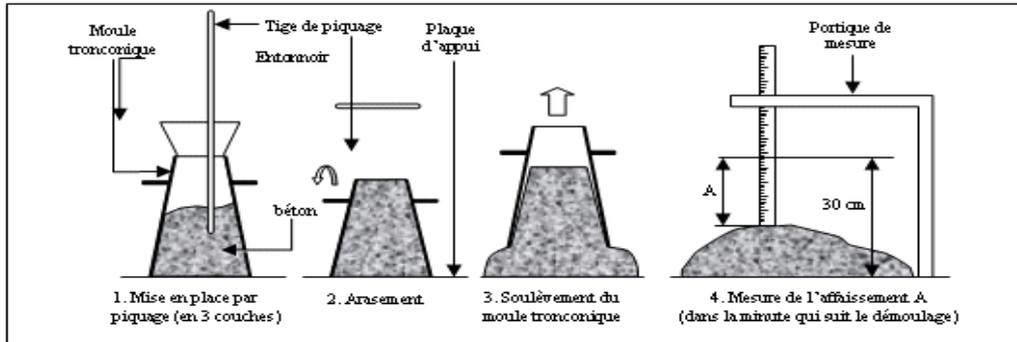
- Type et dosage en ciment;
- La forme des granulats;
- La granularité et la granulométrie;
- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons qu'un essai, qui est le plus couramment utilisé dans la pratique.

**Essai d'affaissement ou cône d'Abrams' s ou SLUMP -test: (NF P 18-439)**

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. C'est un essai essentiellement statique et assez limité dans sa plage de mesure pour les bétons très secs et pour les bétons très fluides.

L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-439. [3]



**Figure 29 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.**



**Figure 30: Essai d'affaissement**

**🌈 Classes de consistance du béton:**

Il existe 5 différentes classes de consistance des bétons référencés par la norme NF EN 206-

**Tableau 14 : Classes de consistance de béton**

<i>Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1</i>		
<b>Classe</b>	<b>Consistance du béton</b>	<b>Affaissement (en mm) au cône d'Abrams</b>
<b>S1</b>	Ferme	10 - 40
<b>S2</b>	Plastique	50 - 90
<b>S3</b>	Très plastique	100 - 150
<b>S4</b>	Fluide	160 - 210
<b>S5</b>	Très fluide	≥ 220

## IV.2 Propriétés de béton durci:

### B. Résistance:

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à 28 jours après coulage. Elle présente sous deux aspects : résistance à la compression, et la résistance à la traction. La résistance à la traction joue un rôle très important en béton armé. Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.



Figure 31 : Eprouvettes de béton

### C. Résistance en compression

La résistance en compression à 28 jours est désignée par  $f_{c28}$ . Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 (d = 15,96 cm) dont la section est de  $200 \text{ cm}^2$ . La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres d = 16 cm de H = 32 cm.

Elle varie suivant la taille des épreuves essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées.

La résistance sur cylindre d'élanement 2 (exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm. [3]

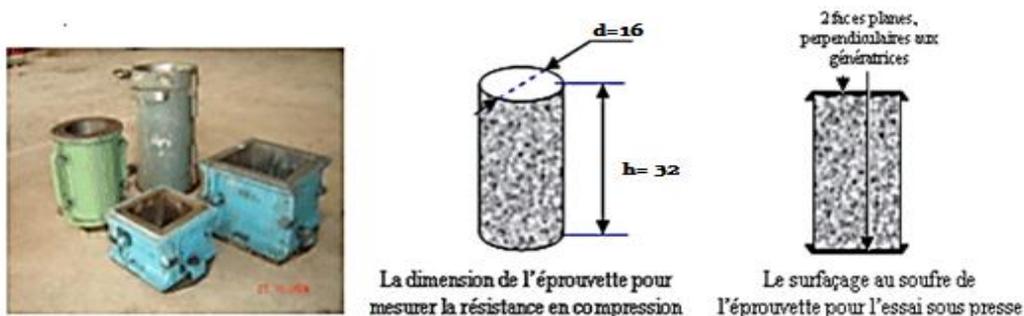


Figure 32: Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression



**Figure 33** : Essai de résistance à la compression

Le béton de l'ouvrage a des résistances différentes de celles du même béton essayé sur éprouvettes d'essais normalisés (il y a l'effet de masse et une hydratation différente du fait des évolutions des températures elles-mêmes différentes).

La résistance en compression est donc à associer à la méthode d'essai (ou à la référence à la norme utilisée) et à l'échéance fixée.

#### **D. Porosité volumique du béton**

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Elle est calculée grâce à la différence de masse entre un échantillon à l'état sec et ce même échantillon à l'état saturé .



**Figure 34:** Pèse hydrostatique

En effet, la porosimétrie à l'eau prend en compte la microporosité capillaire (c.-à-d. les pores dont le diamètre moyen est compris entre 0,8 et 2  $\mu\text{m}$ ) ainsi que la porosité des C-S-H) volume interfilière) car l'eau peut pénétrer dans des espaces d'une taille de 0.5  $\mu\text{m}$ .

A partir du volume de l'éprouvette, on peut alors calculer sa porosité volumique représentant le rapport de son volume poreux à son volume total. La méthode de caractérisation la plus utilisée est sans doute la mesure de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique

Pour déterminer la porosité et la capacité d'absorption d'eau des éprouvettes de à l'âge de 14 et 28 jours, on a pesé les éprouvettes après séchage et élimination totale de l'humidité (séchage dans l'étuve à 105 °C) et ensuite immersion dans l'eau jusqu'à saturation.

La porosité (P) a été déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$P = (M_{sat} - M_{sec}) / V_t \cdot 100\%$$

La capacité d'absorption d'eau (CAE) a été calculée par :  $CAE = P = (M_{sat} - M_{sec}) / M_{sec} \cdot 100\%$

- $M_{sat}$  : masse de l'éprouvette saturée d'eau
- $M_{sec}$  : masse de l'éprouvette sèche.
- $V_t$  : volume total de l'éprouvette (10×10×10)

Sur une base expérimentale, soit par la pesée hydrostatique d'une éprouvette saturée, on détermine alors le volume total de l'éprouvette (fraction poreuse et solide) et on calcule ainsi sa porosité volumique P à partir de la relation :

$$P (\%) = (M_{air} - M_{sèche}) / (M_{air} - M_{eau}) \times 100 \%$$

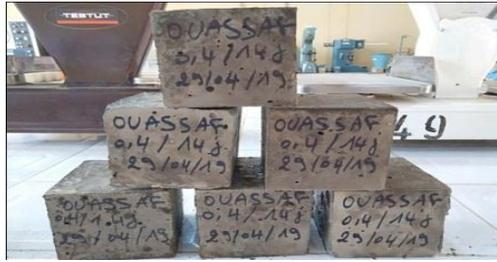
Avec:

- P : porosité volumique établie expérimentalement par pesée hydrostatique, excluant le volume d'air piégé et/ou entraîné.(%)
- $M_{air}$  : masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l'air (g).
- $M_{sèche}$  : masse sèche de l'éprouvette (g).
- $M_{eau}$  : masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l'eau et déterminée par pesée hydrostatique (g).

La masse volumique apparente sèche est calculée par la relation suivante :

$$\rho_d = M_{sec} / V_{app} = (M_{sec} \cdot \rho_{eau}) / (M_{air} - M_{eau})$$

La procédure d'évaluation de la porosité est la suivante: les éprouvettes sont séchées dans une étuve pendant 24 heures, puis immergées dans l'eau pendant 48 heures, l'échantillon est mis ensuite dans un bain d'eau bouillante pendant 5 heures, les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et à l'eau (pesée hydrostatique). Les essais ont été faits au laboratoire de génie civil de (Biskra).



**Figure 35 :** Eprouvettes de bétons de différents types de conservation destinées à l'essai de la porosité par pesées hydrostatique

### E. Absorption d'eau

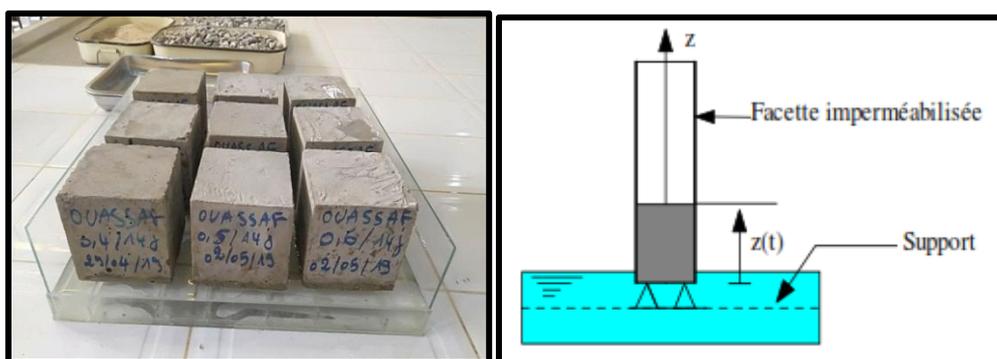
L'absorption d'eau dans un milieu poreux est induite par le phénomène d'absorption capillaire au travers de la macroporosité ouverte, porosité dite « capillaire ».

#### La détermination du coefficient d'absorption d'eau initiale

Dans le but d'étudier l'absorption d'eau des bétons nous avons adopté un essai NF P10-502] [AFNOR 1990]. nous avons utilisé des échantillons cubiques de (10×10 10) cm. Une face d'about de l'échantillon est placée au contact d'une nappe d'eau à 1 cm de profondeur et la quantité d'eau absorbée est évaluée en mesurant la variation de masse de l'échantillon (figure 33).

La quantité d'eau absorbée au bout d'une heure par unité de surface est retenue comme grandeur représentative de volume des plus gros capillaires présents dans la zone de peau, ces capillaires étant les plus efficaces.

Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des éprouvettes. Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ( $T=20 \pm 2$  C et  $HR = 45 \pm 10$  %) [Mezghiche 2005].



**Figure 36 :** Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire de différents bétons

## CHAPITRE II:

---

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

## I. Introduction

Ce chapitre traite l'étude et l'exploitation des résultats reflétant l'effet de rapport E/C sur les performances mécaniques (résistance à la compression) et chimique (Porosité et absorption de l'eau) du béton.

On notera que ce travail de recherche sur l'effet de rapport E/C sur la porosité, l'absorption de l'eau et éventuellement sur la durabilité de béton est d'actualité, vu l'ampleur et l'importance du projet et vu la campagne expérimentale dans cette étude étant très importante avec plusieurs essais, nous nous sommes basés sur la présentation de nos résultats et avec une interprétation comparative avec le béton témoin (ordinaire).

## II. Résultat d'essais de caractérisation

### II.1 Affaissement :

La mise en œuvre du béton frais pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectuée d'après la norme NA 431. La figure 34 présente une photo de cet essai permettant d'obtenir la consistance du béton.



**Figure 37 :** Essai d'affaissement du béton

**Tableau 15 :** Résultat d'essai de cône d'Abrams

E/C	0.4	0.5	0.6
Affaissement (cm)	3	3	3

D'après le résultat de l'essai de l'affaissement de cône d'Abrams on trouve que le béton est de Classe S1 et son consistance est : Ferme.

## II.2 Masses volumiques apparentes des bétons

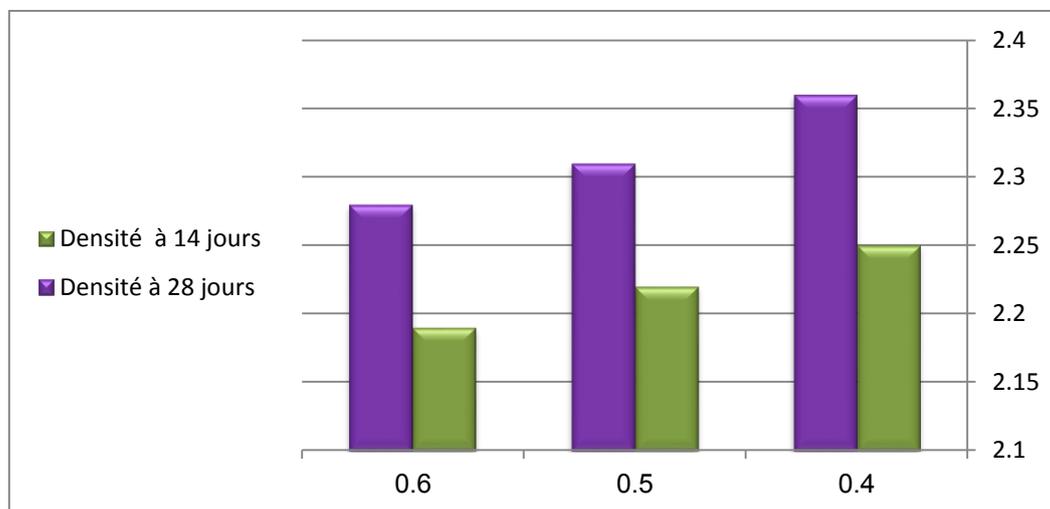
La masse volumique des bétons a été déterminée par la formule suivante :

$$\varphi = \frac{M}{V}$$

M est la masse de l'éprouvette et V son volume, les résultats sont inscrits dans le tableau suivant :

**Tableau 16 :** Variation de la masse volumique à l'état durci, des différents bétons

14 Jours			
Type de béton	B40	B50	B60
Masse volumique (kg/l)	2.25	2.22	2.19
28 Jours			
Type de béton	B40	B50	B60
Masse volumique (kg/l)	2.36	2.31	2.28



**Figure 38 :** Courbe de densité des bétons à 14 et 28 jours

### **✚ Interprétation et discussion**

La figure 36 représente la variation de la densité à des différents bétons en fonction de rapport Eau – Ciment (E/C). On remarque une augmentation de la masse volumique avec la décroissance de rapport E/C dans les deux cas ( 14 et 28 jours ).

### II.3 Porosité:

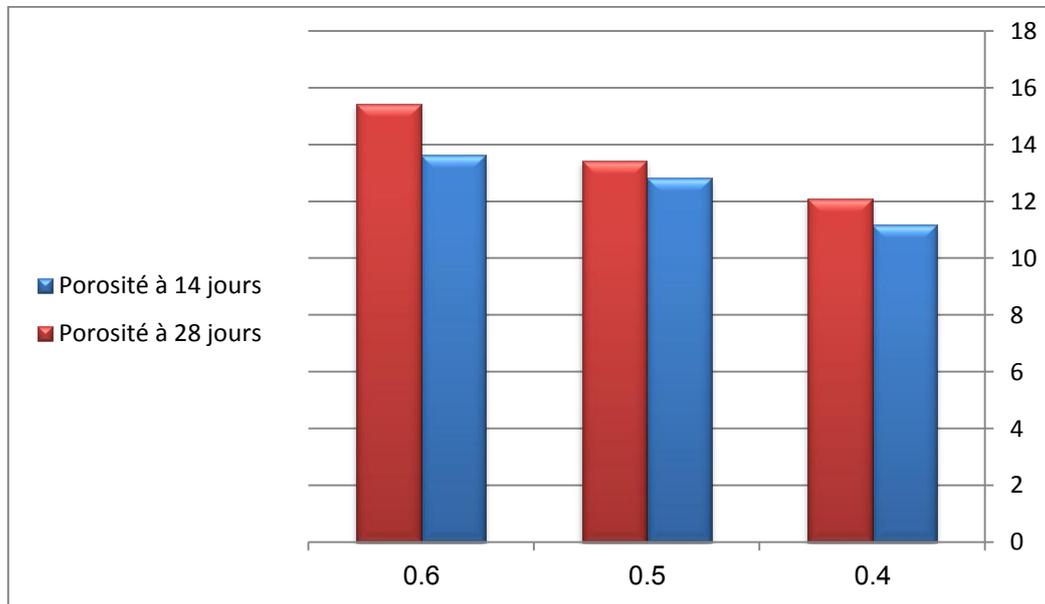
Les résultats caractérisant les bétons d'étude sur des critères de porosité volumique obtenus sont représentés sur le tableau et la figure.

**Tableau 17** : Résultats de l'essai de Porosité à 14 jours

14 Jours							
N	E/C	Masse après immersion T=105°	Masse après immersion 48 h	Masse après l'étuve	Masse humide	MVap (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)
1	0.4	2481.68	2485.58	2470.5	2488.45	2.25	11.18
2	0.5	2468.33	2472.71	2455.5	2474.39	2.22	12.83
3	0.6	2485.94	2490.13	2472.3	2493.64	2.19	13.64

**Tableau 18** : Résultats de l'essai de Porosité à 28 jours

28 Jours							
N	E/C	Masse après immersion T=105°	Masse après immersion 48 h	Masse après l'étuve	Masse humide	MVap (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)
1	0.4	2554.08	2558.2	2542	2482.09	2.36	12.08
2	0.5	2567.74	2571.87	2554.3	2467.09	2.31	13.44
3	0.6	2508.73	2513.4	2493.3	2391.39	2.28	15.43



**Figure 39** : Courbe de Porosité des bétons à 14 et 28 jours

#### ✚ Commentaire:

La figure 37 représente la variation de la porosité à des différents bétons en fonction de rapport Eau – Ciment (E/C), on remarque bien que la valeur de porosité se croit avec l'augmentation de rapport E/C qui signifié que la quantité d'eau dans le béton affecte la porosité de béton après le durcissement.

## II.4 Absorption de l'eau :

Le coefficient d'absorption est calculé par la formule suivante :

$$Abs = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \times 100$$

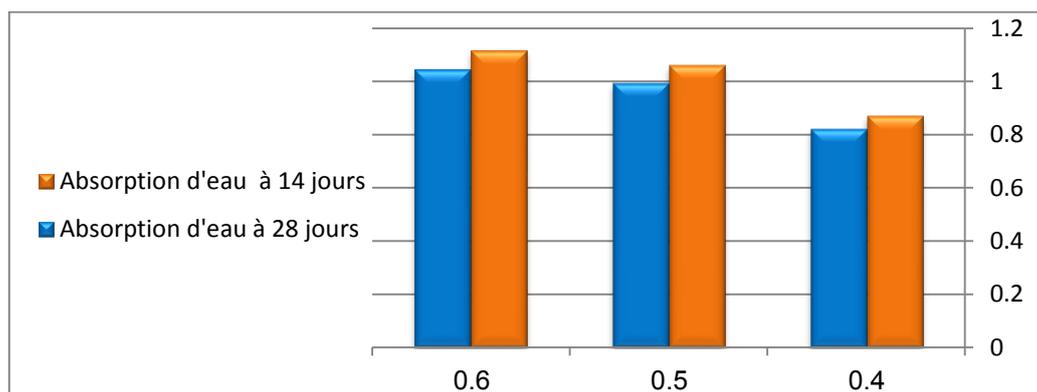
Les coefficients d'absorption d'eaux obtenues pour la totalité des échantillons sont calculés par la masse d'eau absorbée par unité de surface en ( $\text{kg.m}^2.\text{h}^{-1/2}$ ) et résumés dans le tableau 19 et présentés aux figure 40

**Tableau 19** : Résultats de l'essai d'absorption d'eau à 14 jours

14 Jours			
Béton (E / C)	0.4	0.5	0.6
Masse avant immersion (g)	2390.25	2360.16	2380.84
Masse après immersion (g)	2411.25	2385.45	2407.69
Coefficient d'absorption d'eau	0.87091757	1.06017733	1.11517679

**Tableau 20** : Résultats de l'essai d'absorption d'eau à 28 jours

28 Jours			
Béton (E / C)	0.4	0.5	0.6
Masse avant immersion (g)	2488.39	2455.49	2411.78
Masse après immersion (g)	2509	2480.11	2437.25
Coefficient d'absorption d'eau	0.82144281	0.9926979	1.04503026



**Figure 40** : Courbe d'absorption d'eau des bétons à 14 et 28 jours

### ✚ Commentaire:

La figure38 représente la variation de coefficient d'absorption d'eau à des différents bétons en fonction de rapport Eau – Ciment (E/C), on remarque bien la variation croissante de valeur de coefficient d'absorption d'eau avec l'augmentation de rapport Eau / Ciment.

## II.5 Résistances mécaniques des bétons

L'essai effectué sur les bétons durcis est la résistance mécanique à la compression

- **Essais de compression :**

Pour effectuer ces essais, on a préparé deux (02) éprouvettes cubique (10\*10\*10) (cm) pour l'âge de 28 jours dans le but de prendre une valeur moyenne.



**Figure 41 :** Essais de compression

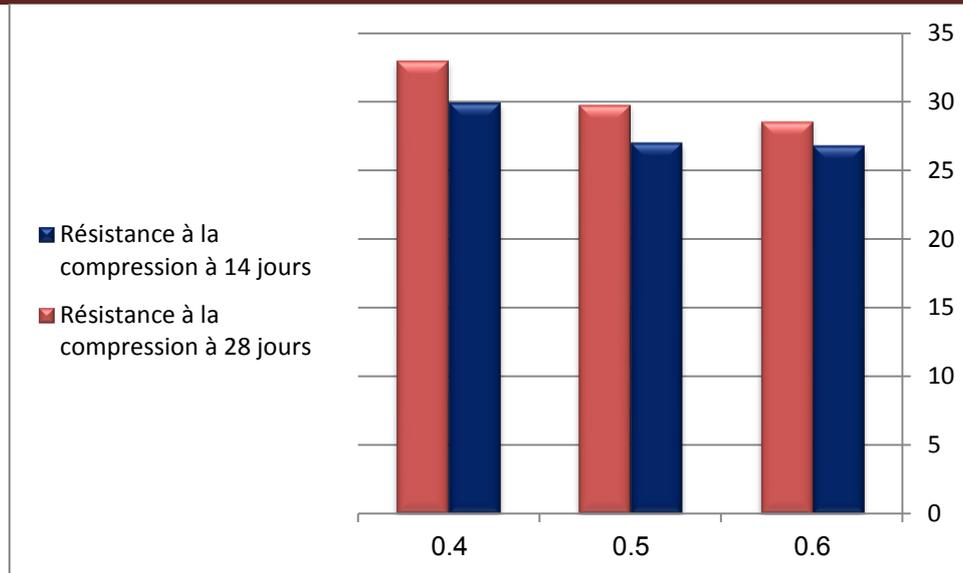
- **Conservation des éprouvettes**

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et protégées contre les chocs ; les vibrations doivent être évitées pendant un minimum de 16h et un maximum de 3 jours, à la température de  $20 \pm 5$ .

Les éprouvettes sont ensuite conservées dans une chambre à  $20 \pm 2 \text{ C}^0$  et hygrométrie relative  $> 95\%$

**Tableau 21 :** Résistance à la compression des bétons à 14 et 28 jours

E/C	0.4	0.5	0.6
Résistance à la compression à 14 jours (MPa)	29.90	27.00	26.80
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	33.00	29.80	28.60



**Figure 42 :** Courbe de résistance à la compression des bétons à 14 et 28 jours

**+** Commentaire:

La figure 40 représente la variation résistance à la compression des différents bétons en fonction de rapport Eau – Ciment (E/C),

Suite à ces résultats, on peut observer une augmentation des résistances en fonction de la diminution du rapport E/C.

### III. Interprétations et discussions

- Pour la masse volumique on constate une augmentation de la masse volumique liée à la diminution du rapport E/C, ceci s'explique par le fait qu'à volume constant, la diminution de l'eau dans les composites est compensée par une combinaison de matériaux plus denses (ciment, sable et gravier).
- Pour la résistance à la compression on remarque que l'augmentation de la résistance liée à la diminution du rapport E/C. Toutefois, pour tous les rapports E/C et même pour des substitutions de 100%, les valeurs de résistances en compression à 28 jours des différents composites sont toutes supérieures à 15 MPa. Conformément aux recommandations de règlements Algérienne, ces mortiers peuvent être utilisés pour la fabrication du béton de structure.
- Il faut aussi constater que la porosité et le coefficient d'absorption de l'eau diminue avec la diminution du rapport E/C, ceci s'explique par la densification des composites liée à la diminution du rapport E/C illustrée par les résultats de la masse volumique ou la densification des composites se traduit par la réduction de la connexion des pores, donc une diminution de vides dans les composites.

## CONCLUSION GENERALE

---

### Conclusions générale

L'essai d'absorption d'eau est simple à réaliser avec une bonne reproductibilité des résultats. De plus, il est suffisamment sensible pour étudier l'influence des facteurs principaux intervenant dans le processus : composition, cure et éventuellement âge et séchage.

L'essai permet également l'approche de certaines grandeurs représentatives de la structure poreuse du béton, telles que la dimension des gros capillaires et le volume des capillaires fins. Il s'avère être un outil pratique de caractérisation du comportement hydrique des bétons. Il permet donc de comparer les bétons naturels vis-à-vis de leur durabilité.

L'objectif de notre travail permis de comprendre la formulation, la caractérisation des bétons (à l'état frais et durci), l'influence de l'absorption de l'eau sur le comportement mécanique et éventuellement la durabilité de béton à l'état durci.

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

- La masse volumique du béton B ( $E/C = 0.4$ ) est élevée par rapport au ( $E/C = 0.5$ ) et ( $E/C = 0.6$ ) ceci s'explique par les différentes granulométries des agrégats. la diminution de l'eau dans les composites est compensée par une combinaison de matériaux plus denses (ciment, sable et gravier).
- Les résultats de l'essai de résistance à la compression pour les trois rapports ( $E/C$ ) donnent des valeurs conformes (soit à l'âge de 14 jours ou bien à l'âge de 28 jours) pour béton destiné aux travaux de structure ou le meilleur résultat est ce de rapport  $E/C = 0.4$ .
- La petite valeur de coefficient d'absorption de l'eau (avec  $E/C = 0.4$ ) donne le meilleur résultat de résistance à la compression qui confirme que la relation inverse entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression de béton durci.

Afin d'évaluer l'effet de l'absorption de l'eau sur la qualité de béton (résistance et durabilité) nous avons choisi de comparer des bétons de valeur différents de rapport  $E/C$  qui donne valeurs différents de résistance mécanique en gardant la même ouvrabilité et en conservant, en outre, un squelette granulaire de compacité constante.

La meilleure composition de béton est celle de rapport  $E/C = 0.4$  qui donne meilleure stabilité en terme de propriétés mécanique et chimique de béton durci.

## BIBLIOGRAPHIE

---

### **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **ISSOUFOU TAMBOURA**, Cours Les Ouvrages D'art, Institut International D'ingénierie, Niamey –Niger
- [2] **JEAN-ARMAND CALGARO**, Projet Et Construction Des Ponts, Presse de l'école nationale de ponts et chaussées, Paris France.
- [3] Généralités Sur Les Ouvrages D'art, Cours d'ouvrages d'art, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Tunisie, 2004/2005
- [4] **M. Dierkens (DLL)**, Construire des Ouvrages d'Art en Béton, Durabilité du béton armé, SETRA, 19-20 janvier 2011
- [5] **SELLAM MOHAMED**, Durabilité du béton, Exposé ENSTP Alger ,2015
- [6] **LCPC**, Maitrise de durabilité des ouvrages en béton, Paris France , 2010
- [7] **IR C. PLOYAERT**, Durabilité Des Bétons Par La Maîtrise De L'absorption D'eau, FEBELCEM, Bruxelles, 2009
- [8] **Fatima LEKDIM**, ETUDE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS ARMÉS CONFECTIONNÉS À PARTIR DES SABLES DE CONCASSAGE, Mémoire Master, université Bejaia, 2011.
- [9] **Différents types de ponts**, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pont> .
- [10] **DJELOUACHI HAYET**, Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton, Mémoire Master, université Boumerdes, 2017.
- [11] **E. Wirquin ; R. Hadjieva-Zaharieva et F. Buyle-Bodin**, Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité -Application aux bétons de granulats recyclés , Matériaux et Constructions, Vol. 33; France, 2000.
- [12] **Bederina M.\*, Bouziani T., Khenfer M. M** , Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois, Séminaire internationale de Génie civil , Université Amar Téliidji, Laghouat, Algérie,2012.
- [13] **N. Banthia** , Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, , Pages 211-216 , The effect of paste volume and of water content on the strength and

## BIBLIOGRAPHIE

---

water absorption of concrete , University of British Columbia CANADA ,  
February 2005.

- [14] **Ben Khadda BEN AMMAR**, Effet de l'étuvage par énergie solaire sur les propriétés mécaniques, la déformabilité et la durabilité des bétons, Mémoire Doctorat en Sciences, université Biskra, 2014.
- [15] **Fiche produit Ciment MATIN**, LAFARGE ALGERIE,

# الإهداء

الحمد لله و الشكر الكثير على ما وصلنا اليه و السلام على رسوله المصطفى .

يقول الله عز وجل في كتابه العزيز :

" وَأَخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّي أَرْحَمُهُمَا كَمَا رَبَّبَانِي صَغِيرًا "

صدق الله العظيم

•الى معنى الحب و الحنان الى بسمة الحياة الى من كان دعائها سر نجاحي و حنانها بلسم

جراحي الى اغلى الحبايب امي الحبيبة حفظها الله و رعاها و اطال الله في عمرها.

•الى من كلاله الله بالهيبة و الوقار الى من علمني العطاء بدون انتظار الى من احمل اسمه

بكل افتخار أرجو من الله ان يطيل في عمرك.

•الى رفيق دربي و حياتي و سندي زوجي الغالي المألحة زهير .

•الى ابني الغالي و حبيب قلبي و سر فرحتي سيف الإسلام .

•الى حبيبتي و قرّة عيني ابنتي الغالية روديثة .

•الى اخوتي الاعزاء حفظهما الله و ادامهما الله سندا لي والى عائلاتهم جميعا كبيرهم

وصغيرهم .

•الى من أعتز بانتمائي اليهم الى اسرتي الثانية عائلة زوجي جميعهم كبيرهم و صغيرهم

واخص بالذكر خالتي العزيزة حفظها الله .

•الى صديقاتي اللواتي عشت معهم أحلى ايام حياتي مليكة و كل صديقاتي في العمل .

•الى استاذي المشرف الفاضل الدكتور بن عمار بن خدة على توجيهاته ونصائحه القيمة .

والى كل الذين نسيهم قلبي و وصلت ذكراهم في قلبي.