



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : (Master)

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME :
**INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EAU DE GACHAGE SUR LA
DURABILITÉ DU BÉTON**

**Préparé par : DOUIB TAIEB
HAMADEN YASSINE**

Soutenu le : 24-06-2014

Devant le jury :

Encadreur : AMRIOU.A RACHID

Président : LOUMACHIL
Examinateur : BENAICHEL HADJ
Examinateur : ROKBANE A MADJID

MAA Université de BBA
MAA Université de BBA
MAA Université de BBA

Année Universitaire 2013-2014

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous tiens à remercions "ALLAH" le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce présent travail ainsi que nos parents qui nous toujours encouragés et soutenu durant toute la durée de nos études.

Nous adressons nos profonds remerciements à notre encadreur de mémoire Mr AMRIOU.R, pour avoir accepté nous encadrer, pour ses conseils et ses orientations pour mieux élaborer ce travail de recherche et pour qu'il nous guider sur le bon chemin durant l'accomplissement de ce travail.

Nous voudrions remercions l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail :

Mr. LOUMACHI, Mr. BENAICHI EL HADJ, Mr. ROKBANE A.M et

Mr. DJELLOUL.C.

Nous adressons nos remerciements à tous les responsables du laboratoire de Génie Civil : ZOBIR, RACHID, FARID, FATIHA et HAYAT qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Je remercié Mr. BELGANDOUZ .A, Mr MAAFI. N et Mr. KASSEL .O pour son médiocrité et son aide afin que nous accomplissions cette étude.

Nous remercîments aussi l'administration de génie civil.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents ;

A mes frères et sœur et leurs enfants ;

A mes chers amis : Yahya, Abdou, Masaoud, Chaker, Charaf, Oussama, Karim, Imad, DJALAL, Zinedine. REBAH.B et RAHIM DJE.

A tous mes amis de promos master 2 génie civil et surtout : Kamal.f, nabil .B, Rebah. M, Walid.m Athman kadour, echrif, salah et Hadjar , Sarah, Masaouda, Samah Houda, Fatiha, Imane

A les familles: HAMADENE, KHOUTHRI.

A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

YASSINE.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents ;

A mes frères et sœurs et leurs enfants ;

A mes chers amis : Azaddine, Marouane, Hamza, Mostapha,
Fouad, Zohir, Rabah, RAHIM DJ ;

A tous mes amis de promos master 2 génie civil et
surtout : kamel, nabil, Abdelkader, Walid, oussama, Rabah,
athman, Imen, messauda, hadjer, sarah, et samah;

A tous ma famille

A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

Taieb.

Résumé

Il est apparu que l'emploi de plus en plus intensif du béton, du béton armé et du béton précontraint soulevait le problème de la durabilité de ce matériau.

Ce travail a pour but d'étudier le comportement de la durabilité du béton par une procédure expérimentale permettant d'évaluer les paramètres qui influent cette durabilité en particulier la quantité d'eau de gâchage exprimée par le rapport E/C ainsi que l'influence du mode de cure sur les caractéristiques du béton.

L'utilisation des adjuvants dans la confection des bétons permet d'améliorer certaines caractéristiques telles que, la masse volumique, la résistance à la compression et la maniabilité du béton.

Les résultats obtenus ont permis de comprendre les effets du rapport E/C et du mode de conservation à l'air libre sur le béton :

- Augmentation de la porosité et diminution de la résistance à la compression.
- L'emploi d'un adjuvant réducteur d'eau est très bénéfique et nous a permis d'obtenir des résultats intéressantes en ce qui concerne la masse volumique, la résistance à la compression et la porosité.
- La conservation du béton à l'air libre pendant 28 jours est influé considérablement les caractéristiques du béton et principalement sa porosité.

Mots clés : béton, durabilité, porosité, résistance, cure, superplastifiant.

ملخص

ان استخدام الخرسانة و الخرسانة المسلحة والخرسانة سابقة الإجهاد بكثافة، أثارت مسألة استدامة هذه المواد. يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك متانة الخرسانة عن طريق إجراء التجارب لتقييم المعلمات التي تؤثر في الاستدامة ولا سيما كمية ماء الخلط الذي أعرب عنه بنسبة (ماء/اسمنت) وكذلك تأثير خصائص الحفظ على الخرسانة. استخدام المواد المساعدة في صناعة الخرسانة يحسن بعض الخصائص مثل الكثافة، قوة الضغط وفاعليته من الخرسانة. استخدمت النتائج لفهم آثار نسبة (ماء/اسمنت) وطريقة الحفظ على الخرسانة في الهواء الطلق:

- تزيد في المسامية وتقلل من قوة الضغط.
- استخدام خليط مع تخفيض نسبة الماء مفيد جدا ويسمح لنا للحصول على نتائج مثيرة للاهتمام بخصوص الكثافة، قوة الضغط والمسامية.
- الاحتفاظ بالخرسانة في الهواء الطلق لمدة 28 يوما يؤثر بشكل كبير على خصائص الخرسانة وبشكل رئيسي على المسامية.

كلمات مفتاحية: الخرسانة، الديمومة، المسامية، المقاومة، العلاج، الملمدن

Sommaire

CHAPITRE I : Processus du choix et facteur régissant la formulation de béton

I.1 Introduction	1
I.2 présentation des quelques Méthodes usuelles de formulation.....	1
I.2.1 Méthode Américaine (ACI 211).....	1
I.2.1.1 Etapes successives de la méthode.....	1
I.2.1.2.Examen critique.....	2
I.2.2 Méthode britannique (BRE 1988).....	4
I.2.2.1 Etapes successives de la méthode.....	4
I.2.2.2 Examen critique.....	4
I.2.3 Méthode française (Dreux 1970).....	5
I.2.3.1 Etapes successives de la méthode.....	5
I.2.4 Méthode Baron Lesage (France).....	7
I.2.5 Autres méthodes.....	8
I.2.5.1 Méthode de Bolomey.....	8
I.2.5.2 Méthode d'Abrams.....	8
I.2.5.3 Méthode de Faury.....	9
I.2.5.4 Méthode de Valette.....	10
I.2.5.5 Méthode Dreux-Gorisse.....	10
I.3. Choix d'une méthode de formulation.....	11
I.3.1 Processus du choix d'une formulation.....	11
I.3.2 Processus du choix d'une formulation.....	12
I.4 facteurs régissant la formulation d'un béton.....	12
I.4.1 le rapport eau/ciment et résistance à la compression.....	12
I.4.2 Durabilité.....	13
I.4.3 Maniabilité.....	14
I.4.4 Dimension maximale du granulat.....	14
I.4.5 Granulométrie et type de granulat.....	15
I.4.6 Dosage en ciment.....	15
I.5 Conclusion.....	16
 CHAPITRE II : Notion sur la de durabilité	
II.1.Introduction.....	17
II.2 Le ciment.....	17
II.3 Hydratation du ciment.....	18
II.3.1 Structure de la pâte de ciment hydraté.....	18

II.3.2 Les principaux hydrates.....	19
II.3.2.1 Les C-S-H.....	19
II.3.2.2 La chaux hydratée (CH ou portlandite).....	20
II.3.2.3 Les aluminates hydratés.....	20
II.3.2.4 Porosité de la pâte de ciment.....	20
II.3.2.5 Distribution porosimétrique de la pâte de ciment hydraté.....	21
II.3.3 État de l'eau dans la pâte de ciment hydraté.....	22
II.3.3.1 L'eau combinée.....	22
II.3.3.2. L'eau zéolitique (interlayer).....	22
II.3.3.3 L'eau adsorbée.....	23
II.3.3.4 L'eau des capillaires.....	23
II.4 Durabilité et qualité de béton.....	23
II.5 Critères généraux de durabilité.....	24
II.5.1 La porosité du béton.....	24
II.5.2 Résistance	25
II.5.3 Rapport E/C.....	25
II.5.4 Dosage en ciment.....	27
II.5.5 Dosage en granulats.....	28
II.5.6 Dosage en eau de gâchage.....	28
II.6 Propriétés de transfert dans le béton.....	28
II.6.1 La perméabilité et la diffusivité.....	28
II.6.2 Perméabilité et géométrie des pores.....	29
II.7 Paramètre influant la perméabilité à l'eau du béton.....	30
II.7.1 Rapport E/C	30
II.7.2 La zone d'interface pâte-granulats.....	30
II.7.3 Influence de la nature du liant et des additions minérales.....	31
II.7.4 Influence de la cure.....	31
II.8 Les adjuvants et durabilité du béton.....	32
II.8.1 Amélioration des conditions de mise en œuvre & l'ouvrabilité du béton plastique.....	32
II.8.2 Amélioration des performances mécaniques.....	32
II.8.3 Amélioration de la durabilité	33
II.9 Classification et types d'adjuvants	33
II.10 Problèmes liés aux excès d'eau pendant le gâchage du béton.....	35
II.10.1 Rôle sur le béton frais.....	35
II.10.1.1 Ressuage	35

II.10.1.2 Croutage.....	35
II.10.1.3 Ségrégation.....	35
II.10.1.4 Dessiccation.....	36
II.10.2 Sur le béton durci.....	36
II.10.3 Sur la porosité.....	36
II.10.4 Sur la résistance à long terme	36
II.10.5 Solutions apportées par les adjuvants.....	36
CHAPITRE III : Etude expérimental de l'effet d'eau sur la durabilité du béton	
<u>Partie A</u> : Description et caractéristiques des matériaux utilisés.....	37
III.1 Introduction.....	37
III.2 Caractérisations des matériaux de la composition de béton.....	37
III.2.1 caractérisation des granulats.....	37
III.2.1.1 Caractéristique du sable.....	37
III.2.1.1.1 Analyse granulométrique.....	37
III.2.1.1.2 Module de finesse.....	39
III.2.1.1.3Caractéristiques physiques du sable.....	39
III.2.1.1.4 Analyse chimique du sable.....	40
III.2.1.2 Caractéristiques du gravier.....	40
III.2.1.2.1 Analyse granulométrique par tamisage.....	41
III.2.1.2.2Caractéristiques physiques du gravier.....	42
III.2.1.2.2.1 Masse volumique.....	42
III.2.2 Caractéristiques du ciment utilisé.....	43
III.2.2.1 Présentation du ciment (MATINE).....	43
III.2.2.2 Analyses et caractérisation.....	43
III.2.3 L'eau de gâchage.....	45
III.2.4 Adjuvant.....	45
III.2.4.1 Description.....	45
III.2.4.2 Propriétés.....	46
III.2.4.3 Caractéristiques.....	46
<u>Partie B</u> : Evaluation de l'effet de la quantité d'eau sur la porosité et Résistance à la compression du béton.....	47
III.3 Introduction.....	47
III.4 Objectif de l'étude.....	47
III.5 Formulation des bétons d'études.....	48

III.5.1 Données de base.....	49
III.5.2 Dosage en ciment.....	50
III.5.3 Dosage en eau.....	50
III.5.3.1 Correction du dosage en eau selon le diamètre maximal D du mélange granulaire.....	50
III.5.4 dosage en pourcentage des granulats	50
III.5.4.1 La ligne de partage.....	52
III.5.5 dosage en masse des granulats	53
III.5.5.1 Quantité des agrégats en pourcentage.....	54
III.5.5.2 Volume absolu de l'ensemble des granulats.....	54
III.5.6 Dosage des granulats en kg dans 1m ³	54
III.6 Confection des éprouvettes	55
III.6.1 Volume des éprouvettes.....	55
III.6.2 Dosage des constituants en kg.....	55
III.6.3 Programme de cure.....	55
III.7 Performances du béton à l'état frais et durci	55
III.7.1 A l'état frais.....	55
III.7.1.1 Affaissement au cône d'Abrams.....	55
III.7.1.2 La masse volumique du béton frais	56
III.7.2 A L'état durci.....	57
III.7.2.1 Propriétés du béton durci.....	57
III.7.2.2 La masse volumique du béton durci	57
III.7.2.3 Résistance à la compression	58
III.7.2.4 Évaluation de La porosité	59
III.7.2.4.1 Procédure d'essai.....	59
CHAPITRE IV : résultat et discussion	
IV.1 Introduction	60
IV.2 Résultats des essais effectués sur le béton frais.....	60
IV.2.1 Masses volumiques.....	60
IV.3 Résultats des essais effectués sur le béton durci.....	61
IV.3.1 Béton conservé a l'eau	61
a- La masse volumique du béton durci.....	61
b- La Résistance à la compression à 28 jours	62
c- La Porosité du béton à 28 jours.....	64
d- Porosité et résistance à la compression pour un béton conservé à l'eau.....	66
IV.3.2 L'influence de mode de conservation.....	67

Sommaire

a- L'influence sur la masse volumique du béton durci.....	67
b- L'influence sur la Résistance à la compression à 28 jours.....	69
C-La Porosité à 28 jours pour un béton conservé à l'air.....	71
Conclusion générale.....	74

Liste des tableaux

Tableau I.1: Paramètres pris en compte dans la détermination de Y (ordonnée du point de brisure).....	6
Tableau I.2: Valeurs optimales d'après ABRAMS du module de finesse des compositions granulaire des bétons courants.....	8
Tableau II.1: la résistance à la compression en fonction rapport E/C.....	27
Tableau II.2 : l'absorption d'eau en fonction de rapport E/C.....	27
Tableau II.3: le retrait final en fonction de rapport E/C.....	27
Tableau II.4: classification et types d'adjuvants.....	34
Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.....	38
Tableau III.2 : Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).....	39
Tableau III.3 : Analyse chimique du sable.....	40
Tableau III.4 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).....	41
Tableau III.5 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).....	41
Tableau III.6 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé (3/8), (8/16).....	42
Tableau III.7: La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/16).....	43
Tableau III.8: Analyse chimiques du ciment MATINE.....	44
Tableau III.9 : Composition minéralogique du clinker.....	44
Tableau III.10: Propriétés physiques du ciment utilisé.....	44
Tableau III.11: Temps de prise à 20°C	44
Tableau III.12 : Résistance mécanique à la compression.....	45
Tableau III.13 : Analyse chimique de l'eau utilisée.....	45
Tableau III.14 :L'effet de l'adjuvant sur le béton.	56
Tableau III.15 : les différentes éprouvettes confectionnées et le mode de conservation.....	46
Tableau. III. 26. Donnés de bases pour la formulation.....	49
Tableau.III.21. Valeurs de la correction sur le dosage en eau	50
Tableau.III.22. Valeurs du terme correcteur k	51
Tableau III.23: Valeurs du coefficient de compacité γ	53
TableauIII.24 : Types de béton en fonction de leur consistance.....	56
Tableau IV.1 : Masse volumique du béton frais.....	60
Tableau IV.2 : Masse volumique du béton durci.....	61
Tableau IV.3: Résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours.....	62
Tableau IV.4 : Résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours.....	64
Tableau IV.5 : la porosité et Résistance à la compression.....	66

Liste des tableaux

Tableau IV.6 : la masse volumique du béton.....	67
Tableau IV.7 : La résistance à la compression du béton conservé a l'air.....	69
Tableau IV.8 : La résistance à la compression des bétons avec une mode de conservation déficient.....	69
Tableau IV.9 : Résultat de porosité pour un béton conservé à l'air.....	71
Tableau IV.10 : la porosité des bétons avec une mode de conservation déficient.....	71
Tableau IV.11: la porosité et la Résistance à la compression des bétons avec une mode de conservation déficient.....	73

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure. I.1. Courbe granulaire de référence selon Dreux.....	5
Figure I.2: Processus du choix d'une formulation.....	11
Figure II.1 : Représentation schématique de la Pâte de ciment hydraté.....	19
Figure II.2 : Représentation schématique des feuillettes de C-S-H.....	20
Figure II.3: Composition volumique d'une pâte de ciment portland totalement hydratée.....	21
Figure II.4 : Influence du rapport E/C sur la structure porosimétrique (28 jours).....	22
Figure II.5 : Représentation schématique du C-S-H et de l'état de l'eau qui y est associé.....	22
Figure II.6: La relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.....	25
Figure II.7: Influence du rapport E/C sur les propriétés du béton.....	26
Figure II.8 : variation de la perméabilité à l'eau en fonction de rapport E/C.....	30
Figure II.9 : Influence de E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de Perméabilité à l'eau des bétons.....	31
Figure II.10: Relation entre la perméabilité à l'eau, le rapport E/C et la durée de la cure initiale.....	32
Figure III.1 : Sable 0/8 (Boussaâda).....	37
Figure III.2 : courbe granulométrique et fuseau granulaire du sable de BOUSAADA.....	38
Figure III.3-a: Agrégats concassés (3/8).....	40
Figure III.3-b: Agrégats concassés (8/16).....	40
Figure III.4 : Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/16).....	42
Figure.III.5 : Graphique indiquant Approximativement le dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée.....	49
Figure III.6 : courbe de mélange réelle.....	50
Figure.III.7 : les coordonnées de la courbe de référence.....	52
Figure III.8 : les lignes de partage.....	53
Figure III.9.a: Essai d'affaissement	56
Figure III.9.b: Essai d'affaissement	56
Figure III.10: Béton frais.....	57
Figure III.11: essais de compression.....	58
Figure III.12 : ébullition des éprouvettes.....	59
Figure III.13 : la pesée hydrostatique des éprouvettes.....	59
Figure IV.1.a : La variation de la masse volumique de béton frais en fonction du rapport E/C.....	60

LISTE DES FIGURES

Figure IV.1.b: La variation de la masse volumique de béton frais en fonction du rapport E/C.....	61
Figure IV.2 : La variation de la masse volumique du béton durci en fonction du rapport E/C.....	62
Figure IV.3.a: La résistance à la compression en fonction du rapport E/C	63
Figure IV.3.b: La résistance à la compression en fonction du rapport E/C	63
Figure IV.4.a: La porosité en fonction du rapport E/C.....	65
Figure IV.4.b: La porosité en fonction du rapport E/C.....	65
Figure IV.5 : La résistance à la compression en fonction de la porosité.....	65
Figure IV.6.a: la masse volumique du béton durci en fonction du rapport E/C.....	67
Figure IV.6.b: la masse volumique du différent type du béton durci en fonction du rapport E/C.....	68
Figure IV.7: La résistance à la compression en fonction du rapport E/C	70
Figure IV.8.a: la porosité en fonction de rapport E/C.....	72
Figure IV.8.b : la porosité en fonction de rapport E/C.....	72
Figure I.9: la résistance à la compression en fonction de la porosité.....	73

Notations

C : ciment.

E : eau.

G : gravier.

E/C : rapport eau sur ciment.

D_{\max} : Diamètre maximal du gros granulat.

V : volume.

γ : masse volumique absolue.

ρ : masse volumique apparent.

P(%) : porosité.

C(%) : compacité.

P_c (%) : porosité à l'état compacte.

C_c (%) : compacité à l'état compacte.

e_c (%) : indice des vides à l'état compacte.

P_L (%) : porosité à l'état lâche.

C_L (%) : compacité à l'état lâche.

e_L (%) : indice des vides à l'état lâche.

A (%) : degré d'absorption.

M_H : La masse du matériau saturé d'eau.

M_S : La masse du matériau sec.

MF : module de finesse du sable.

E_{sv} : équivalent de sable visuel.

E_{sp} : équivalent de sable par piston.

γ_c : masse volumique à l'état compacte.

γ_L : masse volumique à l'état lâche.

R_{c28} : résistance à la compression à 28 jours.

G : gravier.

S : sable.

F : charge de rupture.

V_p : volume des pores.

BF : Béton ferme.

BP : Béton plastique.

BTP : Béton très plastique.

BA : béton adjuvanté.

Introduction

Le béton est sans aucun doute, le matériau le plus utilisé dans la construction, son emploi a soulevé le problème de sa qualité et sa durabilité. C'est la raison qui pousse les constructeurs à chercher des moyens à améliorer la qualité et la durabilité de ce matériau.

Un de ces moyens est la recherche de réduire la porosité des bétons en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'utilisation d'adjuvants. Ces produits sont destinés à conférer au béton des caractéristiques et des performances supplémentaires nécessaires.

Les adjuvants sont des produits très importants pour les bétons modernes, ils permettent de modifier certaines propriétés du béton à l'état frais et durci, parmi les quelles l'amélioration de la durabilité, le retrait, réduction du rapport E/C qui pousse à limiter la porosité du matériau.

Une grande partie des problèmes de durabilité rencontrés pendant la confection des béton dans plusieurs chantiers et l'ajout incontrôlé de l'eau pendant le gâchage du béton surtout pendant le climat chaud ce qui conduit à des effets néfastes sur les caractéristiques et la porosité de ce matériau et peut conduire à la détérioration total d'un grand nombre de construction.

Objectif

L'objectif principal de cette étude est de présenter les expérimentations pour évaluer la durabilité des bétons dans son environnement naturel.

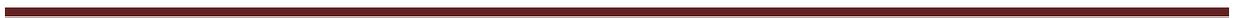
Les caractéristiques du béton sont évaluées en fonction de la quantité d'eau de gâchage (rapport E/C), l'incorporation d'un adjuvant super plastifiant réducteur d'eau et l'effet du mode de conservation à l'air libre.

Nous proposons l'étude expérimentale de cinq bétons confectionnés à base de matériaux locaux en considérant comme moyen de caractérisation : La porosité, la résistance mécanique à la compression et l'influence d'un adjuvant réducteur d'eau.

Il s'agit de déterminer les critères à imposer sur les différents paramètres pour aboutir à confectionner un béton à base de matériaux locaux moins poreux, résistant et durable.

Chapitre I

PROCESSUS DU CHOIX ET FACTEUR REGISSANT LA FORMULATION DE BETON



Processus du choix et facteurs régissent la formulation de béton

I.1 Introduction :

La diversité des méthodes existant dans le monde montre bien que la formulation des mélanges a été long temps plus "un art qu'une science" [1]. Il existe non seulement des différences profondes dans la stratégie adoptée par les différents auteurs pour résoudre le problème, mais une comparaison quantitative entre méthodes révèle, pour les mêmes spécifications, des écarts impressionnants en termes de formule, de coût et de quantité de ciment. [2]

On a recours, dans ce cas aux méthodes de détermination des proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Vallette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-gorisse).

Il existe plusieurs méthodes pour la composition du béton. Elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux, mais le passage de l'une à l'autre peut toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

On distingue en fonction de la granularité du mélange constituant le béton deux types de méthodes de composition du béton :

- **à granularité continue** : lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne sur le graphique granulométrique une courbe s'élevant d'une façon continue du plus petit grain de ciment au plus gros grain des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.
- **à granularité discontinue** : lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires. [3]

I.2 présentation des quelques Méthodes usuelles de formulation :

Examinons maintenant certaines de ces méthodes, en notant leurs aspects positifs et négatifs. Nous verrons que les développements théoriques et les modèles contenus qui permettent au lecteur de comprendre et d'analyser les hypothèses et les simplifications adoptées par ces méthodes. [2]

I.2.1 Méthode Américaine (ACI 211) : [4]

Cette méthode [ACI 211] est probablement l'une des plus populaires au monde. Elle est basée essentiellement sur les travaux de chercheurs américains (Abrams et Powers). [2]

I.2.1.1 Etapes successives de la méthode :

Etape 1 : choix de l'affaissement.

Etape 2 : choix de taille maximale des granulats (D_{max}).

Etape 3 : estimation de la quantité d'eau et d'air. L'eau est déterminée par D_{max} et par l'affaissement requis, alors que l'air dépend de D_{max} .

Étape 4 : sélection du rapport eau/ciment. Ce rapport est choisi en tenant compte de la durabilité (valeur maximale spécifiée) et de la résistance à la compression. Pour cette dernière, une table est donnée pour trouver le rapport eau/ciment en fonction de la résistance requise.

Étape 5 : calcul de la quantité de ciment. Ce calcul est simplement fait à partir de la quantité d'eau et du rapport eau/ciment déterminé précédemment.

Étape 6 : estimation de la quantité de gravillon. La masse volumique en vrac du gravillon, mesurée selon une méthode normalisée (piquage à sec), est déterminée en premier. Elle est alors multipliée par un coefficient tabulé, qui dépend de la taille maximale du granulat et du module de finesse du sable.

Étape 7 : calcul de la quantité de sable. Cette quantité est calculée par différence entre le volume unité de la gâchée et les autres volumes calculés précédemment.

Étape 8 : ajustements finaux.

1.2.1.2.Examen critique de la méthode Américaine (ACI 211) :

ACI 211 a été développé à une époque où le béton était fabriqué pour l'essentiel avec des granulats, du ciment et de l'eau. De ce fait, elle n'est pas directement applicable quand des adjuvants organiques ou des additions minérales sont utilisés.

Par contre, elle convient pour les bétons à air entraîné. Dans le domaine limité des bétons non adjuvés, la méthode est basée sur certaines hypothèses sous-jacentes qu'il est intéressant de discuter.

A l'étape 3, la quantité d'eau est déduite de D_{max} et de l'affaissement. D_{max} est reliée à la granularité du béton frais, car les grains les plus fins sont ceux du ciment. Cette simplification se réfère implicitement à la loi de Caquot : $(P_{min} = P_0 \sqrt[5]{\frac{d}{D}})$, selon laquelle la porosité d'un mélange granulaire est essentiellement contrôlée par son étendue granulaire, et à la règle de Lyse, qui suppose que la maniabilité d'un béton, fabriqué avec un ensemble donné de constituants, est contrôlée par la quantité d'eau. Nous avons vu précédemment que ces deux "lois" ne sont valides qu'au voisinage des combinaisons optimales. Des écarts sont donc prévisibles avec les mélanges riches ou pauvres. De plus, l'effet de la forme des grains n'est pas pris compte dans la prévision de demande en eau.

La relation entre le rapport eau/ciment et la résistance à la compression (étape 4) est supposée unique. Pourtant, si l'on tient compte des diverses natures de granulats et des écarts de résistance des ciments, la résistance à la compression, pour un rapport eau/ciment donné, peut passer du simple au double.

Les prévisions qui ne sont basées que sur le rapport eau/ciment paraissent donc très approximatives. Ceci est particulièrement dommageable, puisque qu'une erreur importante dans la détermination du rapport eau/ciment peut demander 28 jours pour être détectée, alors qu'une mauvaise prévision de la quantité d'eau peut être corrigée en quelques minutes.

A l'étape 6, il est supposé que la quantité de gravillon est indépendante de la quantité de ciment et d'eau. Pour évaluer cette hypothèse, examinons quelques simulations basées sur les constituants de référence. Dans une première série, les proportions entre les coupures 12,5/20 et 5/12,5 d'une part, et entre le sable et le sable correcteur d'autre part, ont été gardées constantes.

Cependant, le fait de supposer que le volume de gravillon est indépendant de la maniabilité induit l'effet pervers suivant : si, avec les mêmes matériaux, la maniabilité spécifiée augmente, les quantités d'eau et de ciment augmentent aussi (puisque le rapport eau/ciment est gardé constant). Comme le sable est calculé par différence entre le volume total de la gâchée et le volume du reste des constituants, son volume ne pourra que diminuer. Le rapport gravillon/sable augmente alors. Or, on a vu qu'un mélange moins compact demande une proportion de sable plus élevée, Ce point faible de la méthode ACI 211 est reconnu dans un post-scriptum où il est signalé que la proportion de gravillon peut (doit) être augmentée pour un béton sec ou diminuée pour un "béton plus ouvrable".

Dans une seconde série de simulations, l'effet du module de finesse du sable sur le volume de gravillon a été étudié. Gardant les mêmes constituants et une quantité constante de 350 kg/m³ de ciment, le module de finesse a été contrôlé en changeant les proportions mutuelles des deux granulats fins. Comme prévu par ACI 211, le volume de gravillon diminue quand le module de finesse augmente. Ce fait est conforme aux concepts d'empilement, car un module de finesse élevé correspond à un sable plus grossier, qui exerce un effet de desserrement plus important sur l'arrangement des gros grains, Mais les valeurs trouvées dans les simulations sont bien plus élevées que celles proposées par ACI 211

Globalement les prévisions du rapport gravillon/sable fourni par les tables d'ACI 211 sont bonnes, quoique perfectibles. Cette méthode est actuellement l'une des rares à faire référence à la compacité du gravillon. Il est simplement regrettable que cette approche ne soit pas étendue au sable.

Il n'est toutefois pas possible de considérer plus de deux fractions granulaires, ni de détecter une carence dans certaines zones de la courbe granulométrique. Certains auteurs prétendent même que cette restriction est l'une des causes des problèmes de durabilité rencontrés aux Etats-Unis. Enfin, la prévision du rapport eau/ciment est trop approximative. [2]

I.2.2 Méthode britannique (BRE 1988) [5]

I.2.2.1 Etapes successives de la méthode :

La méthode du Département de l'Environnement, révisée en 1988 ([BRE 1988]) comporte les étapes suivantes : [2]

Etape 1 : détermination du rapport eau/ciment. Une première contrainte concerne la durabilité (valeur maximale du rapport E/C). Le rapport eau/ciment est ensuite déduit de la résistance à la compression requise, pour des âges compris entre 3 et 91 jours.

Le type de ciment (durcissement lent ou durcissement rapide) et de granulats (concassé ou roulé) est aussi pris en compte dans une table et un abaque.

Etape 2 : détermination de la quantité d'eau. Le principe est très similaire à celui adopté dans la méthode ACI 211). Un raffinement supplémentaire consiste à considérer la forme des grains (anguleux ou non), qui est supposée contrôler la demande en eau, en plus de D_{max} et de l'affaissement requis.

Etape 3 : calcul de la quantité de ciment, en divisant la quantité d'eau par le rapport eau/ciment. A ce stade, une limite inférieure concernant la durabilité est prise en compte.

Etape 4 : détermination de la masse totale de granulats. L'utilisateur peut lire dans un tableau la "densité du béton à l'état frais" en fonction de la quantité d'eau et de la densité des granulats. De cette densité, les masses (pour un volume unité) de ciment et d'eau sont soustraites.

Etape 5 : détermination du rapport sable/ (sable + gravillon). Dans une série de tables, on trouve ce rapport en fonction de la maniabilité requise (exprimée par l'affaissement ou par le temps d'écoulement Vebe), de D_{max} , du rapport eau/ciment et de la quantité de passants du sable au tamis de 0,6 mm. Quand le gravillon est livré en plusieurs coupures, les pourcentages de chaque coupure par rapport à la masse totale de gravillon sont proposés dans une autre table. [2]

I.2.2.2 Examen critique

Des quatre méthodes étudiées dans ce chapitre, la prise en compte du rapport eau/ciment vis-à-vis de la résistance à la compression est de loin la plus avancée. Elle a l'avantage de considérer des âges différents de 28 jours, et elle reconnaît l'influence de la nature des constituants, que tous les ciments n'ont pas la même montée en résistance, y compris dans la même catégorie. Par ailleurs, tous les granulats concassés n'apportent pas la même contribution à la résistance à la compression. La méthode britannique permet cependant une bonne approximation du rapport eau/ciment à partir d'une appréciation visuelle des constituants.

Concernant le squelette granulaire, le niveau de sophistication est aussi plus élevé, par rapport à la méthode ACI 211, puisque plus de deux fractions peuvent être gérées. La proportion de sable dans le granulats total augmente :

- Quand le dosage en ciment diminue (comme dans l'ACI 211).
- Quand l'affaissement augmente. C'est un avantage par rapport à la méthode américaine.
- Quand D_{max} diminue.
- Quand la quantité de grains inférieurs à 0,6 mm diminue. Dans ce cas, le sable devient plus grossier, et l'effet de desserrement exercé sur le gravillon augmente, ce qui, réciproquement, fait augmenter la quantité de sable. Cela correspond à l'influence du module de finesse dans ACI 211. Donc, toutes les tendances relatives à l'évolution du volume de sable, Le point faible de la méthode britannique est cependant l'absence de mesure directe de compacité des fractions granulaires, qui ne sont donc pas intégrées dans la détermination des proportions granulaires. La différence entre granulats arrondis et concassés est toutefois prise en compte dans la prévision du rapport eau/ciment et de la quantité d'eau. [2]

I.2.3 Méthode française (Dreux 1970) : [6]

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique, à la différence de la méthode Faury qui lui est antérieure et qui est basée sur la théorie de l'optimum granulaire de Caquot. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants. En combinant les courbes granulaires obtenues, il a pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique. [2]

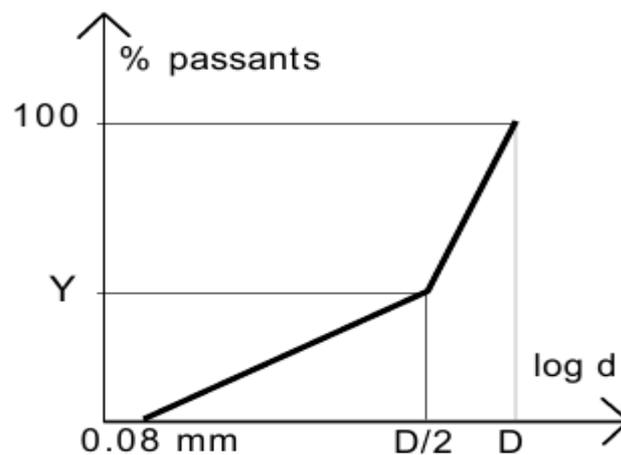


Figure I.1 : Courbe granulaire de référence selon Dreux [2].

I.2.3.1 Etapes successives de la méthode :

Étape 1 : Examen de la structure (dimensions, espacement entre armatures, enrobage, etc.).

Étape 2 : Détermination de la résistance à la compression. Elle est déduite de la résistance désirée et d'un coefficient probable de variation.

Etape 3 : Sélection de la consistance du béton frais. Cette spécification est définie par rapport à l'affaissement ou au test CES (l'essai CES86 a été réalisé sur les deux mélanges. Cet essai consiste à remplir avec le béton frais un moule cubique dont une face verticale transparente et équipée d'un treillis d'acier. Le béton frais est placé dans l'appareil en deux couches piquées 25 fois, et une vibration de 10 secondes est appliquée à la boîte. L'aspect du béton est alors observé sur la face transparente, la compactibilité obtenue est satisfaisante : après vibration, l'acier est correctement enrobé par le béton frais, et il n'apparaît ni bulles, ni de nid d'abeilles).

Etape 4 : Sélection de D_{max} . Elle est faite à l'aide d'une table fixant des valeurs maximales fonction des dimensions de la structure analysées à l'étape 1.

Etape 5 : Calcul du dosage en ciment. Le rapport ciment/eau est déduit tout d'abord de la résistance souhaitée, en utilisant la loi de Bolomey : $f_c = 24.6 \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$.

Cette loi tient compte de la résistance du ciment et d'un facteur ajusté aux granulats. Un dosage minimum en ciment est alors calculé, pour la durabilité. Ce dosage est supposé être inversement proportionnel à la racine cinquième de D_{max} . Enfin, le dosage réel en ciment est déduit d'un abaque, en fonction du rapport ciment/eau et de l'affaissement.

Etape 6 : Calcul de la quantité (totale) d'eau. Elle est calculée à partir de la quantité de ciment déterminée précédemment et du rapport ciment/eau. A ce stade, une correction peut être faite pour tenir compte de D_{max} (augmentation de la quantité d'eau quand D_{max} diminue). La quantité d'eau à mettre dans le malaxeur est alors égale à cette valeur, corrigée par l'eau libre contenue dans les matériaux bruts (granulats).

Etape 7 : Examen du sable. Le sable est soit accepté, soit rejeté sur la base de sa propreté. Sa courbe granulométrique est reportée sur un diagramme standard. Si le module de finesse est trop élevé (sable trop grossier), un sable fin correcteur est ajouté.

Etape 8 : Tracé de la courbe granulaire de référence. L'ordonnée Y (figure I.1) est déterminée par les facteurs suivants : D_{max} , dosage en ciment, intensité de la vibration, forme des grains et module de finesse du sable. Le (tableau I.1) résume les déplacements de Y en fonction d'une augmentation ces paramètres.

Tableau I.1 Paramètres pris en compte dans la détermination de Y (ordonnée du point de brisure).

[2]

Paramètres	Evolution de Y
D_{\max}	↓
Dosage en ciment	↓
Vibration	↓
Forme des particules	Roulées ou concassées
Module de finesse	↑

Étape 9 : Détermination du volume solide du mélange frais. Cette quantité est tabulée en fonction de D_{\max} et de la consistance.

Étape 10 : Détermination des fractions granulaires. Les proportions respectives (en volume) sont déterminées graphiquement, à l'aide de la courbe de référence (étape 8). Alors, pour chaque granulat, le volume dans le volume unité de béton est calculé en multipliant le volume solide par la proportion trouvée. Enfin, en multipliant le volume de chaque granulat par sa masse volumique, on obtient la masse du granulat considéré.

A ce stade, la composition théorique est connue ; elle doit être testée sur des mélanges de laboratoire, et ajustée (si nécessaire). [2]

I.2.4 Méthode Baron Lesage (France) :

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulaire d'un béton.

L'essai utilisé pour caractériser la maniabilité est le maniabilimètre LCL (ou essai d'écoulement). Le principe est de mesurer le temps mis par un échantillon de béton pour s'écouler sous vibration jusqu'à un certain repère. Les proportions optimales des granulats sont supposées donner le temps d'écoulement minimum, pour une quantité donnée de ciment et d'eau. Une fois les proportions granulaires repérées, les dosages en eau et en ciment sont ajustés expérimentalement, de sorte que le mélange présente la maniabilité et la résistance souhaitées. On suppose, dans cette méthode, que les proportions optimales de granulats ne dépendent pas de la quantité de ciment. La méthode Baron Lesage a l'avantage de ne dépendre d'aucune formule ou table qui pourrait être suspectée de ne s'appliquer qu'à certain type de matériaux. De ce point de vue, elle peut être qualifiée de fondamentale et de scientifique. Par contre, la nécessité de réaliser un certain nombre de gâchées expérimentales, pour trouver les proportions optimales de granulats, est assez contraignante. La méthode devient surtout lourde quand plus de deux granulats doivent être proportionnés. Le principe de cette méthode correspond exactement à la règle (L'optimum des proportions granulaires peut être trouvé expérimentalement ; il correspond au maximum d'ouvrabilité pour des dosages constants en ciment et en eau), la méthode est alors justifiée de ce point de vue. On a vu cependant,

que la règle est contestable, puisque les proportions optimales du squelette dépendent généralement du type d'essai utilisé pour tester le béton frais. [2]

I.2.5 Autres méthodes :

I.2.5.1 Méthode de Bolomey :

Par une formule appropriée on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe granulométrique soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante : $P=A+(100-A)\sqrt{\frac{d}{D}}$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D : est le diamètre du plus gros granulat

A : coefficient varie entre 8 et 16 en fonction du dosage en ciment, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. [3]

I.2.5.2 Méthode d'Abrams :

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduits au minimum. [3]

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés sont déterminés expérimentalement par Abrams et sont indiqués dans des valeurs tabulées en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du plus gros granulat.

Tableau I.2 : Valeurs optimales d'après ABRAMS du module de finesse des compositions granulaire des bétons courants.

Dosage en ciment kg/m ³	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6.00
300	4.25	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.30	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

La règle du mélange d'Abrams permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de module de finesse MFS et MFG pour obtenir un module de finesse MF choisi pour le mélange. [3]

$$S_s = MF_G - MF \quad \text{et} \quad S_g = MF - MF_s$$

La proportion de gravier est : % gravier = $(S_g / S) * 100$

La proportion de sable est : % sable = $(S_s / S) * 100$

$$\text{Où} \quad S = S_s + S_g$$

I.2.5.3 Méthode de Faury :

Faury proposa une nouvelle loi de granulation de type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. [3]

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$), des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixé à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est une valeur tabulée en fonction de types des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Y, se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{D^{-0.75}}$$

Avec :

A : valeur tabulée

B : varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

D : est exprimé en dimension de passoire.

R : est le rayon moyen du moule. [3]

I.2.5.4 Méthode de Valette :

R. Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

La méthode Valette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes. Dans les cas les plus courants on parlera en général d'un béton binaire : un sable et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité (par exemple : sable 0/5 et gravier 16/25) [3].

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment ; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment. [3]

I.2.5.5 Méthode Dreux-Gorisse :

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats. [7]

I.3. Choix d'une méthode de formulation :

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisés sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important.

- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées :

- Minimum de vides internes déterminant une résistance élevée.
- Bonne étanchéité améliorant la durabilité.
- Résistance chimique.
- Résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect. La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés. [7]

I.3.1 Processus du choix d'une formulation :

La formulation du béton correspond au processus de sélection des constituants et de leurs proportions pour fabriquer un matériau aussi économique que possible et possédant certaines propriétés minimales précises, notamment en ce qui concerne la résistance, la durabilité et la maniabilité.

Les facteurs de base que l'on doit en considération pour déterminer une formulation et l'ordre des décisions pour chacune des constituants d'une gâché sont donnés dans la figure suivante :

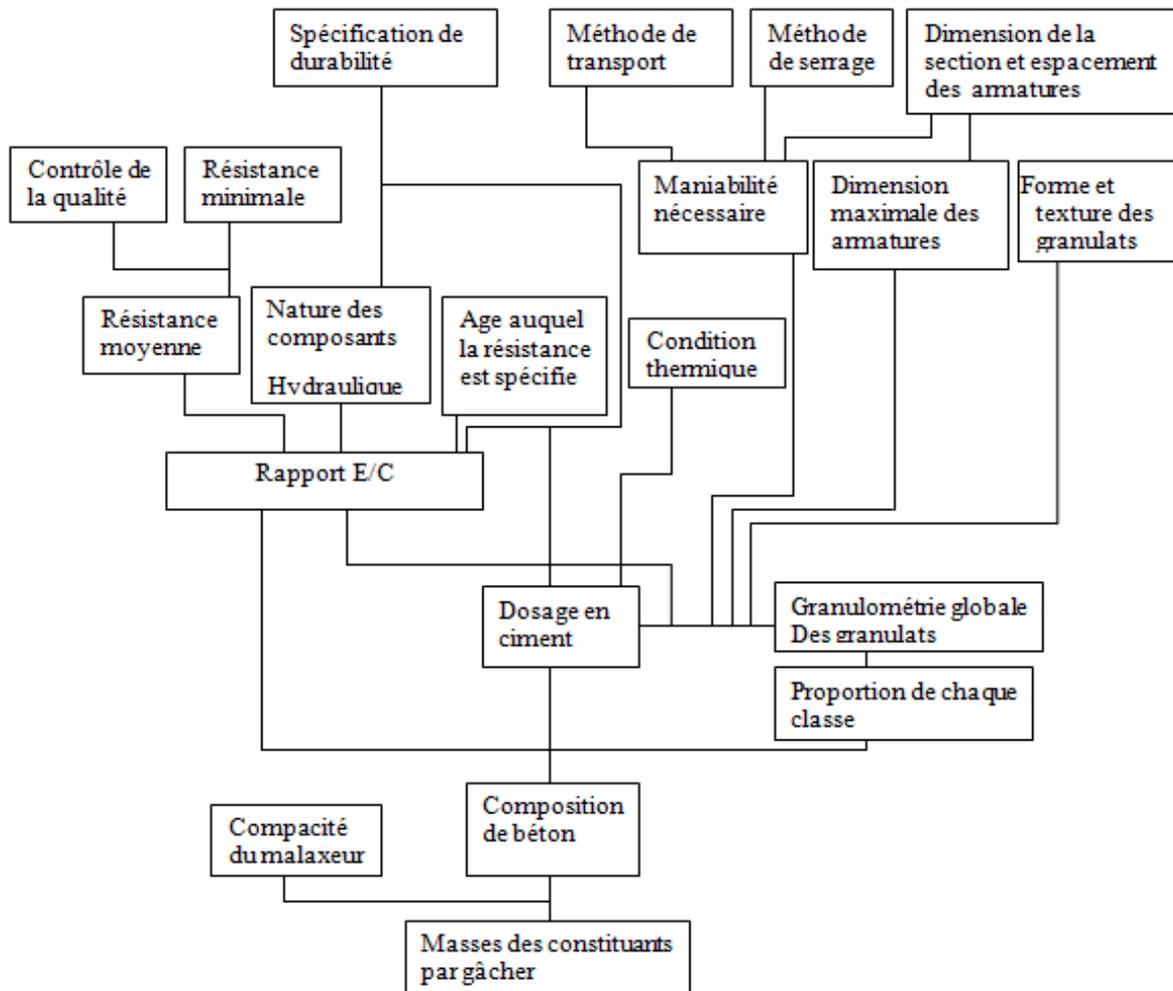


Figure I.2 : Processus du choix d'une formulation [8].

I.3.2 Facteur de base à prendre en compte lors du choix d'une formulation :

Pour obtenir un béton satisfaisant, il faut, non seulement calculer ou estimer les proportions des matériaux disponibles, mais aussi réaliser des gâchés d'essai. On peut ainsi vérifier les proportions et apporter les corrections nécessaires jusqu'à ce que l'on obtienne une formulation donnant entièrement satisfaction.

I.4 facteurs régissent la formulation d'un béton

L'objectif de la formulation est de confectionner le béton le plus économique et donnant satisfaction tant à l'état frais qu'à l'état durci. Pour atteindre cet objectif, on peut considérer les différents facteurs de la figure précédente et suivre les étapes de décisions jusqu'au choix final des proportions du béton.

I.4.1 le rapport eau/ciment et résistance à la compression

La présence de 5 % de vides dans le béton peut réduire la résistance de plus de 30 % et même un pourcentage de 2 % peut produire une perte de plus de 10 %. Les vides à l'intérieur du béton sont soit des bulles d'air piégé lors du malaxage soit des espaces laissés lorsque l'excédent d'eau contenu dans le béton s'évapore. Dans ce qui suit, on ne considérera que le cas de bétons

complètement compactés ceci induit que, lors de la détermination de la composition du béton, le béton durcit ne contient qu'environ 1% d'air piégé.

La résistance d'un béton bien compacté est inversement proportionnelle au rapport Eau/ciment. Cette relation est présentée par Duff Abrams en 1919. Selon cet auteur, la résistance est égale :

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{E/C}}$$

Où E/C : représente le rapport eau/ciment du béton (rapport volumique) et K1 et K2 sont des constantes empiriques.

En pratique, le rapport eau/ciment est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton complètement compacté. La meilleure citation en ce sujet est probablement celle de Gilkey : « pour un ciment donné et de granulats acceptables la résistance qui peut se développer dans un béton maniable confectionné dans des conditions identiques de malaxage, de mise en œuvre, de conservation et d'essai est influencé par (a) le rapport massique entre ciment et l'eau de gâchage.

(b) Le rapport massique entre le ciment et les granulats

(c) La granulométrie, la texture, la forme, la résistance et la dureté des granulats

(d) La dimension maximale des granulats.

On peut ajouter que les facteurs (b), (c) et (d) ont une importance moindre que le facteur (a) lorsque l'on utilise des granulats courants, dont la dimension maximale est de 40 mm.

La résistance du béton est due à :

- la résistance du mortier.

- L'adhérence entre le mortier et le gros granulat

-La résistance du gros granulat, c'est-à-dire la capacité du granulat à résister aux contraintes qui lui sont appliqués. [8]

I.4.2 Durabilité :

Le choix des proportions d'un béton doit non seulement satisfaire aux exigences de résistance, mais aussi garantir une durabilité convenable. Il n'existe encore aucune approche générale et efficace pour sélectionner les proportions et garantir la durabilité à cause de la variété de conditions d'exposition y compris les conditions extrêmement difficiles des régions chaudes et des régions côtières très acides ou la protection des armatures contre la corrosion influe considérablement sur le choix des proportions et la nature des matériaux cimentaires revêt une grande importance. Lorsqu'un béton est soumis à une attaque chimique, il faut utiliser un type de ciment convenable, mais, si le béton est exposé aux cycles de gel - dégel, le choix de ciment est

déterminé par d'autres considérations, par exemple, l'évolution rapide de la résistance à court terme. Si le bétonnage se fait dans un temps froid il faut un ciment avec une forte chaleur d'hydratation [8]

I.4.3 Maniabilité :

Il ne faut pas examiner seulement les conditions nécessaires pour garantir que le béton sera satisfaisant à l'état durci, mais, aussi ses propriétés lorsqu'il est transporté, pompé et mise en place. Une des propriétés essentielle est d'assurer une maniabilité satisfaisante ; la formulation qui ne tiendra pas en compte la maniabilité appropriée à la mise en œuvre remettrait en cause le calcul rationnel des propriétés du béton.

La maniabilité dépend de deux facteurs :

- la dimension minimale de la section à bétonnée ainsi que la densité et l'espacement du ferrailage.
- Le mode de compactage utilisé, vibration ou autre.

Il y a aussi la cohésion qui est une propriété étroitement liée à la maniabilité. Elle dépend de la quantité de fines particules dans le béton ; il est souvent nécessaire d'effectuer plusieurs gâchées d'essai avec différentes proportions de granulats allant du plus fins au plus grossier avant de trouver le béton qui présente la cohésion correcte uniforme et éviter la provocation de la ségrégation. [8]

I.4.4 Dimension maximale du granulat :

Pour le béton armé, la dimension maximale des granulats dépend de la largeur de la section à bétonner et de l'espacement des armatures. Dans ce contexte, plus importante est la grosseur des grains constitutifs du granulat, plus faible est la surface à mouiller par unité de masse. Ainsi, une augmentation de la grosseur maximale du granulat diminue la demande en eau du béton de telle sorte que, pour une même maniabilité et un même dosage en ciment, le rapport eau/ciment peut être abaissé, d'où une augmentation de la résistance Ce comportement est vérifié par des essais sur des granulats dont la dimension était de 40 mm. Les résultats expérimentaux montrent cependant que, pour les granulats supérieurs à 40 mm, la résistance est réduite à cause de la faible interface de liaison et de la discontinuité présentée par les très gros éléments. Le béton devient grossièrement hétérogène et il y'aura risque d'augmenter la ségrégation. [8]

I.4.5 Granulométrie et type de granulat

La granulométrie influe les proportions d'un béton pour une maniabilité et un rapport Eau/ciment définis : plus la granulométrie est grossière, plus le dosage du béton peut être diminué. Mais cette affirmation est vraie sous certaines conditions car un béton très pauvre n'aura pas une bonne cohésion par manque de particules fines.

Il est possible de renverser ce choix : si le dosage en ciment est fixé, la granulométrie doit alors

être choisie de sorte que l'on puisse confectionner le béton avec les proportions données d'eau, de ciment et de granulats et présentant une maniabilité satisfaisante. Cependant, il y a des limites granulométriques au-delà desquelles il n'est plus possible de confectionner un bon béton.

On doit examiner aussi le type de granulat car la texture de la surface et la forme agissent sur le rapport granulat/ciment pour une maniabilité et un rapport eau/ciment donnés.

Par conséquent, lors de la formulation, il est essentiel de connaître le type de granulats disponible. Une autre caractéristique très importante est l'uniformité des granulats fins, dans le cas où la quantité d'eau de gâchage est contrôlée pour une maniabilité constante : un changement brusque pour une granulométrie fine nécessite une quantité d'eau plus élevée pour garantir la même maniabilité, ce qui provoque une diminution de résistance.

I.4.6 Dosage en ciment :

Le choix du dosage en ciment est fait d'après l'expérience ou au moyen de tableaux et graphiques élaborés à partir de résultats de laboratoire. Ces tableaux ne sont guère qu'un guide pour établir les proportions nécessaires, car elles ne tiennent en compte que des granulats utilisés lors de ces essais. [8]

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié des plusieurs méthodes de formulation de béton ordinaire.

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte le plus souvent deux phases :

Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baron et Lesage). Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.

La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

Chapitre II

NOTIONS SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON



Notions sur la durabilité du béton

II.1. Introduction :

La durabilité des bétons dépend beaucoup de la porosité, cette dernière conditionne l'intensité des interactions du béton avec les agents agressifs. Les pores à l'intérieur de l'ouvrage facilitent le processus d'endommagement, lequel s'initie généralement en surface. [9]

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. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces trois paramètres sont considérés comme des « indicateurs de la durabilité ».

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 de leur interconnexion. 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, 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.

Le transport de matière par perméabilité ou diffusivité, caractérise l'aptitude à l'usage de béton. Plus la résistance du béton augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité est augmentée. C'est la raison pour laquelle, la compréhension des mécanismes de transport dans un milieu poreux est très importante.

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 des fissures qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé (dalles, poutres) et éventuellement de diverses causes accidentelles. Dans ce cas, l'augmentation de la capacité de pénétration de ces agents dans le béton facilite la détérioration de la structure. [10]

II.2 Le ciment :

Le ciment est un matériau que tout le monde croit connaître tant il est courant. On l'emploie en effet pour fabriquer le béton qui est le matériau de construction le plus utilisé au monde. La raison en est son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et sa disponibilité pratiquement universelle. Il suffit, en effet, de mélanger un peu de poudre avec de l'eau, du sable et des graviers pour obtenir, à température ambiante et en quelques heures, un matériau dur. Bien que près de deux milliards de

tonnes de béton soient produites de cette manière par an, tous les processus physicochimiques à la base de cette transformation ne sont pas complètement bien compris et font encore l'objet de recherches. [11]

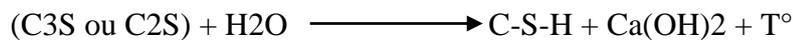
Les principaux composés du ciment portland sont :

- Les silicates tricalciques (alite) : $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C3S]
- Les silicates bis calciques (belite) : $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C2S]
- Les aluminates tricalciques : $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C3A]
- Les aluminoferrites tétra calciques : $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C4AF]
- Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .).

II.3 Hydratation du ciment :

II.3.1 Structure de la pâte de ciment hydraté :

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



La pâte de ciment hydraté est formée par :

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

La figure (II-1) montre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydraté.

On y retrouve :

- Des grains de ciment (10 à 80 μm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates.
- des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau.
- des hydrates (surtout des C-S-H et de la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment.
- Les pores de gel ne sont pas représentés (trop petits) et les bulles d'air sont trop grandes pour apparaître sur cette figure (II.1).

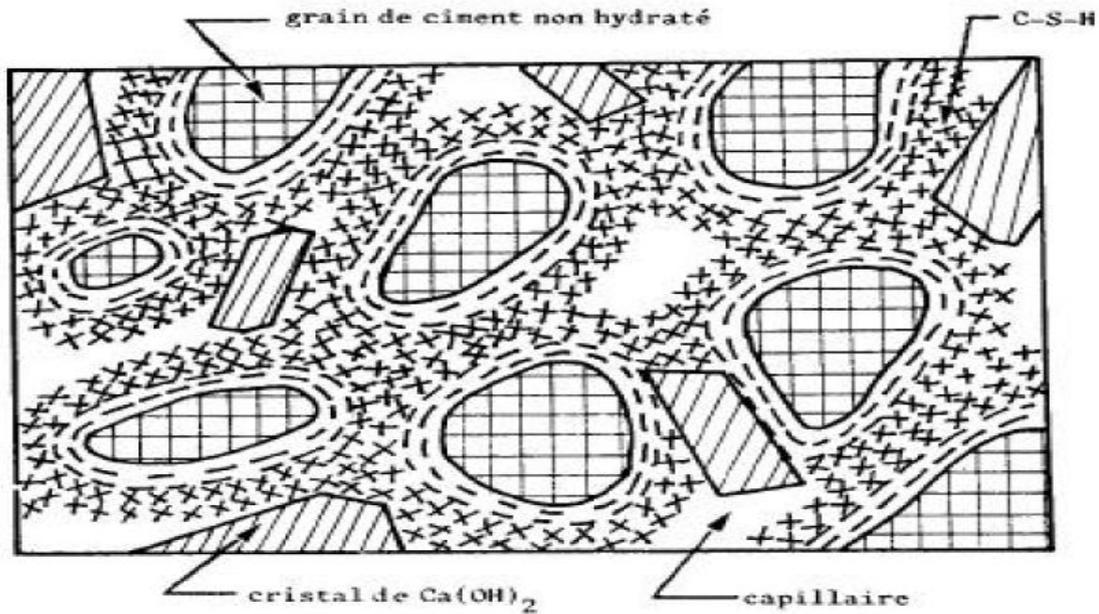


Figure II.1 : Représentation schématique de la Pâte de ciment hydraté. [10]

II.3.2 Les principaux hydrates :

Les hydrates comprennent :

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

II.3.2.1 Les C-S-H :

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

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

- Le pH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13). A des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca^{2+} . Les C-S-H subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.
- Le gel de C-S-H est poreux :
 - ✓ Les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillets.
 - ✓ Ils sont très petits (20Å à 30Å)

- ✓ La porosité du gel de C-S-H représente environ 28% du volume total du gel.
- L'eau des pores de gel n'est pas libre car elle est fortement retenue sur les feuillets par des forces de surface. Puisque les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.

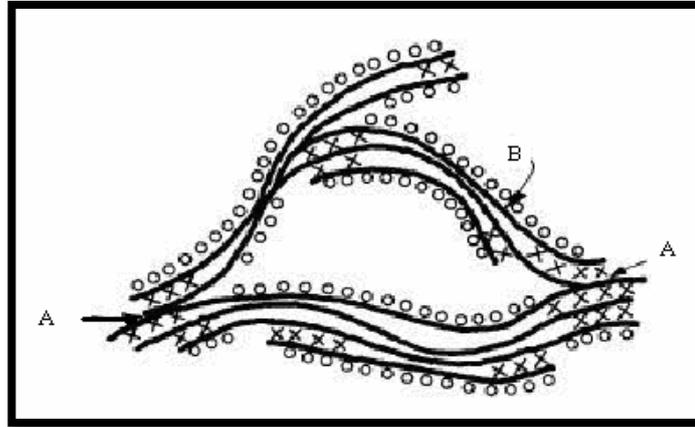


Figure II.2 : Représentation schématique des feuillets de C-S-H

A – Inter particle bonds, X - interlayer hydrate water, B - tobermorite sheets, O - physically adsorbed water [10]

II.3.2.2 La chaux hydratée (CH ou portlandite) :

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

II.3.2.3 Les aluminates hydratés :

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

Ettringite (tri sulfoaluminates) aiguilles prismatiques

Mono Sulfoaluminates (plaquette hexagonales).

II.3.2.4 La Porosité de la pâte de ciment :

En cours d'hydratation, le matériau qui se présente initialement à l'état pâteux (grains de ciment plus ou moins floculés dans l'eau) se transforme progressivement en un solide poreux.

La porosité est classiquement décrite en deux familles :

- **La porosité capillaire** : en cours d'hydratation on constate un accroissement du volume apparent des hydrates par rapport au volume des anhydres (1cm³ d'anhydres produit environ 2.13 cm³ d'hydrates). Les pores capillaires sont les reliquats des espaces inter granulaires initiaux non emplis par les hydrates.

- **La porosité des hydrates** : les hydrates présentent une porosité interne due principalement aux C-S-H. Elle est approximativement constante quel que soit le degré d'hydratation (environ 28%). La porosité capillaire dépend de l'avancement des réactions d'hydratation et de la porosité initiale de la pâte de ciment c'est à dire du rapport E/C des masses de ciment et d'eau de gâchage. Le modèle d'hydratation de POWERS décrit, pour des ciments de type CEM I, l'évolution des volumes au sein d'une pâte de ciment en cours d'hydratation.

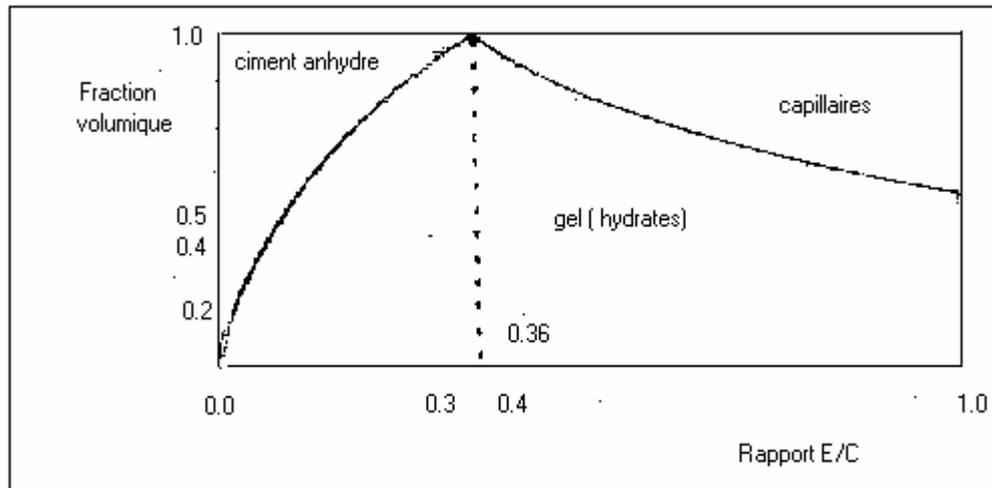


Figure II.3 : Composition volumique d'une pâte de ciment portland totalement hydratée. [13]

II.3.2.5 Distribution porosimétrique de la pâte de ciment hydraté :

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

La figure (II.4) représente la distribution porosimétrique de pâte de ciment CPA-CEM I en fonction du rapport E/C.

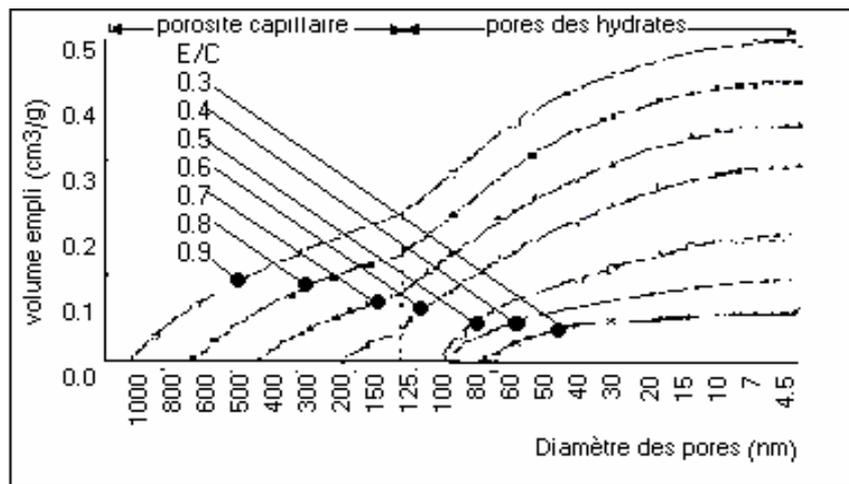


Figure II.4 : Influence du rapport E/C sur la structure porosimétrique (28 jours) [10]

II.3.3 État de l'eau dans la pâte de ciment hydraté :

Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes. Cette eau interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état (Fig. II.5).

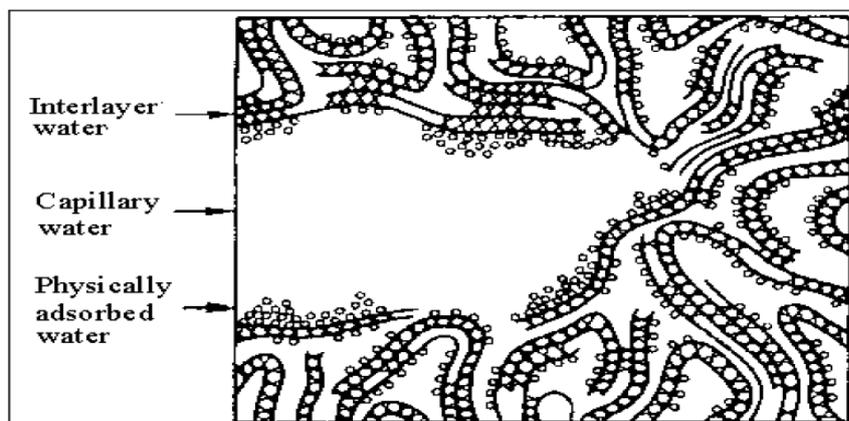


Figure II.5 : Représentation schématique du C-S-H et de l'état de l'eau qui y est associé. [12]

II.3.3.1 L'eau combinée :

Cette eau fait partie intégrante des C-S-H. Elle représente environ 23% du poids de ciment qui a réagi. Elle est très stable et on ne peut l'évaporer qu'en décomposant le C-S-H à haute température.

II.3.3.2. L'eau zéolitique (interlayer):

Cette eau n'est pas chimiquement combinée dans la structure des C-S-H mais elle est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogène. Pour l'évaporer il faut que le taux d'humidité s'abaisse au-dessous de 30%, ce qui provoque un très fort retrait de la pâte.

II.3.3.3 L'eau adsorbée :

Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides (surtout sur les parois des capillaires ou des pores de gel). On croit qu'une couche d'environ 6 molécules d'eau (15 Å) peut être retenue par des liens hydrogène. Une grande partie de l'eau adsorbée peut être retirée si le taux d'humidité est inférieur à 50%. Cette perte d'eau est en grande partie responsable du retrait de la pâte ou du béton.

II.3.3.4 L'eau des capillaires :

Il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment. Selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface.

a) Eau libre :

L'eau libre est contenue dans les plus gros capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$). Son départ ne cause pas de changement de volume important (retrait).

b) Eau Non libre :

Cette eau est contenue dans les plus petits capillaires ($0,05 \mu\text{m}$ à $0,005 \mu\text{m}$). Elle y est retenue par des tensions capillaires. Il faut abaisser le taux d'humidité en dessous de 90% pour qu'elle commence à s'évaporer. Elle a beaucoup d'influence sur le retrait de la pâte [10].

II.4 Durabilité et qualité de béton :

La durabilité du béton est un fait reconnu et attesté par la pérennité des ouvrages exposés à des conditions climatiques ou d'environnement les plus variées. Les ouvrages usuels, réalisés en bétons courants, aussi bien que les plates-formes off-shore en milieu marin, les autoroutes sollicitées par un trafic intense, les viaducs soumis à l'action du gel et des sels de déverglaçage, résistent au fil des années aux multiples agressions physico-chimiques auxquelles ils sont soumis.

Néanmoins, il arrive que des défauts de conception ou de mise en œuvre, que des causes accidentelles soient à l'origine de désordres : la notion de durabilité est donc indissociable de celle de qualité à tous les niveaux et, en particulier, de celle du matériau béton. L'exigence de qualité est devenue aujourd'hui une nécessité, car elle est garante d'avantages techniques et, en particulier, de durabilité. Elle est aussi un facteur d'économie par sa contribution à la limitation des coûts de maintenance.

Pour les constituants du béton et le béton lui-même, la qualité se traduit par la conformité aux normes et, dans de nombreux cas, la certification qui l'atteste.

Pour les ciments, par exemple, la certification est constituée par le label NF géré par l'AFNOR. La plupart des centrales de béton prêt à l'emploi fournissent des bétons normalisés ; les produits en béton fabriqués en usine sont en grande partie certifiés.

Le concepteur dispose donc des informations nécessaires sur les matériaux pour réaliser des ouvrages résistant aux contraintes mécaniques et aux facteurs extérieurs de dégradation.

Il ne faut cependant pas oublier que la durabilité du béton est aussi dépendante des conditions de mise en œuvre et que toute négligence à ce niveau peut remettre en cause des matériaux de bonne qualité. [13]

II.5 Critères généraux de durabilité :

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

II.5.1 La porosité du béton :

Le béton est un mélange composé d'un ensemble de constituants – ciment, granulats, eau, adjuvants mais renfermant aussi des vides dus, entre autres, à l'eau excédentaire.

Le béton durci courant présente une porosité de 10 à 12 % due à la présence de pores inclus dans la texture même des hydrates, et de capillaires qui se développent dans la structure des grains.

Les capillaires, qui sont dimensionnellement les plus importants, ne dépassent pas un diamètre de quelques microns. Les pores des hydrates sont 10 à 100 fois plus petits.

Le comportement du béton et son évolution ont montré, dès l'origine, l'influence de la porosité sur la résistance (relation établie par Féret). Mais les corrélations entre durabilité et résistances mécaniques, entre absorption d'eau et résistance au gel, ou perméabilité et carbonatation ont été mises en évidence plus récemment.

Il est aujourd'hui admis que la réduction de la porosité du béton, qui est, entre autres, la condition pour réaliser des bétons de hautes performances, est requise pour l'amélioration de la résistance du béton, aussi bien d'un point de vue mécanique que vis-à-vis d'agressions d'ordre physico-chimique.

La réduction de la porosité du béton dépend principalement de sa conception et de sa mise en œuvre.

Trois facteurs sont prépondérants dans la conception d'un béton de faible porosité :

- un dosage en ciment adéquat
- une faible teneur en eau
- une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actifs, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

Les progrès réalisés dans la connaissance des adjuvants ont permis d'élaborer des plastifiants qui autorisent des réductions importantes de la teneur en eau sans diminuer la plasticité du mélange.

Une étude correcte de la granulométrie du béton, en jouant sur le ciment et le sable, est généralement suffisante et ne nécessite un recours à des particules ultrafines que pour des bétons de très hautes performances.

Il faut enfin souligner l'importance de la mise en œuvre du béton sur ses propriétés : un malaxage efficace, une vibration appropriée, la cure pour les ouvrages horizontaux, sont des conditions impératives de réalisation d'un béton durable. [13]

II.5.2 Résistance :

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

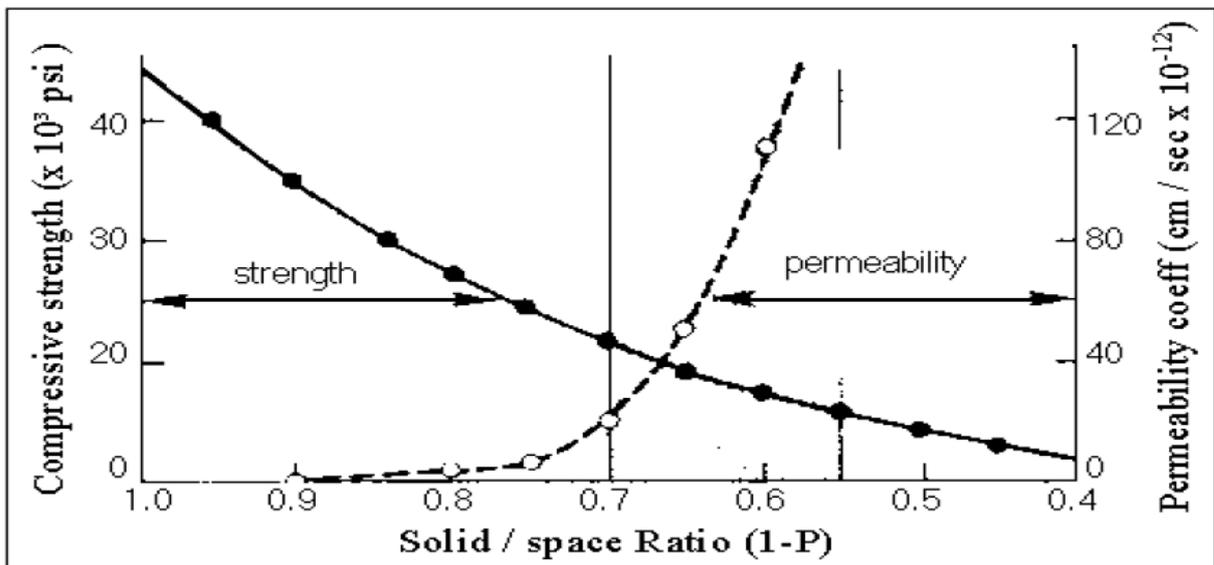


Figure II.6 : La relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. [10]

La figure (II.6) présente la relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. On remarque qu'il y a une relation très nette entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. La perméabilité à l'eau diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance.

II.5.3 Rapport E/C :

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

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

Avec l'augmentation du volume d'eau, le rapport E/C augmente. La figure (II.7) représente l'influence du rapport E/C sur des propriétés sélectionnées du béton.

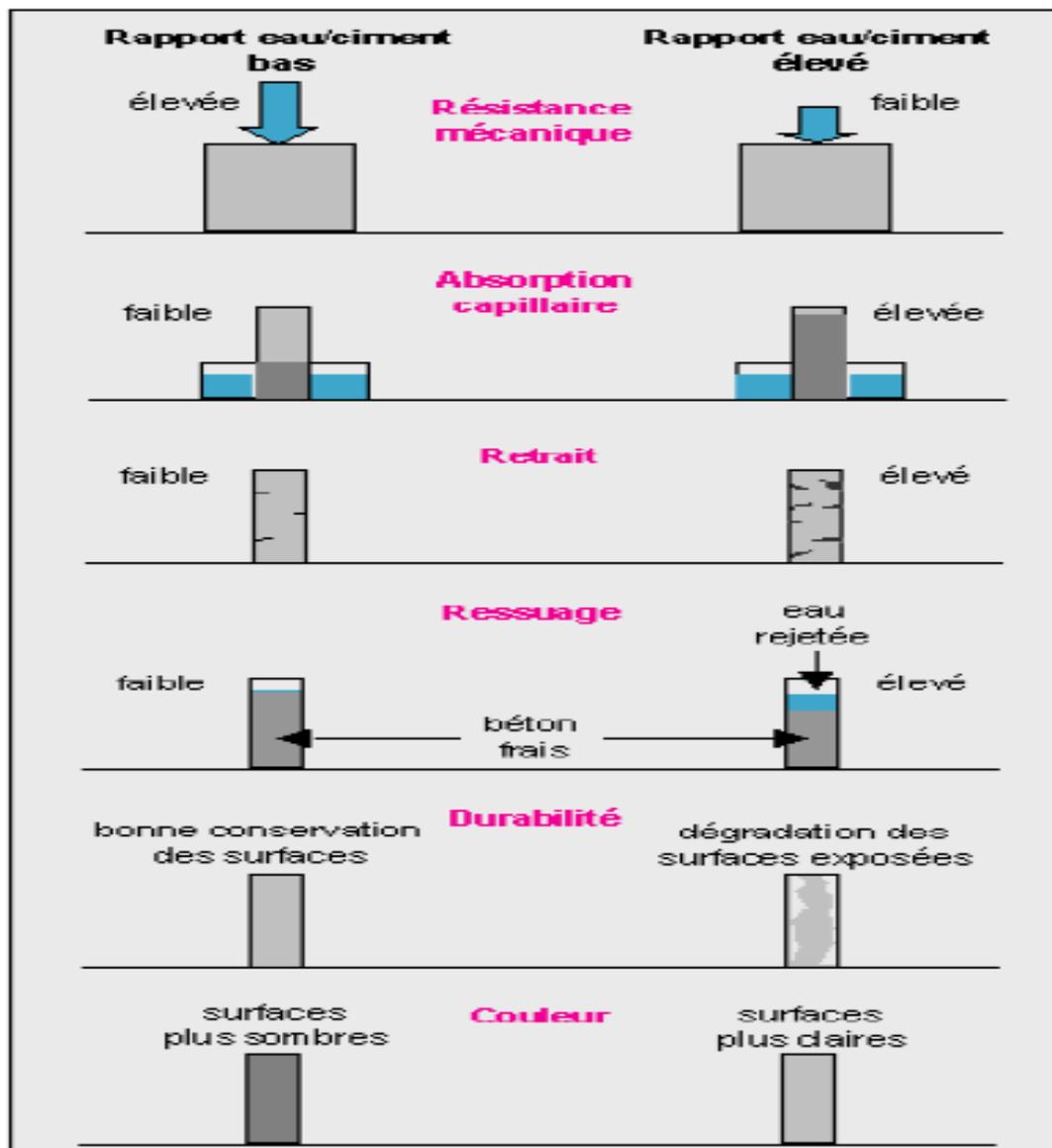


Figure II.7 : Influence du rapport E/C sur les propriétés du béton [10]

Selon [10], On peut retenir les valeurs indicatives suivantes :

1/- la résistance à la compression diminue en fonction de l'accroissement du rapport E/C.

La résistance à la compression d'un béton présentant un rapport E/C = 0.40 est fixée à 100 %.

Tableau II.1 : la résistance à la compression en fonction rapport E/C. [10]

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

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

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

Tableau II.2 : l'absorption d'eau en fonction de rapport E/C. [10]

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

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

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

Tableau II.3 : le retrait final en fonction de rapport E/C [10]

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

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

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

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

II.5.4 Dosage en ciment :

Le moyen d'accroître les résistances à court terme d'un béton peut être d'augmenter son dosage en ciment. En effet, pour augmenter la résistance et diminuer la porosité, cela conduit à diminuer le rapport (E/C) c'est à dire augmenter le dosage en ciment. Donc, plus le béton sera dosé en ciment plus l'exothermie sera importante, ce qui devrait se traduire par des gains résistance à courts termes

plus importants, c'est pour cela que le dosage en ciment est considéré comme une condition de sécurité et comme un critère général de durabilité [10].

II.5.5 Dosage en granulats :

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les qualités du béton.

- La proportion relative gravillons/sable est traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, lorsque ce facteur reste inférieur à 2.
- La granulométrie du sable peut par exemple être caractérisée par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8. [13]

II.5.6 Dosage en eau de gâchage :

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On pressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0,5, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

Toutes ces raisons soulignent la difficulté de la détermination du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression C/E précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier.[13]

II.6 Propriétés de transfert dans le béton :

II.6.1 La perméabilité et la diffusivité :

Les transferts de matière au sein d'un milieu poreux peuvent se réaliser suivant deux mécanismes distincts, dans un béton durci ces transferts s'établissent par l'intermédiaire du réseau poreux, mais également par le réseau de fissures qui résulte du fonctionnement normal des structures en béton armé ou d'éventuelles causes accidentelles. Wang et al, [14], ont montré que la fissuration peut avoir une grande influence sur la perméabilité des bétons.

La diffusion consiste en un transport moléculaire sous gradient de concentration, c'est le mode prépondérant de transport des gaz dans les bétons. On peut citer pour exemple la dessiccation d'un béton partiellement séché, qui est un transfert de vapeur d'eau dans l'air contenu par les pores, et la pénétration de gaz agressifs, comme le dioxyde de carbone. Ce processus est décrit par la première et la deuxième loi de Fick, et on définit la diffusivité D_a d'une espèce dans un milieu poreux [15].

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

La perméabilité d'un matériau dépend bien sur de sa porosité, c'est à dire du volume des pores par unité de volume, mais aussi de la taille des pores et de la distribution de leur taille ou répartition porosimétrique, il existe des corrélations, théoriques et expérimentales entre les paramètres géométriques du réseau poreux, et la perméabilité. Citons pour exemple l'approche de Hugues [16], qui considère un écoulement visqueux dans un réseau 3D de pores cylindriques, et qui établit la relation :

$$V = \frac{P}{32n^2\mu} r^2 \text{ grad}H$$

Ou : P : porosité du matériau

n: facteur de tortuosité

r : rayon moyen des pores (m)

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

Toutefois, la réalité est bien plus complexe, et Powers et al. [17] ont montré que sous certaines conditions de composition et de cure, la perméabilité des bétons n'est plus contrôlée par la porosité capillaire, dont le réseau n'est plus interconnecté, mais par celle des hydrates, ce qui conduit à une perméabilité du matériau beaucoup plus faible. De plus la perméabilité d'une pâte de ciment, d'un mortier et d'un béton est très différente, car l'interface pâte granulat joue un grand rôle dans les mécanismes de transport. Young [14] montre par exemple que la perméabilité d'une pâte de ciment est de plus de deux ordres de grandeur plus faible que celle d'un béton. [18]

II.6.2 Perméabilité et géométrie des pores :

Il n'existe pas de relation simple entre la porosité des bétons et leur perméabilité.

D'une manière générale, on peut dire que l'ensemble des caractéristiques de la structure poreuse détermine la perméabilité : forme, taille et interconnexion des pores.

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

La modélisation statistique et les modèles utilisant les données classiques de la porométrie au mercure. [18]

II.7 Paramètre influant la perméabilité à l'eau du béton :

II.7.1 Rapport E/C :

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

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

La perméabilité à l'eau à augmenter avec le rapport E/C est confirmée. Toute fois, la dispersion de ces résultats illustre les précautions indiquées en préambule concernant les mesures de perméabilité.

La relation entre le rapport E/C et la perméabilité n'est donc pas une relation univoque [18].

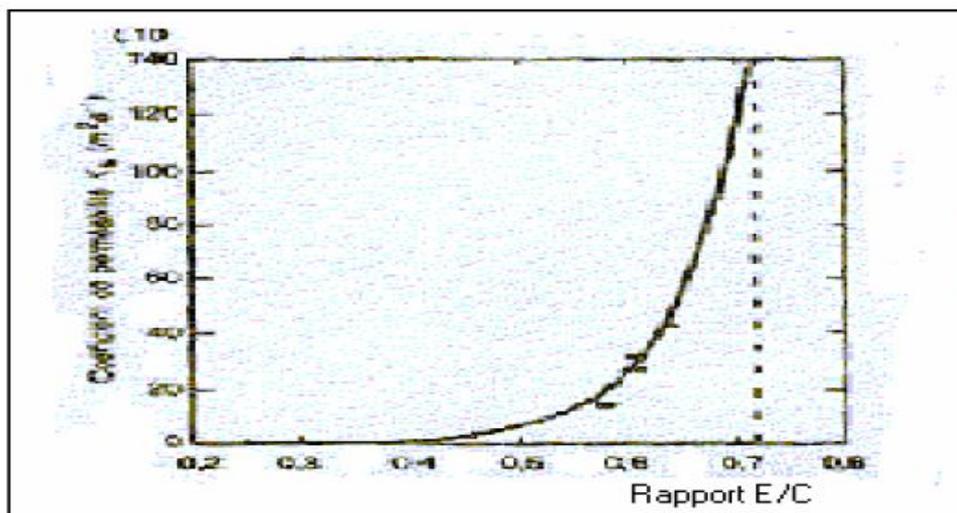


Figure II.8 : variation de la perméabilité à l'eau en fonction de rapport E/C [18]

II.7.2 La zone d'interface pâte-granulats :

Pour un même rapport E/C, la perméabilité à l'eau du mortier ou du béton est généralement supérieure à celle de la pâte en raison de la zone d'interface pâte granulats (figure. II.6). La zone d'interface pâte granulats est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Elle présente souvent une plus grande densité de microfissures. Cette zone offre donc un chemin préférentiel pour le passage de l'eau, des gaz ou des ions.

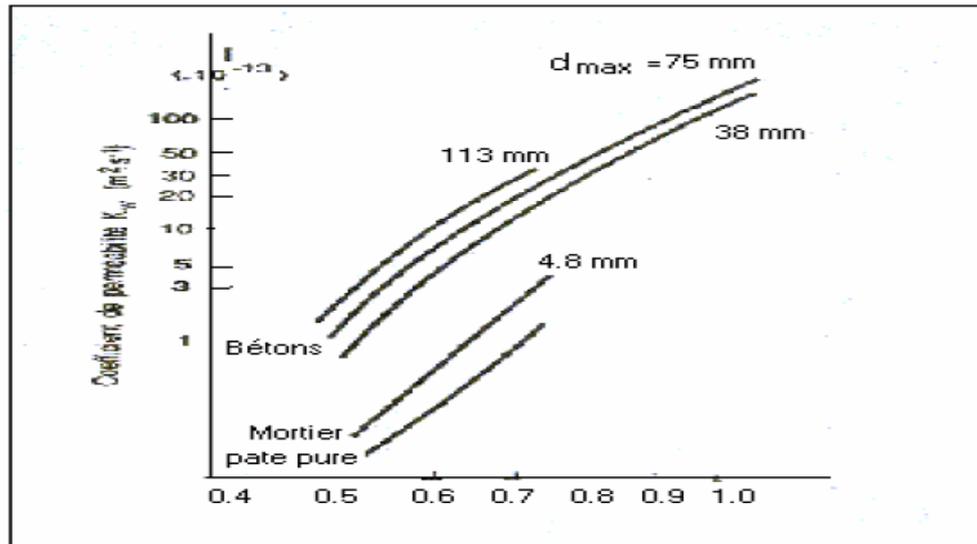


Figure II.9 : Influence de E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de Perméabilité à l'eau des bétons [18].

II.7.3 Influence de la nature du liant et des additions minérales :

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

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

Les cendres volantes n'ont pas toujours un effet positif sur la perméabilité à l'eau du béton. Après 28 jours de mûrissement, les cendres volantes (20% à 30%) provoquent généralement une augmentation de la perméabilité à l'eau (par rapport à un béton de référence). Cependant, à plus long terme (quelques mois), la perméabilité des bétons avec les cendres volantes devient généralement plus faible que celle du béton de référence [18].

II.7.4 Influence de la cure :

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

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

La durée de cure initiale influence fortement la perméabilité à l'eau du béton, l'effet est bien visible sur la figure (II.7) ou on voit bien que qu'une période de cure plus longue diminue toujours très significativement la perméabilité à l'eau. L'influence de la durée de cure devient de moins en moins importante à mesure que le rapport E/C diminue [18].

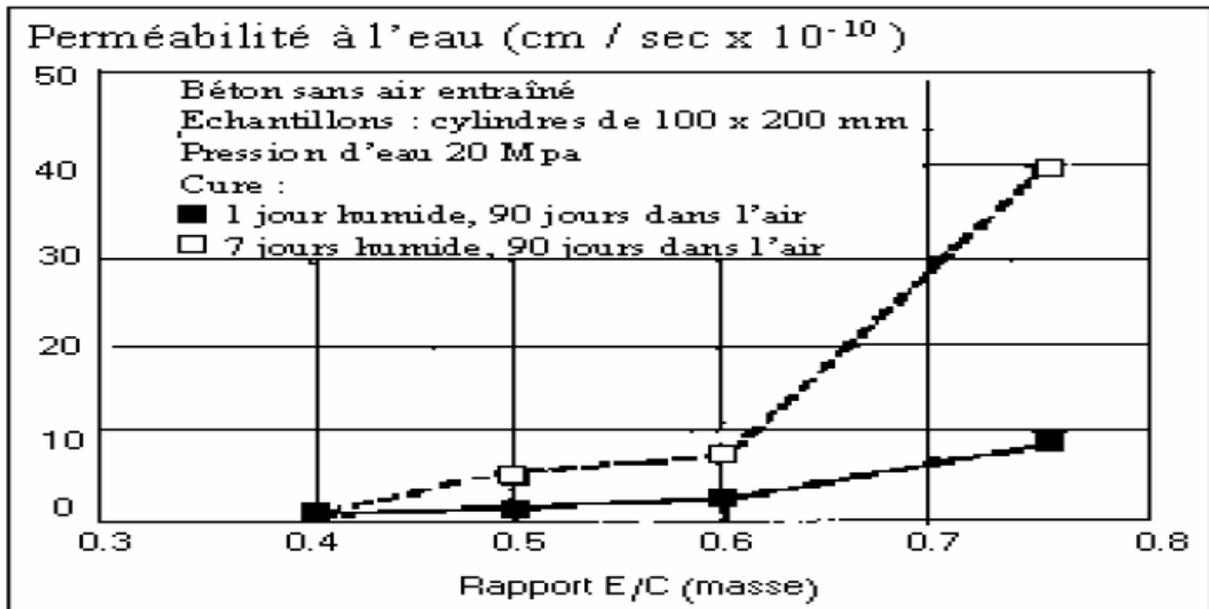


Figure II.10: Relation entre la perméabilité à l'eau, le rapport E/C et la durée de la cure initiale [18]

II.8 Les adjuvants et durabilité du béton :

II.8.1 Amélioration des conditions de mise en œuvre & l'ouvrabilité du béton plastique :

Les premiers adjuvants ont selon toute probabilité été utilisés dans le but d'améliorer le malaxage, la mise en place et la finition du mélange plastique. C'est une considération importante pour l'architecte, parce que cela permet de réduire ou d'éliminer le ressuage, la ségrégation, la formation de nids de cailloux et autres défauts superficiels disgracieux pouvant résulter du manque de plasticité du mélange. La plupart des adjuvants utilisés, qu'ils soient agents entraîneurs d'air, retardateurs de prise, ou réducteurs d'eau, amélioreront l'ouvrabilité. Bien que cette amélioration soit considérée comme un effet secondaire, c'est souvent la principale raison pour laquelle on recourt aux adjuvants. [19]

II.8.2 Amélioration des performances mécaniques :

La résistance des bétons a longtemps été limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques avec l'aide des adjuvants, on va pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible ; le résultat est une augmentation des résistances finales. [19]

II.8.3 Amélioration de la durabilité :

Le béton a une solidité proverbiale ; c'est un matériau dont la robustesse est unanimement reconnue mais, sa surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention si on veut lui conserver un rôle esthétique car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que :

Le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques, ou les agressions chimiques.

Les fissures, si elles se produisent, vont aussi limiter la durabilité des bétons

Les adjuvants sont là pour limiter grandement ces risques notamment en augmentant la compacité des bétons, et en protégeant les armatures par un meilleur enrobage. Voir pour cela, la faible perméabilité des BHP, et leur liaison parfaite aux armatures Sans oublier la « cure » des bétons qui vont limiter les pertes d'eau trop rapides par la surface. [19]

II.9 Classification et types d'adjuvants :

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés. Ils modifient en les améliorant les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés (en faible proportion : < 5 % du poids de ciment). Tous les adjuvants font l'objet de la norme de définition et des exigences NF EN 934-2 ainsi que d'une marque de qualité NF Adjuvants. [3]

Le tableau ci-dessous présente quelque adjuvants, leurs natures et leurs domaines d'application :

Tableau II.4: *classification et types des adjuvants.* [3]

type	nature	Domaine d'application
Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton	Les plastifiants : A teneur en eau égale, ils augmentent la maniabilité du béton.	Béton manufacture, travaux de génie civil, bétonnage avec coffrages glissants.
	Les plastifiants réducteurs d'eau : A même maniabilité, ils augmentent les résistances mécaniques.	Béton pour dallages (béton pompé, etc.) Béton maigre : blocs manufacturés Béton routier.
	Les superplastifiants : Ils provoquent un fort accroissement de la maniabilité du mélange.	Réalisation de fondations, dallages, radiers, sols industriels, routes, etc., BHP et béton pompe
Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement	Les accélérateurs de prise et de durcissement : Ils diminuent les temps de prise ou de durcissement du ciment.	Bétonnages par temps froid, décoffrages rapides, scellements, travaux en galerie, travaux sous l'eau, etc.
	Les retardateurs de prise : Ils augmentent le temps de prise du ciment.	Bétonnages par temps chaud, en grande masse, avec coffrages glissants, reprises de bétonnage.
Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton	Les entraîneurs d'air : Ils entraînent la formation de microbulles d'air uniformément réparties.	Bétons exposés au gel, aux sels de déverglaçage, aux eaux agressives, bétons routiers
	Les hydrofuges de masse : Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et des mortiers durcis.	Ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondation, retenues d'eau, etc.), mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).
	Les rétenteurs d'eau : Ils augmentent l'homogénéité et la stabilité du mélange.	Mélanges retardés ou mélanges à couler sous l'eau sans délavage.
Les produits de cure	Ils protègent le béton frais de la dessiccation.	Bétonnages de routes, de pistes, de dallages et de planchers (norme NF P 18-370).

II.10 Problèmes liés aux excès d'eau pendant le gâchage du béton :

L'eau est dosée en centrale et en aucun cas dans la toupie avant le déchargement. Vis-à-vis des besoins en hydratation du ciment, l'eau est calculée dans la recette de base: toute quantité d'eau supplémentaire vient en excès et laisse tout naturellement des vides dans la masse par suite de son évaporation. Des essais ont démontré que 10 litres d'eau supplémentaires entraînent une chute de la résistance mécanique du béton de l'ordre de 6% environ.

De plus, cet excès d'eau modifiera la masse volumique et affectera la durabilité et la résistance du béton notamment en période de gel et au contact de sels de déverglaçage.

Lorsque le béton est en place, l'eau résiduelle risque de migrer vers la surface provoquant un tassement du béton.

Le talochage améliore l'aspect de surface et fait remonter la laitance, En cas d'excès d'eau, la surface résiste moins aux chocs et devient plus sensible à l'écaillage.

L'excès d'eau réduit la cohésion du béton et favorise la ségrégation. Le risque de dessiccation est d'autant plus fort que sa teneur en eau est élevée. [20]

II.10.1 Rôle de l'eau sur le béton frais :**II.10.1.1 Rôle de l'eau sur le ressuage :**

- En cas d'excès d'eau, des « cheminées » peuvent se créer au sein du béton une fois ce dernier en place, l'eau migrant alors vers la surface supérieure de l'ouvrage, en sens contraire des matériaux solides qui, eux, se tassent naturellement vers le bas. [21]

II.10.1.2 Rôle de l'eau sur le croutage :

- Fréquemment pratiqué sur les chantiers. Le talochage améliore l'état de surface. Par cette opération, c'est en fait la laitance qui remonte. En cas d'excès d'eau dans le béton, celle-ci peut remonter (ressuage) et s'accumuler sous la couche de surface. Une croûte très fragile va alors se former à la surface de l'ouvrage.

- Elle résistera moins aux chocs et s'écaillera à la première sollicitation (gel, frottement pour les bétons horizontaux non recouverts, etc.). [21]

II.10.1.3 Rôle de l'eau sur la ségrégation :

- La présence en excès d'eau réduit les forces de cohésion du béton.

Le béton frais devient alors plus sensible à toutes les sollicitations extérieures.

La ségrégation est le plus souvent observée lorsque la hauteur de chute est importante ou lorsque le béton passe à travers une zone dense de ferrailage. [21]

II.10.1.4 Dessiccation :

Le risque de dessiccation d'un béton est d'autant plus fort que sa teneur en eau est élevée. [21]

II.10.2 Sur le béton durci :

En d'autres termes, on peut dire que l'eau excédentaire dans les bétons est néfaste, car elle provoque de nombreuses dégradations comme :

- Retrait, gonflement, création de réseaux capillaires lors de la prise
- Diminution des performances mécaniques (voir courbe en fonction du rapport E/C)
- Plus grande sensibilité au gel à cause de la porosité
- Accroissement des risques de certaines dégradations chimiques : carbonatations, corrosions
- Encrassement rapide des surfaces par moisissures diverses qui recherchent les porosités...

II.10.3 rôle de l'eau Sur la porosité et la durabilité:

La porosité favorise les dégradations du béton en particulier lorsqu'il est soumis au gel et aux sels de déverglaçage. Là encore, l'augmentation de la porosité du béton durci découlant d'un ajout d'eau vient systématiquement dégrader sa durabilité. L'eau excédentaire, après durcissement du béton, s'évapore et laisse des pores rendant le matériau béton vulnérable à différentes agressions chimiques, en plus des caractéristiques mécaniques nettement amoindries.

II.10.4 Sur la résistance à long terme :

• L'effet d'un ajout d'eau sur la résistance mécanique d'un béton est systématique en accroissant la porosité du béton durci, il conduit à une chute de sa résistance. [21]

II.10.5 Solutions apportées par les adjuvants :

Les adjuvants améliorent certaines propriétés du béton mais, on ne doit toutefois pas perdre de vue que ces produits ne donnent que des moyens supplémentaires pour agir sur la qualité du béton en améliorant certaines de ses caractéristiques, ils ne peuvent en aucun cas apporter une solution valable à une mauvaise formulation de béton, ou à une mise en œuvre déficiente .

Chapitre III

ETUDE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉFFET D'EAU SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON



Partie A : Description et caractéristiques des matériaux utilisés**III.1 Introduction :**

Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de génie civil de l'université d'Elbachir El Ibrahimy de BBA. Nous avons utilisé pour la confection de notre béton des matériaux locaux. Dans ce chapitre, nous traiterons la caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication des différents mélanges de béton ainsi que les essais sur ces bétons à l'état frais et durci.

III.2 Caractérisations des matériaux de la composition de béton:**III.2.1 caractérisation des granulats :****III.2.1.1 Caractéristique du sable :**

Le sable utilisé dans nos travaux est un sable de dune. Ce sable provient de l'oued Maïthre situé entre les collines de Boussaâda. Les caractéristiques de ce sable sont citées ci-après :



Figure III.1 : Sable 0/8 (Boussaâda).

III.2.1.1.1 Analyse granulométrique :

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de BOUSAADA est inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sable de BOUSAADA.

Fraction et masse	Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
Sable 0/8 1600g	6.3	60	60	3.75	96.25
	5	61.50	121.5	7.59	92.41
	2,50	139	260.50	16.28	83.72
	1,25	67	327.50	20.46	79.54
	0,63	107.50	435	27.18	72.82
	0,315	448.50	883.50	55.21	44.79
	0,16	551.50	1435	89.68	10.32
	0.08	145	1580	98.75	1.25
	fond	19	1599	100.00	0.00

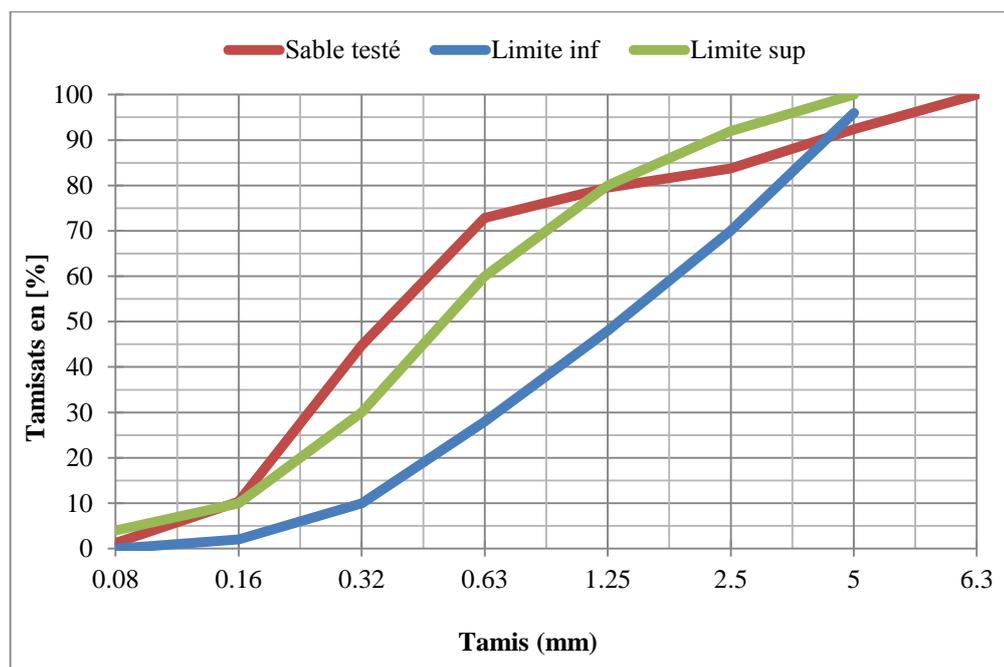


Figure III.2 : courbe granulométrique et fuseau granulaire du sable de BOUSAADA

III.2.1.1.2 Module de finesse :

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

$$Mf = (\sum \text{refus cumulé}) / 100$$

- Avec :
- 1 < Mf < 1.5 : sable très fin
 - 1.5 < Mf < 2 : sable fin
 - 2 < Mf < 2.5 : sable moyen
 - Mf > 2.5 : gros sable

Pour notre sable : Mf = 2.16 donc c'est un sable Moyen.

III.2.1.1.3 Caractéristiques physiques du sable :

Il est nécessaire de déterminer tous les caractéristiques physiques pour le sable de dune . Les résultats qui sont tirés d'après une étude de caractérisation du sable sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : *Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).*

Propriétés		Valeurs	Normes
Masse volumique apparente	à l'état lâche g/cm ³	1.63	NFP18-555
	à l'état compact g/cm ³	1.78	
Masse spécifique absolue g/cm ³		2.46	NFP18-555
Porosité	à l'état lâche %	34.5	NFP18-554
	à l'état compact %	28.4	
Compacité		68.9	NFP18-598
Teneur en eau %		0.02	NFP18-555
Degré d'absorption d'eau %		1.85	NFP18-555
Equivalent de sable	E.S.V	76	NFP18-598
	E.S.P	73	

Commentaire :

1/ Porosité : pour les granulats courant, on peut admettre que la compacité en frac est de l'ordre de 0.60 à 0.70 pour le sable. C'est-à-dire, la porosité est de 0.30 à 0.40.

La porosité de notre sable à l'état lâche est 34.5 % donc : $30\% < 34.5\% < 40\%$

—————→ C'est un sable de qualité courante.

2/ équivalent de sable :

$$75\% < E.S.V = 76\% < 80\%$$

$$70\% < E.S.P = 73\% < 80\%$$

C'est un sable qui convient pour béton de bonne qualité.

3/ degré d'absorption : selon les normes, la limite supérieur du coefficient d'absorption des granulats est fixé à 5 %. Dans notre cas $Ab = 1.85 < 5\%$: condition vérifiée

III.2.1.1.4 Analyse chimique du sable :

La composition chimique du sable a été établie au niveau du laboratoire de la cimenterie d'Ain Touta. Elle est présentée au tableau suivant :

Tableau III.3 : Analyse chimique du sable

Eléments	symbole	Teneur en %
Silice	SiO ₂	80.14
Chaux	CaO	10.50
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0.12
Aluminium	Al ₂ O ₃	1.84
Oxyde de magnésium	MgO	0.44
Perte au feu	P.F	4.08

Donc, le sable est très pur et à haute teneur en silice

III.2.1.2 Caractéristiques du gravier :

Le gravie utilisé pour la confection du béton est gravier de MECHRI obtenue après concassage de la roche .Les fractions utilisées sont (3/8) et (8/16):



Figure III.3.a : Agrégats concassées (3/8)

Figure III.3.b : Agrégats concassées (8/16).

III.2.1.2.1 Analyse granulométrique par tamisage :

Les résultats de l'analyse granulométrique du gravier concassé est inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy			
Gavier 3/8 1600g	8	9	9	13	11	11	0.69	99.31
	6.3	225	280	284	263	274	17.15	82.85
	5	440	426	472	446	720	45.06	54.94
	4	533	503	513	516.33	1236.33	77.37	22.63
	3.15	315	293	255	287.67	1524	95.38	4.62
	2.5	55	55	48	51.50	1575.50	98.60	1.40
	Fond	18	35	14	22.33	1597.83	99.98	0.02

Tableau III.5 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy			
Gavier 8/15 3200g	16	70	105	75	83.33	83.33	2.60	97.4
	12.5	637	909	761	781	864.33	27.01	72.99
	10	611	723	808	714	1578.33	49.32	50.68
	8	739	773	774	726	2340.33	73.13	26.87
	6.3	842	538	652	677.33	3017.66	94.30	5.70
	5	220	158	150	136	3153.33	98.55	1.45
	Font	82	35	21	46	3199.66	99.99	0.01

Les courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisés sont tracés ci-dessous :

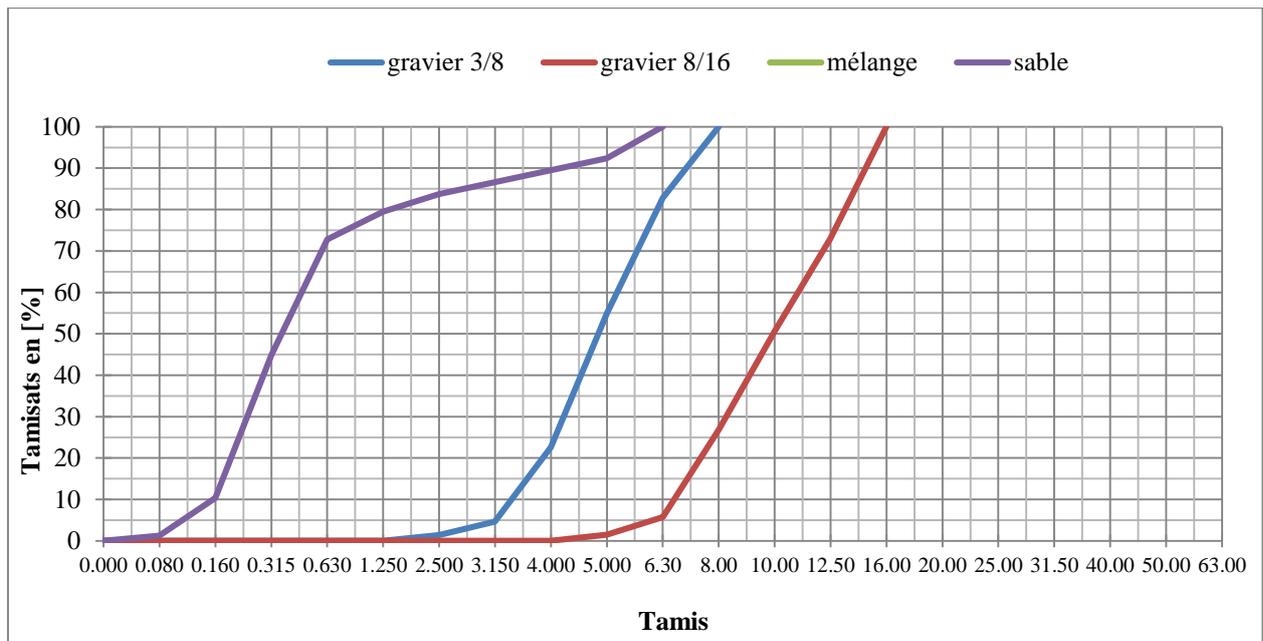


Figure III.4 : Courbe granulométrique des agrégats.

III.2.1.2.2 Caractéristiques physiques du gravier :

III.2.1.2.2.1 Masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps.

a. La masse volumique apparente (γ):

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm^3 ; Kg/m^3 ; t/m^3).

Tableau III.6 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé (3/8), (8/15).

matériaux	M ₁ (kg)	V(l)	M ₂ (kg)	γ	γ_{moy} (kg/l)
3/8	7.68	5	0.84	1.36	1.37
	7.76	5	0.84	1.38	
	7.72	5	0.84	1.37	
8/16	7.55	5	0.84	1.34	1.34
	7.53	5	0.84	1.33	
	7.62	5	0.84	1.35	

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ):

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (t/m^3 , kg/dm^3 , g/cm^3).

Tableau III.7 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé (3/8), (8/16).

matériaux	M(g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ	ρ_{moy} (kg/l)
3/8	300	400	511	2.60	2.54
	300	400	520	2.50	
	300	400	518	2.54	
8/16	300	400	512	2.67	2.60
	300	400	515	2.60	
	300	400	518	2.54	

III.2.2 Caractéristiques du ciment utilisé :

III.2.2.1 Présentation du ciment (MATINE) :

Le ciment utilisé dans la présente recherche est un ciment CEM II/B 42.5 N, provient de la cimenterie de HAMMAM DALAA Wilaya de M'SILA. Il est gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C°. [22]

En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés (C-S-H).

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme [NA EN 197-1].

III.2.2.2 Analyses et caractérisation :

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment MATINE obtenu du fournisseur. [22]

Tableau III.8 : Analyse chimiques du ciment MATINE.

Composantes	Valeur (%)	Norme
Teneur en sulfates SO ₃	2.00 à 2.70	NA 5042
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.00 à 2.20	
Teneur en chlorures	0.01 à 0.05	
Teneur en équivalent en alcalis	0.3 à 0.75	
Perte au feu	7.50 à 12.00	
Résidus insolubles	0.7 à 2.00	

Tableau III.9 : Composition minéralogique du clinker.

Composantes	Valeur (%)
Silicates tricalciques C3S	58 à 64
Silicates bicalciques C2S	12 à 18
Aluminates tricalciques C3A	6.00 à 8.00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF	10.00 à 12.00

Tableau III.10 : Propriétés physiques du ciment utilisé.

Propriété	Valeur
Consistance normale	25 à 28.50 (%)
Surface spécifique Blaine	4150 à 5250 (cm ² /g)
Retrait à 28 jours	<1000 (µm/m)
Expansion	0.3 à 2.5 (mm)
Masse volumique apparente	1.005 (kg/dm ³)
Masse volumique spécifique	3.02 (kg/dm ³)

Tableau III.11 : Temps de prise à 20°C.

Temps de prise	Temps (min)	Norme
Début de prise	140 à 195	NA 230
Fin de prise	195 à 290	

Tableau III.12 : Résistance mécanique à la compression.

Age de l'éprouvette	Résistance à la compression (MPa)	Norme
02 jours	≥ 10.0	NA 234
28 jours	≥ 42.5	

III.2.3 L'eau de gâchage :

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

Tableau III.13 : Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
pH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	-
Taux de (Cl^-)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO_2^-)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO_3^-)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	-
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	-

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'Elbachir Elbrahimi Bordj Bou Arreridj.

Les résultats obtenus ont montré que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

III.2.4 Adjuvant :

On a utilisé dans notre projet de recherche pour cette étude un adjuvant **MEDAFLUID 118** fabriqué en Algérie par la société GRANITEX à L'oued Smar Alger.

III.2.4.1 Description :

Le **MEDAFLUID 118** est un super plastifiant réducteur d'eau.

Son utilisation dans le béton permet d'accélérer le durcissement du béton d'une manière significative.

Il est compatible avec tous les types de ciment et se dilue parfaitement dans l'eau de gâchage.

III.2.4.2 Propriétés :

Grace à ses propriétés le **MEDAFLUID 118** permet :

a. Sur béton frais :

- De diminuer le rapport E/C
- D'augmenter le slump.
- De faciliter la mise en œuvre du béton
- D'évité la ségrégation.

b. Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques.
- D'Augmenter la compacité.
- D'augmenter l'imperméabilité.
- D'augmenter la durabilité.

Tableau III.14 : *L'effet de l'adjuvant sur le béton.*

Désignation	Rc (Mpa)	
	7j	28j
jour		
témoin	22.50	28.00
MEDAFLUID 118(1%)	28.50	36.30

Résistances mécaniques en compression (béton dosé à 350kg/m³ E/C=0.45 et Aff. =23cm).

III.2.4.3 Caractéristiques : [23]

- forme.....liquide.
- Couleur.....marron.
- pH.....5-6.
- Densité.....1.185 ± 0.015.
- Teneur en chlore<1g/L.
- Extrait sec.....40%.

**Partie B : Evaluation de l'effet de la quantité d'eau sur la porosité et
Résistance à la compression du béton**

III.3 Introduction :

La quantité d'eau de gâchage est un paramètre important vis-à-vis le comportement et la durabilité et les caractéristiques mécaniques du béton.

Notre présente étude est menée pour l'étude d'éprouvettes de béton confectionnées à base de ciment (CEM II/B 42.5 N) de Hammam Dalaa à M'sila. Les éprouvettes ont été conservées pendant 28 jours à l'air libre et d'autres ont subit une cure standard à l'eau à 20 °c.

III.4 Objectif de l'étude :

Notre étude est menée en premier lieu dans le but de déterminer l'effet du rapport E/C sur la porosité du béton qui est un paramètre de premier ordre de la durabilité, ensuite l'effet de ce rapport sur les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression) sur ce béton.

L'étude est faite sur 5 types de béton :

- (Ferme, plastique et très plastique) en changeant le rapport E/C.
- En utilisant un adjuvant super plastifiant réducteur d'eau. (0.5 % et 1.5%).

L'expérimentation est réalisée sur des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³. Le gâchage est effectué dans un malaxeur normalisé. Il est coulée et vibrée dans des moules cubiques. Les moules une fois remplis, sont entreposés 24 heures avant d'être démoulé, numéroté et conservés soit à l'air ou dans l'eau pendant 28 jours de cure.

La conservation à l'air des éprouvettes sous l'effet du climat supérieur à 20 °C permet de mieux voir et évaluer l'effet de surplus l'eau sur le comportement (résistance et porosité) du béton et de faire une comparaison avec une cure standard.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des éprouvettes confectionnées et les différents paramètres pris en compte.

Tableau III.15 : les différentes éprouvettes confectionnées et le mode de conservation.

Type de béton	Mode de conservation	E/C	Aff (cm)	Nombre d'éprouvettes	Essais
Béton ferme	A l'eau	0.51	1	04	compression
				04	porosité
	A l'air			04	compression
				04	porosité
Béton plastique	A l'eau	0.57	8	04	compression
				04	porosité
	A l'air			04	compression
				04	porosité
Béton très plastique	A l'eau	0.64	14	04	compression
				04	porosité
	A l'air			04	compression
				04	porosité
Béton plastique (adjuvante) (0.5%)	A l'eau	0.51	8	04	compression
				04	porosité
	A l'air			04	compression
				04	porosité
Béton plastique (adjuvante) (1.5%)	A l'eau	0.50	7	04	compression
				04	porosité
	A l'air			04	compression
				04	porosité

III.5 Formulation des bétons d'études :

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

Pour déterminer la composition de notre béton, nous avons utilisé une méthode de calcul de composition **Dreux-Gorisse**.

III.5.1 Données de base :

Tableau.III. 16 : Donnés de bases pour la formulation.

Données de base	Description (valeur)
Béton normal de classe	C25/30.
Consistance	béton plastique.
Dimension maximale de granulat	D= 16 mm ($\sqrt{D} = 4$ mm)
Forme des granulats	Granulats concassés.
Qualité des granulats	Bonne (courante).
Serrage	vibration normale (courante).
Dosage en ciment	C = 350kg/m ³
Classe vraie du ciment $\sigma'c$ (bars)	425 bars
Module de finesse MF	2.16
Coefficient granulaire G	0,45

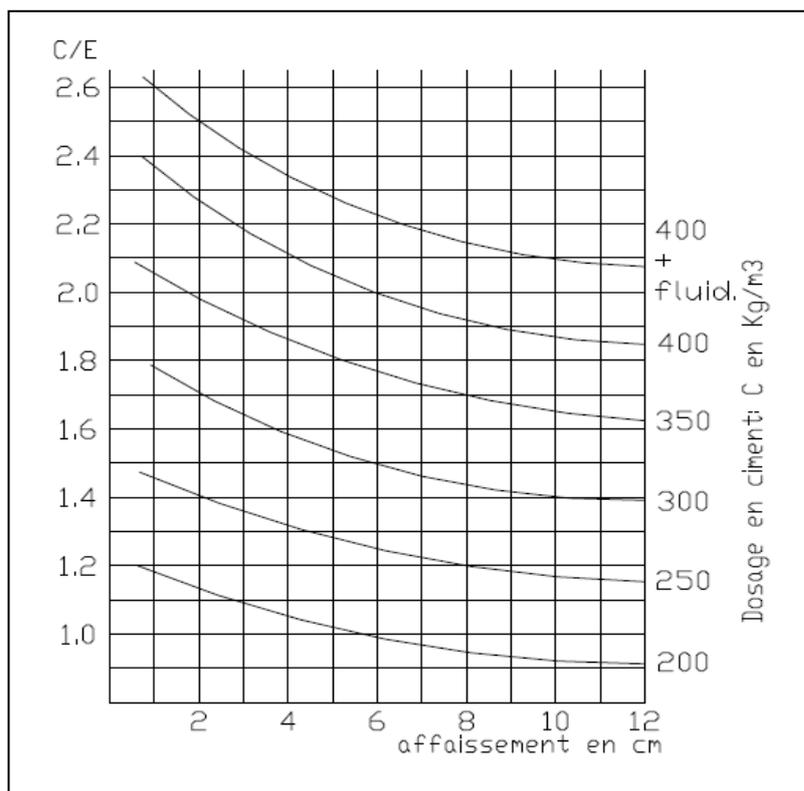


Figure.III.5 : Graphique indiquant Approximativement le dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée. [24]

III.5.2 Dosage en ciment :

C = 350kg/m³ valeur prescrite.

III.5.3 Dosage en eau :

On a : C = 350kg/m³

Et Affaissement = 7cm (béton plastique)

Après l'abaque : C/E=1.74 \implies E/C=0.57

Alors : E=0.57xC=0.57x350 = 199.5L

Dosage en eau = 199.5 L/m³

III.5.3.1 Correction du dosage en eau selon le diamètre maximal D du mélange granulaire :

Tableau.III.17. Valeurs de la correction sur le dosage en eau.

Diamètre en mm	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50
Correction en %	9	6	4	2	0	-2	-4	-6

On a un Dmax = 16 mm qui correspond à une correction de 4% en plus de la quantité d'eau calculée donc on obtient :

$$E = E_{\text{calculée}} + 0.04 \times E_{\text{calculée}} = 199.5 + 0.04 (199.5) = 207.50 \text{ Litres}$$

E après correction = 207.50 litres.

III.5.4 dosage en pourcentage des granulats : [24]

La granularité du mélange obtenu peut être représentée et approchée par deux segments de droite. Cette courbe simplifiée est une modélisation de la courbe réelle.

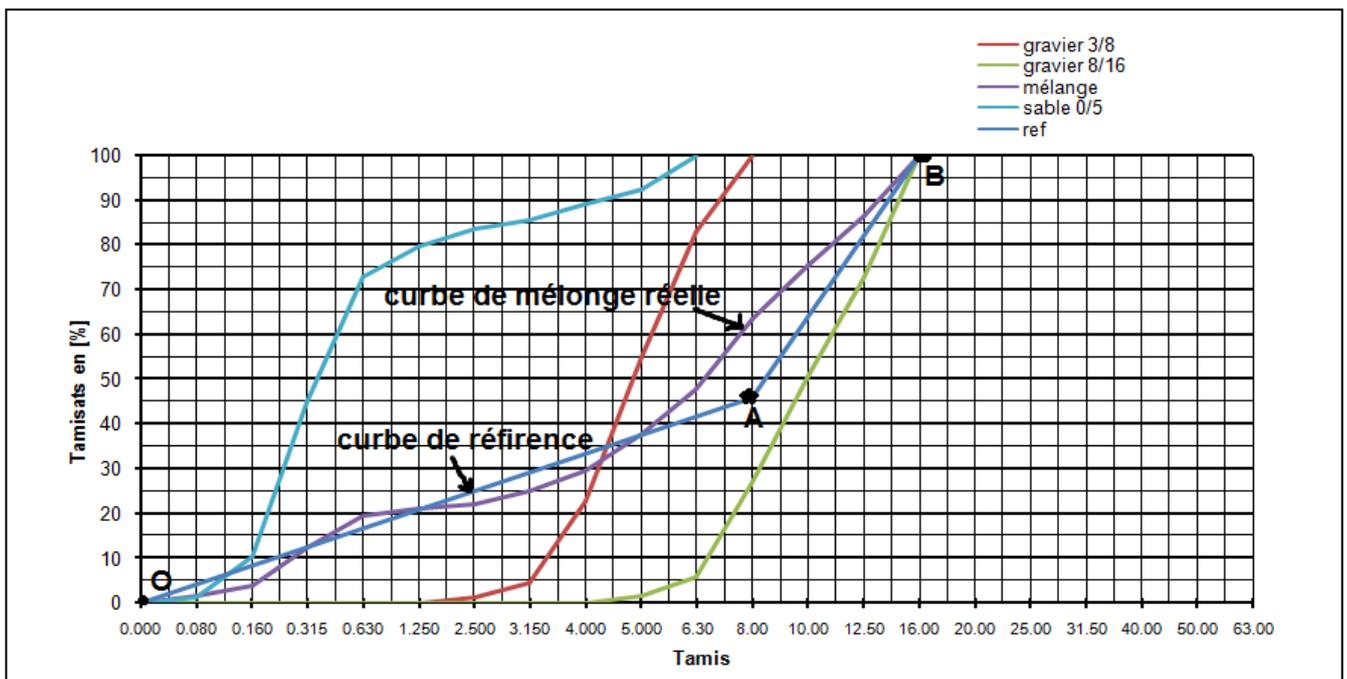


Figure III.6 : courbe de mélange réelle.

Cette modélisation est intéressante car cette courbe théorique est suffisamment proche de la Courbe réelle pour être significative, et elle peut être entièrement déterminée à partir de seulement trois points appelés respectivement, O, origine, A, point de brisure, et B, extrémité.

Pour les granulats à béton, il apparaît que les points O et B, sont invariables quelque soit les proportions du mélange.

Le point d'origine, O est fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis, 0.080 mm. Ce point est repéré par ses coordonnées : O [0.080 ; 0] De même, le d'extrémité, B se situe sur le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât. Ce point est repéré par ses coordonnées : B [D ; 100]

Pour le point de brisure A, il apparaît que le tamis sur lequel il se situe est invariable quelque soit les proportions du mélange. En observant de plus près, il apparaît que ce tamis se situe à $D/2$, si $D \leq 20$ mm, et au milieu de l'intervalle [5 ; D] si $D > 20$ Il reste à déterminer le pourcentage de tamisât du point de brisure. Cette position dépend des proportions du mélange. Or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton et par conséquent sur sa résistance. Le problème consiste donc à déterminer l'ordonnée du point de brisure qui permettra de donner la meilleure compacité au béton. Cette position est optimisée par la méthode dite DREUX-GORISSE. L'ordonnée optimisée du point de brisure, YA est déterminée par la relation suivante :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre. K, optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment. Voir tableau ci-contre

Tableau.III.18. Valeurs du terme correcteur k.

Vibration forme(s,t,sabl)	faible		normale		puissante	
	roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé
400+fluidifiant	(-2)	0	(-4)	(-2)	(-6)	(-4)
400	0	(+2)	(-2)	0	(-4)	(-2)
350	(+2)	(+4)	0	(+2)	(-2)	0
300	(+4)	(+6)	(+2)	(+4)	0	(+2)
250	(+6)	(+8)	(+4)	(+6)	(+2)	(+4)
200	(+8)	(+10)	(+6)	(+8)	(+4)	(+6)

La valeur trouvée est $k = +2$

K_s , ajustement de la granularité du sable

- pour $FM > 2,8 \Rightarrow K_s = 5,4 \times FM - 15$

- pour FM est varier de 2 à 3 $\Rightarrow K_s = 6MF - 15$

(FM : module de finesse du sable). [3]

Ona FM=2.16 => $K_s = (6 \times 2.16) - 15 = -2.04$

K_p , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton.

$K_p = 0$ si béton non pompable

$5 \leq K_p \leq 10$ si béton pompable.

$K_p = 0$ (O na le béton non pompable)

Pour un béton non pompable réalisé avec des granulats roulés dont le gravier a un diamètre, $D=16\text{mm}$, le sable a un module de finesse **MF = 2.16**, un dosage en ciment de **350kg**,

$K=0$, $K_s=6 \times 2.16 - 15 = -2.04$, $K_p=0$, $Y_A = 50 - \sqrt{16} + 2 - 2.04 + 0 = 45$, 96%

$X_A = 16/2 = 8\text{mm}$ Le point A à pour coordonnées : A [8 ; 45.96]

Ainsi la courbe du mélange optimum, c'est à dire du mélange permettant d'obtenir la meilleure compacité est complètement déterminée.

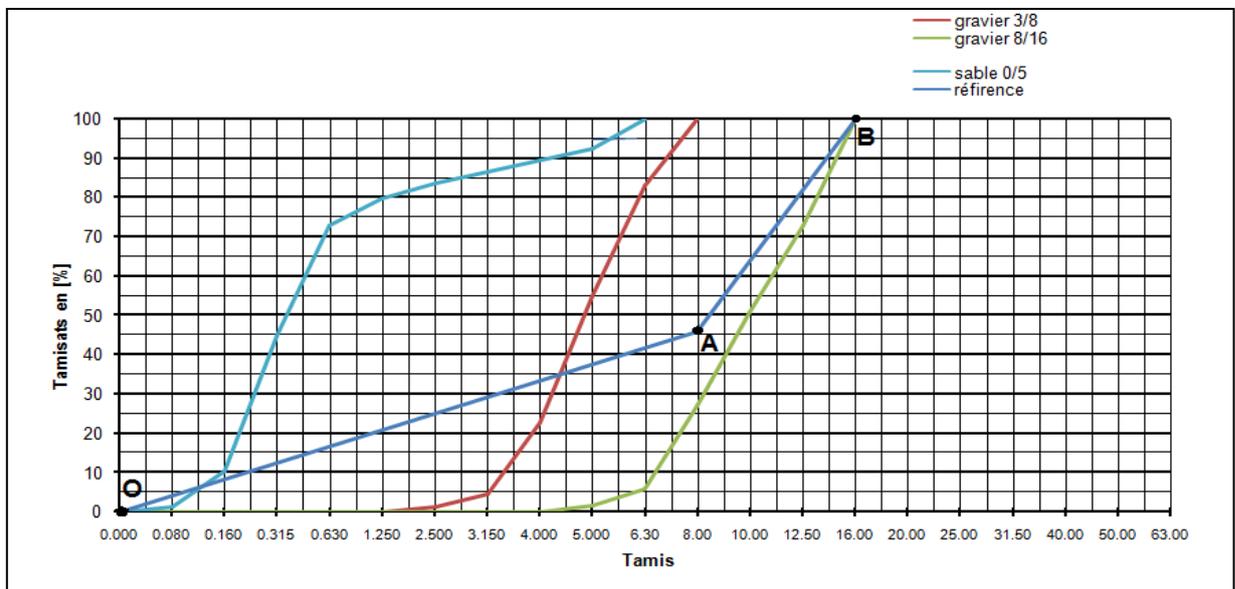


Figure.III.7 : les coordonnées de la courbe de référence.

Quelles sont les proportions de sable et de gravier nécessaire à obtenir cette courbe ?

Une méthode graphique appelée la ligne de partage permet de répondre à cette question.

III.5.4.1 La ligne de partage :

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection.

Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier.

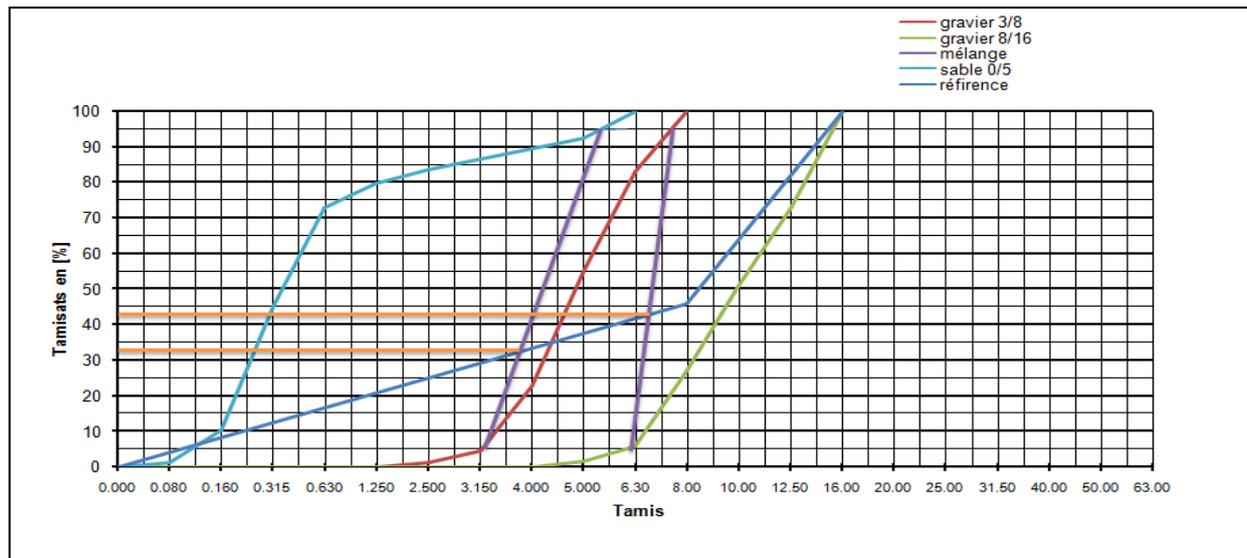


Figure III.8 : les lignes de partage.

Le mélange optimal est obtenu avec un volume absolu de 34% de sable et 66% de gravier

III.5.5 dosage en masse des granulats :

Quelles masses de gravier et de sable correspondent aux proportions du mélange granulaire ?

La réponse s'obtient par la connaissance de la compacité du béton et des masses volumiques absolues des matériaux. La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire. Mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre D des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité. L'expérience permet de prévoir approximativement la compacité du béton selon les valeurs suivantes :

Coefficient de compacité :

Tableau III.19 : Valeurs du coefficient de compacité γ .

consistance	serrage	coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
		0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850

Les corrections effectuées, on trouve $\gamma = 0,820$.

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés si non il conviendra d'apporter la correction suivante :

Sable roulé et gravier concassé = -0.01

Sable et gravier concassé = -0.03

Alors ; $\gamma = 0,820 - 0.01 = 0,810$

Toutes les masses des constituants du béton ont été déterminées pour obtenir un béton conforme aux attentes. Il est maintenant nécessaire de réaliser des éprouvettes, pour vérifier et ajuster les dosages expérimentalement afin de garantir la qualité du béton.

III.5.5.1 Quantité des agrégats en pourcentage:

(%)S=34 \longrightarrow (%)S /100 = 0,34

(%) $g_{(3/8)}$ =10 \longrightarrow (%) $g_{(3/8)}$ /100= 0.10

(%) $g_{(3/8)}$ =56 \longrightarrow (%) $g_{(8/16)}$ /100= 0.07

III.5.5.2 Volume absolu de l'ensemble des granulats :

On a : $V = (1000 \times \gamma) - c$

$c = C/3,1 = 112,90$

Volume absolu de l'ensemble des granulats $V = (1000 \times \gamma) - c = (1000 \times 0,810) - 112,90 = 697 \text{ L}$

$V = 697 \text{ Litres}$

III.5.6 Dosage des granulats en kg dans 1m³ :

Gravier 3/8 [kg] = $0,1 \times 697 \times 2,54 = 177,04 \text{ kg}$

Gravier 8/16 [kg] = $0,56 \times 697 \times 2,60 = 1014,83 \text{ kg}$

Sable [kg] = $0,34 \times 697 \times 2,46 = 582,97 \text{ kg}$

Alors on aura la composition du béton suivante pour 1 m³ de béton :

Sable (0/5): 582.97 kg/m³

Gravier (3/8): 177.04 kg/m³

Gravier (8/16) : 1014.83kg/m³

Ciment : 350 kg/m³

Eau : 207.50 litres

III.6 Confection des éprouvettes :

Le choix des dimensions des éprouvettes est un compromis. La petite taille permettra d'étudier les mécanismes de dégradation du matériau pendant une courte durée, on utilise des éprouvettes cubique de dimension (10 x 10 x 10) cm

III.6.1 Volume des éprouvettes :

$V = 10 \times 10 \times 10 \times 16 = 16000 \text{ cm}^3 = 0,016 \text{ m}^3$ avec une majoration des constituants est 1.2

III.6.2 Dosage des constituants en kg :

Gravier 3/8 [kg] = $177,04 \times 0,016 \times 1,2 = 3,400$

Gravier 8/16 [kg] = $1014,83 \times 0,016 \times 1,2 = 19,480$

Sable [kg] = $582,97 \times 0,016 \times 1,2 = 11,193$

Ciment [kg] = $350 \times 0,016 \times 1,2 = 6,720$

Eau [kg] = $207,50 \times 0,016 \times 1,2 = 3,890$

III.6.3 Programme de cure :

Le programme de cure est comme suite :

1-Avant le démoulage, toutes les éprouvettes remplis de béton sont conservées à l'intérieur du laboratoire pendant 24 heures.

2- Après le démoulage, une partie d'éprouvettes ont subit un cure standard à l'eau (20 °C) et d'autres éprouvettes ont été conservées à l'air libre à l'intérieur du laboratoire pendant 28 jours.

III.7 Performances du béton à l'état frais et durci :**III.7.1 A l'état frais :****III.7.1.1 Affaissement au cône d'Abrams :****a- Principe de l'essai :**

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

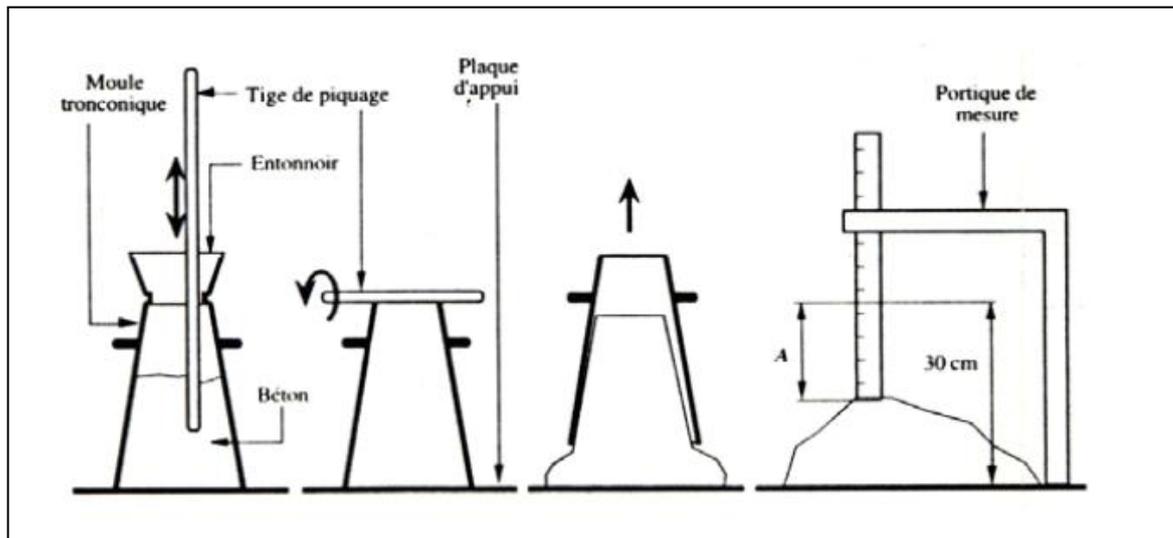


Figure III.9.a : Essai d'affaissement [BADISSI, 2011]



Figure III.9.b: Essai d'affaissement

Tableau III.20: Types de béton en fonction de leur consistance [5]

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance
Ferme F	0 à 4	±1
Plastique P	5 à 9	±2
Très plastique TP	10 à 15	±3
Fluide FL	≥16	

III.7.1.2 La masse volumique du béton frais (NORME EN 12350-6):

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une table vibrante, après un arasement approprié. Le moule et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = m_2 - m_1 / V$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m³).

m_1 : est la masse du moule (kg).

m_2 : est la masse du moule plus la masse du béton contenu dans le moule (kg).

V : est le volume du moule en mètre cube (m^3)

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 kg/m^3 les plus proches.



Figure III.10: *Béton frais*

III.7.2 A L'état durci :

III.7.2.1 Propriétés du béton durci :

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

III.7.2.2 La masse volumique du béton durci (NORME EN 12390-7):

$$D = \frac{m}{V}$$

Avec :

D : Masse volumique de béton durci en Kg/m^3 , pour un état de l'échantillon donné.

m : masse de l'échantillon en Kg pour un état de l'échantillon donné.

V : Volume de l'échantillon en m^3 .

Remarque :

Les résultats des essais doit être accompagné d'une mention indiquant l'état de l'échantillon au moment de l'essai.

La détermination de la masse peut être déterminée dans l'un des trois états suivant :

- en état de réception : état normal.
- en état saturée d'eau : état immerger dans l'eau (20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.
- à l'état séché en étuve : à l'étuve (à 105 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.

III.7.2.3 Résistance à la compression (NORME EN 12390-4):

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cubique de dimension (10 x 10 x 10) cm. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Où :}$$

f_c : résistance en compression, exprimée en Mpa (N/mm^2)

F : charge maximale, exprimée en Newtons

A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm^2) près.



Figure III.11 : essais de compression

III.7.2.4 Évaluation de La porosité :

III.7.2.4.1 Procédure d'essai :

cette teste correspond aux normes établies par ASTM désignation [ASTM C642-97], (Standard test method for spcific gravity, absorption and voids in hardened concrete).

➤ **Etape de l'essai :**

1- Sécher les éprouvettes dans une étuve de 100 à 110°C pendant 24 hures jusqu'à obtention d'une masse constante.

2- Immersion des éprouvettes dans l'eau pendant 24 hures.

3-Chouffer l'échantillon jusqu'à l'ébullition pendant 5 hures. (Utilisation d'un réchaud à gaz boutene).

4-Les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et pesée hydrostatique (dans l'eau).



Figure III.12 : ébullition des éprouvettes



Figure III.13 : la pesée hydrostatique des éprouvettes

Avec : A : poids de l'échantillon après l'étuvage.
 C : poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'air).
 D : poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'eau : hydrostatique)

Alors :

$$V_p = [(C-A)/(C-D)]*100$$

Où :

V_p : volume des pores en %

Chapitre IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats et discussions

IV.1 Introduction :

Dans le présent chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus à savoir : la résistance, la porosité et la masse volumique du béton frais et durci. Les paramètres à considérer sont :

- Le rapport E/C
- Dosage en adjuvant (0.5 % et 1.5 %)
- Mode de conservation (à l'air et à l'eau)

IV.2 Résultats des essais effectués sur le béton frais :

IV.2.1 Masses volumiques :

Dans le tableau ci-dessous, on a présenté les résultats des mesures de la masse volumique du béton à l'état frais des différents bétons.

Tableau IV.1. Masse volumique du béton frais

Nature du béton	Béton ferme E/C=0.51	Béton plastique E/C=0.57	Béton Très plastique E/C=0.64	Béton adjuvante(0.5%) E/C=0.51	Béton adjuvante(1.5%) E/C=0.5
Masse volumique (kg/m ³)	2484	2468	2455	2485	2489

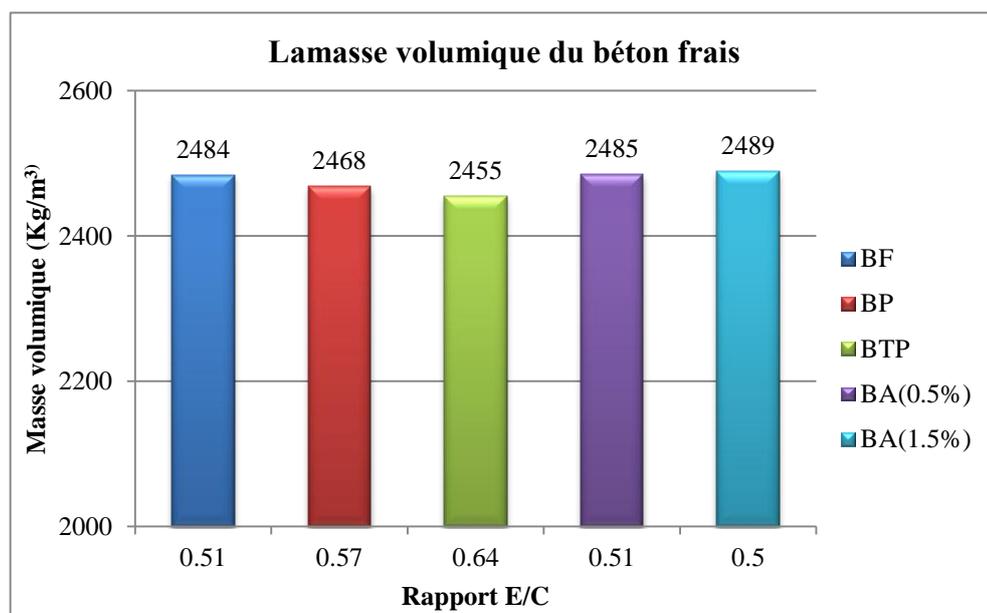


Figure IV.1.a : Masse volumique du béton frais en fonction du rapport E/C

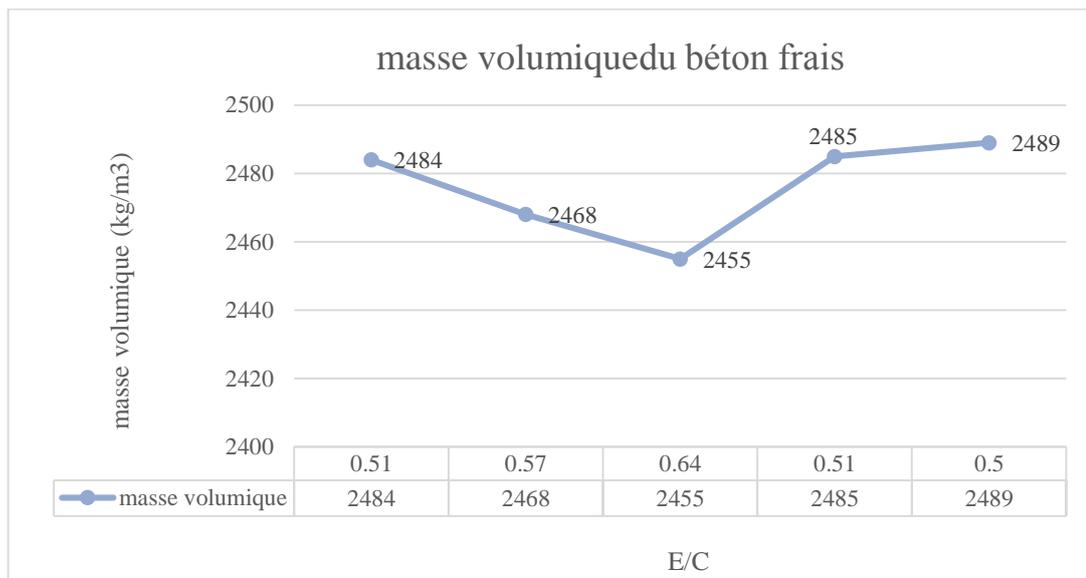


Figure IV.1.b : Masse volumique du béton frais en fonction du rapport E/C

Commentaire :

D'après les résultats obtenus, on constate que la masse volumique du béton frais diminue avec l'augmentation du rapport E/C. L'utilisation d'un adjuvant réducteur d'eau permet une claire augmentation de la masse volumique due à la réduction de la quantité d'eau de gâchage.

L'augmentation de la quantité d'eau permet d'augmenter la phase interstitielle située entre les grains (gravions et sable) composée d'eau et de ciment mais qui n'a pas la même texture d'une pâte de ciment provoquant ainsi une augmentation de volume et une dispersion des grains des différents composants de béton ce qui traduit par une réduction de la masse de l'échantillon pour un même volume.

IV.3 Résultats des essais effectués sur le béton durci :

IV.3.1 Béton conservé à l'eau :

a- La masse volumique du béton durci :

Tableau IV.2 : Masse volumique du béton durci.

Béton	Béton ferme E/C=0.51	Béton plastique E/C=0.57	Béton Très plastique E/C=0.64	Béton adjuvanté(0.5%) E/C=0.51	Béton adjuvanté(1.5%) E/C=0.5
Masse volumique (kg/m ³)	2498	2473	2465	2508	2515

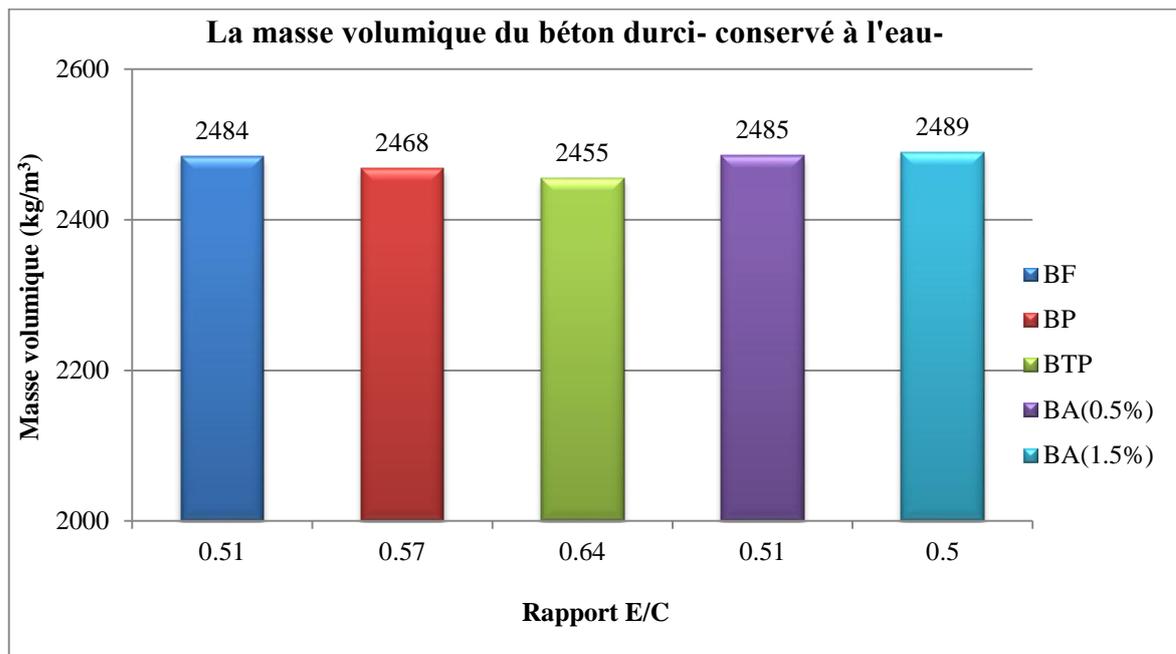


Figure IV.2 : La variation de la masse volumique du béton durci en fonction de rapport E/C.

Commentaire :

On observe une proportion inverse entre la densité des bétons durcis et le rapport E/C. D'où on constate une diminution quasi linéaire de la densité tout on augmente le rapport E/C.

Pour les bétons adjuvants on constate une relation proportionnelle entre le pourcentage d'adjuvant et la densité du béton durci.

Nous pensons que ces variations sont attribuées à la variation entre la quantité d'eau de gâchage et les autres constituants entrant dans la composition de chaque béton.

b- La Résistance à la compression à 28 jours :

Tableau IV.3 : Résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours

Résistance béton	Résistance à la compression (Mpa)					
	Essai01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Moy	Ecart type
Béton ferme (E/C=0.51)	28.50	32.72	33.21	35.60	32.50	2.95
Béton plastique (E/C=0.57)	27.83	23.45	26.42	26.22	25.98	1.83
Béton très plastique (E/C=0.64)	22.36	23.16	22.38	21.90	22.45	0.79
Béton adjuvante (0.5%) (E/C=0.51)	37.31	35.52	30.40	32.23	33.86	1.08
Béton adjuvante (1.5%) (E/C=0.50)	31.20	29.08	29.75	35.48	31.37	0.96

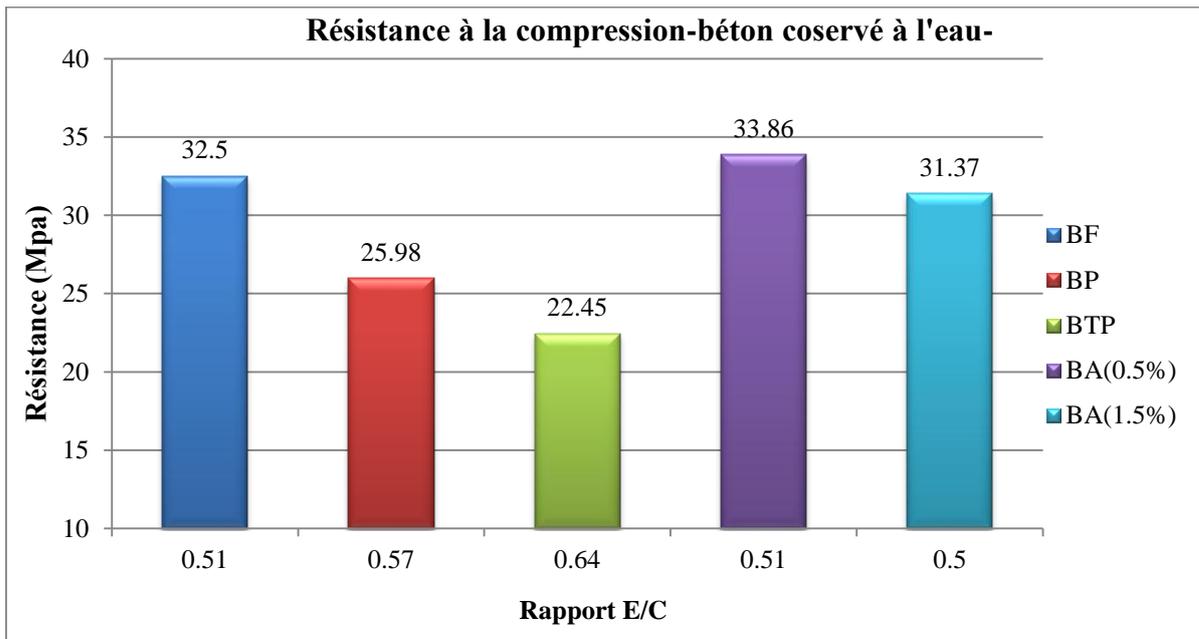


Figure IV.3.a : La résistance à la compression en fonction du rapport E/C

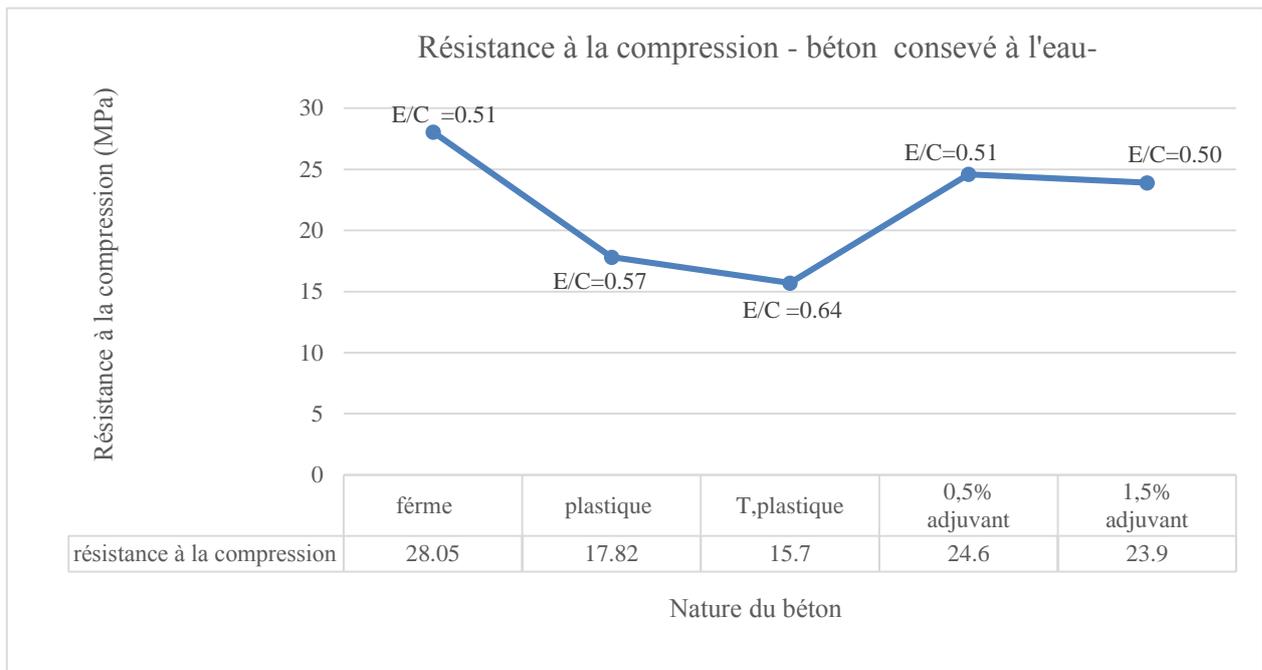


Figure IV.3.b : la résistance à la compression en fonction du rapport E/C

Commentaire :

D’après les résultats obtenus et représentés sur la figure ci-dessus, on peut déduire que :

1/ Pour un béton conservé à l’eau pendant une durée de 28 jours, la résistance à la compression diminue avec l’augmentation du rapport E/C et inversement.

—> La résistance du béton est en relation directe avec la porosité de la pate liante du ciment. Cette porosité résulte principalement du rapport E/C, ainsi la résistance à la compression est reliée directement au rapport E/C.

—> La résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue cela est dû principalement à une manque de formation de silicate de calcium hydraté C-S-H qui forme « une colle » et qui participe le plus au développement de la résistance du béton.

—> A partir d'une quantité d'eau qui est nécessaire à l'hydratation du ciment. L'excédent d'eau dans le béton causé par une quantité importante d'eau de gâchage, cet excès donne lieu à la formation de pores capillaires relativement grands et qui se relie en réseau. Il y a un surplus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater complètement le ciment. Après que tout le ciment soit hydraté, le surplus d'eau restera dans les pores capillaires (eau libre).

2/ L'utilisation d'un adjuvant réducteur d'eau a permet l'obtention d'un béton de meilleur résistance à la compression que ce soit conservé à l'eau ou à l'air. Ce qui explique bien l'influence du rapport E/C sur la résistance.

C- La Porosité du béton à 28 jours:

Tableau IV.4 : Résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours

La porosité béton	La porosité (%)					
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Moy	Ecart type
Béton ferme (E/C=0.51)	8.45	8.25	8.69	8.93	8.58	0.29
Béton plastique (E/C=0.57)	12.53	12.56	13.05	12.25	12.59	0.33
Béton très plastique (E/C=0.64)	14.29	15.01	14.60	14.86	14.69	0.31
Béton adjuvante (0.5%) (E/C=0.51)	5.59	5.63	6.27	6.33	5.94	0.36
Béton adjuvante (1.5%) (E/C=0.50)	7.74	7.00	7.68	7.75	7.54	0.39

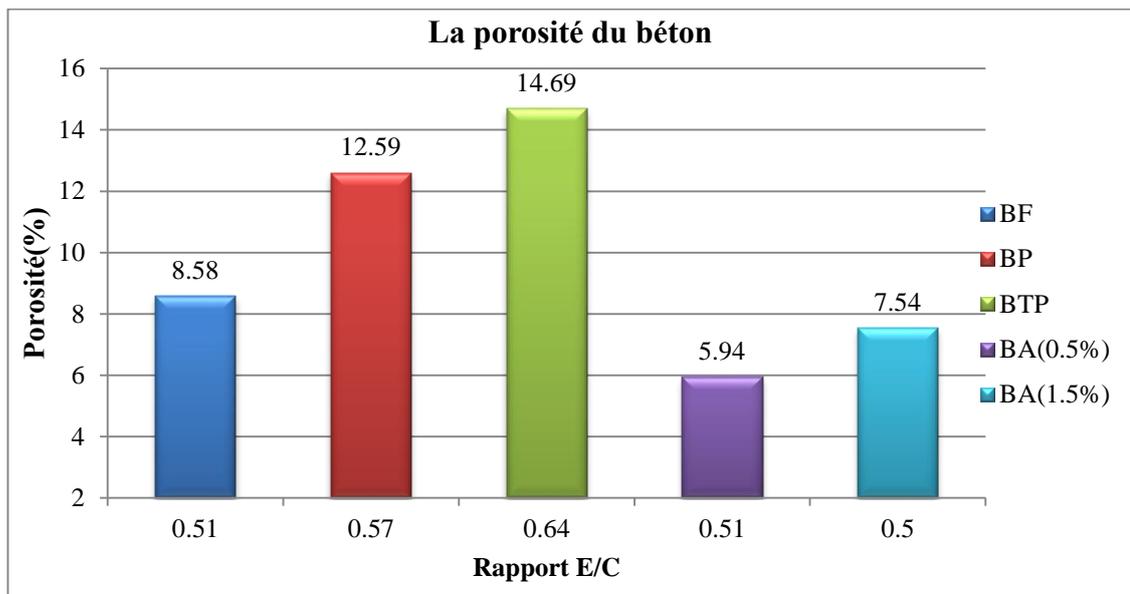


Figure IV.4.a : la porosité de différents bétons en fonction du rapport E/C.

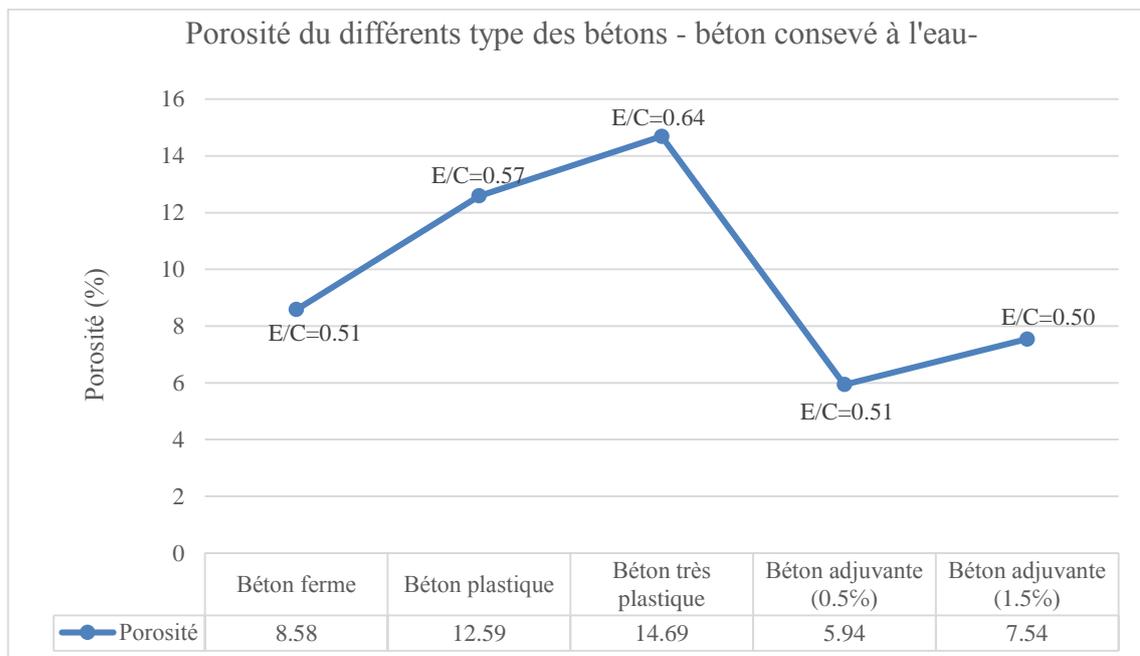


Figure IV.4.b : la porosité de différents bétons en fonction du rapport E/C.

Commentaire :

On constate que la porosité du béton augmente avec l'augmentation du rapport E/C. une quantité supérieure au besoin pour l'hydratation du béton entraîne la création de vide ce qui provoque une porosité supérieure.

L'utilisation d'adjuvant à réduit considérablement la porosité, le volume des vide est réduit entraînant ainsi une diminution de la porosité comme déjà expliqué en haut.

d- Porosité et résistance à la compression pour un béton conservé à l'eau :

Tableau IV.5 : *la porosité et Résistance à la compression.*

Nature du béton	Porosité en (%)	Résistance à la compression (Mpa)
Béton ferme (E/C=0.51)	8.58	32.50
Béton plastique (E/C=0.57)	12.59	25.98
Béton très plastique (E/C=0.64)	14.69	22.45
Béton adjuvante (0.5%) (E/C=0.51)	7.54	33.86
Béton adjuvante (1.5%) (E/C=0.50)	5.94	31.37

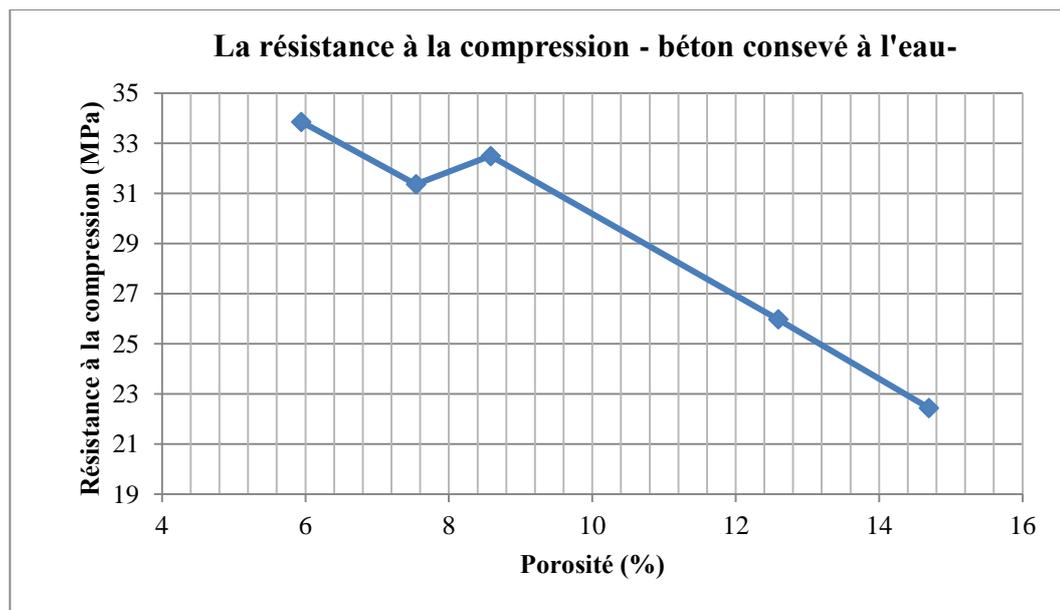


Figure IV.5 : *La résistance à la compression en fonction de la porosité*

Commentaire :

Une diminution de porosité entraîne une augmentation de la résistance à la compression.

→ La résistance à la compression est liée directement aux hydrates formés pendant la période d'hydratation et principalement la précipitation de silicate de calcium hydraté origine de la résistance mécanique. Les fibres de C-S-H ont la propriété de se souder à elles même et aux parois environnantes et inversement. Une augmentation de porosité provoque des fissures entre les grains provoquant une chute de résistance.

IV.3.2 L'influence de mode de conservation

a- L'influence sur la masse volumique du béton durci :

Tableau IV.6 : la masse volumique du béton

Nature du béton La résistance	Mode de conservation	Béton ferme (E/C=0.51)	Béton Plastique (E/C=0.57)	Béton T Plastique (E/C=0.64)	Béton Adjuvanté (0.5%) (E/C=0.51)	Béton Adjuvanté (1.5%) (E/C=0.50)
La masse volumique kg/m ³	A L'Eau	2498	2473	2465	2508	2515
	A L'Air	2388	2369	2360	2403	2410

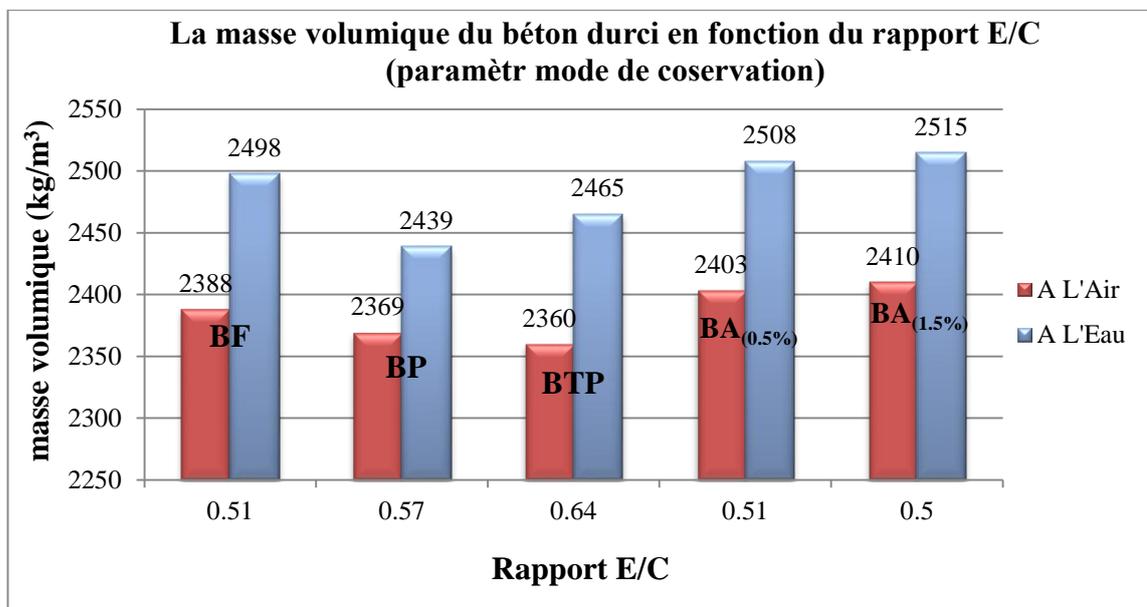


Figure IV 6.a : la masse volumique du béton durci en fonction du rapport E/C

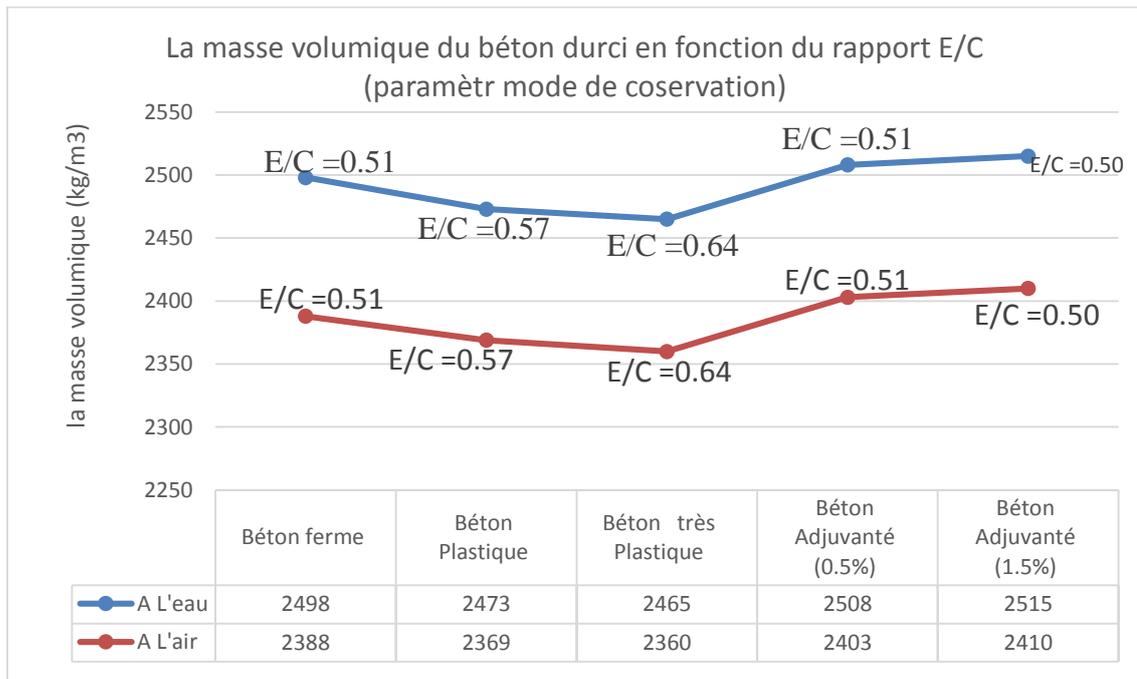


Figure IV.6.b : la masse volumique du différent type du béton durci en fonction du rapport E/C

Commentaire :

D'après les résultats présentés dans le tableau et les figures ci-dessus on peut donner les remarques suivantes :

A- l'influence du rapport E/C apparait clairement sur la masse volumique, pour les deux bétons conservés à l'eau ou à l'air libre.

La masse volumique diminue avec l'augmentation du rapport E/C, quelque soit le mode de conservation.

B- un béton adjuvanté donne les meilleurs résultats dans les deux cas du mode de conservation, cela est dû à la réduction de la quantité d'eau de gâchage.

C- le mode de conservation influe considérablement sur la masse volumique du béton. Le béton qui subit une cure à l'eau pendant à 28 jours présente la meilleure valeur de la masse volumique :

Ce phénomène est dû essentiellement par le fait que le béton conservé à l'eau pendant la période d'hydratation empêche le départ d'eau qui ralentit l'hydratation de poursuivre.

Le béton conservé à l'air perd son eau pendant la période d'hydratation ce qui empêche l'hydratation de continuer la quantité des hydrates est faible ce qui influe sur la structure interne du béton.

b- L'influence sur la Résistance à la compression à 28 jours :**Tableau IV.7 :** *La résistance à la compression du béton conservé a l'air*

Résistance Bétons	Résistance à la compression (Mpa)					
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Moy	Ecart type
Béton ferme (E/C=0.51)	29.84	26.97	27.14	28.78	28.05	1.37
Béton plastique (E/C=0.57)	18.37	18.04	16.61	18.27	17.82	0.82
Béton très plastique (E/C=0.64)	15.20	15.52	15.23	16.87	15.70	0.79
Béton adjuvante (0.5%) (E/C=0.51)	23.00	23.44	26.85	25.14	24.60	1.08
Béton adjuvante (1.5%)	23.81	24.01	23.84	23.96	23.90	0.96

Tableau IV.8 : *La résistance à la compression des bétons avec une mode de conservation défèrent.*

Nature du béton La résistance	Mode de conservation	Béton ferme (E/C=0.51)	Béton Plastique (E/C=0.57)	Béton T Plastique (E/C=0.64)	Béton Adjuvante (0.5%) (E/C=0.51)	Béton Adjuvante (1.5%) (E/C=0.50)
Résistance à la compression	à l'eau	32.50	25.98	22.45	33.86	31.37
	à l'air	28.05	17.82	15.70	24.60	23.90

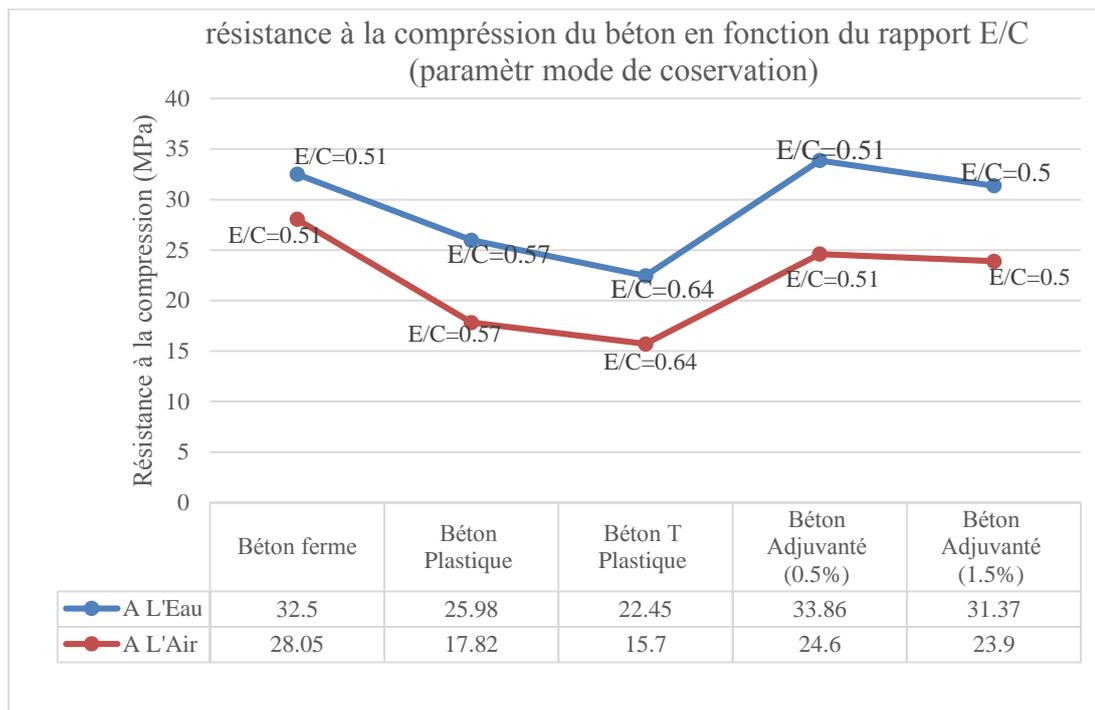


Figure IV.7 : La résistance à la compression en fonction du rapport E/C

Commentaire :

En observant les figures ci-dessus, on peut constater que :

1- La résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C quelque soit le mode de conservation :

→ La résistance du béton est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment, cette porosité résulte principalement du rapport E/C, ainsi la résistance est liée au rapport E/C.

La résistance d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue, cela est dû principalement à une manque de formation de C-S-H qui forme une colle qui participe au développement de la résistance.

2- La résistance à la compression des bétons conservés à l'eau est beaucoup meilleure que celles des bétons conservés à l'air :

→ Une conservation du béton à l'air libre surtout sous une température élevée conduit à une accélération de la vitesse d'hydratation qui est la cause d'une prise plus rapide influant ainsi les caractéristiques du béton et donne une résistance faible.

Le béton perd son eau par l'évaporation surtout dans le cas des bétons de rapport E/C élevée d'où la nécessité de réduire ce rapport par l'utilisation des adjuvants réduction d'eau qui ont donné des résultats intéressants.

C-La Porosité à 28 jours pour un béton conservé à l'air :**Tableau IV.9 : Résultat de porosité pour un béton conservé à l'air.**

La porosité Béton	La porosité (%)					
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Moy	Ecart type
Béton ferme (E/C=0.51)	11.41	11.39	11.47	11.45	11.43	0.036
Béton plastique (E/C=0.57)	14.25	13.50	13.56	13.88	13.79	0.34
Béton très plastique (E/C=0.64)	15.85	15.30	15.85	15.90	15.72	0.28
Béton adjuvante (0.5%) (E/C=0.51)	11.94	11.84	11.50	11.83	11.77	0.53
Béton adjuvante (1.5%)	11.93	12.77	13.17	12.35	12.55	0.19

Tableau IV.10 : la porosité des bétons avec une mode de conservation défirrent.

Nature du béton La porosité	Mode de conservation	Béton ferme (E/C=0.51)	Béton Plastique (E/C=0.57)	Béton T Plastique (E/C=0.64)	Béton Adjuvanté (0.5%) (E/C=0.51)	Béton Adjuvanté (1.5%) (E/C=0.50)
Porosité (%)	à l'eau	8.58	12.59	14.69	5.94	7.54
	à l'air	11.43	13.79	15.72	11.77	12.55

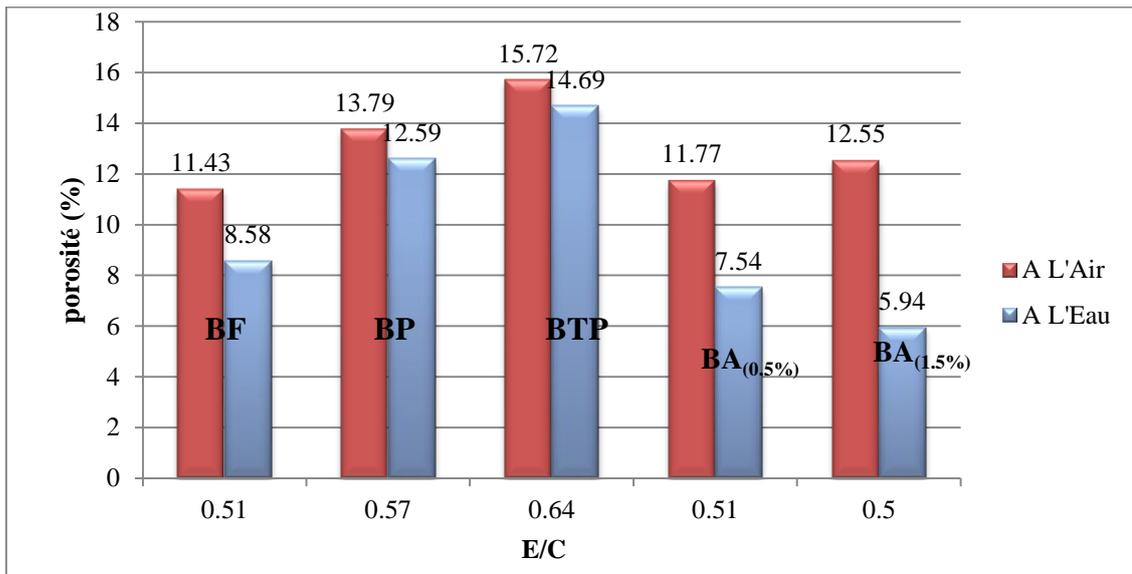


Figure IV.8.a : la porosité du béton en fonction du rapport E/C

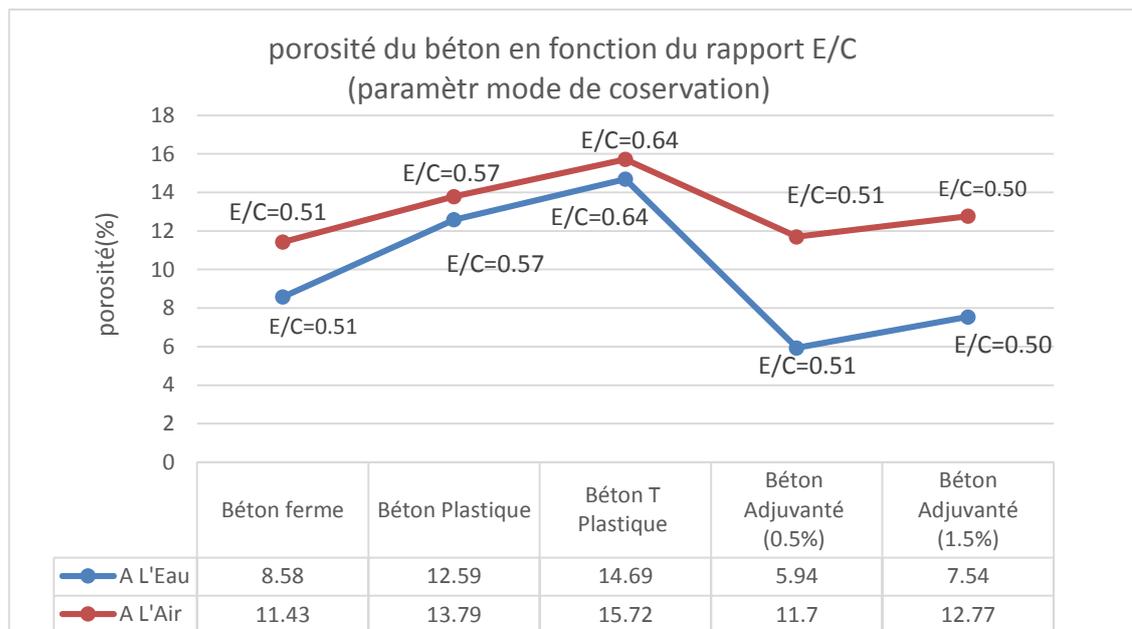


Figure IV.8.b: la porosité du béton en fonction du rapport E/C.

Commentaire :

La porosité du béton conservé à l'air est plus élevée qu'un béton conservé à l'eau : le rapport E/C influe sur la relation d'hydratation provoquant des fissures à l'intérieur surtout dans le cas des bétons conservés à l'air, où une température élevée provoque l'évaporation d'une quantité d'eau de gâchage, l'hydratation ralentie et la porosité augmente.

- **L'influence de la porosité sur la résistance à la compression**

Tableau IV.11 : la porosité et la Résistance à la compression des bétons avec une mode de conservation différent.

Nature du béton La porosité et la résistance	mode de conservation	Béton ferme (E/C=0.51)	Béton Plastique (E/C=0.57)	Béton T Plastique (E/C=0.64)	Béton Adjuvanté (0.5%) (E/C=0.51)	Béton Adjuvanté (1.5%) (E/C=0.50)
		porosité (%)	à l'eau	8.58	12.59	14.69
	à l'air	11.43	13.79	15.72	11.77	12.55
Résistance à la compression (MPa)	à l'eau	32.50	25.98	22.45	33.86	31.37
	à l'air	28.05	17.82	15.70	24.60	23.90

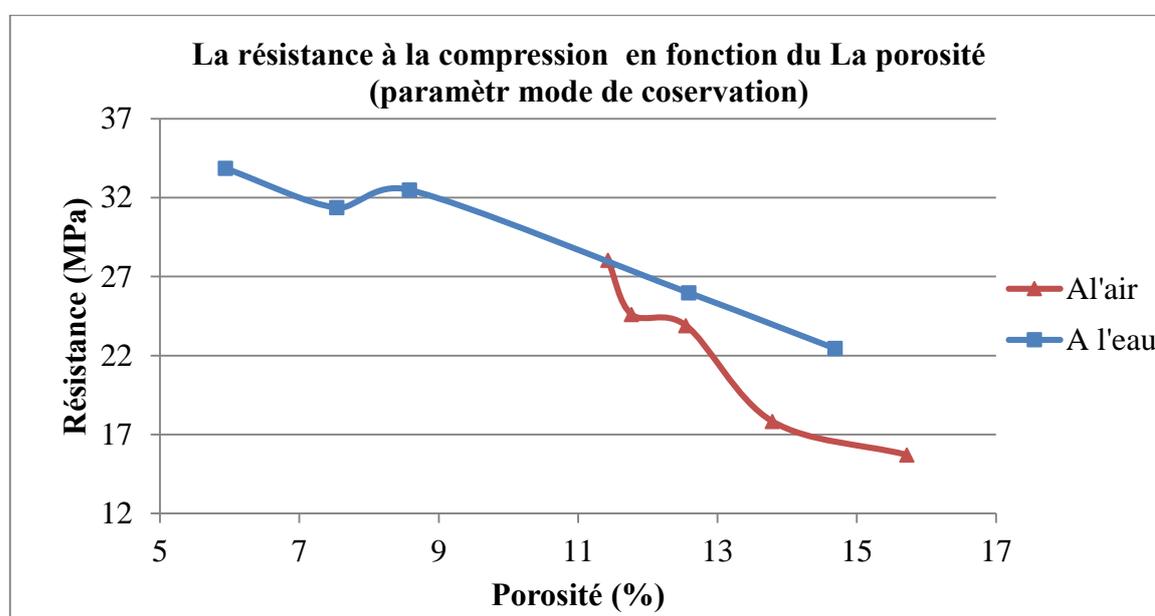


Figure IV.9 : La résistance à la compression en fonction de la porosité.

Commentaire :

Les figures ci-dessus présente bien l'influence de la porosité sur la résistance à la compression, la porosité provoque par l'évaporation d'eau surtout pour des rapport E/C élevé ne permis pas la poursuite de l'hydrations du ciment jusqu'au la remplissage de la porosité capillaire ainsi que la quantité des hydrates et principalement les C-S-H responsables de la résistance à la compression ,la phase d'hydratation joue un rôle importante dans la distribution de la taille des pores , cette hydratation est influence par le mode de conservation .

D'ailleurs, pendant l'écrasement des éprouvettes remarquent, le reste de ciment non hydraté qui laisse à dire que la réaction d'hydratation n'était pas complète a cause de l'évaporation d'eau.

Conclusion générale

Dans ce modeste travail, nous avons pu évaluer en premier lieu l'influence de la quantité d'eau de gâchage exprimé par le rapport E/C sur la masse volumique à l'état frais et durci du béton, sur la porosité et sur la résistance à la compression d'un béton confectionné à base de matériaux locaux. En second lieu, nous avons réalisé des essais dans le but de comprendre et déterminer l'influence du mode de conservation à l'air libre sur les caractéristiques du béton ainsi que les qualités apportées par l'incorporation d'un adjuvant réducteur d'eau. Les paramètres pris en compte sont :

- Rapport E/C
- Dosage en adjuvant
- Mode de conservation

Après cette étude expérimentale, nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- L'influence du rapport E/C apparait clairement sur les résultats obtenus : la résistance à la compression du béton augmente en réduisant la quantité d'eau de gâchage et cela pour les deux cas du mode de conservation du béton.
- La masse volumique diminue avec l'augmentation du rapport E/C quelque soit le mode de conservation.
- La porosité du béton est en relation directe avec la quantité d'eau de gâchage surtout pour les bétons conservés à l'air libre où l'évaporation d'eau est plus importante ce qui influe sur la réaction d'hydratation provoquant des pores et une chute de résistance.
- La présence des pores dans un béton conduit à une chute de résistance de compression d'où la nécessité d'utiliser les adjuvants réducteur d'eau dans nos chantiers pendant la confection pour avoir un matériau de qualité et durable.

Travaux futurs :

- Influence des additions minérales sur les propriétés du béton.
- Etude de l'incorporation d'adjuvants sur la durabilité des bétons.
- Etude de l'effet des milieux agressifs sur les caractéristiques du béton.
- Etude de l'influence de la formulation sur les qualités du béton.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] **NEVILLE A.M. (1995)**, "Properties of Concrete", Longman, Harlow, 844 p.
- [2] **F. DE LARRARD**, "Concrete Mixture-Proportioning – A Scientific Approach", Modern Concrete Technology Series, No. 9, E & FN SPON, Londres, 1999.
- [3] **FESTA. J et DREUX. G:** "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles 1998.
- [4] **ACI 211.1-91(1994)**, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, ACI, Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, ACI, Detroit, Michigan, 38 p
- [5] **BRE (1988)**, "Design of Normal Concrete Mixes", Building Research Establishment, Watford, UK.
- [6] **DREUX G. (1970)**, "Guide pratique du béton", Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.
- [7] **Safi B.** « les méthodes composition de béton », SL, pp1-5. 2011,
- [8] **Adam M., Neville**, Propriété des bétons Edition eyrolles, septembre 2000
- [9] **BENOUIS A., GRINI A., LABROUKI B**, "Pathologie des constructions", Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique – Université de Guelma 2008
- [10] **BOUKERROUCHE Nedjoua**, "DURABILITÉ DES BÉTONS, Influence des paramètres de composition et de traitement", Université Mentouri Constantine 2009.
- [11] **OLLIVER Jean-Pierre et Angélique VICHOT**, "DURABILITÉ DES BÉTONS", sous la direction de J. BARRON, J-P. OLLIVIER, presses de l'ENPC, chap.2 pp.26, 2008.
- [12] **Metha**, 1986 concrete structure, properties, and materials, Prentice - Hall, 450 p.
- [13] **J.-P. Lott, et al, 2005 CIMBÉTON** : centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciment et béton » conception et réalisation– Edition 2005, Am principe Paris.
- [14] **K. WANG, D.C. JANSEN, S.P.SHAN:** "Permeability Study of Cracked Concrete, Cement and Concrete Research", Vol, 27, N°3, 1997, pp. 381-393.
- [15] **BOURDETTE B., RINGOT E et OLLIVIER J.P.** (1995) – modelling of the transition zone porosity. Cem. concr. Res. 25, 741-751.
- [16] **D. CHUGUES:** pore structure and permeability of hardened cement paste –magazine of concrete research, vol, 37, N°133, December 1985, pp. 227-233.
- [17] **M. Buil et j-p. Ollivier**, «la durabilité des bétons» : conception des bétons. La structure poreuse Sd.

Bibliographies

- [18] **ELBAHI BOUBAKEUR SEDDIK**, "Influence des paramètres de formulation et des conditions de mise en œuvre et de conservation sur la perméabilité à l'eau d'un béton", Université Mohamed Boudiaf De M'sila, 2004.
- [19] Ecole Française du béton/Cimbéton 7 place de la Défense 92974 Paris La Défense cedex.
- [20] **CCB, Italcementi Group**, "La garantie d'un béton de qualité", septembre 2008 pp10
- [21] **Unibéton Italcementi Group**, « Excès d'eau », septembre 2008
- [22] **MATINE**, Fiche technique de ciment, 2013, Hammam El Dalaa
- [23] **GRANITEX**, Fiche technique, 2013 Zone industrielle Oued Smar 16270 Alger.
- [24] **PAT**, Abaques Dreux, SL, septembre 2009
- [25] **Pierre Jehel**, «Dosage en granulats des bétons: Méthode CES DREUX-GORISSE», 2013.