

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



## MÉMOIRE DE MAGISTER

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER en Génie Civil  
Option : Matériaux et structures

### THÈME

**ETUDE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS ARMÉS CONFECTIONNÉS À  
PARTIR DES SABLES DE CONCASSAGE**

**Soutenu le :**

**Présenté par :**

M<sup>elle</sup> Fatima LEKDIM

Membres du jury:

Mr. MAZA	Mustapha	Maître de conférences ; Université de Bejaïa ;	Président
Mr. ARKOUB	Hamid	Maître de conférences ; Université de Bejaïa ;	Rapporteur
Mr. TAHAKOURT	Abdelkader	Professeur ; Université de Bejaïa ;	Examineur
Mr. CHELOUAH	Nasser	Maître de conférences ; Université de Bejaïa ;	Examineur

Année Universitaire : 2010/2011

# REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier le bon dieu.

Je présente mes respectueux remerciements à M<sup>r</sup> H.ARKOUB, qui a bien voulu diriger et encadrer les travaux de ce mémoire, pour son suivi et ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Je remercie vivement les membres du jury pour m'avoir honoré en acceptant de juger mon travail.

Je remercie tout les techniciens des deux laboratoires de béton et génie des procédés de la faculté de technologie.

J'exprime ma profonde reconnaissance à M<sup>r</sup> D.BENYESSAD pour son aide.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à mes parents et mon fiancé Salem pour leurs aides et leurs encouragements.

En fins je remercie toute ma famille pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant mes études.

# SOMMAIRE

Liste des figures : .....	I
Liste des tableaux : .....	IV
Notations et abréviations : .....	V

Introduction générale:.....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I-1 : Composition du béton armé.....	3
I-1-1: Description.....	3
I-1-2: Armature.....	3
I-1-3: Les granulats.....	3
I-1-4: Eau et ciment.....	10
I-2 : Rôle des différents éléments constituant le béton.....	11
I-3 : Généralités sur le ciment hydraté.....	11
I-3-1 : Les constituants du ciment [NF EN 197-1] .....	12
I-3-2 : Processus d'hydratation du ciment.....	12
I-3-3 : Mécanisme d'hydratation du ciment portland.....	14
I-4 : Notion sur la durabilité des bétons.....	16
I-4-1 : Introduction.....	16
I-4-2 : Indicateur de la durabilité.....	17
I-4-2-1 : Résistance et retrait .....	17
I-4-2-2 : Carbonatation du béton.....	24
I-4-2-3 : Porosité.....	33

## CHAPITRE II : Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

II-1 : Origine des matériaux .....	36
II-1-1 : Ciment .....	36
II-1-2 : Les sables .....	36

II-1-3 : Gravier	36
II-1-4 : Eau de gâchage	36
II-2 : Prélèvement des matériaux	36
II-2-1 : Prélèvement sur stock	36
II-2-2 : Prélèvement en laboratoire	36
II-3 : Analyse minéralogique des matériaux	37
II-3-1 : Analyse du ciment CPJ 42,5 CEM II	38
II-3-2 : Analyse des granulats	39
II-3-3 : Interprétation des résultats	43
II-4 : Caractéristiques mécaniques des granulats (essai Los angeles )	43
II-5 : Analyse granulométrique par tamisâge (NF P 18-560)	44
II-5-1 : Principe d'essai	44
II-5-2 : Préparation de l'échantillon pour l'essai	44
II-5-3 : Exécution d'essai	44
II-6 : Module de finesse	49
II-7 : Masse volumique (NF P 18-554, P18-555)	49
II-7-1 : Masse volumique absolue	49
II-7-2 : Masse volumique apparente	50
II-8 : Propreté des granulats	51
II-8-1 : Propreté superficielle	51
II-8-2 : Propreté des sables	53
II-9 : Formulation des bétons	57
II-9-1 : Classe d'exposition des bétons en fonction des actions dues à l'environnement	58
II-9-2 : Valeurs limites spécifiées à la composition et aux propriétés du béton (extrait du tableau A.F.1 de la norme NF-EN 206-1)	58
II-9-3 : Formulation des bétons selon la méthode Dreux-Gorisse	58
CHAPITRE III : Indicateurs de la durabilité	
III-1 : Essai de carbonatation	65
III-1-1 : principe de la carbonatation	65
III-1-2 : Caractéristiques des matériaux	66

III-1-3 : Préconditionnement avant carbonatation.....	66
III-1-4 : Essai de carbonatation accélérée.....	67
III-1-5 : Mesure de la profondeur de carbonatation.....	67
III-1-6 : L'indicateur coloré (phénolphtaléine) de pH.....	68
III-1-7 : Résultats.....	68
III-1-7-1 : Analyse minéralogique par DRX.....	72
III-1-7-2 : Morphologie.....	73
III-1-7-3 : Interprétation des résultats.....	76
III-2 : Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente mesurées par pesée hydrostatique (NF P 18-459) .....	78
III-2-1 : Introduction.....	78
III-2-2 : Déroulement des campagnes d'essais.....	78
III-2-3 : Résultats et interprétations.....	80
Conclusion et perspectives .....	84
Références bibliographiques.....	86
Annexes.....	89

## Liste des figures

### Liste des figures

Figure I-1:	Fines sphériques : leur usage conduit à une réduction d'eau.....	9
Figure I-2:	Fines anguleuses : leur usage conduit à un dosage supérieur d'eau .....	9
Figure I-3:	Agglomération des éléments les plus fins sur les éléments les plus gros conduisant à une surconsommation d'eau.....	10
Figure I-4:	Présence dans les fines d'éléments alvéolés avides d'eau.....	10
Figure I-5:	Influence du rapport E/C sur la résistance finale.....	11
Figure I-6:	Caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment d'après Vincent Waller, 2000.....	15
Figure I-7:	Matrice cimentaire « MEB » [3].....	16
Figure I-8:	Évolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de la porosité pour des pâtes pures saines et dégradées.....	18
Figure I-9:	Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines ....	19
Figure I-10:	Résistance à la compression des bétons des deux carrières.....	20
Figure I-11:	Résistance à la compression des mortiers en fonction de la teneur en fines.....	20
Figure I-12:	Évolution du retrait des mortiers d'ENOF A/O en fonction du pourcentage de fines à des temps différents [14].....	22
Figure I-13:	Évolution du retrait des mortiers d'ENOF Timezrit en fonction en fonction du pourcentage de fines à des temps différents [14].....	22
Figure I-14:	Évolution des retraits en fonction de la teneur en fines.....	23
Figure I-15:	Évolution des retraits en fonction en fonction de la teneur en fines d'adras oufarnou[16].....	23
Figure I-16:	Évolution des retraits en fonction en fonction de la teneur en fines de timezrit[16].....	24
Figure I-17:	Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [19].....	26
Figure I-18:	Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers [2].....	28
Figure I-19:	Représentation schématique des étapes de corrosion des armatures du béton causé par $\text{CO}_2$ [2].....	29
Figure I-20:	Profondeur carbonatée en fonction de la racine du temps [31]...31	31
Figure I-21:	Influence de la résistance en compression à 28 jours sur la profondeur carbonatée 2 ans avec différentes ciments et différentes expositions [31].....	32
Figure I-22:	Représentation du matériau poreux imperméable et perméable.....	33
Figure I-23:	Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [33].....	34
Figure I-24:	Échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté [33].....	34
Figure I-25:	Influence de l'E/C de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons [33].....	35
Figure II-1:	Diviseur échantillonneur à couloirs.....	37
Figure II-2:	Spectre de la DRX du ciment CPJ 42,5 CEM II B 42,5.....	38
Figure II-3:	Paternes d'identification du ciment CPJ 42,5 CEM II B 42.....	38
Figure II-4:	Spectre de DRX du gravier 8/15.....	39

## Liste des figures

Figure II-5: Paternes d'identification du gravier 8/15.....	39
Figure II-6: Spectre de la DRX du gravier 3/8.....	40
Figure II-7: Spectre de la DRX du sable de carrière 0/3.....	40
Figure II-8: Spectre de la DRX des fines de sable.....	41
Figure II-9: Spectre de la DRX du sable d'oued.....	42
Figure II-10: Paternes d'identification du sable d'oued.....	42
Figure II-11: Courbe granulométrique du gravier 3/8.....	46
Figure II-12: Courbe granulométrique du gravier 8/15.....	46
Figure II-13: Courbe d'analyse granulométrique du sable de carrière 0/3.....	47
Figure II-14: Courbe d'analyse granulométrique du sable d'oued.....	48
Figure II-15: Méthode d'éprouvette.....	49
Figure II-16: Test au bleu méthylène.....	57
Figure II-17: Abaque permettant la détermination de $C_{opt}$ .....	59
Figure II-18: Courbes granulométrique du mélange.....	63
Figure III-1: Dispositif expérimental de l'essai de carbonatation accélérée...	65
Figure III-2: Front de carbonatation détecté par projection de phénolphthaléine sur une éprouvette de béton ordinaire.....	67
Figure III-3: Profondeurs de la carbonatation en fonction du pourcentage de fines.....	69
Figure III-4: Profondeur de la carbonatation en fonction de la racine du temps des bétons confectionnés à base du sable de carrière et à base du sable d'oued.....	70
Figure III-5: Évaluation des masses du béton en fonction du temps.....	71
Figure III-6: Évaluation des masses des bétons confectionnés à base du sable de carrière et à base du sable d'oued après carbonatation en fonction du temps.....	71
Figure III-7: Spectres de la DRX et paternes d'identification des bétons confectionnés à base du sable de carrière et à base du sable d'oued... ..	72
Figure III-8: Aiguilles « 1 » remplissant une partie de fissure dans un béton de 15% de fines subi une carbonatation à 28 jours.....	73
Figure III-9: Formation des aiguilles au niveau des pores du béton à 15% de fines subi une carbonatation à 28 jours.....	73
Figure III-10: Formation des aiguilles au niveau de la fissure du béton à 15% de fines subi une carbonatation à 28 jours.....	73
Figure III-11: Béton non carbonaté à 15% de fines à 5000 X.....	74
Figure III-12: Béton non carbonaté à 15% de fines au niveau de la fissure à 10 000 X.....	74
Figure III-13: Apparition des aiguilles au niveau du pore du béton de 15% de fines subi une carbonatation à 7 jours.....	75
Figure III-14: Agrandissement de la zone « A » à 20 000 X.....	75
Figure III-15: Carbonatation du béton confectionné à base du sable d'oued sans formation des aiguilles.....	75
Figure III-16: Fissure colmaté d'un béton confectionné à base du sable d'oued non carbonaté à 28 jours.....	75
Figure III-17: Apparition du colmatage au niveau de la fissure d'un béton confectionné à base du sable d'oued non carbonaté à 28 jours.....	75

## Liste des figures

---

Figure III-19: Apparition des vides au niveau d'un béton confectionné à base du sable de carrière brut après carbonatation.....	75
Figure III-20: Carbonatation d'un béton confectionné à base du sable de carrière brut.....	75
Figure III-21: Carbonatation d'un béton à 0% de fines à 28 jours.....	75
Figure III-22: Dispositif de la pesée hydrostatique $M_{eau}$ .....	79
Figure III-23: Évaluation de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente des bétons BSO et BSC brut.....	80
Figure III-24: Évaluation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage de fines.....	82
Figure III-25: Évaluation de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage de fines.....	82

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

### Liste des tableaux

Tableau I-1: Terminologie usuelle des granulats selon leurs dimensions.....	5
Tableau I-2: Classification des granulats naturels selon le type de roche [4].....	6
Tableau I-3: Les principaux constituants du clinker.....	12
Tableau II-1: Analyse granulométrique du gravier 3/8 .....	45
Tableau II-2: Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	45
Tableau II-3: Analyse granulométrique du sable de concassage .....	47
Tableau II-4: Analyse granulométrique du sable d'oued .....	48
Tableau II-5: Module de finesse des sables.....	49
Tableau II-6: Masses volumiques absolues des granulats.....	50
Tableau II-7: Masses volumiques apparentes des granulats.....	51
Tableau II-8: Propreté des granulats.....	52
Tableau II-9: K. fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.....	61
Tableau II-10: Pourcentages en volumes absolus de matériaux.....	62
Tableau II-11: Compacité du béton en fonction de $D_{max}$ de la consistance et du serrage.....	64
Tableau III-1: Les volumes des constituants des bétons pour l'essai de carbonatation.....	66
Tableau III-2: Profondeurs de la carbonatation en « mm » des bétons confectionnés avec le sable d'oued et sable de carrière.....	68
Tableau III-3: Poids des bétons après carbonatation.....	68
Tableau III-4: Masses des constituants des bétons pour l'essai porosité accessible à l'eau et masse volumique mesurée par pesée hydrostatique.....	79
Tableau III-5: Porosité accessible à l'eau et masses volumiques apparentes des bétons confectionnés à base du sable d'oued et à base du sable de carrière.....	81

## NOTATION ET ABBREVIATIONS

Abréviations et symboles	Signification
E/C	Eau/Ciment
C <sub>3</sub> S	Silicate tricalcique
C <sub>2</sub> S	Silicate bicalcique
C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique
C <sub>4</sub> AF	Aluminoferrite tétracalcique
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
AFT	Alumina-Ferric oxide, Tri sulfate
AFm	Alumina-Ferric oxide, mono-sulfate
MEB	Microscope Électronique à Balayage
DRX	Diffraction des Rayons X
ENG	Entreprise Nationale des Granulats
ENOF	Entreprise Nationale des produits miniers non Ferreux
SOMACOB	Société des Matériaux de Construction de Bejaïa
LCPC	Laboratoire Central des Matériaux de Construction
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandite
CaCO <sub>3</sub>	Carbonate de calcium
MF	Module de finesse
ESV	Équivalent de Sable Visible
ESP	Équivalent de Sable au Piston
LA	Coefficient de Los Angeles
P	Propreté
W	Teneur en eau
VB	valeur au bleu méthylène
XC	Profondeur de la carbonatation
P(%)	Porosité accessible à l'eau
BSO	Béton confectionné à base du Sable d'Oued
BSC brut	Béton confectionné à base du Sable de Carrière brut.
AFPC-AFREM	Association Française Pour la Construction et Association Française de Recherche et d'Essai sur les Matériaux et les constructions.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

### INTRODUCTION GENERALE

Les besoins élevés en sable de construction dans notre pays ont conduit à des extractions illicites des sables de mer et des sables d'oueds.

Les réserves disponibles des sables roulés sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des rivières (décret national N° : 67 du 19 novembre 2009).

Afin de limiter ces extractions nous allons effectuer une étude visant à utiliser le sable de carrière, qui est disponible en quantité importante et qui pourrait se substituer au sable roulé.

Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel non contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières.

La fragmentation de roches calcaires s'accompagne systématiquement d'une production de fines dont la présence en quantité non contrôlée dans une composition de béton peut compromettre la qualité de celui-ci. En Algérie, plus de mille unités produisent annuellement 68 millions de tonnes de granulat [1], pour l'essentiel de nature calcaire. Malheureusement, plus de 20% des sables fabriqués sont impropres à l'utilisation comme sable de construction du fait d'une teneur en fines supérieure à 12% (limite normative actuelle).

Les sables de concassage tendent de plus en plus à remplacer les sables ronds dans la fabrication des bétons, mais la présence d'éléments fins joue un rôle important et contribue aux qualités de plasticité et d'ouvrabilité, par fois son influence peut être néfaste sur la durabilité des bétons.

L'objectif de notre étude est de définir l'effet des fines dans le sable concassé, issu de la fragmentation de roche calcaire, sur la durabilité des bétons armés, en comparant avec les bétons confectionnés à base du sable d'oued.

Ce travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique qui comprend deux parties : la première concerne les généralités sur les composants du béton ordinaire et leurs mécanismes, la seconde est consacrée à donner quelques notions sur la durabilité en précisant trois indicateurs de la durabilité (résistance, carbonatation, porosité).

Le deuxième chapitre a pour but de caractériser les matériaux granulaires cités ci-dessus par les essais de laboratoire et la formulation du béton par la méthode Dreux Gorisse.

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

Les résultats et l'interprétation sont portés dans le chapitre III consacré à l'étude expérimentale des indicateurs de la durabilité (carbonatation, porosité accessible à l'eau) des bétons confectionnés à base du sable d'oued et à base du sable de carrière.

Le travail s'achève par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

## **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

**CHAPITRE I :****SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

Dans ce chapitre on présente une synthèse bibliographique sur le matériau béton et ces indicateurs de la durabilité.

Elle est divisée en deux parties, la première concerne les généralités sur les composants du béton ordinaires et leurs mécanismes, la seconde est consacrée à donner quelques notions sur la durabilité en précisant trois indicateurs de la durabilité (résistance, carbonatation, porosité).

**I.1 Composition du béton armé :****I.1.1 Description :**

Le béton armé est un matériau composite constitué d'acier "armatures "et de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci. [2]

**I.1.2 : Armatures :**

Les armatures sont obtenues à partir d'aciers pour béton armé suite à des opérations de dressage, de coupe, de façonnage et d'assemblage.

On distingue deux principaux types d'aciers selon leur composition chimique :

- L'acier au carbone ;
- L'acier inox ;

Les aciers se présentent sous forme de barres de grande longueur (souvent 12 m) ou de fils en couronnes :

- Barres droites lisses : diamètre 5 à 50 mm ;
- Barres droites à haute adhérence : diamètre 6 à 50 mm ;
- Fils à haute adhérence en couronne : diamètre 5 à 16 mm.

**I.1.3 granulats:**

Les granulats utilisés dans les bétons hydrauliques peuvent avoir diverses origines.

**On distingue :**

- Les granulats naturels issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissent aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage et sélection).

- Les granulats artificiels provenant de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages en béton.

Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton. Ils sont agglomérés par le liant pour former une « pierre artificielle ». Ils confèrent ainsi au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique. [3]

Pour que le squelette soit le plus compact et le plus durable possible, il est nécessaire que les granulats satisfassent à des exigences tant au niveau de leur nature (pétrographie, minéralogie), qu'au niveau des techniques de fabrication (taille, forme, rugosité).

#### **A) Rôle des granulats pour bétons:**

Selon la norme XP P 18-540 Les granulats pour béton sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm.

Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton. Les granulats, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice.

La nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton.

Le choix des granulats est un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues.

#### **B) Classification des granulats:**

B-1 ) Classification d'après leur provenance:

##### **Granulats alluvionnaires:**

Les gisements alluvionnaires, correspondent à des matériaux non consolidés, généralement déposés pendant la 1<sup>ère</sup> quaternaire par les glaciers, les cours d'eau ou sur les fonds marins peu profonds. Le site le plus habituel est celui du lit ou de l'ancien lit d'une rivière. L'exploitation aura lieu à sec ou dans l'eau.

##### **Granulats de carrières:**

Les roches massives susceptibles de fournir des granulats viennent surtout des gisements épais de roches durs. Il s'agit surtout de calcaires de formation géologique plus ancienne, ou de roches d'origine plutonique que l'on nomme

roches éruptives. Si ces dernières sont plutôt propres, les calcaires peuvent contenir des limons ou argiles indésirables.

#### Granulats de recyclage et artificiels:

Depuis quelques années, on produit des granulats de recyclage en concassant des matériaux de démolition issus des bâtiments ou des chaussées (bétons, pierre de taille...) et des sous-produits de l'industrie (laitiers de hauts fourneaux, mâchefers...).

#### B-2) Classification d'après leur dimension:

Un granulats est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D, d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains. Lorsque d est inférieur à 2mm, le granulats est désigné 0/D. La norme XP P 18-540 indique la terminologie usuelle des granulats selon leurs dimensions:

Tableau I-1: Terminologie usuelle des granulats selon leurs dimensions.

Granulats	Dimensions
Fillers 0/D	$D < 2\text{mm}$
Sablons 0/D	$D < 1\text{ mm}$
Sables 0/D	$1 < D < 6,3\text{mm}$
Gravillons d/D	$d > 1\text{ mm} ; D < 125\text{ mm}$
Graves 0/D	$D > 6,3\text{ mm}$
Ballast d/D	$d \geq 25\text{ mm} ; D \leq 50\text{ mm}$

#### B-3) Classification d'après leur nature minéralogique:

La composition minéralogique des granulats dépend essentiellement de celles des roches exploitées (granulats de carrière), ou celle des roches auxquelles sont arrachées par l'érosion (granulats alluvionnaires). La classification de ces dernières dépend du taux en différents minéraux constituant ces granulats, on distingue:

- a. les granulats siliceux
- b. Les granulats calcaires
- c. Les granulats granitiques (argileux ou schisteux)

#### B-4) Classification d'après leur pétrographie:

D'un point de vu pétrographique, les granulats, qu'ils soient concassés ou naturels, peuvent être classés en plusieurs groupes de roches présentant des caractéristiques communes. La classification donnée dans la norme BS 812: partie 1:1975 est la suivante:

Tableau I-2: Classification des granulats naturels selon le type de roche [4]

Groupe des basaltes Andésite: Dolérites Basalte: Spi lites Diabase: Quartz-dolérites	Groupe de silex Silex chert	Groupe des gabbros Diorite basique, Gabbro, picrite, péridotite, Norite, Serpentine.
Groupe des calcaires  Dolomite, calcaire, marbre	Groupe des granites Gneiss, Granite, granodiorite, Pegmatite, syénite, granulite, quartz-diorite	Groupe des quartzs  Quartzite  quartzite recristallisé
Groupe des grés  Grés, grés grossiers, tuff Arkose, grauwacke	Groupe des roches cornéennes toutes les roches issues du métamorphisme de contact sauf les marbres.	Groupe des schistes  Schistes, Ardoise, Phyllites Toutes les roches clivées.

Roches éruptives à phénocristaux

Aplite, Dacite, rhyolite, granite microgrenu, Trachyte.

Cette classification par groupe ne signifie pas que tous ces groupes donnent de bons granulats pour un béton: on peut trouver des matériaux à déconseiller dans chacun de ces groupes. Néanmoins, certains groupes de roches présentent de meilleures caractéristiques que d'autres.

C: Différents types de sables:

C-1) Sable naturel:

– Sable de mer:

Ce sable on le trouve à l'embouchure des rivières est en général inutilisable car il est souvent mélangé avec la vase. Toutefois, le sable de mer est chargé de sel; ceci est sans inconvénient pour tous les travaux en mer (mur de quai...) et les fondations, mais il faut prendre des précautions pour les ouvrages en élévation, car les murs auraient tendance à rester humides.

– Sable d'oued ou de rivière:

Il est extrait par curage du lit des cours d'eau, généralement, ce matériau est siliceux. Toutefois, dans certaines régions, le sable de rivière est schisteux et donne de moins bons résultats, surtout si le schiste est tendre car il a, en outre, tendance à se transformer en argile. En fin, le sable de rivières gypseux est à éliminer.

– Sable des dunes:

C'est une variété de sable de mer; ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins

– Sable de carrière:

Certains sables de carrières contiennent de l'argile qui enrobe les grains de sables et empêche d'adhérer aux liants; ils sont donc à proscrire. Les sables quartzeux sans matières terreuses ou argileuses sont excellents pour les maçonneries.

Particularité des sables de concassage :

Le sable de concassage est un matériau qui est utilisé ordinairement dans la confection des mortiers et bétons moyennant le respect d'une valeur maximale de la teneur en fines. Le sable de concassage est un matériau obtenu à partir de roches massives après des opérations de criblages dans une carrière de production de gravillons. En raison du pourcentage élevé des fines (éléments de diamètres inférieurs à 80 microns), allant jusqu'à 25% et même plus, ce sable ne peut être utilisé en état dans la confection des bétons courants, car il nécessite une demande excessive en eau de gâchage pour une mise en œuvre correcte du béton [5]. Cet excès d'eau a pour conséquence de limiter les performances finales des bétons ainsi confectionnés.

C-2) Sable artificiel:

Il provient, soit de la transformation thermique des roches (après cuisson), minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers on les obtient par broyage de roches dures (calcaire dure, quartzites...).

Ces matériaux sont intéressants, tant pour la confection de béton, que pour la confection de matériaux enrobés pour chaussés.

Il convient toutefois de maîtriser le pourcentage de fines parmi les variétés des sables artificiels on distingue:

- Sable de tuile ou de brique
- Sable de laitier de haut fourneau concassé.

**C-3) Sable à béton:**

Le sable est l'élément qui a sur le béton, selon ses qualités, une influence prépondérante. Il participe à la résistance et donne la cohésion au mélange, du mortier et du béton.

Le sable à béton doit être dense provenant des roches chimiquement inertes tels que: les calcaires durs, les granites, les porphyres et les quartzites, il ne doit pas contenir d'éléments nuisibles (matières organiques, argiles, sels solubles...etc.) pouvant porter préjudice à la durabilité du béton ou provoquer une corrosion des armatures.

**D) Caractérisation des fines:**

Les normes s'accordent pour définir comme fines les éléments passant à un tamis de maille de 80 microns. Pour désigner les éléments bruts de concassage inférieur à 80µm, un filler est dit siliceux s'il contient plus de 90% de silice, et calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans d'autre cas le filler est désigné par le nom de la roche d'origine. Le plus important c'est l'action de celle-ci qui est une action forte et complexe parcequ'elles dépendent de leurs dimensions et de leurs natures et elles peuvent être inertes ou actives.

**D-1) les fines inertes:**

Les fines sont par principe des fines de concassage qui adhèrent peu à la surface des grains de sable, ce qui permet de se débarrasser de l'excès par traitements tel que: la ventilation à l'air et ne donnant pas d'effets physico-chimiques nocifs. Du fait de leur finesse, elles auront naturellement pour effet d'accroître l'eau de mouillage de sable. Leur présence donc devrait conduire à un accroissement du rapport Eau/Ciment à maniabilité égale. Les fines de concassage surtout les fines calcaires améliorent la maniabilité à condition d'être en proportion limitée (optimum 6 à 15%) [6]. Elles contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons et s'opposent à la ségrégation. A un certain degré de finesse, elles ont aussi des effets physico-chimiques favorables tels que:

- Création de liaisons épi-taxiques. C'est-à-dire accolement continu par liaison à l'échelle des assemblages cristallins entre les réseaux des éléments du ciment et de la calcite.
- Activité pouzzolanique c'est-à-dire combinaison avec la chaux provenant du ciment avec certaines fines siliceuses.
- Dispersion de la pâte de ciment par des fines de même dimension avec création de germes cristallins ayant un effet d'accélération des réactions.

D-2) les fines actives:

Elles présentent des propriétés colloïdales. Leurs propriétés de surface sont dues non seulement à leurs petites dimensions mais aussi à leurs microstructures et leurs charges électriques.

D-3) les fines d'ajout (addition):

Les paramètres essentiels qui vont jouer la compacité des bétons sont:

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- L'énergie de mise en place.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple: les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros (10 à 20 mm): ceux -créent des macros vides que l'on peut remplir avec du sable, et les vides du sable par des fines.

Ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut aux fines pour obtenir la bonne compacité.

On distinguera les fines actives (laitier moulu, cendre volantes,...) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives,...) les fines actives apporteront un complément d'hydraulicité au mélange que n'amèneront pas les fines inertes; la distinction sera cependant difficile à établir dans certains cas: l'association de certains ciments par exemple avec des fines calcaires pourront conduire à un complément d'hydraulicité (formation de carbo-aluminate). Par ailleurs, si des fines actives sont acceptables, le gain en résistance pourra être fortement diminué.

À dosage constant en fines d'addition [7]:

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente
- Pour un rapport Eau/Ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

Une addition constituée uniquement de particules sphériques (Figure I-1) sera réductrice d'eau. Par contre des fines anguleuses (Figure I-2) nécessiteront d'avantage d'eau. On obtient donc une bonne maniabilité avec des valeurs du rapport eau /Ciment plus faibles avec des particules sphériques qu'avec des particules anguleuses.



**Figure I-1: Fines sphériques [7]**



**Figure I-2: fines anguleuses [7]**

De même certaines fines auront tendance à s'agglomérer (figure I-3) et de ce fait à absorber d'avantage d'eau: parfois également (cas de certaines cendres volantes) l'addition pourra contenir des éléments alvéolés (imbrulés par exemple) négligeables en poids mais constituant de véritables éponges en volume (figure I-4).



**Figure I-3: Agglomération des éléments les plus fins sur les éléments les plus gros conduisant à une surconsommation d'eau.[7]**



**Figure I-4: présence dans les fines d'éléments alvéolés avides d'eau. [7]**

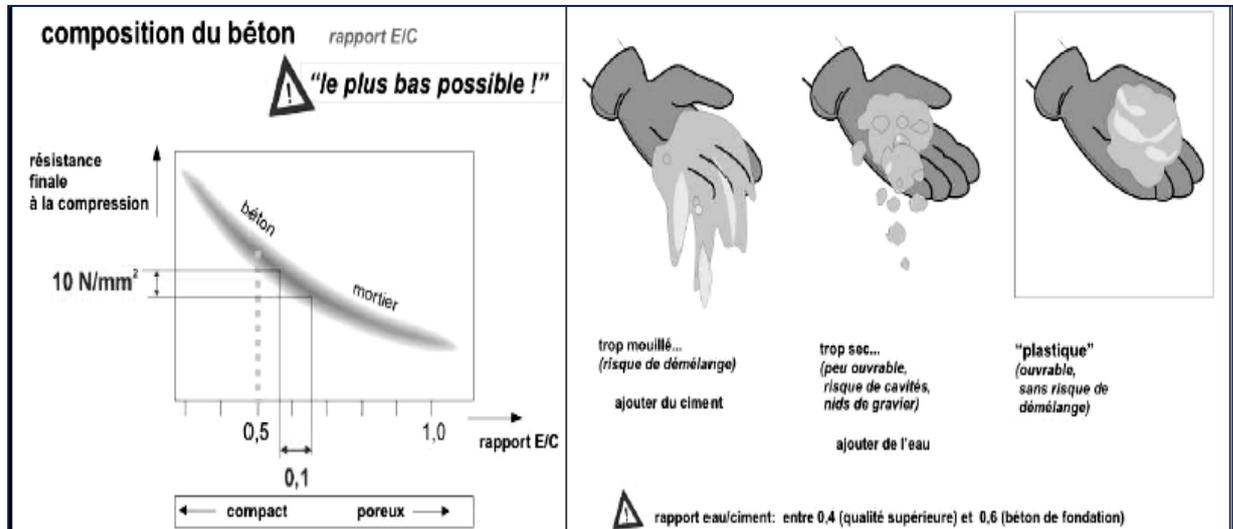
#### I.1.4. Eau et ciment :

L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton.[8]

En général, toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient défavorablement le durcissement (matières organiques telles que huiles, graisse, sucres...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...). [2]

Le rapport E/C (Eau/Ciment) est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité : résistance mécanique à la compression, durabilité.

Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation).



**Figure I.5 : Influence du rapport E/C sur la résistance finale à la compression. [2]**

### I-2 Rôle des différents éléments constituant le béton:

Ciment: réagit chimiquement avec l'eau et lie tous les ingrédients.

L'eau: hydrate le ciment et rend le mélange malléable.

Les granulats: forme une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va coller les granulats.

Le sable: il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

Les plastifiants: ils augmentent l'ouvrabilité du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton).

### I.3 Généralités sur le ciment hydraté :

Les ciments anhydres sont en général composés de clinker et de gypse auxquels on peut ajouter éventuellement des additions minérales telles que les fillers, les cendres volantes, les laitiers ou la fumée de silice pour améliorer leurs propriétés. Le clinker, riche en silicates et en aluminates de calcium, est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange intime d'argile ou de marne et de calcaire finement broyés.

L'ajout d'eau au mélange anhydre entraîne la formation d'une pâte de ciment, milieu poreux constitué de phases solides anhydres et hydratées et d'une solution interstitielle remplissant en partie les pores. [9]

Les quatre principaux constituants du clinker sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau I-3 : les principaux constituants du clinker [9]

Constituant du clinker	Minéraux	Abréviation	Pourcentage en masse du ciment
Le silicate tricalcique :	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	(C <sub>3</sub> S)	50 à 70 %
Le silicate bicalcique :	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	(C <sub>2</sub> S)	15 à 30 %
L'aluminate tricalcique :	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	(C <sub>3</sub> A)	5 à 10 %
L'aluminoferrite tétracalcique :	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$	(C <sub>4</sub> AF)	5 à 15 %

#### I-3-1 les constituants des ciments [NF EN 197-1] [9]:

Ils présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

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

#### I.3.2 Processus d'hydratation du ciment :

Le béton durci est produit à la suite de l'hydratation du ciment Portland qui réagit avec l'eau pour former des C.S.H (silicates de calcium hydratés). Les C.S.H (la pâte de ciment durcie) jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide, la pâte de ciment représente de 25 à 40% du volume du béton [9].

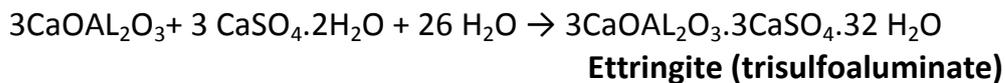


**b) Hydratation des aluminates :**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau ( $C_3A$ :  $3CaO \cdot Al_2O_3 + 6 H_2O \rightarrow 3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$  Aluminate de calcium hydraté). C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

**b.1 étape 1 : formation d'ettringite type AFT :**

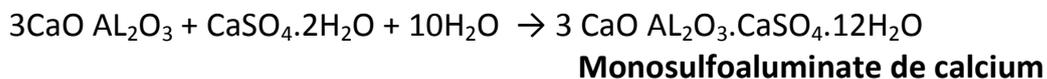
Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) :



Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

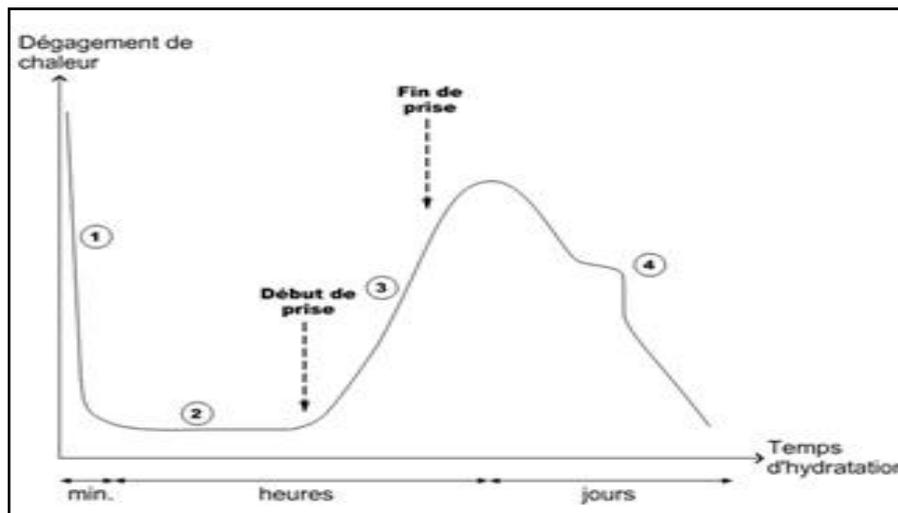
**b.2 Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté :**

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) ( $(CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4) \cdot 12H_2O$ ). Les réactions chimiques s'intensifient.

**b.3 Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels :**

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate ( $C_3A$ ) et l'aluminoferrite ( $C_4AF$ ) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du  $C_3A$ , l'aluminoferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

1.3.3 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland ; L'hydratation du ciment Portland implique la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de  $C_3S$ , c'est l'hydratation du  $C_3S$  qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions.



**Figure I-6: caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment d'après Vincent Waller, 2000.**

La Figure I.6 présente la courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment qui peut être découpée en quatre périodes :

Période 1 : réactions initiales :

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C3S et le C3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables) : les ions entrent en solution.

Période 2 : période dormante :

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

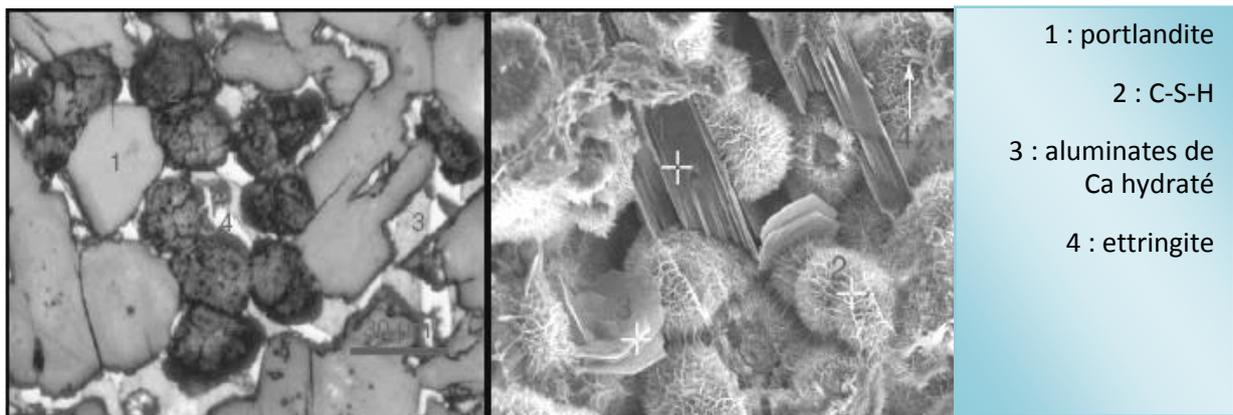
Période 3 : période d'accélération :

Cette période débute lorsque la concentration en ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

Période 4 : période de ralentissement :

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. La chaleur dégagée diminue.

Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFT se dissout afin de se transformer en type AFm.



**Figure I-7 : Matrice cimentaire « MEB » [3]**

I.4. Notion sur la Durabilité des bétons :I.4.1. Introduction:

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. On peut distinguer différentes agressions chimiques, physico-chimiques, mécaniques ou thermiques. L'aptitude des bétons à résister à ces agressions est caractérisée par plusieurs indicateurs de la durabilité (perméabilité à l'eau, perméabilité au gaz, diffusion des chlorures, carbonatation, porosité, résistance en compression, retrait des bétons,...), ces indicateurs de la durabilité correspondent à trois mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou de gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion.

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 [11].

L'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. Elle dépend des pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant.

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

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

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

Dans la suite de ce chapitre on s'intéressera à la résistance en compression, retrait, carbonatation, porosité accessible à l'eau.

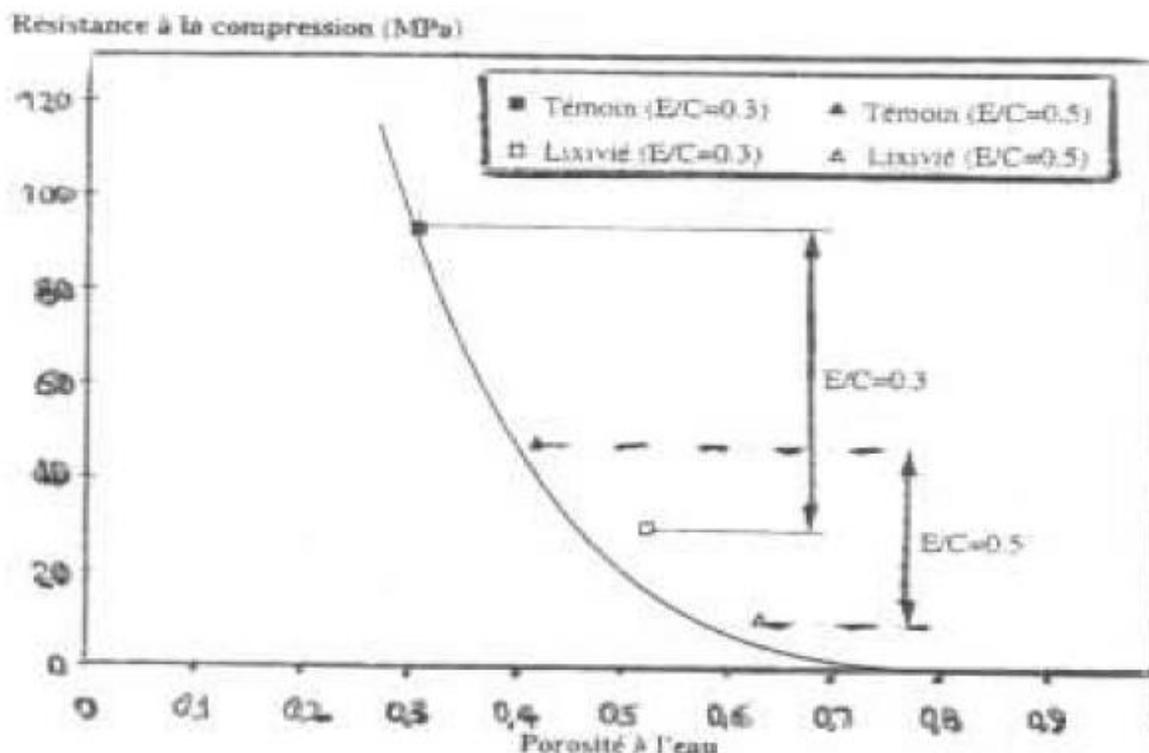
#### I.4.2. indicateur de la durabilité:

##### I.4.2.1. Résistance et retrait :

En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevé que le milieu est plus agressif. Cela signifie que l'exigence de durabilité peut parfois déterminer la résistance à prendre.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit cependant être complété par d'autres conditions, en effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables.

Une forte décroissance de la résistance mécanique est observée avec l'augmentation de la porosité. En génie civil, ceci est traduit par "l'obtention d'un béton très compact passe la réalisation d'un béton mécaniquement très résistant". Ces deux grandeurs sont intimement liées. la figure I-8 illustre cette liaison.



**Figure I-8: Évolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de la porosité pour des pâtes pures saines et dégradées [12]**

Influence des fines calcaires sur les caractéristiques d'un béton :

Des études ont été effectués par Y.BENACHOUR, S.KHERBACHE, F.LEKDIM et S.SAIDANI, D.BENYESSAD à pour but d'étudier l'influence des fines contenues dans les sables de concassage sur les caractéristiques mécaniques du béton. Des échantillons de béton et de mortier sont confectionnés à différents pourcentages de fines (0%, 5%,10%,15%,20%).

Les fines ayant servis ces études ont été récupérées par tamisage à sec des sables de différentes carrières comme indiqué dans le tableau suivant :

Carrières	étudier
ENG Constantine	Y. BENACHOUR
ENOF Adrar oufarnou et timezrit	S.KHERBACHE, F.LEKDIM et S.SAIDANI
SOMACOB AKbou	D.BENYESSAD

A) Résistance à la compression :

Selon Y.BENACHOUR, pour un pourcentage faible de fines la résistance est constante (jusqu'à 5%), au-delà de 5% jusqu'à 15% l'ajout de fines inertes paraît améliorer la résistance. Celle-ci augmente de 25% à 7 jours et 20% à 28 jours. L'optimum de résistance paraît se situer entre 10% à 15% de fines (figure I-9) (figure I-10).

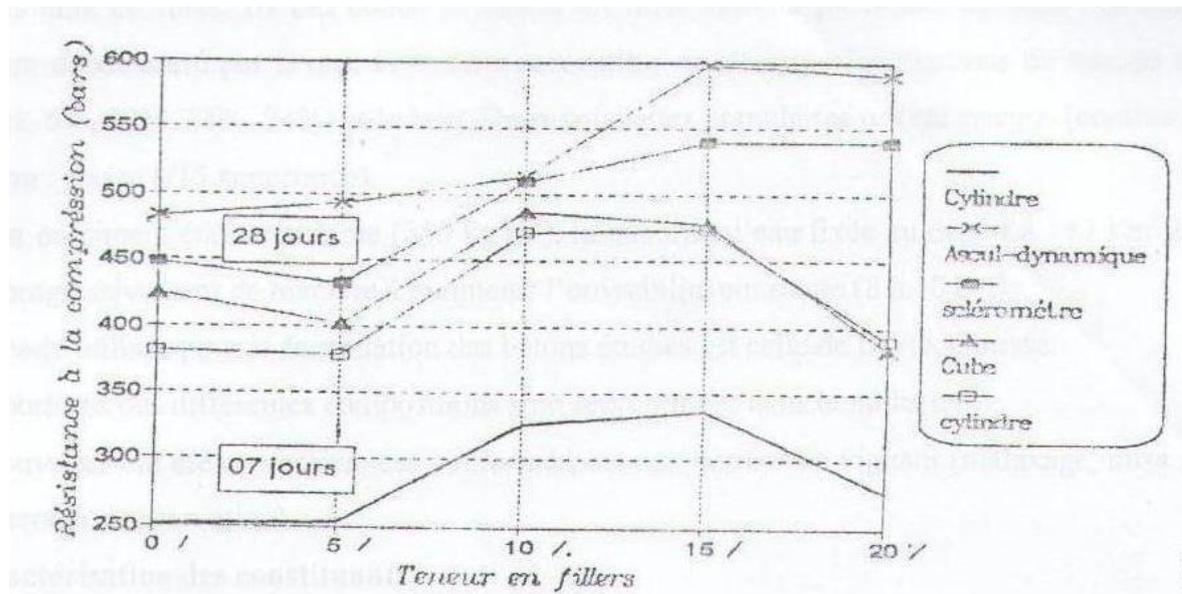


Figure I-9: Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines [13]

D'après S.KHERBACHE [14] et D.BENYESSAD [15] la résistance à la compression augmente en fonction du pourcentage de fines à un optimum de 10% (figures I-10, figure I-11).

L'augmentation de la résistance revient à l'augmentation de la compacité de béton (diminution de volume des vides provoquée par le dosage en fines); les constituants trouvant une grande facilité à réarranger d'une manière plus compact.

À 10% de fines le mélange est optimisé dans son squelette c'est - à- dire que les proportions des différents constituants sont en bon rapport, les vides existant sont occupés par les fines.

La diminution de la résistance est due au taux de fines élevés [14], qui joueront un rôle de fluidifiant [17], et devient défavorable car il accroît la demande d'eau.

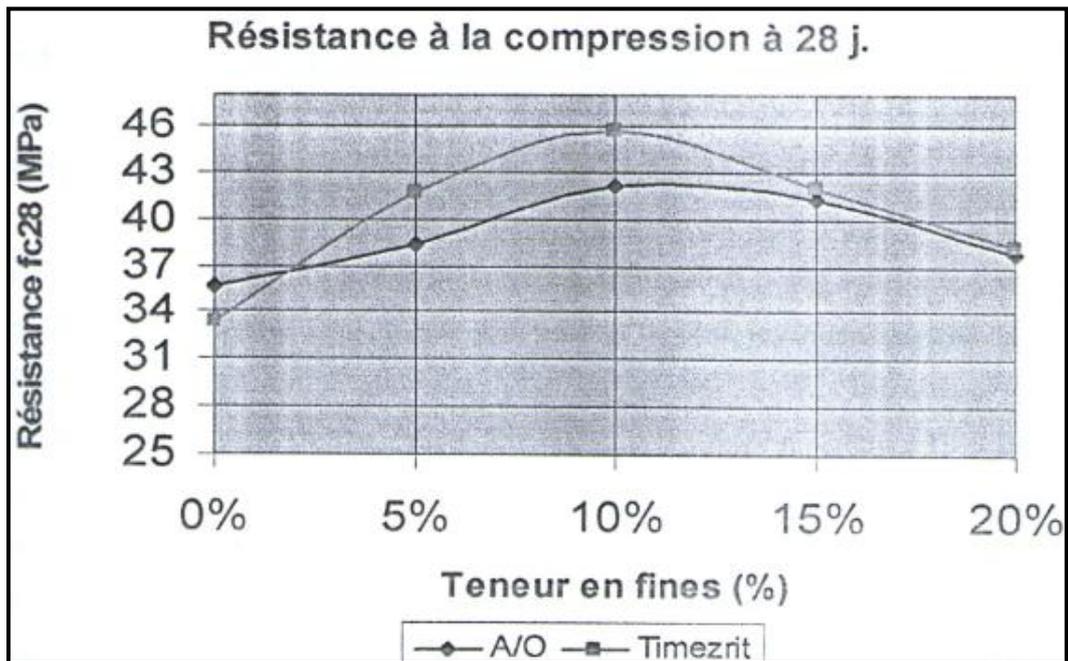


Figure I.10: résistance à la compression des bétons des deux carrières à 28 j.[14]

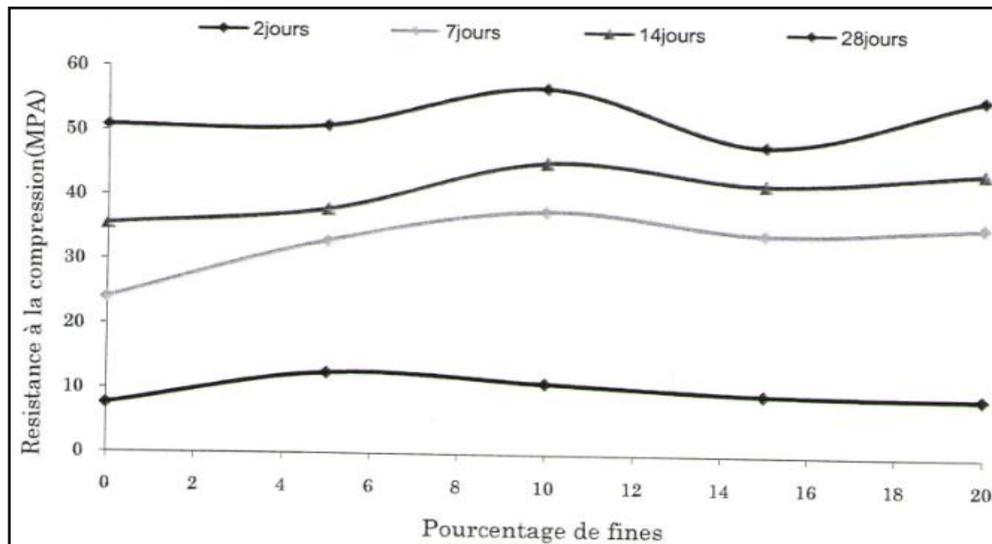


Figure I.11: Résistance en compression des mortiers en fonction de la teneur en fines.[15]

**B) Retrait :**

Lorsqu'on observe une pièce en béton, on constate qu'en l'absence de toute force extérieure, celle-ci change de volume (diminution) cette propriété est ce que l'on appelle le retrait.

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, le retrait est dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton.

Les résultats de S.KHERBACHE ont montré que le retrait croît proportionnellement avec l'ajout de fines jusqu'à 10%, puis il diminue en augmentant cet ajout (figure I-12), figure (I-13).

Alors les éprouvettes ayant subi une contraction maximale sont celles des mortiers dosés à 10% de fines. Ceci peut s'expliquer par le fait que le raffinement de la taille des pores capillaires a été provoqué par ce dosage en fines de 10%, où il engendre des enfoncements capillaires plus importants. Pour les dosages inférieurs à 10%, l'augmentation du retrait est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'hydratation du ciment et les fines non encore hydratées. Pour les dosages supérieurs à 10% les pores capillaires sont presque inexistantes sous l'effet des fines, et les retraits diminuent continuellement [14].

Par contre les résultats trouvés par D.BENYESSAD [15], F.LEKDIM et S.SAIDANI [16] ont montré que le retrait diminue avec le pourcentage de fines tout en passant par un minimum pour 10% de fines (figure I-14, figure I-15, I-16). Au delà de ce pourcentage les résultats s'inversent. Ceci peut s'expliquer par le fait que les éprouvettes de mortiers qui ont 10% de fines ont un nombre important de pores capillaires. Donc l'eau libre a plus d'avantage de s'évaporer. Pour un pourcentage de fines supérieur à 10%, l'augmentation de retrait est due au volume important de fines qui est responsable de l'absorption d'une grande quantité d'eau de gâchage par leurs grandes surfaces spécifiques qui sera libérée après durcissement de l'éprouvette donc une perte de poids qui correspond à une diminution de volume [15].

En conclusion les résultats trouvés par S.KHERBACHE et (D.BENYESSAD, F.LEKDIM) sont contradictoires, on peut expliquer cette contradiction par les conditions de laboratoire c'est-à-dire le retrait est lié aux conditions hygrométrie.

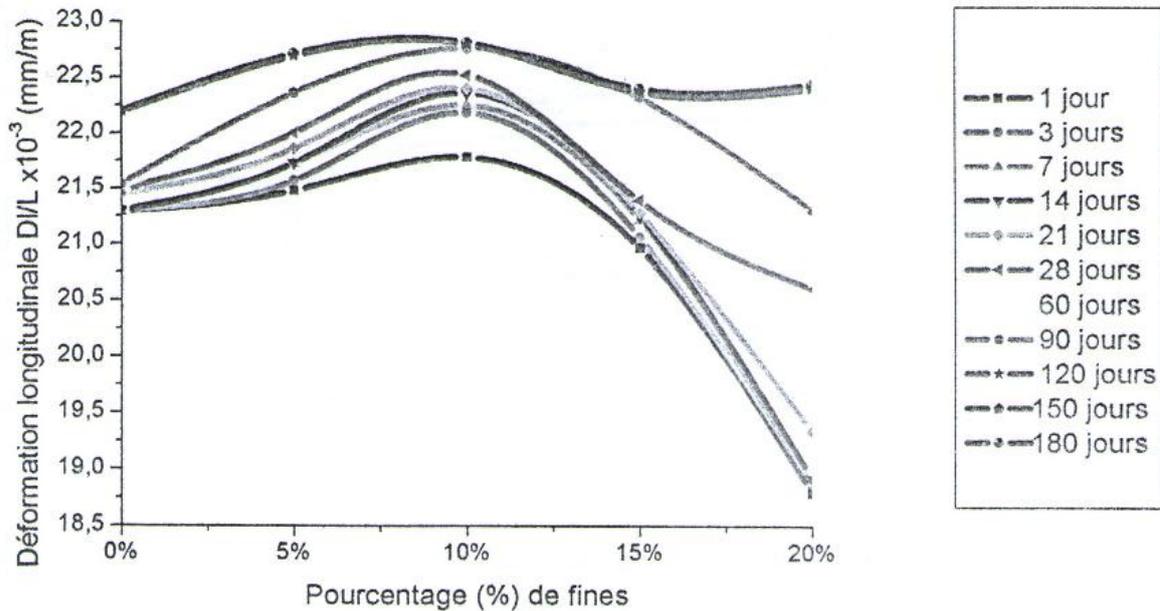


Figure I.12: Évolution du retrait des mortiers d'ENOF A/0 en fonction du pourcentage de fines à des temps différents. [14]

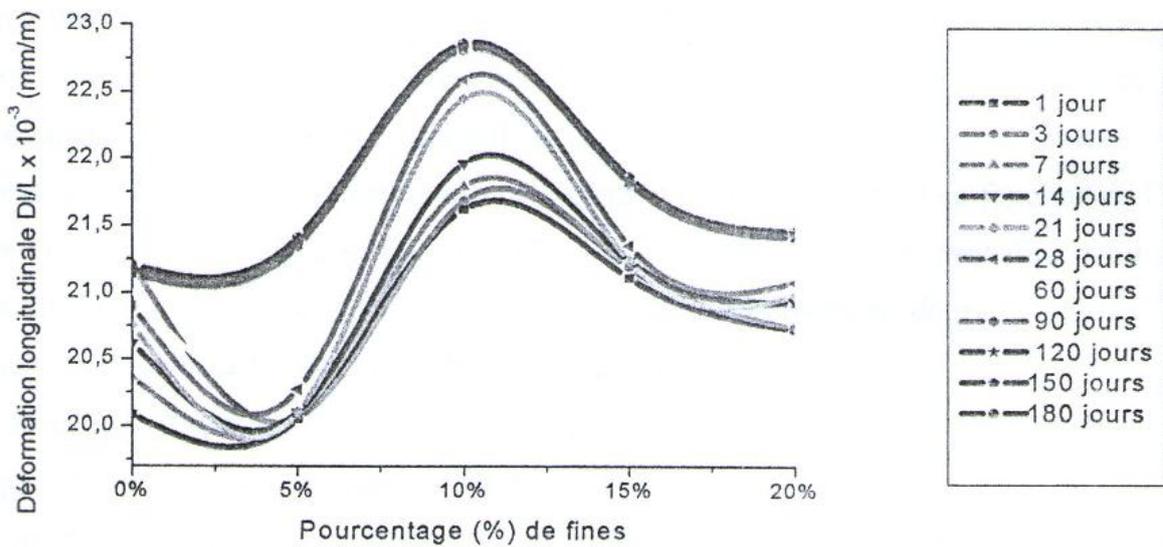


Figure I-13: Évolution du retrait des mortiers d'ENOF Timezrit en fonction du pourcentage de fines à des temps différents.[14]

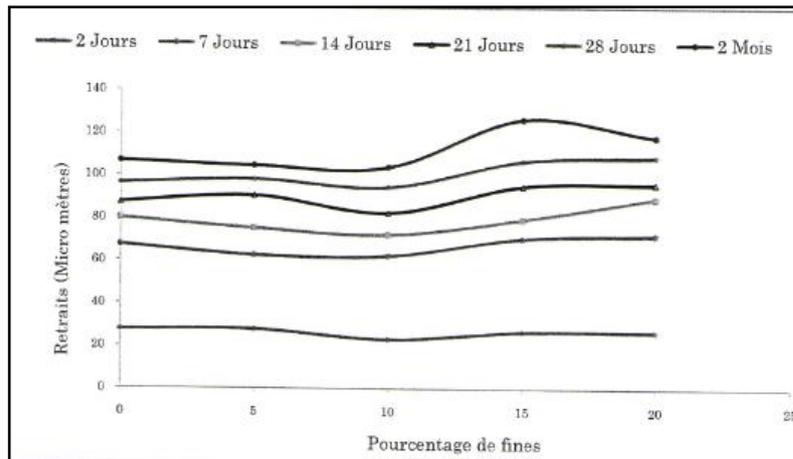


Figure I-14 : Évolution des retraits en fonction de la teneur en fines. [13]

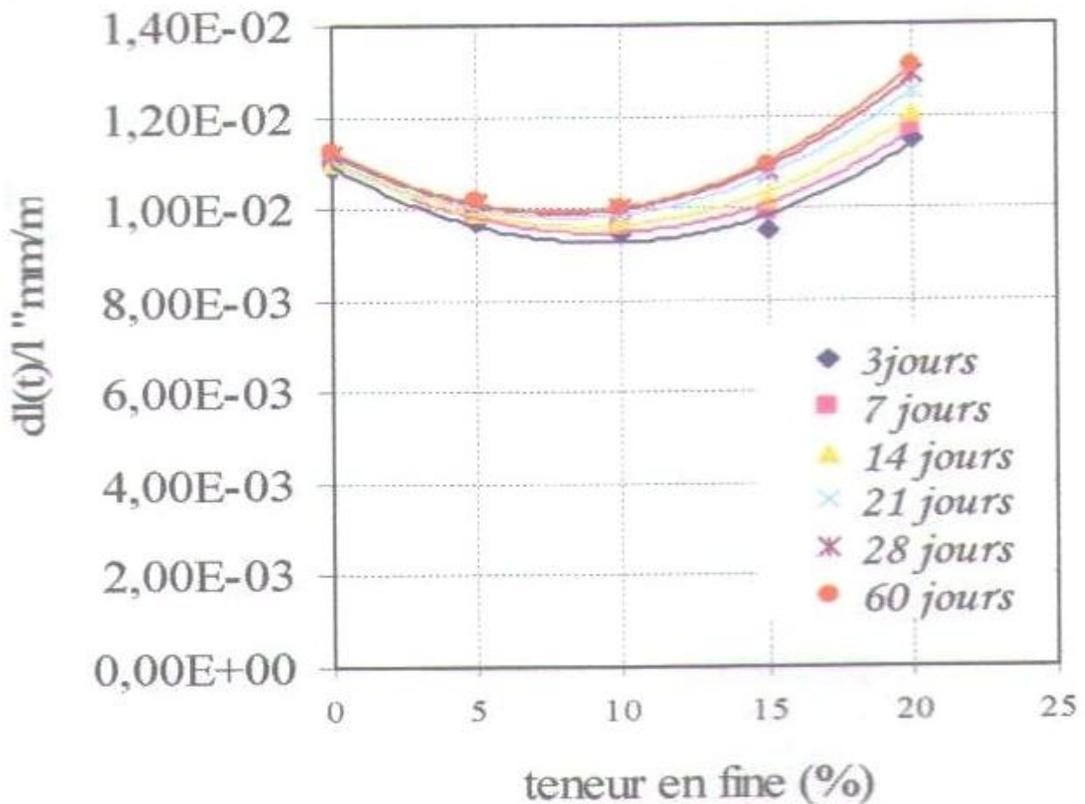


Figure I-15 : Évolution des retraits en fonction de la teneur en fines de la carrière Adrar oufarnou. [16]

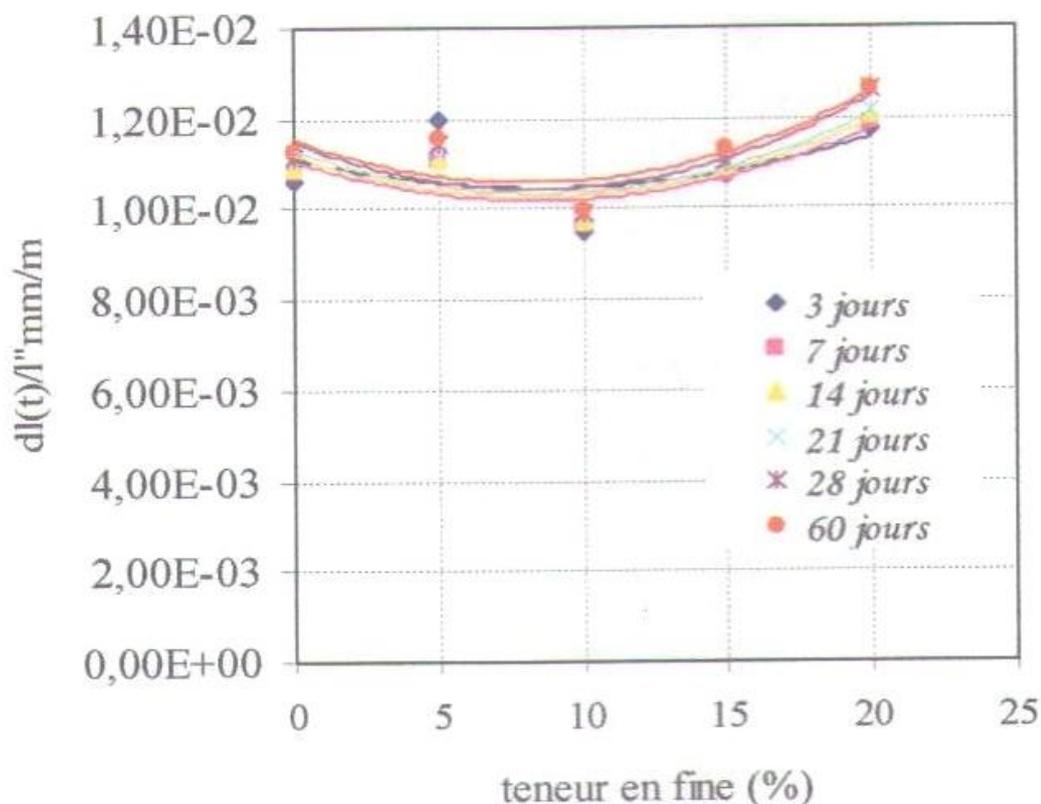


Figure I-16 : Évolution des retraits en fonction de la teneur en fines de la carrière Timezrit. [16]

#### I.4.2.2 : Carbonatation du béton:

Le béton étant un milieu globalement basique ( $\text{pH} > 13$ ), les altérations chimiques sont dues essentiellement aux actions extérieures des sels en présence d'eau. Dans la plupart des cas, elles agissent sur la pâte de ciment en entraînant soit la dissolution de certains hydrates (comme la portlandite), ce qui entraîne une perte d'alcalinité, soit la formation de composés nouveaux qui peuvent être expansifs. [18]

La pénétration des agents agressifs, jouent un rôle déterminant aussi bien sur la cinétique des réactions que sur l'intensité des dégradations.

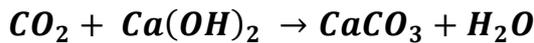
##### I.4.2.2.1 Action du gaz carbonique (carbonatation) :

Le béton, presque toujours en contact avec l'air ambiant, est soumis à l'action du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'air, naturellement de l'ordre de 0,03% à 0,05% en volume, varie avec la température, et le milieu environnant. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 0,1%; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de  $\text{CO}_2$ .

Ce gaz carbonique atmosphérique, inerte vis-à-vis des bétons à l'état gazeux, se dissout facilement dans l'eau pour donner une solution d'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ) susceptible d'altérer le béton [19].

**A) Mécanisme de la carbonatation :**

Le processus de carbonatation, qui correspond à la réaction du  $CO_2$  avec tous les hydrates du ciment et plus particulièrement avec la chaux hydratée, est généralement schématisé de la manière suivante:



**A-1 ) Réaction chimique:**

Le dioxyde de carbone dissout dans la solution interstitielle du béton peut réagir avec les produits d'hydratation du clinker que sont la portlandite  $Ca(OH)_2$  et les silicates de calcium hydratés, pour former du carbonate de calcium  $CaCO_3$ . La dégradation proviendrait essentiellement de la réaction avec la portlandite selon l'équation bilan suivante :



Il s'agit d'un bilan, mais plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes interviennent dans le processus de carbonatation. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du  $CO_2$  en phase aqueuse (2), des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates (3,4) et l'eau (5), la dissolution de la portlandite (6), et la précipitation du carbonate de calcium (7).



## A-2) Processus physiques :

Le dioxyde de carbone est dans l'air et pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures. Il se dissout alors dans l'eau présente dans le béton pour réagir avec la portlandite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), pour former du carbonate de calcium et libérer de l'eau.

L'eau libérée par la réaction entraîne une augmentation du taux de saturation. Or la vitesse de migration du dioxyde de carbone est beaucoup plus faible dans l'eau que dans l'air car le coefficient de diffusion du  $\text{CO}_2$  en phase aqueuse est  $10^4$  fois plus faible qu'en phase gazeuse globalement [20], cela se traduit par une diffusion plus faible du dioxyde de carbone dans le béton, et comme la portlandite devient de moins en moins accessible, raison de la formation du carbonate de calcium, la vitesse du front diminue donc au fur et à mesure de sa progression.

La carbonatation est bénéfique si l'on se place du point de vue de la résistance mécanique et des propriétés de transfert du béton (diminution de la perméabilité et la porosité) car la réaction se produit dans les pores et les capillaires avec une légère augmentation de volume (12%). Dans le cas des bétons armés, la réduction de la basicité du béton due à la réaction de la carbonatation ne permet plus la stabilité de la couche passive de l'acier et la corrosion peut s'amorcer. De même, les hydrates stables en milieu basique, comme les chloroaluminates et l'ettringite, sont susceptibles de voir leur stabilité déplacée, ce qui peut entraîner les modifications structurelles (suite à la libération de chlorures et de sulfates par exemple).

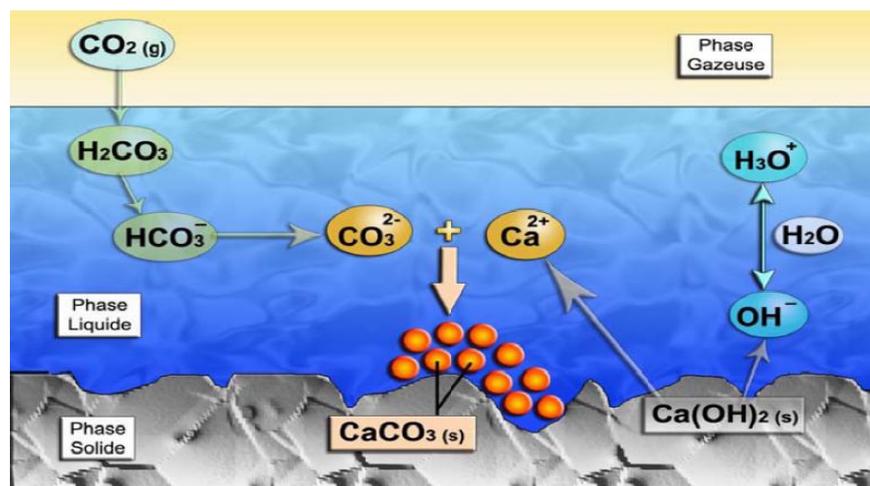


Figure I-17 : Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [19]

#### I.4.2.2 Aspects cristallographiques, morphologiques et chimiques des carbonates de calcium formés:

Les carbonates de calcium naturels se forment en général dans un milieu où le pH est de l'ordre de 9 et où ils sont surtout en quasi-équilibre avec la solution. La carbonatation dans les bétons suit une filière très différente, puisque la phase cimentaire hydratée constitue un système polyphasé, plus ou moins humide, constamment hors équilibre et où le pH est très élevé. De ces différences déroulent des processus de formation des carbonates de calcium distincts sur les plans cristallographiques et morphologiques. Différentes phases cristallines de carbonates de calcium sont identifiées dans les matériaux cimentaires carbonatés: la calcite, la vatérite et l'aragonite. Ces trois formes ont bien la même formule chimique  $\text{CaCO}_3$ , mais elles sont distinctes sur le plan cristallographique: la calcite est rhomboédrique, l'aragonite orthorhombique et la vatérite hexagonale. De plus, la morphologie des précipités est très différente: les précipités de calcite s'apparentent à des macrocristaux cubiques dont la taille est de l'ordre du micromètre. Tandis que les précipités de vatérite et d'aragonite sont des microcristaux de taille plus petite et de forme plutôt sphérique [21] [22].

#### I.4.2.2.3 Corrosion des armatures liées à la carbonatation:

La carbonatation de la matrice cimentaire diminue le pH de la phase aqueuse des pores du béton qui n'offre alors plus de protection à l'acier.

##### **A) Corrosion des armatures du béton armé:**

La solution dans les pores du béton est une solution alcaline qui a un pH proche de 13. Pour les structures exposées à l'air dans des conditions normales. Les mesures de potentiel électrique des armatures donnent généralement des valeurs variant entre -0,2 V et 0,1 V [19]. dans un tel milieu, l'acier est passivé. Or La carbonatation du béton entraîne une baisse du PH à une valeur d'environ 9. Dans ce milieu, L'armature voit alors son potentiel électrique chuter vers les valeurs négatives. Elle se retrouve dans une zone de corrosion. La pathologie qui apparaît et une corrosion généralisée se traduisant par une diminution progressive de la section des armatures. De plus, La formation de rouille expansive exerce une pression sur le béton entourant l'armature, Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.

La présence d'eau est très importante pour la corrosion car elle diminue la résistance électrique. Ainsi, la corrosion est essentiellement un problème pour les bétons humides, mais non saturés d'eau puisque la vitesse de diffusion de l'oxygène devient comparativement nulle dans l'eau par rapport à celle dans l'air. L'estimation générale de la vitesse de corrosion est maximale pour une humidité relative proche de 95% [23].

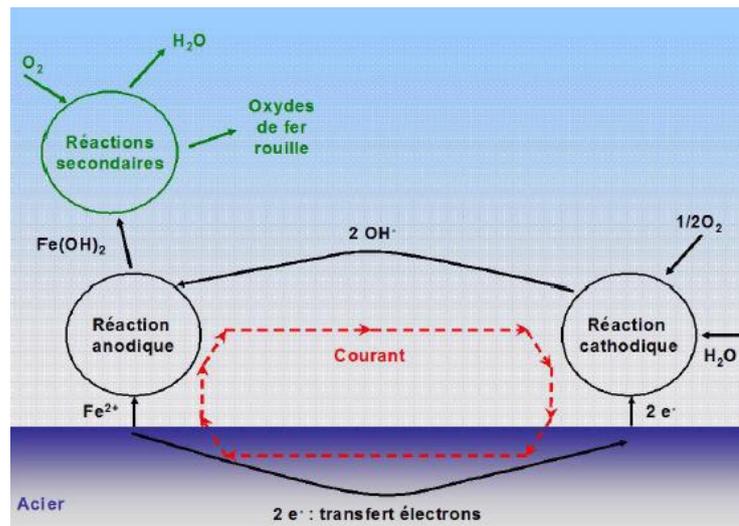


Figure I-18: Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers. [24]

### B) les étapes de la corrosion des armatures :

La corrosion avec formation de rouille dans les bétons armés comporte deux phases :

1. Les éléments agressifs, tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ou les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton. C'est le stade d'incubation.
2. La seconde phase est celle dite de propagation qui commence lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

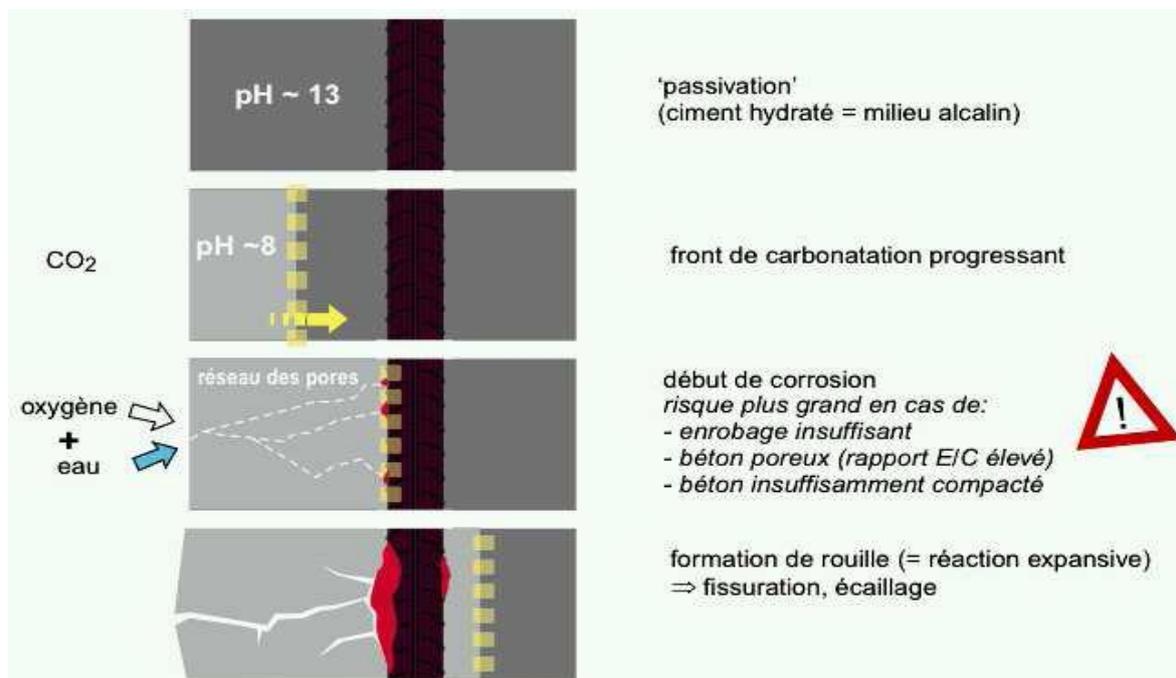


Figure I-19 : Représentation schématique des étapes de corrosion des armatures du béton causé par CO<sub>2</sub>. [2]

#### I.4.2.2.4 Profondeur de la carbonatation:

Du point de vue de la corrosion liée à la carbonatation, la vie de service d'une structure armée est subdivisée en une période d'initiation et une période de propagation de la corrosion. Il est indispensable de pouvoir estimer l'état de progression de la carbonatation dans la couche de béton d'enrobage, afin de savoir si le premier lit d'armatures est en danger ou d'estimer quand il sera. La profondeur de carbonatation est mesurée au moyen d'un indicateur de PH, la phénolphthaléine, dont le pH de virage se situe autour de 9. Le béton non carbonaté se colore en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur. M. Hamada [25] montre que la corrosion peut être initiée pour un PH compris entre 10 et 11.

Le dioxyde de carbone pénètre au-delà de la profondeur de carbonatation détectée par projection de phénolphthaléine et peut avoir déjà induit une chute de PH suffisante pour qu'il y ait corrosion des aciers [19].

#### I.4.2.2.5 Retrait de carbonatation:

Au niveau des modifications de la texture poreuse, la réaction de carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation du volume de la phase solide. À première vue, cette réaction induit un retrait et non un gonflement.

T.C.Powers [26] indique que les cristaux de portlandite commencent par se dissoudre dans l'eau, puis sous l'effet de gradient hydrauliques et diffusifs, les ions  $\text{Ca}^{2+}$  peuvent migrer vers les espaces vides partiellement désaturés du milieu poreux. C'est dans ces vides que les ions calcium pourront former des carbonates de calcium dont l'expansion s'effectue librement sans exercer de contraintes dans la pâte. Les contraintes, initialement imposée sur les cristaux de portlandite, se trouvent libérées et la compressibilité de la pâte de ciment hydraté est augmenté. Donc c'est le réaménagement de la microstructure qui occasionne du retrait [26].

La diminution de la quantité d'eau chimiquement liée aux C-S-H est aussi avancée comme cause de retrait. Ainsi, selon Swenson et Sereda [27], le retrait de carbonatation ne serait pas uniquement dû à la carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , mais s'expliquerait également par la déshydratation et par la polymérisation du gel de silice formé après carbonatation des C-S-H qui pourrait conduire au retrait de carbonatation du matériau.

Enfin, le retrait de carbonatation correspondrait à une forme de retrait de dessiccation associé à la production d'eau par carbonatation. Swenson et Sereda [27], signalent que le transfert de l'eau libérée est freiné par la présence d'une gangue de  $\text{CaCO}_3$  autour des cristaux de portlandite; ce qui crée un gradient hydraulique de teneur en eau à travers la couche de carbonates entre l'interface  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   $\text{CaCO}_3$  et les pores où l'humidité est plus facilement évacuée. Ce gradient hydrique serait suffisant pour occasionner la fissuration de la gangue de carbonatation de calcium et du retrait.

#### 1.4.2.2.6 Paramètres influençant la carbonatation:

Les paramètres qui sont prépondérants dans le mécanisme de carbonatation sont liés à l'accessibilité au dioxyde de carbone (point de vue physique) et à la quantité de matière carbonatable (point de vue chimique).

##### A) Paramètre de formulation:

De nombreuses recherches ont été réalisées pour connaître l'influence du E/C sur la vitesse de la carbonatation; citons Vénuat et Alexandre [28] qui illustrent notamment que la progression de la carbonatation dans des bétons de ciment CEM I est facilitée quand de E/C augmente. Loo et al [29], ont étudié aussi l'influence de la teneur en ciment sur la carbonatation et ont établi que l'effet du dosage en ciment est insignifiant comparativement à celui du E/C [29].

D'un point de vue chimique, les additions minérales conduisent à des matériaux à faible teneur en portlandite. Il résulte d'une plus petite quantité de  $\text{CO}_2$  nécessaire pour consommer toute la portlandite, de sorte que le pH chute plus facilement. D'un point de vue physique, il existe un autre effet, à savoir l'obtention d'une pâte de ciment hydraté moins connectée et éventuellement plus dense, ce qui abaisse le coefficient de diffusion du  $\text{CO}_2$ .

**B) Résistance mécanique à la compression:**

Il a souvent été considéré qu'il était possible de corrélérer la profondeur de carbonatation à la résistance mécanique à la compression du béton. Cette affirmation est une simplification grossière. En effet, l'approche selon laquelle durabilité et résistance sont liées positivement est discutable [30]. Les changements de propriétés des ciments (la finesse et la teneur en  $C_3S$  plus élevées, l'utilisation d'additions minérales, etc.) et l'ajout d'adjuvants font que les nouveaux ciments peuvent obtenir la même résistance mécanique qu'auparavant avec un E/C plus élevé est une durabilité réduite d'un point de vue chimique [19].

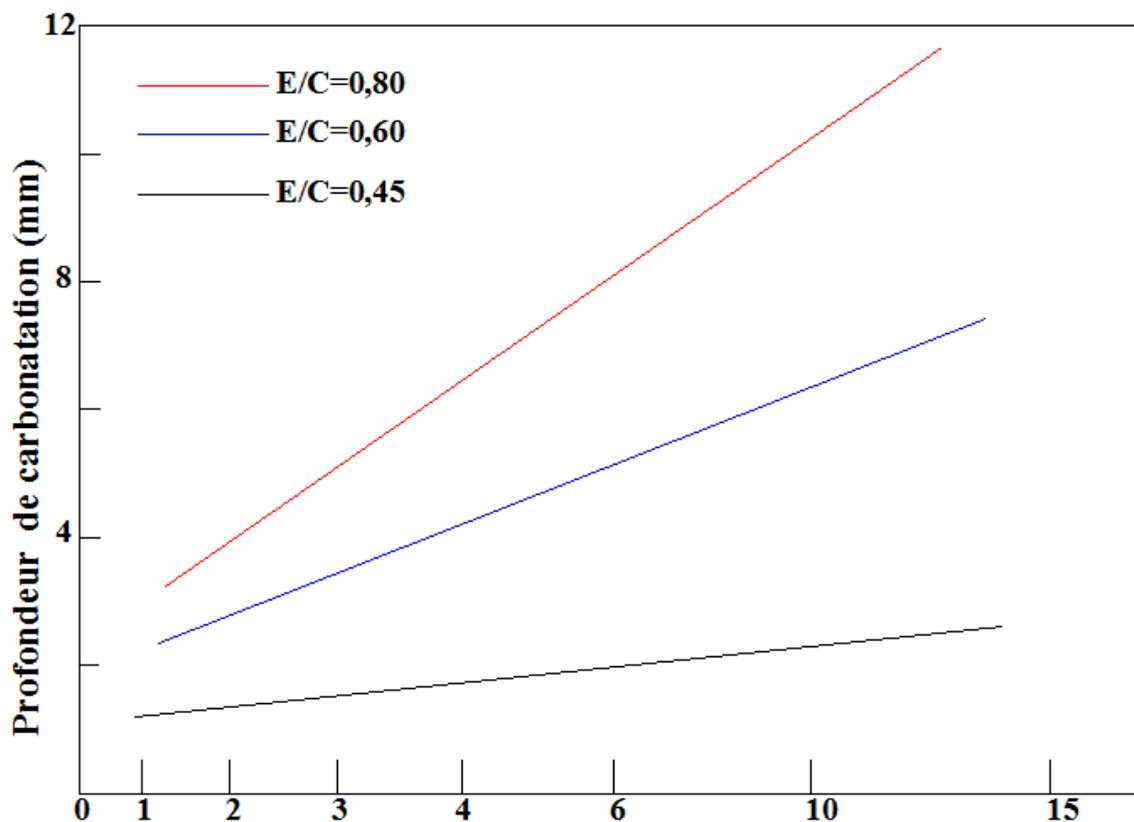


Figure I.20: Profondeur carbonatée en fonction de la racine du temps [31]

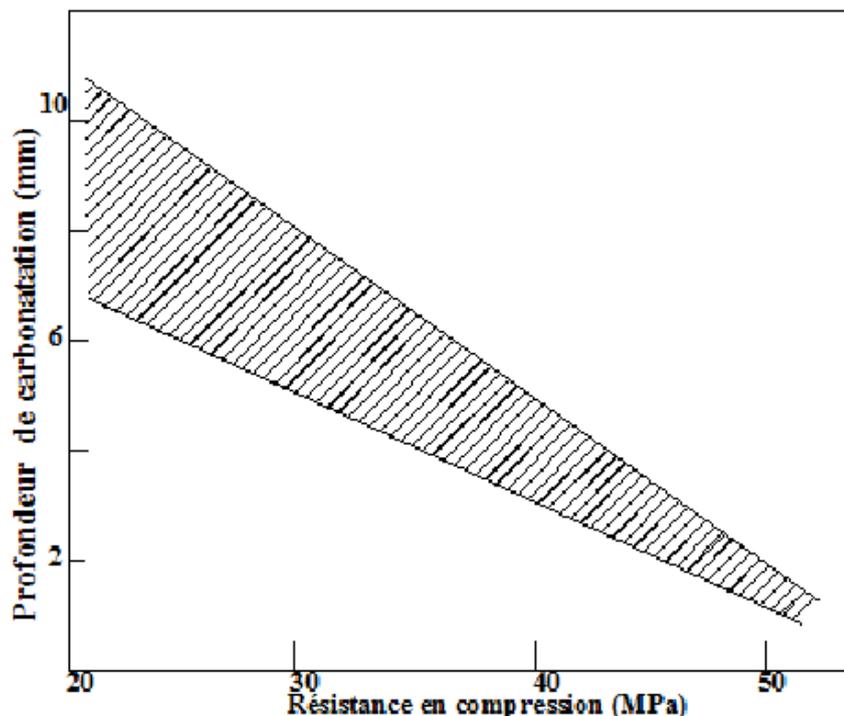


Figure I.21: Influence de la résistance en compression à 28 jours sur la profondeur carbonatée avec différents ciments et différentes expositions.[31]

### C) Cure des bétons et effets de parois [19]:

Les caractéristiques d'un béton durci dépendent grandement des conditions de conservation qui déterminent, dans une large mesure, les réactions d'hydratation et la porosité du matériau. Lorsque le durcissement d'un béton s'effectue dans l'eau, on observe une réduction progressive de la porosité. Après démoulage ou décoffrage et en l'absence de cure, le béton d'enrobage proche de la surface perd rapidement son eau par dessiccation et l'hydratation de cette couche est limitée. Le degré d'hydratation de cette couche est limité. Le degré d'hydratation est alors plus faible et la porosité plus élevée, ce qui facilite la carbonatation de cette zone.

En outre, durant la mise en place du béton, une partie des granulats vient s'immobiliser contre les parois du coffrage et, au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher plus près des parois du coffrage que de leur rayon. Le volume occupé par le vide entre les gros granulats est donc plus important que dans le béton de masse.

Ce phénomène conditionne en partie la microstructure du béton de peau qui est plus riche en particules fines et en pâte de ciment. Cette zone est plus poreuse, ce qui contribue à faciliter la pénétration du dioxyde de carbone [32], mais est aussi

plus riche en hydrates, ce qui tend à ralentir la progression de la carbonatation et permet de maintenir un PH élevé plus longtemps. Cette deuxième caractéristique chimique est bien sûr à nuancer si la cure hydrique est insuffisante.

#### I-4-2-3 : Porosité :

##### I-4-2-3-1 : porosité interne du béton :

La porosité du béton gouverne de nombreuses propriétés du béton :

- Presque toutes les caractéristiques mécaniques ;
- Toutes les perméabilités (eau, ions, gaz)
- Durabilité.

La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide (figure I-22).

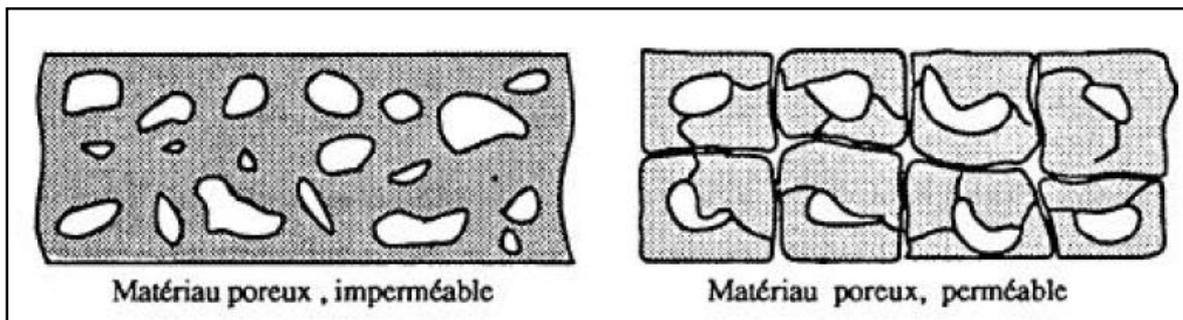


Figure I-22 : représentation du matériau poreux imperméable et perméable

Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue (figure I.23).

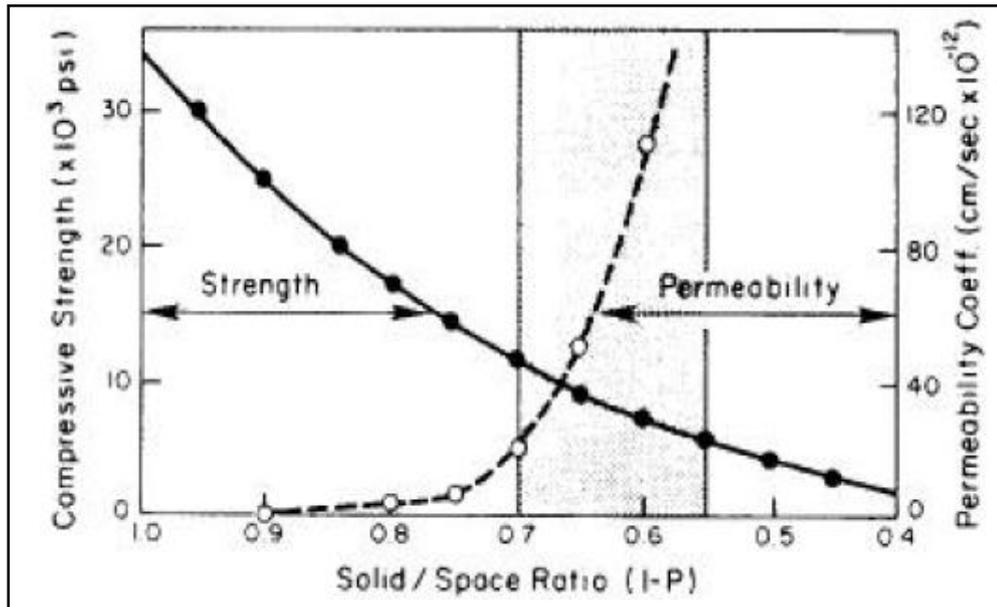


Figure I-23 : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. [33]

La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vides dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'angstrom (Å). Les plus petits vides du béton sont donc 1 million de fois plus petits que les plus gros.

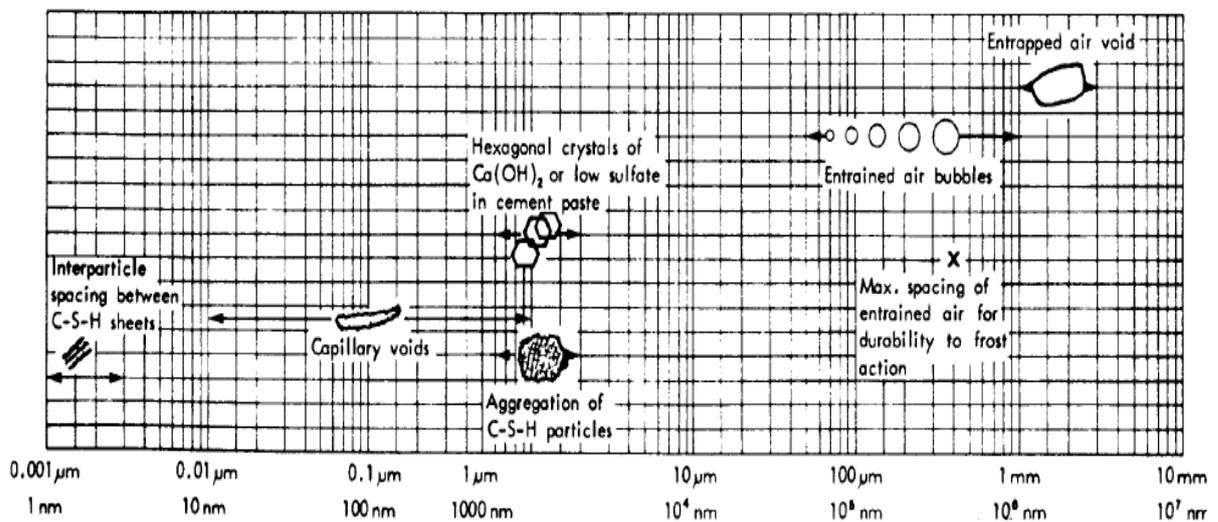


Figure I-24 : échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté. [33]

## I-4-2-3-2 : interface pâte – granulat :

Pour un même rapport E/C, la perméabilité à l'eau du mortier ou du béton est généralement supérieure à celle de la pâte en raison de la zone d'interface pâte-granulats (figure I-25).

La zone d'interface pâte-granulat 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 microfissure cette zone offre donc un chemin préférentiel par le passage de l'eau, de gaz ou des ions.

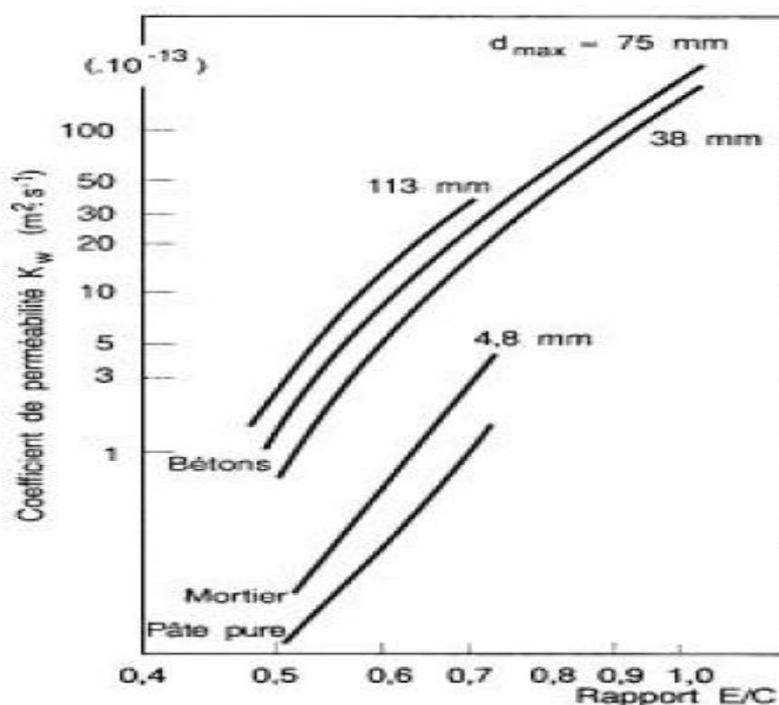


Figure I-25 : Influence du E/C et de la taille maximale des granules sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons [33].

# **CHAPITRE II**

## **CARACTERISATION DES MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS**

### CHAPITRE II :

#### Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux et la formulation des bétons utilisés pour la confection des éprouvettes à étudier qui sera présenté dans le chapitre III. Il est subdivisé en deux parties, la première concerne la caractérisation des matériaux tels-que : ciment et granulats issus de la carrière SOMACOB D'akbou, la seconde concerne la formulation des bétons avec la méthode DREUX GORISSE. Dans les deux parties sont présentées les méthodes normalisées utilisées dans ce travail.

#### II-1 Origine des matériaux :

II-1-1 ciment : le ciment utilisé est de type : CPJ-CEM II/B 42,5

II-1-2 les sables : Deux types de sables sont utilisés :

- a) Sable d'oued Soummam
- b) Sable concassé de fraction 0/3 provenant de la carrière SOMACOB AKBOU

II-1-3 Grapiers : Deux classes granulaires sont employées dans ce présent travail, la fraction 3/8 et la fraction 8/15, provenant de la carrière SOMACOB Akbou.

II-1-4 Eau de gâchage : l'eau utilisée pour le béton est l'eau potable qui est réputée conforme à la norme XP-P 18-303

#### II-2 Prélèvement des matériaux :

Dans ce travail le prélèvement des matériaux est réalisé sur stock

##### II-2-1 Prélèvement sur stock [NF P 18-551] :

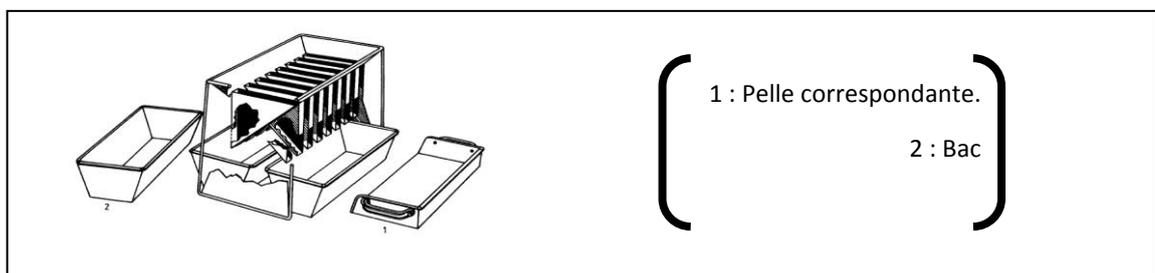
Afin d'avoir un échantillon représentatif, des prélèvements de taille sensiblement égaux doivent être effectués en différents points à différentes hauteurs ou profondeurs sur l'ensemble du stock. Les prélèvements sont faits à la pelle.

##### II-2-2 Prélèvement en laboratoire [NF P 18-553] :

La préparation des échantillons pour essai ou prise d'essai peut s'effectuer de deux manières différentes :

- Par quartage ou fonctionnement manuel d'une quantité de matériau. Cette méthode est utilisée lorsque l'on dispose de quantités de matériau importantes,
- Au moyen de diviseurs " échantillonneurs", appareils séparant en parties égales une quantité de matériau déterminée.

Dans notre travail La préparation est réalisée au moyen de diviseur (figure II-1) avec le matériau légèrement humide pour éviter la perte d'éléments fins.



**Figure II-1. Diviseur échantillonneur à couloirs**

### II-3 : Analyse minéralogique des matériaux :

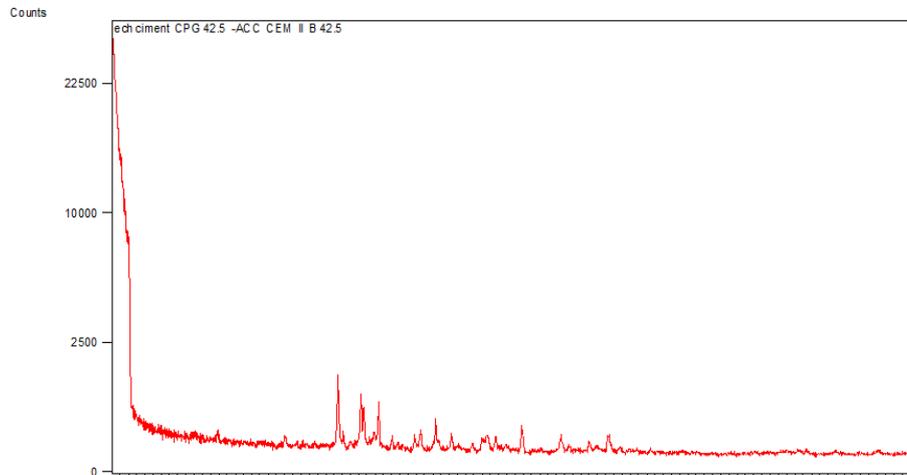
L'analyse minéralogique des matériaux utilisés, réduits en poudre, est faite selon la méthode de diffraction des rayons X. Cette méthode permet de définir les différentes phases cristallines composant le matériau. Chaque minérale possède un spectre caractéristique de diffraction des rayons X, en fonction de l'incidence  $2\theta$  de la source des rayons X sur leurs plans cristallins.

La composition minéralogique des échantillons est donnée grâce à une analyse sur les échantillons suivants :

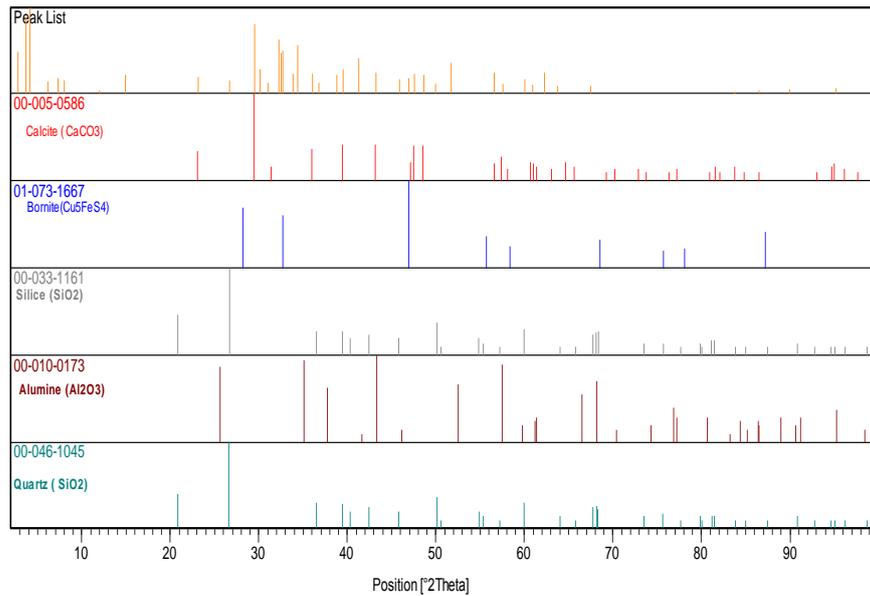
- Gravier 3/8, gravier 8/15, Sable de carrière, Sable d'oued broyé à une dimension inférieur à  $100\mu\text{m}$
- Ciment CEM II 42,5 B ;
- Fines récupérées par tamisage à sec sous un tamis  $80\mu\text{m}$  d'un sable de carrière

Les diffractogrammes RX ainsi que leurs identifications pour ces échantillons sont rapportées dans les tableaux représentés dans les annexes (II-1, II-2, II-3, II-4, II-5) et par les figures suivantes :

**II-3-1 Analyse du ciment CPJ 42,5 CEM II :**



**Figure II-2 : Spectre de la DRX du ciment CPJ 42,5 CEM II B 42,5**



**Figure II.3 : Paternes d'identification du ciment CPJ 42,5 CEM II B42,**

II-3-2 Analyse des granulats :

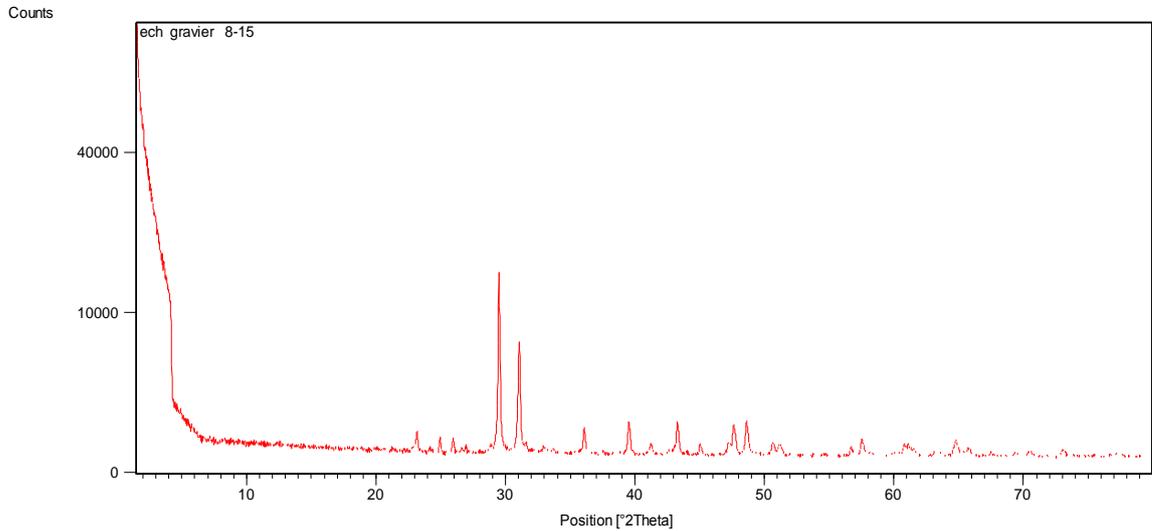


Figure II.4 : spectre de la DRX du gravier 8/15

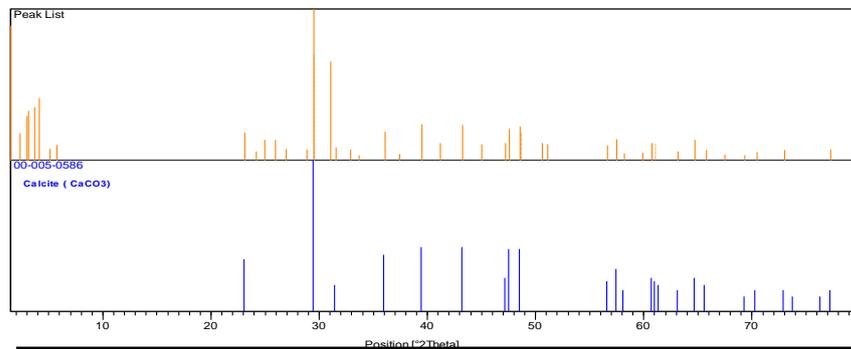
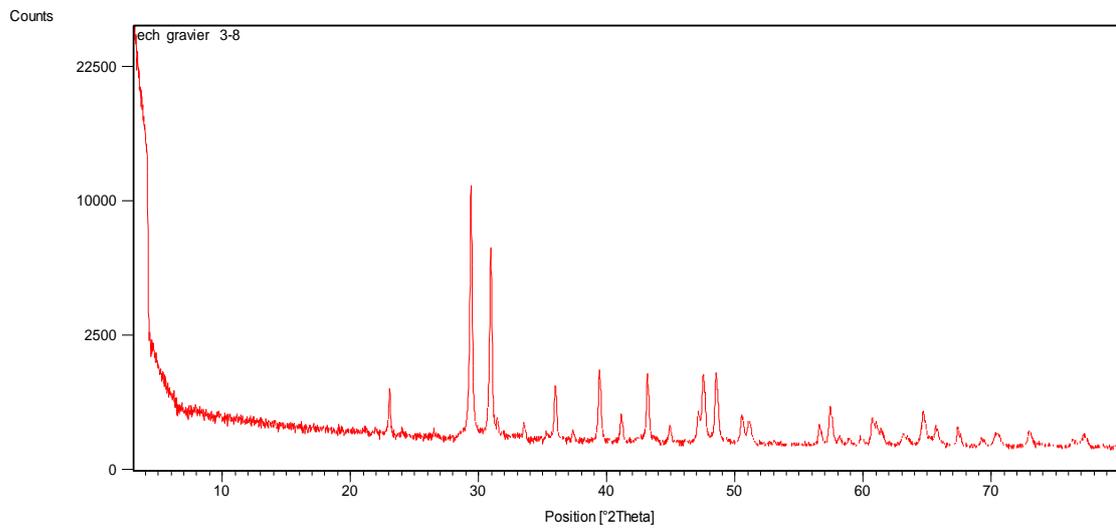
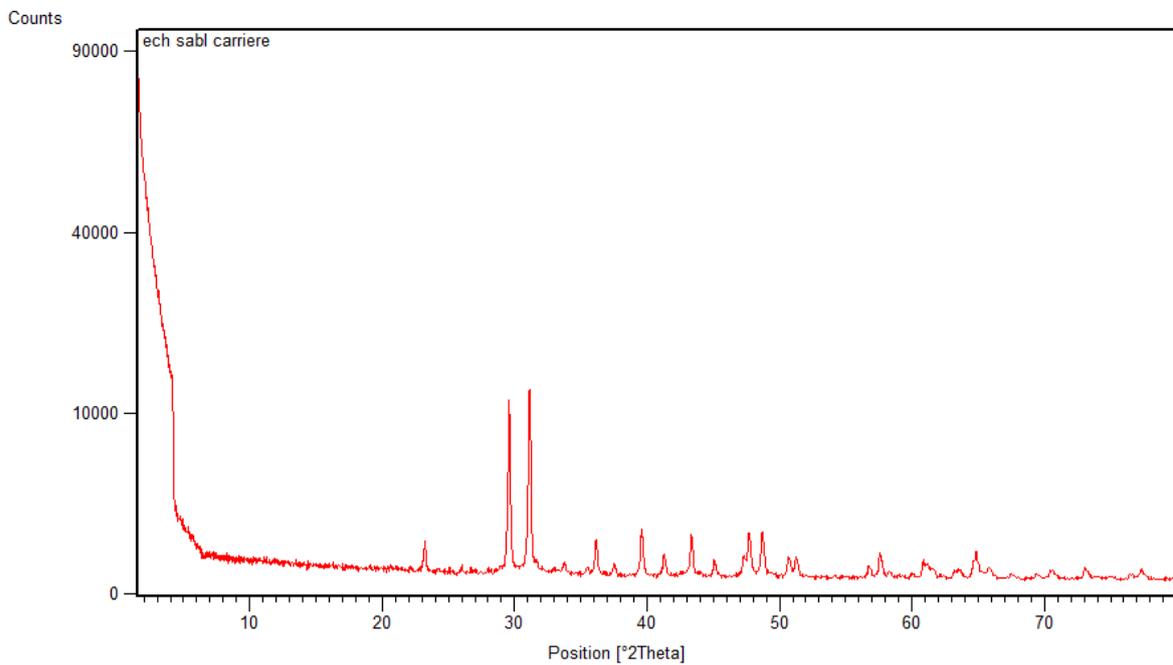


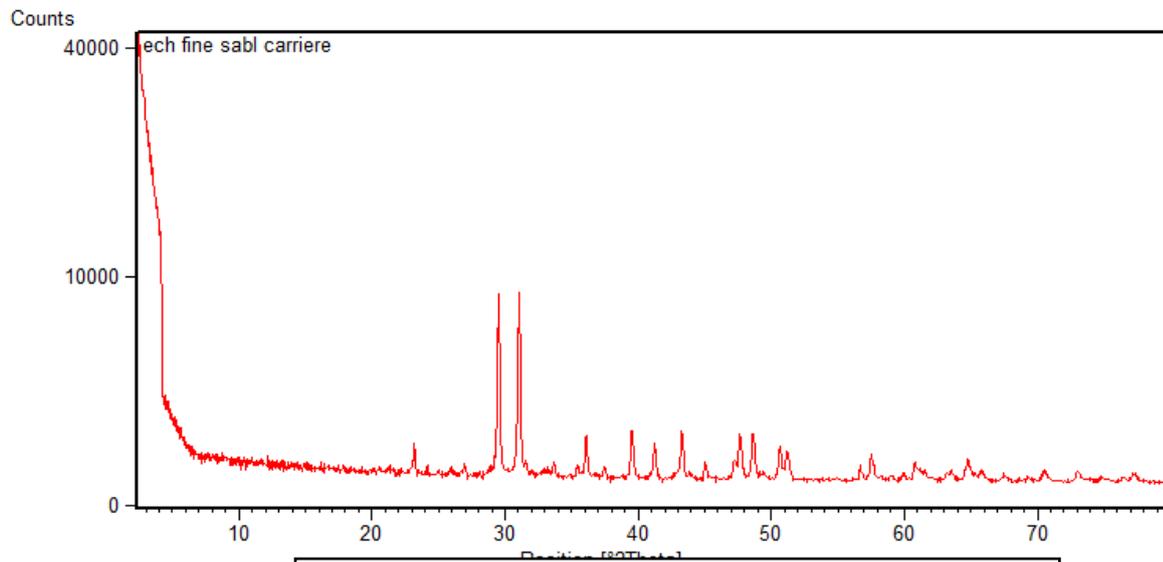
Figure II-5 : Paternes d'identification du gravier 8/15



**Figure II-6 : Spectre de la DRX du gravier 3/8**



**Figure II-7 : spectre de la DRX du sable de carrière 0/3**



**Figure II-8 : spectre de la DRX des fines de sables**

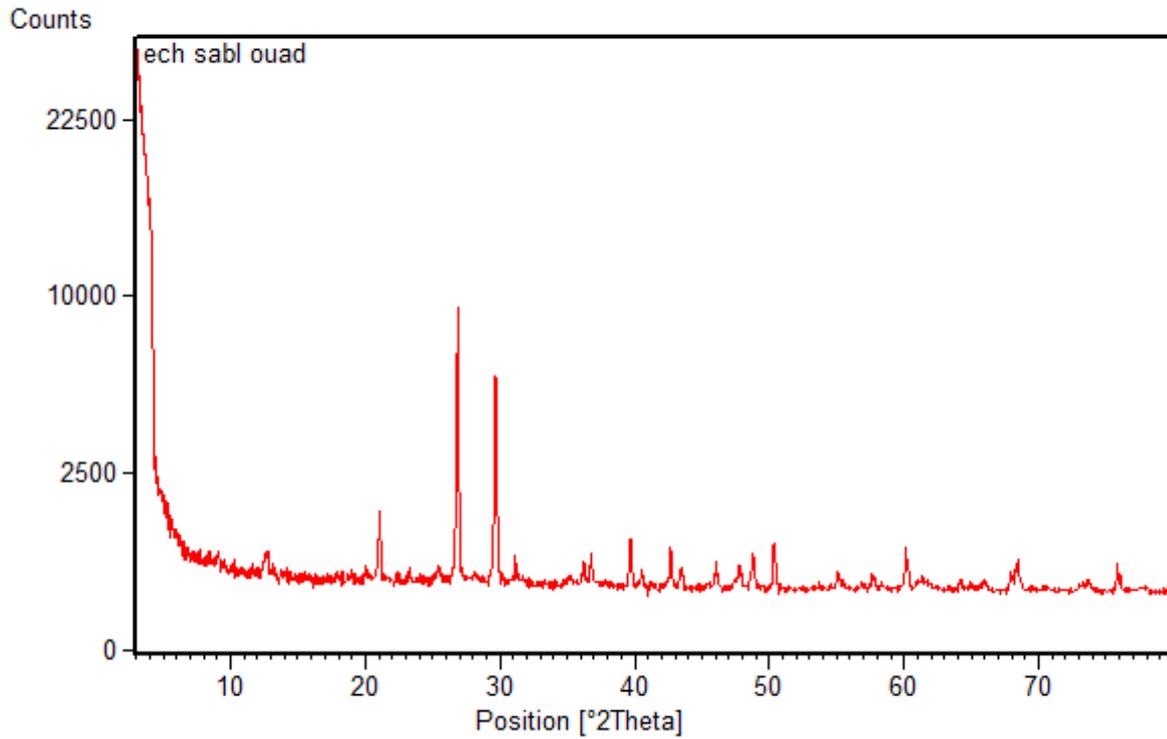


Figure II-9 : spectre de la DRX du Sable d'oued

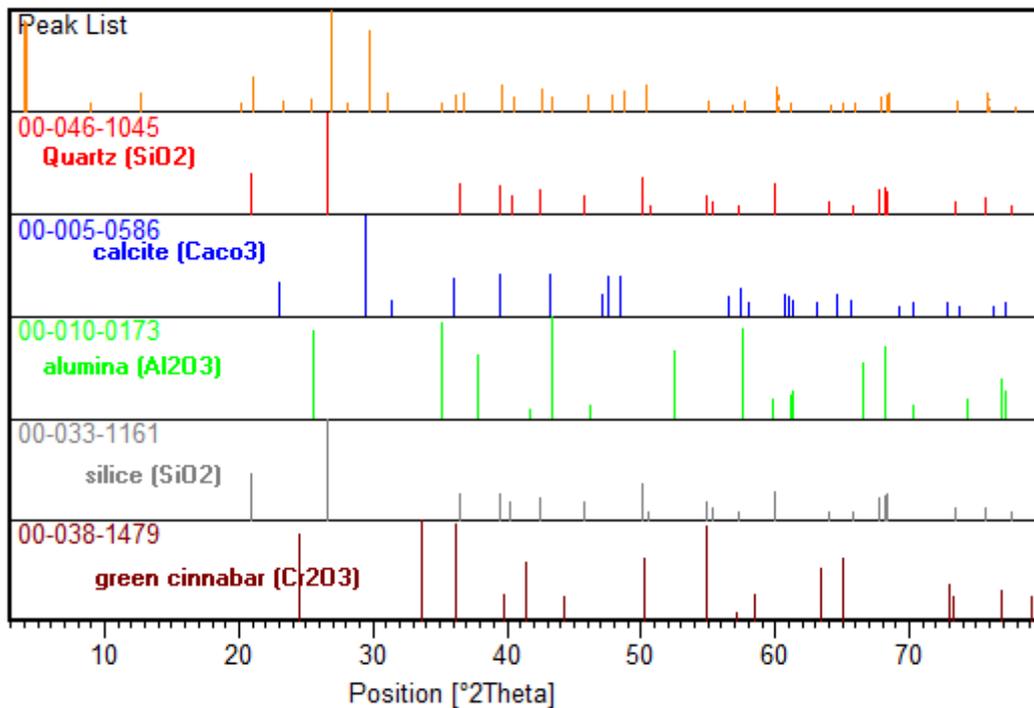


Figure II-10 : Paternes d'identification du sable d'oued

## CHAPITRE II      Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

### II-3-3 Interprétation des résultats :

Le spectre RX figure (II.2) et le paternes figure (II.3) montre l'existence de cinq phases minérales à savoir : la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la bornite( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), la silice ( $\text{SiO}_2$ ), Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ainsi le Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) dans la composition du ciment CPJ 42,5 CEM II B 42,5. La superposition du paterne (figure II-5) sur les spectres RX figures (II.6, II.7, II.8) montre que l'unique phase minérale est la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ).

Par contre le spectre RX figure (II.12) et le paterne figure(II.13) montre l'existence de cinq phases minérales dans l'échantillon de sable d'oued qui sont : la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la silice ( $\text{SiO}_2$ ), Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) et green cinnabar.

### II.4 Caractéristiques mécaniques des granulats (essai Los Angeles NF P 18-573):

Cet essai a pour but de mesurer la quantité "m" d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite par fragmentation d'un matériau en le soumettant à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation.

Dans la machine los Angeles, introduire avec précaution la prise d'essai  $M=5000$  g et la charge de boulets de la classe granulaire choisie. Après 500 rotations de la machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min pendant 15 min, recueillir le granulat et le tamiser sous l'eau sur le tamis de 1.6 mm, égoutter et sécher à  $105^\circ\text{C}$  le refus, le peser, soit  $m'$  le résultat de la pesée. Le passant au tamis de 1.6 mm sera  $m=5000-m'$ .

Le coefficient Los Angeles est donné par le rapport :  $L_A = \frac{m}{5000} \mathbf{100}$

Les résultats de l'essai Los Angeles des deux fractions granulaires 3/8 et 8/15 sont donnés dans le tableau ci-dessous.

matériaux	classes granulaires	poids			$L_A$	categories
		initial(M)	Final ( $m'$ )	<1,6 mm $m=5000 - m'$		
3/8	4 - 6,3	5000	3720	1280	25.6 <30	$LA_A$
8/15	10 – 14	5000	3338	1662	33.24 <40	$LA_B$ et $LA_C$

La norme P18-541 spécifie que la valeur du coefficient Los Angles doit être inférieure ou égale à 40, sauf dans le cas des bétons pour les quels la résistance à 28 jours doit être supérieure à 36 MPa ou l'on doit avoir  $L_A \leq 30$  MPa.

Donc d'après les résultats obtenus les granulats "3/8 et 8/15 " sont résistants.

## CHAPITRE II      Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

### II-5 : Analyse granulométrique par tamisage [NF P 18-5 60] :

#### II-5-1 Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

#### II-5-2 Préparation de l'échantillon pour l'essai :

L'échantillon a été préparé conformément à la norme P 18-553. La masse pour essai doit être supérieure à 0,2 D,

Avec : M exprimé en kilogrammes,

D plus grande dimension spécifiée en mm.

Gravillons : 8/15 :  $M \geq 0.2 \times 15 = 3\text{Kg}$ .

Gravillons : 3/8 :  $M \geq 0.2 \times 8 = 1.6\text{Kg}$ .

Sable : 0/3 :  $M \geq 0.2 \times 3 = 0.6 \text{ kg}$ .

#### II-5-3 Exécution de l'essai :

L'essai a été effectué sur deux échantillons l'un de masse  $M_{1h}$ , échantillon permettant de déterminer la masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai, l'autre de masse  $M_h$ , échantillon soumis à l'essai. Séchage à l'étuve de  $M_{1h}$  jusqu'à une masse  $M_{1s}$ .

La masse sèche ( $M_s$ ) de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique est calculée de la manière suivante :  $M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h$

L'échantillon «  $M_h$  » est lavé sur un tamis correspondant à l'eau courante à la petite maille de la colonne des tamis utilisés lors du tamisage, le matériau est correctement lavé quand l'eau s'écoulant sous le tamis est claire, ensuite le refus récupéré et séché jusqu'à masse constante «  $M_{s1}$  » est versé sur une colonne de tamis à mailles décroissantes du haut de la colonne vers le bas, les refus sur les tamis sont pesés et calculés. Les résultats des analyses granulométriques du sable d'oued, sable 0/3, des graviers 3/8 et 8/15 sont représentés dans les tableaux suivants :

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

Tableau II-1 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Masse nette de l'échantillon soumis à l'essai égale à 1682 grs					
ouverture tamis en mm	masse des refus cumulés en "g"	des "Ri"	pourcentage refus cumulé [Ri/M <sub>s1</sub> ] x100	pourcentage des tamisâts cumulés 100-[Ri/M <sub>s1</sub> ] x100	masse des tamisâts cumulés en "g"
10	0		0,00	100,00	1682
8	184		10,94	89,06	1498
6.3	766		45,54	54,46	916
5	1140		67,78	32,22	542
2.5	1660		98,69	1,31	22
1.25	1668		99,17	0,83	14
0.8	1674		99,52	0,48	8
0.5	1680		99,88	0,12	2
< 0,5	1682		100,00	0,00	0

Tableau II-2 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

Masse nette de l'échantillon soumis à l'essai égale à 3250grs					
ouverture tamis en mm	masse des refus cumulés en "g"	des "Ri"	pourcentage refus cumulé [Ri/M <sub>s1</sub> ] x100	pourcentage des tamisâts cumulés 100- [Ri/M <sub>s1</sub> ] x100	masse des tamisâts cumulés en "g"
16	366		11,26	88,74	2884
12,5	1302		40,06	59,94	1948
10	2366		72,80	27,20	884
8	2892		88,98	11,02	358
6,3	3122		96,06	3,94	128
5	3194		98,28	1,72	56
2,5	3246		99,88	0,12	4
1,25	3248		99,94	0,06	2
<1,25	3250		100,00	0,00	0

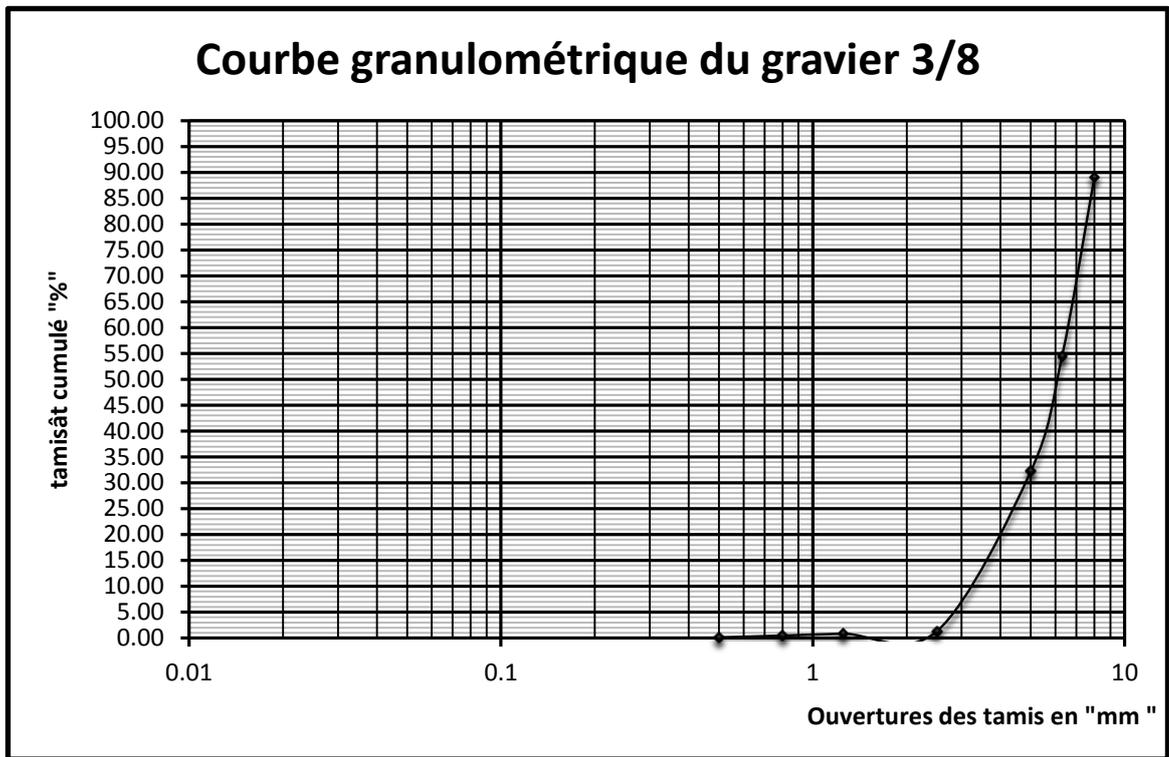


Figure II-11 : Courbe granulométrique du gravier 3/8

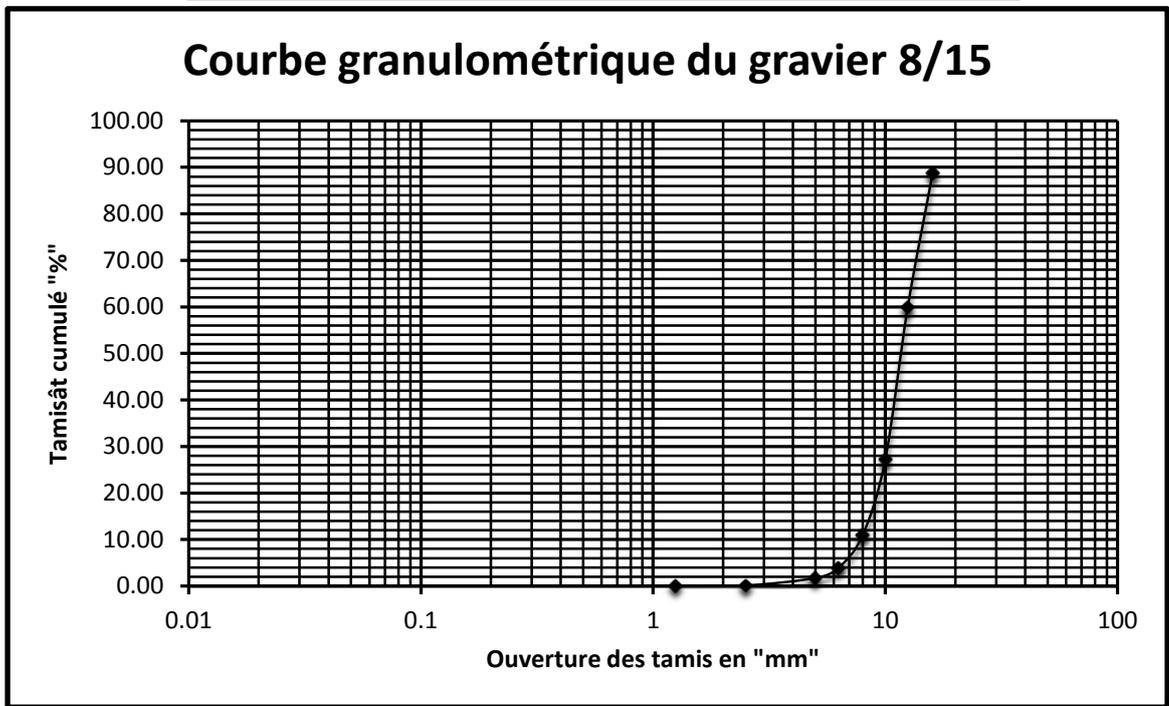
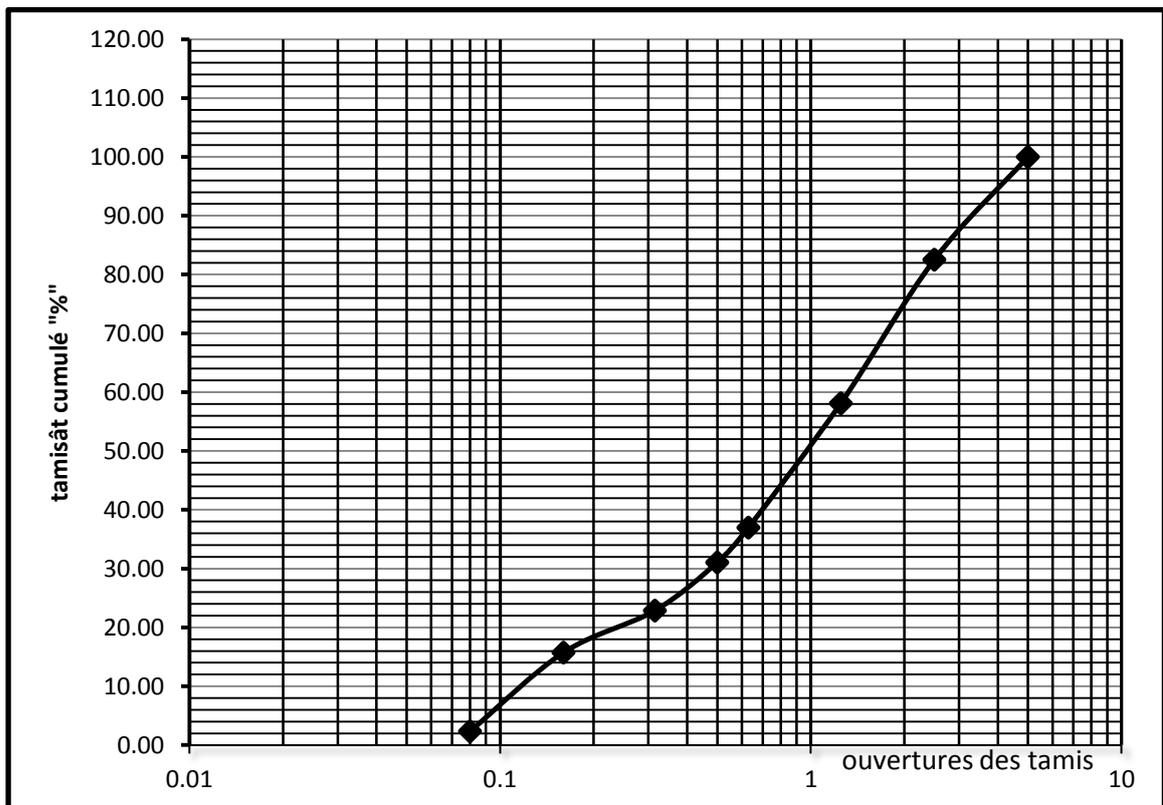


Figure II-12 : courbe granulométrique du gravier 8/15

**Tableau II-3 : Analyse granulométrique du sable de concassage 0/3**

Masse nette de l'échantillon soumis à l'essai égale à 1278grs				
Ouverture des tamis en mm	masse des refus cumulés "Ri" en "g"	pourcentage refus cumulés $[R_i/M_s] \times 100$	pourcentage des tamisats cumulé 100- $[R_i/M_s] \times 100$	masse des tamisats cumulés en "g"
5	0	0.00	100.00	1233
2.5	215.43	17.47	82.53	1018
1.25	516.5	41.89	58.11	717
0.63	777	63.02	36.98	456
0.315	951	77.13	22.87	282
0.16	1039	84.27	15.73	194
0.08	1204	97.65	2.35	29
< 0.08	1233	100.00	0.00	0



**Figure II-13 : Courbe d'analyse granulométrique du sable de carrière 0/3**

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

Tableau II-4 : Analyse granulométrique du sable d'oued

Masse nette de l'échantillon soumis à l'essai égale à 1274grs				
ouvertures des tamis en mm	masse des refus cumulés "Ri" en "g"	pourcentage refus cumulé [Ri/Ms ] x100	pourcentage des tamisâts cumulé 100- [Ri/Ms ] x100	masse des tamisâts cumulés en "g"
5	56	4.40	95.60	1218
2.5	101	7.93	92.07	1173
1.25	134	10.52	89.48	1140
0.63	217	17.03	82.97	1057
0.315	492	38.62	61.38	782
0.16	798	62.64	37.36	476
0.08	1225	96.15	3.85	49
<0.08	1274	100.00	0.00	0

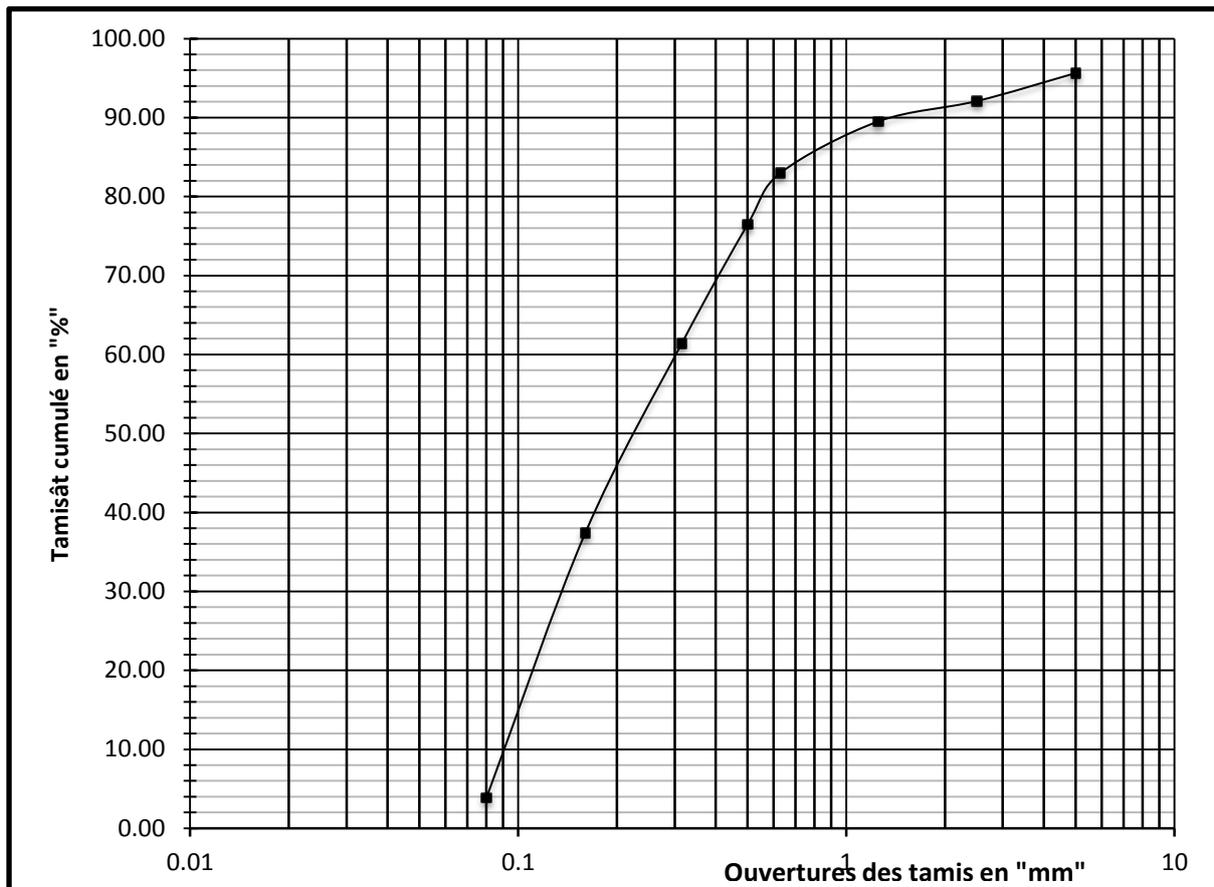


Figure II-14 : courbe d'analyse granulométrique du sable d'oued

**II-6 : Module de finesse :**

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est égale au 1/100 de la somme du refus cumulé exprimé en pourcentage sur les différentes tamis de la série suivante : 0,16-0,315-0,63-2,5-5 mm.

**Tableau II-5 : Module de finesse des sables**

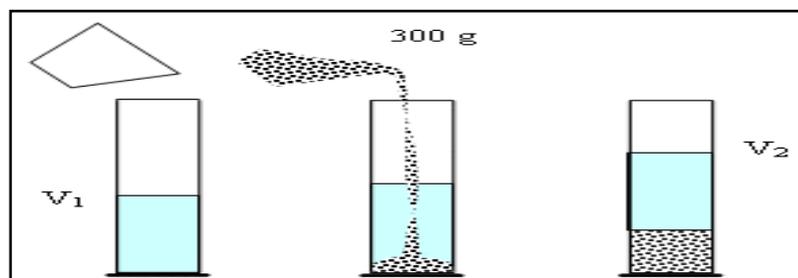
Ouvertures des tamis en « mm »	pourcentage des Refus cumulés de Sable concassage 0/3 en « % »	pourcentage des Refus cumulé de Sable d'oued en « % »
5	0	4.40
2.5	17.47	7.93
0.63	63.02	17.03
0.315	77.13	38.62
0.16	84.27	62.64
Mf=Σrefus /100	2.42	1.31

**II-7 : masses volumiques (NF P 18-554. P 18- 555):**

**II-7-1 : masse volumique absolue :**

C'est la masse par unité de volume du granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Les masses volumiques s'expriment en t/m<sup>3</sup>, en kg/dm<sup>3</sup>, ou en g/cm<sup>3</sup>.

**Méthode d'éprouvette graduée :** Cette méthode est très simple et très rapide, elle consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume « V<sub>1</sub> » d'eau et verser une masse « M » de granulats dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Ensuite relever le nouveau volume « V<sub>2</sub> » et calculé sa masse volumique par la relation suivante :  $\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$



**Figure II-15 : méthode d'éprouvette**

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

La masse de chaque prise d'essai des granulats gravillons « 8/15, 3/8 », sable de concassage 0/3 et sable d'oued est de 300 g ; les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-6: masses volumiques absolues des granulats

Granulats	V1 (cm3)	V2 (cm3)	Ps « g/cm <sup>3</sup> »	$\rho_s$ moyenne « g/cm <sup>3</sup> »
8/15	600	720	2,50	2,78
	595	700	2,86	
	600	701	2,97	
3/8	400	520	2,50	2,50
	400	520	2,50	
	400	520	2,50	
0/3	250	353	2.91	2.89
	251	354	2.91	
	251	357	2.83	
sable d'oued	250	353	2,91	2,91
	251	354	2,91	
	251	354	2,91	

### II-7-2 : Masse volumique apparente :

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire, du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

### Détermination de la masse volumique apparente :

- Après quartage et étuvage du matériau, verser le matériau à 10 cm au dessus du récipient de volume V jusqu'au débordement (formation d'un cône).
- Araser avec soin à l'aide d'une règle plate la couche débordante. Peser le récipient plein, soit M' sa masse.
- La masse volumique est donc calculée suivant la formule :  $\rho_p = \frac{M' - M}{V}$
- La masse du récipient vide et son volume : M=792 g et V=3887.72 cm<sup>3</sup>.

Les masses volumiques apparentes sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau II-7 : masses volumiques apparentes des granulats

Granulats	M' (g)	M'-M (g)	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
8/15	6308	5516	1,42	1,40
	6254	5462	1,40	
	6148	5356	1,38	
3/8	6030	5238	1,35	1,36
	6078	5286	1,36	
	6106	5314	1,37	
0/3	6450	5658	1.46	1.48
	6626	5834	1.50	
	6564	5772	1.48	
sable d'oued	5600	4808	1,24	1,26
	5736	4944	1,27	
	5752	4960	1,28	

### II-8 propreté des granulats :

Les granulats employés doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte.

#### II-8-1 propreté superficielle (NF P 18-591) :

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0,5 mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

##### II-8-1-1 Principe de l'essai :

Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

##### II-8-1-2 Appareillage :

- Tamis de 0,5 mm ;
- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1% ;
- Étuve ventilée à (105±5°C).

### II-8-1-3 Exécution de l'essai :

Préparer deux échantillons à partir de l'échantillon pour laboratoire : l'un de masse  $M_{1h}$  pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour essai, l'autre de masse  $M_h$  pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm.

#### A) Détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai :

- Peser les deux échantillons  $M_{1h}$  et  $M_h$ .
- Sécher le premier échantillon  $M_{1h}$  à l'étuve à  $(105 \pm 5)$  °C jusqu'à masse constante ;
- Le peser, soit  $M_{1s}$  sa masse sèche.

La masse sèche  $M_s$  de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :  $M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h$

#### B) Détermination de la masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm :

- Effectuer l'essai sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant essai.
- Tamiser sous eau l'échantillon  $M_h$  sur le tamis de 0,5 mm jusqu'à ce que l'eau devienne claire.
- Récupérer le refus et le sécher à l'étuve à  $(105 \pm 5)$  °C jusqu'à masse constante.
- Le tamiser à nouveau sur le tamis de 0,5 mm, soit sa masse sèche.

La masse sèche  $m$  des éléments inférieurs à 0,5 mm est égale à :  $m = M_s - m'$

La propreté superficielle est donnée par :  $P = \frac{m}{M_s} 100$

Tableau II-8: propreté des granulats

	3/8	8/15
masse humide $M_{1h}$ (g)	626	620
masse humide $M_h$ (g)	1822	3316
$M_{1s}$ (g)	622	616
$M_s$ (g)	1810,36	3294,61
$m'$	1682	3250
$M$	128,36	44,61
$P$ (%)	7,09	1,35

D'après la norme XP P 18-540 : P doit être inférieur à 1,5 ; dans notre cas :

8/15 :  $P=1,35 < 1,5$  donc les granulats 8/15 sont propres.  
 3/8 :  $P=7,09 > 1,5$  donc les gravillons 3/8 sont très pollués.

### I.8.2 : propreté des sables :

#### II.8.2.1 Équivalent de sable à 10% de fines [NF P 18-597] :

L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines, permettant de mesurer la propreté d'un sable est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2mm et dont la proportion des éléments passants au tamis à maille carrées de 0,08 mm a été ramenée à 10% à l'aide d'un sable correcteur. Il rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

#### Préparation des échantillons :

Tamiser le matériau humide sur le tamis de 2mm. Laver le refus sur ce même tamis en utilisant le moins d'eau possible et en associant les deux passants. Le 0-2 mm mis à l'étuve, puis en atmosphère ambiante pour l'amener à une teneur en eau comprise entre 1% et 3%.

Préparer quatre échantillons suivant les prescriptions de la norme P 18-553 : un pour la détermination de la teneur en eau W, un pour la préparation du sable correcteur et la détermination de la teneur en fines et deux pour la préparation des échantillons pour essai.

#### Détermination de la teneur en eau du tamisât :

A partir du premier échantillon, déterminer la teneur en eau W exprimée en pourcentage sur deux prises de 100 g à 200 g par une méthode rapide telle que : séchage

Sable de carrière (0/3)				Sable d'oued			
$M_h$ "g"	$M_s$ "g"	$W(\%) = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times 100$	$W_{moy}$ (%)	$M_h$ "g"	$M_s$ "g"	$W(\%) = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times 100$	$W_{moy}(\%)$
185,82	180	3,23	3,32	200	196	2,04	2,07
188,22	182	3,42		194	190	2,10	

## CHAPITRE II      Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

### Détermination de la teneur en fines et préparation du sable correcteur :

Tamiser sous eau le deuxième échantillon de masses  $M_{h2}$  sur le tamis de 0,08 mm. Sécher et peser les éléments retenus sur ce tamis pour déterminer la teneur en fines  $f$  du sable. Si  $m_s$  est la masse de ce refus à 0,08 mm,

$$f = 100 - \frac{m_s}{M_{h2}}(100 + W)$$

La masse  $m_{sc}$  de sable correcteur (refus sec à 0,08) à ajouter pour la préparation d'un échantillon pour essai est donnée par la formule :  $m_{sc} = 120 - \frac{1200}{f}$

### Préparation de deux échantillons pour essai :

Si  $f$  est inférieur à 11%, il n'ya pas lieu d'utiliser de sable correcteur et l'essai s'effectue directement sur le troisième et le quatrième échantillon à leur teneur en fines d'origine. la masse de chaque échantillon pour essai est égale :  $120 \left[ 1 + \frac{W}{100} \right]$

Si  $f$  est supérieur à 11% prendre une masse égale à :  $\frac{1200}{f} \left[ 1 + \frac{W}{100} \right]$

Ajouter à cette masse une quantité de sable correcteur sec  $m_{sc}$  .

	sable de concassage (0/3)	sable d'oued
Masse humide de sable $M_h$	962	862
Masse sèche du sable $M_s$	957	848
Teneur en fines du sable $f$ (%)	16,78 >11%	9,12 < 11%
Masse totale du sable correcteur $M_{sc}$ (g)	48,47	-----
Masse de l'échantillon soumis à l'essai (g)	122,36	122,45

### Conduite de l'essai :

1. La solution lavante ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondante à une masse sèche de  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

2. Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon ;
3. Laisser reposer dix minutes ;
4. Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation ;
5. Faire subir à l'éprouvette 90 cycle en  $30 \pm 1s$  ;
6. Remettre l'éprouvette en piston verticale sur la table d'essai ;
7. Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante ;
8. En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette ;
9. Laver le sable pour faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en piston verticale ;
10. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère ;
11. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur ;
12. Laisser reposer pendant  $20 \text{ min} \pm 10s$  ;  
Au bout de ces 20 min :
13. Mesurer à l'aide du réglet la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette ;
14. Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.
15. Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston
16. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
17. Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon.
18. Arrondir les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  au millimètre le plus proche.
19. La propreté du sable est donnée par la formule :  $P_s = 100 \frac{h_2}{h_1}$

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Sables	Eprouvette	hauteur totale du flocculat (h1,cm)	Hauteur du sable visible (h2)"cm"	Hauteur du sable par piston (h'2)"cm"	Équivalent de sable visible ESV	Équivalent de sable visible ESV moyen	Équivalent de sable visible ESP	Équivalent de sable visible ESP moyen
Sable d'oued	01	18.50	10.00	9.30	54.05	56.34	50.27	49.31
	02	17.90	9.90	8.90	55.31		49.72	
	03	17.10	10.20	8.20	59.65		47.95	
Sable de concassage (0/3)	01	10.20	7.50	7.10	73.53	74.37	69.61	67.42
	02	10.90	8.00	7.40	73.39		67.89	
	03	10.50	8.00	6.80	76.19		64.76	

**II.8.2.2. Essai au bleu de Méthylène (méthode de tache) :**

L'essai au bleu méthylène vient compléter l'essai d'équivalent de sable. Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu méthylène. Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface des ces éléments.

Le principe de l'essai consiste à contrôler l'adsorption de la solution du bleu injecté dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. En observant les taches sur un papier filtre, la tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide incolore. Le test est dit positif si, dans la zone humide, apparait autour du dépôt central une auréole bleu clair persistante. Il est dit négatif si l'auréole est incolore.

**Conduite de l'essai :**

préparation de la solution du bleu méthylène à base de 10g de poudre dissout dans un litre d'eau distillée ; la solution est portée à 40°C et agitée pendant 3h à vitesse 300 trs/min. 30 g du matériau de fraction 0/2 sont trompés dans 100ml d'eau déminéralisée, l'ensemble est agité pendant 3min à 400trs/min.

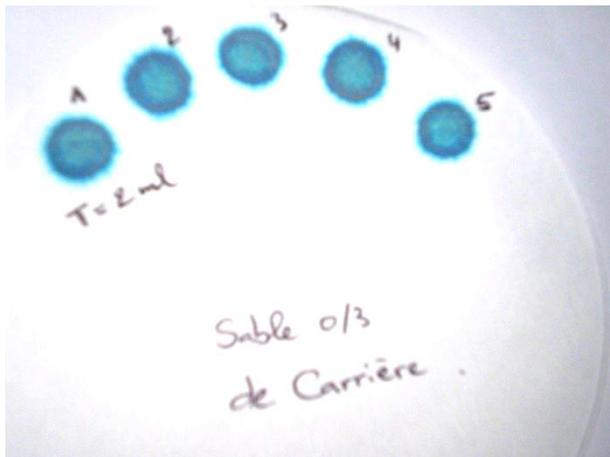
Le matériau est injecté, minute après minute, par des doses du bleu de méthylène jusqu'à la saturation des fines argileuses qui est contrôlé par le teste à la tâche sur le papier filtre.

La valeur de bleu du sable est donc donnée par la formule :  $V_B = \frac{V}{M}$

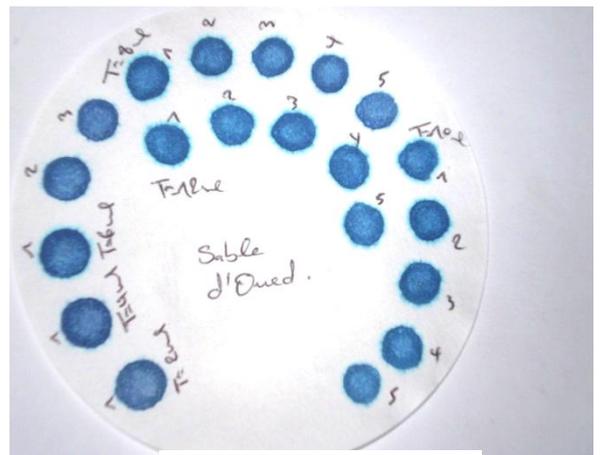
V : volume de la solution de bleu nécessaire pour atteindre le test positif ( $\text{cm}^3$ ).

M : Masse sèche de la prise d'essai (g).

Les résultats des tests au bleu de méthylène sont représentés dans la figure ci-dessous.



**Sable de carrière 0/3**



**Sable d'oued**

**Figure II-16 : test au bleu méthylène**

Les résultats du test effectués sur les sables sont :  $V_B = \frac{2}{30} = 0,07 < 1$  ..... **sable de carrière 0/3**

$V_B = \frac{12}{30} = 0,4 < 1$  ..... **Sable d'oued**

$V_B < 1$ , le sable est non argileux. Il peut, donc, être utilisé dans la fabrication des bétons et des mortiers sans aucune correction (lavage sous tamis inférieur à  $80 \mu\text{m}$ ).

II-9 Formulation des bétons :

La composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (la résistance, l'ouvrabilité) pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage. On doit également tenir compte de l'environnement dans lequel il se situe et de la durabilité souhaitée, en consultant la norme EN 206-1 afin de retenir dans quelle classe d'exposition le bâtiment se situe.

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

### II-9-1 classe d'exposition des bétons en fonction des actions due à l'environnement (NF-EN206-1) :

Le béton peut être soumis à plusieurs des actions décrites au tableau ci-dessous, dans ce cas, les conditions environnementales auxquelles il est soumis, peuvent nécessiter d'être exprimées sous la forme de combinaison de classe d'exposition.

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Béton concerné	
X0	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou armé en environnement très sec.	
XC	Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposées à l'air et à l'humidité.	
	XC1		Sec ou humide en permanence
	XC2		Humide, rarement sec
	XC3		Humidité modérée
XC4	Alternance d'humidité et de séchage		

### II-9-2 Valeurs limites spécifiée à la composition et aux propriétés du béton (extrait du tableau NA.F.1 de la norme NF-EN 206-1) :

Classe d'exposition		Rapport $E_{eff}/\text{liant éq}$ maximal	Classe de résistance minimale	Teneur minimale en liant éq. ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Teneur minimale en air (%)
Aucun risque de corrosion ou d'attaque	X <sub>0</sub>	-	-	150	-
Carbonatation	XC1	0.65	C20/25	260	-
	XC2	0.65	C20/25	260	-
	XC3	0.60	C25/30	280	-
	XC4	0.60	C25/30	280	-

### II.9.3 Formulation des bétons selon la méthode DREUX-GORISSE [34] :

Dans les expériences établies on a formulé le béton selon la méthode DREUX-GORISSE. L'objectif de la méthode est de déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton.

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

1. Détermination du rapport C/E
2. Détermination de C et E
3. Détermination du mélange optimale à minimum de vides
4. Détermination de la compacité du béton
5. Détermination des masses de granulats

Donnée de base :

Pour essai de carbonatation accélérée on choisi la classe XC4 : Alternance d'humidité et de séchage ;

### A. Résistance souhaitée :

Selon la classe XC4 : la classe de résistance C25/30 visant  $f_{c28} = 30\text{MPa}$

$f_c = f_{c28} + 15\%$ , on obtient :  $f_c = 34,50\text{ MPa}$ .

- Consistance désirée : est définie par l'affaissement moyen au cône d'Abrams, dans notre cas on a réalisé un béton plastique de vibration courante avec un affaissement  $A = 6$  à  $9\text{ cm}$ .
- Dosage en ciment "C" : la valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure ci-dessous en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

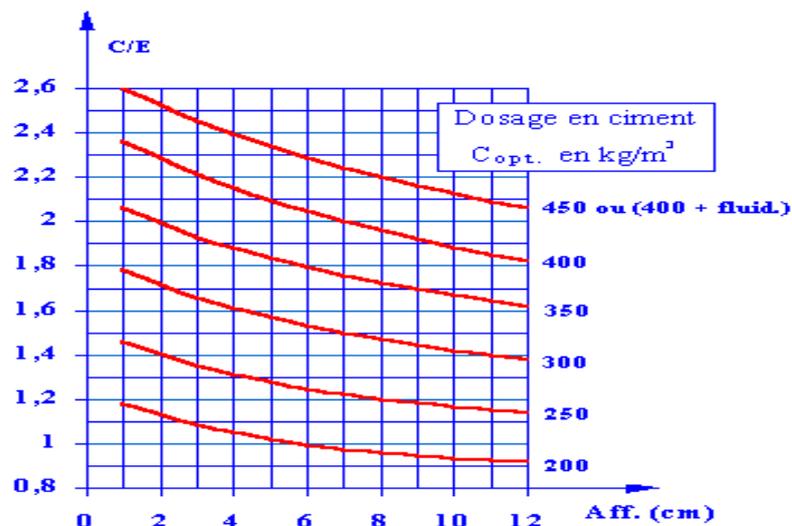


Figure II-17: Abaque permettant la détermination de  $C_{opt}$

## CHAPITRE II      Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

Selon la classe XC4 :  $E/C = 0,6 \rightarrow C/E = 1,67$

Selon l'abaque : pour la valeur  $C/E = 1,67$  et un affaissement au cône d'Abrams  $A = 7\text{cm}$ , la quantité optimale de ciment nécessaire à la confection d'un mètre cube de béton est de  $350\text{ kg/m}^3$ .

### D. Dosage en eau "E" :

La quantité d'eau  $E$  nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de  $C/E$  et de  $C$ .

$$\begin{cases} E/C = 0,6 \\ C = 350\text{kg/m}^3 \end{cases} \rightarrow E = 210\text{ l}$$

### E. Détermination du mélange optimal à minimum de vides :

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par DREUX pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

1. Tracé de la droite brisée de référence
2. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux.

#### 1. Tracé de la droite brisée de référence :

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse  $X$  et son ordonnée  $Y$  :

En abscisse :

$$\begin{cases} \text{Si } D_{\max} \leq 20\text{ mm} & X = D_{\max} / 2, \text{ donc : } X = 8\text{mm} \\ \text{Si } D_{\max} > 20\text{ mm} & \text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{\max}) + 38) / 2 \end{cases}$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K' \quad , \quad K' = K + K_S + K_P \quad Y \text{ est donné en pourcentage de passants cumulés}$$

## **CHAPITRE II      Caractérisation des matériaux et formulation des bétons**

K est un coefficient donné par le tableau II-9 Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :

Ks (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

$K_s = (6 M_{fs} - 15)$  avec  $M_{fs}$  le module de finesse du sable.

Kp (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

$K_p = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.

Tableau II-9 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 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 droite de Dreux a pour origine le point 0 origine du graphe et pour extrémité le point  $D_{max}$  caractéristique des plus gros granulats.

### 2. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure II-9 des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux.

## **CHAPITRE II      Caractérisation des matériaux et formulation des bétons**

---

Pourcentages en volumes absolus des granulats	Béton à base du sable d'oued "Y=37%"	Béton à base du sable de concassage "Y=45%"
Sable "S%"	32	39
Gravier 3/8 "g%"	04	04
Gravier 8/15 " G% "	64	57

Tableau II-10 : pourcentages en volumes absolus de matériaux

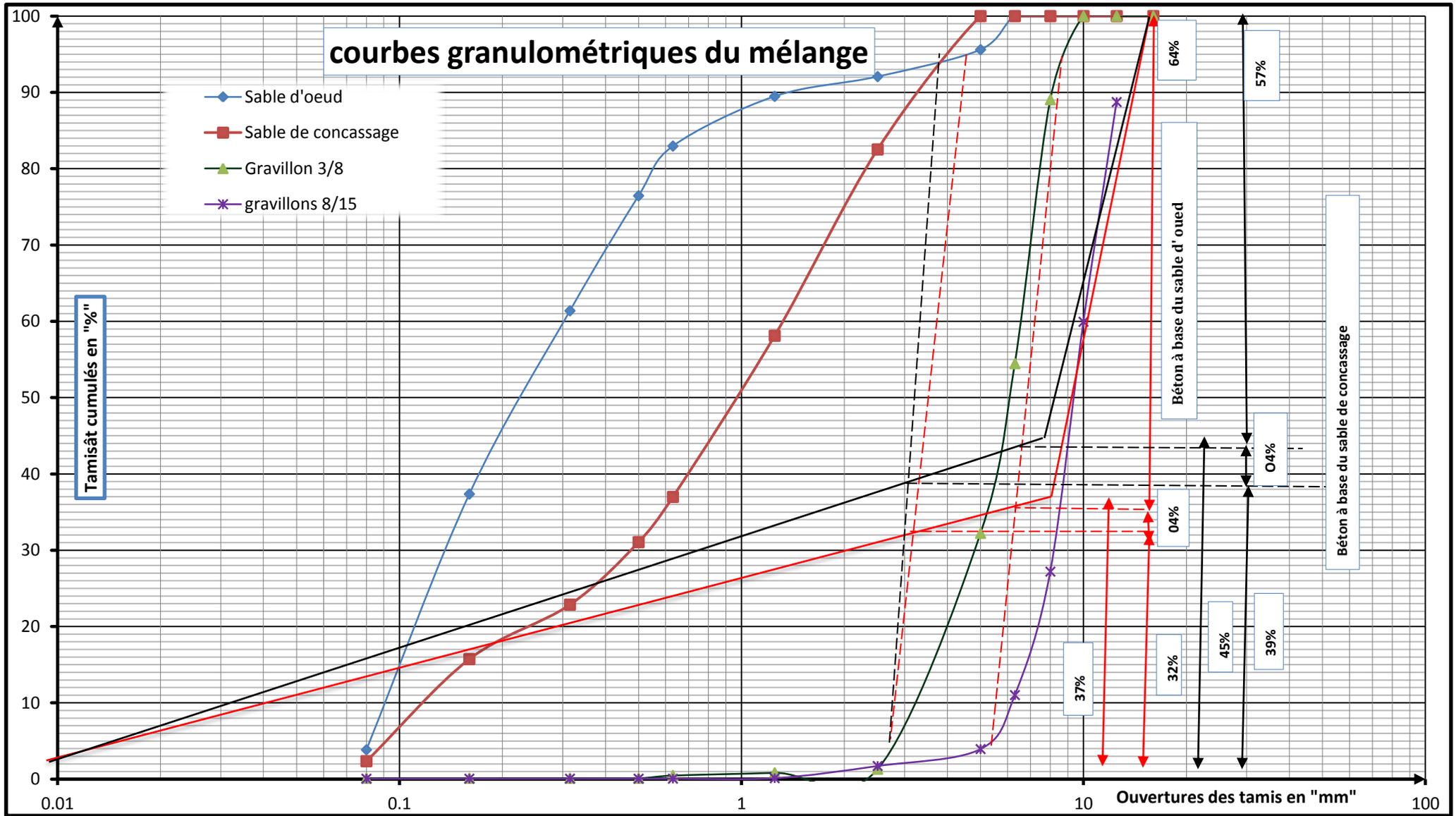


Figure II.18 : Courbes granulométriques du mélange

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

### F. Détermination de la compacité du béton :

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m<sup>3</sup> de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base  $\gamma$  est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tableau II-11). Des corrections ( $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$ ) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tableau II-11) :  $\gamma = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$ .

La valeur de la compacité  $\gamma$  du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :  $V = (1000\gamma - V_c)$  où  $V_c$  est le volume de ciment défini par  $V_c = C / \rho_{s(c)}$  où  $\rho_{s(c)}$  est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Tableau II-11 Compacité du béton en fonction de  $D_{max}$ , de la consistance et du serrage [34].

Consistance	Serrage	compacité ( $c_0$ )						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=8$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
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
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

## CHAPITRE II Caractérisation des matériaux et formulation des bétons

**Nota :**

\* Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

*Sable roulé et gravier concassé ( $c_1 = - 0,01$ )*

*Sable et gravier concassé ( $c_1 = - 0,03$ )*

\* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ( $c_2 = -0.03$ )

\* Pour un dosage en ciment C 1 350 kg/m<sup>3</sup> on apportera le terme correctif suivant : ( $c_3 = (C - 350) / 5000$ )

### G. Détermination des masses de granulats :

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V<sub>s</sub>) de gravillon (V<sub>g</sub>) et de gravier (V<sub>G</sub>) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$V_s = V * S \% \quad S = V * S \% * \rho_{s(S)}$$

$$V_g = V * g \% \quad g = V * g \% * \rho_{s(g)}$$

$$V_G = V * G \% \quad G = V * G \% * \rho_{s(G)}$$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes :

$\rho_{s(c)} = 3,1 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho_{s(S) \text{ concassage}} = 2,89 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho_{s(S) \text{ oued}} = 2,91 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho_{s(g)} = 2,50 \text{ t/m}^3$  et  $\rho_{s(G)} = 2,78 \text{ t/m}^3$ .

Dosage des granulats	Béton à base du sable d'oued V=687,09 l	Béton à base du sable de concassage V=707,10 l
Sable "S" en Kg	658,44	774,40
Gravier 3/8 "g" en Kg	70,70	68,70
Gravier 8/15 "G" en Kg	1258,06	3026,75

# **CHAPITRE III**

## **INDICATEURS DE LA DURABILITE**

CHAPITRE III :INDICATEURS DE LA DURABILITÉ

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale des indicateurs de la durabilité (Carbonatation, porosité accessible à l'eau) des bétons confectionnés à base du sable d'oued et à base du sable de carrière en variant le pourcentage de fines calcaire (0% ,5%,10%,15%,20%).

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première concerne l'étude de l'influence des fines calcaires sur la profondeur de carbonatation, et le second est consacré à étudier la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente des mêmes bétons cités ci-dessus.

III-1: Essai de carbonatationIII-1-1: Principe de carbonatation accélérée [35] :

L'essai consiste à introduire du gaz carbonique (1% à 50%) dans une enceinte (20°C) à humidité relative (HR=65%) dans laquelle sont placés les échantillons de béton.

A certaines échéances (généralement 7, 14, 28 jours), les échantillons de béton sont retirés de l'enceinte et la profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide de phénolphtaléine comme indicateur qui permet de visualiser le changement de pH ( $8 \leq \text{pH} \leq 10$ ) résultant de la carbonatation du béton.

Dispositif expérimental :

**Figure III-1: dispositif expérimental de l'essai de carbonatation accéléré**

III-1-2: Caractéristiques des matériaux:

L'étude est réalisée sur deux bétons ordinaires différents, le premier est confectionné à base du sable de carrière en évaluant le pourcentage des fines contenues dans ce sable et le deuxième à base de sable d'oued dans le rapport E/C= 0,6 et le dosage en ciment C= 350kg/m<sup>3</sup> (voir chapitre II).

Les volumes des constituants utilisés sont comme suit:

Tableau III-1: les volumes des constituants des bétons pour l'essai de carbonatation

Béton	nature du sable	Volumes des constituants en "grs"					
		Fines	Sables	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Ciment	eau
béton à base de sable d'oued	Brut	-----	514,37	57,01	1030,35	282,24	169,34
	Brut	-----	591,88	55,41	908,77	282,24	169,34
béton à base de sable de carrière	pourcentage des fines						
	0%	0	591,88	55,41	908,77	282,24	169,34
	5%	32,55	618,51	55,41	908,77	282,24	169,34
	10%	65,09	585,96	55,41	908,77	282,24	169,34
	15%	97,66	553,41	55,41	908,77	282,24	169,34
	20%	130,22	520,86	55,41	908,77	282,24	169,34

III-1-3: Préconditionnement avant carbonatation :

Selon le mode opératoire AFPC-AFREM [35]:

Le préconditionnement consiste en une saturation en eau sous vide pendant 90 jours puis en un séchage de 48 heures dans une étuve ventilée à T=40°C.

Les éprouvettes recommandées : prisme 4X4X16 dont une face est exposée au séchage et à la carbonatation, les autres faces sont recouvertes de papier aluminium.

#### III.1.4: Essai de carbonatation accélérée :

Les échantillons sont ensuite introduits dans l'enceinte de carbonatation accélérée dont le volume est de 25 litres. L'alimentation en  $\text{CO}_2$  est assurée à partir d'une bouteille de  $\text{CO}_2$  sous pression dont le débit est réglé à partir d'un manomètre, évitant les surpressions dans l'enceinte pour que le transfert du gaz  $\text{CO}_2$  dans les corps d'épreuve se fasse avant tout par diffusion.

Une solution saline saturée de nitrite de sodium est disposée dans l'enceinte de carbonatation accélérée et règle l'humidité relative à  $\text{HR} = 60$  à  $65\%$ .

#### III.1.5 Mesure de la profondeur de carbonatation :

A chaque échéance (7,14, 28j), les corps d'épreuve sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté sont mesurées après les pesés. Un morceau de béton (épaisseur  $2 \pm 1$  cm) est prélevé sur chaque éprouvette. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte.

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléines.

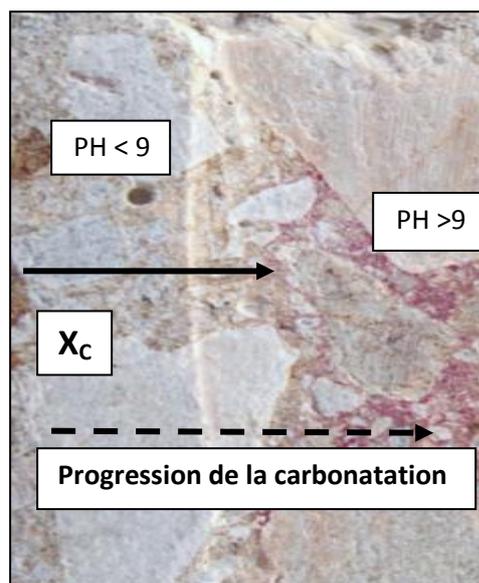


Figure III-2 : Front de carbonatation détecté par projection de phénolphaléine sur une éprouvette de Béton ordinaire

III.1.6 : l'indicateur coloré (phénolphtaléine) de pH :

La solution phénolphtaléine est préparée comme suit : en dissoudre 1g de phénolphtaléine en poudre dans 100 ml d'éthanol et on obtient une solution incolore.

La zone de virage de la phénolphtaléine est de 8,2 à 10,0, elle est incolore dans un milieu acide et rose dans un milieu basique.

Les mesures de l'épaisseur carbonatée sont effectuées par pulvérisation d'un indicateur phénolphtaléine de pH, on repère quatre mesures équidistante d'un centimètre et on calcule la moyenne arithmétique. Les résultats obtenus sont mentionnés dans les annexes III- 1, III-2 et les profondeurs moyennes obtenues sont récapitulées dans le tableau III-2.

III-1-7 Résultats :

Tableau III-2 : profondeurs de la carbonatation en « mm » des bétons confectionnés avec le sable d'oued et sable de carrière

Tableau III.3 : Poids des bétons après carbonatation

Eprouvettes	Temps en jours		7j	14j	28j	35j
	pourcentage de fines	0%		12.167	14.625	19.98
5%			9	11.5	15	17.08
10%			10.875	12.085	14.55	16.2
15%			8.7	9.292	12.13	14.92
20%			7.165	8.625	13.75	15.5
Béton avec sable brut			10.167	14.33	16.13	17.58
Béton avec sable d'oued			11.66	13.958	16.38	25.67

		Poids des bétons après carbonatation « grs »				
Eprouvettes	Temps en jours		7j	14j	28j	35j
	pourcentage de fines	0%		601.43	587.73	587.09
5%			597.29	584.85	584.4	583.27
10%			652.54	652.71	651.89	650.67
15%			608.03	590.42	589.89	588.82
20%			548.6	548.54	547.85	546.91
Béton avec sable brut			597.97	581.5	581.4	580.95
Béton avec sable d'oued			637.53	637.45	636.46	635.33

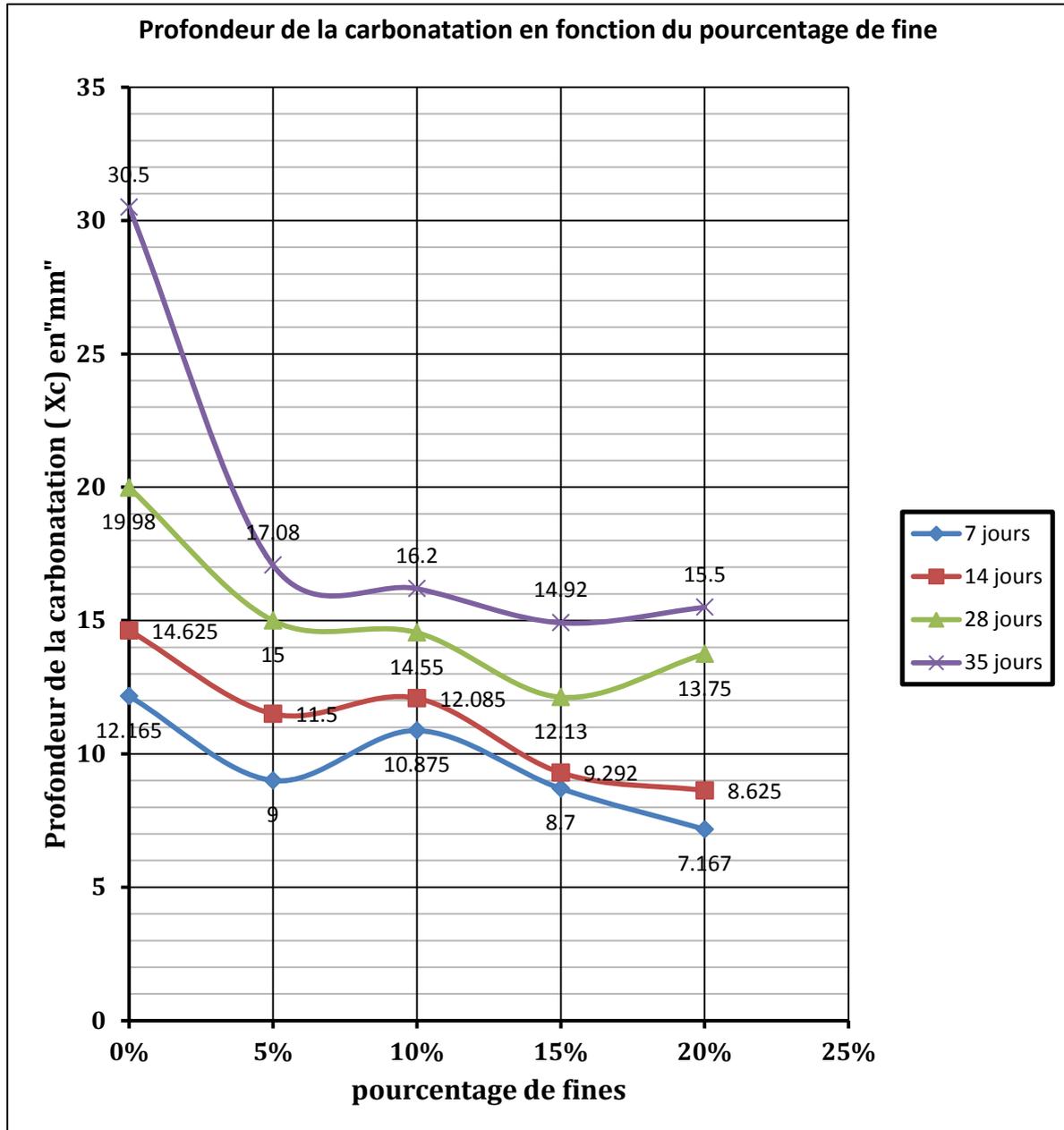


Figure III-3 : Profondeurs de la carbonatation en fonction du pourcentage de fines

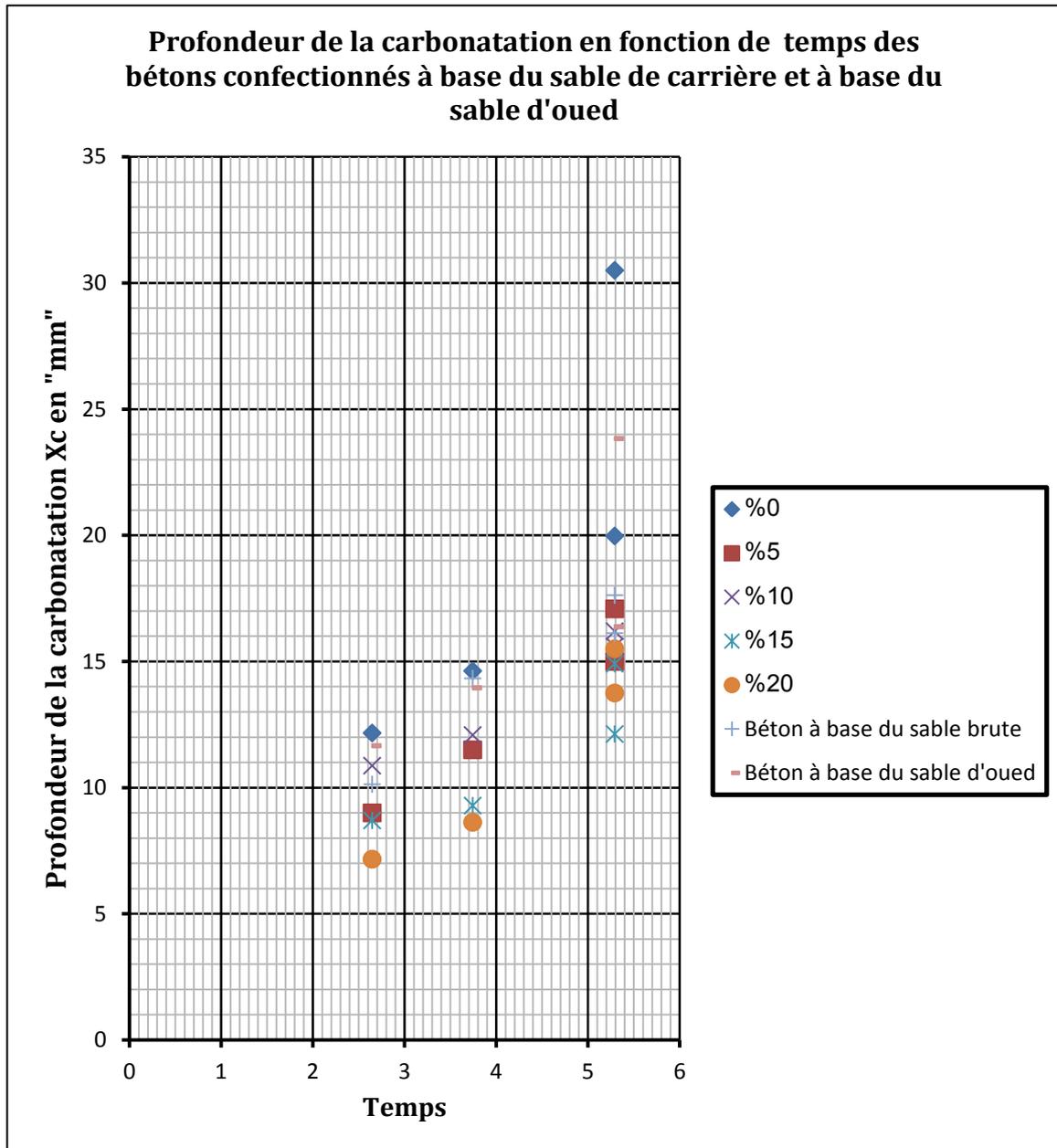


Figure III-4 : Profondeurs de la carbonatation en fonction de la racine carrée du temps des bétons confectionnés à base du sable de carrière et à base du sable d'oued

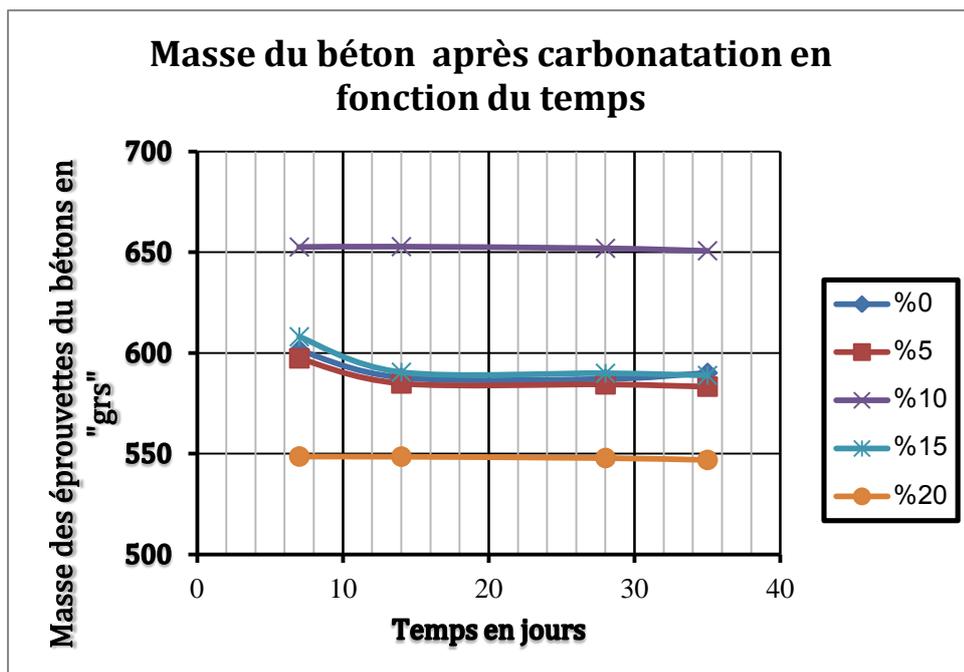


Figure III-5 : Évaluation des masses du béton en fonction du temps

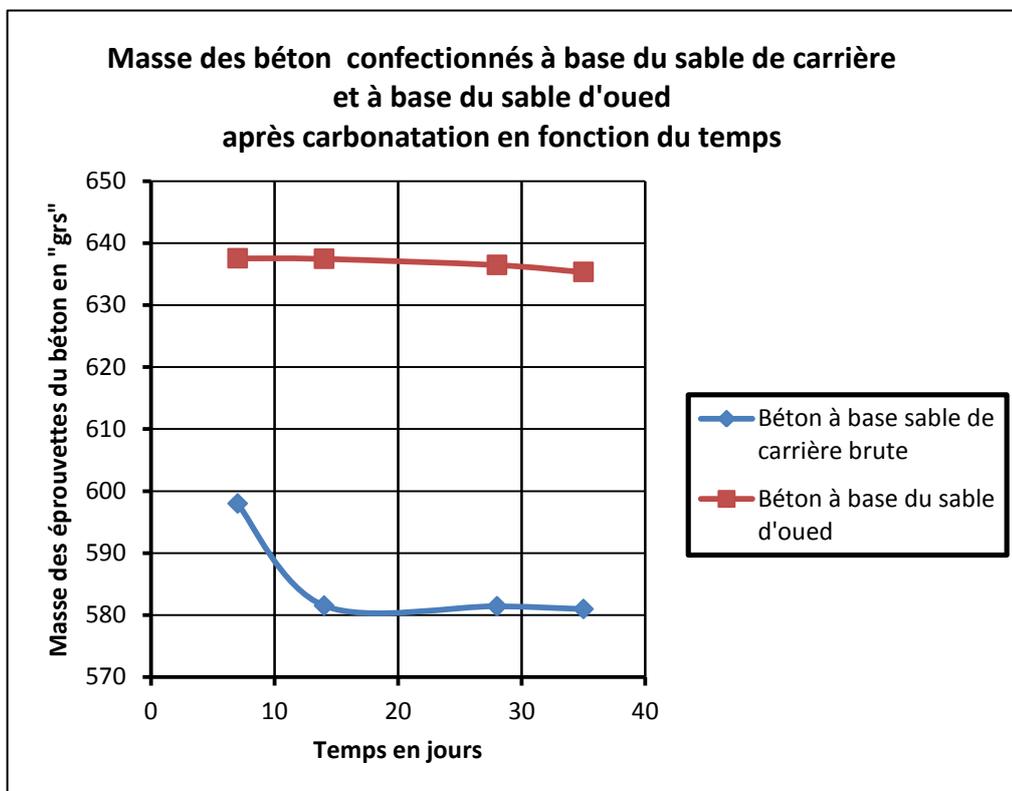


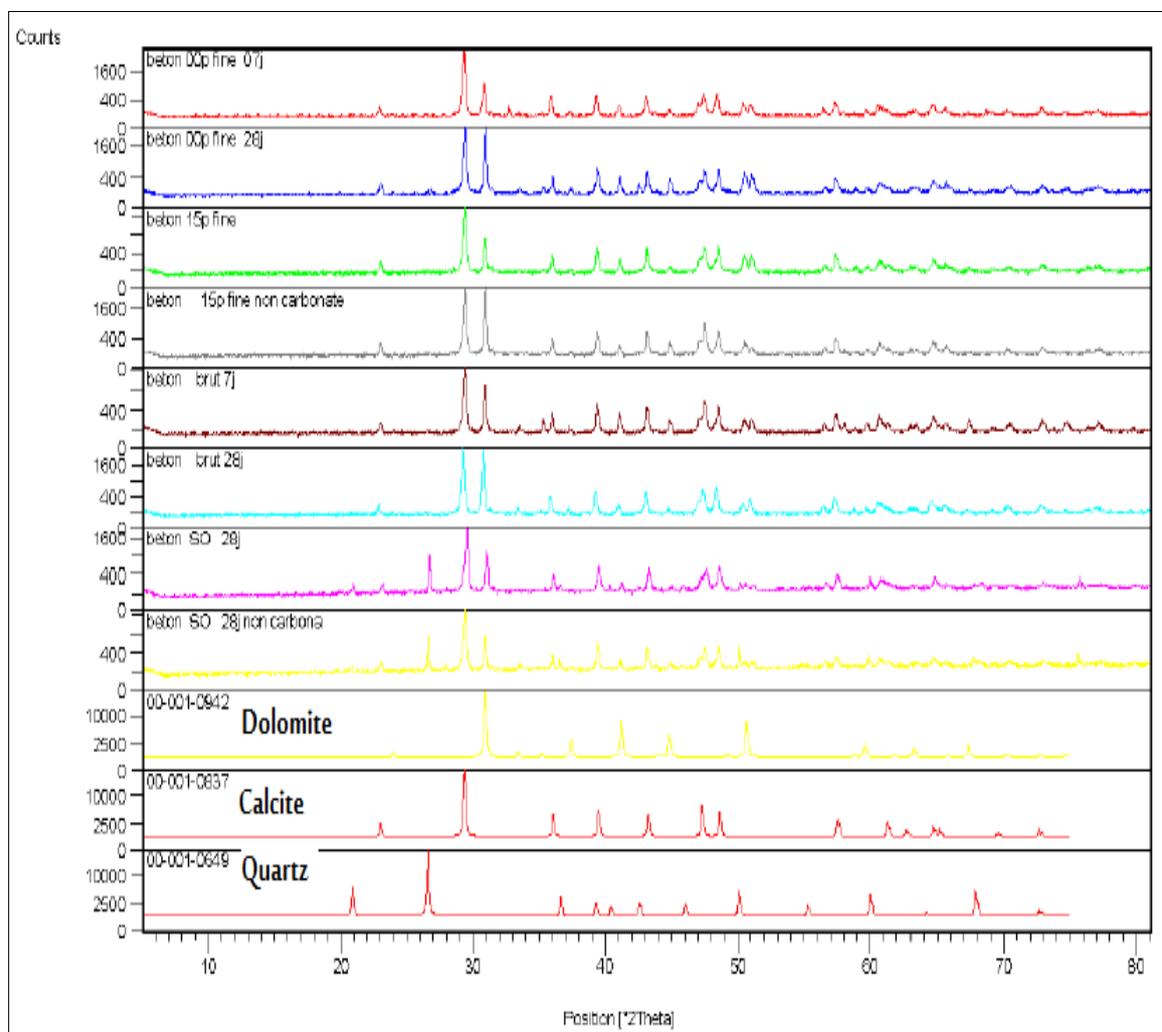
Figure III-6 : Évaluation des masses des bétons confectionnés à base du sable de carrière et à base du sable d'oued après carbonatation en fonction du temps

II-1-7-1 : Analyse minéralogique par DRX :

Chaque minérale possède un spectre caractéristique de diffraction des rayons X, en fonction de l'incidence  $2\theta$  de la source des rayons X sur leurs plans cristallins. Ce qui permet de les identifier à partir de spectre de diffraction de l'échantillon analysé.

La diffraction des rayons X a été réalisée au laboratoire de Technologie des matériaux et de Génie des procédés (LTMGP) de l'université de Bejaïa, à l'aide d'un diffractomètre de marque PHILIPS « XPERT-PRO » équipé d'une anticathode de cuivre fonctionnant sous 45 KV et 30 mA.

Les diffractogrammes RX ainsi que leurs identifications pour les échantillons de bétons à base du sable d'oued et à base de sable de carrière sont apportés par la figure suivante :

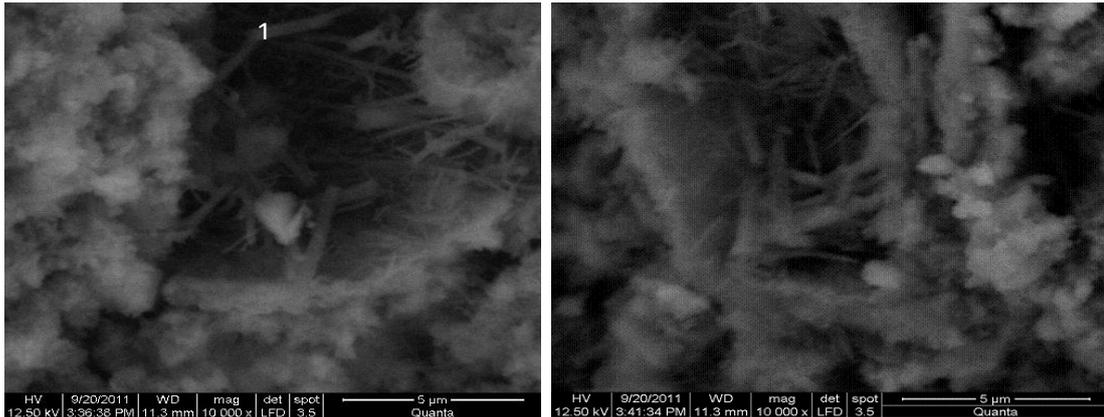


**Figure III-7 : Spectres de la DRX et patrons d'identification bétons confectionnés à base du sable de carrière et à base du sable d'oued.**

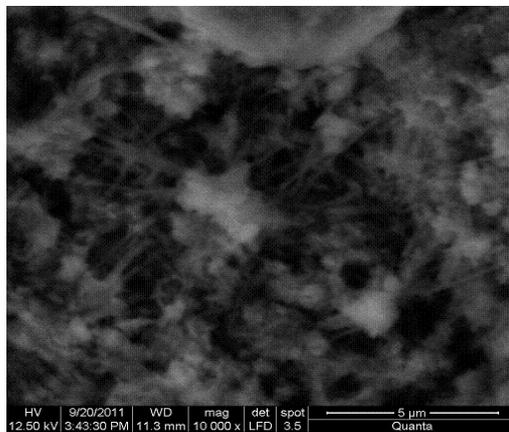
III-1-7-2 Morphologie :

Après la carbonatation des bétons, on a relevé la morphologie des différents bétons utilisés dans l'essai de carbonatation accélérée à l'état carbonaté et non carbonaté.

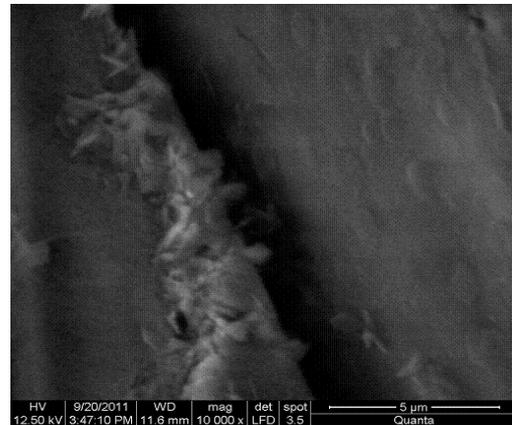
Les images ci contre sont relevé par le MEB QUANTA 200 de laboratoire génie des procédés de l'université A.MIRA :



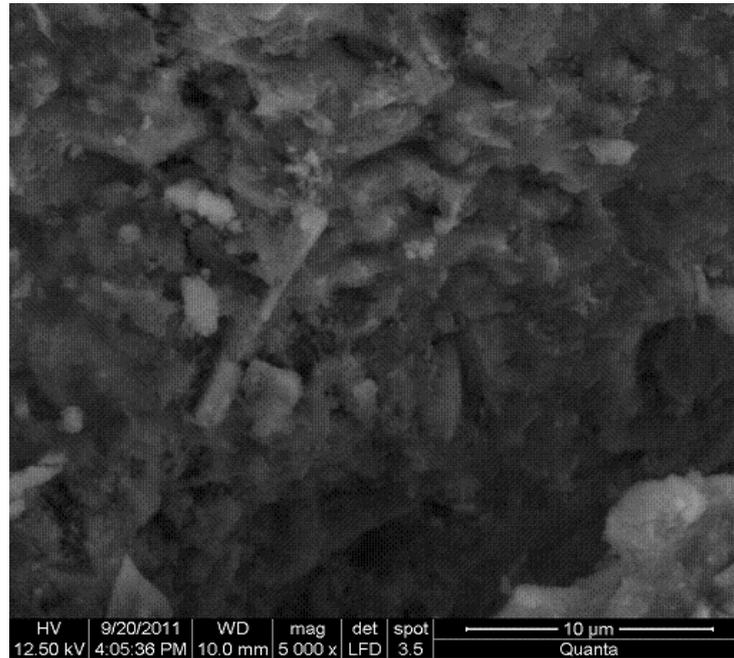
**Figure III-8 : Aiguilles « 1 » remplissant une partie de fissure dans un béton de 15% de fines subi une carbonatation à 28 jours**



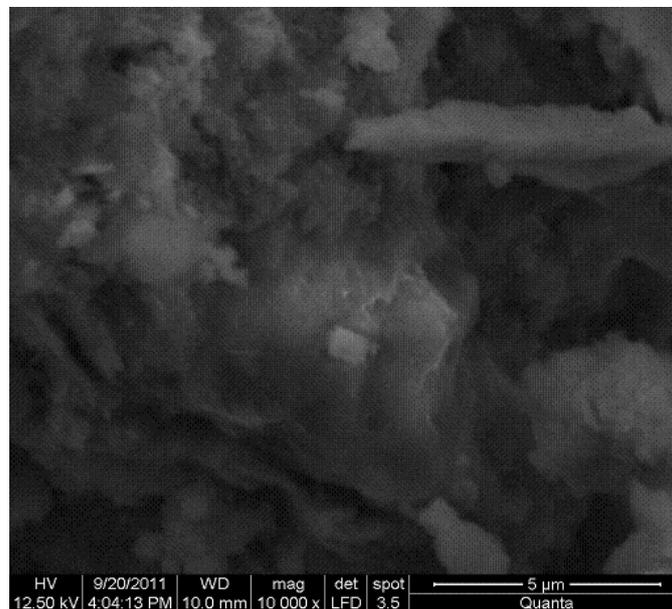
**Figure III-9 : formation des aiguilles remplissant un pore de béton à 15% de fines subi une carbonatation à 28 jours.**



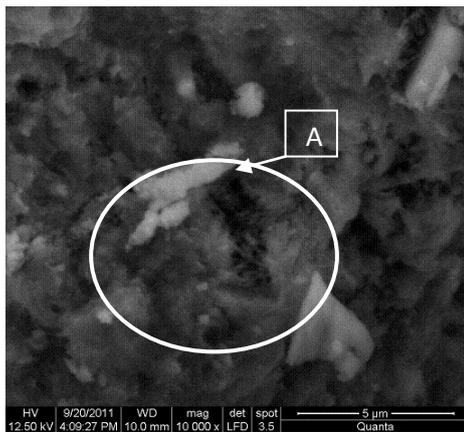
**Figure III-10 : formation des aiguilles au niveau de la fissure du béton à 15% de fines subi une carbonatation à 28 jours**



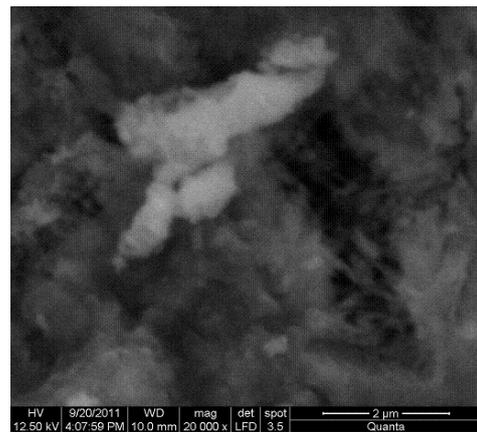
**Figure III-11 : béton non carbonaté à 15% de fines à 5000 X.**



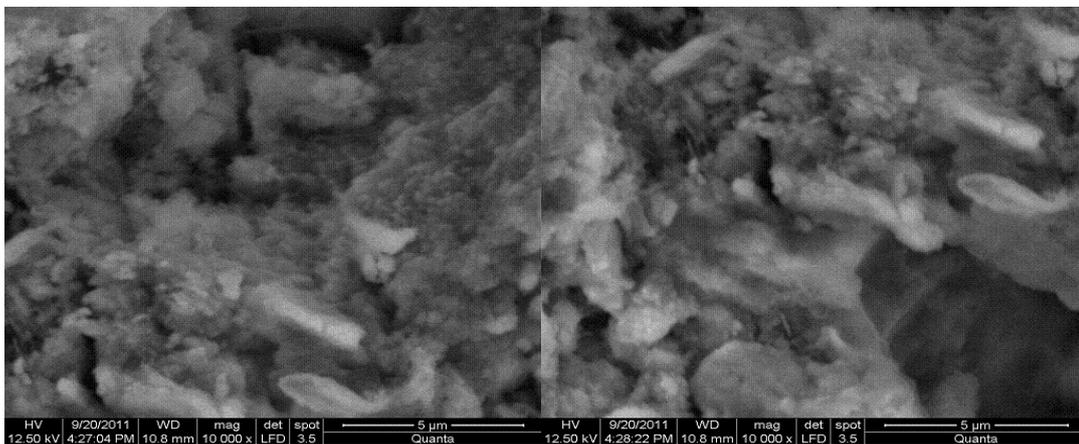
**Figure III-12 : béton non carbonaté à 15% de fine au niveau de la fissure à 10 000 X.**



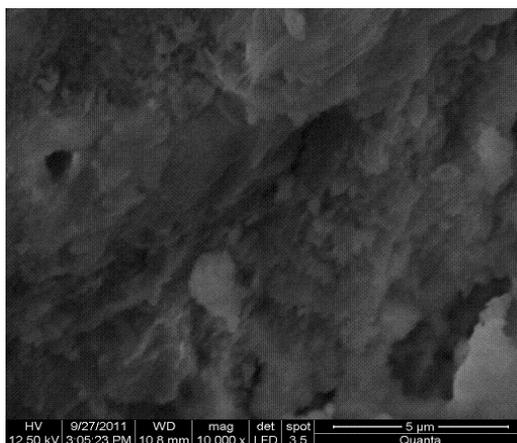
**Figure III-13 : Apparition des aiguilles au niveau du pore du béton de 15% de fines subi une carbonatation à 7 jours.**



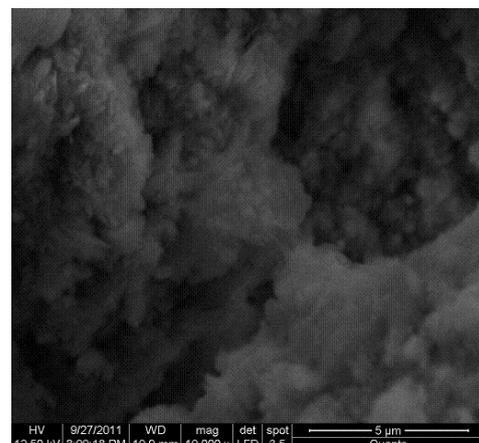
**Figure III-14 : Agrandissement de la zone « A » à 20 000 X.**



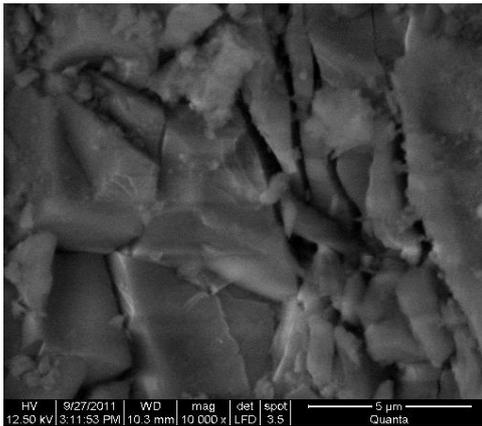
**Figure III-15 : carbonatation du béton confectionné à base du sable d'oued sans formation des aiguilles.**



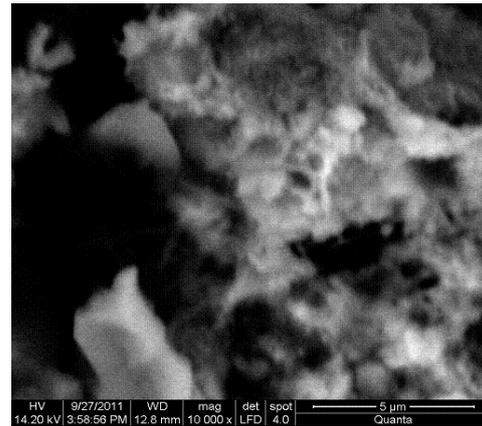
**Figure III-16 : fissure colmaté d'un béton confectionné à base du sable d'oued non carbonaté à 28 jours.**



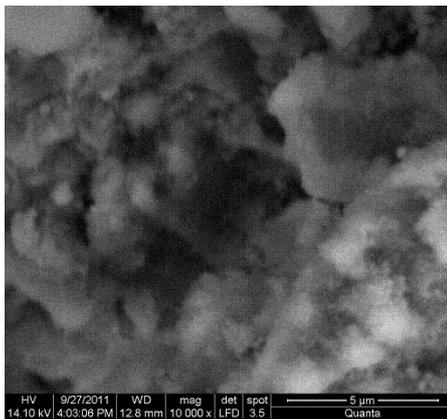
**Figure III-17 : apparition du colmatage au niveau de la fissure d'un béton confectionné à base du sable d'oued non carbonaté à 28 jours.**



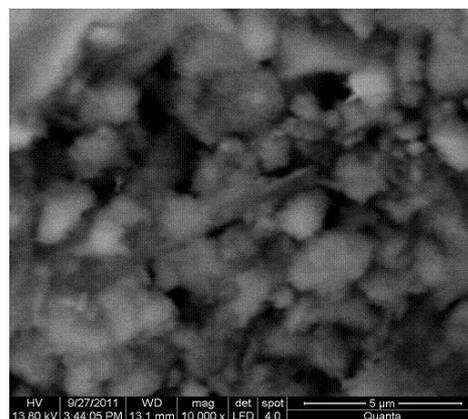
**Figure III-18 : réarrangement des grains du béton confectionné à base du sable d'oued non carbonaté.**



**Figure III-19 : apparition des vides au niveau d'un béton confectionné à base du sable de carrière brut après carbonatation**



**Figure III-20 : carbonatation d'un béton confectionné à base du sable de carrière brut.**



**Figure III-21 : carbonatation d'un béton à 0% de fines à 28 jours.**

### III-1-7-3 interprétation des résultats :

La figure III-3 montre l'allure des courbes est similaire.

On remarque une diminution de la profondeur de carbonatation en fonction du pourcentage des fines pour les différents âges étudié (7, 14, 28 et 35 jours).

Une légère augmentation est observée à 10% de fines.

On peut déduire ainsi que la diminution de la profondeur de la carbonatation est due aux colmatages des fissures entre la pâte et les granulats par les fines calcaires.

On sait que le dioxyde de carbone pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures et se dissout dans l'eau présente dans le béton pour réagir avec la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et les silicates de calcium hydraté (C-S-H) pour former le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). La présence de fines empêche la carbonatation en profondeur.

La figure III-4 montre que la vitesse de carbonatation augmente en fonction du temps pour les deux bétons. La vitesse de carbonatation du béton confectionné à base du sable d'oued est plus grande par rapport au béton confectionné à base du sable de carrière à l'état brut, ceci peut être expliqué par le fait que les granulats roulés favorisent la pénétration du  $\text{CO}_2$  dans le béton.

Les figures (III-8 à III-21) relevées par le MEB montrent les morphologies des deux bétons étudiés dans le cas carbonaté et non carbonaté :

Les figures (III-8, III-9) montrent la formation des aiguilles, remplissant les fissures et les pores d'un béton carbonaté à 15 % de fines à 28 jours et un début de leur apparition à 7 jours, on les observe aussi au bord de la fissure montré par la figure III-10 ; ce ci peut s'expliquer par la carbonatation des aluminates hydratés. Des études indiquent qu'ils se carbonatent en produisant des carbonates de calcium, des hydroxydes d'aluminium et de l'eau, si les produits de carbonatation se trouvent en présence de portlandite et d'eau, il peut se reformer de l'ettringite à partir des aluminates et du gypse libéré par la carbonatation [19].

Selon Hostomsky et Jones [21], les carbonates de calcium sont identifiés dans les matériaux carbonatés par trois phases cristallines : la calcite, la vatérite et l'aragonite et la morphologie des précipites est différente ; la calcite s'apparente à des microcristaux cubiques dont la taille est de l'ordre du micromètre, pour les précipites de vatérite et d'aragonite sont des microcristaux de taille plus petite de forme sphérique [21], ces microcristaux de forme sphérique sont observés dans les bétons à 0% de fines et les bétons confectionné à base du sable d'oued ( figures III-15,III-20,III-21) ce ci nous montre la précipitation de carbonates de calcium produites par la carbonatation de la portlandite ou les silicates de calcium hydraté.

Dans le cas des bétons non carbonatés (figures III-11, III-12, III-16, III-17, III-18) on remarque moins de fissures ce ci est du aux fines qui les occupent ; qui explique la diminution de la profondeur de carbonatation en fonction du pourcentage de fines.

Par contre les spectres de l'analyse minéralogique par la DRX (figure III-7) montrent l'existence des mêmes phases minéralogiques pour les différents pourcentages de fines pour les deux cas carbonatés et non carbonatés à savoir : la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et Dolomite pour le béton à base du sable de carrière et la calcite et le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) pour le béton confectionné à base du sable d'oued.

La figure III-5 montre que la masse est stable pour les pourcentages en fine de 10 et 20%. On remarque une légère diminution en poids pour les pourcentages en fine de 0,5 et 15% au environs de 10 jours puis reste stable toute la durée d'expérience. La stabilité de la masse en fonction de temps montre que la carbonatation n'influe pas sur la masse du béton. La diminution du poids est due à l'introduction des fines qui ont bouchés les vides dans le béton et non à la formation de carbonate de calcium ou de silicate de calcium.

### III-2 Porosité accessible à l'eau et masse volumique mesurées par pesée hydrostatique (NF P 18-459) :

#### III-2-1 : Introduction :

La porosité accessible à l'eau est un paramètre ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité [36]. C'est en effet un indicateur de durabilité. Parmi les méthodes à disposition, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique selon le mode opératoire AFPC-AFREM est une mesure simple et praticable sur une large variété de matériaux. La masse volumique apparente est également déterminée par cette technique.

#### III-2-2 Déroulement des campagnes d'essai :

##### III-2-2-1 Caractéristiques générales :

Les échantillons de béton (BSO, BSC en variant le pourcentage de fines calcaires 0% , 5% , 10%, 15% ,20%) testés dans le cadre des campagnes d'essais ont été sciés à partir de cylindre  $\Phi 16 \times 32$  cm, après avoir éliminé les 50 premiers millimètres aux extrémités du cylindre , trois échantillons ont été testés.les volumes des constituants des bétons confectionnés (  $E/C = 0,6$  et  $C = 350 \text{ kg/m}^3$  ) sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau III-4 : Masses des constituants des bétons pour l'essai porosité accessible à l'eau et masse volumique mesurées par pesée hydrostatique

Béton	nature du sable	masses des constituants en "grs"					
		Fines	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Ciment	eau
béton à base de sable d'oued (BSO)	Brut	-----	4101	455	8216	2250	1350
	Brut	-----	4724	442	7246	2250	1350
béton à base de sable de carrière (BSC)	pourcentage des fines						
	0%	0	4724	442	7246	2250	1350
	5%	236,2	4488	442	7246	2250	1350
	10%	472,4	4252	442	7246	2250	1350
	15%	708,6	4015	442	7246	2250	1350
	20%	944,8	3779	442	7246	2250	1350

III-2-2-2 Principe de l'essai :

Il s'agit de la détermination par pesée des données suivantes :

1. La masse apparente d'un corps d'épreuve de béton immergé dans un liquide avec lequel il est préalablement imprégné sous - vide (masse saturée dans l'eau  $M_{eau}$ ) ;

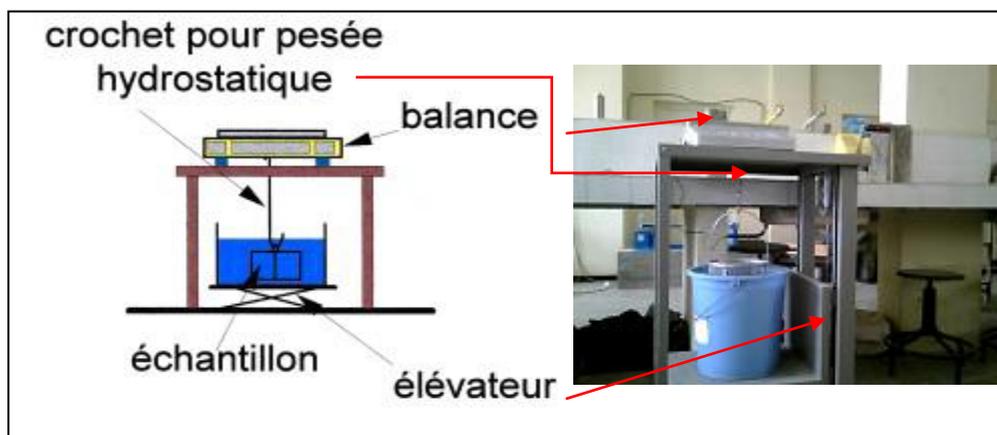


Figure III-22 : Dispositif de la Pesée hydrostatique  $M_{eau}$

2. La masse du corps d'épreuve dans l'air alors qu'il est encore imbibé de liquide (masse saturée dans l'air  $M_{air}$ ) ;
3. La masse du corps d'épreuve à l'état sec dans l'air  $M_{sec}$ .
4. A partir de ces données, il est alors possible d'accéder à la masse volumique apparente du corps d'épreuve (à l'état sec  $\gamma_p$ ) et à la porosité accessible à l'eau «  $P_{eau}$  », en appliquant les formules suivante :

$$\text{masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse à l'état sec dans l'air}}{\text{masse saturée dans l'air} - \text{Masse nette saturée dans l'eau}}$$

$$\text{Porosité accès à l'eau} = \frac{(\text{masse saturée dans l'air} - \text{masse à l'état sec dans l'air}) \times 100}{\text{Masse saturée dans l'air} - \text{Masse nette saturée dans l'eau}}$$

### III-2-2-3 Mode Opératoire AFPC-AFREM :

Le mode Opératoire est le suivant :

1. Saturation en eau sous- vide pendant 24 heures. Le corps d'épreuve est placé dans un récipient étanche on fait le vide et ce vide est maintenu pendant « 4 heures ».
2. On recouvre ensuite le corps d'épreuve de 20 mm d'eau environ pendant  $20 \pm 1h$ , à une température  $T=20\pm 2^\circ C$  ;
3. Le corps d'épreuve est ensuite pesé immergé (pesée hydrostatique), puis pesé dès qu'il est sorti du récipient (débarrassé toute fois du film superficiel d'eau et des gouttes à sa surface) ;
4. Le corps d'épreuve est ensuite placé dans une étuve ventilée à  $T=105 \pm 5^\circ C$  jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque « 02 » pesées successives, espacées de 24 heures, ne diffèrent pas de plus de 0,005%.

### III-2-3 : Résultats et interprétation :

Les résultats obtenues après la réalisation de l'essai sont mentionnés dans l'annexe III-3.

Le tableau suivant représente les résultats recapitulatifs de la porosité accessibles et la masse volumique apparente obtenues :

Tableau III-5 : porosité accessible à l'eau et masses volumique apparente des bétons confectionnés à base du sable d'oued et à base du sable de carrière

Béton	Nature du sable	Pmoyene (%)	$\gamma_{pmoy}$
béton à base de sable d'oued (BSO)	BSO	14.47	2.228
béton à base de sable de carrière (BSC)	BSC Brut	12.35	2.296
	Pourcentage de fines		
	0%	11.48	2.346
	5%	12.18	2.325
	10%	13.10	2.316
	15%	13.04	2.300
	20%	13.20	2.314

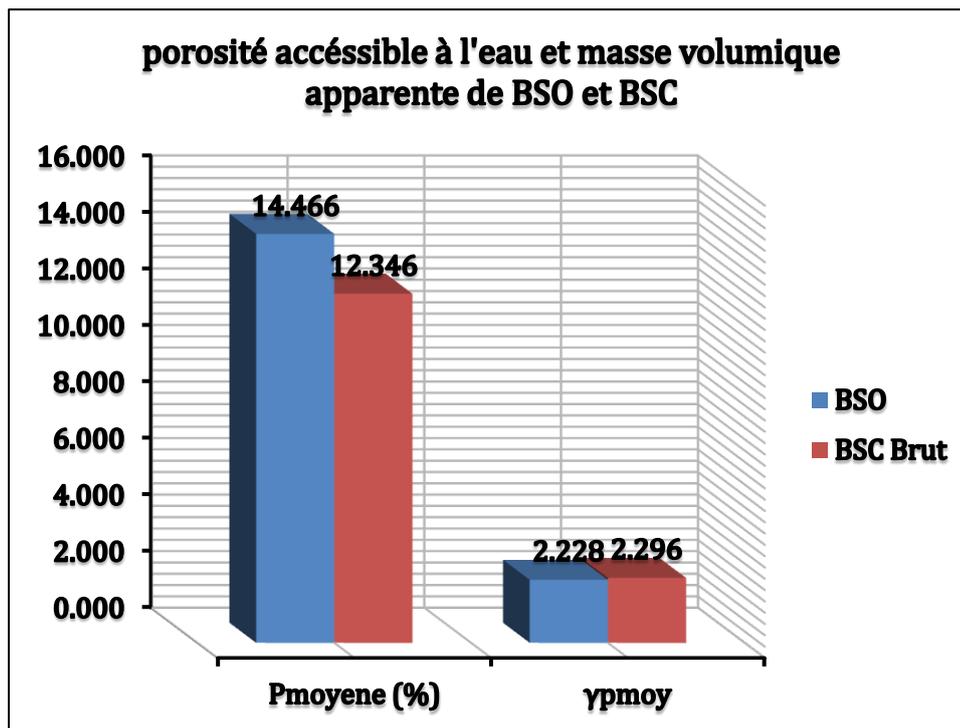


Figure III-23 : Évaluation de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente des bétons BSO et BSC brut

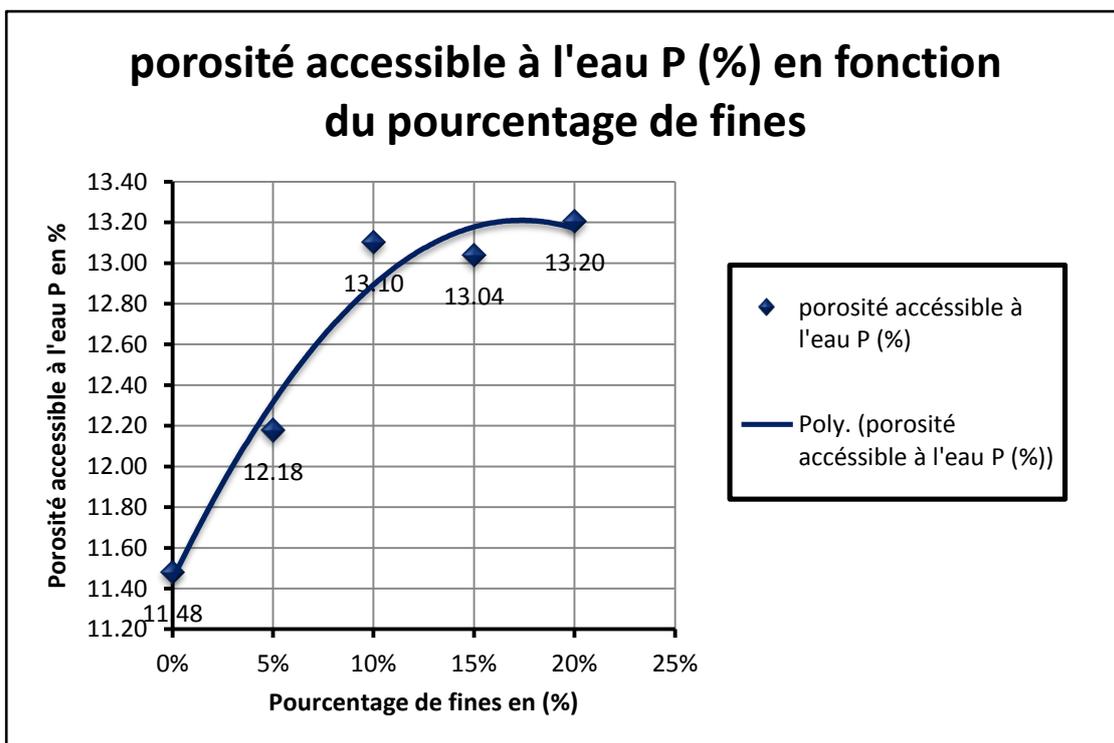


Figure III-24 : Évaluation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage de fines

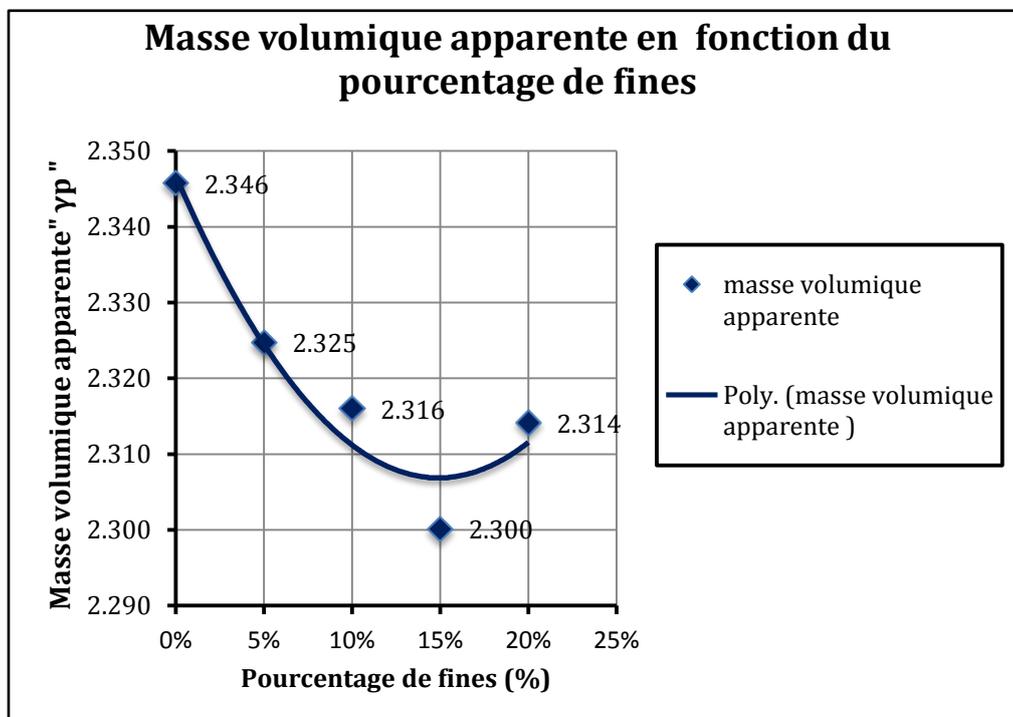


Figure III-25 : Évaluation de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage de fines

Interprétation des résultats :

La figure III-24 présente l'évaluation de la porosité accessible à l'eau en fonction du pourcentage de fines, les résultats montrent que la porosité accessible à l'eau augmente en fonction du pourcentage de fines ; ce ci est du à l'ajout des fines calcaires qui ont tendance à absorber l'eau [7].

la figure III-23 montre que la porosité du BSO (béton confectionné à base du sable d'oued) est élevée de 2,12% par rapport au BSC (béton confectionné à base du sable d'oued brute) ce qui n'est pas le cas pour leur masse volumique apparente, cette augmentation est due à la perméabilité du béton BSO non à la finesse du sable d'oued parceque les fines sphériques sont des réductrices d'eau, ce qui est le contraire pour les fines anguleuses.

Par contre la figure (III.25) montre une légère diminution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage de fines, qu'on peut expliquer par l'absorption d'eau par les fines qui provoque une augmentation du volume apparent du béton donc une diminution de la masse volumique apparente.

# **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a pour objectif de valoriser les sables de concassage issus des gisements des roches massives en évaluant les indicateurs de la durabilité des bétons. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les produits fins 3/8,8/15 présentent :
  - De bonne résistance aux chocs  $LA < 30$ .
  - Une bonne propreté pour la 8/15, par contre la 3/8 nécessite un lavage.
  - Une distribution granulométrique continue
- Le sable de carrière 0/3 contient 16,78 % de fines ce qui dépasse les teneurs prescrites dans les normes utilisées en Algérie.
- Le sable d'oued contient 9,12% de fines .ce résultat est conforme aux normes.
- L'équivalent de sable de carrière 0/3 a un équivalent de sable visuel de 74,37 et un équivalent de sable à piston de 67,42 avec une valeur au bleu méthylène  $VB = 0,07 < 1$  ce qui nous permet d'affirmer sa propreté.
- Le sable d'oued a un équivalent de sable visuel de 56,34 et un équivalent de sable à piston de 49,31 avec une  $VB = 0,4 < 1$  . ce résultat correspond à la norme.
- La profondeur de la carbonatation et la masse des bétons carbonatés diminuent en augmentant le pourcentage de fines, cette diminution est liée au colmatage des fissures entre pate-granulats par ces fines calcaires qui freinent la diffusion du  $CO_2$ .
- La vitesse de carbonatation augmente en fonction du temps pour tous les échantillons étudiés.
- La vitesse de la carbonatation dans les bétons confectionnés à base du sable d'oued (roulé) est plus importante à celle des bétons confectionnés à base du sable de carrière (anguleux).
- La porosité accessible à l'eau augmente en fonction de pourcentage de fines calcaires qui ont tendance à absorber l'eau.
- La porosité accessible à l'eau des bétons confectionnés à base du sable d'oued (roulé) est légèrement élevée par rapport à celle des bétons confectionnés à base du sable de carrière.
- La diminution de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage de fines est due à l'augmentation du volume apparent du béton.

## Conclusion et perspectives

---

L'analyse des résultats obtenus, montrent clairement que les fines calcaires issues du concassage influent sur la carbonatation des bétons et sur la porosité accessible à l'eau.

Les résultats de travaux antérieurs sur la formulation d'un béton à 15% de fines ont donné une résistance acceptable et un retrait minimum et nos résultats montrent qu'à 15% de fines la carbonatation est acceptable et la porosité accessible à l'eau est importante.

Toutes ces observations ont conduit à admettre une limite de 15% de fines dans la formulation des bétons qui nous donne une résistance à la compression acceptable, un retrait minimum, une porosité accessible à l'eau importante et moins de diffusion de CO<sub>2</sub> c'est-à-dire moins de corrosion d'armature. Ces résultats sont comparables à ceux obtenues avec le béton confectionné à base du sable d'oued (roulé).

Donc les sables de carrières peuvent être utilisés dans les bétons de structure si la qualité et le taux de fines sont conformes aux spécifications en vigueur. Ces fines sont considérées comme un constituant du béton, ayant une fonction bien définie, il est nécessaire donc qu'elle soit constante en caractéristiques et en qualité.

Dans ce travail nous avons montré que l'utilisation des sables de carrière n'altère en rien la qualité des bétons obtenus. Cependant, les producteurs de sables de carrière doivent veiller à ne pas dépasser les 15% en fines préconisés.

Ceci aura un double avantage : le premier étant la préservation de l'environnement en évitant l'extraction du sable des oueds, et le second est l'encouragement de la création des entreprises de production d'agrégats car la demande du marché est très importante.

En guise de perspectives, il serait intéressant de poursuivre cette étude en faisant évaluer d'autres indicateurs de la durabilité tels que : la diffusion des chlorures, la perméabilité au gaz O<sub>2</sub>, la perméabilité à l'eau...etc , afin de valoriser les sables de carrières dans la construction du bâtiment.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1]: F. Sadhouari, N. Goufi, A. Guezzouli ; « valorisation de l'utilisation des sables de concassage par analyse des propriétés des mortiers et béton » ; SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [2]: Groupement Belge du béton ; Technologie du béton, Edition 1998.
- [3]: BOROGHEL BOUNY. V ; « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons méthode, analyse, interprétation » thèse de l'ENPC, LCPC, paris 1994, p468.
- [4]: ADDAM.M.N ; « Propriétés des bétons » ; centre de recherche interuniversitaire sur le béton SHERBROUK –LAVAL-2000, Éditions Eyrolles.
- [5]: Communication ; « Le béton : Durabilité, solutions et innovation » ; 4<sup>eme</sup> séminaire sur les technologies du béton, hôtel Hilton (Alger), Octobre 2007.
- [6]: BIZET.A ; communication « Valorisation des sables de concassage » ; séminaire PUBLITECH, hôtel SOFITEL (Alger) ; juin 1995.
- [7]: (SABLOCRATE) ; projet nationale de recherche développement « Béton de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation » ; presse de l'école nationale des ponts et chaussées ; 1994.
- [8]: W.JAAFAR; « Influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons » ; thèse de doctorat ; Juin 2003.
- [9]: N. HYVERT ; « Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton » ; thèse de doctorat ; Toulouse ; Avril 2009.
- [10]: Bernard. QUENEE ; « Hydratation du ciment » ; document technique de LERM ; juin 2009.
- [11]: M.BUIL et J.P OLLIVIER ; « conception des bétons : la structure poreuse, durabilité des bétons » Press de l'ENPC p 57-99 ; 1992.
- [12]: Saïda. BOUALLEG ; « Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires » ; mémoire de magistère, soutenu en 2004 à l'université de M'sila.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [13]: Y.BENACHOUR-L.T.P .Est Constantine ; « contribution à l'étude de l'influence des fines sur les caractéristiques mécaniques du béton » ; thèse de magistère soutenue en 1992 à l'université de Constantine.
- [14]: S.KHERBACHE ; « Étude de l'influence de l'ajout de particules fines contenues dans les sables concassés sur le retrait et la résistance de béton » ; mémoire de magistère soutenu en 2006 à l'université de Bejaïa.
- [15]: D.BENYESSAD ; « valorisation des matériaux granulaires issus des gisements de roche massives de la wilaya de Bejaïa cas de SOMACOB Akbou ; mémoire de magistère soutenue en 2009 à l'université de Bejaïa.
- [16]: F.LEKDIM, S.SAÏDANI ; « Influence des fines contenues dans les sables concassés sur les caractéristiques d'un béton » ; mémoire de fin d'étude soutenu en 2005 à l'université de Bejaïa.
- [17]: R.BERTRANDY ; « influence des fillers calcaires sur la maniabilité des bétons » ; Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics ; N° 328 ; Paris ; mai 1975.
- [18]: Roger. LACROIX, Jean LUC CLEMENT ; « Propriétés des bétons armés et précontraintes » ; Lavoisier ; 2002.
- [19]: M.THEIRY ; « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires - prise en compte des effets cinétique et des modifications microstructurales et hydrique » ; thèse de doctorat soutenue en 2005 ; LCPC.
- [20]: Emmanuel-ROZIERES ; « Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle » ; thèse de doctorat soutenue en 2007 ; école nationale de Nantes.
- [21]: J.HOSTOMSKY et A-G.JONES; « Calcium carbonate crystallization, agglomeration and formduring continuous precipitation form solution; 1991; p 24:165-170.
- [22]: C-Y.TAI et F-B.CHEN; « Polymorphism of CaCO<sub>3</sub> précipitation in a constant composition environnement » ; 1998;AlchE Journal, 44(8) :1790-1798.
- [23]: K. TUUTTI; « corrosion of streel in concrete »; research institute; Stockholum; 1982.
- [24]: Y.F.HOUST;« carbonatation du béton et corrosion des armatures chantiers/suisse » ; 1989 ; 15 (6) :569-574.

## [25]: RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [26]: M.HAMADA; « Neutralization carbonatation of concrete and corrosion of reinforcing steel»; vol.III. International symposium on cement chemistry; 1968; Tokyo; p 343-369.
- [27]: T-C.POWERS; "A hypothesis on carbonation shrinkage"; 1962.
- [28]: E-G .SWENSON et P-J.SEREDA; "Mechanism of the carbonatation shrinkage of lime and hydrated cement"; J. appl. chem.; 1968 p 18: 111-117.
- [29]: M.VENUAT et J.ALEXANDRE ; "carbonatation du béton"; partie II; revue des matériaux de construction;1968; (639):469-481.
- [30]: Y-H. LOO, M-S.CHIN,C-T.TAM et K-C-G.ONG ;« A carbonatation prediction model for accelerated carbonatation lesting of concrete magazine of concrete research “ ;1994; p191-200.
- [31]: A. NEVILLE;"consideration of durability of concrete structures: past, present and future materials and structures"; 2001; p 34:144-188.
- [32]: Gilles CHANVILLARD; « le matériau béton: connaissance générale »ENTPE ALEAS ; octobre 1999.
- [33]: R.MIRAGLIOTTA ; « Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriquées-Pris en compte des effets de parois » ; thèse de doctorat ; 2000 ; Université de la Rochelle.
- [34]: J. Baron et J.PIERRE ; « la durabilité des bétons » ; 1992 p34.
- [35]: G. Dreux et J.FESTA ; « Nouveau guide du béton » ; 7<sup>eme</sup> édition ; 1995.
- [36]: Méthodes d'essai N°58 ; « caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons : méthode de mesures et d'essai de laboratoire » ; LCPC ; février 2002, paris.
- [37]: Ginette ARLIGUIE, Hugues HORMAIN ; Grandubé ; « grandeur associée à la durabilité » ; p 78-79-80 ; Presses des ponts 2007.

# ANNEXES

# Annexe (II-1)

---

## Analyse par diffraction RX d u ciment CPJ 42,5 CEM II B 52,5

No.	Position des pics [2 Theta °]	Intensité relative [%]	calcite	silice	quartz	bornite	alumina
1	14.9524	5.02	X				
2	23.15	3.66		X	X		
3	26.6858	2.26	X				
4	32.5679	22.13				X	
5	32.6699	24.34				X	
6	36.0816	5.39	X				
7	39.5255	8.3	X	X	X		
8	43.2597	6.29	X				X
9	45.8547	2.88		X			X
10	46.9864	3.5	X			X	
11	47.6029	5.56	X				
12	48.6634	4.57	X				
13	49.9576	1.47			X		
14	56.6314	6.27	X				
15	57.592	1.53	X		X		
16	60.034	2.86	X				X
17	60.9146	1.08		X	X		
18	83.6907	0.05	X	X	X		
19	86.4707	0.16	X				X
20	95.1611	0.39	X	X	X		X

# Annexe (II-2)

---

## Analyse par diffraction RX d u gravier 8/15

No.	Position des pics [2Theta°]	intensité relative [%]	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )
1	23.146	3.26	X
2	29.4908	100	X
3	31.5671	0.86	X
4	36.0725	3.82	X
5	39.5096	5.49	X
6	43.2483	5.58	X
7	47.1976	1.43	X
8	47.5922	4.6	X
9	48.5882	5.38	X
10	56.6503	1.01	X
11	57.5106	2.12	X
12	58.1832	0.27	X
13	60.7719	1.43	X
14	63.156	0.38	X
15	64.7547	1.92	X
16	65.7047	0.63	X
17	69.2507	0.19	X
18	72.9682	0.54	X
19	77.2466	0.48	X

## Annexe (II-3)

---

### Analyse par diffraction RX d u gravier 3/8

No.	Position des pics [2Theta°]	intensité relative [%]	calcite (CaCO <sub>3</sub> )
1	23.0411	6.35	X
2	29.389	100	X
3	31.4607	1.58	X
4	35.9597	7.73	X
5	39.3993	11.39	X
6	43.1618	10.72	X
7	47.1105	2.84	X
8	47.5018	10.16	X
9	48.5068	10.93	X
10	56.5513	1.48	X
11	57.4134	4.17	X
12	58.1641	0.42	X
13	60.681	2.42	X
14	61.3699	1.17	X
15	63.0795	0.71	X
16	64.6544	3.57	X
17	65.6362	1.57	X
18	69.1991	0.51	X
19	72.8924	0.94	X
20	76.3002	0.48	X
21	77.1965	1.02	X

## Annexe (II-4)

---

### Analyse par diffraction RX d u sable 0/3

No.	Position des pics [2Theta]	intensité relative [%]	calcite (CaCO <sub>3</sub> )
1	36.1303	5.97	X
2	47.2802	2.43	X
3	48.6748	8.23	X
4	57.5591	3.11	X
5	60.8578	2.03	X
6	63.2236	0.6	X
7	64.8342	3.81	X
8	69.3901	0.33	X
9	73.0566	0.95	X
10	76.4692	0.32	X
11	77.3129	0.7	X

### Analyse par diffraction RX des fines d u sable 0/3

No.	Position [2Theta °]	intensité relative [%]	calcite (CaCO <sub>3</sub> )
01	23.1687	6.1	X
02	29.5118	97.2	X
03	31.5734	1.65	X
04	36.0785	7.96	X
05	39.5139	10.61	X
06	43.2572	10.88	X
07	47.2068	2.41	X
08	47.6339	8.39	X
09	48.6102	8.97	X
10	56.6612	1	X
11	57.5249	3.75	X
12	60.8152	2.22	X
13	64.7897	2.56	X
14	65.7959	0.36	X
15	69.359	0.2	X
16	73.0282	1.22	X
17	77.2816	0.83	X

## Annexe (II-5)

### Analyse par diffraction RX d u sable d'oued

No.	Position des pics [2Theta°]	intensité relatives [%]	calcite	quartz	silice	alumine	green cinnabar
01	21.0714	13.15		X	X		
02	25.4431	1.83				X	
03	26.8442	100		X	X		
04	35.1237	0.78				X	
05	36.2387	2.89					X
06	36.768	3.6		X	X		
07	39.6784	7.32		X	X		
08	40.5072	2.35		X	X		
09	42.6569	5.64		X	X		
10	43.4327	2.46				X	
11	46.0296	3.25	X		X	X	
12	48.7653	4.44	X				
13	50.3476	7.14		X	X		X
14	55.0677	1.58		X	X		X
15	57.6757	1.42				X	
16	60.1405	6.42		X	X		
17	61.0897	0.78	X			X	
18	64.1738	0.65		X	X		
19	65.9448	1.08		X	X		
20	67.9049	2.23		X	X		
21	68.3071	3.38		X	X	X	
22	68.4887	3.69		X	X		
23	73.6058	1.24	X	X	X		X
24	75.8123	3.49		X	X		
25	77.8989	0.43		X	X		

# Annexe (III-1)

Profondeurs de la carbonatation ( $X_c$ ) 7 jours et 14 jours des éprouvettes des bétons en « mm »

Béton	nature du sable	7 jours							14 jours						
		Xc1	Xc2	Xc3	Xc4	Xc5	Xcmoy	Xc	Xc1	Xc2	Xc3	Xc4	Xcmoy	Xc	
béton à base de sable d'oued (BSO)	Brute	11	15	14	/	/	13.33	11.667	15	15	14	/	14.67	13.958	
		11	12	7	/	/	10.00		11	15	15	12	13.25		
béton à base de sable de carrière (BSC)	Brute	10	10	9	/	/	9.67	10.167	13	14	14	/	13.67	14.333	
		10	12	10	/	/	10.67		12	13	17	18	15		
		pourcentage des fines													
	0%	15	13	12	/	/	13.33	12.167	12	17	15	15	14.75	14.625	
		11	11	11	/	/	11		13	14	14	17	14.5		
	5%	10	9	8	12	/	9.75	9.000	10	15	14	/	13	11.500	
		8	8	8	9	/	8.25		10	10	10	/	10		
	10%	11	12	10	10	/	10.75	10.875	10	13	13	10	11.5	12.083	
		10	12	/	/	/	11		9	13	16	/	12.667		
	20%	5	7	5	7	/	6	7.167	8	7	7	9	7.75	8.625	
9		8	8	/	/	8.333	11		8	/	/	9.5			
15%	9	11	7	7	8	8.4	8.700	8	6	10	13	9.25	9.292		
	9	9	9	/	/	9		9	11	8	/	9.3333			

## Annexe (III-2)

Profondeurs de la carbonatation ( $X_c$ ) 28 jours et 35 jours des éprouvettes des bétons en « mm »

Béton	nature du sable	28 jours							35 jours							
		Xc1	Xc2	Xc3	Xc4	Xc5	Xcmoy	Xc	Xc1	Xc2	Xc3	Xc4	Xc5	Xcmoy	Xc	
béton à base de sable d'oued (BSO)	Brute	14	16	20	22	/	18	16.38	18	40	40	/	/	32.667	25.67	
		13	15	16	15	/	14.75		18	18	20	/	/	18.667		
béton à base de sable de carrière (BSC)	Brute	12	20	16	18	/	16.5	16.13	18	20	11	18	25	18.4	17.58	
		17	13	16	17	/	15.75		12	13	25	17	/	16.75		
	0%	pourcentage des fines														
		11	22	25	25	/	20.75	19.98	40	40	40	/	/	40	30.5	
	15	16	25	22	18	19.2	15		20	28	/	/	21			
	5%	pourcentage des fines														
		19	15	/	/	/	17	15	13	21	24	24	/	20.5	17.08	
	12	12	15	/	/	13	12		14	15	/	/	13.667			
	10%	pourcentage des fines														
		18	10	15	15	20	15.6	14.55	12	16	15	15	20	15.6	16.2	
16	11	14	13	/	13.5	19	18		19	10	18	16.8				
20%	pourcentage des fines															
	12	13	14	15	/	13.5	13.75	17	17	12	14	/	15	15.5		
15	12	15	/	/	14	16		14	15	19	/	16				
15%	pourcentage des fines															
	14	12	13	/	/	13	12.13	12	13	17	20	/	15.5	14.92		
10	12	14	9	/	11.25	13		13	17	/	/	14.333				

## Annexe (III-3)

### Évaluation de la porosité accessible à l'eau et les masses volumiques apparentes des bétons BSO et BSC

Béton	nature du sable	Masses mesurés sur éprouvettes de bétons ciés en "grs"			P (%)	Pmoyene	$\gamma_p$	$\gamma_{pmoy}$	
		Meau	Mair	Msec					
béton à base de sable d'oued (BSO)	Brute	2746	4720	4456	13.37	14.466	2.26	2.228	
		2978	5138	4830	14.26		2.24		
		2734	4764	4444	15.76		2.19		
béton à base de sable de carrière (BSC)	Brute	2986	5106	4846	12.26	12.346	2.29	2.296	
		2552	4360	4122	13.16		2.28		
		3072	5208	4960	11.61		2.32		
	pourcentage des fines								
	0%		3146	5322	5062	11.95	11.480	2.33	2.346
			2652	4482	4260	12.13		2.33	
			3042	5088	4876	10.36		2.38	
	5%		3102	5226	4990	11.11	12.179	2.35	2.325
			3240	5538	5236	13.14		2.28	
			2536	4262	4050	12.28		2.35	
	10%		2822	4770	4516	13.04	13.101	2.32	2.316
			3020	5152	4836	14.82		2.27	
			3070	5150	4912	11.44		2.36	
	15%		3190	5356	5094	12.10	13.040	2.35	2.300
			2758	4712	4450	13.41		2.28	
			2998	5128	4838	13.62		2.27	
	20%		2716	4570	4338	12.51	13.205	2.34	2.314
			3260	5506	5212	13.09		2.32	
			3106	5290	4984	14.01		2.28	

## Résumé

Les fines contenues dans les sables de concassage ont un rôle important sur la qualité de plasticité, d'ouvrabilité et durabilité des bétons, qui est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur.

Trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont : eau pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène.

Les mouvements de ces fluides se font par l'écoulement à travers le réseau poreux ou par mécanisme de diffusion et d'absorption.

Dans le but de connaître les effets des fines (particules < 80µm) contenues dans les sables de concassage sur la durabilité, nous avons effectué une étude d'évaluation de deux indicateurs principaux de la durabilité tel-que : la porosité accessible à l'eau et la carbonatation des bétons qui est la cause principale de la corrosion des armatures des ouvrages en béton armé.

Donc , cette étude à pour objectif de mesurer la porosité accessible à l'eau et la profondeur de la carbonatation des bétons incorporés par des fines des sables de carrière aux bétons en proportions variables et celle des bétons confectionnés à base du sable d'oued. En conclusion la profondeur de la carbonatation et la porosité accessible à l'eau sont influencés par la présence des fines.

**Mots- clés :** sable de concassage, fines, durabilité, porosité, carbonatation, corrosion.

## ABSTRACT

The fine sand contained in the crushing have an important role on the quality of plasticity, workability and durability of concrete, which is connected to its ability to exchange with the external environment.

Three main fluids that can penetrate into the concrete and to question its sustainability are: pure water or containing aggressive ions, carbon dioxide and oxygen.

The movement of these fluids is through the flow through the porous network or mechanism of scattering and absorption.

In order to know the effects of fines (particles <80µm) contained in the oil crushing on sustainability, we conducted an evaluation study of two key indicators of sustainability, such as: porosity accessible to water and carbonation of concrete is the main cause of reinforcement corrosion of reinforced concrete structures.

Therefore, this study aims to measure the porosity accessible to water and the depth of carbonation of concrete embedded with fine sand to concrete career in varying proportions and that of concrete prepared based sand wadi. In conclusion, the depth of carbonation and porosity accessible to water are influenced by the presence of fines.

**Key-words:** crusher dust, fine, durability, porosity, carbonation, corrosion.

## مُلخَص

للدقائق المحتواة في رمال الرضاضة الدور الهام في نوعية لدانة الخرسانات و صلاحية استخدامها وكذا ديمومتها، وذلك بفعل قدراتها على التبادل مع الوسط الخارجي.

هناك ثلاثة موانع يمكنها أن تتغلغل إلى داخل الخرسانة فتؤثر سلباً على ديمومتها وهي : الماء النقي أو المحتوى على أيونات عضوانية و غاز الفحم و كذا الأكسجين .

تنجم تحركات هذه الموانع عن السيلان عبر شبكة المسام أو عن آلية التوزيع والامتصاص .

أُنجزت في هذا البحث دراسة تقييمية لمؤشرين أساسيين للديمومة وذلك لمعرفة أثر الدقائق (دقائق > 80 µm ) التي تتضمنها رمال الرضاضة في هذه الديمومة ، وهذان المؤشران هما :

المسامية السُمُوحة للماء و كَرَبَنَة الخرسانات التي تُعدُّ السبب الرئيسي لتآكل الهياكل المنشآت الخرسانية المسلحة.

إذن، هذه الدراسة أُنجِزت بغرض قياس المسامية السُمُوحة للماء وكذا سرعة تغلغل الكَرَبَنَة داخل الخرسانات المدمجة بدقائق رمال المحاجر بدرجات متفاوتة وكذلك الخرسانات المعدة برمال الوديان . وقد تبين أن الدقائق المحتواة في رمال الرضاضة تساهم في امتصاص الخرسانة المسلحة للماء كما أن مسامية الخرسانة المسلحة المعدة برمال الوديان معتبرة، وأما سرعة تغلغل الكربنة فهي في علاقة عكسية مع كمية دقائق رمال المحاجر .

**الكلمات المفتاحية:** رمال الرضاضة - دقائق - ديمومة - مسامية - كَرَبَنَة - تآكل.

