

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

**Université Mohamed Boudiaf - M'SILA
Faculté de Technologie
Département de Génie-Civil**



THESE

Présentée en vue de l'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences
(Spécialité : Génie-Civil – Option : Matériaux)

**Présentée par :
MAZA MEKKI**

THEME

**Analyse des propriétés physiques et mécaniques du mortier à
base de sable mixte (sable de dune et sable concassé)**

Soutenue Publiquement le 23/11/2016.....

Devant le jury :

KHEMISSA Mohamed :	Professeur / Université de M'sila / Président de jury
NACERI Abdelghani :	Professeur / Université de M'sila / Rapporteur
BENOUIS Abdelhalim :	Professeur / Université de Guelma / Examineur
BOUDAOUD Zine-Eddine :	Professeur / Université d'Oum-El-Bouaghi / Examineur
RAHMOUNI Zine-El-Abidine :	Professeur / Université de M'sila / Invité

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail de thèse.

En second lieu, je tiens à remercier Monsieur NACERI Abdelghani, Professeur à l'université de M'sila pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur KHEMISSA Mohamed, Professeur à l'université de M'sila, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent également à Messieurs : RAHMOUNI Zine-El-Abidine, Professeur à l'université de M'sila, BENOUIS Abdelhalim Professeur à l'université de Guelma et BOUDAUD Zine-Eddine Professeur à l'université d'Oum-El-Bouaghi, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous le personnel des laboratoires de la Cimenterie de Hammam Dalâa "LAFARGE".

Résumé:

Les gisements calcaires exploités par les centrales de concassages concentrées au Nord du pays génèrent des quantités importantes de résidus inférieurs à 3mm non exploités qui constituent à la fois une gêne environnementale et une perte de matière première et occupent des aires de stockage importantes. Le premier objectif de ce travail expérimental porte essentiellement sur l'utilisation de ces résidus comme composant du mortier et du béton en substituant une partie de sable de dune dans le but d'améliorer les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques du mortier et du béton, de diminuer le coût de réalisation des constructions et de préserver les aires de stockages et contribuer à lutter contre la pollution de l'environnement. L'addition du sable concassé au sable de dune nous a permis d'obtenir un sable mixte normalisé de meilleures caractéristiques (granulométrie, module de finesse, masse volumique apparente, masse spécifique, porosité, absorption d'eau). Cette investigation nous a permis aussi d'analyser les propriétés du mortier (béton) frais et durci et a révélé une amélioration notable des propriétés rhéologiques du mortier (béton) frais et propriétés mécaniques du mortier (béton) durcis, l'augmentation du pourcentage de sable concassé a engendré un besoin en eau plus important qui a un effet néfaste sur la résistance mécanique alors l'incorporation de 1% de MEDAFLOW 30 (un réducteur d'eau) a permis de maintenir la quantité d'eau réduite. L'ajout de 40% à 50% de sable concassé a donné lieu à une augmentation de la résistance mécanique du mortier et du béton.

Mots-clés: Propriétés physiques et mécaniques, sable de dune, sable concassé, mortier, béton, adjuvant

ABSTRACT

This experimental study investigates the effect of using binary natural fine aggregates (dune sand and crushed sand) on mortar and concrete. This method is utilized to modify the particle size distribution of various sands used in mortar (concrete). For this investigation, two sands were used: a dune sand (DS) and crushed sand (CS) at different proportions in mortar. The effect of the quality and grain size distribution of natural fine aggregates (DS and CS) on the physical properties of binary sand concrete (apparent or bulk density, absolute or gravity density, porosity, fineness modulus, particle size distribution and water absorption). The properties of fresh and hardened mortar (concrete) were also analysed. The results obtained showed that the mechanical strength of mortar depends on the nature and particle size distribution of sand studied. This study shows the potential of this method to make mortar with binary sand (dune and crushed fine aggregates) in order to improve the physical properties of sand. The increase in the quantity of mixing water generated by addition of quarry waste was modified by the addition of a superplasticizer or water reducing admixture (Medaflow 30) what led to the improvement of the physical and mechanical properties of the mortar. The inclusion of crushed sand (CS) at replacement levels of 40 % to 50% resulted in a increase in the mechanical strength of the mortar. However, the improved performance was observed when quarry waste as fine aggregate was used in presence of chemical admixture (1% of Medaflow 30).

Keywords: Crushed sand; dune sand; chemical admixture; mortar; concrete, physico-mechanical properties.

SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	XI
Introduction	1
Contexte général de la recherche.....	1
Intérêts de la recherche... ..	3
Aperçu sur la thèse.....	4

Premier Chapitre Revue Bibliographiques Sur Les Granulats, Bétons ET Mortiers

1.1. Introduction.....	3

A- Granulats

1.2. Classification des granulats.....	6
1.3. Sable.....	6
1.3.1 Sable de dune	8
1.3.2 Sable de carrière.....	9
1-4 Fabrication des graviers et sable concassés.....	10
1-5 La dépendance des sables concassés de la roche maternelle.....	10
1.6 Rôle du sable dans le mortier et le béton.....	10
1-7 Evaluation de la qualité des sables	11
1-7-1 Forme des grains	11
1-7-2 Adhérence au liant.....	12

1-7-3 Granularité (composition granulométrique)	12
1-7-4 Grosseur du sable	16
1-7-5 Porosité du sable.....	16
1-7-6 Absorption	17
1-7-7 L'altérabilité des granulats (gravier, sable) et réaction alcalis-granulats.....	18
1-7-8 Impureté du sable.....	18
1-7-9 Traitement des sables	20
1-7-10 Choix des sables.....	21

B- BETON ET MORTIER

1-8 Structure du béton et mortier.....	21
1-9 Propriétés du béton (mortier).....	21
1-10 Adjuvants utilisés dans les bétons et mortiers	23
1-10-1 Mode d'action de l'adjuvant	23
1-10-2 Différents types d'adjuvants.....	23
1-11 Composition du béton	26
1-11-1 Méthode des volumes absolus.....	26
1-12 Composition de mortier	31

Deuxième Chapitre

Etat Actuel Des Connaissances

2.1 Introduction	33

A- Valorisation des sables de concassage

2- 2 Travaux généraux	33
2.2.1 Valorisation des sables de concassage dans les mortiers et les bétons courants.....	33
2.2.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires.....	42

2.2.3 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans ; les dans les bétons à hautes performances.....	46
2.2.4 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les ; bétons courants.....	47
2.2.5 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les . bétons autoplaçants	52
2-2-6 Conclusion.....	54

B- Ciment et processus d'hydratation

2-3 Introduction	54
2-3-1 Le processus d'hydratation du ciment:.....	55
2-3-1-1 Hydratation des silicates	55
2-3-1-2 La chronologie d'hydratation	56
2-3-2 Les propriétés des principales phases hydratées.....	58
2-3-2-1 La portlandite	58
2-3-2-2 Les silicates de calcium hydratés	59
2-3-2-3 Les aluminates de calcium hydratés	60
2-3-2-4 L'ettringite	60

C - Les superplastifiants et leurs modes d'action

2-4 Historique	61
2-4 -1 Utilisation, adsorption et mode d'action des superplastifiants.....	62
2-4-2 Paramètres influents.....	64
2-4-3 Conclusion.....	67

D - Béton:

2-5-1 Introduction	67.
2-5-2 Historicité	68
2-5-3 Les composants d'un béton	69
2-5-3-1 Pâte de ciment	70
2-5-3-2 L'eau.....	71
2-5-3-3 Les adjuvants	72
2-5-3-4 Les granulats.....	73
2-5-4 Malaxage des constituants	76
2-5-5 Qualités essentielles d'un béton	77

Troisième Chapitre

Matériaux Et Méthodes De Caractérisation

3. Introduction	99.
3.1 Identification des granulats	99
3.1.1 Les graviers.....	100
3.1.2 Sables	104
3.2 Le ciment.....	115.
3.2.1 Caractéristiques physico – mécaniques.....	115
3.2.2 Analyse chimique du ciment.....	116
3.3 Adjuvant.....	117
3.3.1 Action du MEDAFLOW 30.....	118.
3.3.2 Domaine d'application.....	118
3.3.3 Dosage	119.
3.4 Eau de gâchage.....	119
3.5. CONCLUSION.....	120

Quatrième Chapitre

Mortier a Base De Sable Mixte

Avec Et Sans Adjuvant

4.1 Introduction	121
4.2 Définition.....	121
4.3 Rôles.....	122
4.4 Détermination de la composition du mortier.....	122
4.4.1 Détermination de la composition du béton.....	122
4.5 Essais et procédures.....	124
4.5.1 Détermination de la fluidité du mortier frais par méthode d'enfoncement du cône (Méthode RUSSE).....	124
4.5.2 Détermination de la masse volumique.....	124
4.5.3 Détermination de la résistance mécanique du mortier durci.....	125
4.5.4 Capacité d'absorption.....	126
4.6 Discussion des résultats.....	130
4.6.1 Fluidité.....	130
4.6.2 Masse volumique.....	131
4.6.3 Capacité d'absorption.....	132
4.6.4 Rapport E/C.....	132
4.6.5 Résistances mécanique.....	133
4.7 Conclusion.....	140

Cinquième Chapitre

Béton a Base De Sable Mixte Adjuvanté

5.1	Introduction.....	142
5.2	Essais, Procédures et Résultats.....	143
5.2.1	Détermination de la composition du béton.....	143
5.2.2	Détermination de la fluidité du béton frais.....	145
5.2.3	Détermination de la résistance à la compression des bétons durcis à différents âges.....	145
5.2.4	Détermination de la masse volumique.....	146
5.3	Discussion et analyse des résultats.....	152
5.3.1	Fluidité.....	153
5.3.1.1	Réduction d'eau de gâchage	153.
5.3.1.2	Rapport E/C	154
5.3.2	Résistance mécanique.....	156
5.3.3	Masse volumique.....	160
5.4	Conclusion	164
	Conclusions générales et perspectives	166
	Bibliographie	168
	Annexe	181

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Classification des grains (d'après les normes Anglaise).....	11
Tableau 1-2: Fluidité des bétons frais.....	27
Tableau 1-3: Dosage en eau dans les bétons.....	28
Tableau 1-4: Valeur du coefficient α	29
Tableau 1-5: Consommation approximative de ciment.....	32
Tableau 2.1: Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, d'après Taylor.....	54
Tableau 2.2 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abram-norme NF EN 206-1.....	78
Tableau 3.1 : masse volumique apparente et masse volumique spécifique du gravier.....	100
Tableau 3.2 : Porosité – compacités – indice des vides.....	101
Tableau 3.3 : Coefficient d'absorption d'eau du gravier.....	101
Tableau 3.4 : Résultats d'essais Los Angeles.....	102
Tableau 3.5 : Analyse granulométrique des fractions de gravier.....	102
Tableau 3.6 : Analyse chimique du gravier concassé.....	104
Tableau 3.7 Dénomination des différents sables mixtes.....	104
Tableau 3.8 : caractéristique physique du sable de dune et sable concassé.....	105
Tableau 3.9 : Coefficient d'absorption du sable et taux d'humidité des sables.....	106
Tableau 3.10 : Equivalent de sable de dune et sable concassé.....	106
Tableau 3.11 : Analyse granulométrique du sable de dune et du sable concassé	107
Tableau 3.12: module de finesse des sables.....	108
Tableau 3.13 : Analyse chimique du sable de dune et du sable concassé.....	114
Tableau 3.14 : Caractéristiques du ciment (CPJ CEMII/A 42.5).....	116

Tableau 3.15 : Compositions chimiques du ciment CPJ CMII/A 42,5.....	116
Tableau 3.16 : Caractéristiques du MEDAFLOW 30.....	118
Tableau 3.17 : Masse moléculaire du superplastifiant.....	118
Tableau 3.18 : Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage.....	119
Tableau 4-1 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m ³ de béton.....	123
Tableau 4-2 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés sans adjuvant.....	126
Tableau 4-3 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés avec 1% de MEDAFLOW 30.....	127
Tableau 4-4: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	127
Tableau 4-5: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%)de MEDAFLOW 30.....	127
Tableau 4-6 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	128
Tableau 4-7 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30.....	128
Tableau 4-8 : Résistance à la traction des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	128
Tableau 4-9 : Résistance à la traction des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30.....	129
Tableau 4-10 : Résistance à la flexion des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	129

Tableau 4-11: Résistance à flexion des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30.....	129
Tableau 4-12 : Degré d'absorption des mortiers étudiés à base de sable mixte à l'âge de 28 jours.....	130
Tableau 5.1 : Dénomination du béton.....	142
Tableau 5.2 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m ³ de béton.....	144
Tableau 5.3 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable de dune.....	147
Tableau 5.4 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S1.....	147
Tableau 5.5 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S2.....	148
Tableau 5.6 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S3.....	148
Tableau 5.7 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S4.....	148
Tableau 5.8 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S5.....	148
Tableau 5.9 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte concassé.....	149
Tableau 5.10 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable de dune.....	149
Tableau 5.11 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S1.....	149

Tableau 5.12 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S2.....	149
Tableau 5.13 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S3.....	150
Tableau 5.14 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S4.....	150
Tableau 5.15 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S5	150
Tableau 5.16 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable concassé.....	150
Tableau 5.17 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable de dune.....	151
Tableau 5.18 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S1.....	151
Tableau 5.19 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S2.....	151
Tableau 5.20 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S3.....	151
Tableau 5.21 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S4.....	152
Tableau 5.22 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S5.....	152
Tableau 5.23 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable concassé.....	152

Liste des figures

Figure 1-1: Forme d'un granulat.....	12
Figure 1-2 : Fuseau de spécification pour les sables (Normes françaises).....	13
Figure 1-3 : Fuseau granulométrique français pour les sables utilisés dans les bétons.....	13..
Figure 1- 4: Fuseau de spécification pour la composition granulaire des sable utilisés dans les bétons (Normes françaises)	14
Figure 1-5 : Fuseau de spécification Anglais pour les sables utilisés dans les bétons	15
Figure 1-6 : Fuseau de spécification Russe pour les sables utilisés dans les bétons.....	15
Figure 1-7 : Fuseau de spécification pour les sables utilisés dans les mortiers	15
Figure 1.8 : Contrôle de fluidité du béton frais.....	30
Figure 2-1: Performances mécaniques des bétons à différents taux de poussière.....	35
Figure 2-2 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières ajoutées	36
Figure 2-3 : Teneur en air et densité des bétons frais à différents tau.....	37.
Figure 2-4 : Résistance à la compression des mélanges à différents taux de fille. À gauche le mélange BGK et à droite le mélange BGS	37
Figure 2-5 : Consistance des pâtes de ciment en fonction du pourcentage de substitution....	38
Figure 2-6 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression des pâtes de ciment.....	38
Figure 2-7 : Variation du rapport eau/ciment en fonction du pourcentage de fillers.....	39
Figure 2-8 : Variation de la densité réelle en fonction du pourcentage de fillers.....	39
Figure 2-9 : Variation de l'air en fonction du pourcentage de fillers.....	39
Figure 2-10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fillers	40

Figure 2-11 : Déformation des mortiers sans fillers ou avec remplacement partiel de 10 % de ciment par des fillers calcaires en masse.....	41
Figure 2-12 : Déformation des mortiers remplacés par 10 % en masse de fillers calcaires, et du mortier de contrôle.....	42
Figure 2-13 : Système de filtration des déchets de carrières (marquage circulaire) et récupération sous forme de poudres (marquage rectangulaire)	43
Figure 2-14 : Résistance à la compression des pâtes de ciments	44
Figure 2-15 : Résistance à la compression des BAP, le sable est remplacé partiellement par les fillers de carrières	46
Figure 2-16 : Résistance à la compression des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines.....	48
Figure 2-17 : Résistance à la traction des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines.	49
Figure 2-18 : Retrait en fonction du pourcentage de fines	49
Figure 2-19 : Performances mécanique des bétons calcaires	52
Figure 2-20 : Courbes d'étalement au cône d'Abrams des BAP pour les différentes combinaisons de sable roulé et de sable de concassage.....	53
Figure 2-21 : Résistance à la compression des BAP réalisés par Rmili	53
Figure 2-22 : Résistance à la traction des BAP réalisés par Rmili.....	53
Figure : 2.23 (a) grains de ciment (b) structure cristalline de la portlandite ; (c) image au MEB de cristaux de portlandite	58
Figure : 2.24 morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'Alite.....	60
Figure : 2.25 Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une peolote d'ettringite.....	61
Figure 2.26 : Utilisation d'un superplastifiant.....	63

Figure 2.27 : Mécanisme d'action d'un superplastifiant à base de polycarboxylates.....	64
Figure 2.28: Mécanisme d'action successive (Exemple de superplastifiant « Glenium » à base de polycarboxylates).....	64
Figure 2.29 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	69
Figure 2.30 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé.....	71
Figure 2.31 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie.....	72
Figure 2.32 : Utilisation des superplastifiants.....	73
Figure 2.33 : L'effet du dosage du superplastifiant.....	73
Figure 2.34 : Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres.....	75
Figure 2.35 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire.....	75
Figure 2.36 : Cycle de malaxage.....	76
Figure 2.37 : Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage.....	77
Figure 2.38 : Influence de la température du béton frais sur la demande en eau et sur l'affaissement.....	79
Figure 2.39 : Perte d'affaissement d'un béton au cours du temps.....	80
Figure 2.40 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement.....	80
Figure 2.41 : Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide.....	81
Figure 2.42 : Valeurs des résistances de la figure 1.15 en fonction du rapport C/E.....	84
Figure 2.43 : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport C/E.....	84
Figure 2.44 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton.....	85

Figure 2.45 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton.....	85
Figure 2.46 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme....	86
Figure 2.47 : Développement de la résistance de bétons confectionnés avec différents ciments pour un dosage de 335 kg/m ³	87
Figure 2.48 : Développement de la résistance de bétons de rapport E/C de 0,49 confectionnés avec différents ciments.....	87
Figure 2.49 : Les différents pores d'un béton, positionnement selon le milieu extérieur.....	88
Figure 2.50 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires.....	89
Figure 2.51: Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, influence du rapport E/C,.....	90
Figure 2.52 : Composition volumique d'une pâte de ciment hydraté sans apport d'eau externe, selon le modèle de Powers,.....	91
Figure 2.53 : Relation entre la résistance à la compression de mortiers et la porosité calculée à partir du volume des pores de diamètre supérieur à 20 nm.....	92
Figure 2.54 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton.....	93
Figure 2.55 : Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5.....	94
Figure 2.56 : Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment.....	95
Figure 2.57 : Augmentation relative de la résistance dans le temps de bétons ayant différents rapports E/C confectionnés avec un ciment portland ordinaire.....	95
Figure 2.58 : Augmentation de la résistance de bétons (mesurée sur des cubes modifiés de 150 mm) sur une période de plus de 20 ans ; condition de conservation humide.....	96

Figure 2 .59 : Influence de la température des deux premières heures suivant la mise en place sur la résistance du béton.....	97
Figure 3.1 : gravier issu de pierres concassées.....	100
Figure 3.2 : Analyse granulométrique des fractions 3 /8 et 8/16.....	103
Figure 3.3 : DRX du gravier concassé.....	104
Figure 3.4 :(a) sable de dune de Boussaâda, (b) sable concassé d’el Euche.....	105
Figure 3.5 courbe granulométrique du sable de dune.....	108
Figure 3.6 : Courbe granulométrique du sable concassé.....	109
Figure 3.7 : Courbe granulométrique du sable mixte S1.....	109
Figure 3.8 : Courbe granulométrique du sable mixte S2.....	110
Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable mixte S3.....	110
Figure 3.10 : Courbe granulométrique du sable mixte S4.....	111
Figure 3.11 : Courbe granulométrique du sable mixte S5.....	111
Figure 3.12 courbe granulométrique des sables mixte.....	112
Figure 3.13 : DRX du sable de dune.....	112
Figure 3.14 : DRX du sable concassé.....	113
Figure 3.15: DRX du sable mixte (60% S.de dune ,40% S. concassé).....	113
Figure3.16 : DRX du sable mixte (40% S.de dune, 60% S. concassé).....	113
Figure 3.17 : DRX du sable mixte (30% S.de dune ;70% S concassé).....	114
Figure 3.18 : DRX du sable mixte (70% S.de dune ;30% S concassé).....	114
Fig. 4-1 : Modélisation du mortier au béton équivalent (MBE).....	121
Figure 4-2 : Confection des éprouvettes prismatiques en mortier.....	124
Figure 4-3 : Détermination de la masse volumique des éprouvettes par pesage.....	124
Figure 4-4 : Mesure de la résistance à la flexion des éprouvettes 4X4X16 cm.....	126
Figure 4-5 : Mesure de la résistance à la compression sur demi- prismes.....	126

Figure 4-6 : Variation d'E/C du mortier en fonction du % de sable concassé	131
Figure 4-7 : Variation de la masse volumique du mortier en fonction du % de sable concassé.....	131
Figure 4-8 : Capacité d'absorption du mortier en fonction du % de sable concassé.....	132
Figure 4-9 : E/C fonction de la porosité du sable mixte.....	133
Figure 4-10 : E/C fonction de la capacité d'absorption du sable mixte sans adjuvant.....	134
Figure 4-11 : E/C fonction de la capacité d'absorption du mortier mixte avec adjuvant.....	134
Figure 4-12 : Resistance en compression à 28 jours en fonction du % de sable concassé....	136
Figure 4-13 : Resistance en flexion à 28 jours en fonction du % de sable concassé.....	136
Figure 4-14: Resistance en traction à 28 jours en fonction du % de sable concassé.....	137
Figure 4-15: Résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte.....	138
Figure 4-16 : Résistance à la flexion à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte...	138
Figure 4-17 : Résistance en traction des mortiers à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte.....	139
Fig 4- 18: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant...	139
Fig 4- 19: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant...	139
Fig 4- 20: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant	140
Fig 4- 21: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant.....	140
Fig 4- 22: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant.....	140
Fig 4- 23: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant	140
Figure 5.1 : compositions des bétons étudiés.....	142
Figure 5.2 : Mesure de l'affaissement du béton frais au cône d'Abrams.....	145
Figure 5.3 : Mode de Conservation des échantillons avant leur écrasement.....	147

Figure 5.4 : Sciage des éprouvettes 16 x 32 cm de béton.....	147
Figure 5.5 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de mortier.....	155
Figure 5.6 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de sable concassé.....	155
Figure 5.7 : Rapport E/C en fonction de la porosité du sable mixte.....	156
Figure 5.8 :Rc en fonction du mortier à 28j	157
Figure 5.9 :Rc en fonction du sable mixte à 28j	158
Figure 5.10 :Rc en fonction de la porosité à 28j	159
Figure 5.11 : Rc dans le temps avec sable mixte S2.....	160
Figure 5.12 : Masse volumique à 28Jours en fonction pourcentage de mortier	161
Figure 5.13 : Masse volumique à 28 Jours en fonction du sable mixte.....	161
Figure 5.14 : Masse volumique à 28Jours en fonction la porosité du sable mixte.....	162
Figure 5.15 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S2.....	163
Figure 5.16 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S3	163
Photo1:(70%mortier,30%gravier)	164.
Poto2:(60% mortier,40%gravier).....	164
Photo3:(50%mortier,50%gravier)	164
Poto4:(40% mortier,60%gravier)	164
Poto5:(30% mortier,70%gravier)	164

INTRODUCTION

Contexte général de la recherche :

Le sud de l'Algérie est connu pour ses dunes de sable, qui ornent les cartes postales et sont des destinations touristiques, mais aussi qui engloutissent les terres et les palmeraies et envahissent certaines oasis. De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple. En génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie, sont autant de raisons qui poussent à poursuivre l'exploitation de ce produit.

Les dix dernières années L'Algérie a connue une explosion dans le domaine de la construction des bâtiments, des infrastructures, des ouvrages d'art, la construction de routes et de 1300km d'autoroute pour répondre aux besoins toujours en hausse des citoyens et le développement du pays, alors de gros approvisionnements en matériaux sont exigés, les sables roulés alluvionnaires sont les plus couramment utilisés pour la confection des bétons et mortiers entrant dans ces ouvrages, les prélèvements excessifs de ces sables risquent fortement de contribuer à l'épuisement des ressources et de provoquer des retombées néfastes sur l'environnement.

Le même problème se pose dans plusieurs régions du monde et vivent la même situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats pour mortier et béton. Les sables de concassage présentent sans aucun doute la meilleure alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières sont souvent considérés par les utilisateurs comme des « déchets », car ils sont riches en fines, parfois argileuses au demeurant. Ils sont alors quasi-systématiquement écartés pour un usage dans les bétons, bien que les spécifications d'emploi le permettent dans de nombreux cas.

Plusieurs pays ont déjà été amenés à prendre des mesures de préservation des ressources alluvionnaires en imposant des règles strictes limitant les prélèvements. L'Algérie par exemple a élaboré en 2005 [Loi n° 05-12, 2005] une instruction ministérielle organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux [Instruction,

2007]. Une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable. C'est le cas aussi au Maroc où une loi relative à l'exploitation des carrières a été promulguée en 2002 [Dahir n° 1-02-130, 2002]. Elle vise à valoriser les sables de concassage lavés en tant qu'alternative aux sables alluvionnaires pour la fabrication des bétons hydrauliques [Norme Marocaine 10.1.165, 1995]. Cette loi introduit de nouvelles exigences normatives propres à ce matériau.

Pour surmonter la forte demande en agrégats, il est nécessaire d'assurer une exploitation rationnelle des ressources disponibles dans le pays par une valorisation de déchets minéraux tels que les déchets de carrière, laitier de haut fourneau, déchets de briques, déchets de tuiles et céramiques et les déchets de sous-produits industrielle qui sont jusqu'à présent rarement utilisés en Algérie. Dans le cadre d'une politique de préservation du patrimoine national, Il est donc indispensable et nécessaire d'utiliser les déchets de carrières, déchets de sous-produit industriels,...etc dans la production de matériaux de construction.

En Algérie, des agrégats fins naturels ont été traditionnellement utilisées dans les mortiers et bétons. Cependant, de plus en plus de restrictions environnementales relatives à l'exploitation du sable de rivières et du sable de dune ont donné lieu à une recherche de matériaux alternatifs pour produire des granulats fins, en particulier près des grandes zones d'extension de grande agglomération et villes. Les granulats fins issus de la fabrication des graviers par les centrales de concassages (carrières) sont alors apparus comme une alternative intéressante aux agrégats fins naturels (sable de dunes) pour la fabrication des mortiers de ciment et de différentes sortes de bétons.

Les agrégats fins sont des matériaux granulés inertes utilisés dans la fabrication des mortiers et bétons. Pour réaliser un bon mélange de mortier et béton, les granulats fins doivent être propres, dur, fort et ne comportant pas de produits chimiques absorbés et d'autres matières fines qui pourraient entraîner la détérioration du béton et du mortier. Malheureusement, la majorité des sables naturels utilisés (sable de rivière, sable de dunes et le sable de mer) sont choisis pour des raisons de coût et de disponibilité [1,4]

Les propriétés du sable affectent la durabilité et la performance du mortier. Comme les granulats fins sont le composant essentiel du mortier, la forme et la texture des particules de sable concassé pourrait conduire à l'amélioration de la résistance du béton grâce à l'angularité et la rugosité des particules qui offrent un meilleur mode de serrage et une meilleure adhérence pâte ciment particules [6,8].

Les agrégats ont une influence significative sur les deux propriétés essentielles rhéologiques et mécaniques du mortier et du béton. Leur poids spécifique, la distribution de la taille des particules et la texture de surface influent nettement les propriétés des mortiers et bétons à l'état frais. D'autre Part, la composition minéralogique, la ténacité et le degré d'altérabilité des agrégats affectent les propriétés du mortier et du béton à l'état durci [7,10].

La durabilité des ouvrages est l'une des majeurs préoccupations des maîtres d'ouvrages, alors une grande importance est donnée à la qualité des granulats utilisés qui ne peut être sous-estimée. Les agrégats occupent généralement entre 60% et 75 % du volume du béton (70 % à 85 % en masse) et influent fortement les propriétés du béton frais et durci. Par conséquent, la sélection des agrégats est un processus important.

Bien que certaines caractéristiques globales des propriétés qui sont prises en compte lors de la sélection des agrégats devraient comprendre les paramètres suivants: la forme des particules, la texture de la surface, l'abrasion, la masse volumique, la masse spécifique, porosité et l'absorption d'eau [11,14].

Intérêts de la recherche

✓ Intérêt général

L'intérêt premier de cette recherche est la valorisation des sables de concassage pour la fabrication des mortiers et bétons, avec ou sans superplastifiant, en tant que ressource alternative aux sables alluvionnaires surexploités. Ainsi, les ressources alluvionnaires encore disponibles pourront être préservées pour les usages les plus nobles (bétons performants par exemple) [9, 15, 17].

Nous nous sommes donc intéressés à la valorisation de ce type de sable. Compte tenu de sa granulométrie (sable très fin, naturellement inférieur à 0.5 mm), de sa morphologie, de sa propreté et de sa dureté, nous nous sommes focalisés sur sa valorisation dans les Bétons et mortiers.

Nous pouvons raisonnablement penser que le remplacement d'une partie de sable de dune par le sable concassé permet d'améliorer les caractéristiques du mortier et béton et de contribuer à la préservation de la nature des fines générées par les carrières.

On propose aussi d'utiliser le sable mixte (de concassage et de dune) pour fabriquer des bétons autoplaçants, l'idée innovante étant que les sables calcaires fillérisés apportent directement la majeure partie des fines nécessaires au mélange. Incidemment, il s'agit également d'améliorer la durabilité des bétons et mortiers actuels car les sables alluvionnaires utilisés sont généralement pauvres en fines (lavage), conduisant ainsi à des bétons plutôt poreux. Ils contiennent parfois aussi des sels marins pouvant compromettre la pérennité des armatures. Les sables calcaires concassés ne présentent pas cet inconvénient.

✓ Intérêts scientifiques :

Ces dernières années, le béton est devenu, grâce à des progrès scientifiques qui ont mobilisé les principales disciplines de la science des matériaux, d'une extraordinaire diversité. S'il est toujours le matériau de construction le plus simple à fabriquer et à mettre en œuvre, avec des matières premières courantes et un matériel rudimentaire, il est aussi capable,

aujourd'hui, grâce à une technologie de formulation sophistiquée, d'approcher les performances mécaniques de l'acier, de présenter une résistance exceptionnelle aux attaques

physiques et chimiques et son extraordinaire aptitude à répondre à des cahiers des charges de plus en plus exigeants et celui d'un merveilleux champ d'expérience pour la Science.

Un mélange bien dosé entraîne un squelette granulaire le plus compact possible, cela va donc favoriser certaines propriétés du béton à l'état frais (écoulement et aptitude au filage) mais aussi certaines propriétés du matériau à l'état durci (résistance et durabilité) [1].

La porosité du béton et du mortier dépendent du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores.[2]

Mais sachant bien que la matrice du béton est composée de mortier et de gros granulats (graviers) donc pour obtenir un béton de qualité supérieure il faut donner beaucoup d'attention aux constituants de la matrice du béton (mortier et graviers), il est souvent avancé que l'adhésion entre le gravier et le mortier conditionne la résistance mécanique des bétons [3, 4].

On constate que le sable est l'élément inerte essentiel entrant dans la composition du mortier, une granularité continue du sable permet d'obtenir un squelette plus résistant et plus compact suite au remplissage successif par des grains de dimensions inférieures des vides laissés entre les grains de dimensions supérieures [5].

Le sable de dune, du fait du taux de fines élevé qu'il renferme et de l'homogénéité de ses particules qui engendrent des vides, aura naturellement pour effet d'accroître leur eau de mouillage, leur présence devrait, donc, conduire à un accroissement du rapport E/C et une diminution de l'adhérence des particules à la pâte de ciment entraînant inévitablement une baisse des performances mécaniques des mortiers [6].

L'ajout du sable concassé (résidus) contribue à l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques du béton et du mortier en corrigeant la granulométrie, diminuer la porosité du sable de dune, valoriser les ressources existante et contribuer à préserver l'environnement des fines générées par les carrières.

Alors, la formulation d'un béton ou d'un mortier sans ou avec adjuvant à partir de sable mixte ouvrirait de nouvelles perspectives aux chercheurs et aux entreprises de génie civil, en Algérie comme ailleurs.

Aperçu sur la thèse :

Cette thèse est constituée de six chapitres.

Chapitre 1 : Revue générale (donnant des généralités sur les caractéristiques des composants du béton et mortier, ainsi que les différentes méthodes de compositions).

Chapitre 2 : Etat actuel de connaissance sur : la valorisation des sables de concassages, l'hydratation du ciment, les superplastifiants et leurs modes d'action, les paramètres essentiels influant les caractéristiques rhéologiques, mécaniques du béton à l'état frais et durcis.

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux utilisés, description du matériel et essais effectués).

Chapitre 4 : Mortiers à base de sable concassés avec et sans adjuvants (comportant la discussion des résultats obtenus).

Chapitre 5 : Béton à base de sable concassés avec et sans adjuvants (comportant la discussion des résultats obtenus).

Chapitre 6 : Finalement, ce mémoire s'achève sur une conclusion générale des travaux réalisés et présenter les perspectives d'études de ces nouveaux mortiers et bétons fabriqués à partir de sable mixte (de dune et concassé) avec et sans adjuvant.

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRANULATS, BETON ET MORTIER

1-1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présente une revue générale en ce qui concerne les propriétés principales des granulats, notamment des granulats fin (sable), des adjuvants chimiques et quelques notions sur les bétons et mortiers dans lesquels les sables et les adjuvants sont souvent utilisés. Cela concerne l'objectif de cette présente thèse.

A- Granulats :

1-2 Classification des granulats :

Les granulats sont classés en catégories en fonction de leurs dimensions. Les règles AFNOR recommandent la classification et les appellations suivantes en fonction des diamètres des trous de passoire pour tamisage. [20-24]

-Farine, fines ou filler	- 0 - 0,1mm;
-Sable fin	- 0,1 – 0,4mm;
-Sable moyen	- 0,4 - 1,6mm;
-Sable gros	- 1,6 - 6,3mm;
-Gravillons (graviers) petit	- 6,3 - 10 mm;
-Gravillons moyens	- 10 - 16 mm;
-Gravillons gros	- 16 - 25 mm;
-Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) petits	- 25 - 40 mm;
- Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) moyens	- 40 - 63 mm;
- Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) gros	- 63 - 100 mm.

Cette classification s'avère très détaillée et la limite de séparation du sable (granulat fin) et du gros granulat (gravier) est 6,3 mm. Dans la pratique actuelle cette limite est fixée à 5 mm [20-21-24].

1.3 Sable :

On appelle couramment sables les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 35%.

A cette définition se rattachent les sables de concassage mais lorsque l'on parle "sables" on pense essentiellement aux sables naturels ; ces derniers sont abondant dans de nombreux pays où les réserves sont quasi inépuisables.

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches suivies d'un transport fluvial et par fois éolien. En règle générale, les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressive vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les plus résistants ; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituées de quartz devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît.

C'est ainsi que la fraction comprise entre 0,2 et 0,5mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%. Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent :

- grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau) ;
- grains ronds et mats (déplacement par le vent) ;
- grains non usés.

A côté du quartz, on trouvera dans la fraction la plus grossière des débris de roche et, présents en faibles quantités des débris de feldspath. Il est à noter que ces derniers sont surtout sous forme d'argile obtenue par destruction du réseau minéral par hydrolyse et en particulier en climat tropical caractérisé par une attaque chimique intense.

A cette composition classique des sables, peuvent s'ajouter des sulfates et des carbonates provenant de la cristallisation sous l'action de l'évaporation de sels en solution (en particulier dans les zones arides à faible pluviosité et forte évaporation).

En définitive, selon leur histoire géologique, les sables se distingueront les uns des autres par une multitude d'aspect : granulométrie, teneur et nature des fines, nature minéralogique, angularité, dureté, présence de matières humiques.

En Algérie, on fabrique des graviers de fraction 3/8 , 8/15 , 15/25,... C'est évident que la fraction qui précède la fraction 3/8 est considérée comme sable concassé.

On distingue les différents types de sable suivants.

i/ sable de dune : C'est une variété de sable de mer de qualité médiocre, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins.

ii/sable de carrière: Exploité à la carrière, souvent il contient de l'argile qui enrobe les grains de sable et empêchent ainsi la bonne adhérence pour remédier. Il faut un lavage pour débarrasser le sable des poussières et impuretés.

iii/sable de mer: Il est exploité sur les plages de mer. Il est généralement propre mais fin et chargé de sel et il est employé dans le béton après lavage. Mais il faut éviter son utilisation pour les ouvrages en élévation (dans le béton armé).

iv/ sable de rivière : Il est extrait par dragage du lit des cours d'eau. En général il est propre, mais il faut éviter que la fraction fine du sable soit emportée par le courant d'eau lors du dragage. Car le manque de la partie fine augmente la quantité du ciment dans le béton ou mortier.

v/Sable artificielle: c'est un sable de broyage ou de concassage obtenu à la centrale de concassage en broyant des roches dures, des tuiles, des briques et des scories (sous produits des hauts fourneaux).

Le sable de dune est un sable naturel et le sable de carrière est appelé concassé qui font l'objet d'étude de cette présente thèse.

1.3.1 Sable de dune :

Le sable de dune est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation de différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée à partir du quartz. Il se caractérise par une granulométrie fine et très serrée [51].

Aujourd'hui, lorsqu'on évoque le sable de dune, c'est principalement pour rappeler qu'il englutit les terres, les palmeraies, et menace d'envahir certaines oasis.

Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers. Mais, l'utilisation de cette matière avec sa forme actuelle, comme constituant principal du béton, n'apparaissait qu'après la naissance du béton de sable en 1853 par COIGNET.F [50].

Pourtant, en modifiant notre point de vue, le sable de dune peut être considéré comme une source quasi inépuisable de matériau. L'utilisation et l'exploitation future de ce type de sable constituent ainsi une des nouvelles préoccupations des chercheurs et intéressent différents domaines comme la microélectronique, l'énergie solaire (cellule photovoltaïque), la métallurgie, le génie civil, et le génie mécanique. Ses applications et son exploitation sont liées à sa teneur en silice et à la taille, la forme et la nature de ses grains .

Un grand intérêt s'inscrit pour la valorisation du sable de dune, son exploitation en génie civil présente un grand atout économique et environnemental pour l'Algérie. La hausse de la demande du sable de construction dans ce pays et l'incapacité des carrières locales à fournir du sable fin de granulométrie inférieure à 2 mm s'impose.

1.3.2 Sable de carrière :

Les matériaux de carrières calcaires sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées, par effet de blocage mécanique du système, du moins si leur résistance intrinsèque le permet. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau

(efficace) plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

Généralement, les sables de concassage présentent une bonne distribution granulaire, comparativement aux sables de rivières lavés qui manquent souvent de fines. Les classes granulaires de la plage [0,1 - 0,5 mm] présentent dans les sables de concassage sont essentielles à la stabilité du béton frais [53].

1-4 Fabrication des graviers et sable concassés :

Dans la nature la décomposition des roches peut-être naturelle sous l'action des éléments climatiques (gel, ruissèlement des eaux). Pour la décomposition artificielle, on choisit alors des affleurements d'un accès facile que l'on abat par tranches verticales de 3 à 6m de haut au moyen d'explosifs. Les débris d'explosion sont morcelés au marteau piqueur, puis envoyés dans des concasseurs successifs qui les réduisent à la grosseur voulue. Les produits concassés sont tirés les passoirs tournantes appelées trommels et les éléments trop gros sont retournés aux concasseurs. On obtient ainsi des graviers de différentes fractions et du sable concassé.[24]

1-5 La dépendance des sables concassés de la roche maternelle :

Le sable concassé dépend de la roche maternelle en composition chimique, minéralogique, description pétrographique, dureté, stabilité physique et chimique et même de la couleur. Mais les autres propriétés sont différentes de la roche maternelle la forme, la texture de la surface, l'absorption d'eau,...etc. [20]

Les granulats en générale et le sable en particulier doivent provenir des roches :

-Stables, c'est-à-dire inaltérables à l'air, à l'eau et au gel. Ce qui exclut les roches feldspathiques et les schistes;

-Dures et n'ayant pas tendance à se feuilletter (comme nombreux, calcaires et schistes). Inattaquables par les ciments (certaines roches alcalines sont attaquées par les ciments alumineux).[24]

1-6 Rôle du sable dans le béton et mortier :

Dans le béton, le granulat occupe 3/4 de son volume et le sable occupe presque un tiers du volume total des granulats (sable et gravier).

Le mauvais sable ne donne pas des bétons et des mortiers de haute qualité. Il influe considérablement sur la stabilité et la performance structurale de ces derniers. Le sable (granulat) est toujours moins cher que le ciment, c'est pourquoi l'augmentation du dosage en sable conduit à une diminution du coût des bétons et mortiers. Mais la qualité du béton et mortier est surtout importante, alors il faut choisir le sable adéquat pour confectionner ces matériaux.

1-7 Evaluation de la qualité des sables :

1-7-1 Forme des grains :

Les normes Anglaise classent les formes des grains du granulat comme indiqué dans le tableau 2-1.[24]

Tableau 1-1: Classification des grains
(d'après les normes Anglaise) [24]

Classe	Description	Exemple
Ronde	Forme arrondie par l'attrition de l'eau	Sable déposé sur les rivières des fleuves, plages de mer, emporté par le vent
Irrégulière	Naturellement ou artificiellement irrégulier par l'attrition, et ayant des arrêtes arrondies	-----
Forme de plaquette	Matériaux dont l'épaisseur est relativement moins que les deux autres dimensions	-----
Anguleuse	Matériaux ayant des arrêtes vives et surface rugueuse	Gravier et sable concassé, laitier concassé
Forme d'aiguillé	Matériaux dont la longueur est considérablement plus grande que les deux autres dimensions	-----
Forme d'aiguillé et de plaquette	Matériaux ayant la longueur considérablement plus grande que la largeur et cette dernière est plus grande que l'épaisseur	-----

On distingue les formes suivantes pour les sables naturels : Anguleux ,sub-anguleux, sub-arrondie, rond et très rond.

Pour le granulat artificiel les concasseurs à mâchoires ont tendance à produire des granulats de mauvaise forme, écaillé, plaquettes, éléments plats [20]. Le coefficient volumétrique C_v permet de donner une idée précise sur la forme de l'élément considéré [29]. Pour un grain il est défini comme le rapport entre le volume V de grain et le volume V' de la sphère circonscrite de diamètre d (d - étant la plus grande dimension du grain) (voir figure 1-1)

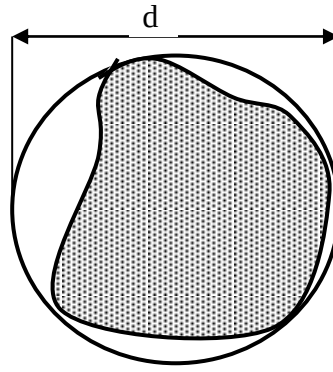


Figure 1-1: Forme d'un granulat

Pour un ensemble de grains on a :

$$C_V = \sum V_i / \sum (\pi d_i^3 / 6)$$

Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de plats et un coefficient élevé correspond à un granulat "cubique" ou "arrondi".

La notion de coefficient volumétrique est juste pour toutes sortes de granulats, y compris le gravier et le sable. Mais pour le sable le coefficient volumétrique est très difficilement réalisable par suite de la petite grosseur de ses grains surtout de la partie fine.

1-7-2 Adhérence au liant:

L'adhérence est un facteur important de la résistance à la traction des bétons et mortiers ainsi que leur résistance à la compression. A cet égard, les granulats (graviers et sable) des roches altérables et susceptibles de réagir au contact de ciment, sont à utilisées avec précaution.

Les sulfates (ex gypse) et les sulfures (ex pyrite) provoquent la désagrégation du béton par augmentation de volume des parties qui les contiennent. Le sable concassé possède une bonne adhérence avec le ciment dans les bétons et mortiers par suite de sa forme anguleuse et ses surfaces rugueuses. L'interaction chimique des granulats avec la pâte de ciment se manifeste en cas des sables d'origine calcaire et dolomitique [22,24].

1-7-3 Granularité (composition granulométrique) :

La composition granulométrique est présentée par les proportions des grains de différentes grosseurs. Les sables doivent avoir la bonne granularité, c'est-à-dire avoir des proportions rationnelles des grains de différentes dimensions, pour qu'ils aient la porosité minimale. La bonne granularité conduit à la bonne qualité du sable [22, 23, 24].

La composition granulométrique d'un sable est déterminée en tamisant le sable sec à travers un jeu standard de tamis dont les dimensions des trous sont de haut en bas : 5;2,5;1,25; 0,63; 0,315; et 0,14 mm ou encore des tamis intermédiaires. On détermine alors le refus partiel et le refus cumulé sur chaque tamis et le tamisât passant à travers chaque tamis.

La composition granulométrique est exprimée par une courbe granulométrique qui est formée sur la base des tamisât ou refus cumulés. Cette courbe doit se trouver entièrement dans

une zone normalisée (dite fuseau de spécification), ce qui traduit une bonne granularité du sable. Le fuseau de spécification est prescrit dans les normes de différents pays sous différentes formes. Ci-dessous nous présentons quelques uns dans les figures 1-2 jusqu'à 1-7.

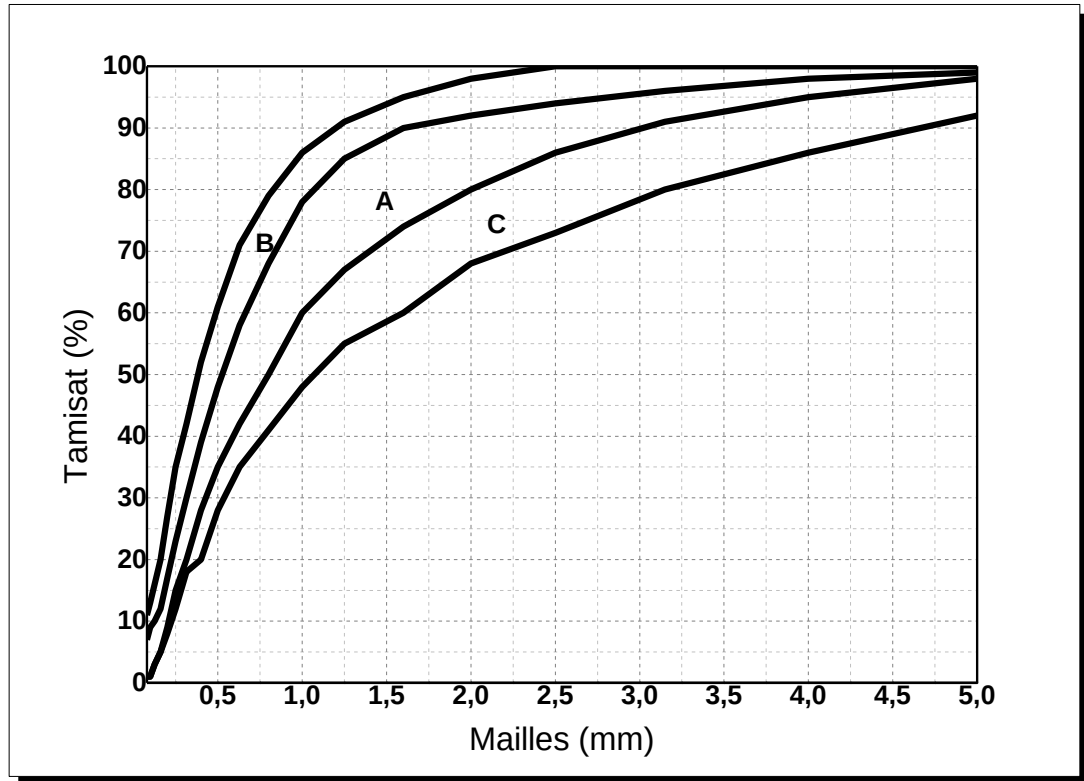


Figure 1-2 : Fuseau de spécification pour les sables (Normes françaises) [16]

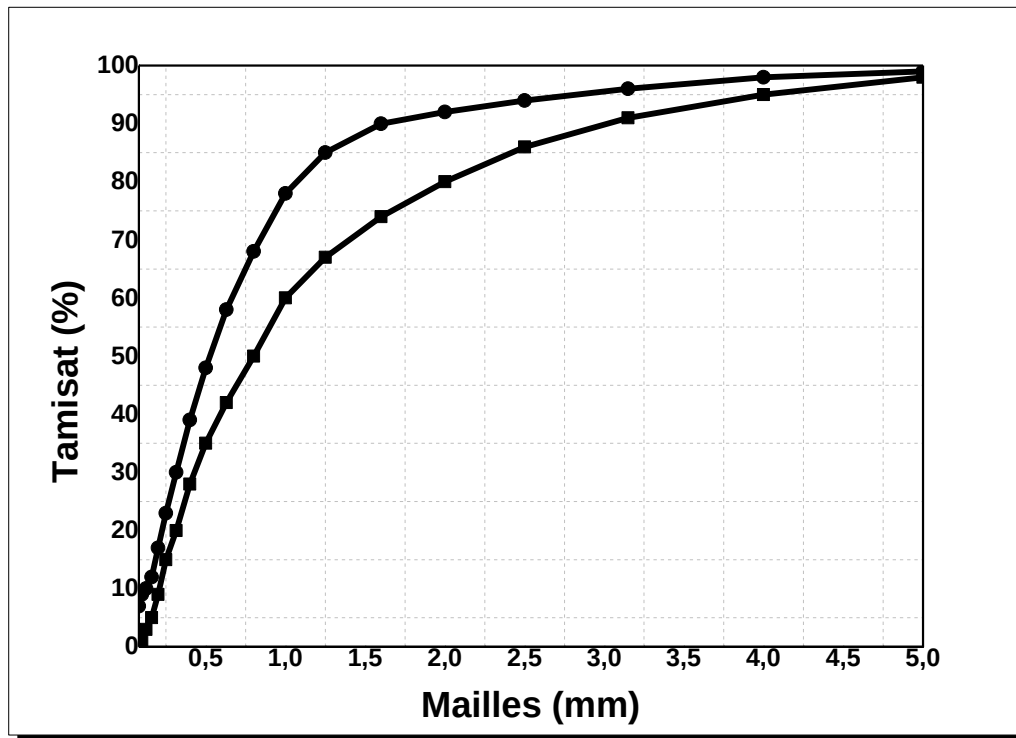


Figure 1-3 : Fuseau granulométrique français pour les sables utilisés dans les bétons. [16]

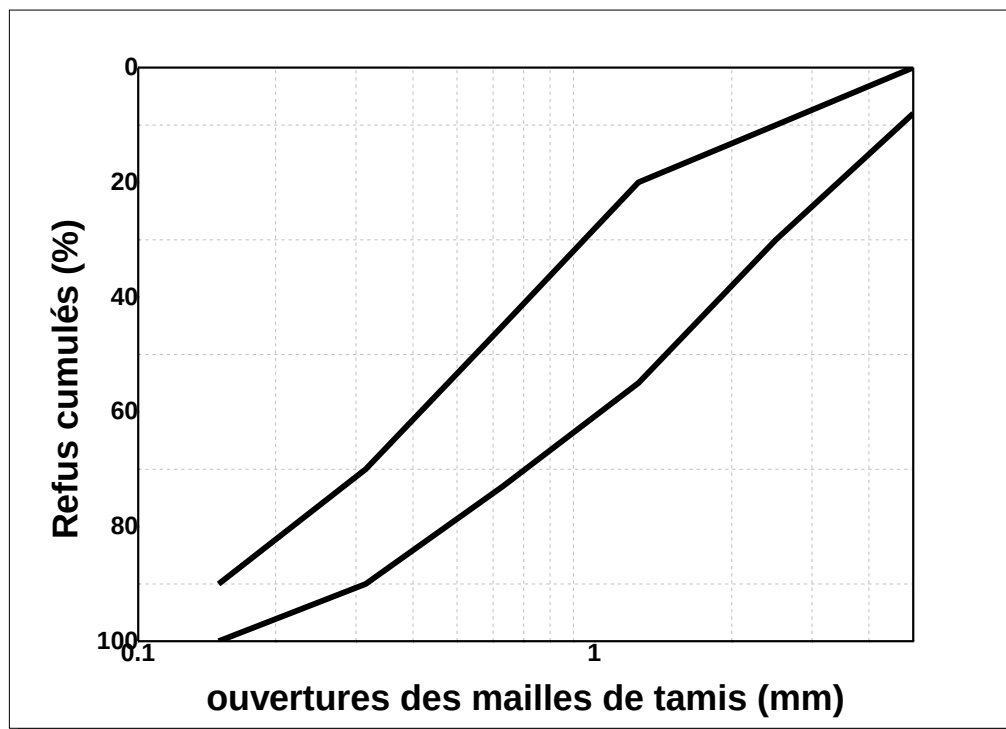


Figure 1-4 : Fuseau de spécification pour la composition granulaire des sables utilisés dans les bétons (Normes françaises) [16]

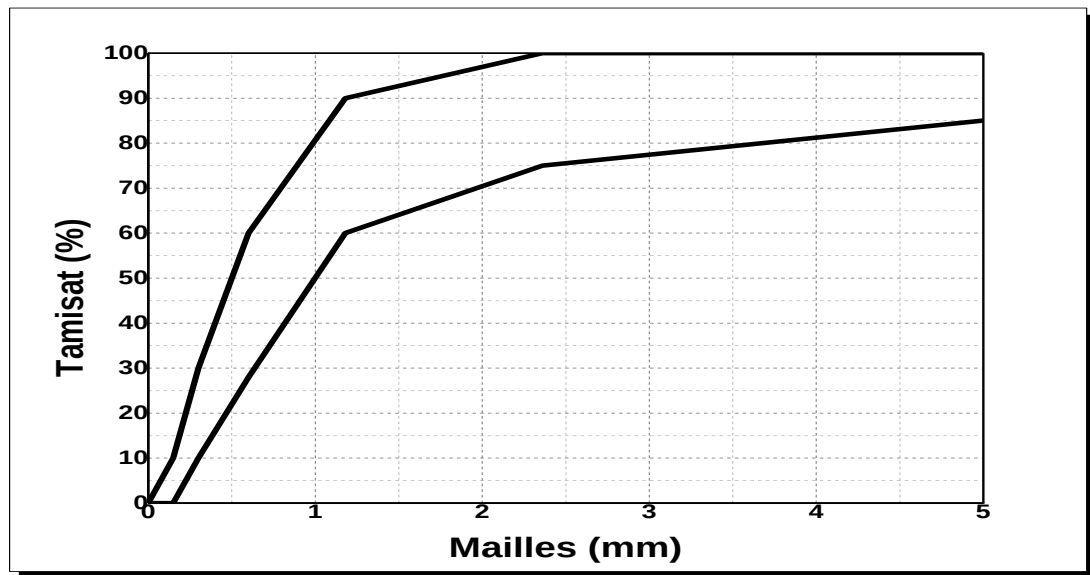


Figure 1-5: Fuseau de spécification Anglais pour les sables utilisés dans les bétons [24]

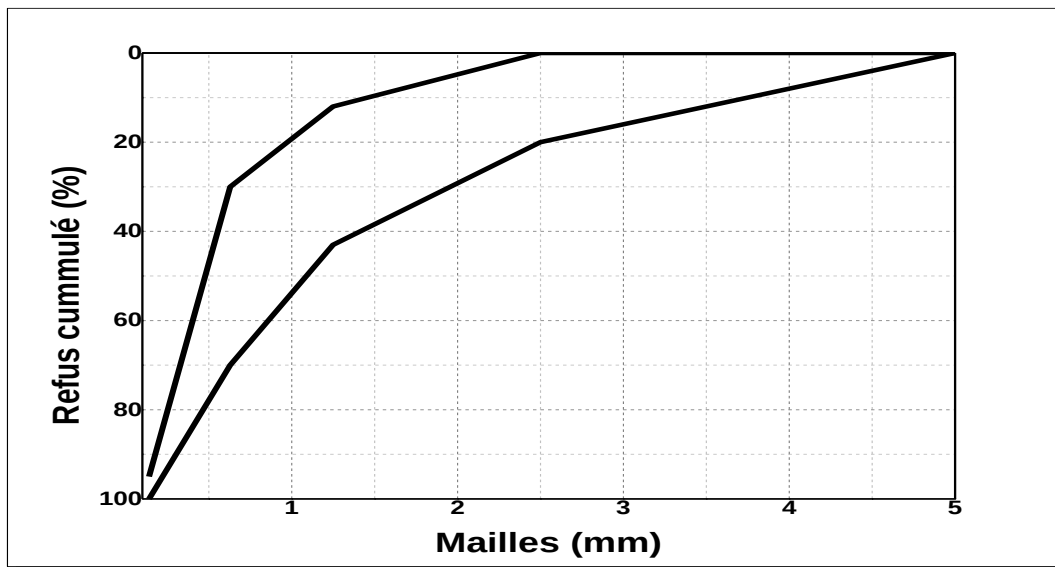


Figure 1-6: Fuseau de spécification Russe pour les sables utilisés dans les bétons [20]

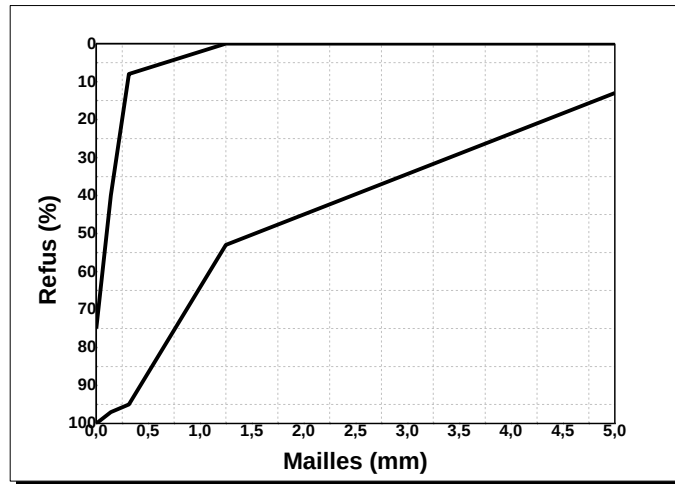


Figure 1-7: Fuseau de spécification pour les sables utilisés dans les mortiers [35]

A noter que : le fuseau de spécification français (Fig 1-2) comprend trois zones: zone "A" destinée aux sables préférentiels avec module de finesse 2,20 – 2,80, zone "B" pour les sables un peu trop fin avec module de finesse 1,80 à 2,20 et zone "C" pour les sables un peu trop gros avec module de finesse 2,80 – 3,20. Tandis que les autres fuseaux de spécification français (Fig. 1-3 ,Fig. 1-4), fuseau Anglais (Fig. 1-5) et le fuseau de L'ex- URSS (Fig. 1-6) comprennent uniquement une zone autorisée. Les courbes granulométriques des sables un peu trop fin se trouvent au dessus de cette zone et les sables un peu trop gros, leurs courbes sont situées au dessous de la dite zone autorisée.

Le fuseau granulométrique des sables utilisés dans les mortiers (Fig. 1-7) est plus large que celui utilisé dans les bétons car les mortiers ont des résistances en générale moins importante que celles des bétons.

1-7-4 Grosseur du sable :

La grosseur du sable n'est pas exprimée par le diamètre maximal des grains comme dans le cas des graviers et pierres concassées. Elle est exprimée en général par la grosseur de l'ensemble et cela d'une façon approximative. Alors on peut juger la grosseur du sable à travers la courbe granulométrique; Si la courbe se trouve en haut par rapport au fuseau de spécification le sable est gros. Si la courbe se trouve en bas le sable est dit fin.

Auparavant, en Ex –URSS on a calculé le diamètre moyen de l'ensemble des grains pour évaluer la grosseur du sable. Cependant le module de finesse s'avère plus important car il est utilisé fréquemment dans tous les pays pour apprécier la grosseur du sable [20, 21,26].

Le module de finesse est donné par la relation suivante :

$$M_f = (R_c^{0,16} + R_c^{0,315} + R_c^{0,63} + R_c^{1,25} + R_c^{2,5} + R_c^5) / 100$$

où

$R_c^{0,16}$, $R_c^{0,315}$, $R_c^{0,63}$, $R_c^{1,25}$, $R_c^{2,5}$, R_c^5 sont les refus cumulés des tamis de dimension de mailles 0,16, 0,315, 0,63, 1,25, 2,5 et 5 mm respectivement. D'après Komar [20], on distingue des sables selon leur module de finesse :

Sable gros	$M_f > 2,5;$
Sable moyen	$M_f > 2,5 - 2;$
Sable fin	$M_f > 2 - 1,5;$
Sable très fin	$M_f > 1,5 - 1.$

En générale on utilise de préférence des sables moyens et gros, parce qu'ils donnent des bétons et mortiers de meilleure performance malgré le dosage important en ciment.

1-7-5 Porosité du sable :

On distingue la porosité des grains séparés et la porosité de l'ensemble des grains. La porosité d'un grain est déterminée par la quantité des pores et vides dans celui-ci. Les grains du sable sont de petites dimensions, c'est pourquoi l'opération de détermination des pores du grain est très difficile et même impossible. Par contre, la détermination des pores et vides de l'ensemble des grains est plus simple. Dans ce dernier cas, non seulement on détermine les pores et les vides des grains mais aussi les vides qui existent entre les grains.

La bonne granularité du sable assure une faible porosité, ce qui traduit la bonne qualité de celui-ci et sa bonne performance dans le béton et mortier. Il exige peu de ciment pour combler tous les vides entre les grains du sable. En générale la fluidité du béton (mortier) frais et la résistance du béton (mortier) durci sont d'autant plus grandes que la porosité du sable est plus faible. La porosité du sable (l'ensemble des grains) peut-être calculée comme suite:

$$P = (1 - \gamma_s / \rho_s) \cdot 100\%$$

Où:

γ_s = masse volumique apparente du sable ;

ρ_s = Masse spécifique du sable

La masse volumique apparente du sable à l'état lâche est plus faible que celle à l'état compact. C'est pourquoi la porosité du sable à l'état compact est toujours inférieure à celle à l'état lâche.

1-7-6 Absorption:

Lors du contact avec l'eau, cette dernière s'infiltre dans les grains et remplit les vides entre les grains. Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très importante jusqu'à 20 – 25% du poids du sable [20]. Le sable fin absorbe plus d'eau par suite de sa porosité importante et sa grande surface spécifique.

Il faut prendre en compte cette humidité qui comprend la quantité d'eau se trouvant dans les grains du sable, sur leurs surfaces et dans les vides entre les grains.

Lors de la détermination de la composition du béton et mortier, si cette mesure n'est pas prise alors la quantité d'eau de gâchage devient superflue, ce qui diminue la résistance du béton d'après la loi "la résistance est fonction du rapport E/C"[27].

Dans [28], on présente une notion dite "besoin en eau" du sable que l'on détermine comme suite:

- ✓ On détermine d'abord le rapport $(E/C)_c$ requis pour une pâte de ciment ayant une consistance normale (l'étalement du cône sous l'action de vibration d'une table à secousses est égale à 170mm);
- ✓ On détermine ensuite le rapport $(E/C)_m$ requis pour un mortier de composition pondérale 1:2(c'est-à-dire une part de ciment mélanger à deux part de sable en poids) confectionné à base sable étudier et ayant une fluidité normale même fluidité que la pâte de ciment (c'est-à-dire l'étalement est aussi égale à 170mm).
- ✓ Enfin, on calcul le besoin en eau par la relation:

$$Be = [(E/C)_m - (E/C)_c]/2 \times 100\%$$

D'après [28] le besoin en eau est un facteur important au biais duquel on peut connaître l'influence du granulat sur les propriétés principales du béton (mortier) telle que la fluidité et la résistance.

1-7-7 L'altérabilité des granulats (gravier, sable) et réaction alcalis-granulats:

Ce problème à été étudié profondément aux U.S.A et au Canada [29,30].Le sable peut contenir d l'opale et des calcaires dolomitiques. Ces derniers peuvent réagir avec l'alcalis existant dans le ciment formant de nouveaux composés chimiques expansifs, ce qui peut causer des contraintes internes menant à la fissuration du béton [31].

Deux conditions nécessaires favorisant la réaction alcalis-granulat. La présence de SiO_2 hydraté dans le granulat et la teneur en alcalin supérieure à 0,6% dans le ciment utilisé pour le béton et mortier [15]. La teneur en alcalin dans le ciment est donner comme suite:

%Alcalin = $\text{Na}_2\text{O} + 0,638\text{K}_2\text{O}$ (d'après ASTM [15]).

Les granulats (sables) ayant des réactions alcalines sont appelés granulats réactifs et les autres sont appelés non réactifs. La réaction commence par l'attaque de l'hydroxyde alcaline, dérivée de l'alcalis (Na_2O et K_2O) dans le ciment, sur la silice dans le granulat. Alors se forme un gel d'alcali-silicate et une altération des bords des grains de granulat. Ce gel est de type "d'expansion illimité", il absorbe l'eau pour augmenter son volume ce qui provoque une fissuration et la destruction de la pâte de ciment.

1-7-8 Impureté du sable:

Le granulat en général et le sable en particulier contient souvent une ou plusieurs matières étrangères appelées impureté. D'après [20] on distingue deux types : impureté prohibée, impureté tolérée.

- ✓ L'impureté prohibée : Comme le charbon, le bois ou leurs résidus (cendres, mâchefer,...etc.), l'argile en morceaux et les scories comme matières faibles moins adhérente avec le ciment et pour cette raison elles peuvent diminuer la résistance et d'autres propriétés mécanique du béton et mortier.
Les matières organique même en faible quantité peuvent nuire au durcissement du ciment et les acides humiques formés par la décomposition des déchets végétaux se combinent aux alcalins du ciment. Par suite de sa nuisance ce type d'impureté est presque interdite dans le granulat en général et dans le sable en particulier.
- ✓ L'impureté tolérée comme les sulfates (gypse) et sulfure (pyrite), la teneur de ceux-ci dans le granulat est transformée en teneur en SO_3 qui ne doit pas dépasser la limite autorisée de 1%. Les matières solubles et extra-fines sont tolérées à condition de ne pas dépasser 5%. Remarquons que les matières extra-fines comme l'argile et les poussières peuvent former une pellicule sur les surfaces des grains de sable, ce qui empêche l'adhérence de ceux-ci à la pierre de ciment dans le béton et mortier.

Par conséquent il y aura une chute de résistance de ces matériaux, surtout la résistance à la traction et à la flexion.

En outre, l'argile et les poussières absorbent l'eau et augmentent ainsi le besoin en eau du sable, ce qui conduit aussi à une chute plus au moins importante de la résistance du béton et mortier [20, 21,22]. La teneur de cette impureté est autorisée différemment dans les pays du monde:

- ✓ En Ex-URSS les normes spécifient que la teneur en argile et poussière ne doit pas dépasser 2% pour les bétons de classe inférieurs à 300 et de 1% pour les bétons de classe supérieurs ou égale à 300.
Pour les granulats concassés d'origine calcaire la teneur autorisée est de 3% pour les bétons de classe inférieur à 300 et 2% pour les bétons de classe supérieure ou égale à 300 [23].
- ✓ la norme Anglaise (BS882:1973) spécifie les teneurs suivantes autorisées en argile, limon et poussière :
 - *15% (en poids) dans les sables concassés des roches;
 - * 3% (en poids) dans les sables naturels ou concassés des cailloux.
- ✓ Aux U.S.A on autorise presque les même teneurs, mais en tient compte de différentes sortes de bétons : Bétons soumis à l'abrasion et d'autres [24]. Dans le premier cas la

teneur des matières fines traversant le tamis de dimension 75μ (N° 200) est limitée jusqu'à 3% du poids du sable et dans le deuxième cas cette limite est de 5%. On prescrit séparément la teneur en argile, limon et particules friables inférieure à 3% dans les sables.

La norme américaine ASTM (C33-78) [25], spécifie la teneur autorisée des particules friables comme suit :

Type de particules	Teneur maximale dans le sable, %
- particules friables	3,0
- particules tendres	--
- charbon	0,5 - 1

Les argiles présentes la pollution la plus fréquente. Leur présence entraîne toujours une diminution de résistance alors il faut veiller à ne pas dépasser les limites spécifiées pour chaque technique [25].

La répartition des impuretés doit être uniforme, en aucun cas on ne doit trouver des morceaux d'impuretés ayant un volume supérieur à $0,5 \text{ cm}^3$. La teneur en matière extra-fines (limon, argile et poussière) est déterminée par méthode de lavage ou à travers l'équivalent de sable.

1-7-9 Traitement des sables:

Le traitement du sable consiste à le faire débarrasser de ces éléments nuisibles à sa qualité c'est-à-dire le faire débarrasser des impuretés des éléments poussiéreux, argileux, vaseux, des sels, des sulfates, mica, ...etc.

Afin d'obtenir un sable de qualité fiable et de composition granulométrique acceptable, et parmi les méthodes de traitement nous citons : Méthode de lavage, méthode de ventilation et méthode de mélange de sables.

✓ Méthode de lavage :

Cette méthode consiste à éliminer une partie des grains fins c'est-à-dire éliminer l'excès de filler et diminuer le taux d'impureté existant dans le sable. Cette méthode présente des avantages et des inconvénients. Parmi les avantages on cite : Méthode simple et propre, élimine en même temps les grains fins et les impuretés de toutes natures. Parmi les inconvénients on cite : demande beaucoup d'énergie pour le séchage après lavage et un coût élevé [61].

✓ Méthode de ventilation:

Cette méthode a pour but d'éliminer l'excès de filler et elle présente les avantages et les inconvénients suivants :

- Avantages :

- * Le sable sera utilisé directement après traitement, car il reste à l'état naturel sec;
- * Pas besoin d'eau qui est rare dans certaines régions ;
- * la réalisation est facile et plus rapide par rapport à la méthode de lavage.
 - Inconvénients :
- * Elimine uniquement les grains fins mais les impuretés peuvent rester encore dans le sable,
- * Demande beaucoup d'énergie pour faire fonctionner les ventilateurs,
- * Pollution de l'environnement par la poussière [61].

✓ **Méthode de mélange des sables :**

Cette méthode de mélange de deux sables est destinée pour l'obtention d'un sable de bonne composition granulométrique si la granulométrie du sable s'avère incompatible (courbe granulaire ne se trouve pas entièrement dans le fuseau de spécification). Il faut l'améliorer en ajoutant les fractions manquantes ou insuffisantes ou en éliminant les fractions superflues. Ceci est difficile à réaliser en pratique pour les grandes quantités de sable aux chantiers, par suite du manque d'équipements nécessaires en particulier les tamis de différentes dimensions.

On utilise souvent la méthode du mélange de deux sables avec un ou deux sables pour obtenir un sable mixte compatible. Alors il faut déterminer la proportion de chaque sable dans le mélange en employant " le diagramme rectangulaire " cette méthode est exposée en détail dans [35].

1-7-10 Choix des sables :

Le choix des granulats (gravier et sable) pour les bétons et mortiers peut-être fait en fonction de plusieurs critères dont les principaux sont :

- La résistance aux ambiances agressives ;
- Les caractéristiques mécaniques (du granulat et de la roche maternelle);
- L'adhérence au liant. [16]

D'après [15], quand le choix est possible, il porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la forme, la granulométrie et l'altérabilité. En fait dans bien des cas le choix est restreint, du fait de la distance qui sépare le chantier de la carrière et de l'indice de coût du transport sur le prix de revient. Mais il est parfois nécessaire de s'approvisionner à une carrière plus éloignée afin de satisfaire aux exigences des cahiers de charges.

B- Béton et Mortier :

1-8 Structure du béton et mortier :

Un béton est fait de bons matériaux mélangés en proportions calculées soigneusement pour obtenir une masse parfaitement homogène [32]. D'après sa structure le béton durci est considéré comme un conglomérat naturel, dans lequel les grains de sable s'arrangent dans les vides entre les grains de gravier et les grains sont liés les uns aux autres par des couches minces de la pierre de ciment. Le gravier représente le squelette du béton, ce qui permet à ce dernier de résister aux charges appliquées.

Le mortier peut-être considéré comme un béton sans gros granulats (gravier ou pierre concassée) dans lequel le sable joue le rôle de squelette et la pierre de ciment vient occuper les vides entre les grains de sable [33].

1-9 Propriétés du béton (mortier):

Le béton frais (après gâchage) et le béton durci (après durcissement) possèdent des propriétés importantes qu'on doit déterminer pour apprécier la qualité de ce matériau [34,35]. Les propriétés principales sont. L'ouvrabilité (maniabilité), résistance et durabilité.

L'ouvrabilité est l'aptitude que présente le béton à être transporté sans ségrégation et sans ressuage de l'eau et l'aptitude à être mis en œuvre facilement sans malfaçon (c'est à dire assurer une grande homogénéité) [31,36]. Une bonne ouvrabilité à pour but une garantie d'une grande qualité du béton durci. L'aspect principal de l'ouvrabilité est la fluidité qui est influée par les facteurs suivants :

- Granularité des granulats, leurs formes et l'angularité de surface des grains ;
- La composition du béton surtout le dosage en eau dans le béton et l'addition des fluidifiants et plastifiants.

La résistance du béton (mortier), se traduit par la capacité du béton (mortier) de résister aux charges. Cette propriété dépend nettement de la qualité des granulats, du ciment et de la composition du béton (mortier).

La résistance du béton peut être exprimée par l'expression suivante [20,37]:

$$R_b = A.R_c(\% \pm 0,5) ;$$

où: A: coefficient dépendant de la qualité des granulats et ciments, A est d'autant plus grand que la qualité des granulats et ciments est meilleurs [20].

$$R_b = G.R_c(\% - 0,5)$$

où:

G: coefficient granulaire déterminé en fonction de la qualité des granulats et de la dimension maximale du gravier. Ces expressions sont utilisées en EX-URSS et en France pour déterminer la composition du béton.

Comme le béton, le mortier possède les mêmes propriétés mais les méthodes et les équipements pour déterminer ses propriétés sont différents de ceux qui sont utilisés dans le cas du béton. Même la résistance du mortier est exprimée par d'autres expressions que celles du béton. Nous citons ici deux expressions de la résistance des mortiers [20]:

$$R_m = 0,25 R_c (C/E - 0,4) , \quad \text{où } R_c \text{ activité du ciment .}$$

Cette relation est valable pour les mortiers posés sur une base compacte. Si la base est poreuse, elle aspire l'eau du mortier en le rendant compacte, la résistance croît de 1,5 fois à peu près [20].

La résistance du mortier dépend aussi de la consommation du ciment et de la qualité du sable ce que l'on voit de l'expression suivante :

$$R_m = K.R_c (C - 0,05) + 4$$

où : K : Coefficient dépendant de la grosseur du sable.

- Pour les sables fins	K = 0,50 - 0,70
- Pour les sables moyens	K = 0,80
- Pour les sables gros	K = 1,00

C : Dosage en ciment.

1-10 Adjuvants utilisés dans les bétons et mortiers :

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps, les romains additionner par fois du sang d'animal et des blancs d'œufs comme plastifiants à leurs bétons dès 1850.

Les additions de chlorure de calcium comme accélérateur, du sucre comme retardateur, datent du début du siècle.

La commercialisation de ces ajouts a commencé plus tard vers 1910-1920, il s'agissait surtout, à l'époque d'hydrofuges et d'accélérateurs. Les plastifiants furent commercialisés en 1935, les entraîneurs d'air vers 1948, plus récemment, sont apparus les antigels et les produits de cure et depuis 1960 les adjuvants non pas cesser de se multiplier de se diversifier.

Les fabricant mettent au point des produits mieux adaptés aux besoins de la construction moderne grâce au développement de l'industrie chimique [31].

Avec l'évolution de l'utilisation des adjuvants dans plusieurs pays, alors il est considéré comme cinquième composant du béton et comme quatrième composant du mortier.

Un grand nombre d'adjuvants de différentes sortes ont été étudiés, fabriqués et utilisés [38,41,42,43,44,45,46,47,48,49].

On distingue les additions minérales et les adjuvants chimiques. Un adjuvant chimique est un produit qui, ajouté en faible quantité (proportions), améliore certaines propriétés du béton (mortier) par action chimique sur la pâte de ciment ils doivent satisfaire aux conditions particulières de chaque ouvrage [61].

En général chaque adjuvant à une action principale qui le définit et d'après laquelle il est classé, cependant il peut présenter d'autres actions secondaires.

1-10-1 Mode d'action de l'adjuvant :

Comme il est impossible d'avoir un ciment qui ne flocule pas, la solution est de lutter contre cette tendance qu'ont les grains de ciment à floculer. Ainsi, pour diminuer la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter, les fabricants d'adjuvants ont développé des molécules déjà bien connues pour leurs propriétés dispersantes.

Les grains de ciment Portland présentent un grand nombre de charges électriques sur leurs surfaces, si bien que lorsqu'ils rentrent en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, ils ont tendance à floculer. L'action mécanique des malaxeurs et des gros granulats durant le malaxage du béton n'est pas suffisante pour éliminer complètement ce phénomène de floculation des grains de ciment. Cette formation de floccs stables empêche la dispersion uniforme des grains de ciment et emprisonne à l'intérieur des floccs une certaine quantité d'eau qui n'est plus disponible pour lubrifier le mélange.

Pour obtenir une bonne ouvrabilité, il faut ajouter beaucoup plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater les grains de ciment. L'addition de cette eau de maniabilité produit une pâte de ciment hydratée poreuse.

Deux effets néfastes peuvent alors apparaître: une perte de résistance et une augmentation de la perméabilité. Ces effets diminuent donc la durabilité du béton.

D'un point de vue technologique, un ciment idéal serait donc un ciment où la seule quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des grains de ciment suffirait, dans un premier temps, pour obtenir un mélange suffisamment maniable pour se mettre facilement en place.

Une fois la mise en place terminée, l'eau de gâchage remplirait alors son rôle chimique, c'est-à-dire celui d'hydrater les grains de ciment en une masse de porosité minimale puisque la moindre goutte d'eau introduite initialement dans le béton se trouverait finalement liée chimiquement aux grains de ciment.

1-10-2 Différents types d'adjuvants :

✓ Accélérateur de prise :

Ce sont des produits solubles dans l'eau, ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Les produits de base qui entrent dans la composition des accélérateurs sont :

- Les chlorures : Calcium, Sodium, Aluminium,... (Leur utilisation est réglementée).

- Les bases alcalines : Soude, Potasse, Ammoniac, ainsi que leurs sels, Carbonate, Aluminate, Borate de soude ou de potasse, des Nitrates,..., se sont surtout des alcalins (soude, potasse) qui sont utilisés pour la prise et les chlorures (CaCl_2) pour le durcissement.

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2 % du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont utilisés pour le bétonnage en temps froid où lorsque un durcissement rapide est souhaitée. Ils augmentent le retrait, diminuent légèrement les résistances finales et accélèrent la corrosion des aciers (surtout CaCl_2 il est interdit en cas du béton précontraint).

✓ **Les retardateurs de prise :**

Ils agissent chimiquement, ils donneraient naissance à des produits colloïdaux enveloppant les grains de ciment et retarderaient ainsi la progression de l'hydratation pendant un certain temps, alors retarder le début de prise. Ils sont surtout employés pour la reprise de bétonnage, les transports du béton sur une grande distance et les bétonnages par temps très chaud. Comme retardateurs de prise on peut citer les produits suivants :

- Les acides phosphoriques, fluorhydriques, humiques ;
- Les lignosulfonates (de Calcium, de Sodium, d'ammoniac) qui contiennent des doses plus ou moins importantes de sucres;
- Les acides et sels d'acides hydroxy-carboxyliques;
- Les hydrates de carbone (glucose, saccharoses, amidon, cellulose) ;
- La glycérine, les phosphates et fluorures, les oxydes de zinc et de plomb.

En général, ces produits sont utilisés en très faibles doses. Ils ne modifient en principe que très légèrement les autres propriétés du béton.

✓ **Entraîneur d'air :**

Les adjuvants agissent en créant dans le béton un très grand nombre de petites bulles d'air (de 10 à 200 μ de diamètres). Ces petites bulles d'air ont un double rôle :

- Ils améliorent la résistance au gel du béton durci. En effet, les très nombreuses petites bulles d'air constituent des micro-vases d'expansion pour interstitielle en cas de gel;
- Ils améliorent la plasticité et l'ouvrabilité du béton. Les bulles d'air agissent comme étant des grains fins constituent de petites billes souples et sans frottement.

Les entraîneurs d'air sont, en général : des résines de bois traités, des lignosulfonates, des huiles minérales, des graisses. Ils sont commercialisés sous forme de liquide, de sel soluble ou de poudre à ajouter au moment du malaxage.

✓ **Hydrofuges :**

Ces produits protègent de l'humidité en arrêtant l'absorption capillaire et en améliorant l'étanchéité des bétons à l'eau sous pression. Ils agissent surtout physiquement en bouchant les pores et canicules grâce aux particules très fines qu'ils contiennent ou aux produits précipitables ou gonflant. On distingue :

- Les hydrofuges de masse : présentés sous forme de liquide ou de poudre à mélanger à l'eau de gâchage. Ce sont des produits fins qui obturent les pores dans le béton. On peut citer les hydrofuges suivants : Bentonite, filler.

- Les hydrofuges de surface : S'applique au béton durci. Ce sont des produits de traitement superficiel à base de silicate ou de fluosilicate,....

✓ **Antigels :**

Ce sont des produits (chlorures, résines,...) utilisés pour le bétonnage par temps froid (-10°C).

✓ **Produits de cure :**

Ce sont des produits résineux, qui pulvérisés sur la surface du béton frais, le recouvrant d'un film continue imperméable légèrement coloré s'éliminant après quelques semaines sans laisser de trace qui empêche l'évaporation de l'eau. Les produits de cure sont à base de :

- Résines, cires, ou paraffines en émulsion aqueuse ;
- Résines naturelles ou synthétiques dissoutes dans des solvants spéciaux (pétrolier) ;
- De cire ou de paraffines dissoutes dans un solvant pétrolier;
- De caoutchouc chloré.

✓ **Les fluidifiants (réducteurs d'eau) :**

Ce sont des adjuvants qui permettent soit réduction de la teneur en eau pour une même ouvrabilité, soit une augmentation de l'ouvrabilité à une même teneur en eau. Ces adjuvants améliorent l'aptitude à la déformation des bétons frais et mortiers sous l'effet d'un moyen de serrages donnés.

Ce sont souvent des produits organiques capables d'abaisser la tension superficielle ou interfaciale des liquides et de l'eau en particulier. Ils lubrifient les grains de ciment ceux-ci sont défloculés et individualisés et cette dispersion facilite le mouillage. Les fluidifiants les plus connus actuellement sont à base de :

- Lignosulfanates de Calcium (sous produit de la fabrication du papier par voie chimique): ce type de fluidifiant se présente sous forme d'un liquide soluble dans l'eau, directement mélangé à l'eau de gâchage à raison de 0,2 à 0,5 % du poids de ciment ce qui permet une diminution de 15 à 20 l d'eau /m³ de béton.

✓ **Les plastifiants :**

Ce sont des produits pulvérulents extrêmement fins. Ils ont le rôle d'améliorer la stabilité et l'homogénéité du béton en diminuant le ressuage et en augmentant la cohésion.

Ces adjuvants comportent souvent des produits très fins dont la majorité des grains est inférieure à 10 µ qui complètent la granulométrie du béton. On peut citer les plastifiants suivants : La bentonite (argile colloïdale) ; la chaux grasse ; le calcaire broyé et les pouzzolanes broyées [60]. Ces produits fins augmentent la viscosité du béton frais et diminuent la ségrégation.

1-11 Composition du béton :

La composition du béton est un facteur très important qui est l'objet d'étude de plusieurs chercheurs dans le monde et présentée dans plusieurs ouvrages [20, 51, 52, 54, 55, 56, 57].

La composition du béton à pour but de déterminer les proportions de divers constituants (ciment, sable, eau, gravier et adjuvants possibles) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera , après durcissement, les meilleurs caractéristiques (étanchéité, résistance, faible retrait,...).

Il y a beaucoup de méthodes de détermination de la composition du béton proposées et appliquées dans différents pays du monde :

- Méthode de Bolomey (méthode à granularité continue);
- Méthode de Valette à caractère expérimental (elle consiste à rechercher un béton plein à minimum de grains fins (sable), la granularité est discontinue.
- Méthode de Faury : Cette méthode tient compte, des coefficients
 - * de l'effet de paroi ;
 - * De la nature des grains ;
 - * De la plasticité recherchée ;
 - * De la vibration.

En principe elle aboutit à une granularité continue.

- Méthode générale du CES (Centre d'Essais des Structures) : elle est issue d'une synthèse des méthodes précédentes [62].
- Méthode pratique de Dreux-Gorisse [15,49].
- Méthode des volumes absolus [20].

1-11-1 Méthode des volumes absolus :

Cette méthode à été formulée par l'académicien de l'ex-URSS B.G.Scramtaiev. Elle a été considérée comme la plus rationnelle au concours en Ex URSS en 1960. Cette méthode est basée sur le principe suivant :

La somme des volumes absolus de tous les matériaux composant 1 m³ de béton frais est égale à 1000 litres. C'est à dire la porosité du béton frais est considérée nulle [20, 35]. D'après cette méthode de la détermination de la composition du béton comprend quatre parties suivantes :

A- Définir les données nécessaires :

1- Déterminer la grosseur maximale des grains de gros granulats D_{max} .

$D_{max} \leq (1/3 - 1/4)$ d'épaisseur de l'élément de construction;

$D_{max} \leq (2/3 - 3/4)$ de la distance entre deux barres de l'armature.

2- Déterminer la fluidité requise du béton frais d'après le tableau 1-2 :

Tableau 1-2: Fluidité des bétons frais [20]

Type des constructions ou des éléments de construction	Affaissement du cône d'Abrams, Cm
-Lits des fondations des bâtiments et des chaussées, sols.	0
-Revêtement des routes et d'aérodromes, constructions massives sans armatures (murs d'appuis, blocs massifs, fondations)	0 - 2
-Dalles, poutres, poteaux de grandes et moyennes section	2 - 4
-Constructions à parois minces, à armatures très dense	4 - 6

3- Si le sable n'est pas admissible au point de vue granularité, il est indispensable de le mélanger avec un autre sable et d'établir le rapport optimal entre les deux sables.

4- Si le gravier ou la pierre concassée est composés de plusieurs fractions, il est indispensable d'établir le rapport optimal entre eux en utilisant le diagramme de la meilleure granularité ou en faisant le choix d'une composition où la quantité des vides soit plus petite possible.

5- Déterminer les caractéristiques des matériaux utilisés par l'essai.

- Classe du ciment (activité du ciment).
- Masse volumique apparente et masse spécifique du ciment, sable et gravier (pierre concassée) à l'état sec
- Porosité du gravier (pierre concassée) calculée après sa masse volumique apparente et masse spécifique.

B- Calcul de la composition du béton :

1- Déterminer le rapport C/E selon les expressions :

a/ Pour béton à $C/E \leq 2,5$

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0,5) \quad (1) ;$$

D'où :

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5 \quad ;$$

b/ Pour béton à $C/E > 2,5$;

$$R_b = A' \cdot R_c (C/E + 0,5) \quad (2) .$$

D'où :

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A' \cdot R_c} - 0,5$$

2- Déterminer la quantité d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton frais. D'après sa fluidité et le type de gros granulat (gravier ou pierre concassée) en employant le tableau 1-3 :

Tableau 1-3: Dosage en eau dans les bétons [20]

Fluidité du béton frais (affaissement du cône d'Abrams) (cm)	Quantité d'eau dans 1 m ³ du béton, (l) par rapport à la grosseur du gravier, (mm)		
	10	20	40
0	175	160	145
1	185	170	155
2	190	175	160
3	195	180	165
5	200	185	170
7	205	190	175
8	210	195	180
10	215	200	185

Remarque :

Les données du tableau sont justes pour les bétons au ciment portland, au sable moyen et au gravier utilisé comme gros granulat.

Dans des conditions différentes la quantité d'eau indiquée au tableau, augmente :

- En cas d'utilisation d'un ciment portland pouzzolanique, (de 15 à 20 l/m³);
- En cas où le gravier est remplacé par des pierres concassées de 10 l/m³ ;
- Pour le sable fin, de 10 l/m³.

3- Déterminer la quantité de ciment pour 1 m³ de béton frais :

$$C = E \cdot C/E, \quad (\text{Kg}).$$

4- Déterminer la quantité de gravier (pierre concassée) pour 1 m³ de béton frais. D'après le principe de la méthode, la somme des volumes absolus de tous les composants du béton frais est égale 1 m³. (1000 l).

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g} = 1000 \quad (3)$$

Où :

C, E, S et G sont respectivement les dosages en ciment, eau, sable et gravier (pierres concassées) en Kg.

ρ_c , ρ_e , ρ_s et ρ_g , sont respectivement les masses spécifiques de ces matériaux, en Kg/m³ ; $\rho_e = 1$

La solution ciment-sable remplit les vides entre les grains du gravier (pierres concassées) avec un certain écartement alors on peut écrire :

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + E = P_g \cdot \frac{G}{\gamma_g} \cdot \alpha \quad (4)$$

Où :

P_g : porosité du gravier ; G/γ_g : volume apparent du gravier et $P_g.G/\gamma_g$: volume des vides.

α : Coefficient d'écartement (ou coefficient d'excès de mortier) α est défini d'après le tableau 1-4 pour les bétons fluides.

Tableau 1-4: Valeur du coefficient α [20]

Dosage en ciment (Kg) dans 1 m ³ de béton frais	Valeur de α				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,30	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,40	1,46	-	-	-

En résolvant simultanément les équations (3),(4), on détermine la quantité du gravier (Kg) pour 1 m³ de béton frais :

$$G = \frac{1000}{P_g \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}} \quad (5)$$

5/ Déterminer la quantité du sable (Kg) pour 1 m³ de béton frais. La quantité du sable est déterminée à partir de l'équation (3) :

$$S = \left| 1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_E} + \frac{G}{\rho_G} \right) \right| \rho_s \quad (6)$$

Ainsi sont déterminés les composants pour 1 m³ de béton frais (C,E,S,G) .

C/ Contrôler la composition calculée et déterminer la composition de laboratoire :

1- Contrôler la fluidité du béton frais par l'essai de l'affaissement du cône d'Abrams .

(Ac) alors trois cas peuvent se présenter :

- $Ac = Ac$ requis, la composition calculée est admise.

- $Ac < Ac$ requis alors on ajoute une certaine quantité de ciment et d'eau sans changer C/E pour parvenir à Ac requis . Enfin, calculer de nouveau la composition du béton.

- $Ac > Ac$ requis alors on ajoute peu à peu du sable et du gros granulat tout en maintenant leur rapport constant.

On arrive ainsi à obtenir la fluidité requise, après cela calculer de nouveau la composition du béton que l'on appelle composition modifiée.

2/ Contrôler la résistance du béton : On prépare trois gâchages :

i- Avec la quantité de ciment de la composition modifiée (C_1) ;

ii- Avec la quantité de ciment de composition modifiée + 10% (C_2) ;

iii- Avec la quantité de ciment de la composition modifiée - 10% (C_3) .

Les quantités d'eau, du sable et du gravier (pierres concassées) sont celles de la composition modifiée après le contrôle de fluidité. À partir de chaque mélange on prépare trois éprouvettes cylindriques ou cubiques que l'on conserve dans des conditions normales ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $w = 100\%$) pendant 28 jours, puis les éprouvettes sont soumises à l'écrasement.

D'après les résultats obtenus on trace la courbe de la résistance à la compression du béton en fonction de la quantité de ciment Fig 1-8. A partir de cette courbe on détermine la quantité de ciment (C^*) correspondant à la résistance requise du béton, ainsi on obtient la composition de laboratoire.

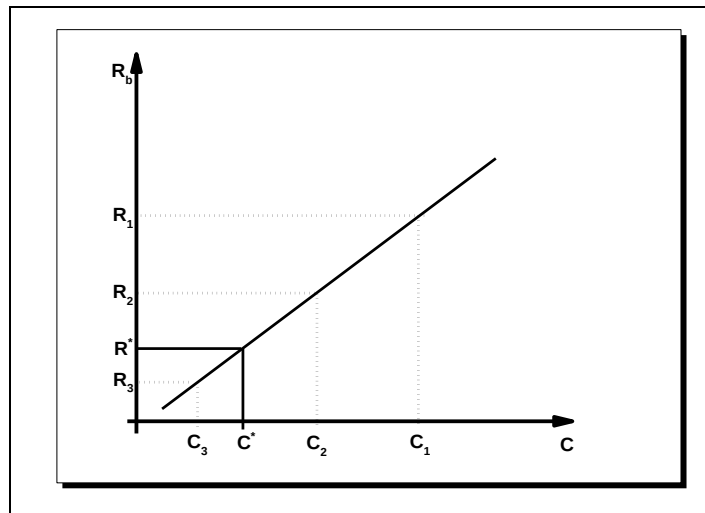


Figure 1.8 : Contrôle de fluidité du béton frais [20].

D/ Déterminer la composition d'exploitation (de chantier) :

En général le sable et le gravier (pierre concassées) au chantier sont humide, soit un taux d'humidité de W_s % et W_g %. On doit alors modifier les quantités du sable, du gravier et de l'eau comprises dans la composition de laboratoire pour avoir la composition d'exploitation du béton.

Les quantités de sable, gravier (pierres concassées) humide et eau pour 1 m^3 de béton frais sont calculées comme suite :

$$\begin{aligned}
 S_{ex} &= S_l \left(1 + \frac{W_s}{100}\right) \\
 G_{ex} &= G_l \left(1 + \frac{W_g}{100}\right) ; \\
 E_{ex} &= E_l - \frac{W_s}{100} \cdot S_l - \frac{W_g}{100} \cdot G_l
 \end{aligned}$$

La quantité de matériaux nécessaire pour le dosage d'une bétonneuse de capacité V est C_V , E_V , ρ_V et G_V .

Notons que le volume d'un mélange de béton (V_b) est toujours inférieur à la somme des volumes apparents des matériaux secs constituant le mélange (V_c , V_s , V_g). Car les petits grains se placent dans les vides entre les gros grains.

Le coefficient de rendement du béton β est défini par la relation suivante :

$$\beta = \frac{V_b}{V_c + V_s + V_g} < 1 \quad ;$$

β varie entre 0,67 - 0,80 .

V_c , V_s , V_g masses volumiques apparentes du ciment, sable et du gravier en l .

$\beta.V$ quantité du béton frais obtenu dans la bétonneuse de capacité V en l.

$$C_V = \beta V \cdot C_l / 1000 \quad ; \quad E_V = \beta V \cdot E_l / 1000$$

$$S_V = \beta V \cdot S_l / 1000 \quad ; \quad G_V = \beta V \cdot G_l / 1000$$

Si le sable et le gravier sont humides, il faut modifier E_v , S_v , G_v et C_v par la méthode déjà indiquée ci-dessus.

En cas d'utilisation d'adjuvants chimiques comme les plastifiants et les accélérateurs, il faut calculer la quantité d'adjuvant dans 1 m³ de béton frais après la proportion spécifiée (en général, la proportion d'un adjuvant en matière sèche est de 0,2 - 0,25% de la masse du ciment et la proportion de CaCl_2 est de 1,5 - 2 %).

Si l'adjuvant est utilisé sous forme liquide alors il faut déterminer sa teneur en eau et diminuer la quantité d'eau contenu dans l'adjuvant de l'eau de gâchage.

Cette méthode s'avère simple, logique et facile à appliquer dans la pratique. C'est pourquoi elle est utilisée dans cette présente thèse pour déterminer la composition des bétons étudiés sans adjuvant et avec adjuvant.

1-12 Composition de mortier:

Il existe des méthodes différentes pour la détermination de la composition des mortiers. Parmi ces méthodes, on expose une assez simple et efficace qui comporte les étapes suivantes [35].

1- Détermination de la quantité de ciment (C en Kg) pour 1 m³ de sable (ou 1 m³ de mortier):

$$C = \frac{R_m}{0,7 \cdot R_c} \cdot 1000 \quad \text{Kg}$$

Où :

R_m : résistance du mortier.

Rc : classe (activité) du ciment.

Le volume apparent du ciment est donné par $V_c = C/\gamma_c$, l où : γ_c : masse volumique apparente du ciment, Kg/l.

2- Détermination de la quantité (En volume) de la pâte de chaux (s'il s'agit d'un mortier mixte) pour 1 m³ de sable :

$$V_{pc} = 0,17 (1 - 0,002 C) ,$$

3- Expression de la composition du mortier (en volume) ciment, chaux et sable (Vc: Vpc : 1) où le volume du sable est égale à 1 m³.

4- Dosage en eau :

Le dosage en eau est déterminé par tâtonnement, en effectuant l'essai de fluidité afin d'obtenir la fluidité requise. En cas de manque d'essais, on peut le déterminer approximativement par la relation suivante:

$$E = 0,65 (C + Pc).$$

où:

Pc : Poids de la pâte de chaux.

A noter que si la chaux n'est pas utilisée dans le mortier, le facteur Vpc dans la relation sera supprimé.

En présence d'un adjuvant (fluidifiant ou plastifiant) le dosage en eau peu être plus ou moins réduit pour avoir la fluidité requise du mortier frais . Alors la résistance du mortier durci augmente sensiblement.

On peut conserver la résistance requise en diminuant le dosage en ciment, cela conduit à un effet économique important.

La consommation approximative du ciment pour les travaux de finissage de surface des panneaux et gros blocs et données dans le tableau 1-5 :

Tableau 1-5: Consommation approximative de ciment [20]

Type de mortier	Classe du mortier	Consommation de ciment (Kg/m ³)		
		300	400	500
Mortier à sable de roches broyées	75	320	270	240
Idem	100	370	310	280
Idem	150	470	390	350

CHAPITRE 2 :

ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES

2.1 Introduction :

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des principaux travaux concernant les travaux généraux s'intéressant à la valorisation des sables de concassage dans les mortiers et les bétons courants avec ou sans superplastifiants, le mécanisme d'hydratation du ciment, la performance des superplastifiant.

Ce chapitre présente également les bétons ordinaires, les bétons autoplaçants, les bétons à hautes performances et leurs constituants.

a- Valorisation des sables de concassage

2- 2 Travaux généraux :

2.2.1 Valorisation des sables de concassage dans les mortiers et les bétons courants :

Depuis les années mille neuf cent quatre vingt, les possibilités d'emploi des granulats calcaires dans la confection des bétons ont été étudiés. Certaines études françaises [65] ont tout d'abord montré que les calcaires de dureté moyenne à faible permettent de confectionner des bétons de caractéristiques très satisfaisantes, comparables à celles de bétons de granulats silico-calcaires ou siliceux. Mais ces bétons nécessitent souvent plus d'eau, notamment lorsque la teneur en éléments fins augmente, entraînant alors une baisse de résistance mécanique.

Toutefois, au jeune âge (< 48 heures), les résistances des bétons calcaires sont généralement supérieures à celles des bétons silico-calcaires ou siliceux. Les écarts de résistance trouvés semblent plus liés à la nature et au dosage en ciment qu'à la résistance propre des granulats [65]. Pour les mélanges granulaires pauvres en fines, une teneur minimale en ciment de 330 kg/m³ est recommandée [65].

D'autres études [66] ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle « actif » exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment. Des essais réalisés sur mortier [67] ont montré que, pour une porosité constante donnée, le mortier calcaire est toujours plus résistant que le mortier siliceux.

D'autres recherches ont été réalisées sur des bétons calcaires par Bachiorrini et Murat [68]. Elles ont montré que de très bons bétons hydrauliques pouvaient être obtenus avec des gravillons et des sables calcaires durs concassés ou broyés et renfermant 15 à 20 % de fines. Les calcaires durs peuvent ainsi être utilisés comme granulats pour bétons performants ou exposés à des conditions sévères. Ces bétons présentent d'excellentes propriétés physiques synonymes de durabilité (compacité, perméabilité) et des résistances mécaniques

généralement supérieures à celles des bétons de granulats alluvionnaires confectionnés avec des sables lavés peu ou pas fillérisés. La fillérisation des sables calcaires améliore donc sensiblement les performances mécaniques des bétons, sans avoir par ailleurs d'effets sensibles sur le retrait et la durabilité. Ces travaux comportent aussi une étude sur mortiers. Les résultats ont montré que les mortiers avec sables calcaires desquels toutes les fines sont extraites sont ceux qui donnent les performances mécaniques les plus médiocres.

L'introduction des fines dans le sable améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques de tous les mélanges étudiés [68]. Les courbes de résistances en fonction de la teneur en fines ont alors une allure en cloche aplatie avec un optimum qui se situe sensiblement à 12% de fines dans le sable. A 15% et à consistance de mortier constante, le retrait hydraulique augmente. Mais le facteur qui influe le plus sur ce terme est la propreté des fines, jugée par la valeur de bleu. Les autres facteurs déterminants de la durabilité sont la quantité d'air occlus ainsi que la nature et le dosage en ciment. Le caractère « actif » des fillers calcaires a été quantifié en leur affectant un coefficient apparent « d'activité liante » k , à partir de la loi de Bolomey et en considérant non pas le rapport C/E mais le rapport généralisé $(C + kF)/E$, avec F la quantité de fillers calcaires en kg par m^3 . Les coefficients k obtenus aux diverses échéances sur les mortiers s'échelonnent entre 0,25 et 0,45 avec les valeurs les plus fréquentes situées aux alentours de 0,30.

Les fillers calcaires ont donc bien une activité liante. Par ailleurs, l'analyse du couple liant-granat a montré notamment des phénomènes particuliers dans la zone de transition entre pâte de ciment Portland et grains calcaires (néoformations hydratées). Les auteurs considèrent alors que les fillers calcaires ont pour principales actions :

- ✓ l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire ;
- ✓ une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés, c'est-à-dire un effet réellement hydraulique ;
- ✓ des réactions physico-chimiques avec la calcite et les aluminates du ciment donnant lieu à des néoformations hydratées.

Ces travaux ont apporté une meilleure connaissance du rôle des fines dans les sables calcaires. Les expériences réalisées à la suite sur des grands chantiers ainsi que les travaux de l'industrie cimentière sur les ciments avec fillers ont permis le développement d'un nouveau constituant des bétons hydrauliques ; les additions de fillers calcaires.

En effet, d'autres travaux ont montré que l'utilisation d'un filler inerte est théoriquement avantageuse dans les bétons maigres, car sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides intergranulaires [53].

Les fillers calcaires n'étant pas inertes, leur utilisation est encore plus bénéfique si le ciment contient un taux élevé de C3A. L'effet accélérateur est contrôlé par la surface spécifique du produit. Plus il est fin, plus cet effet est important. Un filler calcaire très fin demande cependant plus d'eau. Il n'a donc d'intérêt que si une plus grande quantité de

superplastifiant est utilisée, car les fillers calcaires consomment du superplastifiant, au même titre que le ciment. Comme son utilisation ne permet qu'une faible réduction de la quantité de ciment, il y a donc un équilibre économique à trouver. Pour les bétons à haute résistance, les fillers calcaires deviennent réellement intéressants grâce à l'emploi d'un superplastifiant [53].

La quantité optimale de filler calcaire augmente quand la dose de superplastifiant augmente et quand la résistance visée diminue. L'utilisation des fillers entraîne aussi une légère augmentation du retrait total [53]. Mais elle n'influe pas sur la durabilité générale du matériau (à maniabilité et résistance égales) si les fillers ne sont pas surdosés [69], sauf pour la résistance à l'écaillage.

Des études réalisées en Turquie [70] se sont intéressées aux problèmes des poussières provenant du concassage des roches calcaires et à la possibilité de leur utilisation dans les bétons en tant qu'addition. Elles ont consisté à étudier l'influence du taux de poussières de concassage sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons, à l'état frais et durci. Le sable a été partiellement remplacé par 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de poussières. Il a été constaté que lorsque le taux de poussières augmente, le volume d'air et l'affaissement diminuent. Un ajout de poussières de concassage jusqu'à 15% contribue à la diminution de l'absorption des bétons [66]. Par contre, au delà de 15 % l'absorption augmente. Les performances mécaniques des bétons réalisés sont représentées par la Fig. 2.1.

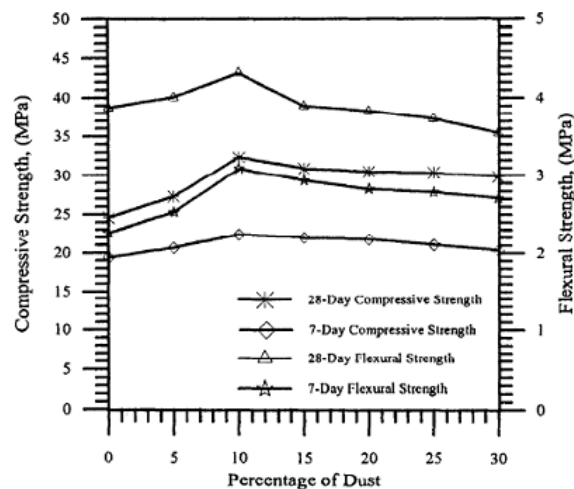


Fig. 2.1 : Performances mécaniques des bétons à différents taux de poussières [70]

Les mélanges les plus performants sont ceux qui contiennent 10 % de poussières. Au-delà, les performances mécaniques diminuent progressivement. Les mélanges contenant 5 % de poussières n'ont pas assez de fillers pour augmenter la compacité de la pâte de ciment, et ils présentent une résistance inférieure à ceux obtenus avec 10% d'ajout. Pour les mélanges ayant plus de 10%, les auteurs supposent qu'il n'y a pas assez de pâte de ciment pour enrober les granulats, ce qui entraîne une diminution de la résistance [70].

Le retrait de séchage de ces bétons est présenté Fig.2.2. Il augmente pour des taux de poussières allant de 0 à 10 % ; il diminue ensuite pour les taux supérieurs ou égaux à 10%. Les bétons les plus résistants sont les mélanges les plus compacts, les moins poreux et

qui s'opposent le plus à la pénétration de l'eau. Cependant, ce sont les mélanges qui ont enregistré le retrait le plus élevé [70].

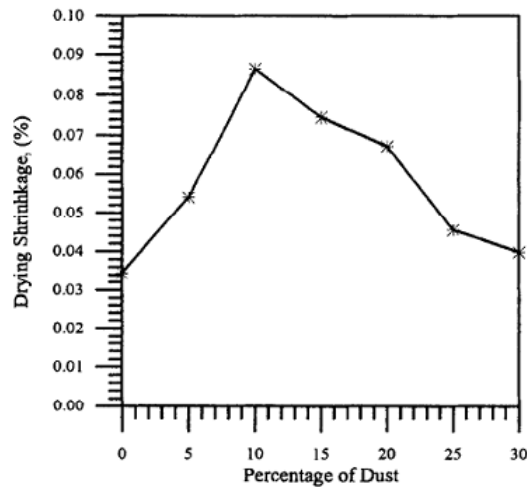


Fig. 2.2 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières ajoutées [70]

En Algérie, la demande croissante en granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières, suivi d'une exploitation anarchique des sables de mer. Par ailleurs, 20 % de sables fabriqués en carrières ne sont pas utilisés pour la construction à cause de leur teneur en fines supérieure à 12 % (limite normative actuelle [71], et les fillers résultants du processus de concassage sont considérés comme des résidus inexploitable. Pour limiter l'utilisation des sables de mer et dans le but de valoriser les matériaux locaux, une étude (Sadhouari et al) a été réalisée avec deux sables de concassage provenant de deux gisements différents (sable de Kristel noté SCK et sable de Sidi Ali Benyoub noté SCS). Des sables mélanges ont été fabriqués en combinant 60% des sables de concassage avec 40% du sable de mer (provenant de Terga). Les résultats observés sur mortiers ont montré que les résistances obtenues avec les sables de concassage seuls n'atteignent que 75 à 90 % des résistances obtenues avec les sables combinés. De plus, la montée en résistance des mortiers combinés est plus rapide que celle des mortiers à base de sable de concassage seul [71].

La résistance à la compression est très influencée par la variation de teneur en fines. Pour contribuer à la valorisation des sables de concassage dans les bétons, trois bétons ont été formulés avec les sables de concassage (SCK et SCs) et le sable de mer (SmT). Ces bétons sont référenciés respectivement BGK BGS et BT. Les bétons réalisés avec les sables de concassage ont été formulés avec différentes teneurs en fines, de l'ordre de 0, 5, 10, 15 et 20 %.

Les résultats obtenus à l'état frais (Fig.2.3) ont montré que le pourcentage d'air occlus en fonction du pourcentage de fines passe par un minimum situé entre 10% et 15% pour les deux séries des bétons. Corrélativement, la densité réelle du béton augmente rapidement lorsque le taux de fines passe de 0 à 15%. Au delà, elle diminue pour les deux séries de bétons. Les fines calcaires ont donc une influence positive, puis négative sur la densité, selon la quantité présente dans les mélanges. D'autre part, les fines confèrent au béton frais

une certaine cohésion et un pouvoir de rétention d'eau qui permet le maintien de l'homogénéité, en s'opposant au ressuage et à la ségrégation.

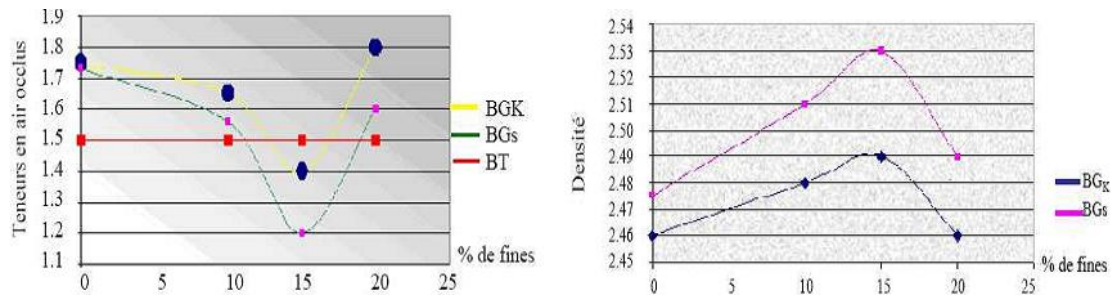


Fig. 2.3 : Teneur en air et densité des bétons frais à différents taux de filler [71]

A l'état durci, les courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de fines présentent la même allure, quel que soit l'âge des différents types de bétons, comme le montre la Fig. 2.4. A toutes les échéances, la résistance augmente avec le taux de fillers pour atteindre un maximum vers 15% de fines, puis chute modérément ensuite [71].

En conclusion, les auteurs considèrent que le sable de concassage est une solution intéressante, à condition que sa teneur en fines soit optimale ou bien qu'il soit combiné avec un sable de mer.

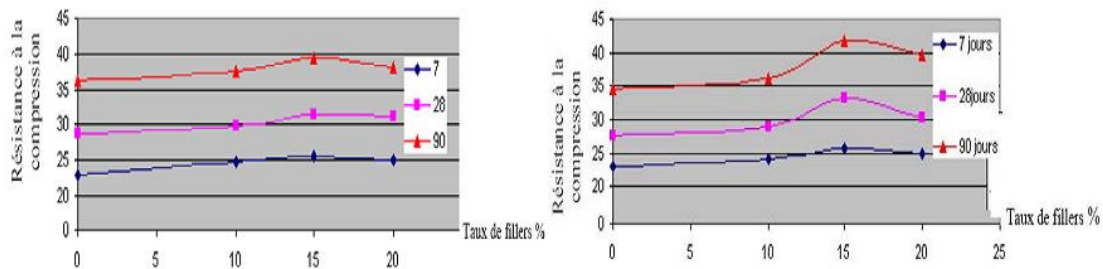


Fig. 2.4 : Résistance à la compression des mélanges à différents taux de fillers [71].

À gauche le mélange BGK et à droite le mélange BGS

D'autres recherches se sont intéressées à un critère optimal d'utilisation des fines calcaires dans les mélanges cimentaires algériens [72]. En général, il a été confirmé qu'un ajout de 5% de fillers calcaires dans le ciment (clinker) n'affecte pas sa résistance mécanique. Ce thème a fait l'objet de plusieurs recherches car il présente des avantages techniques, économiques et écologiques intéressants. En effet, il permet à la fois d'augmenter la résistance à la compression au jeune âge, de produire un ciment au coût de production à la tonne moins élevé, dont les émissions de CO₂ et de NO₂ sont réduites.

La substitution du ciment Portland par des fillers calcaires a été étudiée sur des pâtes de ciment à l'état frais et durci [72]. Quatre fillers de finesses variables ont remplacé le ciment avec les pourcentages suivants : 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 40%.

Les résultats ont révélés que la substitution du ciment portland par les fillers calcaires les plus fins, à un taux de 15%, réduit légèrement la consistance des pâtes (voir Fig.2.5) ainsi que le temps de prise. Les fillers jouent ici le rôle de « superplastifiant ».

Par ailleurs, la substitution du ciment par les fillers calcaires diminue la porosité totale et améliore la résistance à la compression, notamment si les fines ont une surface spécifique élevée et si la substitution est de l'ordre de 15%, comme le montre la Fig.2.6. L'accélération de l'hydratation de C3A et C3S, la formation des carboaluminates, la nature de la zone de transition entre fillers et pâte de ciment sont des facteurs qui sont conditionnés par la finesse des fillers.

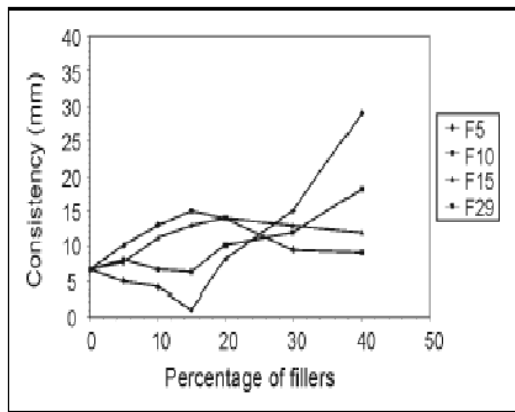


Fig. 2.5 : Consistance des pâtes de ciment en fonction du pourcentage de substitution [72]

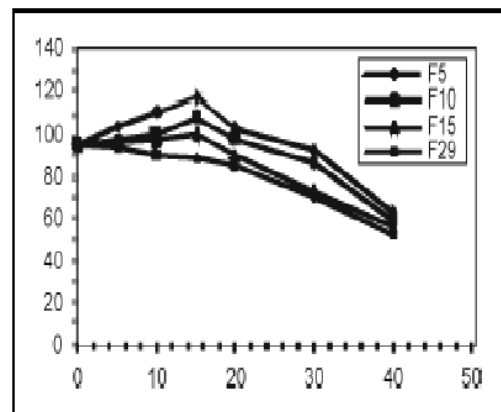


Fig. 2.6 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression des pâtes de ciment [72].

Vingt mélanges ayant différents taux de fines (0, 6, 12, 18 et 24%) ont aussi été confectionnés avec deux types de sable A et K et pour deux courbes granulaires de mélanges : l'une continue et l'autre discontinue [72]. Les mélanges formulés sont désignés par AC et KC s'il s'agit d'une courbe granulaire continue et par AD et KD si la courbe granulaire du mélange est discontinue. Il a été remarqué que les éléments fins ont une influence importante sur le rapport E/C. Plus le taux de fillers est important, plus la demande en eau nécessaire à l'obtention du même affaissement est importante (Fig. 2.7). Au-delà d'un taux de fillers de 18 % approximativement, la demande en eau devient moins importante. Les auteurs font l'hypothèse ici que la surface spécifique élevée des fillers conduit à former une microstructure colloïdale qui retient l'eau... Ces observations sont valables pour les deux squelettes granulaires étudiés, continu et discontinu, indépendamment de la nature minéralogique du sable utilisé [72].

Approximativement, pour un taux de fillers de 18%, les fillers se comportent comme un fluidifiant. Selon Bertrand et Coquillat, pour une consistance plastique, le taux de fillers optimal semble se situer entre 8 et 12 % dans le sable. Ainsi, il est nécessaire de considérer un nouveau paramètre faisant intervenir les effets de l'activité colloïdale des fillers. Les auteurs concluent que :

- ✓ pour un coefficient d'activité élevé, la meilleure maniabilité est atteinte [73] pour un taux de fillers de 8 % ;
- ✓ la demande en eau devient considérable pour le coefficient d'activité le plus élevé.

Les auteurs affirment que le coefficient d'activité est égal à 0,5 dans le cas présent, ce qui explique qu'ils sont allés jusqu'à 18 % pour atteindre l'optimum.

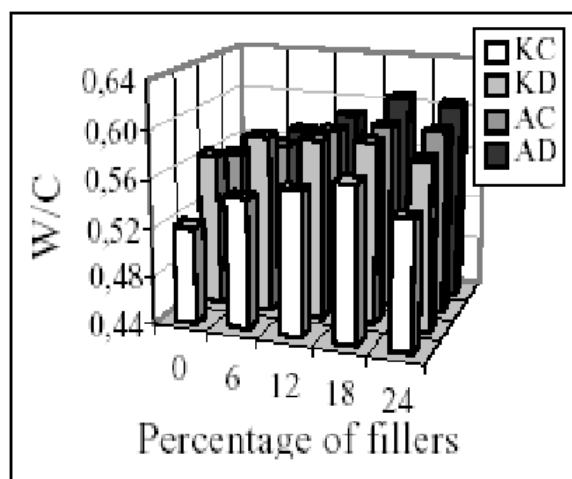


Fig. 2.7 : Variation du rapport eau/ciment en fonction du pourcentage de fillers [72].

Entre 0 et 12%, la densité augmente rapidement en fonction du taux de fillers. Le maximum de densité est observé entre 15 et 18 % (Fig. 2.8). Au-delà, une diminution est observée pour tous les mélanges. Ainsi, les fillers ont une influence tantôt positive, tantôt négative sur la densité. L'influence des fillers est plus marquée pour les bétons discontinus. A l'opposée de la densité, le pourcentage d'air diminue avec l'ajout de fillers, l'optimum est observé aux environs de 18% (Fig. 2.9). Pour les valeurs comprises entre 0 et 12%, les courbes sont presque constantes [72].

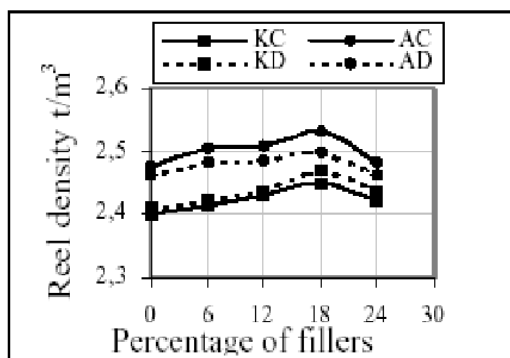


Fig. 2.8 : Variation de la densité réelle en fonction du pourcentage de fillers [72].

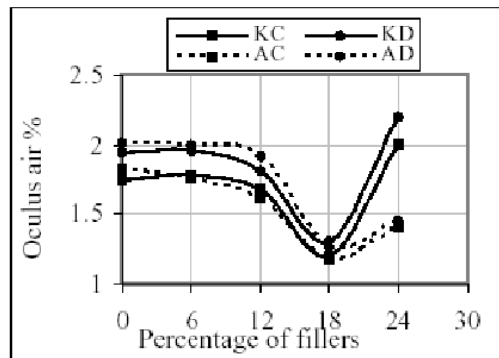


Fig. 2.9 : Variation de l'air en fonction du pourcentage de fillers [72].

La résistance à la compression de tous les mélanges augmente avec le temps, comme le montre la Fig. 2. 10, selon une cinétique qui semble indépendante du taux de fillers ou du type de béton.

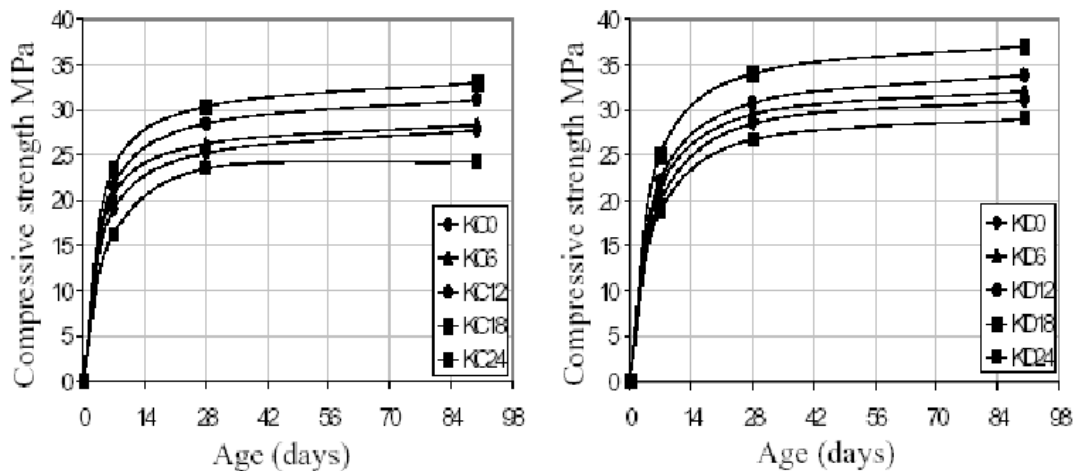


Fig. 2.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fillers [72].

D'après ces résultats, les auteurs parviennent à la conclusion que les fines calcaires jouent les rôles suivants :

- ✓ rôle de remplissage en comblant le manque d'éléments fins dans le ciment
- ✓ rôle rhéologique en dispersant les grains de ciment diminuant ainsi la demande en eau
- ✓ rôle chimique et physique par la formation des carboaluminates.

En Belgique, les fillers calcaires ont été longtemps considérés comme inertes au sens des normes « béton » [74]. Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'une certaine activité « liante » pouvait leur être attribuée. Par exemple, une étude a été menée au Sud de la Belgique afin d'évaluer l'effet de l'application du coefficient k à différents fillers calcaires de production locale. Six fillers ont été sélectionnés pour évaluer leurs effets sur les propriétés de mortiers et de bétons [74]. Le concept du coefficient k , tel que défini dans la norme européenne EN 206-1 pour les additions à caractère hydraulique et pouzzolanique, a été utilisé pour formuler les bétons. La composition du béton de référence sans fillers a été choisie pour satisfaire les exigences de durabilité pour une application en Belgique, dans un environnement extérieur (gel et contact avec la pluie).

Les résultats de cette recherche intégrant des aspects de durabilité à long terme ont montré que, malgré la diminution de la teneur en ciment et l'augmentation du rapport eau/ciment des bétons additionnés de fillers calcaires, des propriétés équivalentes sont obtenues en termes de résistance à la compression, d'absorption d'eau par immersion, de retrait de séchage et de résistance à la carbonatation. Par contre, l'absorption d'eau capillaire est systématiquement augmentée et un gonflement important est observé avec certains fillers en cas d'immersion dans une solution à haute teneur en sulfates. Les résultats indiquent également que la contamination des fillers par des particules argileuses contribue à augmenter la demande en eau des bétons [74].

Ces dernières années, la plupart des bétons sont formulés en adoptant un rapport e/c inférieur à 0,45, voire même parfois inférieur à 0,35. Les modèles de résistances impliquent que pour ces bétons, une fraction de ciment se comporte comme un filler inerte puisqu'il n'y a pas assez d'eau pour assurer une hydratation complète. C'est dans ces bétons que le remplacement partiel du ciment par un fillers moins cher et plus respectueux de l'environnement, comme un fillers calcaire par exemple, est le plus intéressant. Une étude a analysé la porosité capillaire totale des pâtes de ciment contenant différents taux de fillers calcaires [75], afin de trouver le pourcentage optimum de remplacement partiel du ciment par ces fillers.

La finesse des fillers calcaires a été aussi prise en compte en utilisant des fillers de tailles médianes différentes. Les résultats obtenus ont montré que le remplacement partiel du ciment par des fillers calcaires, jusqu'à 15 % en masse, pour des bétons ayant un rapport e/c égal à 0,3 et qui présentent une hydratation maximale dans des conditions saturées, est tout a fait possible sans affecter la porosité capillaire et les propriétés à long terme. Les bétons à faible rapport e/c présentent toutefois des déformations significatives dues à la fissuration au jeune âge.

A l'inverse, sur mortiers, la finesse des fillers limite plus ou moins les déformations, selon leur finesse. La Fig. 2.11 présente les déformations d'un mortier témoin et de deux mortiers à 10% de fillers fins ou grenus, ayant même rapport e/c et des résistances à la compression comparables. On constate que l'utilisation d'un filler moins fin est très avantageuse [75].

Quand les fillers sont fins, la distance entre les grains de la pâte de ciment à l'état frais sont réduites, ce qui augmente la tension capillaire et provoque des retrait plus amples (Fig. 2.11). Quand les fillers sont plus grossiers et de granularité comparable à celle du ciment, la compacité de la pâte est plus faible. La tension capillaire est alors moindre ainsi que le retrait (Fig. 2.11) [75].

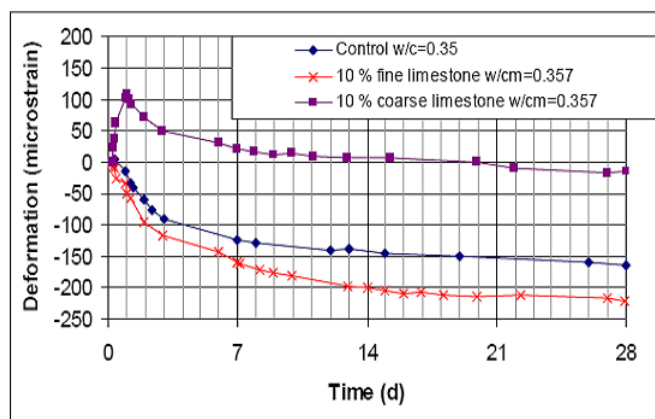


Fig. 2.11 : Déformation des mortiers sans fillers ou avec remplacement partiel de 10 % de ciment par des fillers calcaires en masse [76].

D'autres résultats, présentés Fig. 2.12, illustrent aussi le retrait des mortiers confectionnés avec un rapport e/c égal à 0,3 et un ciment substitué par 10 % de fillers calcaires en masse. Ils ont été obtenus en utilisant trois fillers de finesses différentes ayant un diamètre moyen de particules compris entre 3 et 100 μm . Le filler intermédiaire est de même finesse que le ciment avec un diamètre moyen de 17 μm [75]. Les courbes confirment le potentiel de réduction du retrait au jeune âge des fillers grossiers[77].

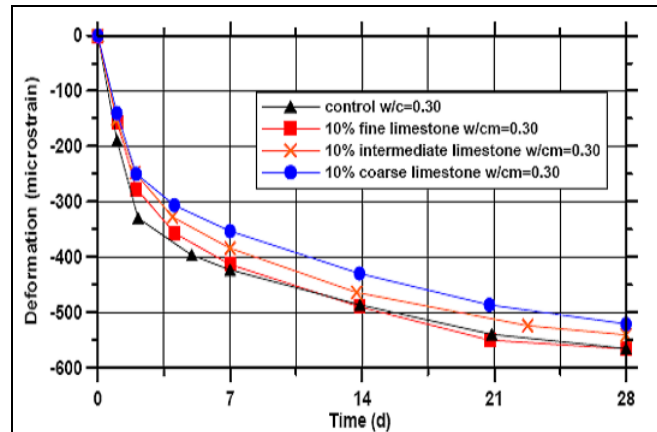


Fig. 2.12 : Déformation des mortiers remplacés par 10 % en masse de fillers calcaires, et du mortier de contrôle (sans fillers) [77].

Ces analyses montrent que pour les bétons à faible rapport e/c, le ciment peut être remplacé partiellement par des fillers calcaires à des pourcentages supérieurs à la valeur courante de 5 % déclarée par exemple dans la spécification de l'ASTM C150. Les diminutions de résistance à la compression observées expérimentalement dans ces essais sont de l'ordre de 7 % pour un remplacement de 10 % et de l'ordre de 12 % pour 20 % de remplacement. Ces pertes peuvent être contrôlées par une légère réduction du rapport e/c. Le remplacement partiel du ciment par des fillers calcaires dans des bétons à faible rapport e/c semble donc être très intéressant. Mais, dans les faits, cette possibilité n'est pas encore exploitée [75].

En conclusion, on retiendra que ces recherches sont encourageantes pour l'utilisation des sables de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des bétons hydrauliques.

2.2.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants :

L'incorporation partielle ou totale du sable de concassage dans la composition des Bétons AutoPlaçants ou BAP donne des caractéristiques rhéologiques acceptables lorsque la composition est adaptée. Une teneur élevée en fillers est nécessaire pour éliminer les frottements inter granulaires et des dosages en eau et en superplastifiant modérés sont conseillés pour éviter les ségrégations et les blocages de l'écoulement [78].

Une étude réalisée en Turquie a été dédiée à l'utilisation des volumes importants de

déchets de carrières calcaires dans l'industrie du béton, notamment les fillers [79]. Ceux-ci sont nuisibles à l'environnement et doivent être traités par des systèmes de filtration adaptés (Fig. 2.13).

En béton ordinaire, l'utilisation de ces fillers est limitée car ils augmentent la demande en eau et réduisent concomitamment la résistance. Par contre, dans les BAP, ces fillers peuvent être introduits en masse puisque la fluidité est maintenue en utilisant un superplastifiant. Il existe alors deux voies pour conserver la stabilité et la fluidité des BAP. La première consiste à augmenter la viscosité du béton frais en augmentant le volume de pâte, c'est-à-dire le dosage en ciment et/ou en additions minérales comme les cendres volantes par exemple. Mais ceci peut provoquer une plus grande chaleur d'hydratation et un retrait accru lors du séchage. Toutefois, les fillers calcaires n'ont pas ces inconvénients. La deuxième voie repose sur l'emploi d'un agent de viscosité. Mais les produits disponibles coûtent assez cher, et ils génèrent souvent un volume important d'air entraîné.



Fig. 2.13 : Système de filtration des déchets de carrières (marquage circulaire) et récupération sous forme de poudres (marquage rectangulaire) [79].

Les travaux déjà réalisés ont montré que l'utilisation des fillers calcaires :

- ✓ augmente significativement la maniabilité des mortiers et des BAP
- ✓ réduit le dosage en superplastifiant tout en maintenant une fluidité constante
- ✓ présente plusieurs avantages, dont ceux de réduire le coût des BAP et d'utiliser des matériaux qui posent des problèmes de stockage et d'environnement [78].

Pour montrer l'intérêt de l'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du béton (dont celle des BAP) [79], dix pâtes de ciment ont été formulées, les unes contenant des fillers calcaires issus des systèmes de filtration des carrières (QLP), les autres contenant des fillers calcaires traités (PLP). Les différents mélanges ont été réalisés en substituant le ciment par 10, 20, 30 et 40 % de fillers calcaires, de l'un ou de l'autre type. Deux pâtes pures de ciment, sans et avec superplastifiant, ont servi de référence. Les résultats ont montré

que les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/(ciment+fillers) constants.

Pour la résistance à la compression (Fig. 2.14), les fillers calcaires n'ont pas tous la même efficacité. L'amélioration la plus grande est obtenue avec 10% de fillers issus des filtres de carrières (QLP). Au-delà de cette valeur, la résistance diminue.

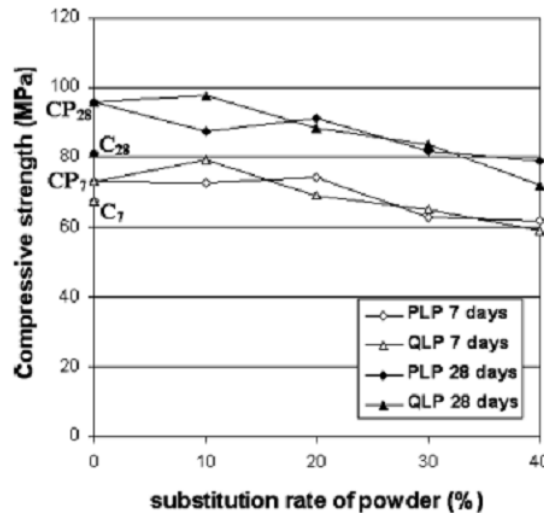


Fig. 2.14 : Résistance à la compression des pâtes de ciments [79].

Des BAP contenant ces deux types de fillers ont été formulés [79], et leurs performances ont été comparées à celles d'un mélange de contrôle sans addition. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- ✓ pour les BAP de classe de résistance courante (30 MPa) contenant 300 à 310 kg de ciment, les fillers issus des systèmes de filtration de carrières peuvent être utilisés ;
- ✓ pour des classes plus élevées (45 à 50 MPa), ces fillers peuvent aussi être utilisés mais il faut aussi augmenter le dosage de ciment sous peine d'une diminution de la résistance ;
- ✓ le coût des BAP contenant ces fillers est réduit de 0,05 à 0,1 \$/MPa/m³ par rapport au coût d'un BAP ne contenant que du ciment, ce qui donne, pour une résistance moyenne de 30 MPa, une réduction de l'ordre de 1,5 à 3 \$/m³.

Ainsi, l'utilisation des fillers calcaires obtenus par les systèmes de filtration des carrières dans les bétons autoplaçants présente une solution économique et environnementale intéressante [79]. Des BAP contenant ces deux types de fillers ont été formulés [79], et leurs performances ont été comparées à celles d'un mélange de contrôle sans addition.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- ✓ pour les BAP de classe de résistance courante (30 MPa) contenant 300 à 310 kg de ciment, les fillers issus des systèmes de filtration de carrières peuvent être utilisés ;
- ✓ pour des classes plus élevées (45 à 50 MPa), ces fillers peuvent aussi être utilisés mais il faut aussi augmenter le dosage de ciment sous peine d'une diminution de la résistance ;
- ✓ le coût des BAP contenant ces fillers est réduit de 0,05 à 0,1 \$/MPa/m³ par rapport au coût d'un BAP ne contenant que du ciment, ce qui donne, pour une résistance moyenne de 30 MPa, une réduction de l'ordre de 1,5 à 3 \$/m³

Ainsi, l'utilisation des fillers calcaires obtenus par les systèmes de filtration des carrières dans les bétons autoplaçants présente une solution économique et environnementale intéressante [79].

Une autre étude comparant l'utilisation d'un sable riche et d'un sable pauvre en fines dans les bétons autoplaçants a été menée en Turquie [80]. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés pauvres en fines, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci. Ces travaux ont permis de conclure que :

- ✓ pour remplacer les fines contenues dans les BAP, des sables concassés riches en fines (15 à 20 % en masse) peuvent être utilisés. Le choix du type de sable apparaît donc important pour obtenir une bonne résistance à la compression avec un minimum d'addition ;
- ✓ l'utilisation d'un sable calcaire de concassage a été bien appréciée par les praticiens;
- ✓ l'essai au bleu de méthylène est une méthode efficace pour choisir un sable approprié ayant un pourcentage élevé en fines, à défaut de méthodes plus sophistiquées comme la microscopie SEM.

La possibilité d'utiliser les calcaires de carrières en vue de développer des BAP économiques a été aussi étudiée au Canada [81]. Dans une première étape, le remplacement partiel du ciment par un taux croissant de cendres volantes de 0, 20, 35, 45 et 55% a été étudié. Le mélange à 35% de cendres volantes a été choisi comme mélange de référence puisqu'il améliore la résistance, diminue le coût des matériaux et diminue aussi le

dosage en agent de viscosité. La deuxième partie est consacrée à la confection de bétons composés par le mélange de référence avec 0, 10, 20, 30, 40, 50% de fillers calcaires provenant des carrières (en remplacement du sable naturel). Les résultats obtenus ont montré que:

- ✓ le remplacement partiel du sable par 50% en masse des fines de carrière diminue le coût des BAP sans affecter la résistance à la compression (voir Fig. 2.15) ;
- ✓ une diminution du dosage du réducteur d'eau a été observée ;
- ✓ la résistance à la compression diminue à jeune âge mais elle augmente à long termes.

Le remplacement partiel du sable par des fines calcaires et du ciment par des cendres volantes réduit donc largement le coût des BAP et donne des résistances à 28j et à long termes comparables à celles des BHP.

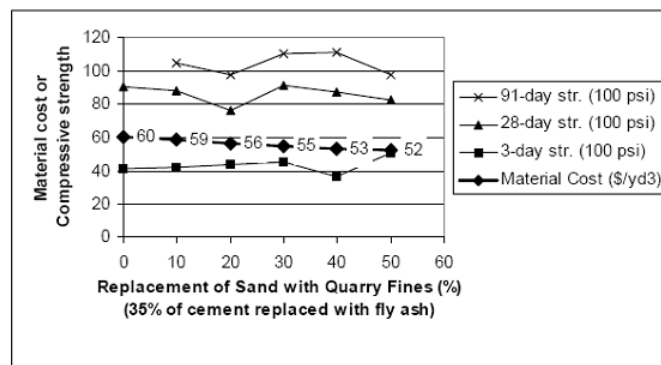


Fig. 2.15 : Résistance à la compression des BAP, le sable est remplacé partiellement par les fillers de carrières [81].

Les fillers non pouzzolaniques sont fréquemment utilisés pour optimiser la compacité des particules et le comportement des pâtes de ciment dans les bétons autoplacants. Il a été démontré (Bosilijkov) que les fillers calcaires provenant du concassage des granulats ont une influence positive sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Pour les BAP ayant un dosage en ciment de l'ordre de 380 et 390 kg/m³, une substitution jusqu'à 50% du volume de ciment par des fillers calcaires provenant du concassage des granulats peut être utilisées. Les résultats montrent que si les fillers calcaires sont bien gradués, ils augmentent significativement la déformabilité de la pâte. Quand un grand volume de fillers est ajouté aux BAP, leur résistance à la compression à 28 jours est améliorée. Ces fillers permettent de diminuer le coût des BAP.

Il a été démontré aussi que l'ajout de fillers calcaires de surface spécifique Blaine élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné, augmente leur compacité, améliore leur résistance à la ségrégation et la robustesse de leur formulation [82]. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe significativement sur la demande en superplastifiant (SP). Une augmentation de la surface Blaine des fillers conduirait (étonnamment) à une diminution du dosage en SP et à une diminution de l'ouvrabilité au cours du temps [82].

Comme précédemment, ces différentes recherches contribuent à valoriser l'utilisation des fillers calcaires et des sables de concassage dans les BAP.

2.2.3 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons à hautes performances

Dans les travaux de Donza, Cabrera et Irassar[83] , les performances de bétons formulés avec un sable de concassage ont été comparées à celles obtenues avec un sable naturel. Les deux types de bétons ont été formulés avec le même dosage en ciment, le même rapport e/c et la même maniabilité a été visée en modulant le dosage en superplastifiant.

Les résultats obtenus ont montré que les bétons avec sables de concassage nécessitent un dosage plus élevé en superplastifiant que les bétons aux sables naturels. Ils présentent en revanche des résistances mécaniques supérieures à celles obtenues avec le sable naturel, à tout âge d'essais.

Les sables concassés peuvent donc être utilisés pour obtenir des bétons à hautes performances (BHP) ayant des propriétés mécaniques similaires ou meilleures à celles obtenues avec un sable naturel de bonnes caractéristiques. D'autres recherches réalisées sur des mortiers confectionnés avec des sables remplacés partiellement par un pourcentage croissant de poussières de concassages, allant de 0 jusqu'à 20%, ont été effectuées [70]. Au jeune âge, une amélioration de la résistance à la compression des mortiers contenant les poussières de concassage a été remarquée, bien que la demande en eau et la porosité de ces mélanges soient supérieures. Le gain de résistance au jeune âge est attribué à l'accélération de l'hydratation du aux effets de l'introduction des poussières de concassage. A long terme, aucun effet nuisible n'a été observé. Il est montré ainsi que les sables et les fillers issus de concassage sont capables également d'améliorer les performances des BHP.

2.2.4 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons courants (travaux Tunisiens)

L'épuisement des réserves en sables alluvionnaires, suite au développement urbain des grandes villes tunisiennes, nécessite des solutions de substitution de ces matériaux [84]. Les stocks potentiels en sable de concassage d'âge et de qualité variables, qui existent dans les différentes carrières exploitant des roches carbonatées, méritent d'être identifiés afin d'étudier leur conformité par rapport aux exigences normatives applicables dans le domaine du bâtiment.

Pour ces raisons, l'influence du remplacement partiel ou total du sable siliceux par du sable calcaire concassé sur les performances rhéologiques et mécaniques des bétons a fait l'objet de plusieurs études. Certaines se sont intéressées aux propriétés des sables calcaires de concassage issus des principales carrières de Tunisie, en tenant compte de la qualité de la roche exploitée [84 ;85]. Les sables analysés présentent pour la plupart des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques conformes aux exigences de la

réglementation en vigueur pour les sables à bétons hydrauliques [NT 21.30, 2002], excepté pour les teneurs en fines qui sont relativement fortes en général ($> 15\%$) et pour la propreté mesurée à l'aide de l'essai de l'équivalent de sable (valeur comprise entre 17 et 86). Des analyses complémentaires ont montré également que les sables

analysés peuvent être rendus conformes aux différentes exigences par de simples corrections (lavage par exemple), puisque leurs constituants minéralogiques ne renferment pas d'éléments nuisibles en forte proportion, comme les sulfates, les chlorures, les matières organiques, etc.

Les résistances à la compression obtenues sur des bétons de sables calcaires de concassage sont souvent supérieures à celles des bétons de sable alluvionnaire siliceux, à dosage en ciment et en eau identiques [85]. Un sable calcaire conforme aux exigences normatives améliore sensiblement les performances du béton hydraulique [84]. Ces auteurs attribuent essentiellement

ces améliorations à la nature calcaire, à la forme et à la granulométrie du sable. En effet, la distribution granulaire étalée, la forme anguleuse des grains et la finesse du sable calcaire concassé

permettent un meilleur accrochage entre la pâte de ciment et les grains, un meilleur enchevêtrement granulaire et finalement une meilleure compacité du béton. Ainsi le béton obtenu serait plus résistant et durable [84].

L'influence de la finesse des fines des sables de concassage sur les caractéristiques mécaniques, rhéologiques et physiques des mortiers a été étudiée par Bedday [85] dans le but d'évaluer la quantité optimale de fillers susceptible d'améliorer ou du moins ne pas dégrader les performances. Il a été observé que la quantité d'eau de gâchage augmente avec le pourcentage de fines et avec leur finesse. En ayant plus de fillers très finement broyés, la surface spécifique Blaine (SSB) des grains devient plus grande et, selon les auteurs, la quantité d'eau nécessaire pour mouiller les grains sera plus grande. Par conséquent, pour avoir une maniabilité constante, le dosage en eau croît avec la quantité de fines et avec leur finesse.

Une surface spécifique plus grande adsorbe plus d'eau, ce qui va à l'encontre de l'apport bénéfique de ces fines qui jouent un rôle lubrifiant et peuvent améliorer l'ouvrabilité [85].

A l'opposé, les mélanges dépourvus de fines nécessitent aussi un besoin nettement supérieur en eau. Le manque de fines provoque une granularité discontinue et un manque de maniabilité et par la suite un apport supplémentaire en eau pour atteindre la maniabilité recherchée [85]. Les résistances à 28 jours des mélanges à base de sable de concassage dont les fillers ont une surface spécifique Blaine ou SSB de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ sont supérieures à celles obtenues avec le sable normalisé [CEN EN 196-1], l'augmentation maximale est de l'ordre de 30% pour 20% de fines [85] (Fig. 2. 16).

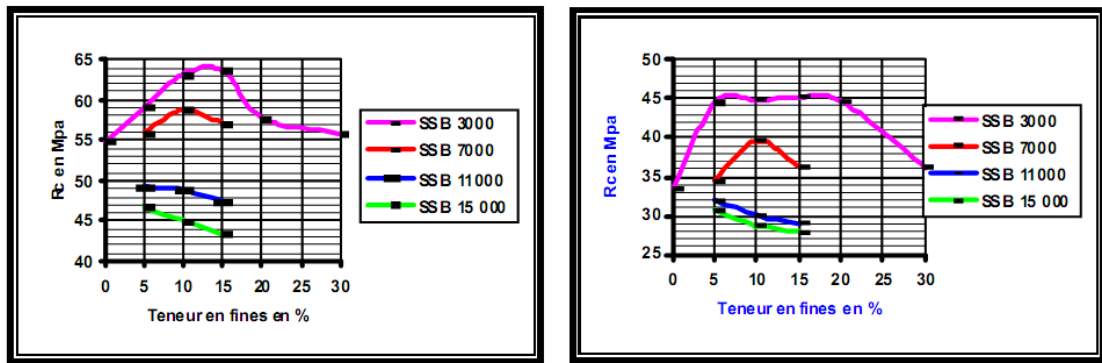


Fig. 2.16 : Résistance à la compression des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C [85] .

En ce qui concerne la résistance à la flexion, elle est peu influencée par l'ajout de fines comme le montre la Fig.2.17.

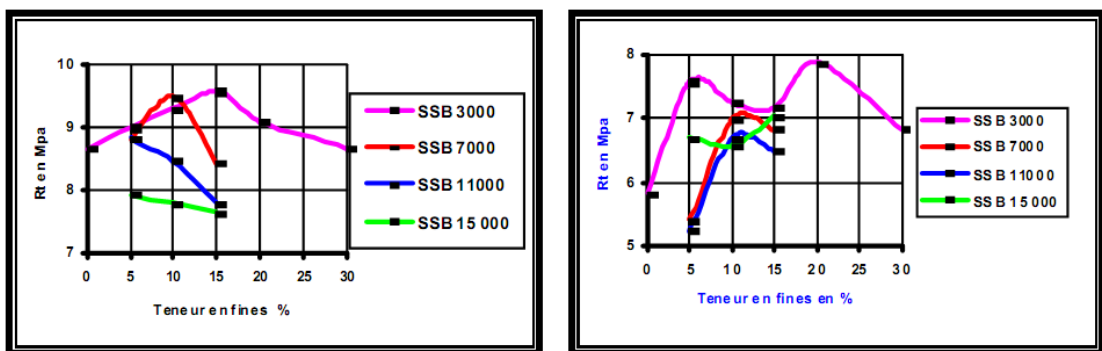


Fig. 2.17 : Résistance à la traction des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C [85].

Les résultats obtenus montrent clairement l'apport positif des fines, surtout lorsque leur SSB est faible (3000 à 7000). Selon l'auteure, cet apport réside dans un meilleur accrochage et une plus forte adhésion entre le liant et les granulats [85]. Le retrait a été étudié sur des mortiers à base de sable de concassage ayant différentes SSB et dans les conditions de chantiers tunisiens en été (hygrométrie 40 % et température 38 °C). L'allure générale des résultats obtenus à 28 j est présentée Fig. 2.18.

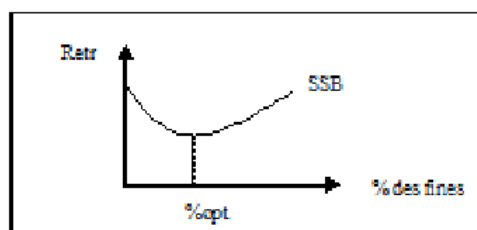


Fig. 2.18 : Retrait en fonction du pourcentage de fines

Un optimum est observé. Il est de l'ordre de :

- 5 % de fines pour les fortes SSB (11 000 et 15 000 cm²/g),
- 10 % de fines pour la SSB (7000 cm²/g),
- et 15 % de fines pour la SSB (3000 cm²/g).

Au delà de ces pourcentages, une augmentation sensible du retrait est remarquée. La perte de masse des mortiers avec 20 % de fines de SSB 3000 cm²/g est de l'ordre de 4 %. Elle atteint 6 % pour les mortiers avec 30% de fines. Le besoin en eau supplémentaire qu'imposent la finesse et la quantité des fines, au-delà de l'optimum, pour permettre la mise en place du mortier, explique cette différence [85]. La présence de fines de faible valeur de SSB conduit à une augmentation de la compacité, sans ajout d'eau, ce qui permet de limiter le retrait. Avec des fines de grandes valeurs de SSB, la quantité d'eau de gâchage est augmentée. Celle-ci va s'évaporer par la suite, ce qui conduit à une augmentation du retrait total [85].

Par ailleurs, les bétons silico-calcaires confectionnés en Tunisie présentent souvent des courbes granulométriques discontinues, contrairement aux bétons tout calcaire qui montrent une continuité granulométrique entre le sable et le gravillon. La compacité et les performances des bétons ainsi réalisés sont améliorées [85]. En substituant partiellement ou totalement le sable siliceux roulé par un sable de concassage de qualité (tel que le sable de la carrière de Jbel Ressas par exemple), les caractéristiques physiques et mécaniques obtenus sont supérieures à celles du béton silico-calcaire.

La durabilité de ces bétons vis-à-vis des attaques chimiques par des solutions concentrés en Na₂SO₄ et MgSO₄ a été étudiée, conformément au mode opératoire de la norme ASTM C 88. Il apparaît que le béton de sable de concassage est plus résistant à ces sulfates que celui du béton de sable alluvionnaire [85].

L'utilisation d'un sable de concassage riche en fines permet aussi de corriger la granulométrie du béton [86].

Des mortiers ont été confectionnés avec des sables reconstitués ayant un module de finesse variant de 0,5 à 4, par pas de 0,5, et des sables reconstitués à partir d'un sable commercialisé par le CTMCCV (Centre Technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et de Verre), de nature non précisée, auquel des fines calcaires ont été ajoutées par pas de 2 [86]. Les résistances mécaniques obtenues sont maximales pour un module de finesse de 2,5 (l'intervalle adéquat varie de 1,5 à 3,2), pour des teneurs en fines situées entre 8 et 18 %. Pour des teneurs supérieures, des chutes de résistance, allant jusqu'à 50%, sont observées [86]. Les mortiers les plus stables ayant des caractéristiques mécaniques optimales sont ceux réalisés avec des sables ayant une propreté (Equivalent de Sable ES) comprise entre 65 et 80%. La propreté optimale est située entre 65 et 75% pour les fines de nature calcitique. Des mesures de retrait et de gonflement

ont été réalisées sur ces mortiers. Les résultats ont montré que les valeurs minimales des variations volumétriques et de masse sont obtenues pour des quantités de fines variant entre 12 et 14%. Par contre, pour les teneurs en fines inférieures à 8% ou supérieures à 18%, les mortiers sont moins stables.

Ces résultats obtenus avec des sables reconstitués ont été aussi validés en utilisant 24 sables naturels (siliceux et calcaires de concassage). Les mortiers confectionnés avec des sables de concassage ont donnés des résistances mécaniques meilleures que celles obtenues avec les sables siliceux roulés, et même pour le sable reconstitué de qualité conseillée [86].

L'étude réalisée par Akrouf, Mounaga, Ltfi et Ben Jamma [87] a consisté à étudier l'effet des taux de fillers des sables de concassage sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. 72 mélanges ont été formulés en utilisant trois types de sable (un sable siliceux servant de référence, un sable concassé et un sable constitué par un mélange de 60% de sable concassé et 40% de sable siliceux). Pour chaque type de sable, quatre bétons ont été formulés: un béton ferme, un béton plastique, un autre très plastique et un béton fluide.

Les résultats obtenus ont montré que les bétons formulés avec un sable calcaire concassé consomment un peu plus d'eau par rapport à des bétons à base d'un sable siliceux, à affaissement constant et pour un dosage en ciment de 350 kg/m³. La différence observée a été attribuée au pourcentage élevé de fines du sable concassé. La résistance à la compression du béton confectionné avec le sable concassé est inférieure de 22% par rapport à celui avec le sable siliceux.

L'influence de la substitution du sable siliceux par le sable calcaire concassé vis-à-vis des attaques des ions chlorures a été aussi étudiée sur des mortiers. La diffusion des chlorures a été déterminée par deux tests ; un test de migration et un test d'immersion [87]. Les résultats du test de migration ont montré que le coefficient de diffusion des ions chlorures est plus grand pour le mortier de sable siliceux que pour le mortier de sable concassé [87]. Ce coefficient dépend aussi du rapport eau/ciment. Pour le test d'immersion, l'utilisation du sable calcaire concassé influence positivement la résistance aux chlorures ; le coefficient apparent de diffusion est toujours inférieur pour les mortiers confectionnés avec le sable concassé [87].

Cependant, la pénétration des chlorures augmente avec le temps d'exposition. La faisabilité de bétons hydrauliques courants avec des granulats calcaires provenant de différents gisements tunisiens, pour limiter le recours aux granulats de bonnes caractéristiques mécanique, physique et chimique, a été étudiée par Achour [88]. Les ressources alluvionnaires de qualité sont surexploitées, voire épuisées, notamment à proximité des centres de consommations comme la région de Tunis et la zone touristique côtière [88].

Dans le cadre de cette recherche, un inventaire évaluant les potentialités du pays en matière de ressources minérales a été effectué. Il a permis de montrer que, compte tenu de l'évolution de la demande, certaines régions du pays seront déficitaires dans un futur

proche. L'ouverture de nouvelles carrières est ainsi recommandée dans les formations géologiques calcaires majoritaires en Tunisie. Six gisements ont été choisis comme source d'approvisionnement potentiel apte à donner des granulats à bétons.

Les performances obtenues sur les bétons montrent que la plupart des granulats issus de ces formations peuvent répondre à priori aux exigences des normes tunisiennes en vigueur pour un emploi dans les bétons hydrauliques, comme le montre la Fig. 2.19. [88].

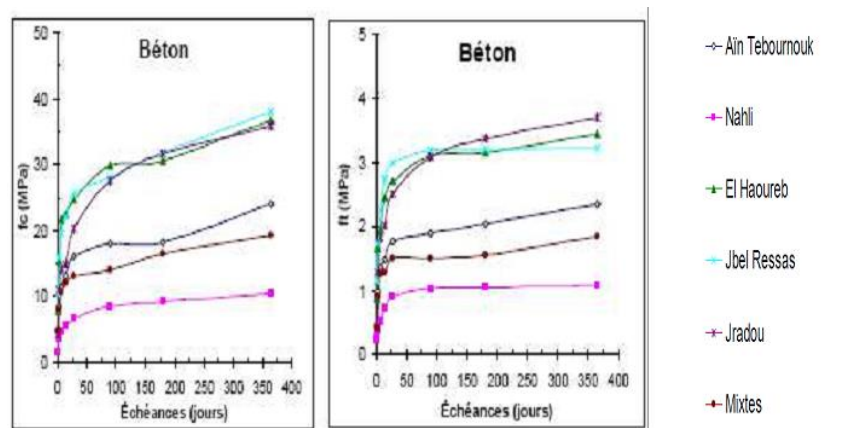


Fig. 2.19 : Performances mécaniques des bétons calcaires [88].

Ces travaux ont contribué aussi à une meilleure connaissance du comportement mécanique des bétons calcaires. Il a été montré que le taux de fillers influe sur l'adhérence pâte-granulat. Les fillers calcaires associées à la pâte de ciment modifient les propriétés de rigidité de la matrice, de sorte qu'elles se rapprochent de celle du granulat, améliorant ainsi l'ancrage mécanique de la liaison et la résistance à la compression [89].

2.2.5 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants :

La formulation de bétons autoplaçants (BAP) avec des matériaux locaux tunisiens, comme les sables de concassage et le sable de désert, a été étudié récemment en Tunisie [90]. La substitution progressive de ces deux produits au sable alluvionnaire additionné de fillers d'apports dans la composition des BAP étudiés a permis d'analyser l'effet du type de sable sur le comportement à l'état frais et durci. Les essais ont consisté à réaliser différentes combinaisons binaires des trois sables choisis, à différentes teneur en superplastifiant (SP). Seuls sont résumés ici les résultats des mélanges sable roulé - sable de concassage.

A faible dosage en SP, les BAP se comportent à l'état frais comme des bétons ordinaires (consistance mesurée au cône d'Abrams, voir Fig. 2.20). A dosage en SP plus élevé, la substitution du sable roulé par le sable de concassage provoque une

légère diminution de la fluidité, excepté pour la substitution à 30% (étalement maximum quel que soit le dosage en SP). La baisse de fluidité des autres combinaisons est attribuée à l'augmentation des frottements intergranulaires induits par les gros grains anguleux du sable de concassage. Toutefois, l'ajout d'une quantité importante en fillers permet a priori de diminuer ces frottements, comme l'indique le BAP à 100% de sable de concassage.

L'utilisation partielle ou totale du sable de concassage dans les BAP conduit donc à des propriétés rhéologiques acceptables.

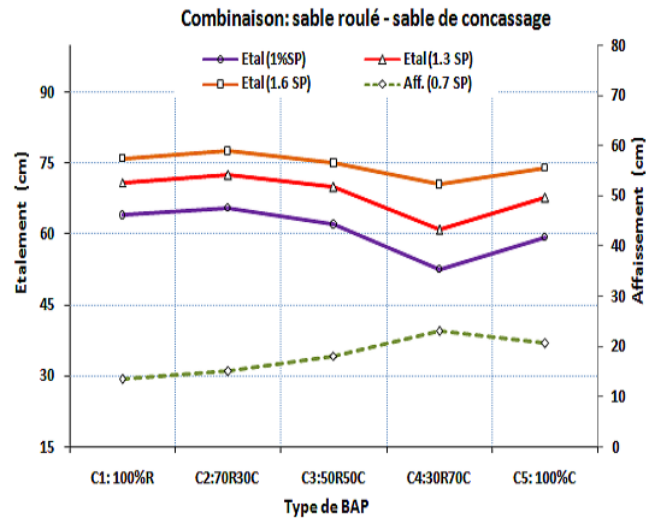


Fig. 2.20 : Courbes d'étalement au cône d'Abrams des BAP pour les différentes combinaisons de sable roulé et de sable de concassage [90].

A l'état durci, la substitution progressive du sable de concassage par le sable roulé provoque une augmentation de la résistance à la compression. Elle est de l'ordre de 30 % pour les BAP ne contenant que du sable de concassage (Fig. 2.21)

A la traction, le comportement des BAP est similaire (Fig. 2.22). Les gains de résistance à la flexion et au fendage sont respectivement de 52 % et 31 % pour les BAP à 100% de sable de concassage, par rapport au BAP à 100 % de sable roulé.

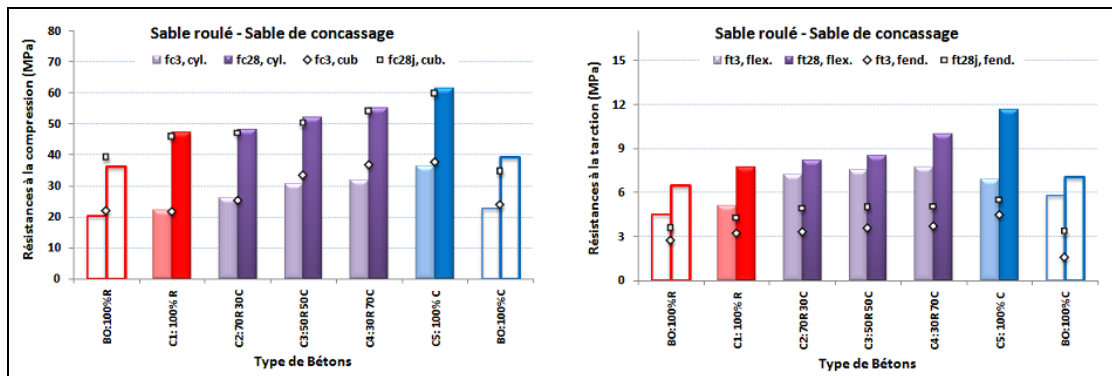


Fig. 2.21 : Résistance à la compression des BAP réalisés par Rmili [90].

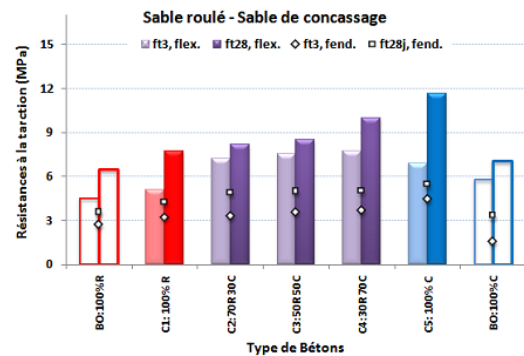


Fig. 2.22 : Résistance à la traction des BAP réalisés par Rmili [90].

Par ailleurs, l'utilisation du sable de concassage diminue le coefficient d'absorption d'eau par capillarité et augmente légèrement le module d'élasticité [90]. Le remplacement partiel ou total du sable roulé par un sable de concassage dans la composition des BAP apparaît donc comme une alternative intéressante.

2-2-6 Conclusion :

De nombreuses études se sont intéressées à la recherche de voies alternatives à l'utilisation des ressources alluvionnaires en voie d'épuisement, notamment les sables alluvionnaires, pour la fabrication des bétons hydrauliques. Parmi les solutions proposées, l'emploi des sables calcaires de concassage est souvent recommandé. Cependant, dans les pays de Maghreb, en Algérie, leur utilisation est jusqu'à présent écartée quasi systématiquement de tout usage dans le bâtiment et les ouvrages d'art, malgré les avantages économiques et environnementaux que cette solution peut présenter. Notons que les spécifications normatives autorisent leur utilisation. Cette situation résulte essentiellement de l'absence de références scientifiques fiables à l'échelle du pays, et d'un manque d'exemples de réalisation d'ouvrages de références pouvant convaincre les maîtres d'ouvrages et les entreprises.

B- Ciment et processus d'hydratation :

2-3 Introduction :

Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland, car c'est lui qui assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant.

Ce clinker résulte de la réaction à haute température (autour de 1450 °C) du mélange des quatre oxydes principaux. Ceux-ci proviennent, pour la plus grande part, de roches naturelles extraites de carrières: les calcaires apportent l'oxyde de calcium, les argiles apportent la silice, l'alumine et l'oxyde de fer, les marnes apportent les quatre oxydes à la fois.

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques. Les quatre principaux sont l'oxyde de calcium (CaO), le silicium (SiO₂), l'aluminium (Al₂O₃), l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et représentent environ 95% en masse. Les oxydes sont combinés dans le clinker pour former les quatre minéraux anhydres principaux. Le Tableau 1.1 regroupe la composition minéralogique moyenne d'un ciment Portland.

Tableau 2.1: Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, d'après Taylor [63]

Nom du composant	Formule chimique	Notation cimentaire	% massique des différentes phases
Silicate tricalcique (Alite)	3CaO SiO ₂	C ₃ S	60 à 65%
Silicate bicalcique (Belite)	2CaO SiO ₂	C ₂ S	10 à 20%
Aluminate tricalcique	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A	8 à 12%
Aluminoferite tricalcique	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8 à 10%

D'autres phases mineures ($\text{CaO}_{\text{libre}}$, CaCO_3 , MgO , R_2SO_4 , Na_2O , K_2O , ...) sont associées à ces principaux minéraux. L'examen au microscope optique, à des échelles de l'ordre de 50 à 100 μm , montre des cristaux de quelques micromètres de silicates bi et tricalciques (C_2S et C_3S), enrobés dans une matrice d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF et d'aluminate tricalcique C_3A cryptocristallins [64].

La cristallisation de ces minéraux est fonction de la composition et de la finesse du "cru", de la température de cuisson (les conditions de cuisson influent sur la morphologie des cristaux), ainsi que du type de combustible. La vitesse de refroidissement influe sur la taille des cristaux des constituants: avec un refroidissement lent, on obtient de gros cristaux bien développés et dont l'hydratation sera plus difficile que celle des petits cristaux résultant d'un refroidissement rapide [91].

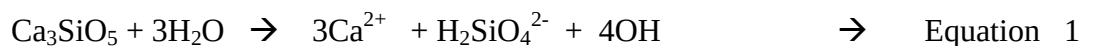
2-3-1 Le processus d'hydratation du ciment:

2-3-1-1 Hydratation des silicates

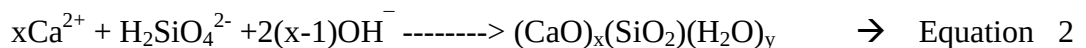
* *Le silicate tricalcique :*

Plusieurs études effectuées au laboratoire ont permis de décrire le mécanisme d'hydratation des phases silicates qui sont les composantes majoritaires du ciment Portland. Il existe trois réactions chimiques simultanées liées à l'hydratation du C_3S .

- dissolution congruente du C_3S suivant la réaction chimique suivante:



- précipitation des hydrosilicates de calcium notés C-S-H ;



-précipitation des hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, appelé portlandite :



La première réaction est très rapide générant des espèces ioniques en solution, laquelle atteint rapidement la saturation par rapport aux hydrosilicates de calcium. Il y a alors formation de germes de C-S-H essentiellement sur la surface du silicate tricalcique. La stoechiométrie des C-S-H, caractérisée par son rapport molaire C/S (CaO/SiO_2), n'excède jamais 2. La solution continue donc de s'enrichir en ions calcium jusqu'à atteindre la saturation par rapport à l'hydroxyde de calcium qui précipite à son tour (Equation 3).

* *Le silicate bicalcique :*

Le C_2S s'hydrate de la même façon que le C_3S , cependant avec une activité moindre. La réaction peut être décrite par l'équation 4:



Les produits d'hydratation sont identiques à ceux de C_3S , mais il y a comparativement une plus forte proportion de C-S-H. L'hydratation et le développement de la microstructure sont environ 90 fois plus lents que pour C_3S . La naissance des cristaux de $Ca(OH)_2$ est également plus lente qu'avec C_3S [92].

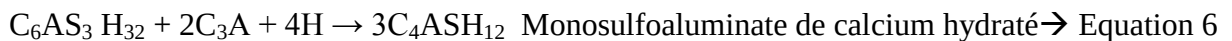
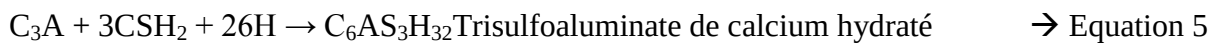
* Les phases aluminates

Les phases aluminates, aluminate tricalcique C_3A et aluminoferrite-tétracalcique C_4AF , sont les composantes complémentaires aux phases silicates dans un ciment.

- Le C_3A présente une réactivité importante dans l'eau se traduisant par le phénomène de prise éclair lié à la précipitation des hydroaluminates de calcium. Cette prise rapide conduit à une perte d'ouvrabilité de la pâte de ciment et à des résistances mécaniques faibles. Pour éviter ce raidissement de la pâte, le cimentier incorpore du sulfate de calcium sous forme de gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, d'hémihydrate (plâtre) $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ ou d'anhydrite $CaSO_4$. En présence d'une quantité de sulfates suffisante, le premier produit d'hydratation est l'ettringite (équation 5).

Lorsque la teneur en sulfates diminue, l'ettringite se convertit en monosulfo aluminate hydraté (équation 6).

L'hydratation de C_3A dépend, comme pour les autres minéraux du ciment, de facteurs tels que la température, le rapport eau/solide, la surface spécifique, la taille de l'échantillon et la présence d'adjuvants ou d'ajouts [92].



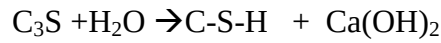
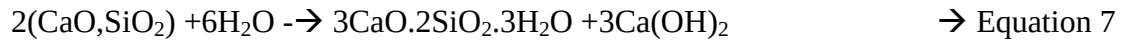
* La phase ferrite

Les études récentes confirment que l'hydratation de la phase ferrite des ciments Portland est semblable à celle de C_3A , aussi bien en présence qu'en l'absence de gypse. Toutefois, sa vitesse d'hydratation est beaucoup plus lente. La spectrométrie Mossbauer [93] permet de montrer que, à température et pression normale, l'hydratation de C_4AF donne une série d'isomorphes hydratés et $Fe(OH)_3$. Lorsqu'on ajoute du gypse, la séquence d'hydratation de la phase ferrite est la même que pour C_3A : il se forme de l'ettringite où Fe est substitué à Al et $Fe(OH)_3$. Collepardi et al. [94] trouvent que l'ettringite obtenue par hydratation de C_4AF en présence de gypse est plus stable que celle produite par C_3A dans les mêmes conditions. L'hydratation de la ferrite de calcium, C_2F , conduit à la formation de C_4FH_{13} et $Fe(OH)_3$.

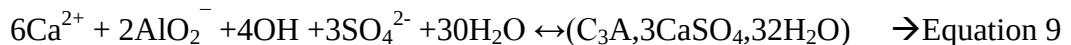
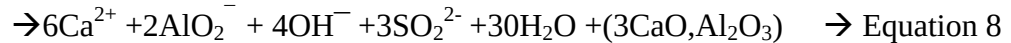
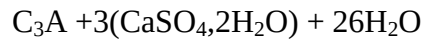
2-3-1-2 La chronologie d'hydratation

Au cours de la période de gâchage, les phases du ciment anhydre passent en solution dans la phase aqueuse pour donner des ions (Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} ...). Cette dissolution initiale est très rapide et exothermique. Dès les premières minutes, il se forme deux hydrates (C-S-H et l'ettringite).

- le silicate de calcium hydraté (C-S-H), formé par combinaison des ions Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ et OH^-



- l'ettringite, trisulfoaluminate de calcium hydraté formé par combinaison des ions Ca^{2+} , AlO_2^- , SO_4^{2-} et OH^-



Les grains de C_3A se recouvrent donc d'un écran d'ettringite très finement cristallisé. La formation de cette ettringite entraîne des forces d'expansion qui résultent de l'augmentation du volume des solides. Cette expansion provoque l'éclatement de la croûte d'ettringite et l'hydratation du C_3A . Mais à cet endroit, de l'ettringite se forme à nouveau et protège encore le C_3A de l'hydratation.

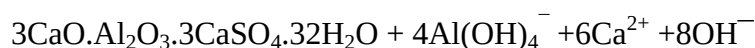
Par la suite, on remarque que l'élévation rapide du pH et de la teneur en calcium et en OH^- de l'eau de gâchage ralentit la dissolution des constituants du clinker. Cette étape est appelée « phase dormante » ou « d'induction » qui est influencée par les adjuvants et la température du milieu [95]. La formation d'ettringite et de C-S-H se poursuit lentement, et la phase aqueuse se sature en $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La durée de cette période est de quelques heures.

Les réactions qui entraînent la prise sont déclenchées par la précipitation de la portlandite, qui survient au bout de plusieurs heures (≈ 5 heures). La brutale consommation d'ions Ca^{2+} et OH^- par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ accélère la dissolution de tous les constituants du ciment.

On observe une augmentation du flux thermique correspondant à la précipitation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de C-S-H, assez lente au départ car la précipitation de la portlandite est endothermique.

La formation des hydrates se faisant plus rapide, le nombre de « points de colle » entre les grains augmente rapidement. La fin de la période de prise est caractérisée par une accélération de l'hydratation.

Dans la plupart des ciments Portland, la proportion molaire de gypse est inférieure à celle de l'aluminate. La formation d'ettringite, très rapide en fin de la période de prise et début de la période de durcissement, aboutit à l'épuisement du gypse (entre 9 et 15 heures), l'ettringite devient alors la source d'ions sulfates SO_4^{2-} pour former avec le C_3A excédentaire le monosulfo-aluminate de calcium hydraté ($\text{C}_3\text{A}, \text{CaSO}_4, 12\text{H}_2\text{O}$).





→ Equation 10

La présence de C_3A n'est pas indispensable à la prise, mais C_3A accélère le durcissement de la pâte en augmentant la chaleur et donc la vitesse d'hydratation des silicates de calcium, les grains de clinker se recouvrent d'une couche de plus en plus épaisse, ce qui ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. Après une quinzaine d'heures s'établit la période de ralentissement diffusionnel. Dans la majorité des cas, une partie du ciment restera ainsi anhydre, bien que l'hydratation se poursuive lentement pendant plusieurs années.

2-3-2 Les propriétés des principales phases hydratées

2-3-2-1 La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Sa solubilité dans l'eau est de l'ordre de 22 mol/L à 25 °C, soit environ 1,6 g/L [96], ce qui correspond à un pH d'équilibre de 13. Sa présence dans la pâte de ciment, par son équilibre de solubilité, maintient le pH de la solution interstitielle élevé. Sa solubilité diminue avec la température. C'est également une des phases les mieux cristallisées. Elle cristallise sous forme de cristaux hexagonaux plus ou moins développés dans la pâte de ciment, ces cristaux sont bien orientés sous forme de couche dans l'auréole de transition, ou en bordure des bulles d'air. Sa structure cristalline est de type hexagonal. Elle est constituée de plans d'ions calcium (plan ab) en environnement octaédrique assuré par 3 ions OH^- de part et d'autre du plan, ce qui constitue un feuillet d'hydroxyde qui est répété selon l'axe c (Figure 2. 23).

En raison de la grande taille de ses cristaux, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présente une faible surface spécifique. La portlandite peut aussi se trouver à l'état amorphe lorsqu'elle ne trouve pas assez d'espace pour cristalliser.

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique mais, par contre, cet hydrate joue un rôle notable pour des questions de durabilité [95] [96], car il opère un effet tampon en maintenant un pH basique.

La teneur initiale en portlandite est une donnée d'entrée de la plupart des modèles de carbonatation des bétons.

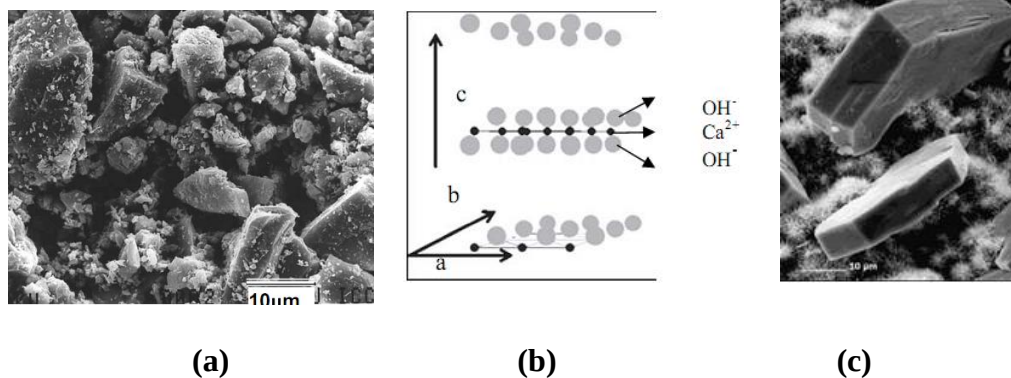


Figure : 2.23 (a) grains de ciment (b) structure cristalline de la portlandite ;
(c) image au MEB de cristaux de portlandite [97]

2-3-2-2 Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Les C-S-H constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment. On parle souvent de gel de C-S-H en se référant à des composés amorphes. Ce sont en fait des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes aux autres (Figure 2.24). Les dimensions typiques de ces particules sont de l'ordre de $60 \times 30 \times 5$ nm³[98]. Ces nano cristallites de forme lamellaire sont constitués de deux ou trois feuillets avec une étendue d'environ 5 nm comme le décrit le modèle de Feldman-Sereda [99].

La famille des C-S-H est formée d'une grande variété de silicates de calcium hydratés. Une des caractéristiques importantes qui différencie ces espèces est le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport Ca/Si). Trois phases de C-S-H sont distinguées : C-S-H- α correspondant à $0,66 < \text{Ca/Si} < 1$, C-S-H- β correspondant à $1 < \text{Ca/Si} < 1,5$, C-S-H- γ correspondant à $1,5 < \text{Ca/Si} < 2$ [96].

On distingue souvent également les C-S-H par leur morphologie [96], en particulier les C-S-H externes (outer product) de morphologie plutôt fibrillaire, qui se développent à partir de la surface des grains anhydres dans les pores de la pâte et les C-S-H internes (inner

product) de morphologie plus compacte, qui occupent l'espace libéré par le grain d'alite qui se dissout (Figure 2.24). Les particules de C-S-H peuvent être classées en 4 types morphologiques selon Diamond [100] :

Type I: il se présente en feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux et rayonnent autour du grain de ciment. Cette cristallisation aciculaire recouvre progressivement les grains anhydres et leur donne un aspect dit « en hérissos ». Cette morphologie fibreuse est surtout visible aux premiers âges de l'hydratation.

Type II: il se présente sous forme alvéolaire (nid d'abeilles).

Type III: il apparaît souvent comme de petits disques ou des sphères (0,2 μm) assemblés pour former des particules plus massives sans forme particulière. On le trouve dans les pâtes matures.

Type IV: il s'agit d'une structure particulièrement dense et amorphe.

Les types I et II cristallisent en début de prise dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Par contre, les types III et IV seraient plutôt des hydrates tardifs qui occuperaient la place des grains anhydres d'origine; pour cela, ils sont appelés hydrates internes [95].

Du fait de la petite taille des particules qui le composent, la surface spécifique du C-S-H est très élevée (de l'ordre de 250 m²/g) [101].

Le C-S-H est très peu soluble dans une solution saturée par rapport à la portlandite (quelques $\mu\text{mol/L}$, soit de l'ordre de 1 mg/L). Sa solubilité augmente quand la concentration en hydroxyde de calcium en solution diminue. Si le pH descend en dessous de 10, il se dissout au profit de la silice qui devient moins soluble [102].

Les silicates de calcium hydratés restent des corps mal définis et mal cristallisés non identifiables par DRX. C'est pour cela que cette phase est souvent appelée « gel », en rapport avec son faible degré de cristallinité et le fait qu'elle soit gorgée d'eau.

L'espace inter feuillet peut être qualifié de première classe de porosité. Les autres classes de porosité naissent de l'agencement des lamelles [99].

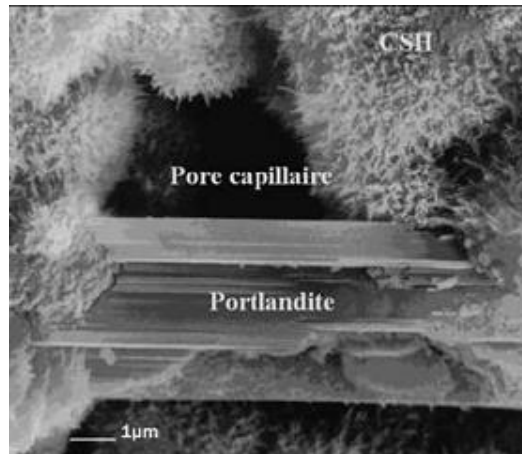


Figure : 2.24 morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'Alite [103]

2-3-2-3 Les aluminates de calcium hydratés

On distingue les phases hexagonales (C_2AH_8 – C_4AH_{13}) et la phase cubique C_3AH_6 .

* *Le C_3AH_6 ou hydrogrenat*

Le C_3AH_6 , $Ca_3Al_2(OH)_{12}$ est la forme la moins soluble des aluminates de calcium hydratés et la plus stable. Il présente la même structure cristalline que le grenat $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ (Katoite) [104]. L'hydrogrenat est le produit de l'hydratation des ciments alumineux, on le trouve rarement dans les ciments Portland hydratés à des températures normales.

* *Les phases hexagonales*

Les hydrates les plus stables sont les carboaluminates de calcium qui se forment dans les ciments contenant des ajouts calcaires ou simplement à partir des carbonates dissous dans la solution interstitielle du fait du contact avec le CO_2 atmosphérique.

2-3-2-4 L'ettringite

L'ettringite ($C_3A_3CSH_{32}$) cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (Figure 2.25), souvent rayonnantes (oursins) autour des grains de ciment anhydres dans une pâte de ciment âgée. Ces aiguilles se retrouvent parsemées dans les fibres de C-S-H [95]. Le nombre de molécules H_2O de la formule de l'ettringite est mal connu, il peut être 30, 31, ou 32 H_2O suivant la température et la pression partielle de vapeur d'eau du milieu.

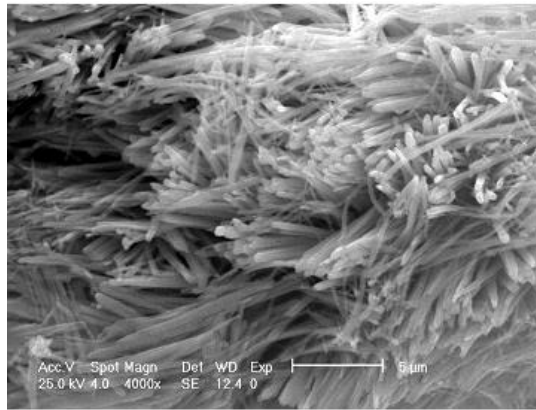


Figure : 2.25 Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une peolote d'ettringite [105]

C - Les superplastifiants et leurs modes d'action :

2-4 Historique

L'introduction des superplastifiants dans le béton a été le fruit du hasard. Du noir de charbon avait été ajouté au béton pour changer la couleur de la ligne médiane d'une autoroute à trois voies. Cela a dégradé la maniabilité du béton, un dispersant a donc été introduit pour contrecarrer l'effet du noir de charbon. Le béton, une fois pris, se caractérisait par des propriétés qui indiquaient l'influence positive du dispersant [106]. Les ouvriers avaient probablement ajouté moins d'eau en raison de la dispersion accrue, et le matériau durci avait montré une résistance supérieure [107].

Mielenz [108] nous apprend que les effets dispersifs des sels d'acides sulfuriques et d'acides naphtalènes sulfoniques furent utilisés pour la première fois en 1936 par H.L. Kennedy. En 1938, un premier brevet américain sur l'emploi d'agent dispersant à base d'acide aromatique sulfonique condensé avec la formaldéhyde, est octroyé à G.R. Tucker. En 1939, un second brevet sur les effets dispersifs des sels solubles d'acides sulfoniques est enregistré par J. Scripture [109].

Les lignosulfonates, obtenus par traitement du bois avec le bisulfite, sont utilisés en tant que dispersants vers 1950. Cependant, ce sous-produit de l'industrie de la pâte à papier contient du glucose qui retarde fortement la prise. Ces molécules organiques ne sont pas très longues, donc leur effet neutralisant sur les particules de ciment sera plus ou moins local. En utilisant de tels adjuvants, la réduction de la quantité d'eau de gâchage se trouve entre 8 et 10 %, ce qui est nettement insuffisant pour éliminer totalement l'eau excédentaire (non nécessaire à l'hydratation du ciment) [110].

La découverte au début des années 60 par les japonais (1962) et les allemands (1964) des propriétés dispersantes des lignosulfonates modifiés (LMS), des polynaphtalènes sulfonates (NSF) et des polymélamines sulfonates (MSF) ont permis à la technologie du béton de progresser. Il est devenu possible de fabriquer des bétons fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons de très faible rapport E/C et faciles à mettre en place.

Dans la présente décennie, une nouvelle famille de produits à base de polymères carboxyliques, acryliques ou de polyéthylène a été proposée et utilisée. Ces polymères qui ne contiennent pas de groupes sulfoniques, avec leurs molécules de longues chaînes latérales sont plus efficaces que les MSF et NSF. Ils ont été développés pour l'utilisation dans l'industrie du béton où qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

2-4 -1 Utilisation, adsorption et mode d'action des superplastifiants

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la Figure 2.26 [114] permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble. Young [115] constate qu'aux premiers stades de l'hydratation du ciment, les adjuvants anioniques sont préférentiellement adsorbés sur les phases aluminates. L'adsorption de superplastifiant par les C_3A et C_4AF purs est plus importante que par du C_3S et du C_2S purs.

La plupart des travaux effectués sur l'hydratation du C_3A influencée par la présence des adjuvants concluent que l'hydratation du C_3A est retardée par les superplastifiants [116]. Hanchara [117] et Kim [118] ont observé que l'adsorption des superplastifiants est plus importante pour les ciments présentant un taux en C_3A élevé et en concluent que l'adsorption des superplastifiants a lieu de façon préférentielle sur cette phase. Ces auteurs omettent cependant de préciser si l'adsorption observée a effectivement lieu sur la phase anhydre C_3A ou bien sur ces ou l'un de ces hydrates [109]. D'autres auteurs tel que Ramachandran [119] semblent s'accorder sur le fait que les superplastifiants s'adsorbent de manière décroissante selon la séquence : $C_3A > C_4AH_{13} > C_3AH_6$. Comparet [109] a mesuré l'adsorption des superplastifiants sur des phases pures les plus stables qu'il a synthétisées sans prendre en considération le C_3A du fait de sa grande réactivité. Il a pu mettre en évidence que les superplastifiants s'adsorbaient de façon préférentielle sur les hydrates du fait de leurs plus grandes surfaces spécifiques et il a établi un classement qui reflète l'évolution des surfaces spécifiques des minéraux : $CSH > Ca(OH)_2 > C_3AH_6 > Ettringite > Monosulfoaluminate >> C_3S$ (classement par ordre décroissant du pouvoir adsorbant).

En raison des compositions chimiques différentes, les particules de ciment peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes les autres. Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité.

Les molécules des superplastifiants viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ces superplastifiants peuvent agir soit:

- ✓ Par formation d'une couche lubrifiante [120], séparant les grains les uns des autres. Il suffit d'une très faible quantité de superplastifiant pour recouvrir d'une couche de quelques molécules d'épaisseur certains "sites" préférentiels des grains. Les particules de ciment se déplacent alors plus facilement les unes par rapport aux autres sans avoir à vaincre des forces plus élevées de cisaillement, comme c'est le cas d'une agglomération des grains;

- ✓ Par répulsion [121], les adjuvants neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules pour empêcher le contact entre les grains de s'opérer et amener une défloculation de ces grains;
- ✓ En réduisant la tension superficielle de l'eau par rapport au ciment et aux éléments les plus fins;
- ✓ Par un mécanisme d'actions successives. Les superplastifiants à base de polymères carboxyliques se différencient des superplastifiants traditionnels par une action liant la répulsion électrostatique et l'effet stérique [122]. C'est en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment grâce à la longueur des chaînes latérales des polymères que l'encombrement spatial améliore l'état dispersé (Figure 2.27). Cette réaction est la combinaison de deux actions successives (Figure 2.28) qui permettent de s'opposer à la perte de l'ouvrabilité dans le temps. Dès l'incorporation du superplastifiant dans le mélange cimentaire, une première partie agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive.

L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires. Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc la dispersion, évitant ainsi la perte d'efficacité dans le temps [123,113].

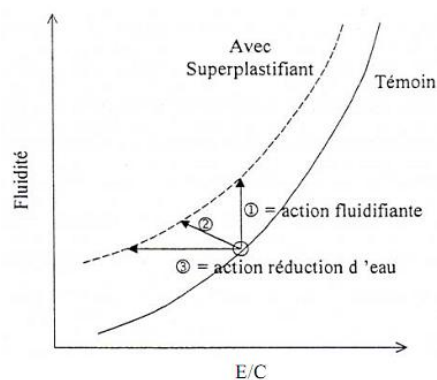


Figure 2.26 : Utilisation d'un superplastifiant [114]

- 1-Augmentation de la fluidité à teneur en eau égale
- 2-Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3-Diminution de la teneur en eau à fluidité égale.

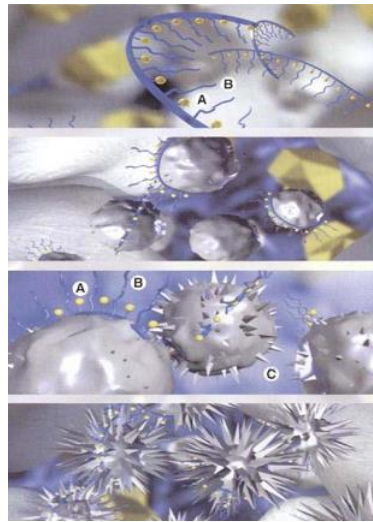


Figure 2.27 : Mécanisme d'action d'un superplastifiant à base de polycarboxylates [123]
A : répulsion électrostatique , B : effet stérique

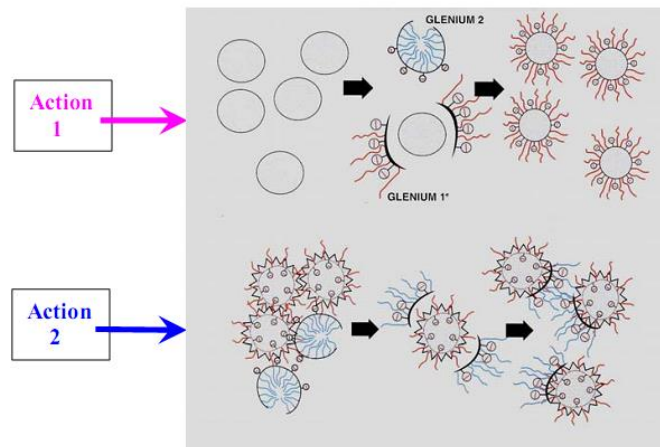


Figure 2.28: Mécanisme d'action successive (Exemple de superplastifiant « Glenium » à base de polycarboxylates)

2-4-2 Paramètres influents :

✓ Influence de la masse moléculaire du superplastifiant :

L'adsorption du superplastifiant dépend de sa masse moléculaire : lorsqu'elle augmente, l'adsorption et l'effet fluidifiant augmentent simultanément [124], [125], [126], [127], [128], [129]. La masse moléculaire du NSF peut varier de 2000 à 50000 Da [130] et celle du MSF de 7900 à 20000 Da [131]. Elle dépend des conditions de préparation par polycondensation. L'effet fluidifiant du superplastifiant dépend de sa masse moléculaire. Cependant, Ferrari et al. [132] trouvent que le superplastifiant NSF de masse moléculaire comprise entre 6000 et 8000 Da exerce un meilleur effet fluidifiant sur les ciments utilisés. Ils ont remarqué une

diminution de l'efficacité fluidifiante pour des masses moléculaires supérieures à 8000 Da dans le cas de deux ciments riches en A C3 (9 % et 10,5 %). Les résultats de Piotte [125] confirment que certains polymères NSF de haute masse moléculaire ne fluidifient pas les suspensions de ciment. L'effet de la masse moléculaire dépend ainsi de la composition du ciment [131], [132].

✓ ***Influence du dosage en superplastifiant :***

L'incorporation du superplastifiant dans le ciment conduit à une augmentation de la fluidité des pâtes de ciment. Paillère et al. [133] mettent en évidence l'existence de trois plages de dosages influençant le maintien de la maniabilité du béton:

- * une plage de faibles pourcentages d'adjuvant inférieurs à 1 % d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est faible, sa durée maximale étant de 15 min;
- * une plage de pourcentages élevés en adjuvant. Elle concerne des dosages en superplastifiant supérieurs à 1 % et pouvant atteindre jusqu'à 3 % en extrait sec. On constate ici un phénomène de refluidification du matériau hydraulique en fonction du temps, c'est-à-dire une augmentation de l'effet fluidifiant au cours du temps (après repos).
- * une plage de pourcentages très élevés en adjuvant. Les valeurs sont supérieures à 3 ou 4% d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est très faible.

L'addition du superplastifiant conduit également à un retard de l'hydratation du ciment, donc à un ralentissement du dégagement de la chaleur d'hydratation et à une augmentation du temps de prise. L'effet retardateur du superplastifiant est étroitement lié aux dosages de ce produit. Il augmente graduellement lorsque la concentration en superplastifiant augmente. Ce retard est dû, d'une part, à l'adsorption du superplastifiant sur le C3A, ce qui empêche le contact de l'eau avec ce composé et, d'autre part, à la formation des particules plus fines d'ettringite dont la texture est plus dense en présence de superplastifiant. Plus l'adsorption est forte, plus le retard est amplifié. Ce dernier est plus marqué par la faible teneur en C3A du ciment [134]. L'effet retardateur du superplastifiant contribue à l'intensification de son effet plastifiant. Un retard important peut entraîner une réduction de la résistance à la compression aux jeunes âges (à 1 jour) [129].

✓ ***Influence du contre ion :***

Les résultats de Simard et al. [129] ont montré que l'effet fluidifiant du polynaphtalène sulfonate dépend du type de contre-ion de ce superplastifiant. La présence des ions calcium diminue l'effet fluidifiant du NSF par rapport aux ions sodium. En revanche, l'effet retardateur du superplastifiant est indépendant du type de contre-ion. Piotte et al. [125] ont noté que les polynaphtalènes sulfonates (M-NSF) dont le contre ion (M) est un alcalin (monovalent inorganique) présentent tous un effet semblable sur la viscosité et le temps d'écoulement des suspensions étudiées. Par contre les contre-ions alcalino-terreux (divalents inorganiques) et

les contres-ions organiques ont tous un effet particulier sur l'efficacité du polymère : soit sur la fluidité initiale, soit sur la perte de fluidité en fonction du temps.

✓ ***Influence du mode d'introduction du superplastifiant :***

Le mode d'introduction du superplastifiant peut également influencer la fluidité des pâtes de ciment et la vitesse d'hydratation durant la période dormante. Le superplastifiant est généralement plus efficace lorsque son addition est différée [126] [135], [136], [137], ou fractionnée (une fraction 1/3 dans l'eau de gâchage et 2/3 à la fin du malaxage) [133], [138].

Collepari et al. [139] observent que l'addition différée du superplastifiant (2 min 30 après mélange eau-ciment) conduit à une augmentation de la fluidité.

Paillère et Briquet [140] signalent que les polymères de synthèse incorporés en différé (30 min et plus après fabrication des mélanges hydrauliques) présentent un effet fluidifiant très élevé. Chiocchio et Paolini [141] rapportent que l'addition différée du superplastifiant (NSF ou MSF) de quelques minutes augmente la fluidité par rapport à une addition dans l'eau de gâchage.

Dans ce cas, la diminution de l'ouvrabilité en fonction du temps est faible et la nature du superplastifiant n'influence pas ce changement de fluidité au cours du temps. Le moment d'addition optimal est de deux minutes après le mélange eau-ciment. Il correspond au début de la période dormante de l'hydratation du ciment (sans adjuvant).

Dans le cas de l'addition du superplastifiant dans l'eau de gâchage, le polymère est sensiblement adsorbé sur le ciment et le sulfate de calcium. Ainsi, seulement une faible quantité de superplastifiant reste disponible dans la solution interstitielle et son effet dispersant sur C_3S et C_2S est alors considérablement réduit. De plus, le sulfate de calcium ne peut plus réagir pleinement avec le C_3A pour réguler la prise éclair, ce qui dégrade l'ouvrabilité. En revanche, une addition différée de quelques minutes laisse un temps suffisant aux sulfates pour former une coquille d'ettringite qui bloquera temporairement l'hydratation du ciment avant que le superplastifiant ne soit introduit, les molécules de superplastifiant n'entrent donc pas en compétition avec le sulfate de calcium pour réagir avec le C_3A , elles demeurent disponibles pour disperser le C_3S et le C_2S . Paillère et al. [133] montrent l'intérêt de l'addition fractionnée du superplastifiant: une fraction dans l'eau de gâchage, l'adjuvant jouant son rôle de plastifiant réducteur d'eau, et la fraction restante à la fin du malaxage, voire avant la mise en œuvre des bétons, l'adjuvant jouant alors son rôle fluidifiant. Un superplastifiant qui serait efficace indépendamment du mode d'introduction serait mieux apprécié dans les centrales pour béton prêt à l'emploi ou de préfabrication afin de réduire la variabilité du slump du béton frais comme le cas pour les superplastifiants à base de polymères acryliques [123].

✓ ***Effets des superplastifiants à long terme :***

- La résistance des bétons à longterm est limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des superplastifiants, on va

pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible ; le résultat est une augmentation des résistances finales.

- Le béton d'enrobage qui est la surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention, car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que : le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques ou les agressions chimiques tel que le CO₂. Les superplastifiants sont là pour limiter grandement ces risques, notamment en augmentant la compacité des bétons et en protégeant les armatures pour un meilleur enrobage.

2-4-3 Conclusion :

La teneur en portlandite des matériaux cimentaires est un indicateur performantiel de la durabilité des structures en béton armé vis-à-vis de la carbonatation, puisque la portlandite représente la réserve de basicité des matériaux cimentaires qui permet, en maintenant un pH élevé autour de 13, de protéger par passivation les aciers de la corrosion.

Les superplastifiants à base de polycarboxylates sont des adjuvants qui ne contiennent pas de groupes sulfoniques. Ils arrivent à réduire l'eau d'environ 30 à 40 % grâce à leurs molécules de longues chaînes latérales et un poids moléculaire élevé. Leur structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique. Une première partie du superplastifiant agit immédiatement dès l'incorporation dans le mélange cimentaire, tandis que la seconde partie est libérée au fur et à mesure que la basicité du mélange augmente, ce qui permet de prolonger l'ouvrabilité sans effet retardateur.

La formulation des bétons adjuvés dépend du comportement du couple ciment-superplastifiant. Ce comportement est fonction de la réactivité du ciment d'une part et de l'efficacité du superplastifiant d'autre part. Certains ciments, en présence de certains types de superplastifiants, peuvent perturber la prise : retard de plusieurs heures, fausse prise immédiate, prise éclair.

D- Béton:

2-5-1 Introduction :

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

La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sur, des matériaux de base qui entrent dans la formulation mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation). Il s'agit de déterminer la meilleure qualité du béton qu'on puisse obtenir.

Pour ne citer que la résistance à la compression du béton qui reste, la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité [142], nous allons examiner

ci-après les différents facteurs ayant une influence sur cette résistance, et sur lesquels on pourra compter pour l'amélioration de la qualité du béton.

2-5-2 Historicité :

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [143].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

Au 20^{ième} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculants et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et de durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons de démoulage immédiat à plus de 25 cm pour les bétons autoplacants. De même, les résistances requises à 28 jours en compression peuvent s'échelonner depuis des valeurs modestes, de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPa et plus pour certains produits spéciaux préfabriqués.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplacants. L'étude du matériau n'est plus seulement gouvernée par l'amélioration

de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Nous disposons actuellement de bétons particulièrement fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration et qui sont devenues prioritaires. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 [144]. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes). Les BAP sont utilisés entre autres pour réaliser des éléments de structure préfabriqués, des réservoirs, des plates-formes de pont, des colonnes architecturales et ainsi que des ancrages pour de grands ponts.

2-5-3 Les composants d'un béton :

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure 2.29) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 μ m (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [145].

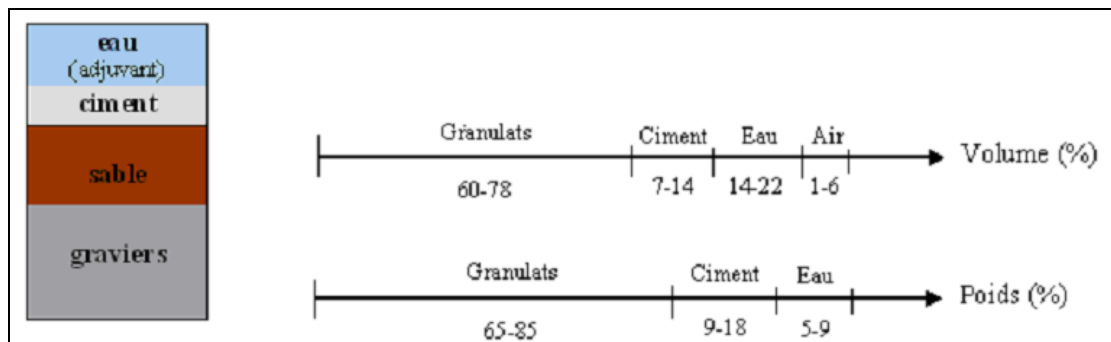


Figure 2.29 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire

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

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,...) peuvent être rajoutés dans le but de modifier les propriétés du béton.

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

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

2-5-3-1 Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment + additions + eau efficace + air + adjuvants. La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension de particules colloïdales suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau. Les forces colloïdales et la force de la pesanteur régissent alors complètement ses propriétés macroscopiques [146].

✓ Le ciment

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. C'est un liant hydraulique à la base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu [147]. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant d'accélérer pendant la phase de prise. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, les ciments les plus utilisés sont les CEM II de classe 32,5 – 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Ce sont des ciments bien adaptés aux usages les plus courants du bâtiment, dans les environnements 1 et 2 au sens de la norme P 18-305 [148].

El Barak et col. (2008)[149] ont montré que le dosage en ciment a un effet sur la viscosité du béton pour un gradient de vitesse petit.

✓ Additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [146]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulo-métrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la

ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique [150]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [151].

2-5-3-2 L'eau:

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité. Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [148], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

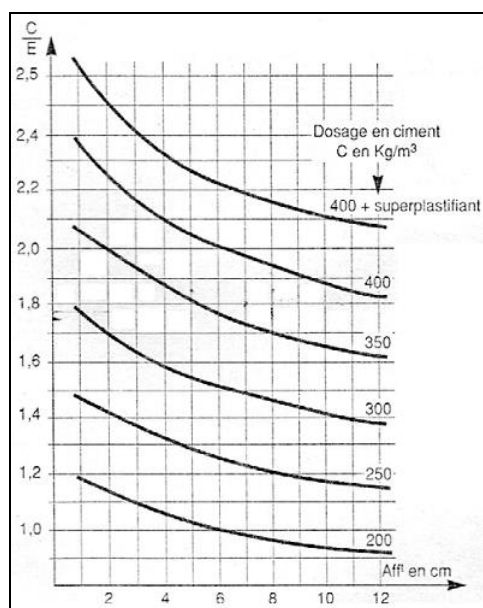


Figure 2.30 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé [153]

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure 2.30 montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé.

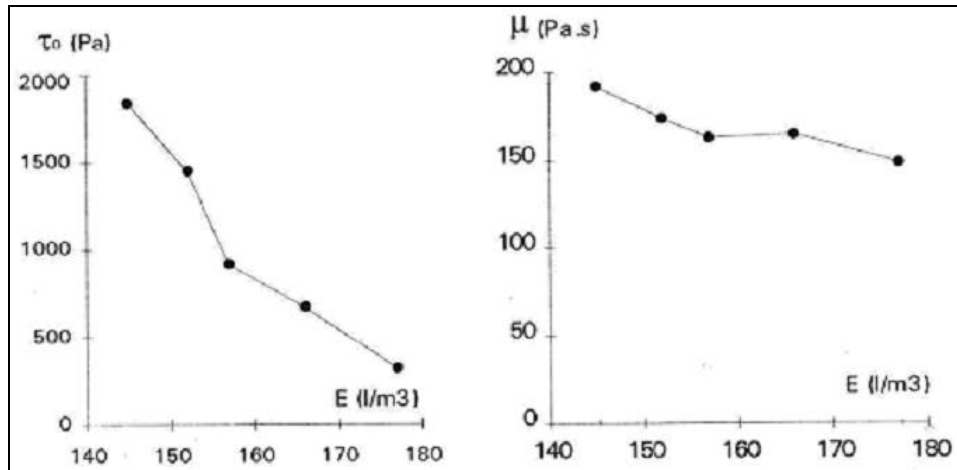


Figure 2.31 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [154]

Un ajout d'eau conduit également à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la figure 2.31.

2-5-3-3 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égale à 5% du poids du ciment permettant d'améliorer certains de ses propriétés [142]. Ils fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les superplastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent suivant leur nature à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [146]. Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des superplastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau.

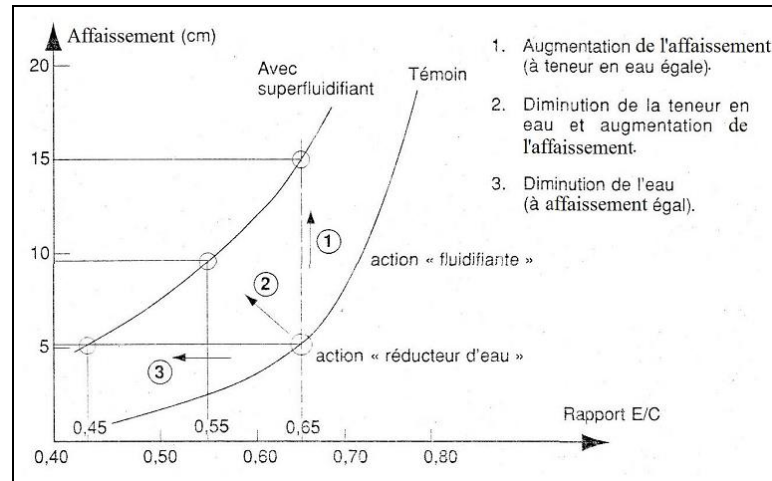


Figure 2.32 : Utilisation des superplastifiants [153]

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la figure 2.32, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en termes de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces.

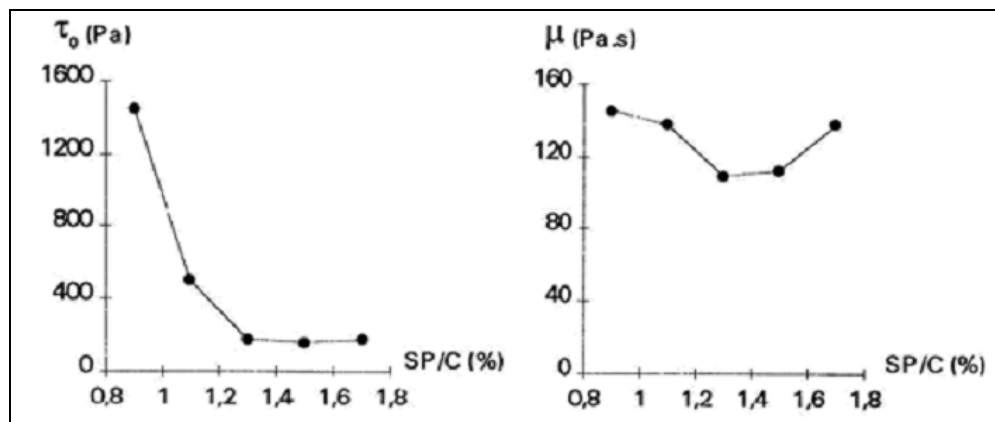


Figure 2.33 : L'effet du dosage du superplastifiant [155]

Dans sa thèse, Hu (1995) a étudié l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. Il a ainsi montré que les superplastifiant diminuent le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, mais que l'effet sur la viscosité reste modeste (figure 2.33).

2-5-3-4 Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la

confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci. Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico chimiques et mécaniques.

On a constaté qu'un granulat peut paraître insatisfaisant sous certains aspects, alors qu'aucun problème n'a été détecté lorsqu'il a été utilisé dans le béton. Par exemple, une éprouvette de roche peut se rompre lorsqu'elle est soumise au gel, mais ne pas se briser si elle est confinée dans du béton. Cela est d'autant plus vrai lorsque les granulats sont bien enrobés d'une pâte de ciment de faible perméabilité. Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton de qualité. Ceci dit, les essais sur les granulats sont d'une aide précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons [156].

La phase granulaire résiste au cisaillement suivant un processus mécanique faisant intervenir l'enchevêtrement et les frottements des grains (loi de Coulomb). Ces processus dépendent à la fois des caractéristiques physiques des granulats (dimension, forme, masse, etc.) et de leur concentration dans le mélange [146]. Le seuil de cisaillement τ_0 du mélange est régi par le nombre et la nature des contacts entre les granulats.

En général, la forme des granulats a un effet appréciable sur la maniabilité du béton. En effet, les granulats roulés avec leurs formes présentent l'avantage d'avoir un plus petit volume de vide intergranulaire, ce qui nécessite une faible quantité de pâte de ciment pour le remplir et réduisent généralement la demande en eau. Ils présentent aussi une bonne résistance intrinsèque mais développent une liaison médiocre avec la pâte de ciment. Par contre, les granulats concassés nécessitent une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités et de leurs absorptions [157], mais ils sont réputés avoir une excellente adhérence avec la matrice cimentaire, à cause de leurs natures chimiques, leurs porosités et leurs rugosités [154].

La figure 2.34 montre que la quantité d'eau est plus forte avec le granulats concassé, à cause de son absorption et de sa compacité. Mais dès que le mélange devient assez riche, il n'y a plus aucun effet de la forme du granulat sur le rapport optimal gravillon/sable (G/S). Enfin, la consommation en ciment est plus forte avec le granulats roulé, à cause de sa mauvaise adhérence à la pâte de ciment.

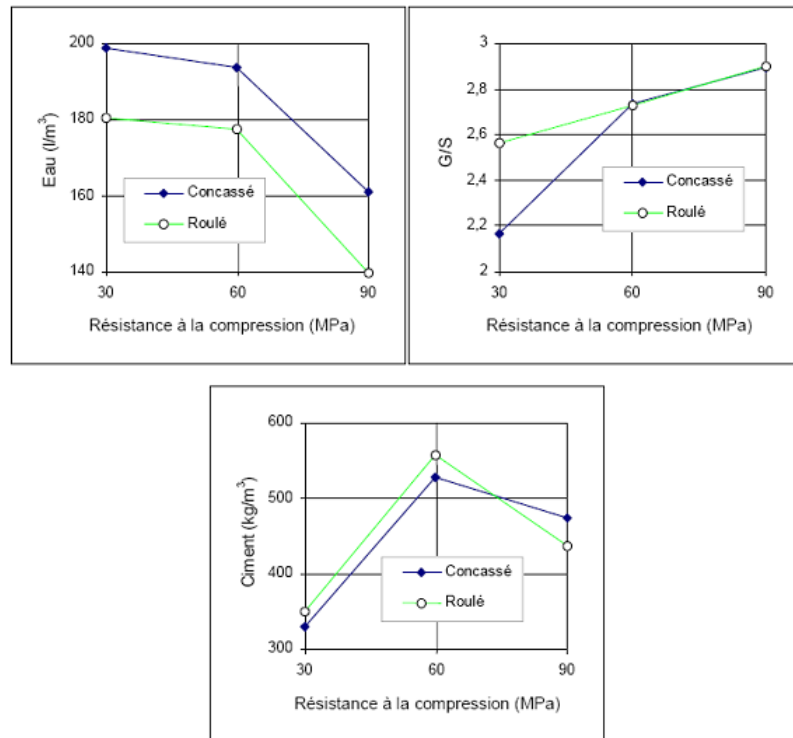


Figure 2.34 : Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres [154]

L'étendue de taille des grains des bétons peut être illustrée dans la figure 2.35.

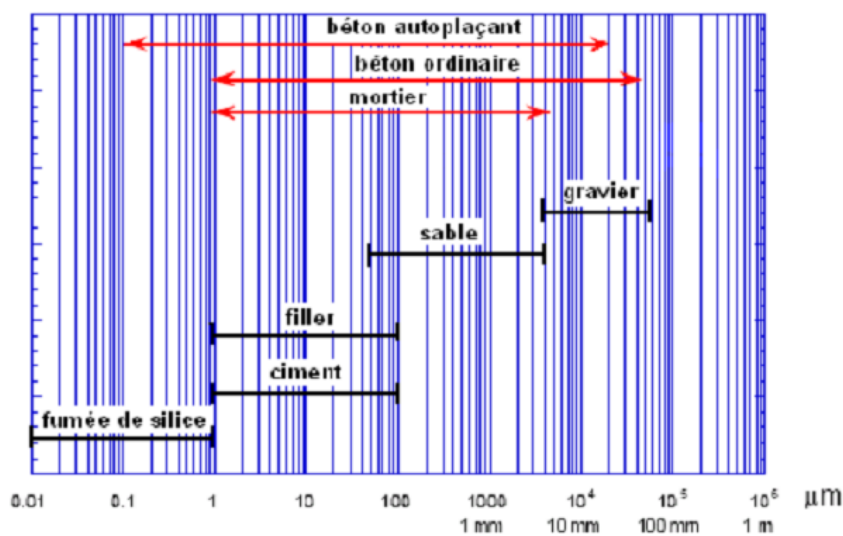


Figure 2.35 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire [146]

A partir de la figure 2.35, on constate clairement dans le cas des bétons ordinaires, la présence des gros granulats et l'absence de la fumée de silice.

2-5-4 Malaxage des constituants :

Après le dosage, les constituants sont versés dans un malaxeur et mélangés à l'aide d'un système de pales de brassage. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et/ou addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant. L'objectif du malaxage est de répartir des constituants de nature et de tailles différentes en vue d'obtenir un mélange le plus homogène possible. La répartition homogène s'accompagne d'une structure optimale, attendue pour un mélange poly-phasique comme le béton: le ciment entre en contact avec l'eau, les petits grains s'empilent dans les vides des plus gros grains et la pâte enrobe les granulats. L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage.

La durée totale du cycle de malaxage (figure 2.36) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

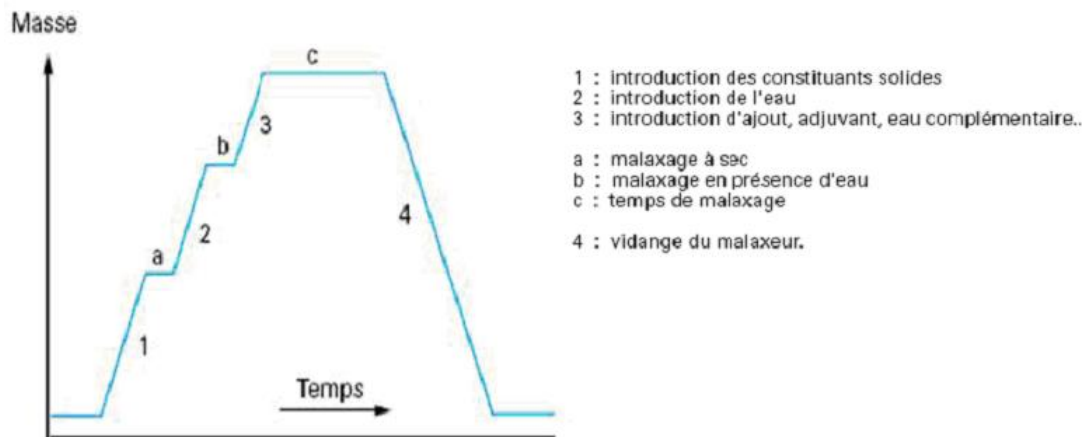


Figure 2.36 : Cycle de malaxage [158]

Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.

Le temps est un paramètre prédominant pour l'homogénéisation du béton lors de son malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air « piégés ». Ceci accroît donc la densité et la compacité du béton (figure 2.37).

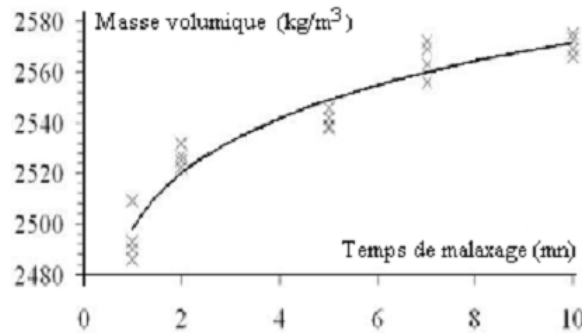


Figure 2.37 : Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage [159]

Parfois, une perte de la maniabilité du béton peut être observée lors de la prolongation du temps de malaxage. Ces phénomènes ont reçu des explications différentes selon les auteurs :

- ✓ selon Vandanjon (2000)[160], l'augmentation de la surface spécifique des particules primaires, c'est à dire des amas qui restent groupés lors des mouvements de cisaillement dans le béton frais tend à accroître le seuil;
- ✓ selon Chopin (2003)[161], l'effet de défloculation importante de l'adjuvant accroît le frottement et donc le seuil.

2-5-5 Qualités essentielles d'un béton :

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

2-5-5-1 A l'état frais

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides. Ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisante pour permettre la mise en œuvre souhaitée [145].

Deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques.

➤ Ouvrabilité

Après avoir été malaxé, le béton frais doit rapidement être mis en œuvre sur le chantier pour diverses opérations : vidange dans les coffrages, serrage (par vibration, piquage...) et talochage, ... La manière dont le matériau se comporte est gouvernée par son ouvrabilité.

L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange. Dreux et Festa (1998)[153] écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage ». Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction. En effet, selon ces auteurs, la plupart des qualités de l'ouvrage telles que la compacité et la résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, l'enrobage et l'adhérence des armatures, les parements de belle apparence, l'étanchéité, etc., dépendent de l'ouvrabilité.

Au-delà de la mise en place sur le chantier, Faury (1958) souligne que l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de malfaçons. Ces propriétés doivent donc être classées en deux groupes distincts suivant qu'elles s'appliquent au transport ou à la mise en œuvre du mélange.

Dans la pratique, il existe plusieurs méthodes de transport (en bétonnière, en wagonnette, en benne, en camion...) et plusieurs processus de mise en œuvre (pompage, vibration, projection, compactage...). C'est pourquoi de nombreux tests technologiques ont été proposés pour s'adapter à cette diversité. Ces essais permettent de mesurer empiriquement certaines caractéristiques dépendant de l'ouvrabilité. Nous pouvons citer quelques appareils recensés dans la littérature: le cône d'Abrams et l'étalement à la table à secousses [153]. Pour les bétons très secs, on pourra utiliser l'essai V.B., qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour qu'un cône de béton se mette à l'horizontale dans un récipient cylindrique périphérique, une fois soumis à une vibration. Le maniabilimètre L.C.L. [162] fonctionne sur le même principe, et la vibration est déclenchée lorsque l'on retire la trappe. Un temps long signifie que le béton est ferme.

L'affaissement au cône d'Abrams ou « slump test » est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés. Il est décrit dans la norme Algérienne NA 431. Pour effectuer cet essai, on remplit tout d'abord un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm) de béton. Le remplissage est exécuté en trois couches serrées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide. La norme EN 206-1 spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams - norme NF EN 206-1

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥ 220

Lors du remplissage du coffrage, l'affaissement du béton est un des facteurs faisant varier la pression du béton sur le coffrage, paramètre important lors de leur dimensionnement. [153].

Zivkovic (1992) [163] a montré que, plus la température des constituants du béton augmente, plus la demande en eau est importante et d'un autre côté l'affaissement diminue comme indiqué sur la figure 2.38. Sur cette figure, la courbe 1 donne l'affaissement au cône d'Abrams pour un même dosage en eau (180 l/m³) et la courbe 2 la demande en eau nécessaire à l'obtention d'un même affaissement de 7,5 cm $\pm$ 0,1 cm. Quand la température s'élève de 20° à 40°, la demande en eau passe de 190 à 220 l/m³.

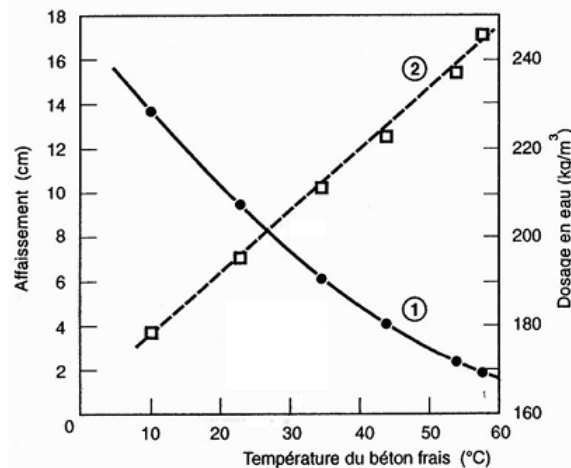


Figure 2.38 : Influence de la température du béton frais sur la demande en eau et sur l'affaissement [163]

Les mesures de l'affaissement ont été effectuées sur des bétons frais, dosés à 300 kg/m³ de CPA-CEM I A, préparés avec des constituants à différentes températures et conservés, ensuite, à 22 $\pm$ 2 °C.

Le béton avant même d'être sorti du malaxeur commence à évoluer : premières réactions chimiques entre le ciment et l'eau, dessiccation, etc. A cause de cela, la valeur de l'affaissement au cône au moment de la livraison sur le chantier est toujours inférieure à celle mesurée à la sortie du malaxeur (perte d'affaissement). A l'évidence, c'est la consistance du béton au moment de sa livraison qui doit être égale à la valeur cible.

L'ingénieur qui formule un béton doit donc tenir compte du délai de livraison du béton et mesurer sa consistance trente minutes, voire une heure après la fabrication. Si le bétonnage a lieu l'été, il doit aussi tenir compte de la température. La figure 2.39 montre combien cette précaution est nécessaire car il peut y avoir des différences sensibles d'un béton à l'autre [162].

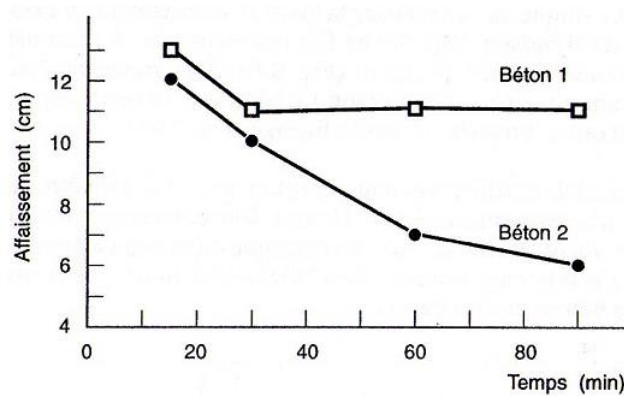


Figure 2.39 : Perte d'affaissement d'un béton au cours du temps [162]

Les bétons 1 et 2 ont les mêmes proportions ($E=200 \text{ l/m}^3$, $C=300 \text{ l/m}^3$) et diffèrent seulement par l'origine du ciment. Après malaxage, le béton est conservé sans agitation à 20°C . La consistance du béton frais est mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams après différentes durées d'attente. A la sortie du malaxeur, les deux bétons ont une consistance très plastique. Soixante minutes après, celle du béton 1 est toujours très plastique, alors que celle du béton 2 est devenue plastique.

Makhloufi et Bouhicha (2008)[164] ont montré l'évolution de la résistance en fonction de l'affaissement sur la figure 2.40. Ils ont remarqué une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C . Pour chacun des dosages en ciment considérés de CPJ-CEM II/A d'Ain Touta, plusieurs mélanges de béton ont été confectionnés, en faisant varier le rapport E/C . Le rapport optimal G/S a été gardé constant ($G/S = 1,47$) et les quantités des granulats de types calcaires concassés utilisés sont les suivantes : Sable 0/5 = 704,41 kg, Gravillon 5/15 = 399,32 kg et Gravillon 15/25 = 635,44 kg.

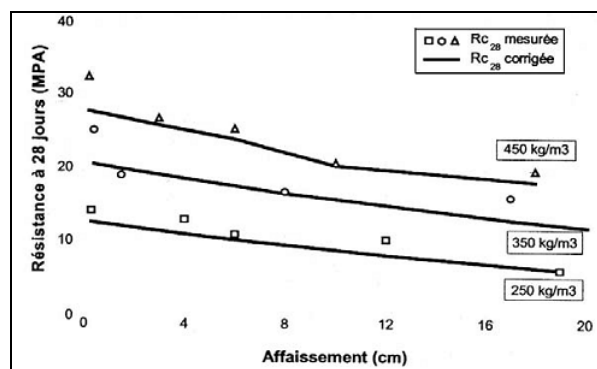


Figure 2.40 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement [164]

Il convient de noter que les valeurs des résistances mesurées et corrigées sont proches les unes des autres pour les dosages en ciment considérés.

2-5-5-2 A l'état durci :

Le béton frais va évoluer pour aboutir au produit durci recherché. Il est incontournable de suivre l'évolution du béton sous différents aspects :

- ✓ Chimique, car il s'agit bien d'un ensemble de réactions,
- ✓ Physique, car le développement de la microstructure s'accompagne de phénomènes physiques qui définiront un état initial de la structure,
- ✓ Mécanique, car les aspects précédents conduisent à des cinétiques variables et des performances modulées en conséquence [145].

Le béton durci est un solide hétérogène formé de granulats enrobés par une pâte de ciment, il apparaît donc en première analyse, que ses propriétés mécaniques dépendent : de celles de la pâte liante, de celles des granulats et de l'adhérence pâte-granulats.

➤ **Résistance à la compression :**

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures (exception faite par exemple du domaine routier). C'est donc en général la résistance en compression qui sert de caractérisation de base du béton durci.

Cette résistance en compression est déterminée suivant la norme européenne NF EN 12390-3. La résistance à 28 jours après un mûrissement à l'eau sert en général de référence. La norme EN 206 définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30). X est la résistance caractéristique (c'est-à-dire garantie dans 95% des cas) mesurée sur cylindre 16x32 cm, tandis que Y est la résistance (du même béton) mesurée sur cube 15x15 cm.

La résistance à la compression s'explique par la réaction d'hydratation du ciment Portland, mélange de clinker et de gypse finement co-broyés. Le clinker se compose principalement des quatre minéraux suivants dans des proportions variables : silicate tricalcique C3S, silicate bicalcique C2S, aluminat tricalcique C3A et aluminoferrite tétracalcique C4AF.

La réaction du C2S et du C3S avec l'eau conduit à la formation d'hydrates dont les principaux sont les cristaux de C-S-H ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), qui sont en majeure partie responsables du durcissement de la pâte de ciment, permettant à cette dernière de reprendre les charges extérieures et donc de participer à la résistance macroscopique du béton [165],[166].

La liaison entre la pâte durcie et les granulats qu'elle enrobe conditionne également la résistance mécanique du béton. On observe, autour des granulats dans le béton durci, une zone de pâte hydratée particulière : l'auréole de transition. Cette auréole a des propriétés différentes de la pâte dans sa masse, en fonction de la porosité des granulats. Dans le cas de granulats non poreux, l'auréole comporte une couche de cristaux de grandes dimensions, très

poreuse et de cohésion faible, générant des zones de faiblesse pour les bétons soumis à des actions mécaniques [167].

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment, etc.

1- Essai de résistance à la compression :

Le plus courant des essais sur béton durci est la résistance à la compression, en partie parce que cet essai est facile à exécuter et aussi parce que de nombreuses caractéristiques du béton, mais pas toutes, peuvent être qualitativement reliées à sa résistance.

Toutefois, la raison principale de cet essai est l'importance intrinsèque de la résistance à la compression lors de la conception structurale. Même s'il est universellement utilisé dans le domaine de la construction, l'essai de résistance à la compression présente quelques inconvénients, mais il constitue, à parler franc, un élément du bagage culturel de l'ingénieur [168].

Les résultats de l'essai de résistance à la compression peuvent être affectés par différents paramètres : le type d'éprouvette et ses dimensions, le type de moule, de mûrissement, la préparation des faces d'essai sur lesquelles s'exerce la compression, la rigidité de la presse, la vitesse d'application de la charge. Pour toutes ces raisons, les essais doivent être effectués selon une procédure bien précise sans dévier des spécifications imposées.

Les essais de résistance à la compression effectués sur des éprouvettes préparées de façon normalisée, incluant un serrage ou un compactage à 100% et un mûrissement dans l'eau pendant une période donnée, donnent des résultats représentant la qualité du béton. Bien sûr, le béton dans la structure peut présenter une qualité inférieure, par exemple, par suite d'une mauvaise mise en œuvre, d'un compactage ou vibration inadéquats, d'un phénomène de ségrégation ou d'un mauvais mûrissement. Ces effets sont importants si l'on désire savoir à quel moment on peut décoffrer, pour suivre la construction ou mettre la structure en service. Pour cette raison, les éprouvettes d'essai sont mûries dans des conditions se rapprochant le plus possible de celles existant dans la structure réelle.

Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques. Les plateaux ou contre-plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises.

2- Influence du rapport eau/ciment :

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en première approximation la qualité de la matrice cimentaire. Nous présentons dans cette section des résultats, issus de la littérature, d'essais de compression simple, réalisés sur mortiers (ou bétons) avec différents rapports E/C.

La figure 2.41 montre que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole. Cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulats et l'âge. La résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Une des propriétés géométriques d'une hyperbole ($y=k/x$) est que la relation existant entre y et $1/x$ est linéaire. La relation entre la résistance et le rapport C/E est donc approximativement linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre environ 1,2 et 2,5. Cette relation linéaire, tout d'abord suggérée par Neville (2000)[156], a été confirmée par Alexander et Ivanusec (1982) et par Kakizaki et col. (1992)[169]. Cette relation est plus facile à utiliser que la courbe représentant le rapport eau/ciment, particulièrement lorsqu'une interpolation est nécessaire. La figure 2.42 présente les valeurs de la figure 1.16 en fonction du rapport ciment/eau porté en abscisses. Les valeurs indiquées sont applicables uniquement pour un ciment donné, la relation entre la résistance et rapport ciment/eau doit donc être déterminée pour tout autre cas pratique.

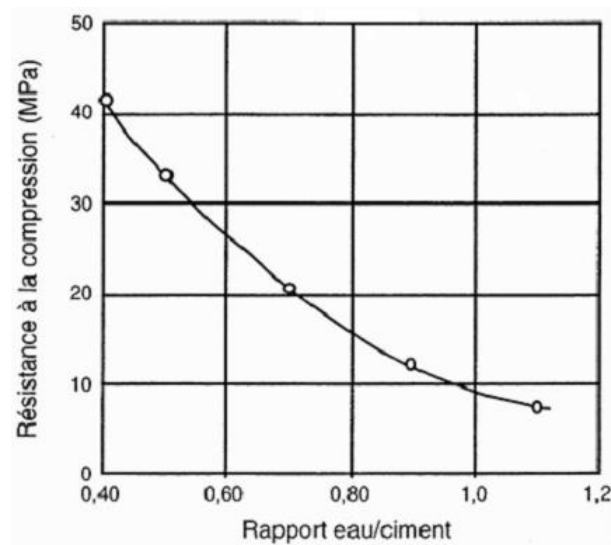


Figure 2.41 : Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide [156]

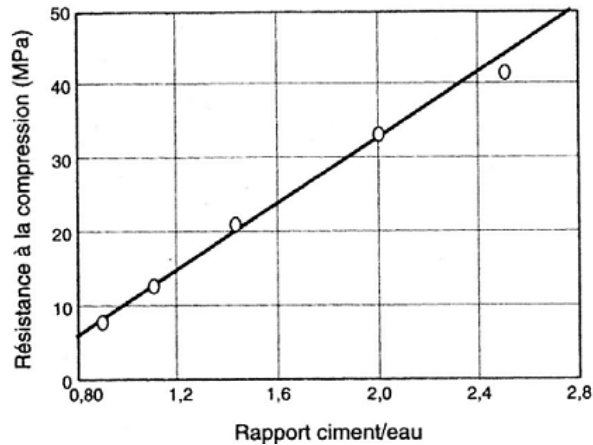


Figure 2.42 : Valeurs des résistances de la figure 1.15 en fonction du rapport C/E [156]

Nielsen (1993) [170] a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport C/E n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2.6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38. Comme on le voit sur la figure 2.43, pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.

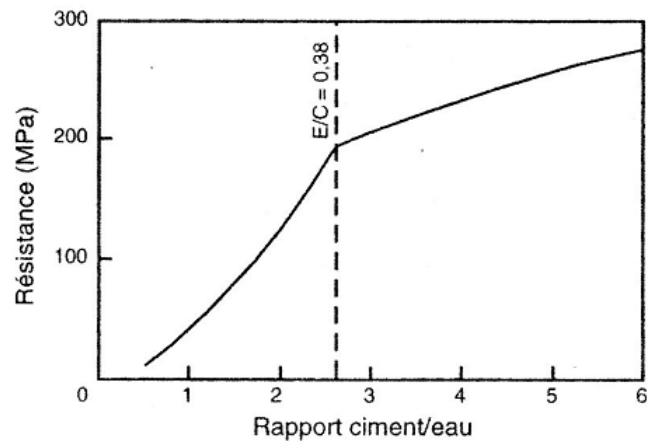


Figure 2.43 : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport C/E [170]

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton [171]. La figure 2.44 montre que la résistance à la compression du béton est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand [145].

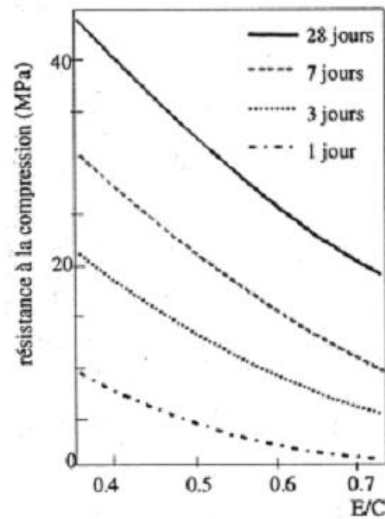


Figure 2.44 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton [145].

La résistance a été mesurée sur des cylindres de 15x30 cm et les bétons ont été préparés avec un ciment de type I (ASTM), sans air entraîné

3- Influence du dosage en ciment :

Pour une même ouvrabilité, une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

La figure 2.45, illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton [162]. En effet, pour obtenir le même affaissement (7cm), le béton dosé à 377 kg/m³ de ciment a demandé 192 l/m³ d'eau, soit un rapport E/C de 0,51, alors qu'il a fallu 186 l/m³ d'eau pour le béton dosé à 347 kg/m³ de ciment, soit un rapport E/C de 0,54. En se référant à la figure 2.44, il est alors possible d'expliquer les résultats présentés par la figure 2.44, qui montrent clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.

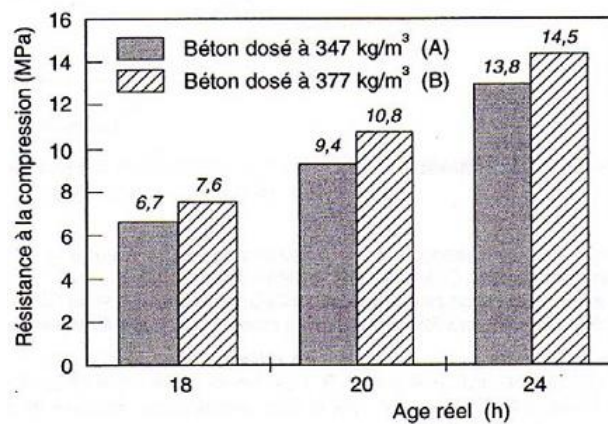


Figure 2.45 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [162]

Les bétons ont été gâchés avec 347 kg/m³ (A) et 377 kg/m³ (B) de CPJ-CEM II 42,5 R et les résistances ont été mesurées sur des éprouvettes 11×22 cm confectionnées dans des moules en carton.

4- Influence du type de ciment

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la figure 2.46. Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R, c'est-à-dire que, plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances sont élevées, à toutes les échéances. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [162].

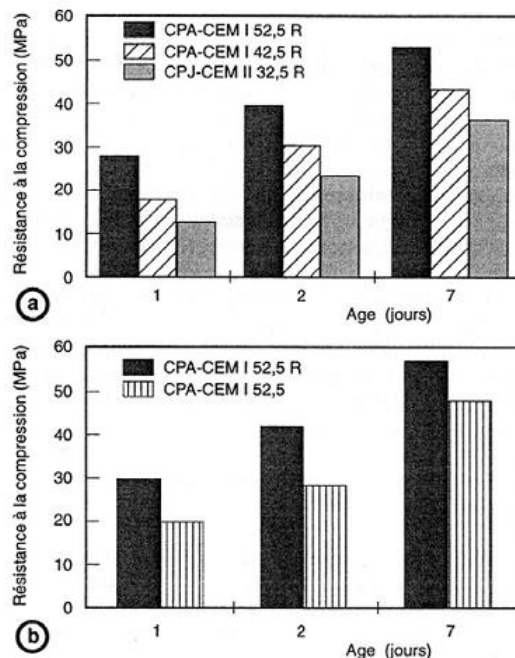


Figure 2.46 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [162]

D'après U.S. Bureau of réclamation (1975)[172], la figure 2.47, illustre la vitesse de développement de la résistance de bétons confectionnés avec un dosage unique de différents ciments. Alors que les vitesses de montée en résistance varient considérablement, on constate peu de différence de résistance entre tous ces ciments à 90 jours. A la figure 2.48, pour un même rapport E/C, Gonnerman et Lerch (1951)[173] ont constaté dans certains cas des différences plus importantes. Or, la tendance générale montre que les ciments à vitesse de durcissement peu élevée ont une résistance finale plus élevée. Par exemple, la figure 2.47 montre un ciment de type IV qui présente la plus faible résistance à 28 jours, mais développe la deuxième plus forte résistance à 5 ans. La comparaison des figures 2.47 et 2.48, démontre que les différences entre les ciments ne sont pas facilement quantifiables.

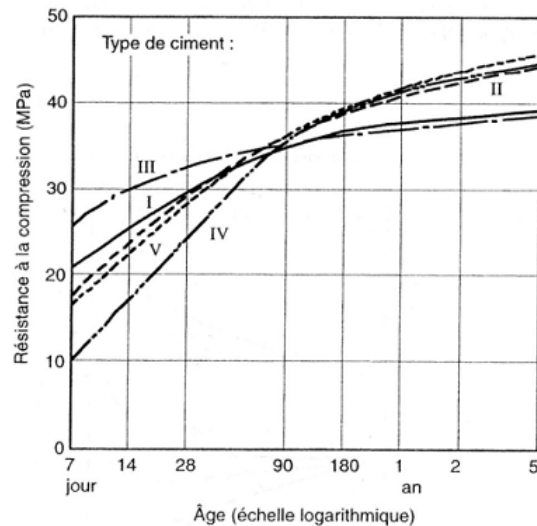


Figure 2.47 : Développement de la résistance de bétons confectionnés avec différents ciments pour un dosage de 335 kg/m³ [172]

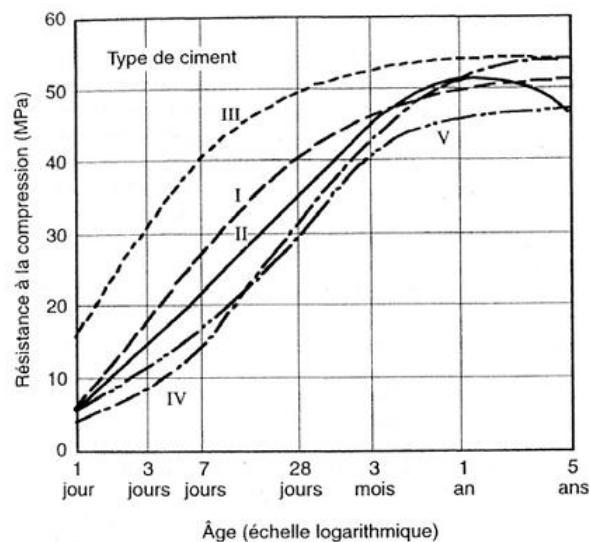


Figure 2.48 : Développement de la résistance de bétons de rapport E/C de 0,49 confectionnés avec différents ciments [173]

5- Influence de la porosité

Tout milieu poreux est constitué de deux domaines distincts : la charpente du milieu (bordure solide) et son complément que constitue le volume poreux. La porosité (N) d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides. Si V_t est le volume total de l'échantillon, V_p le volume poreux ou le volume des vides et V_s le volume réel de la phase solide, on a alors (2.49) :

$$N \% = \frac{V_p}{V_t} 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} 100 \dots\dots\dots 1.4$$

✓ Géométrie et positionnement des pores

Ces vides se distinguent par leur forme : lorsque les formes sont convexes, globuleuses, ce sont des pores ; lorsqu'elles sont grandes, plates et étendues, ce sont des fissures. Lorsque les vides communiquent entre eux, il s'agit d'une porosité ouverte (ou libre). Lorsque les vides sont isolés, c'est une porosité occluse ou fermée. La figure 2.49 présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

- les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).
- les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.
- les bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités.

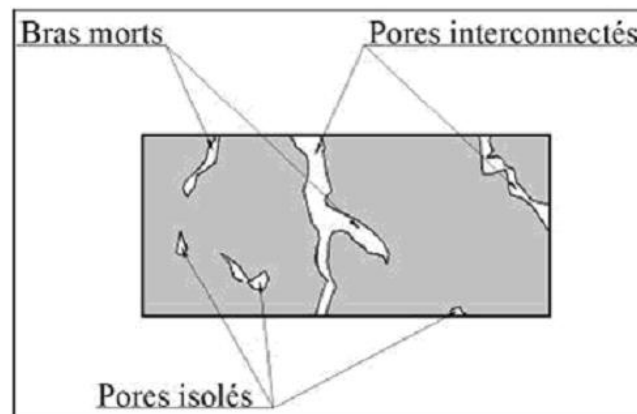


Figure 2.49 : Les différents pores d'un béton, positionnement selon le milieu extérieur

La porosité d'un béton apparaît comme un paramètre extrêmement important puisqu'il conditionne la rugosité de surface ainsi que la quantité d'eau potentiellement présente dans le matériau. Un matériau présentant une porosité importante offre également une surface de réaction importante entre le matériau et les substances chimiques agressives avec lesquelles il est en contact. Ceci entraîne une vitesse de dégradation potentiellement plus élevée.

✓ Tailles des porosités

Le réseau poreux des matériaux cimentaires tels que les bétons, les mortiers ou encore les pâtes de ciment recouvre une large gamme d'échelles (du picomètre au centimètre). La figure 2.50 présente les différents types de porosités que l'on rencontre dans les matériaux cimentaires en fonction de leur taille et de leur géométrie.

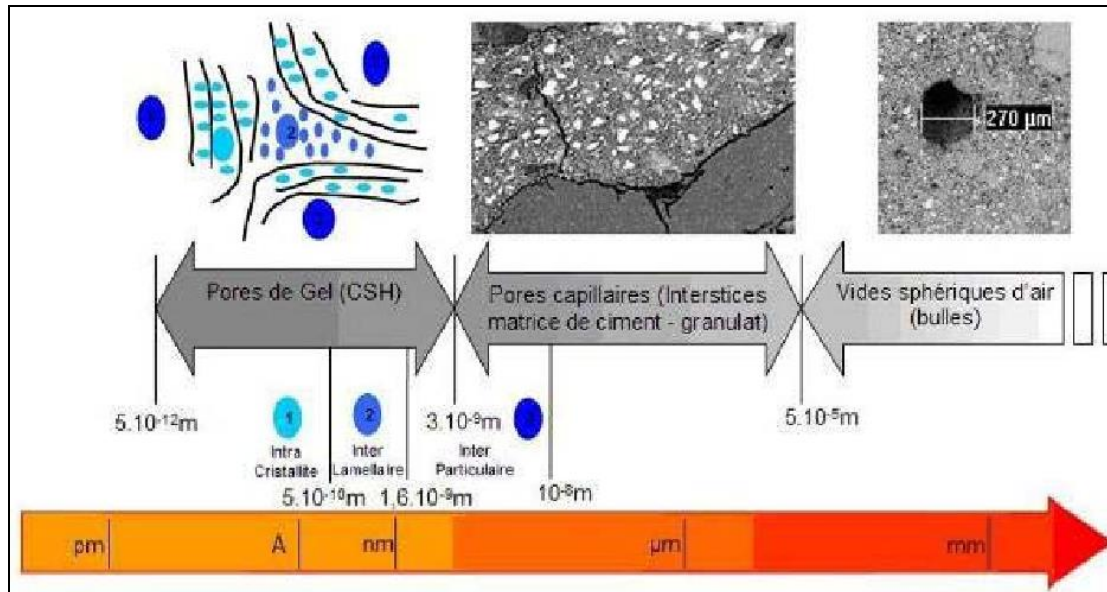


Figure 2.50 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires

La porosité des matériaux cimentaires est constituée de :

- vides d'air occlus, généralement de forme sphérique et de dimension supérieure à 50 micromètres. Ces vides sont générés par le piégeage dans le matériau à l'état frais de bulles d'air qui ne parviennent pas à s'échapper malgré le serrage (vibrations, chocs) de la pâte.
- pores capillaires, ils peuvent être modélisés sous la forme de tubes tortueux dont le diamètre varie entre 1 micromètres et 50 micromètres. Ces porosités sont liées à l'hydratation des grains de ciment ainsi qu'à la présence de granulats.
- pores de gel, ces pores sont liés à la structure lamellaire même des CSH (silicates de calcium hydratés) et de dimension de l'ordre du nanomètre [175].

Ces porosités sont liées à la structure propre du matériau (structure et arrangement des cristaux) mais également à sa mise en oeuvre. Le rapport E/C est un facteur de grande importance car, si l'augmentation de la quantité d'eau dans les matériaux cimentaires à l'état frais permet d'améliorer l'ouvrabilité du matériau, elle augmente sa porosité [176]. En effet, l'eau présente en excès, qui ne sert donc pas aux différents processus d'hydratation du ciment, s'évapore lors du séchage du matériau laissant les emplacements qu'elle occupait vides [156].

Lors de fabrication de la pâte fraîche, les grains de ciment sont mis en suspension dans l'eau. Le rapport E/C influence ainsi l'espacement initial entre les grains de ciment.

Plus l'espacement initial entre les grains de ciment est important, plus l'espace à combler lors de l'hydratation est grand et plus la formation de vide est favorisée, les hydrates ne pouvant pas combler tout l'espace comme illustré par la figure 2.51.

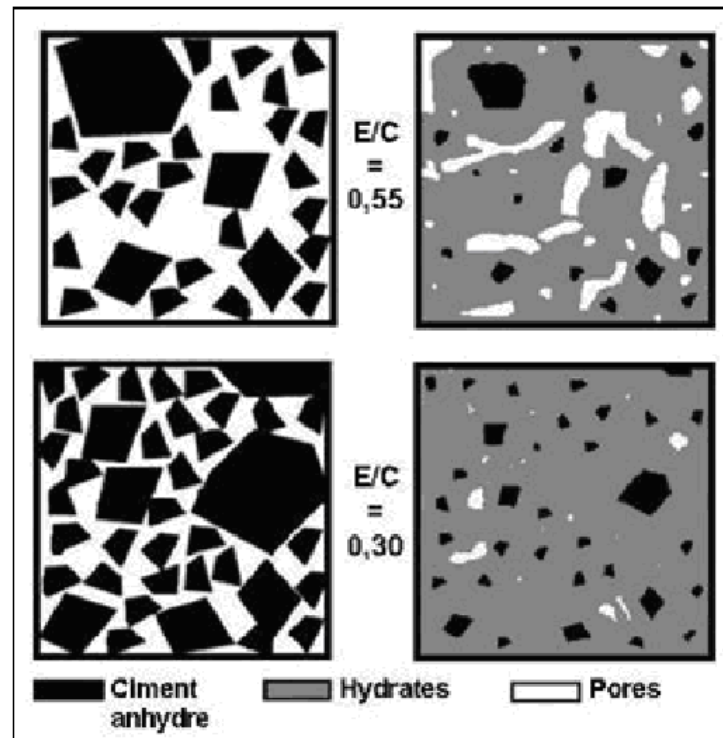


Figure 2.51: Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, influence du rapport E/C, [77]

En ne considérant que la stoechiométrie des réactions d'hydratation du clinker, le rapport E/C minimum pour obtenir des réactions chimiques complètes est de 0,22. Pour un ciment Portland le rapport est de 0,36. Cependant, Powers a montré que l'hydratation complète du ciment ne peut pas être obtenue avec un rapport E/C inférieur à 0,42 [178] car les gels de CSH absorbent de l'eau qui ne sera alors plus disponible pour l'hydratation des composants du clinker.

Avec un rapport E/C supérieur à 0,42, la quantité d'eau est supérieure à celle nécessaire à l'hydratation complète du ciment. Les grains de ciment sont éloignés, leur hydratation ne permet pas de combler tout l'espace. Lorsque l'hydratation arrive à son terme, il reste une quantité d'eau importante dans le matériau (sous forme d'eau libre), ce qui engendre la formation d'une porosité capillaire importante, favorisant la perméabilité du matériau et diminuant sa résistance mécanique. L'utilisation d'un E/C élevé favorise l'absorption de fluide et la perméabilité du matériau et ainsi la pénétration d'agents potentiellement agressifs vers le coeur du matériau [179].

Avec un rapport E/C de 0,42, l'ensemble des grains de ciment peut s'hydrater. Cette hydratation entraîne la création de vides non remplis d'eau. En effet, la formation des hydrates conduit à la formation de composés dont le volume est inférieur aux volumes de l'eau et du ciment utilisés pour la confection de la gâchée (volume des hydrates = volume du ciment + 0,736 x volume de l'eau). Ce phénomène est appelé contraction de Le Châtelier [180].

Avec un rapport E/C inférieur à 0,36, les grains de ciment sont initialement proches les uns des autres. Toute l'eau sera consommée par les réactions d'hydratation des grains de ciment qui ne seront pas tous hydratés complètement et très peu d'espaces seront laissés vides entre les hydrates. Ceci permet d'obtenir des matériaux ayant une porosité capillaire limitée et de bonnes propriétés mécaniques, l'ensemble des grains de ciment ne sera pas complètement hydraté, ce qui ne nuit pas à la résistance du matériau.

L'influence du rapport E/C sur la porosité capillaire et sur le taux de ciment non hydraté est illustrée par la figure 2.52.

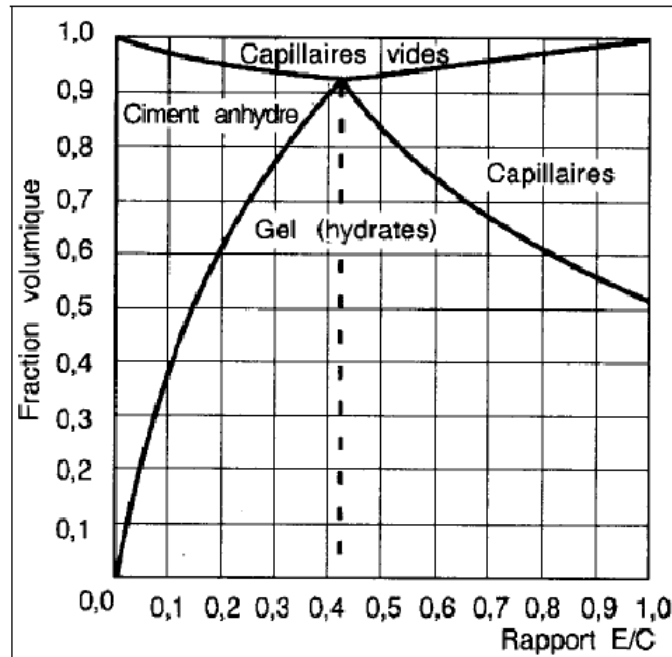


Figure 2.52 : Composition volumique d'une pâte de ciment hydraté sans apport d'eau externe, selon le modèle de Powers, [171]

La résistance du béton est fondamentalement dépendante du volume des vides qu'il comporte.

L'influence de la porosité de la pâte de ciment hydraté sur la résistance a fait l'objet de plusieurs recherches. L'application directe des résultats de laboratoire, déterminés à partir d'essais sur des éprouvettes de pâte pure confectionnées avec soin, à des éprouvettes de béton doit être faite avec prudence, mais la compréhension de l'effet de la porosité sur la résistance de la pâte de ciment hydraté est importante. Il n'y a aucun doute que la porosité, définie comme étant le volume total de l'ensemble des vides supérieurs à ceux des vides de gel et exprimée en pourcentage du volume global de la pâte de ciment hydraté, est un des facteurs principaux influençant la résistance de la pâte de ciment. Une relation linéaire entre la résistance et la porosité a été établie par Rossler et Odler (1985), pour des valeurs de porosité comprises entre 5 et 28%. L'effet des vides d'un diamètre inférieur à 20 nm semble négligeable [181].

La relation entre la résistance du mortier et la porosité, en se basant sur le volume des vides de plus de 20 nm de diamètre, est présentée à la figure 2.53. L'effet de la distribution de la dimension des vides sur la résistance doit donc être pris en compte en plus de la porosité totale. De façon générale, pour une porosité donnée, la diminution de la dimension des pores entraîne une augmentation de la résistance de la pâte de ciment.

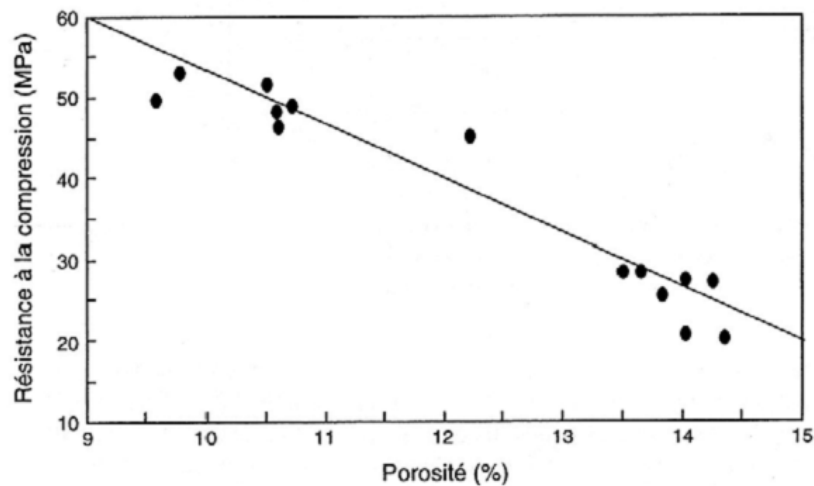


Figure 2.53 : Relation entre la résistance à la compression de mortiers et la porosité calculée à partir du volume des pores de diamètre supérieur à 20 nm [182]

Strictement parlant, la résistance du béton est influencée par le volume de tous les vides contenus dans le béton : air occlus, pores capillaires, pores de gel et air entraîné [156].

La mise en place du béton engendre toujours une certaine quantité d'air occlus. Ce volume dépend de l'énergie de serrage, plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus.

La quantité d'air occlus varie dans un béton courant entre 1 et 2.5 %, si l'on réalise que 1 % d'air, occupant le même volume que dix litres d'eau, réduit pareillement la résistance à la compression, on conclut à l'évidence que l'air occlus dans un béton doit toujours être mesuré et pris en compte [162].

6- Influence du rapport granulats/ciment :

Le rapport granulats/ciment (G/C) est un facteur de deuxième importance quand à la résistance, mais, pour un rapport E/C constant, Erntroy et Shacklock (1954) cités par Neville (2000), ont montré qu'un béton plus faiblement dosé était plus résistant (figure 2.54).

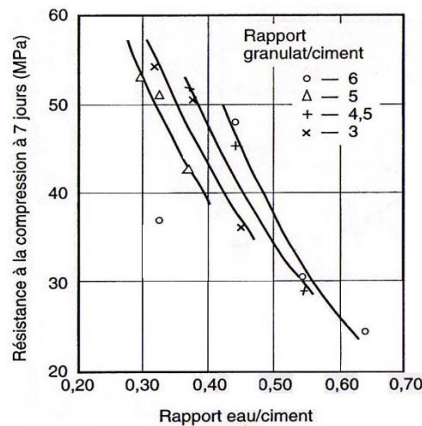


Figure 2.54 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [156]

Les raisons de ce comportement ne sont pas bien connues. Dans certains cas, une partie de l'eau peut être absorbée par le granulat : plus il y a de granulat, plus la quantité d'eau absorbée est importante, ce qui contribue à réduire le rapport eau/ciment réel du béton. Dans d'autre cas, une plus forte teneur en granulats contribue à diminuer le retrait et le ressuage, ce qui diminue les désordres dans les liaisons granulat et pâte de ciment. De même, les modifications thermiques dues à la chaleur d'hydratation du ciment sont plus faibles [183]. L'explication la plus probable provient toutefois du fait que la teneur totale en eau par mètre cube de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment que dans un béton fortement dosé en ciment. Il en résulte que le pourcentage de vides par rapport au volume total de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance.

Les études portant sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que, lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20 %, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, on constate une augmentation [184]. L'allure générale de ce comportement est représentée à la figure 2.55.

Cette tendance se vérifie quel que soit le rapport eau/ciment [185].

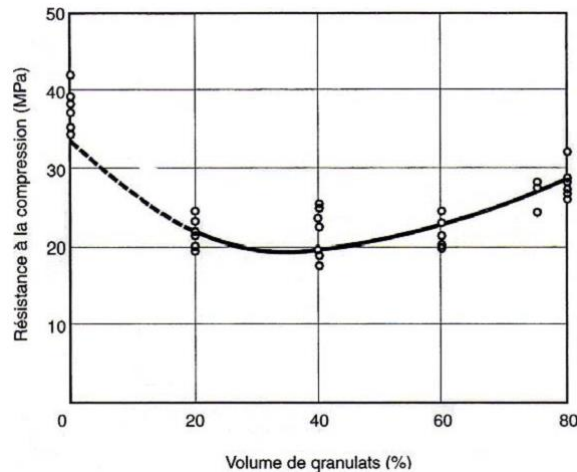


Figure 2.55 : Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5 [184]

Stock et col. (1979) ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie, liés par la même matrice. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Malheureusement, les essais de résistance à la compression sur les éprouvettes cubiques ont donné des résultats assez dispersés. Il est à noter que l'effet du granulat, qui n'est pas monotone, peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand l'ouvrabilité diminue [186].

7- Influence de la taille maximale du granulat

Walker et Bloem (1960) ont publié un article qui suscita à l'époque beaucoup de discussions [187] : la majorité des résultats présentés montraient un effet négatif de la dimension maximale du granulat (D) sur la résistance à la compression, à rapport E/C constant. Cette constatation étonna la communauté scientifique, celle-ci présumant généralement qu'avec un D important, le béton, plus compact, présenterait une résistance mécanique supérieure et une meilleure durabilité.

Cependant, deux causes exercent des effets contradictoires : pour une quantité donnée de ciment, en augmentant le D , on tend vers une réduction de la demande en eau, tandis que la résistance obtenue à rapport E/C donné diminue. Par conséquent, quand le volume du ciment et l'ouvrabilité restent constants, on a un effet du D sur la résistance à la compression qui n'est pas monotone. Une valeur optimale de la dimension du granulat existe, qui décroît quand la quantité de ciment augmente [188].

L'effet négatif de l'augmentation de la dimension maximale du granulat dans le béton s'applique à l'échelle de toutes les grosseurs, mais l'effet de la dimension des grains sur la diminution de la demande en eau est particulièrement important en dessous de 38,1 mm. Pour des dimensions supérieures, le bilan des deux effets dépend du dosage du béton [156], (figure 2.56).

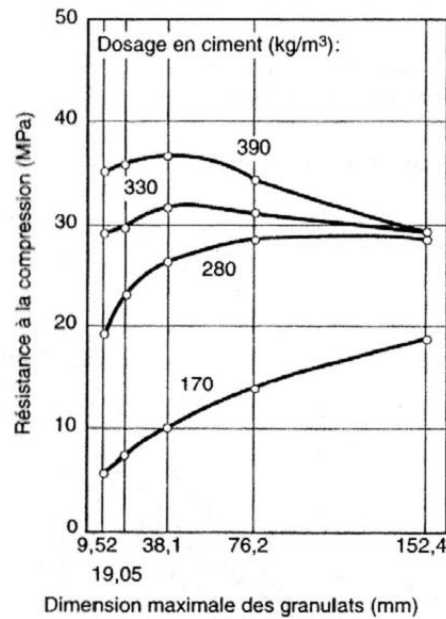


Figure 2.56 : Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment [156]

8- Influence de l'Âge

Meyer (1963) a montré que l'augmentation de la résistance (exprimée en pourcentage de la résistance à long terme) des bétons à faible rapport E/C est plus rapide que celle des bétons ayant un rapport E/C plus élevé (figure 2.57). Ceci s'explique par le fait que les grains de ciment sont plus près les uns des autres et que le réseau de gel continu s'établit plus rapidement.

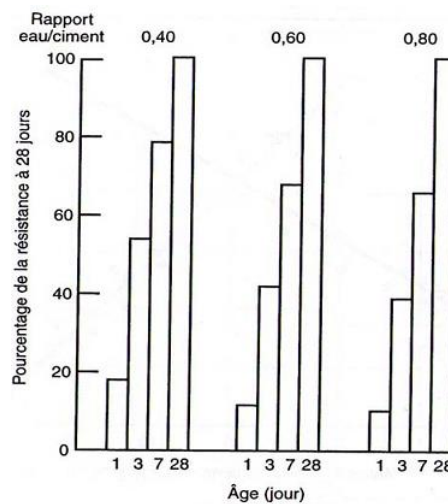


Figure 2.57 : Augmentation relative de la résistance dans le temps de bétons ayant différents rapports E/C confectionnés avec un ciment portland ordinaire [189]

Il est important de connaître l'évolution de la résistance en fonction du temps lors de la mise en service d'une structure, c'est-à-dire lorsque cette dernière devra supporter, à un âge plus éloigné, la charge totale pour laquelle elle a été dimensionnée. Dans ce cas, le gain de résistance après l'âge de 28 jours peut être pris en compte lors du dimensionnement de la structure. Dans d'autres situations, comme dans le cas des bétons précontraints, préfabriqués ou lorsque les coffrages doivent être enlevés rapidement, il est important de connaître la résistance au jeune âge.

La figure 2.58 présente l'évolution de la résistance en fonction du temps pour des bétons de rapports E/C de 0,40, 0,53 et 0,71 confectionnés avec un ciment de type I en 1948 et conservés constamment dans l'eau [Wood, 1991].

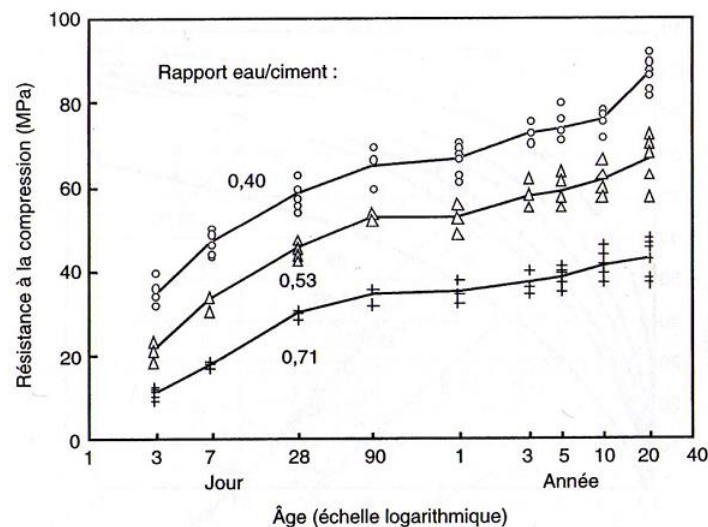
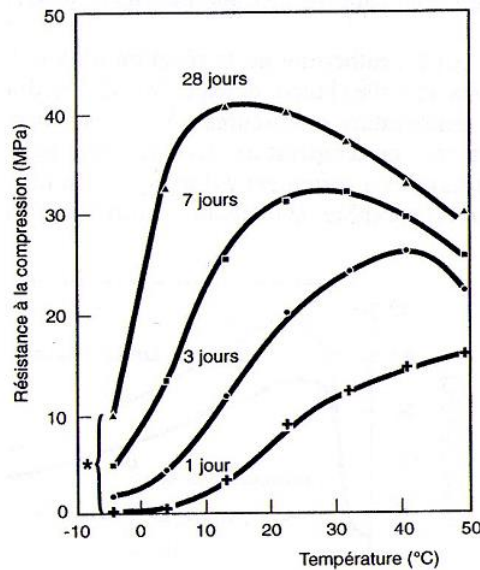


Figure 2.58 : Augmentation de la résistance de bétons (mesurée sur des cubes modifiés de 150 mm) sur une période de plus de 20 ans ; condition de conservation humide [190]

En ce qui concerne la résistance à long terme, les ciments portland américains fabriqués au début du 20^{ème} siècle (ayant une forte teneur en C2S et une faible surface spécifique) présentaient une augmentation de la résistance pour des bétons sur chantier proportionnelle au logarithme de l'âge jusqu'à 50 ans. La résistance à 50 ans était typiquement 2,4 fois celle mesurée à 28 jours. Toutefois, depuis les années trente, les ciments ayant une plus faible teneur en C2S et une plus grande surface spécifique atteignent leur résistance maximale entre 10 et 25 ans et, par la suite, perdent un peu de cette résistance [191]. Les ciments portland allemands fabriqués en 1941 et utilisées pour des applications extérieures ont présenté après 30 ans une résistance égale à 2,3 fois celle mesurée à 28 jours. L'augmentation relative de la résistance était plus importante pour les rapports eau/ciment élevés. En comparaison, les ciments à base de laitiers de haut fourneau permettaient une augmentation de l'ordre de 3,1 fois [192].

9- Influence de la température

L'influence de la température de fabrication puis de mûrissement du béton sur ses résistances à court et à long terme a fait l'objet de plusieurs études au cours des soixante dernières années. De façon générale, toutes les études ont montré que : plus la température de fabrication et/ou de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont les résistances.



*Béton fabriqué à 4°C et conservé immédiatement à -4°C

Figure 2.59 : Influence de la température de mûrissement du béton sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances [193]

La figure 2.59 montre que plus la température de fabrication et de mûrissement du béton est élevée, plus la résistance à un jour de ce béton est élevée ; alors que pour les âges de trois à vingt-huit jours l'influence de la température change radicalement. En effet, pour chacun des âges étudiés à partir de trois jours, il existe une température optimale à laquelle correspond le maximum de résistance. En fait, cette température optimale de mûrissement diminue lorsque l'échéance considérée augmente. Cependant, les causes à l'origine des réductions de résistances observées à long terme pour les bétons mûris à des températures élevées sont beaucoup plus complexes et suscitent encore aujourd'hui des questions [162].

Bien qu'une température plus élevée durant la mise en place et la prise augmente la résistance au très jeune âge, elle peut avoir un effet inverse sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation présentant une structure physique moins compacte, probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli. En se basant sur la règle du rapport gel/espace, cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement, dans laquelle un rapport gel/espace élevé sera éventuellement atteint.

Conclusion

On constate que l'utilisation des sables calcaires de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des mortiers et des bétons a fait déjà l'objet de plusieurs études et recherches. Elles ont été menées le plus souvent dans le but d'encourager l'utilisation de ces matériaux en tant qu'alternative aux granulats alluvionnaires en voie d'épuisement, donc de prévenir une future pénurie. Mais, jusqu'à présents, ces études n'ont pas abouti partout puisque l'utilisation du sable de concassage dans le secteur du bâtiment et des centrales à bétons ne s'est pas encore développé et concrétisé. En effet, bien que l'avantage économique et environnemental de l'emploi de ces matériaux dans les bétons hydrauliques paraisse démontré, ils ne sont pas encore utilisés dans la formulation des bétons hydrauliques en Algérie, du moins à l'échelle industrielle. Les maîtres d'ouvrages et les entreprises ne sont pas encore convaincu de leurs performance refusent jusqu'à présent de recourir à ces bétons, faute probablement d'exemples de réalisation servant de références, sous forme d'ouvrages pilote ou de chantiers expérimentaux.

Par ailleurs, la plupart des études ont été réalisées sur des mortiers en substituant une part du ciment ou bien du sable par des fillers calcaires. Les sables peuvent être constitués par un mélange de sable alluvionnaire et de sable de concassage. Il apparaît donc nécessaire de compléter les travaux déjà réalisés par une étude théorique et expérimentale rationnelle destinée à conforter les connaissances déjà acquises et à en proposer si possible de nouvelles pouvant servir par exemple à la modélisation. Il s'agit aussi de statuer sur la pertinence des spécifications normatives des sables à béton actuelles, en particulier pour ce qui concerne le taux de fillers, et de les faire admettre, par l'exemple notamment, à la communauté scientifique et industrielle. Cette recherche doit non seulement concerner les mortiers et les bétons traditionnels, mais aussi les bétons superplastifiés et les BAP dans lesquels la teneur en fillers joue un rôle déterminant. Cet aspect n'a pas encore fait l'objet de recherches avérées. Cette solution pourrait constituer un vecteur original conduisant les praticiens à l'utilisation des sables calcaires fillérisés dans les mortiers et les bétons hydrauliques.

Finalement, les travaux réalisés durant cette recherche apportent une meilleure connaissance du comportement mécanique des mortiers et bétons calcaires. Ils forment aussi un ensemble assez complet de résultats originaux devant permettre, aux exploitants, et aux chercheurs de mieux caractériser les ressources granulaires en vue de leur valorisation dans les mortiers et bétons hydrauliques de demain. Elles constituent également un support théorique et pratique pour adapter les exigences des cahiers de charges à ces matériaux.

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET METHODE DE CARACTERISATION

3. Introduction :

La qualité du béton (mortier) est intimement liée à celle de ses constituants et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de son volume, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton (mortier), mais, selon leurs propriétés, ils peuvent affecter la durabilité et les performances structurales du béton (mortier).

Les granulats sont donc, un constituant essentiel des bétons (mortiers) qui conditionnent à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. En fait, on ne peut confectionner un béton (mortier) résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres. L'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats, car ces derniers confèrent au béton (mortier) une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment à elle seule.

Dans la composition des bétons et mortiers, il faut autant que possible pour des raisons économiques utiliser les matériaux locaux. Les granulats naturels sont soit directement obtenus par criblage et les grains se présentent alors sous une forme plus ou moins arrondie (granulat roulé), soit issus d'un concassage et les grains présentent des arêtes (granulat concassé). Cette distinction constitue une donnée de base lors de la formulation d'un béton (mortier). D'autres propriétés, spécifiques aux granulats, jouent un rôle majeur dans les caractéristiques d'un béton (mortier). Il s'agit essentiellement de : la granulométrie, les masses volumiques, la porosité, la propreté, le coefficient Los Angeles des granulats, la finesse du sable, le coefficient d'absorption et. En plus de l'identification des granulats, leur origine et leur provenance l'étude s'intéresse au type d'adjuvant utilisé, du ciment et leurs provenances ainsi que la détermination de leurs principales caractéristiques.

3.1 Identification des granulats :

Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers constituent le squelette du béton et plus de 70% de son volume et influent donc fortement sur ses caractéristiques ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques.

Les essais sur les diverses propriétés des granulats sont effectués sur des échantillons du matériau et, de ce fait, les résultats ne sont valables, d'une certaine manière, que pour les granulats de l'échantillon.

3.1.1 Les graviers :

Les graviers utilisés proviennent de la station de concassage de Cosider à El-Euch (wilaya de Bordj-Bou-Arreridj). Dans cette investigation sont utilisées deux fractions 3/8 et 8/16. Après essais, on a pris 30% (3/8) et 70% (8/16) c'est les pourcentages qui ont donnés une porosité minimale du mélange des deux fractions.



Figure 3.1 : gravier issu de pierres concassées

✓ Masse volumique apparente :

Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme NA 255. Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, qui est une méthode simple et rapide.

Les deux fractions de gravier (3/8, 8/16) ont donnés des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m^3 et 2700 kg/m^3 . Les résultats des masses volumiques obtenus pour les deux fractions de gravier, sont récapitulés sur le tableau 3.1.

Les résultats des essais de compacité, porosité et indice des vides réalisés, sur les deux fractions de gravier (3/8, 8/16), sont récapitulés sur le tableau 3.2.

Tableau 3.1 : masse volumique apparente et masse volumique spécifique du gravier

Gravier (fraction)	Masse volumique apparente (ρ) (Kg/l)	Masse spécifique (γ) (Kg/l)
3/8	1,3	2,54
8/16	1,37	2,54
30%(3/8)+70%(8/16)	1,35	2,54

Tableau 3.2 : Porosité – compacités –indice des vides

Gravier (fraction)	Porosité (P)%	Compacité (C)%	Indice des vides (e)
3/8	49	0,51	96,08
8/16	46	0.54	85.18
30%(3/8)+70%(8/16)	47	0.53	88.67

✓ Coefficient d'absorption :

L'absorption de l'eau par les granulats est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement. Le rapport entre l'augmentation de la masse immergée et la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption ou coefficient d'absorption.

Ce coefficient mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif. En particulier la pénétration de l'eau dans les pores des granulats, donc du béton, fragilise la structure en cas de gel. Par ailleurs dans un milieu à faible hygrométrie, de l'ordre de 60 à 70 %, la vitesse de pénétration de la carbonatation est plus rapide. Enfin lors du malaxage du béton, l'emploi de granulats à fort coefficient d'absorption peut provoquer un léger raidissement s'ils n'ont pas été pré-mouillés avant leur introduction dans le malaxeur. [2]

Les deux fractions de gravier ont donnés des coefficients d'absorption qui répondent aux exigences de la norme P18-541 ($\leq 5\%$). Les coefficients d'absorption des deux fractions de gravier sont récapitulés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Coefficient d'absorption d'eau du gravier.

Gravier (fraction)	Coefficient d'absorption
3/8	1,3
8/16	0,46

✓ Résistance au choc (Essai Los Angeles) :

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles (LA). L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets métalliques normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles pendant 15 minutes. Cet essai est également utilisé pour vérifier la sensibilité au gel des gravillons conformément à la norme NF P18-593.

D'après les résultats d'essais La carrière de El-Euch (Bordj bou arreridj) produis des graviers qui convienne à la fabrication des bétons et répondant aux exigences de la norme qui exige des valeurs maxima tolérées inférieures à 40 %. Les résultats de l'essai Los Angeles sont récapitulés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Résultats d'essais los Angeles

Gravier (fraction)	M (kg)	m (kg)	L _A
G 3/8	4	1,115	27,875
G 8/16	5	1,118	22,36

✓ Analyse granulométrique (NF P18-560):

L'analyse granulométrique consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

Les agrégats destinés au mélange des bétons doivent être composés de grains de dimension différente afin d'assurer un volume minimal des vides les résultats d'analyse sont présentés au tableau 3.5, la courbe granulométrique est présentée par la figure 3.2.

Tableau 3.5 : Analyse granulométrique des fractions de gravier.

fractions	Tamis(mm)	8	6.3	5	4	3.15	2.50	Fond
3/8	R P (g)	2	12	223	1214	418	85	45
	R C (g)	2	14	237	1451	1869	1954	1999
	Tamisat %	99.9	99.3	88.15	27.45	6.55	2.3	0.05
8/16	Tamis(mm)	16.00	12.50	10.00	8.00	6.30	Fond	/
	R P (g)	4.8	1433.1	818.1	852	177	12.9	/
	R C (g)	4.8	1437.9	2256	2808	2985	2997.9	/
	Tamisat %	99.84	52.07	24.8	6.4	0.5	0.07	/

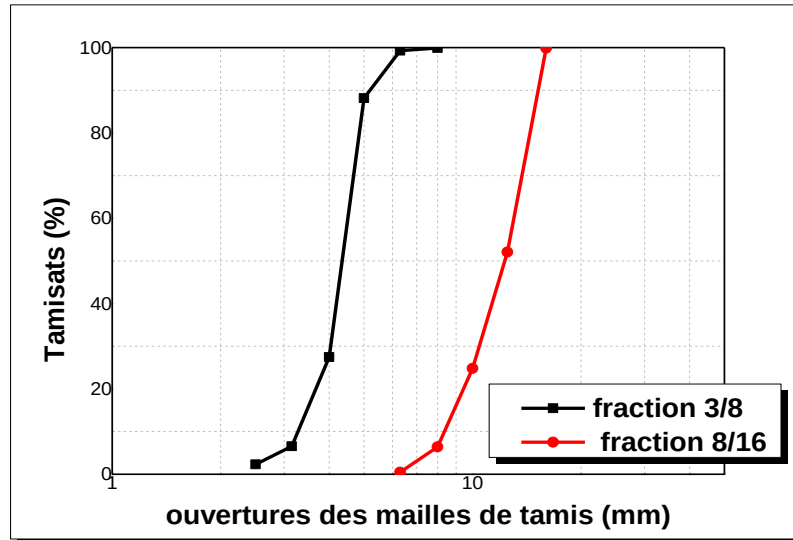


Figure 3.2 : Analyse granulométrique des fractions (3 /8 et 8/16).

✓ Analyse élémentaire par diffractométrie des rayons X :

La diffractométrie par rayon X est une méthode d'analyse qui étudie les processus de diffusion, d'absorption et d'émission des rayons X. En effet, lorsqu'un échantillon est bombardé par des rayons X, ce rayonnement provoque l'émission de son spectre. Ce spectre est appelé diffraction par rayon X (DRX) car le mode d'excitation concerne les photons. Le spectre est formé de raies caractéristiques des différents éléments présents dans l'échantillon.

Pour effectuer une analyse de DRX, on procède de la manière suivante :

- broyage de l'échantillon (de la même manière que pour la diffraction des rayons X ;
- préparation de perles ou pastilles.

L'échantillon à analyser est irradié par un faisceau de rayons X primaires. L'analyse des rayons X secondaires caractéristiques émis par l'échantillon renseigne sur la composition de ce dernier. Les rayonnements X caractéristiques d'un atome étant, en première approximation, indépendants de son état chimique, cette méthode fournit des spectres particulièrement simples, mais qui ne nous renseignent que sur la composition élémentaire. La DRX est généralement une technique d'analyse globale portant sur une surface de plusieurs cm^2 .

Les résultats d'analyse élémentaire par DRX (réalisée à la cimenterie « LAFARGE » à Msila) menée sur le gravier concassé ont révélé les principaux éléments constitutifs du gravier et sont groupés dans le tableau 3.6 et présentés graphiquement sur la Figure 3.3

Nous remarquons un pic d'environ 100 % de calcite qui traduit la dominance du CaO, les autres éléments présents à de faibles pourcentages.

Tableau 3.6 : Analyse chimique du gravier concassé

Eléments	%
R_wp	5,7
Calcite	95,1
Dolomite	0,4
Quartz	1,92
Pyrite	0,34
Illite	0,78
Chlorite	0,76
Kaolinite	0,69
Albite	0
CO ₂ _XRD	42,01

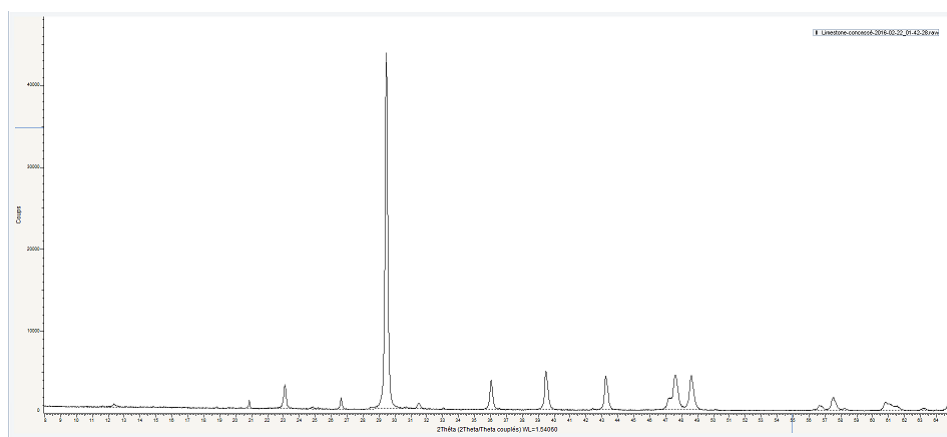


Figure 3.3 : DRX du gravier concassé

3.1.2 Sables :

Dans cette recherche deux sables de base de fraction 0/3 mm sont utilisés, de nature minéralogiques et de provenance différente à savoir le sable de dune provenant de la région de Boussada (wilaya de M'sila) et le sable calcaire de la région d'El Euche (wilaya de bordj bou arreridj) pour composer différent sable mixte présentés au tableau 3.7

Les caractéristiques physiques essentielles des sables mixtes utilisés sont déterminées au laboratoire du département de génie civil selon les normes AFNOR.

Tableau 3.7 Dénomination des différents sables mixte

Sable	Dénomination du sable mixte						
	S _d	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _c
Sable concassé%	0	30	40	50	60	70	100
Sable de dune %	100	70	60	50	40	30	0



(a)



(b)

Figure 3.4 :(a) sable de dune de Boussaada ,(b) sable concassé d'el Euhe

On procède comme précédemment pour la détermination des caractéristiques mécaniques des sables mixtes, les résultats sont récapitulés au tableau 3.8

Tableau 3.8 : caractéristique physique du sable de dune et sable concassé

Sable	Caractéristiques physiques			
	Masse volumique apparente L/C (kg/l)	Masse spécifique (kg/l)	Porosité (%)	Coefficient d'absorption(%)
Sable de dune	1,52/1,66	2,61	42	1,236
Sable concassé	1,49/1,72	2,67	44	1,252

✓ Humidité :

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre 20 à 25% de son poids). Si son humidité est comprise dans la limite de 0 à 3% on l'appelle sable sec [2].

L'humidité des granulats est défini par le rapport entre la masse de l'échantillon, prélever et la masse de matériau sec après étuvage, cet essai est réalisé selon les normes. L'humidité est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100\%$$

où :

M_h : Poids du sable humide (Kg) ;

M_s : Poids du sable sec (Kg) .

On peut conclure que tous ces sables sont considérés comme sec lors de leur prélèvement.

✓ Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption d'eau A% des granulats est défini par le rapport entre l'augmentation de masse de l'échantillon, provoquée après 24 heures d'immersion dans

l'eau, et la masse du matériau sec. Les résultats d'essai d'absorption (A%) et d'humidité (W%) sont regroupés dans le tableau 3.9

Tableau 3.9 : Coefficient d'absorption du sable et taux d'humidité des sables.

sable	S _d	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _c
A(%)	1.236	1.238	1.240	1.241	1.245	1.249	1,252
W (%)	1.500	1.502	1.505	1.501	1.503	1.499	1.502

✓ Equivalent de sable

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme P 18-541.

Les essais nous ont donné un équivalent de sable de 78,33 % pour le sable de dune de Bousaada (M'sila) et un équivalent de sable de 73,21 pour le sable de concassage de la carrière d'El Euche (Bordj Bou Arreridj). Le sable de dune et le sable de concassage de carrières sont propres et répondent aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe les limites à $ESV \geq 65$ et $ESP \geq 60$, pour les sables concassés ou broyés.

Pour les sables, le dispositif de contrôle est à double détente. Dans notre cas, les essais d'équivalent de sable ont donné des résultats conformes à la norme suscitée, de ce fait, l'essai de bleu à la tache (V_{Bta}) n'est pas exigé [Baron et Ollivier, 1996].

Les résultats de l'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Equivalent de sable de dune et sable concassé

sable	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable au piston
Sable de dune	78,33	76,29
Sable concassé	73,21	70,97

Remarque :

On remarque que le sable de dune est propre et convient parfaitement pour les bétons de haute qualité (faible pourcentage de farines argileuse), et le sable concassé est un sable légèrement argileux de propriétés admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

✓ Composition granulométrique :

La composition granulométrique est représentée par les proportions des grains de différentes grosseurs. Les sables doivent avoir des proportions rationnelles des grains de différentes dimensions pour qu'ils aient une porosité minimale. Une bonne composition granulométrique conduit à une bonne qualité de sable [15,20,37,60] .

La procédure opératoire des essais est la suivante :

Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond. Verser le matériau sec dans la colonne de tamis. , et agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle.

Poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis, et vérifier la validité de l'analyse granulométrique (différence entre la somme des masses de refus et de tamisa et de la masse initiale).

Selon l'analyse faite au laboratoire du département de génie civil, les résultats d'analyse du sable de dune et du sable concassé sont récapitulés au tableau 3.11 pour les sables mixtes les résultats sont présentés en partie annexe:

Tableau 3.11 : Analyse granulométrique du sable de dune et du sable concassé

Sables	Tamis	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,125	0,08	Fond
Dune	R.P (g)	0	54	78.75	60.75	609	664.5	20.25	5.25
	R.C%	0	3.6	8.85	12.9	53.5	97.8	99.15	99.5
	Tamisat %	100	96.4	91.15	87.10	46.50	2.2	0.85	0.10
Concassé	R.P (g)	0	165.75	669.75	239.25	178.5	153.75	40.5	50.25
	R.C%	0	11.05	55.7	71.65	83.55	93.8	96.5	99.85
	Tamisat %	100	88.95	44.3	28.35	16.45	6.2	3.5	0.15

✓ Module de finesse :

C'est un facteur très important qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés sur les tamis de mailles (0,10 -0,20 - 0,50 - 1,00 - 2,00) mm sur cent, il est donné par la relation suivante.

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

où:

R_c : refus cumulés.

Tableau 3.12: module de finesse des sables

sable	S_d	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_c
M_f	1.77	2.59	2.59	2.75	2.91	3.02	3.16
Type de sable	Sable fin	Sable moyen	Sable moyen	Sable moyen	Sable moyen	Sable gros	Sable gros

Le sable de dune (S_d), présente un module de finesse de 1,77 classé comme sable fin et les sables mixtes S_1, S_2, S_3 et S_4 leurs module de finesse est compris entre 2,59 et 2,91 sont classés comme sable moyen, le sable mixte S_5 et le sable concassé S_c sont classé comme gros sable ils contiennent peu de fines.

Les courbes granulométrique du sable de dune, du sable concassé et les sables mixtes sont représentées sur les figures 3.5 à 3.11, la figure 3.12 réunie l'ensemble des courbes granulométriques pour comparaison.

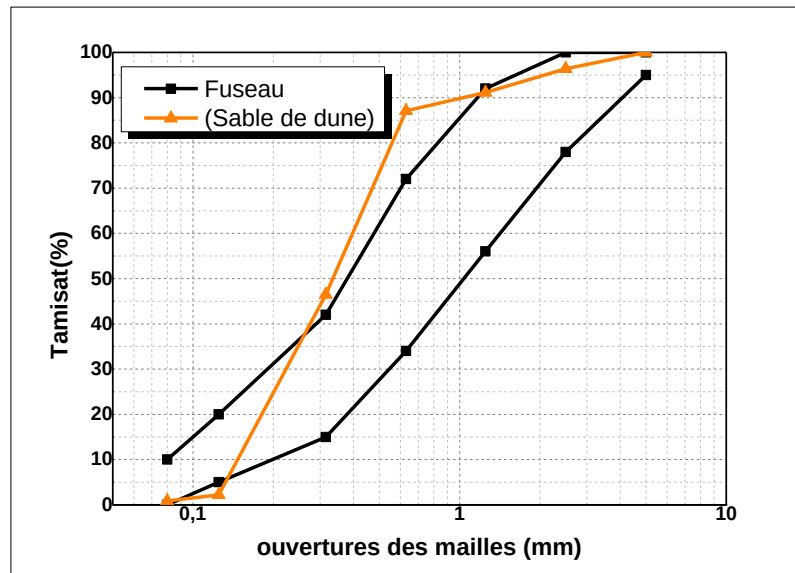


Figure 3.5 courbe granulométrique du sable de dune

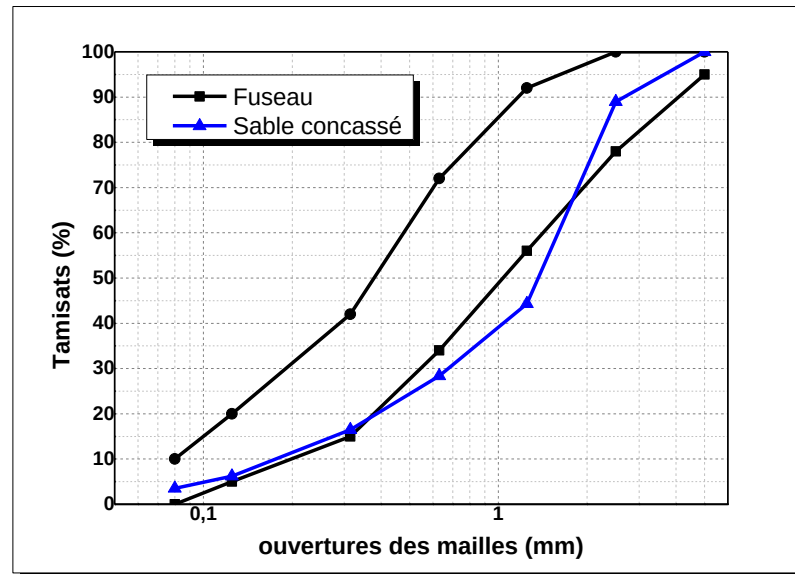


Figure 3.6 : Courbe granulométrique du sable concassé

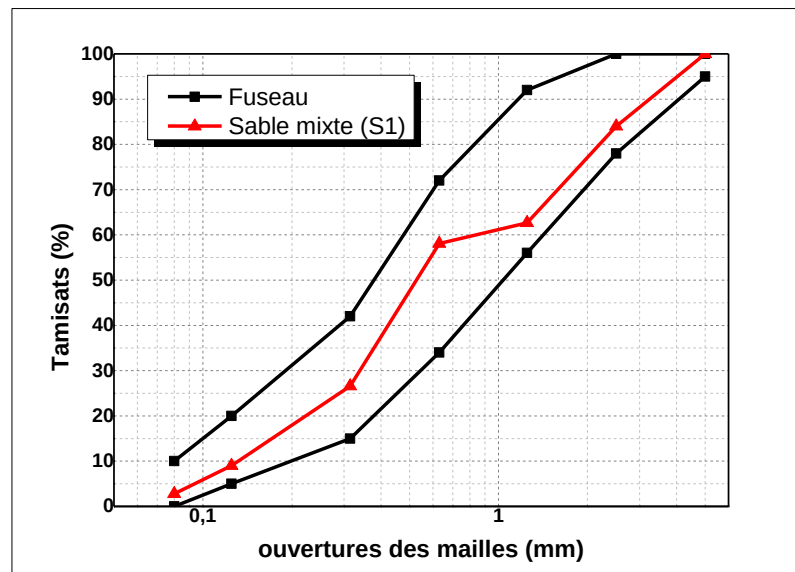


Figure 3.7 : Courbe granulométrique du sable mixte S1

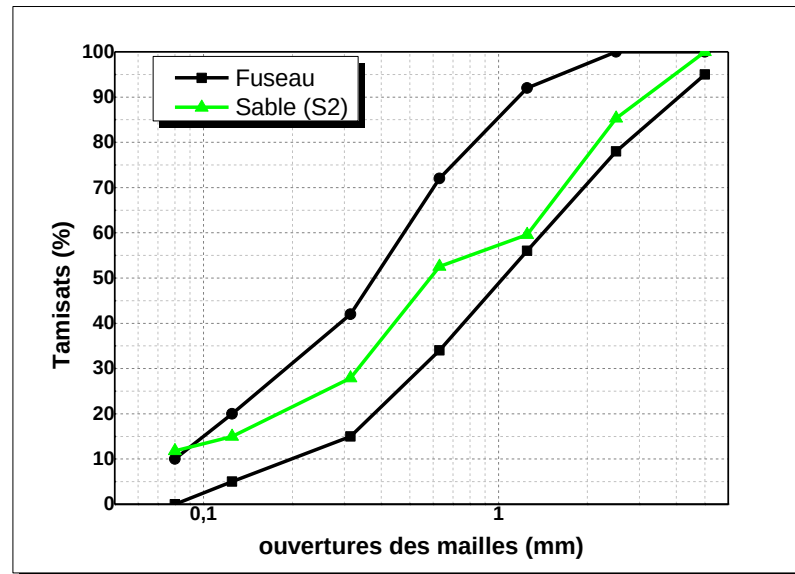


Figure 3.8 : Courbe granulométrique du sable mixte S2

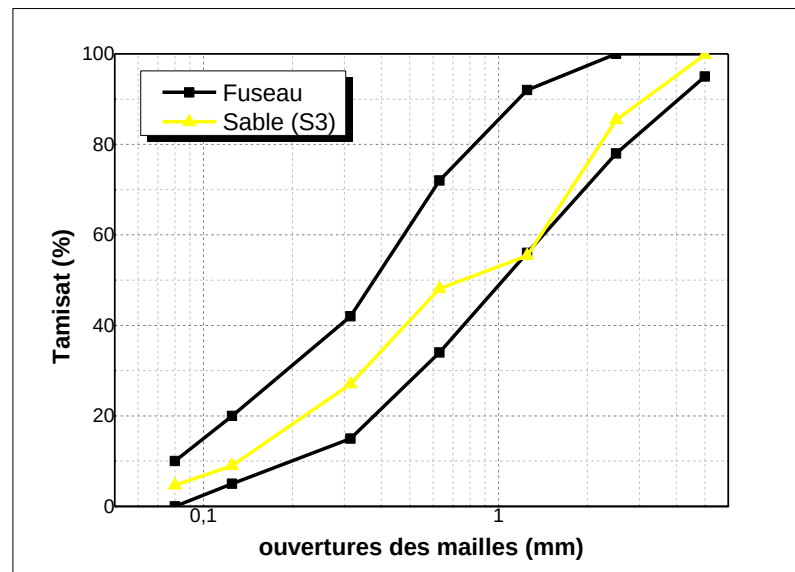


Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable mixte S3

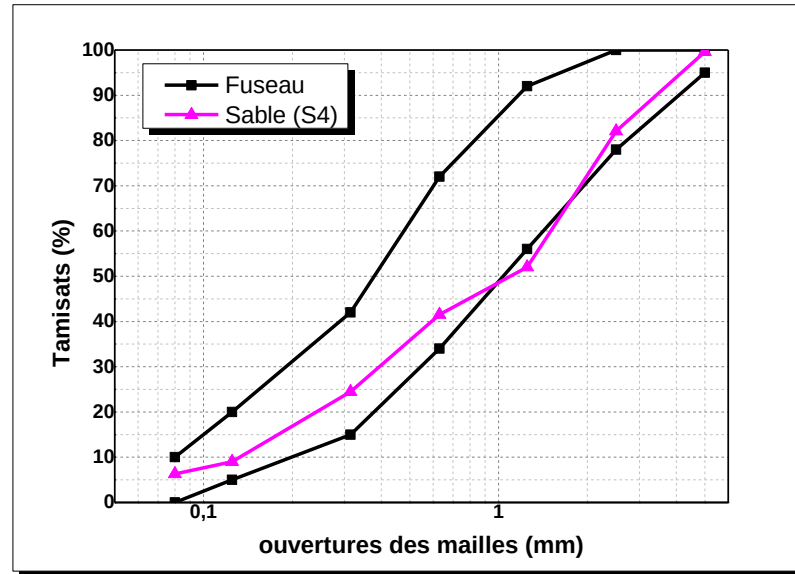


Figure 3.10 : Courbe granulométrique du sable mixte S4

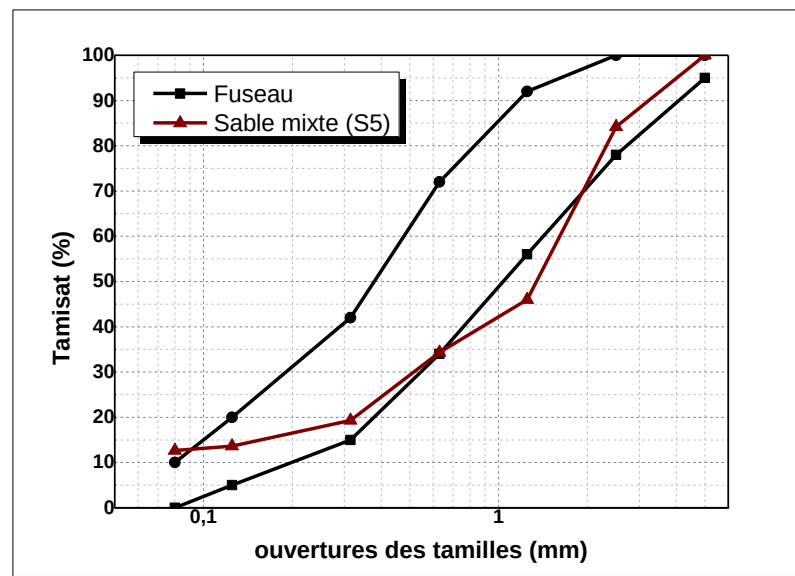


Figure 3.11 : Courbe granulométrique du sable mixte S5

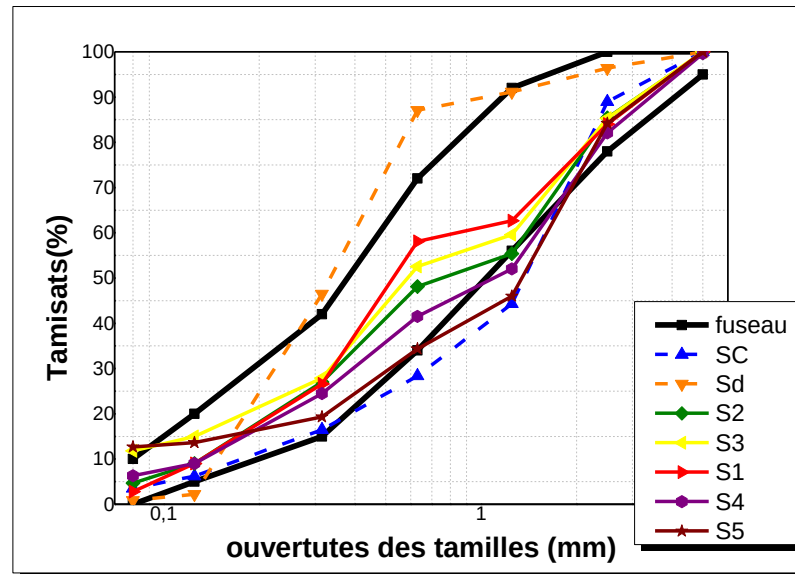


Figure 3.12 courbe granulométrique des sables mixte

✓ Propriétés chimiques et minéralogiques :

Les résultats d'analyse élémentaire par DRX réalisé au laboratoire de la cimenterie LAFARGE à Hamam EDhalaa (M'sila) sur le sable de dune, le sable concassé et les sables mixtes sont présentés au tableau 3.13, graphiquement sur les figures (3.13, à 3.18,).

Nous remarquons un pic d'environ 90 % de silice qui traduit la dominance du SiO_2 dans le sable de dune, les autres éléments présents à de faibles pourcentages.

Pour le sable concassé on note un pic d'environ 90% de calcite qui traduit la dominance du CaO , les autres éléments sont présents à de faibles pourcentages.

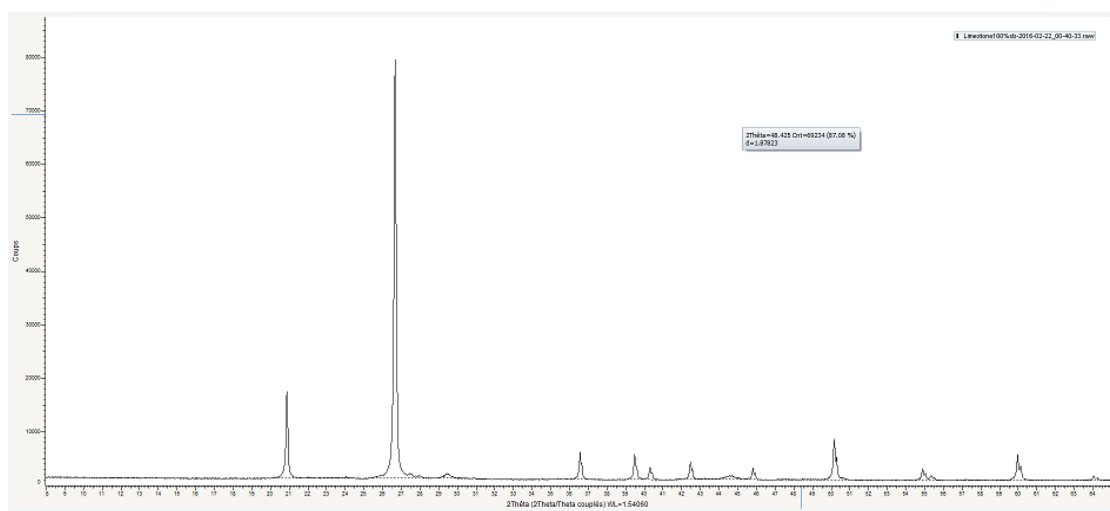


Figure 3.13 : DRX du sable de dune

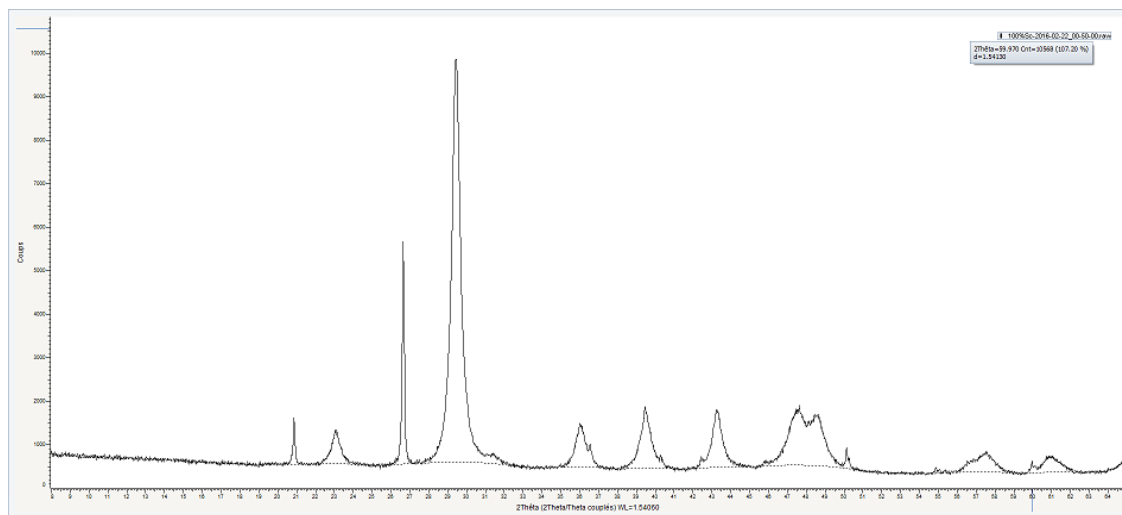


Figure 3.14 : DRX du sable concassé

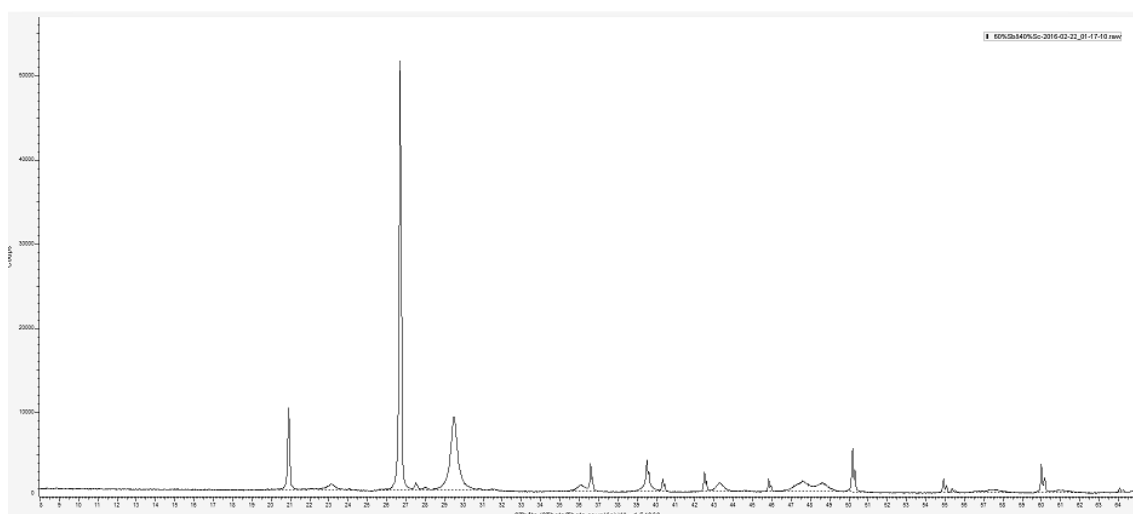


Figure 3.15: DRX du sable mixte (60% S. de dune ,40% S. concassé)

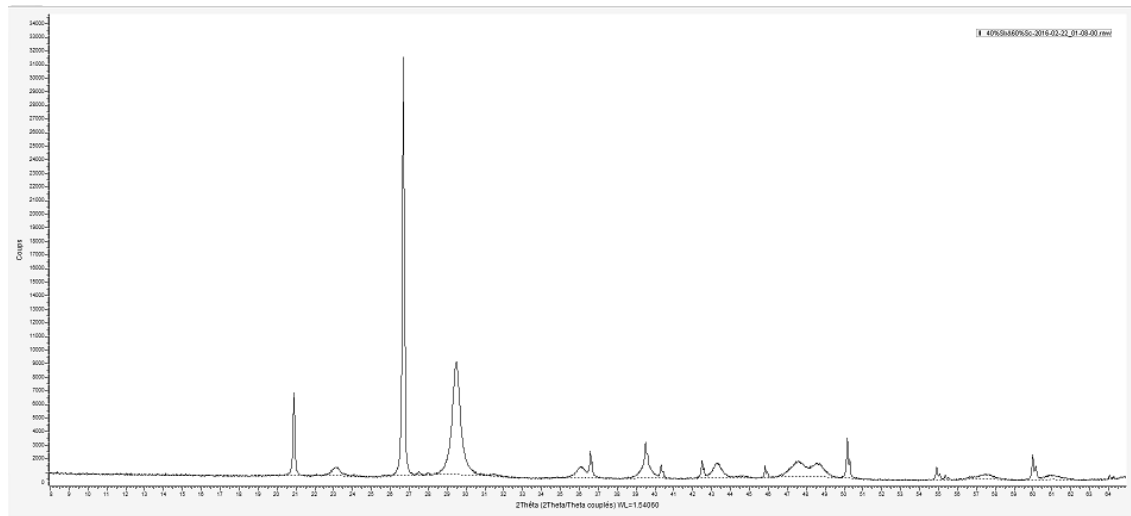


Figure3.16 : DRX du sable mixte (40% S.de dune, 60% S. concassé)

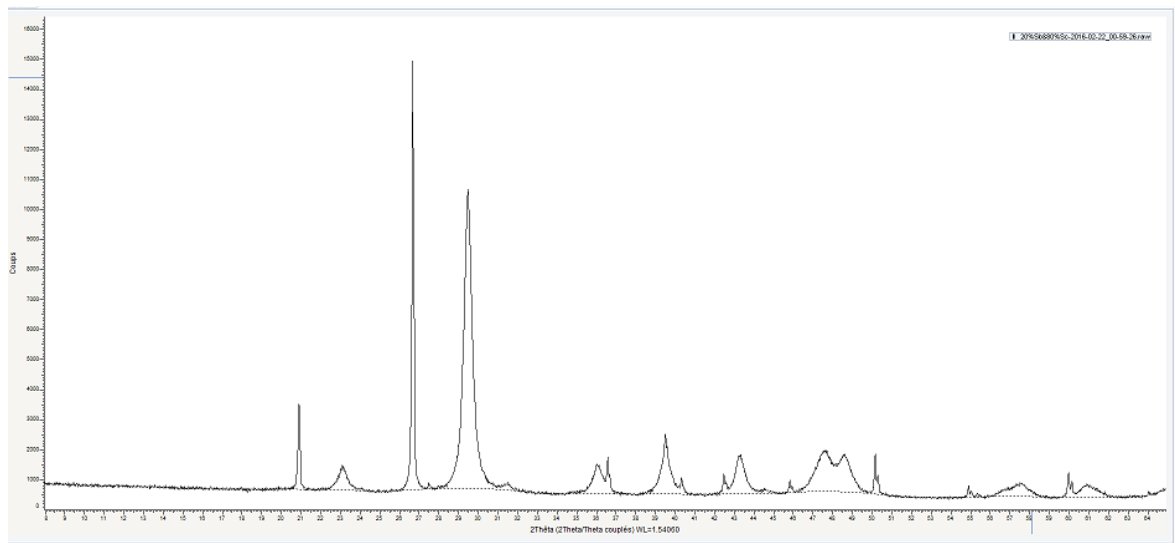


Figure 3.17 : DRX du sable mixte (30% S.de dune ;70% S concassé)

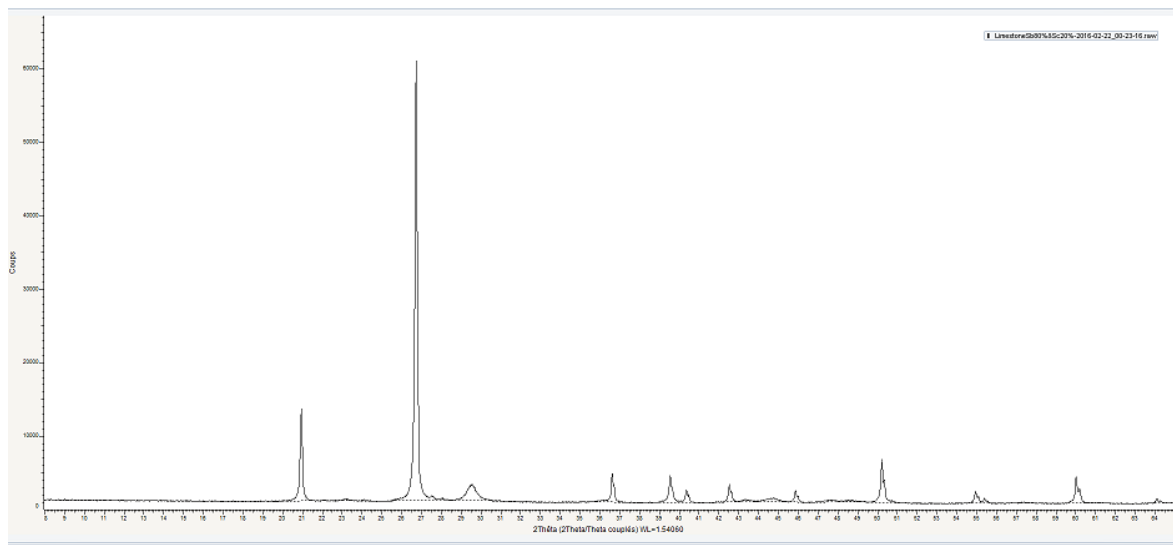


Figure 3.18 : DRX du sable mixte (70% S.de dune ;30% S concassé)

Tableau 3.13 : Analyse chimique du sable de dune et du sable concassé :

Sable Eléments %	Sable concassé	Sable de dune
R_wp	6,81	8,29
Calcite	88,16	2,64
Dolomite	0,02	0,51
Quartz	8,2	88,5
Pyrite	0,1	0
Illite	2,11	2,73
Chlorite	0,14	0,3
Kaolinite	1,27	1,04
Albite	0	4,27
CO ₂ _XRD	38,77	1,41

3.2 Le ciment:

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé, CPJ- CEM II/A 42.5 qui contient 15 % de fillers calcaires produit par la cimenterie d'Ain-Touta. Obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment ont été déterminées au laboratoire de la cimenterie d'Ain-Touta.

3.2.1 Caractéristiques physico – mécaniques

✓ Masses volumiques (apparente et absolue)

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons utilisé deux méthodes pour le calcul de la masse volumique absolue, la méthode du densitomètre Le Chatelier ainsi que celle du pycnomètre à liquide et pour chacune d'entre-elles nous avons réalisé trois essais.

✓ Essai de consistance

L'objectif de cet essai est de déterminer, pour le ciment CEM II/A 42.5 que nous avons utilisé, la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3.

✓ Essai de prise

Nous avons réalisé l'essai de l'aiguille Vicat à l'aide de la méthode expérimentale normalisée (NF EN 196-3) qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise, comprise entre deux échéances : le temps de début et de fin de prise Vicat, définis par des hauteurs normalisés d'enfoncement de l'aiguille. Trois essais simultanés à l'aiguille Vicat ont été réalisés sur la pâte de ciment étudiée.

✓ Surface spécifique Blaine

Les surfaces spécifiques Blaine ont été déterminées par le perméabilimètre de Blaine (NFP 15-442) dont le principe est de déterminer le temps mis par l'air pour traverser une certaine quantité de poudre. La consistance normale des pâtes de ciment a été suivie par l'appareil de Vicat. Les caractéristiques mécaniques ainsi que les propriétés physiques ont été mesurées par les laboratoires des cimenteries, les résultats sont récapitulés au tableau 3.14

Tableau 3.14 : Caractéristiques du ciment (CPJ CEMII/A 42.5)

Consistance normale (%)	26,00 - 28,00
Début de prise (mn)	150 - 180
Fin de prise (mn)	210 - 270
Poids spécifique (g/cm ³)	3.08
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3509
Résistance à la compression à 2j (MPa)	18.00 – 23,00
Résistance à la compression à 7j (MPa)	32.00 – 38.00
Résistance à la compression à 28j (MPa)	>42.00
Retrait a 28 jours (µm/m)	< 1000
Stabilité (mm)	0,0– 20.00

3.2.2. Analyse chimique du ciment :

L'analyse chimique du ciment CPJCEMII/A42,5 réalisé au laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta montre une prédominance d'oxyde de calcium (54,19 %), présence de la silice de l'ordre de (18 %), d'autres constituants à faible pourcentage peuvent être classés avec les impuretés comme des oxydes (d'aluminium, fer, magnésium, potassium) et une perte au feu faible.

La composition chimique du ciment composé CPJCEMII/A42,5 est représenté au tableau (3.15).

Tableau 3.15 : Compositions chimiques du ciment CPJ CMII/A 42,5.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P.F	Ins
%	54,19	21,25	5,32	2,41	1,52	0,79	0,09	1,89	7,4	5,12

3.3 Adjuvant :

La plupart des bétons (mortiers) modernes incorporent des superplastifiants dans leur formulation. Ces produits "défloculants" améliorent l'ouvrabilité à quantité d'eau constante. Ils permettent d'atteindre des rapports eau/liant inférieurs à 0,50, en conformité avec les spécifications de la norme NF EN 206 [4]

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex implanté à OUED SMAR (wilaya d'ALGER) et commercialisé sous le nom de « MEDAFLOW 30 », il est à base de polycarboxylates, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5 à 2 % (en extrait sec) du poids de ciment, ajouter au béton gâchée lors du malaxage quelques minutes avant la fin du malaxage [64].

Le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération, il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Il permet d'obtenir des bétons de très haute qualité en plus de sa fonction principale de superplastifiant il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable et ne présente pas d'effet retardateur.

Les caractéristiques essentielles recueillies sur la fiche technique sont données au tableau 3.16.

Tableau 3.16 : Caractéristiques du MEDAFLOW 30

Forme	Couleur	P-H	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Jaunâtre	6 – 6,5	1,07 ± 0,01	< 1g/l	30%

La chromatographie par perméation de gel est un essai qui permet la détermination de la masse moléculaire du superplastifiant.

Tableau 3.17 : Masse moléculaire du superplastifiant

Superplastifiant	Masse moléculaire Moyenne en nombre	Masse moléculaire Moyenne en masse	Indice de polydispersité
MEDAFLOW 30	44700	58714	1,31

3.3.1 Action du MEDAFLOW 30

- ✓ sur le béton frais il permet :
 - L'obtention d'un E/C très faible ;
 - L'amélioration considérable de la fluidité ;
 - Une très bonne maniabilité ;
 - Un long maintien d'ouvrabilité ;
 - D'éviter la ségrégation ;
 - De faciliter la mise en œuvre du béton.
- ✓ sur le béton durci il permet :
 - D'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme ;
 - De diminuer la porosité ;
 - D'augmenter la durabilité ;
 - De diminuer le retrait et le risque de fissuration.

3.3.2 Domaine d'application :

- Béton à haute performance.
- Béton auto plaçant.
- Béton pompé.
- Béton précontraint.
- Béton architecturant.

3.3.3 Dosage :

Le dosage de MEDAFLOW 30 varie entre 0.5 et 2% du poids de ciment d'après les prescriptions recommandées par le fabricant. Le pourcentage utilisé dans cette recherche pour tous les mortiers et bétons est de 1%.

Remarque :

On remarque que cet adjuvant est une solutions neutre ($\text{Ph} \approx 7$) donc ne présente pas de danger pour une manipulation à main nue . Mais pour plus de sécurité on préconise l'utilisation des gants lors des manipulations.

3.4 Eau de gâchage :

Pour le gâchage des mélanges des mortiers et bétons on utilise une eau dépourvue d'éléments nuisibles qui empêcheraient le durcissement normale du béton (mortier). Ce sont, les acides, les sulfates, les graisses, les huiles, le sucre, ..., etc. Comme il est interdit d'employer des eaux souillées dont le Ph est inférieur à 4.

L'eau de mer ou autres eaux contenant des sels minéraux peuvent être employées à conditions que la teneur en sels ne dépasse pas 2%. La qualité de l'eau pour la confection des bétons s'établis par l'analyse chimique ou en procédant à des essais comparatifs des résistance d'éprouvettes de béton gâchés avec l'eau testée et une eau potable pure , essayés à 28 jours et conservées dans des conditions normales . L'eau est considérée comme bonne si les éprouvettes préparées avec cette eau ont la même résistance que celle préparée avec l'eau potable. De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30g/l de chlorure de sodium pour la fabrication de béton armé ou prés contrainte.

Pour la confection des différents bétons et mortiers, nous avons utilisé l'eau distribuée par le réseau du service public de la ville de M'Sila (Algérie).

Les résultats de l'analyse chimique de cette eau ont été réalisés au laboratoire de L'Algérienne des eaux et sont présentés dans le tableau 3.18. Ils répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211), (2003).

Tableau 3.18 : Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage.

Elément	TC^0	PH	NO^{-3}	Cl^-	SO^{-4}	Ca^{+2}
Teneur (mg/l)	21.00	7.57	15.00	220.1	272.4	176.00

3.5. CONCLUSION :

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ces masses volumiques sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 et sa consistance est conforme à la norme NF EN 196-3. De même, ces résistances en compression obtenues à 2, 7 et 28 jours sont conformes aux exigences de la norme EN 196-1.

Les essais réalisés, sur les deux fractions (3/8 et 8/16) des graviers et du sable concassé de la carrière choisie (El- Euch) et le sable de dune de Bousaada, ont présentés de bonnes propriétés physiques, physico- chimiques et mécaniques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme P 18-541. Pour notre étude, ces granulats ont été utilisés en tant que tel, nous n'avons pratiqué aucun traitement (lavage) pour formuler des bétons et mortiers. L'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons (mortiers) de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des parements, de résistances et de durabilité.

Il est toutefois raisonnable d'ajouter que, bien que les différentes propriétés des granulats puissent être examinées, il est difficile de définir la qualité des granulats autrement qu'en la comparant à celle des bétons (mortiers) confectionnés avec eux. Un granulat dont les propriétés paraissent satisfaisantes produira toujours un bon béton (mortier). Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton (mortier) de qualité. Au cours de cette étude, nous allons procéder à la confection de quatorze mortiers et trente cinq bétons en utilisant le ciment de Ain-Touta (Batna) ainsi que les granulats concassés de la carrière d'El-Euch (Bordj Bou Arreridj), le sable de dune de (Boussaâda) et le superplastifiant MEDAFLOW 30 fabriqué par GRANITEX (Alger) .

CHAPITRE 4 : MORTIER A BASE DE SABLE MIXTE AVEC ET SANS ADJUVANT

4-1 Introduction :

Dans ce chapitre sont présentées la composition du mortier, les essais effectués (fluidité, résistance, masse volumique et capacité d'absorption) et la discussion des résultats.

Nous tenons à rappeler la définition et les rôles essentiels des mortiers.

4-2 Définition :

Le mortier est un mélange intime dans des proportions convenables (suivant la destination et l'emploi du mortier) de sable, de liant, d'eau et parfois d'adjuvants pour former une pâte de plasticité déterminée après mélange et une sorte de pierre naturelle après durcissement.

Il est parfois habile d'étudier le comportement des bétons par le biais d'études sur des mortiers judicieusement choisis. Ces mortiers présentent alors l'avantage d'être plus faciles à tester, les volumes de matériau requis étant plus faibles du fait de la diminution du volume représentatif.

Deux stratégies de détermination de la composition de mortiers associés à des bétons sont :

- La première concernant l'obtention de mortiers en faisant passer le béton malaxé à travers le tamis 05mm et séparer le gros granulat (gravier) du mortier et ainsi on obtient le mortier équivalent mais cette méthode s'avère pas pratique car une quantité d'eau est absorbée par les graviers et une partie de ciment reste collée aux gros granulats.
- La seconde est de déterminée théoriquement à partir d'une des méthodes de composition du béton répandue et déterminer la quantité de gros granulat, la quantité de sable, la quantité de ciment et la quantité d'eau nécessaire, alors ainsi la composition du mortier équivalente (sable, ciment, eau) est déterminée.

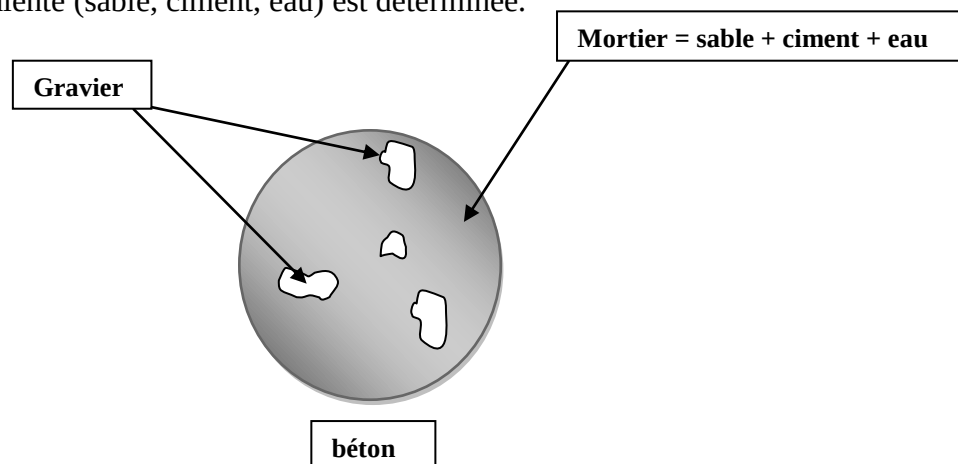


Fig. 4-1 : Modélisation du mortier au béton équivalent (MBE)

4-3 Rôles :

Le rôle principal du mortier équivalent est d'améliorer la performance des caractéristiques rhéologiques à l'état frais et les caractéristiques mécaniques à l'état durci du béton, donc le mortier équivalent doit remplir les exigences suivantes :

- Une bonne maniabilité pour faciliter la mise en place ;
- Une bonne compacité, donc une faible absorption d'eau pour assurer une bonne étanchéité ;
- Une bonne résistance (R_c) à la compression ;
- Une résistance à la traction (R_t) adéquate pour réduire la fissuration.

Nous avons jugé nécessaire d'étudier l'effet de la substitution d'une partie de sable de dune par le sable concassé (traitement de sable de dune par le sable concassé) et l'ajout de 1% de l'adjuvant MEDAFLOW 30 sur les caractéristiques suivantes :

- La fluidité ;
- La masse volumique ;
- La résistance mécanique ;
- La capacité d'absorption ;

4-4 Détermination de la composition du mortier:

La composition du mortier équivalent est tirée à partir de la composition du béton en appliquant la méthode « SCRAMTAIV » dite méthode des volumes absolus choisie pour sa rationalité et son application très simple [20].

4-4-1 Détermination de la composition du béton.

- ✓ Détermination du rapport (E/C) :

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0,5) \quad ; \text{ d'où } :$$

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5$$

Avec :

$$R_b = 400 \text{ Bars (Classe du béton);}$$

$$A = 0,6 \text{ béton de qualité ordinaire ;}$$

$$R_c = 425 \text{ Bars (Activité du ciment).}$$

Alors :

$$\frac{C}{E} = \frac{400}{0,6 \cdot 425} + 0,5 = 2,068 \Rightarrow \frac{E}{C} = 0,483$$

- ✓ Détermination du volume d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton frais:
D'après le tableau 2.3 préétabli avec une fluidité égale à 6cm.

$$E = 200 + 20 = 220 \text{ l/m}^3.$$

- ✓ Détermination de la quantité de ciment nécessaire pour 1 m³ de béton frais:

$$C = E \cdot C/E ; C = 220 \times 2,068 = 454,96 \text{ Kg/m}^3.$$

- ✓ Détermination de la proportion de gravier pour 1 m³ de béton frais :

$$G = \frac{1000}{P_g \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}}$$

où :

$\gamma_g = 2,54 \text{ Kg/l}$ masse spécifique du gravier ;

$P_g = 0,47$ Porosité du gravier ;

$\rho_g = 1,35 \text{ Kg/l}$: Masse volumique apparente du gravier ;

$\alpha = 1,46$ Coefficient d'écartement.

Alors :

$$G = \frac{1000}{0,47 \frac{1,46}{1,35} + \frac{1}{2,54}} = 1108,65 \text{ Kg}.$$

- ✓ Détermination de la quantité de sable pour 1m³ de béton frais :

$$S = (1000 - (\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{\gamma_e} + \frac{G}{\gamma_g})) \cdot \gamma_s$$

$$S = (1000 - (\frac{454,96}{3,1} + \frac{220}{1} + \frac{1108,65}{2,54})) \cdot \gamma_s = 196,762 \cdot \gamma_s$$

où :

γ_s masse spécifique du sable.

Tableau 4-1 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m³ de béton

Sable mixte	S _d (kg)	S1(kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4(kg)	S5(kg)	Sc (kg)
Poids	513,55	515,52	515,52	521,42	519,45	521,42	525,35

Pour une fluidité souhaitée correspondant à un affaissement au mini cône de 4 à 6 cm la quantité d'eau nécessaire retenue est $E = 385 \text{ l}$ pour 1m³ de mortier (à base de sable de dune).

La quantité du gravier est remplacée par le mortier

$$(S + C) = G, \quad \frac{C}{S_d} = 0,886$$

$$S + S = 1108 \text{ kg} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{C}{S_d} = \frac{455}{531,52} = 0,886 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{à partir des équations 1 et 2} \rightarrow S + 0,886S = 1108 \text{ kg} \rightarrow S = \frac{1108}{1,866} = 587,487 \text{ kg}$$

$$C = 0,886 \times S_d = 0,886 \times 587,49 = 508,76 \text{ kg}$$

La composition de 1m³ de mortier à base de sable de dune :

S = 513,55 + 587,49 = 1101,04 kg, C = 454,96 + 508,76 = 963,72 kg, E = 380l

De la même façon est déterminée la composition du mortier à base de différents sables mixte et les résultats sont groupés aux tableaux 4- 2 et 4-3

4-5 Essais et procédures :

4-5-1 Détermination de la fluidité du mortier frais par méthode d'enfoncement du cône

La fluidité est la capacité du mortier frais de couler sous l'effet de son poids propre. On peut exprimer la fluidité d'une pâte de mortier, par la profondeur d'enfoncement (en cm) dans la pâte, d'un cône métallique pesant 300 g et a ayant un angle au sommet de 30°[59] . Cet essai est réalisé pour les mortiers à base de sable mixtes (Sd, S1, S2, S3, S4, S5, Sc) avec et sans adjuvant. Les résultats obtenus sont groupés aux tableaux 4-1 et 4-2.

4-5-2 Détermination de la masse volumique :

La masse volumique est déterminée juste avant l'écrasement à chaque âge, en pesant l'éprouvette. La masse volumique est donnée par la relation suivante .

$$\gamma = M/V ;$$

où :

M : masse de l'éprouvette ;

V : Volume de l'éprouvette.

Les résultats obtenus sont groupés aux tableaux 5-9 à 5-12 donnant les valeurs moyennes de 3 essais.



Figure 4-2 : Confection des éprouvettes prismatiques en mortier



Figure 4-3 : Détermination de la masse volumique des éprouvettes par pesage

4-5-3 Détermination de la résistance mécanique du mortier durci

La résistance mécanique d'un mortier après durcissement dépend de l'activité du rapport eau / ciment (E/C) et de la quantité du sable utiliser. La résistance mécanique d'un mortier est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression.

Mode opératoire:

- Préparer le mélange de mortier avec une composition soigneusement calculée. Les composants sont malaxés jusqu'à obtention d'une pâte bien homogène. Les mélanges de mortier sont obtenus à partir de différents sables mixtes (Sd, S1, S2, S3, S4, S5 et Sc) avec un rapport C/S $\approx 0,9$ et avec une fluidité plus au moins constante (affaissement ≈ 4 à 6 cm) pour différents dosages d'adjuvants afin d'avoir les résistances correspondantes .
- On lubrifie les moules de mortier de dimensions (4x4x16) cm.
- On remplit les moules métalliques avec le mortier frais préparé avec un certain excès. On les tasse avec une tige métallique et en suite on leur fait subir une série de vibration sur une table à secousses. Cette vibration durera 30 s environs (à raison de 30 coups) jusqu'à l'apparition d'une couche de laitance sur la surface.
- On nivelle la surface du mortier au ras de bord.
- Les éprouvettes sont conservées à l'abri du soleil dans une ambiance humide.
- Le démoulage des éprouvettes se fait après 24 heures.
- A l'âge de 7,14 et 28 jours les éprouvettes sont soumises aux essais de flexions et de compressions
- L'essai de flexion est réalisé sur l'appareil de flexion. On place l'éprouvette symétriquement sur deux mâchoires. Ces dernières servent comme appuis et une troisième destinée à appliquer un moment fléchissant. Après rupture de l'éprouvette la valeur de la contrainte à la flexion (R_f) et à la traction (R_t) sont directement lues en N/cm² sur une réglette graduée. Les deux morceaux obtenus après rupture sont testés en compression. L'essai à la compression est réalisé sur une presse hydraulique où l'éprouvette est placée au milieu du plateau de la presse. La surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de 16 cm² (4x4 cm²) . L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en KN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai. La résistance à la compression est déterminée par la moyenne de trois essais cette résistance est donnée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{P_{\max}}{S} \quad (\text{bars})$$

où :

$P_{\max}$: charge maximal de rupture en (kgf) ;

S : section de l'éprouvette (cm²);

Les résultats obtenus sont groupés dans les tableaux 5-13 jusqu'à 5-20 .



Figure 4-4 : Mesure de la résistance à la flexion des éprouvettes 4X4X16 cm



Figure 4-5 : Mesure de la résistance la compression sur demi-prismes

4-5-4 Capacité d'absorption :

La capacité d'absorption d'un mortier donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mesurer en évidence la compacité du mortier durci. Plus le mortier est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche. La capacité d'absorption est déterminée par une méthode simple. Les éprouvettes de mortiers sont pesées après étuvage (à 105°C) jusqu'à stabilisation de leurs poids soit (P_s). Ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau pendant 24 heures puis retirées et pesées, soit P_h leur poids. La capacité d'absorption est donnée par la relation suivante :

$$A(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau 5-21 donnant les valeurs moyennes de trois essais.

Tableau 4-2 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Sable (kg)		Ciment (kg)	C/S	E (l)	E/C
		S.de dune	S. Concassé				
MSD	S.D	1101.35	0	975,52	0.886	385	0.394
MS1	S1	772.76	331.82	974.57	0.883	392	0.402
MS2	S2	662.44	441.63	974.57	0.883	400	0.410
MS3	S3	556.5	556.5	971.43	0.873	403	0.415
MS4	S4	444,03	666,04	972.38	0.876	416	0.428
MS5	S5	333,9	779.09	971.44	0.873	425	0.437
MSC	S.C	1119.13	0	969.21	0.866	443	0.457

Tableau 4-3 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés avec 1% de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Sable (kg)		Ciment (kg)	C/S	E (l)	Adj (kg)	E/C	Réduction d'eau (%)
		S.de dune	S. Concassé						
MSD	S.D	1101.35	0	975,52	0.886	301,4	9.76	0.309	21.71
MS1	S1	772.76	331.82	974.57	0.883	307	9.75	0.315	21,68
MS2	S2	662.44	441.63	974.57	0.883	308	9.75	0.316	23.01
MS3	S3	556.5	556.5	971.43	0.873	310	9.72	0.319	23.11
MS4	S4	444,03	666,04	972.38	0.876	312	9.73	0.321	25.00
MS5	S5	333,9	779.09	971.44	0.873	312	9.72	0.324	26,63
MSC	S.C	1119.13	0	969.21	0.866	326	9.69	0.336	26.49

Tableau 4-4: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Masse volumique (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	2.258	2.266	2.285	2,320
MS1	S1	2.289	2.305	2.348	2,402
MS2	S2	2.270	2.293	2.328	2,348
MS3	S3	2.266	2.270	2.381	2,324
MS4	S4	2.254	2.289	2.309	2,313
MS5	S5	2.281	2.301	2.304	2,324
MSC	SC	2.297	2.309	2.348	2,371

Tableau 4-5: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Masse volumique (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	2.309	2.328	2.355	2.371
MS1	S1	2.309	2.324	2.394	2.414
MS2	S2	2.285	2.313	2.339	2.367
MS3	S3	2.281	2.371	2.383	2.391
MS4	S4	2.273	2.309	2.348	2.363
MS5	S5	2.289	2.316	2.332	2.387
MSC	SC	2.332	2.328	2.367	2.314

Tableau 4-6 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Résistance à la compression (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	43.75	45.79	52,19
MS1	S1	38.75	43.92	53,12
MS2	S2	45.05	52.08	57,81
MS3	S3	48.75	59.87	59,37
MS4	S4	42.50	56.75	57,81
MS5	S5	37.50	48.96	47,75
MSC	SC	43.75	44.79	47,50

Tableau 4-7 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Résistance à la compression (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	46.80	52.71	61,43
MS1	S1	46.46	58.33	69,37
MS2	S2	48.44	64.69	72,29
MS3	S3	49.37	60.93	69,37
MS4	S4	47.43	53.43	67,18
MS5	S5	43.97	53.12	65,29
MSC	SC	45.52	48.71	58,53

Tableau 4-8 : Résistance à la traction des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Résistance à la traction (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	6.25	6.50	7,05
MS1	S1	5.65	5.39	6,65
MS2	S2	5.00	6.22	7,05
MS3	S3	5.71	6.28	7,03
MS4	S4	4.40	5.82	6,65
MS5	S5	4.30	5.89	6,58
MSC	SC	5.90	6.30	6,42

Tableau 4-9 : Résistance à la traction des mortiers étudiés
à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Résistance à la traction (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	6.30	7.33	7,80
MS1	S1	6.24	6.36	7,15
MS2	S2	5.68	6.40	8,40
MS3	S3	6.15	7.80	8,23
MS4	S4	6.00	7.78	7,15
MS5	S5	5.15	6.45	6,61
MSC	SC	7.10	7.33	7,50

Tableau 4-10 : Résistance à la flexion des mortiers
étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Résistance à la flexion (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	5.80	7.36	8,00
MS1	S1	6.63	7.02	8,26
MS2	S2	7.35	7.66	8,35
MS3	S3	7.00	7.30	8,20
MS4	S4	5.15	6.85	7,71
MS5	S5	5.05	6.32	7,16
MSC	SC	7.35	7.60	8,26

Tableau 4-11: Résistance à flexion des mortiers étudiés
à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Résistance à la flexion (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	7.40	8.58	9,00
MS1	S1	7.02	7.45	8,62
MS2	S2	7.90	7.55	9,35
MS3	S3	7.34	9.15	9,50
MS4	S4	7.00	8.76	8,35
MS5	S5	6.02	7.65	7,75
MSC	SC	8.00	8.58	8,70

Tableau 4-12 : Degré d'absorption des mortiers étudiés
à base de sable mixte à l'âge de 28 jours

Mortier	Sable mixte	Degré d'absorption (%)	
		Sans adjuvant	avec (1%) d'adjuvant
MSD	SD	9,86	6,86
MS1	S1	10,18	7,41
MS2	S2	10,31	7,55
MS3	S3	10,91	7,66
MS4	S4	11,07	7,86
MS5	S5	11,39	7,72
MSC	SC	11,8	8,15

4-6 Discussion des résultats :

4-6-1 Fluidité:

La fluidité ou consistance est la capacité du mortier de couler sous son poids, cette caractéristique rhéologique du mortier frais doit être contrôlée au cours des gâchées successives et permet de s'assurer de la régularité de la quantité d'eau entrant dans la composition du mortier.

L'influence du pourcentage de sable concassé avec l'incorporation de 1% d'adjuvant, sur la fluidité mesurée, nous amène à examiner et analyser la réduction d'eau constatée puisque la fluidité est maintenue plus ou moins constante (4 à 6 cm).

La figure 4.6 montre que l'augmentant du pourcentage de sable concassé pour tous les mortiers étudiés est engendré par une augmentation de la quantité d'eau de gâchage. Cela est dû principalement à la force de cohésion entre les grains de sable de forme anguleuse et à la présence de fines (qui absorbent l'eau) que contient le sable concassé, cette augmentation d'eau de gâchage dépasse 8% pour le mortier sans adjuvant, elle atteint 3% pour le mortier avec adjuvant.

L'incorporation de 1% de MEDAFLOW30 permet une réduction sensible d'eau de gâchage pour tous les mortiers malgré les pourcentages élevés de sable concassé utilisés. Cette réduction atteint et dépasse même 27% car l'adjuvant permet une défloculation des particules fines (ciment) ce qui permet un accroissement de la compacité (effet géométrique), lubrifie les surfaces solides en diminuant les contraintes de friction entre particules (effet mécanique). [15]

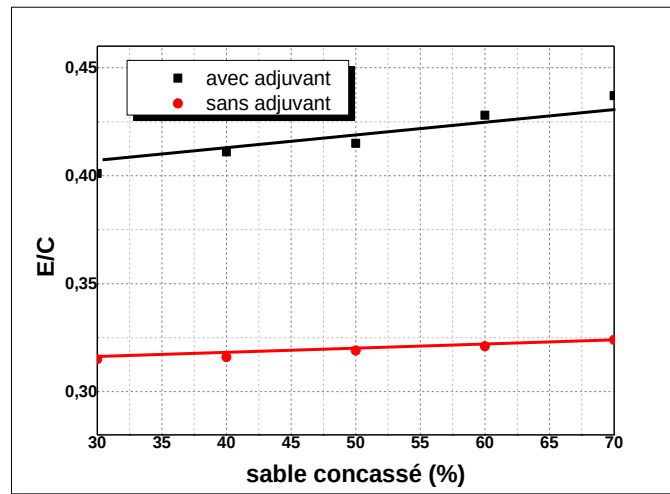


Figure 4- 6 : Variation d'E/C du mortier en fonction du % de sable concassé

En conclusion l'utilisation d'un pourcentage élevé de sable concassé entraîne une augmentation de l'eau de gâchage mais l'incorporation de 1% de MEDAFLOW30 permet de réduire sensiblement cette augmentation de l'eau de gâchage du mortier cela est visible sur la figure 4-6 la pente de la droite pour mortier sans adjuvant est supérieure à la pente de la droite du mortier avec adjuvant.

4-6-2 Masse volumique:

En analysant les résultats représentés sur la figure 4-7, on constate généralement une baisse de la masse volumique lorsque le pourcentage de sable concassé augmentant, cette baisse est peu significative (3,7%). L'incorporation de 1% de MEDAFLOW 30 a permis l'amélioration de la masse volumique cela est dû principalement à la réduction d'eau et à la lubrification des particules qui est suivit par un meilleur mode de serrage ce qui rend alors le mortier plus compact. A titre d'exemple le mortier à base du sable mixte S1, présente la meilleure compacité (voir tableau 1) qui conduit à un mortier de masse volumique supérieure.

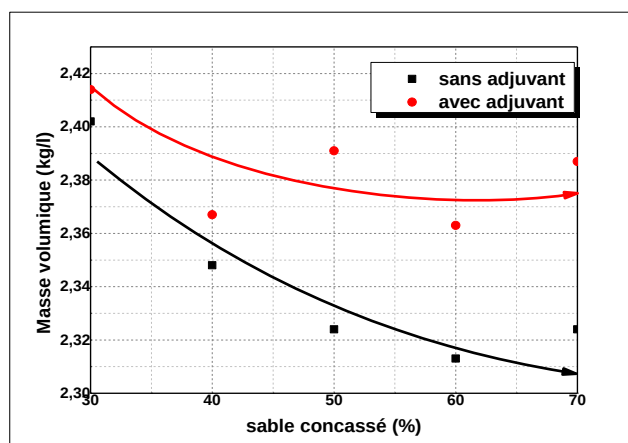


Figure 4-7 : Variation de la masse volumique du mortier en fonction du % de sable concassé

4-6-3 Capacité d'absorption:

La capacité d'absorption d'eau d'un mortier donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du mortier durci. Plus le mortier est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche.

La figure 4-8, nous permis de constater et de noter que la capacité d'absorption d'eau augmente jusqu'à 24% en augmentant le pourcentage de sable concassé pour les mortiers sans adjuvant, pour les mortiers à 1% de MEDAFLOW30 l'augmentation de la capacité d'absorption atteint 18%. On constate que l'utilisation du superplastifiant permet une diminution de la capacité d'absorption à titre d'exemple la capacité d'absorption du mortier avec le sable mixte S5 a diminuée de 53% en utilisant 1% d'adjuvant. C'est-à-dire que le MEDAFLOW 30 a permet la réduction du nombre de vides et des pores existants dans le mortier qui devient ainsi plus compact, plus résistant et plus étanche à l'eau

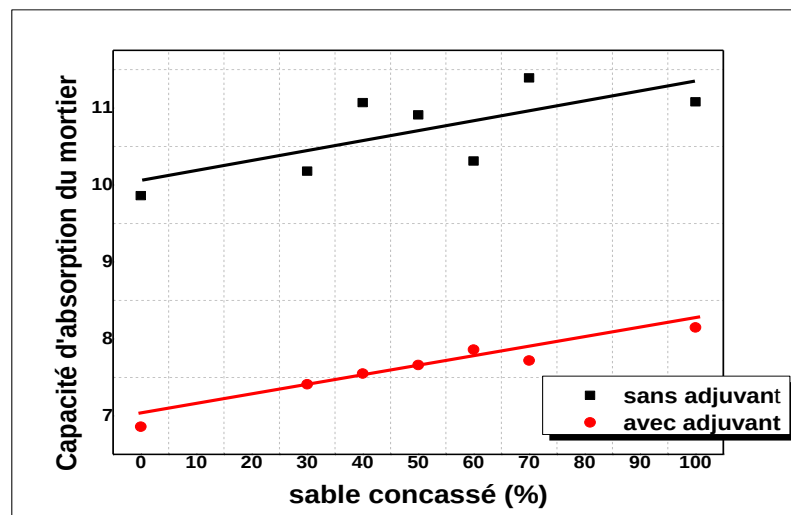


Figure 4-8 : Capacité d'absorption du mortier en fonction du % de sable concassé

4-6-4 Rapport E/C:

L'eau de gâchage est l'un des paramètres principaux qui influent sur la maniabilité du mortier frais et sur la résistance et la compacité du mortier durci. La résistance croît en même temps que le dosage en ciment et elle décroît en fonction du dosage en eau c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport E/C comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. [156]

✓ Effet de la porosité du sable mixte sur le rapport E/C du mortier :

La porosité du mortier dépend du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores. [154]

On constate sur la figure 4-9 que l'augmentation de la porosité du sable mixte est engendrée par une hausse de plus de 11%, du rapport E/C des mortiers sans adjuvant, pour les mortiers avec adjuvant cette hausse atteint 6,33%, on note aussi que l'utilisation du MDAFLOW 30 engendre une diminution du rapport E/C de plus de 35% car ce dernier baisse la force de cohésion entre les grains, lubrifie et facilite le réarrangement des grains et le mortier devient moins poreux donc plus compact et plus étanche.

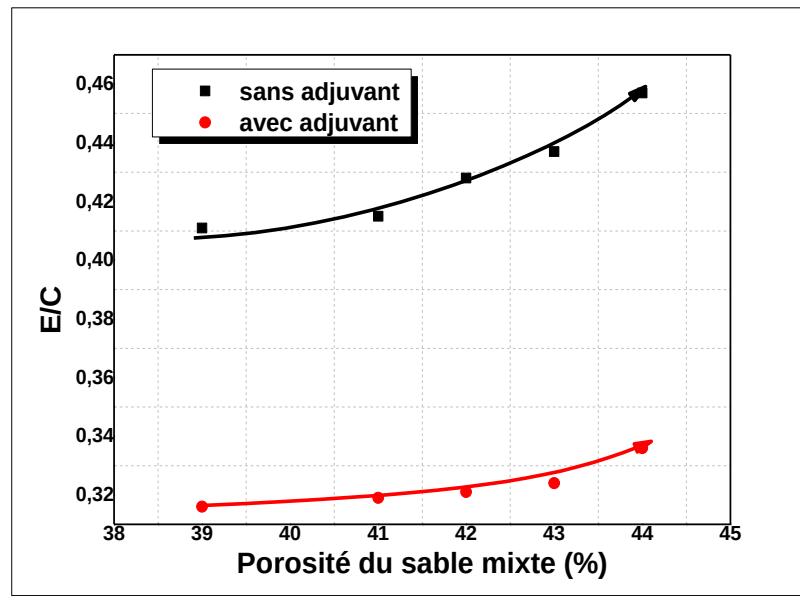


Figure 4-9 : E/C fonction de la porosité du sable mixte

✓ Effet de la capacité d'absorption du mortier sur le rapport E/C:

L'analyse des résultats représentés sur les figures 4-10 et 4-11 montrent que la réduction du rapport E/C est suivie par une baisse de la capacité d'absorption du mortier à base de sable mixte avec ou sans adjuvant ; la réduction du rapport E/C de 8,74% est suivie par une réduction de la capacité d'absorption de 18,45% pour les mortier avec adjuvant ; pour les mortiers sans adjuvant la réduction du Rapport E/C de 16% est engendrée par une baisse de la capacité d'absorption de 19,67%. Donc l'incorporation du MEDAFLOW30 réduit la capacité d'absorption le mortier devenant ainsi compacte, étanche et plus résistant [150].

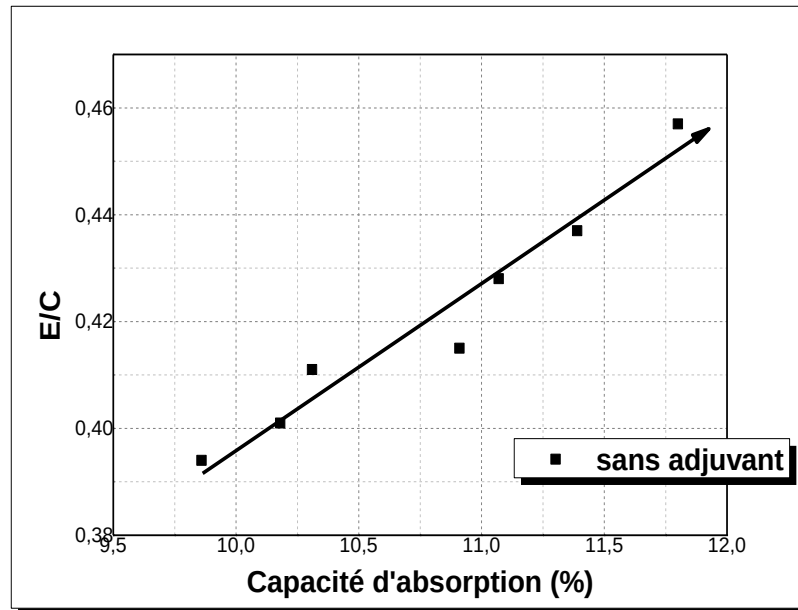


Figure 4-10 : E/C fonction de la capacité d'absorption du sable mixte sans adjuvant

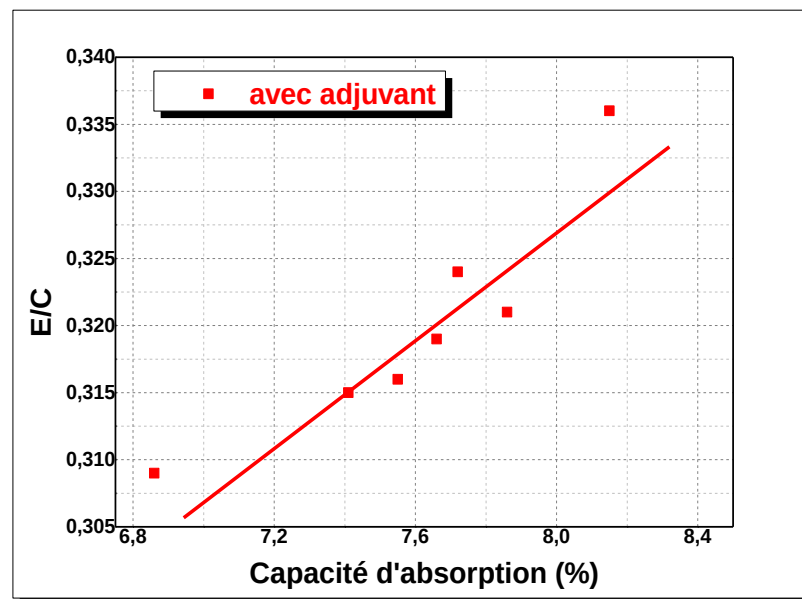


Figure 4-11 : E/C fonction de la capacité d'absorption du mortier mixte avec adjuvant

4-6-5 Résistances mécanique:

La résistance mécanique d'un mortier après durcissement dépend de l'activité du ciment, du rapport eau/ciment (E/C) et de la qualité et quantité du sable utilisé. Elle est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression.

On prépare le mélange de mortier avec une composition soigneusement calculée, les composants sont malaxés, jusqu'à obtention d'une pâte bien homogène. Les mélanges de mortier sont obtenus à partir de différents sables mixtes (S_c , S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , et S_d), avec un rapport $C/S \approx 0,9$ sans adjuvant et avec 1% d'adjuvant. Ensuite on lubrifie et on

remplit les moules métalliques de dimensions (4 x 4 x 16) cm avec le mortier frais, le démoulage des éprouvettes se fait après 24 h, à l'âge de 7, 14 et 28 jours les éprouvettes sont soumises aux essais de flexion et de compression. EN 1015-11.

✓ **Effet du traitement du sable de dune par sable concassé sur la résistance:**

La figure : 4-12 montre que la résistance en compression du mortier sans adjuvant s'améliore à partir de 30% d'ajout de sable concassé jusqu'à 50% d'ajout, la résistance maximale étant obtenue à 50% d'ajout ; pour le mortier avec adjuvant l'amélioration est constatée à partir de 30% d'ajout de sable concassé jusqu'à 40% et la résistance maximale est obtenue à 40% d'ajout, la diminution de la résistance est notable au-delà de 70% d'ajout cela est due essentiellement à l'augmentation de l'eau de gâchage qui engendre une porosité plus grande le mortier devient alors moins compact et moins résistant, on remarque aussi que l'utilisation du MEDAFLOW 30 ralentit sensiblement la baisse de résistance du mortier (il améliore le réarrangement des grains) et le gain de résistance dépasse 35% (pour le mortier à base de sable mixte S5).

La figure : 4-13, montre que la résistance en flexion pour les mortiers sans adjuvant affiche une faible amélioration visible à partir de 30% d'ajout de sable concassé. Au-delà de 40% d'ajout, on observe une baisse de résistance qui se poursuit jusqu'à 70% d'ajout. Pour les mortiers avec adjuvant, l'amélioration est notable à partir de 40% d'ajout de sable concassé et cette amélioration se poursuit jusqu'à 60% d'ajout; au-delà de cet ajout, on remarque une baisse de résistance de flexion. L'incorporation de 1% de superplastifiant (MEDAFLOW 30) permet un gain de résistance qui dépasse 24%.

La figure : 4-14, nous permet de constater que l'amélioration de la résistance en traction pour les mortiers sans adjuvant commence à être visible à partir de 40% d'ajout de sable concassé, la résistance optimale est atteinte à 50% d'ajout, une baisse de résistance est enregistrée à partir de 60% d'ajout. Pour les mortiers avec adjuvant, on constate une amélioration de la résistance à partir d'un pourcentage supérieur à 30% d'ajout de sable concassé et la résistance optimale est obtenue à 40% d'ajout, la baisse de résistance est affichée en dépassant 60% d'ajout, l'adjuvant permet un gain de résistance qui dépasse 26%.

Finalement, on conclut qu'à partir de 30% d'ajout de sable concassé on constate une amélioration des résistances à la compression, flexion et traction des mortiers avec ou sans adjuvant, on remarque que l'utilisation du MEDAFLOW30 améliore les résistances R_c , R_t et R_f du mortier de plus de 24%.

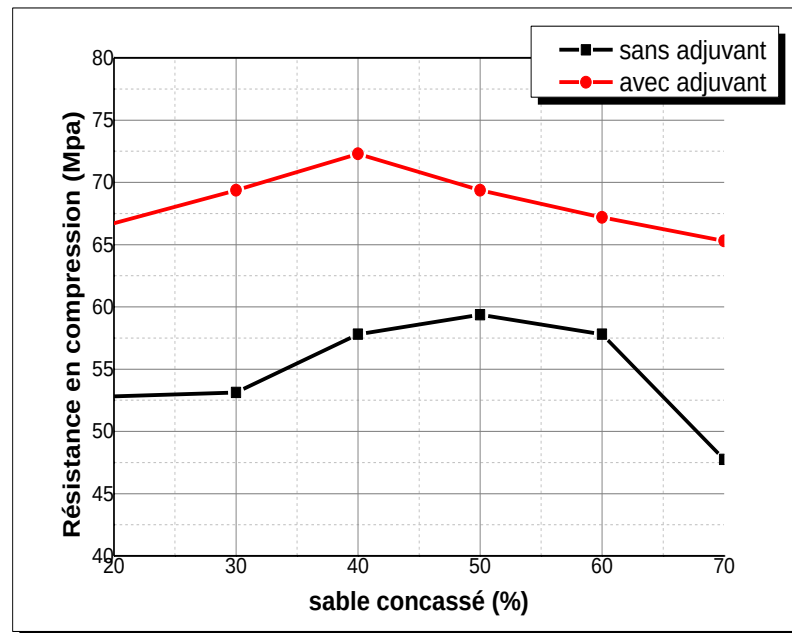


Figure 4-12 : Resistance en compression à 28 jours en fonction du % de sable concassé

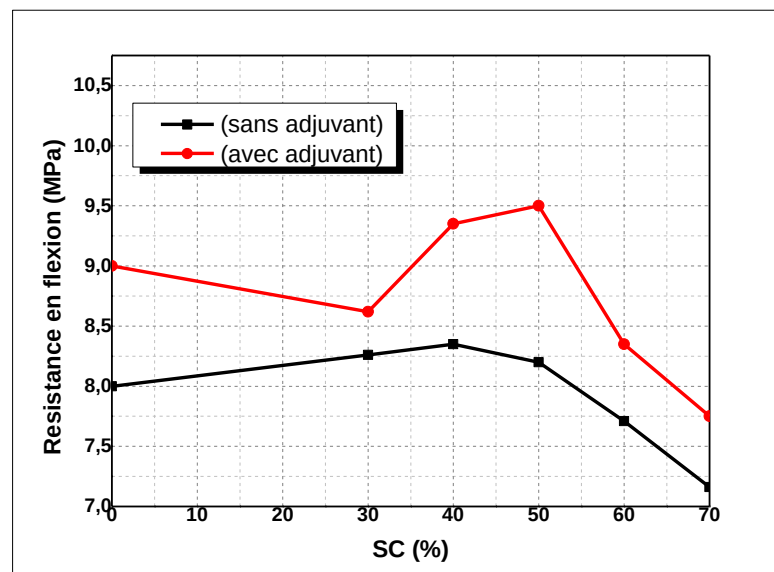


Figure 4-13 : Resistance en flexion à 28 jours en fonction du % de sable concassé

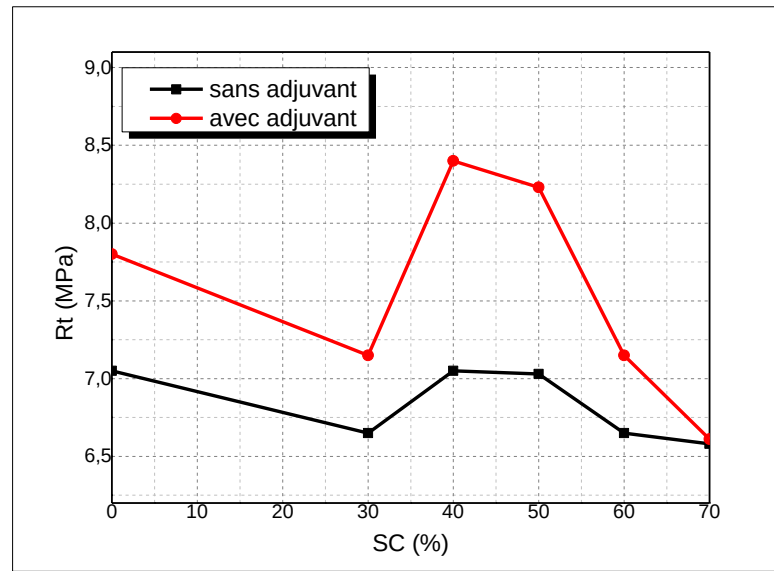


Figure 4-14: Resistance en traction à 28 jours en fonction du % de sable concassé

✓ Effet de la porosité du sable mixte sur la résistance du mortier:

D'après les figures représentées ci-dessous, on remarque que les résistances R_c , R_t et R_f respectivement de compression, traction et flexion diminuent lorsque la porosité du sable mixte augmente, on constate également que les résistances optimales de compression et de traction sont obtenues à une porosité de 39% environ, pour les mortiers à base de sable mixte avec ou sans adjuvant ; en flexion par contre, on remarque que la résistance optimale est obtenue à une porosité de 41%. A titre d'exemple, en utilisant le sable mixte S2 (40% de sable concassé, 60% de sable de dune) on atteint les résistances optimales respectivement de compression et de traction du mortier avec adjuvant $R_c = 72,39\text{Mpa}$, $R_t = 8,40\text{ Mpa}$ et la résistance optimale en flexion pour le mortier avec adjuvant est obtenue en utilisant le sable mixte S3 (50% de sable concassé, 50% de sable de dune $R_f = 9,50\text{Mpa}$.

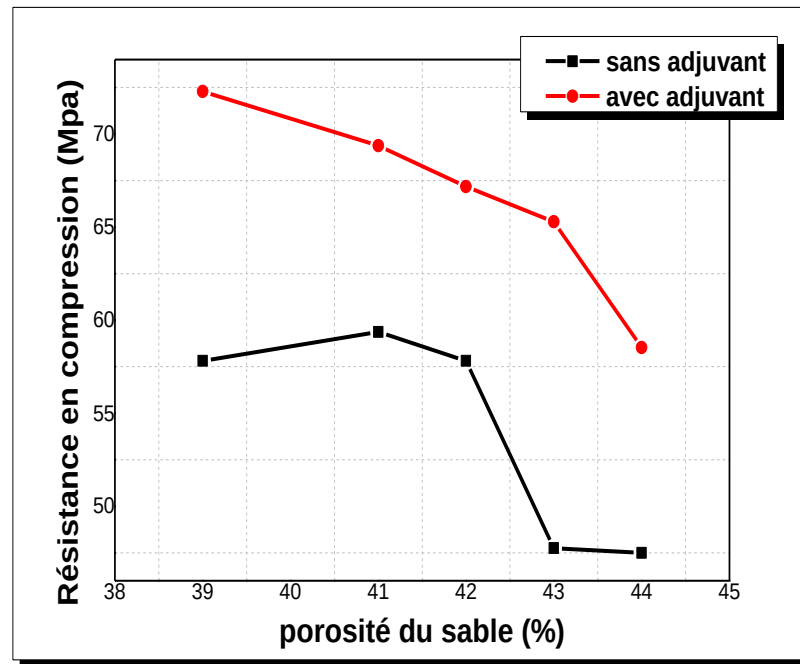


Figure 4-15: Résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte

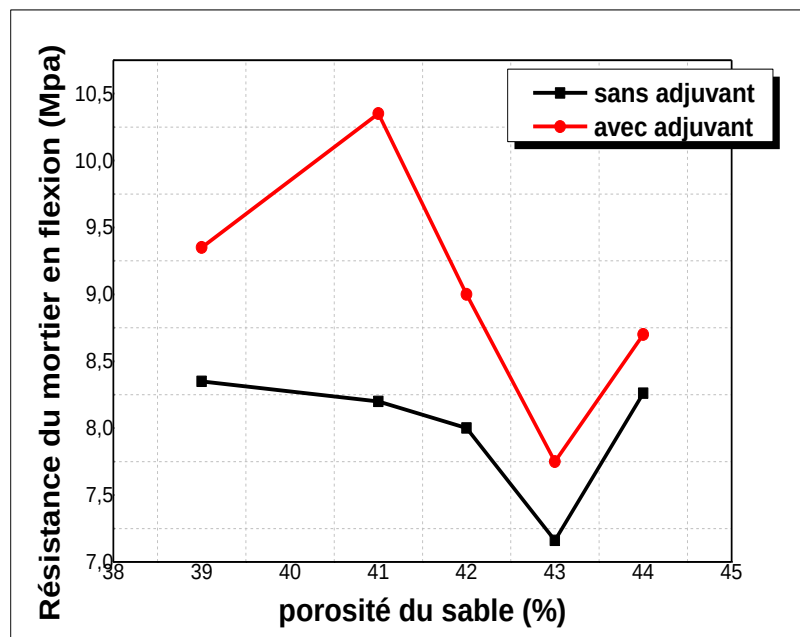


Figure 4-16 : Résistance à la flexion à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte

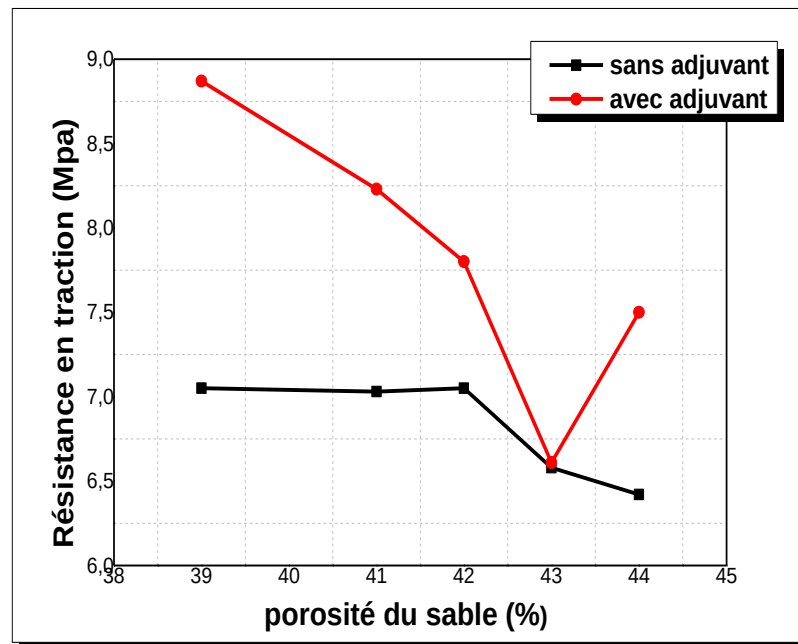


Figure 4-17 : Résistance en traction des mortiers à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte

✓ Evolution dans le temps de la résistance mécanique du mortier :

D'après les courbes donnant l'évolution la résistance mécanique R_c , R_t , et R_f respectivement de compression, de traction et de flexion pour les mortier à base du sable de dune traiter par sable concassé pour différents pourcentages dans le temps représentées par les Figures 4-18 à 4-23 , on note que l'accroissement est de forme hyperbolique rapide dans l'intervalle (0 -7 jours) et lent dans l'intervalle (14-28jours) pour tous les mortiers avec ou sans adjuvant. L'utilisation de l'adjuvant MEDAFLOW 30 est engendré par un accroissement de la résistance mécanique dans le temps, quelque soit le pourcentage de sable concassé utilisé et quelque soit la porosité du sable mixte.

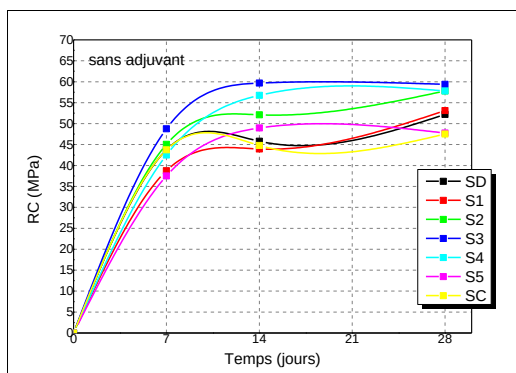


Fig 4- 18: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant

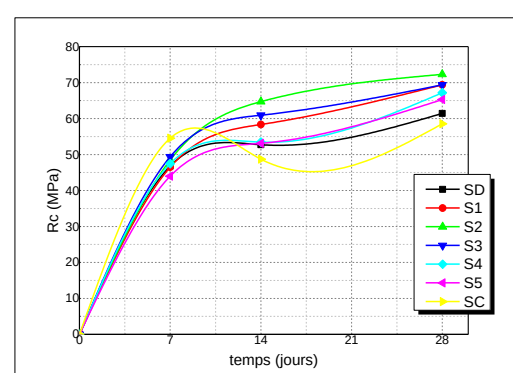


Fig 4- 19: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant

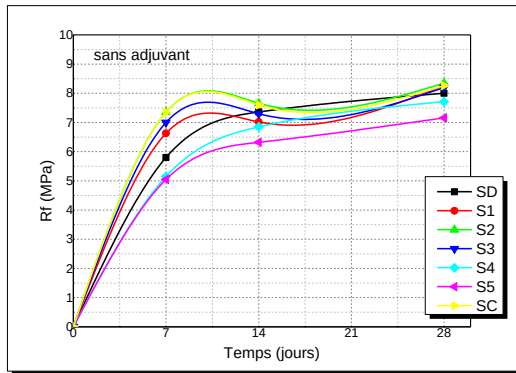


Fig 4- 20: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant

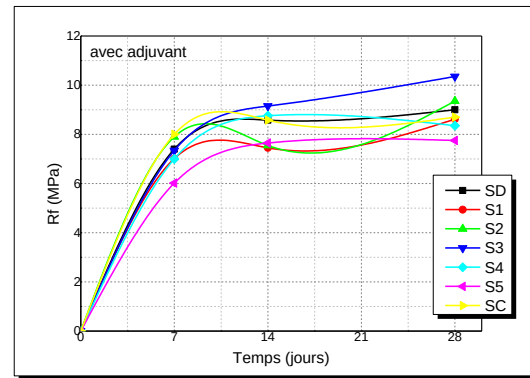


Fig 4- 21: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant

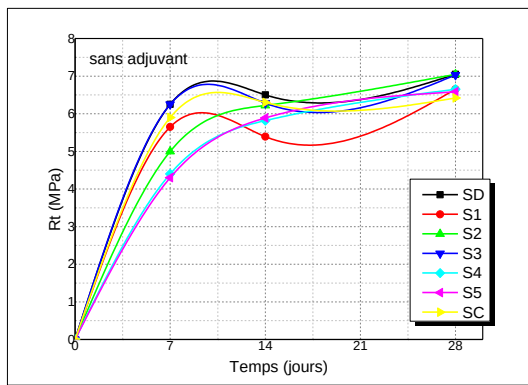


Fig 4- 22: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant

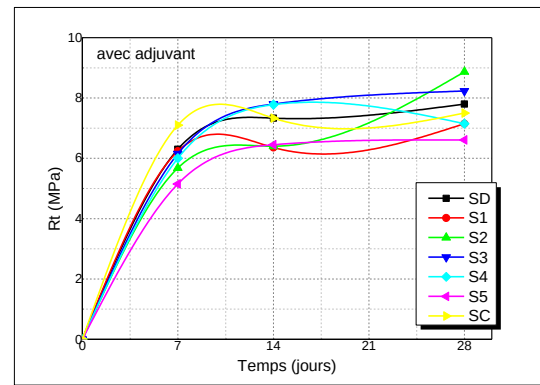


Fig 4- 23: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant

4-7 Conclusion :

L'objectif principal de ce travail expérimental est de valoriser les matériaux locaux et les déchets de carrière en les utilisant dans la fabrication des mortiers et bétons dans divers projets de construction (bâtiments, routes, ouvrages d'art ...,etc) et préserver le patrimoine du pays en matière de sable de dune.

Cette investigation nous a permis d'aboutir à des résultats très satisfaisants qui confirment que le traitement du sable de dune (par substitution) par les déchets issus de la fabrication des graviers conduit à une amélioration notable de la résistance mécanique (de compression, traction et de flexion) qui est due essentiellement à la correction des caractéristiques physiques du sable mixte.

Les résultats obtenus précisent de façon claire que l'amélioration est notable à partir de 30% jusqu'à 50% d'ajout de sable concassé, malgré que cet ajout du sable de concassage soit engendré par une petite hausse du rapport E/C qui influe négativement sur la résistance mécanique [53].

L'utilisation de 1% de superplastifiant (MEDAFLOW 30) a permis de réduire l'eau de gâchage de plus de 25% alors l'effet du sable de concassage (baisse de E/C) est rapidement corrigé.

L'étude de l'effet du traitement du sable de dunes par sable concassé avec divers pourcentages (0%, 30%, 40%, 50%, 60% et 70%) nous a permis de conclure ce qui suit :

- ✓ L'ajout du sable concassé permet l'amélioration des propriétés physiques du sable mixte (granularité améliorée, faible porosité, compacité élevée, adhérence pâte ciment-granulats améliorée,..., etc);
- ✓ L'utilisation du sable mixte améliore également la résistance mécanique (compression, flexion et à la traction) du mortier;
- ✓ Le traitement (ajout) du sable de dunes de 30% jusqu'à 50% de sable concassé et l'utilisation du superplastifiant (1% de Medaflow30) augmentent la résistance à la compression, à la flexion et à la traction plus de 24%.
- ✓ Avec 1% de superplastifiant (MEDAFLOW 30), la résistance de compression optimale du mortier est réalisée avec le sable mixte S2 (40% d'ajout de sable concassé) elle est de l'ordre de 72,39 MPa, la résistance optimale de traction du mortier est obtenue avec le même sable mixte S2 est elle affiche une valeur 6,40 MPa, en flexion la résistance optimale affiche une valeur de 9,5 MPa en utilisant le sable mixte S3.

Les résultats d'investigation indiquent que les propriétés physico-mécaniques du mortier seraient mieux avec du sable mixte. Les bonnes résistances mécaniques affichées par le mortier à base de sable mixte incite à poursuivre l'investigation et encourage à substituer le sable (naturel) de dune.

CHAPITRE 5 : BETON ADJUVANTE A BASE DE SABLE MIXTE

5-1 Introduction :

Dans ce chapitre sont présentés les compositions des bétons utilisée dans cette recherche, Les essais effectués (fluidité, résistance à la compression et masse volumique) et enfin la discussion des résultats obtenus.

Les méthodes de formulation des mélanges hydrauliques sont nombreuses. Le principe de base de la plupart d'entre elles repose sur la recherche de la compacité granulaire maximale.

Pour cela, certaines méthodes recourent à la mesure de la compacité des constituants et des mélanges, d'autres à « une courbe granulaire de référence » supposée donner la compacité maximale avec les matériaux utilisés. Dans le même esprit (optimisation de la structure granulaire), à partir de la matrice cimentaire (gravier+sable+ciment+ eau) c'est-à-dire gravier + mortier, nous proposons alors cinq bétons B1, B2, B3, B4, B5 (cinq formulations) avec les sept sables mixtes étudiés dans la partie mortier, il s'agit bien de mettre au point un mélange optimisé de constituants qui non permet la réalisation d'un béton de qualité supérieure en améliorant ses principales caractéristiques rhéologiques à l'état frais (fluidité) et les caractéristiques mécaniques à l'états durcis (résistance). Pour cela les constituants sont déterminés à partir de la composition Russe dite méthodes des volumes absolus « méthode **B. scamtaiev**» puis la substitution d'une partie de gros granulats (gravier) avec différents pourcentages par du mortier en gardant le rapport C/S (sable sur ciment) constant, 35 mélanges de bétons sont réalisés avec les différents sable mixtes utilisés dans la partie mortier.

Tableau 5.1 : Dénomination du béton

Dénomination du béton	B1	B2	B3	B4	B5
Mortier (%)	30	40	50	60	70
Gravier (%)	70	60	50	40	30

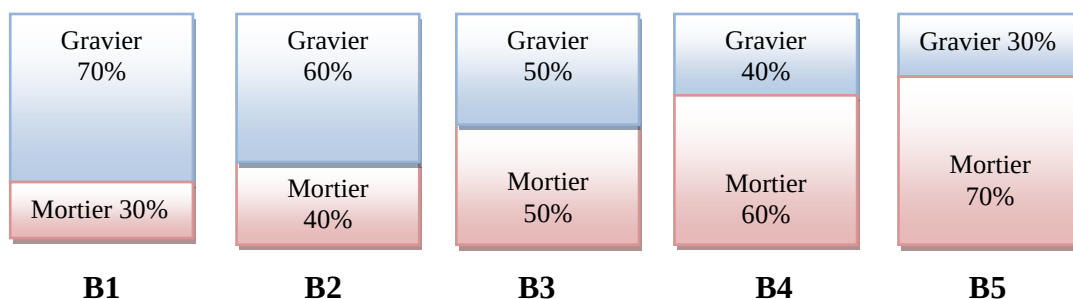


Figure 5.1 : compositions des bétons étudiés

5-2 Essais, Procédures et Résultats :

5-2-1 Détermination de la composition du béton.

On a utilisé la méthode " **Xkramtaev** " dite méthode des volumes absolue de l'ex URSS, cette méthode est choisie pour sa rationalité et son application très simple [20].

✓ Détermination du rapport (E/C) :

$$R_b = A.R_c (C/E - 0,5) \quad ; \text{ d'où } :$$

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A.R_c} + 0,5$$

Avec :

$R_b = 400$ Bars (Classe du béton);

$A = 0,6$ béton de qualité ordinaire ;

$R_c = 425$ Bars (Activité du ciment).

Alors :

$$\frac{C}{E} = \frac{400}{0,6.425} + 0,5 = 2,068 \Rightarrow \frac{E}{C} = 0,483$$

✓ Détermination du volume d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton frais:

D'après le tableau 2.3 préétabli avec une fluidité égale à 6cm.

$$E = 200 + 20 = 220 \text{ l/m}^3.$$

✓ Détermination de la quantité de ciment nécessaire pour 1 m³ de béton frais:

$$C = E. C/E \quad ; \quad C = 220 \times 2,068 = 454,96 \text{ Kg/m}^3.$$

✓ Détermination de la proportion de gravier pour 1 m³ de béton frais :

$$G = \frac{1000}{P_g \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}}$$

où :

$\gamma_g = 2,54$ Kg/l masse spécifique du gravier ;

$P_g = 0,47$ Porosité du gravier ;

$\rho_g = 1,35$ Kg/l : Masse volumique apparente du gravier ;

$\alpha = 1,46$ Coefficient d'écartement.

Alors :

$$G = \frac{1000}{0,47 \frac{1,46}{1,35} + \frac{1}{2,54}} = 1108,65 \text{ Kg.}$$

✓ **Détermination de la quantité de sable pour 1m³ de béton frais :**

$$S = (1000 - (\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{\gamma_e} + \frac{G}{\gamma_g})).\gamma_s$$

$$S = (1000 - (\frac{454,96}{3,1} + \frac{220}{1} + \frac{1108,65}{2,54})).\gamma_s = 196,762 .\gamma_s$$

où :

γ_s masse spécifique du sable.

Tableau 5.2 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m³ de béton

Sable mixte	S _d (kg)	S1(kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4(kg)	S5(kg)	Sc (kg)
Poids	513,55	515,52	515,52	521,42	519,45	521,42	525,35

Alors pour chaque béton (B1, B2, B3, B4, B5) on détermine sa composition selon l'hypothèse suivante :

Le béton est composé d'une matrice comprenant du gravier et du mortier, on calcule alors la masse du béton d'après ses composants en poids déterminé par la composition des volumes absolus « **Xkrantaev** » pour chaque sable mixte.

La Masse du béton = G + S + C + E + Adj = 1108,65 + S + 454,96 + 220 + 4,55.

- Sable de dune : $M_b = 1788,16 + 513,55 = 2301,71 \text{ kg}$
- Sable mixte (S1) : $M_b = 1788,16 + 515,52 = 2303,68 \text{ kg}$
- Sable mixte (S2) : $M_b = 1788,16 + 515,52 = 2303,68 \text{ kg}$
- Sable mixte (S3) : $M_b = 1788,16 + 521,42 = 2309,58 \text{ kg}$
- Sable mixte (S4) : $M_b = 1788,16 + 519,45 = 2307,61 \text{ kg}$
- Sable mixte (S5) : $M_b = 1788,16 + 521,42 = 2309,58 \text{ kg}$
- Sable concassé : $M_b = 1788,16 + 525,35 = 2313,51 \text{ kg}$

A titre d'exemple pour le béton B1 (70% de gravier et 30% de mortier) on détermine la composition en poids comme suite :

$$\text{Masse du gravier : } \text{Gravier} = \frac{M_b}{100} \times 70 = \frac{2301,71}{100} \times 70 = 1611,97 \text{ kg}$$

$$\text{Mortier} = \frac{M_b}{100} \times 30 = \frac{2301,71}{100} \times 30 = 690,51 \text{ kg}$$

Masse du mortier :

Mortier = sable + ciment + eau, donc sable + ciment = mortier – eau = 690,51 – 66 = 624,15 kg

C+S = 624,15 kg, C/S = 0,88 → C = S x 0,88 → S + 0,88 x S = 624,15 kg => 1,88 x S = 624,15 kg

S = (624,15)/1,88 = 332 kg => C = 624,15 – 332 = 292,15 kg

Gravier (8/16) = 1128,38 kg, Gravier (3/8) = 483,59 kg, S = 332 kg, C = 292,1 kg,

E = 220 l, Adjuvant = 2,92 kg.

La composition des bétons B1, B2, B3, B4, B5 est calculée comme précédemment est donnée pour chaque sable mixte dans les tableaux : 5. 3 à 5. 9

5-2-2 Détermination de la fluidité du béton frais :

La fluidité du mélange de béton frais est évaluée par sa capacité de couler sous l'action de son poids propre ou d'une vibration. Cette caractéristique est déterminée au moyen du cône d'Abrams.

Cet essai est assez simple il est le plus fréquemment utilisé. Il consiste à remplir un moule tronconique de diamètre $D=20$ cm pour la base inférieure et d'un diamètre $d=10$ cm pour la base supérieure et de hauteur $h=30$ cm, par du béton frais.

Le remplissage est réalisé en trois couches compactées avec une tige métallique de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche. Suite à cela, le moule est soulevé avec grande précaution pour mesurer ainsi l'affaissement.



Figure 5.2 : Mesure de l'affaissement du béton frais au cône d'Abrams

Les résultats sont regroupés aux tableaux 4-1 jusqu'à 4-4.

5-2-3 Détermination de la résistance à la compression des bétons durcis :

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du béton de résister à la destruction sous l'action des contraintes dues aux différentes charges de compression, de traction, de flexion et de cisaillement. Le béton résiste le mieux à la compression et cet indice sert de caractéristique principale des propriétés mécaniques des bétons.

Mode opératoire:

- Après détermination de différents dosages des composants du béton selon la méthode de l'ex URSS dite " des volumes absolus", ces derniers seront mélangés et gâchés puis on effectue les essais de mesure de fluidité jusqu'à obtention de la fluidité requise.
- On coule le béton frais dans des moules cubiques de dimensions $10 \times 10 \times 10$ cm³. Après avoir lubrifiés ces derniers, on leur fait subir des vibrations jusqu'à l'apparition d'une couche de laitance du ciment sur la surface libre.

- Pour avoir une surface lisse de la face supérieure de l'éprouvette, cette dernière est arasée à l'aide d'une règle biseautée. Le démoulage se fera 24 heures après la confection du béton. Avant de soumettre les éprouvettes aux essais, ces dernières seront conservées dans un endroit humide (immergées dans l'eau) tel qu'un bac galvanisé rempli d'eau.

-Avant les essais, les éprouvettes seront exposées à l'air libre pendant au moins 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité. Les éprouvettes seront centrées sur le plateau de la presse hydraulique et une charge continue sera appliquée sur l'éprouvette. A la rupture, on effectue la lecture de la charge P.

La résistance à la compression est donnée par la relation suivante.

$$R_c = P / S$$

où :

R_c : Résistance à la compression ;

P : Charge de rupture ;

S : Section de l'éprouvette.

Les essais de résistance à la compression se font à l'âge de 7, 14, 28 jours.

Les résultats sont regroupés aux tableaux 4-5 jusqu'à 4-12.

5-2-4 Détermination de la masse volumique :

On détermine la masse volumique après avoir retiré les éprouvettes des bacs et les laisser à l'air libre 20 minutes pour qu'elles aient une humidité normale. Juste avant l'écrasement aux différents âges on détermine la masse volumique en pesant l'éprouvette. La masse volumique est donnée par la relation suivante:

$$\gamma = M / V$$

où :

M : masse de l'éprouvette ;

V : volume de l'éprouvette .

Les résultats sont regroupés aux tableaux 4-13 jusqu'à 4-20 .



Figure 5.3 : Mode de Conservation des échantillons avant leur écrasement



Figure 5.4 : Sciage des éprouvettes 16 x 32 cm de béton

Tableau 5.3 : Composition (de 1m³) des bétons étudiés à base du sable de dune

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1611,97	332	292,15	2,92	141,76	35,57	0,485
B2	1381,69	442,92	389,77	3,90	142,45	35,25	0,365
B3	1150,85	553,64	487,21	4,87	158,14	28,12	0,325
B4	920,68	664,52	584,78	5,85	177,06	19,52	0,303
B5	690,51	775,11	682,10	6,82	186,098	15,41	0,273

Tableau 5.4 : Composition (de 1m³) des bétons étudiés à base du sable mixte S1

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1612,58	332,5	292,6	2,92	148,5	32,50	0,507
B2	1382,21	443,14	390,14	3,90	157,63	28,35	0,404
B3	1151,84	554,17	487,67	4,88	167,53	23,85	0,344
B4	921,47	665,00	585,20	5,85	175,08	20,42	0,299
B5	691,10	775,83	682,73	6,83	184,12	16,31	0,292

Tableau 5.5 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S2

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1612,58	332,5	292,6	2,92	157,89	28,23	0,539
B2	1382,21	443,14	390,14	3,90	169,11	23,13	0,433
B3	1151,84	554,17	487,67	4,88	177,30	19,41	0,364
B4	921,47	665,00	585,20	5,85	186,29	15,32	0,318
B5	691,10	775,83	682,73	6,83	189,11	14,07	0,277

Tableau 5.6 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S3

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1616,71	333,44	293,43	2,93	156,62	28,81	0,534
B2	1385,75	444,59	391,24	3,91	172,13	21,76	0,440
B3	1154,79	555,73	489,05	4,89	177,83	19,17	0,364
B4	923,83	666,88	586,86	5,87	187,84	14,62	0,320
B5	692,87	778,03	684,67	6,85	191,33	13,03	0,279

Tableau 5.7 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S4

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1615,54	333,17	293,19	2,93	159,02	27,72	0,542
B2	1364,75	444,23	390,92	3,9	182,75	16,93	0,467
B3	1153,96	555,28	488,65	4,9	184,76	16,02	0,378
B4	923,17	666,34	586,38	5,86	189,72	13,74	0,324
B5	692,37	777,40	684,11	6,84	193,56	12,02	0,283

Tableau 5.8 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S5

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1616,70	333,44	293,42	2,93	159,46	27,52	0,543
B2	1385,74	444,59	391,23	3,91	184,95	15,93	0,473
B3	1154,79	555,73	489,03	4,89	186,93	15,03	0,382
B4	923,83	666,88	586,84	5,87	192,19	12,64	0,337
B5	692,87	776,03	684,65	6,85	197,29	10,32	0,288

Tableau 5.9 : Composition (de 1m³) des bétons étudiés à base du sable concassé

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1619,46	334,07	293,98	2,94	188,69	14,23	0,642
B2	1388,11	445,43	391,97	3,92	190,01	13,63	0,521
B3	1156,76	556,78	489,97	4,90	192,57	12,47	0,393
B4	925,41	668,14	587,96	5,88	195,93	10,94	0,333
B5	694,05	779,50	685,95	6,70	199,17	9,47	0,290

Tableau 5.10 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable de dune

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,230	2,251	2,264	2,266
B2	0,87	2,444	2,472	2,489	2,490
B3	0,87	2,377	2,398	2,400	2,420
B4	0,87	2,369	2,396	2,400	2,405
B5	0,87	2,368	2,378	2,383	2,390

Tableau 5.11 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S1

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,160	2,189	2,192	2,202
B2	0,87	2,422	2,421	2,425	2,422
B3	0,87	2,401	2,405	2,409	2,413
B4	0,87	2,323	2,345	2,348	2,349
B5	0,87	2,313	2,316	2,320	2,338

Tableau 5.12 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S2

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,215	2,220	2,228	2,230
B2	0,87	2,412	2,417	2,410	2,415
B3	0,87	2,407	2,406	2,409	2,410
B4	0,87	2,342	2,345	2,346	2,348
B5	0,87	2,327	2,327	2,330	2,332

Tableau 5.13 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S3

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,159	2,215	2,224	2,241
B2	0,87	2,409	2,420	2,434	2,435
B3	0,87	2,404	2,445	2,450	2,452
B4	0,87	2,327	2,340	2,349	2,352
B5	0,87	2,349	2,364	2,366	2,369

Tableau 5.14 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S4

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,335	2,345	2,349	2,354
B2	0,87	2,412	2,428	2,431	2,436
B3	0,88	2,431	2,448	2,450	2,451
B4	0,88	2,363	2,400	2,402	2,405
B5	0,87	2,369	2,391	2,396	2,410

Tableau 5.15 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S5

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,033	2,035	2,121	2,122
B2	0,87	2,410	2,432	2,456	2,456
B3	0,88	2,397	2,414	2,428	2,430
B4	0,87	2,336	2,358	2,364	2,371
B5	0,87	2,376	2,393	2,400	2,400

Tableau 5.16 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable concassé

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,307	2,353	2,354	2,356
B2	0,87	2,391	2,416	2,420	2,421
B3	0,86	2,403	2,421	2,435	2,438
B4	0,86	2,379	2,396	2,408	2,409
B5	0,86	2,379	2,403	2,404	2,407

Tableau 5.17 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable de dune

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	24,05	30,13	36,52
B2	51,23	56,38	64,75
B3	52,00	58,25	62,53
B4	42,12	52,72	60,12
B5	42,08	48,33	51,09

Tableau 5.18 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S1

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	25,54	34,08	38,41
B2	41,42	56,34	68,29
B3	45,22	50,11	58,43
B4	39,76	47,23	56,12
B5	39,54	43,78	51,66

Tableau 5.19 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S2

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	33,65	39,55	52,45
B2	51,78	68,32	84,15
B3	45,31	63,13	73,50
B4	41,48	61,20	67,43
B5	39,56	49,32	63,33

Tableau 5.20 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S3

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	34,18	36,13	48,32
B2	62,05	66,75	81,12
B3	56,5	62,52	73,25
B4	48,18	51,16	62,83
B5	43,25	47	52,25

Tableau 5.21 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S4

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	34,5	40,32	46,25
B2	42,13	60,3	77,75
B3	52,67	62,25	63
B4	43,12	50,75	56,19
B5	40,25	48,02	54,17

Tableau 5.22 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S5

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	28,2	33,12	39,15
B2	51,12	63,5	73,25
B3	48,15	55,38	65,23
B4	35,00	42,37	57,12
B5	31,75	40,3	53,15

Tableau 5.23 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable concassé

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	31,25	35,5	36,25
B2	57,5	59	68,25
B3	55,5	62	62,25
B4	41,15	45,2	53,75
B5	35,5	38,25	39

5-3 Discussion et analyse des résultats:

L'analyse du comportement rhéologique, physique et mécanique des bétons étudiés en fonction du type de sable mixte utilisé et du pourcentage de mortier composant la matrice du béton a donné les résultats représentés aux tableaux ci-dessus, l'analyse des paramètres essentielles du béton à l'état frais (fluidité) et à l'état durci (masse volumique, résistance) est effectuée en fonction de la composition (% de mortier), du sable mixte utilisé ainsi que sa porosité.

5-3-1 Fluidité:

La fluidité ou l'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, l'enrobage des aciers et l'obtention d'un parement brut acceptable qu'il soit dans le plan vertical ou horizontal. [153].

pour un affaissement au cône d'Abrams $f \approx 5$ à 7 cm (fluidité plus au moins constante) , l'analyse de la réduction d'eau de gâchage en fonction du pourcentage du mortier dans le béton et le traitement du sable de dune par le sable concassé (sable mixte) ainsi que la porosité du sable mixte s'avère importante.

5-3-1-1 Réduction d'eau de gâchage :

La quantité d'eau dans le béton, sert pour sa moitié à peut près à l'hydratation du ciment. tandis que l'autre moitié, sous forme d'eau de mouillage et interstitielle confère au béton ses qualités de plasticité et d'ouvrabilité, une partie d'eau pouvant être absorbée par les granulats en fonction de leur plus au moins grande porosité.[153]

a) Réduction d'eau de gâchage en fonction du pourcentage de mortier entrant dans composition du béton :

On analysant les résultats groupés dans les tableaux 5-3 à 5-9, on remarque que la réduction d'eau de gâchage diminue en augmentant le pourcentage de mortier dans la matrice béton (B1, B2, B3, B4, B5) pour tous les sables mixte, cela est du essentiellement au faite que la quantité de ciment devient plus importante dans le béton par la suite plus d'eau pour l'hydratation de cette dernière. La plus grande réduction affiche plus de 35 % pour le béton B1 à base de sable de dune cela s'explique par l'absence des fines (qui absorbent beaucoup d'eau) et la forme sphérique des particules du sable de dune qui diminuent la friction (jouent le rôle de billes) , on note que cette réduction varie de 35,47% à 9,47%.

Enfin on peut conclure que l'augmentation de la quantité de mortier aide à vaincre les forces de cohésion entre les grains de gravier et l'adjuvant lubrifie les grains de ciment, ceux-ci sont défloculés et individualisés, cette dispersion facilite le mouillage et améliore le mode de serrage [31].

b) Réduction d'eau de gâchage en fonction du pourcentage de sable concassé entrant dans composition du béton :

on observant les tableaux 5-3 à 5-9 on constate que le sable concassé par sa nature géométrique (grains anguleux) et son besoin en eau(présence de fines) important baisse la réduction d'eau de gâchage car la cohésion entre les grains augmente et la fluidité diminue et le réarrangement des grains dans la matrice cimentaire devient difficile, à titre d'exemple on note une réduction de plus de 35% pour le béton B1 à base de sable de dune et de 14,23% pour le même béton à base de sable concassé alors plus d'eau pour vaincre la cohésion entre les grains et la présence de fines.

c) Réduction d'eau de gâchage en fonction de la porosité du sable mixte entrant dans composition du béton :

L'analysant, des résultats groupés aux tableaux 5-3 à 5-9, montrent que la réduction d'eau de gâchage n'est pas significative et presque constante et tourne au tour de 27,5% pour le béton B1 (70% de gravier, 30% de mortier) avec n'importe quel sable mixte utilisé, alors l'eau de gâchage utilisée sert plutôt à vaincre la cohésion entre les grains car la quantité de ciment présente dans la composition du béton est faible (donc une faible quantité d'eau suffit pour son hydratation complète), pour les bétons B2, B3, B4 et B5 cette réduction est plutôt significative en augmentant la porosité du sable mixte utilisé, à titre d'exemple pour le béton B2 confectionné avec le sable mixte (S2 de porosité 39%) la réduction d'eau est égale à 23,13% cette réduction passe à 15,93% avec le sable mixte S5 (de porosité égale à 44%) pour le même béton B2 donc les pores entre les grains sont remplis d'eau (la réduction diminue alors).

5-3-1-2 Rapport E/C :

a) Effet du mortier sur le rapport E/C :

L'analyse des résultats figurants aux tableaux 5-3 à 5-9, illustrés à la figure 5-5 nous permet de constater la diminution du rapport E/C pour tous les bétons (B1, B2, B3, B4, B5) confectionnés avec n'importe quel sable mixte cela est dû d'une part à l'effet du MEDAFLOW30 qui sert à lubrifier tous les grains et défloculer les particules de ciment, le mortier à son tour contribue à remplir le vide entre grains, à diminuer et vaincre les forces de cohésion entre les gros grains. On remarque que pour 30% de mortier dans la matrice du béton, on a besoin d'une quantité d'eau de gâchage importante ($E/C = 0,64$) pour vaincre la force de cohésion entre les gros grains (discontinuité du squelette granulaire) afin d'atteindre la fluidité fixée ($f \approx 5$ à 7cm) voir. A 40% de mortier, la cohésion est réduite et la quantité d'eau de gâchage diminue pour tous les sables ; la baisse de E/C se poursuit jusqu'à 60% de mortier dans la matrice de béton (la cohésion est réduite d'avantage) ; alors la continuité du squelette granulaire s'améliore et l'incorporation du MEDAFLOW30 facilite le réarrangement des petits grains entre gros grains, la porosité du mélange (de la matrice béton) est réduite et ainsi la fluidité s'améliore ($E/C \approx 0,30$) ; au-delà de 60% de mortier, le rapport E/C est presque constant (voir figure 5-5). A titre d'exemple on note une diminution du rapport E/C de 0,485 pour le béton B1 à 0,273 pour le béton B5 confectionnés avec le sable de dune, le rapport E/C passe de 0,642 pour le béton B1 à 0,290 pour le béton B5 confectionnés avec le sable concassé.

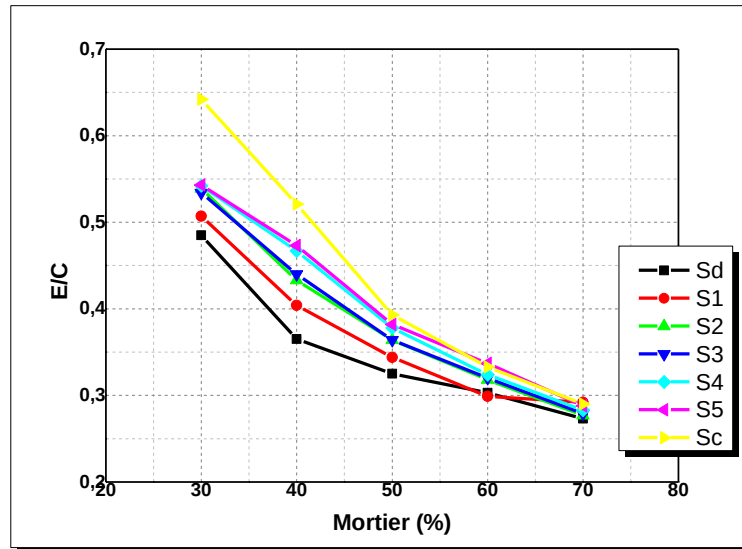


Figure 5.5 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de mortier

b) Effet du sable concassé sur le rapport E/C :

A partir des résultats groupés aux tableaux 5-3 à 5-9 et de la figure 5-6, on constate que l'ajout du sable concassé au sable de dune est généralement engendré par une hausse du rapport E/C pour presque tous les bétons, cela s'explique par le besoin en eau du sable concassé et par la nature anguleuse de ses grains alors l'eau de gâchage augmente et le rapport E/C augmente. A titre d'exemple le rapport E/C passe de 0,642 pour le béton B1 confectionné à base du sable concassé (100% concassé) à 0,485 pour le béton B1 à base de sable de dune (0% sable concassé).

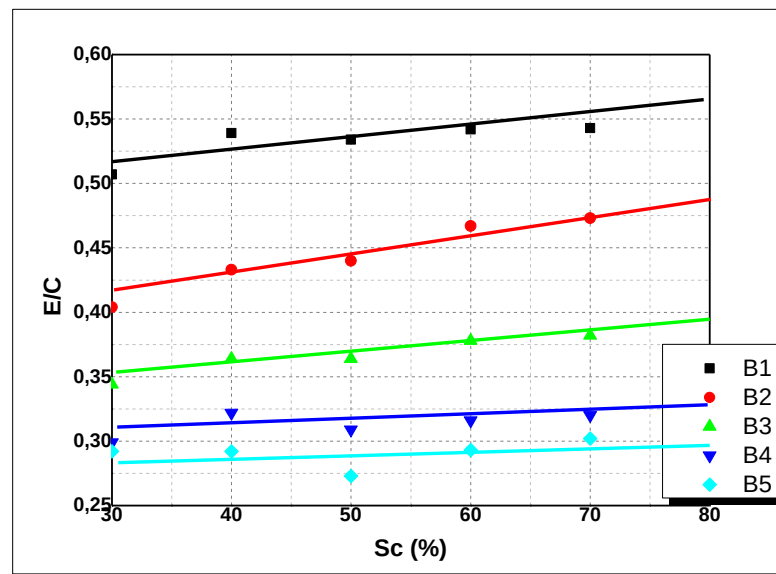


Figure 5.6 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de sable concassé

c) Effet de la porosité du sable mixte sur le rapport E/C :

La figure 5.7 montre que la hausse de la porosité du sable mixte est suivie par une augmentation du rapport E/C pour tous les bétons, les bétons B1 et B2 possèdent une pente plus importante car la porosité de la matrice béton (% de gravier élevé) prime sur la porosité du sable mixte, plus d'eau de gâchage pour vaincre la cohésion entre les gros grains voir photos 1, 2, 3, 4, 5.

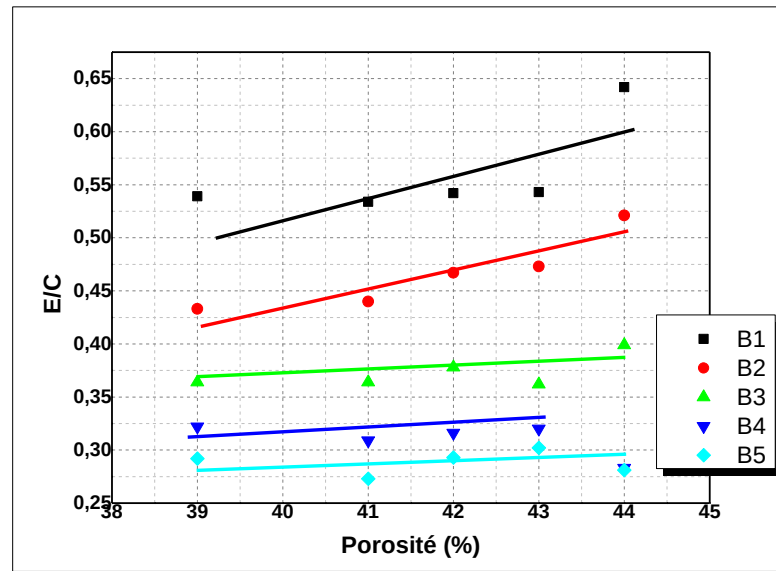


Figure 5.7 : Rapport E/C en fonction de la porosité du sable mixte

5-3-2 Résistance mécanique :

Le béton résiste le mieux à la compression et cet indice sert de caractéristique principale des propriétés mécanique des bétons. Pour cette raison on ne s'intéresse qu'à l'étude du comportement du béton à la compression.

Dans cette analyse on a jugé nécessaire de constater et de commenter les résultats obtenus en cinq parties :

- Effet du mortier sur la résistance du béton à la compression (R_c).
- Effet du sable mixte sur la résistance du béton à la compression (R_c).
- Effet de la porosité du sable mixte sur la résistance du béton à la compression (R_c).
- Evolution de la résistance du béton à la compression (R_c) dans le temps .

a) Effet du mortier sur la résistance du béton à la compression (R_c):

D'après la figure 5-8, on remarque qu'à 30% de mortier dans la matrice de béton (béton maigre), la résistance affiche sa plus faible valeur pour tous les bétons avec n'importe quel

sable mixte utilisé. La résistance maximale à 30% de mortier est obtenue pour le béton à base de sable mixte S4 ($R_c = 46,25\text{Mpa}$). A 40% de mortier dans la matrice béton, la résistance est optimale pour les bétons B2 pour n'importe quel sable mixte utilisé ; à titre d'exemple, la résistance maximale ($R_c = 84,15\text{Mpa}$) est obtenue en utilisant le sable mixte S2. Au-delà de 40% de mortier tous les bétons affichent une perte graduelle de résistance. Pour 70% de mortier, dans la matrice du béton (béton gras), on remarque que tous les bétons avec n'importe quel sable mixte affichent une baisse de résistance qui atteint presque 35%, cette baisse est due essentiellement à la quantité d'eau de gâchage pour l'hydratation du ciment, donc un rapport E/C important et au manque de gros granulats (faiblesse du squelette granulaire) qui engendrent une baisse de résistance du béton.

Remarque : La quantité de mortier composant la matrice du béton influe sur la compacité de cette dernière qui est l'un des facteurs essentiels qui détermine la résistance du béton, ce qui est bien illustré sur les photos 1, 2, 3,4.

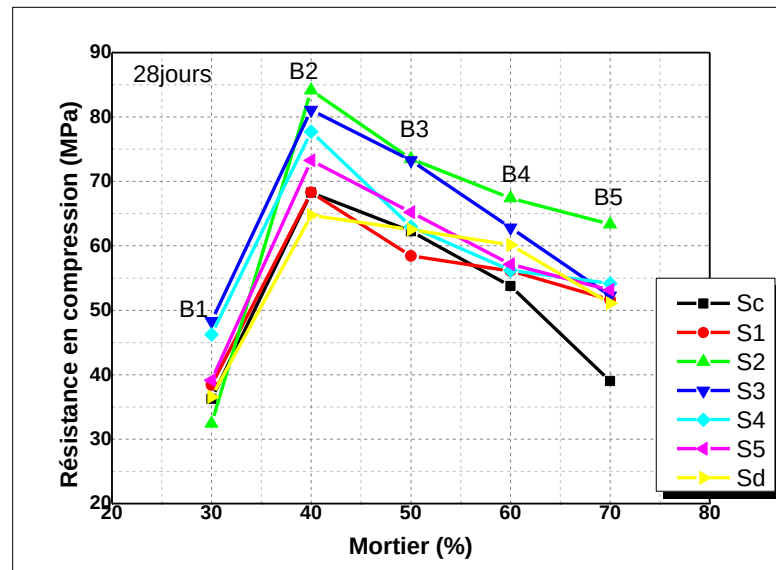


Figure 5.8 :Rc en fonction du mortier à 28j

b) Effet du sable mixte sur la résistance du béton (R_c):

D'après les résultats groupés aux tableaux 5.17 à 5.23 représentés sur la figure 5-9, on constate que 40% d'ajout de sable concassé permet d'obtenir la résistance optimale pour les bétons **B2, B3, B4 et B5** ; au delà de 50% d'ajout, la résistance des bétons **B2, B3, B4 et B5** affiche une baisse qui atteint 27,84%, 13,88%,16,7 et 14,46% respectivement à un ajout de 60% de sable concassé, cela est du essentiellement à la présence de fine et à la force de cohésion des grains(géométrie et état de surface des grains). Par contre, le béton maigre **B1** (30% de mortier) affiche une résistance optimale de 48,32 Mpa à 50% d'ajout de sable concassé au-delà de 50% d'ajout on note une baisse de résistance sa résistance; en

augmentant le pourcentage de sable concassé à 70%, le béton **B1** perd plus de 18% de sa résistance.

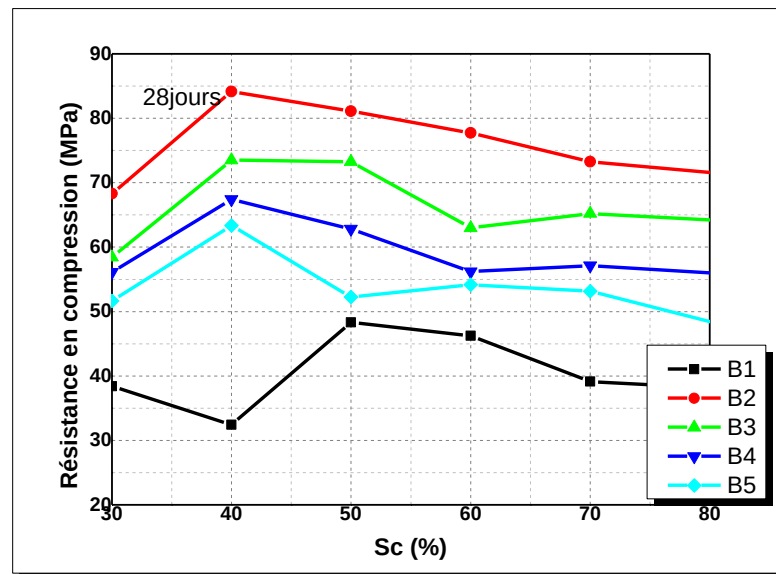


Figure 5.9 :Rc en fonction du sable mixte à 28j

c) Effet de la porosité du sable mixte sur la résistance (Rc) du béton :

La figure 5-10, montre que pour une porosité du sable mixte de 39 %, les bétons **B1, B2, B3, B4 et B5** affichent leurs meilleures performances, on constate que la hausse de la porosité du sable mixte influe significativement sur la baisse de la résistance des bétons (**B1, B2, B3, B4, et B5**) , à titre d'exemple la résistance accuse une baisse de plus de 38% ,du béton B5 à l'âge de 28 jours en passant d'une porosité de 39% à 44% , on remarque que la baisse de la résistance en compression des bétons (**B1, B2, B3, B4 et B5**) est presque identique en regardant les pentes des droites représentant cette baisse pour tous les bétons cela est dû principalement à la géométrie et l'état de surface des grains qui engendrent une cohésion entre les grains et la présence de fines dans le sable mixte.

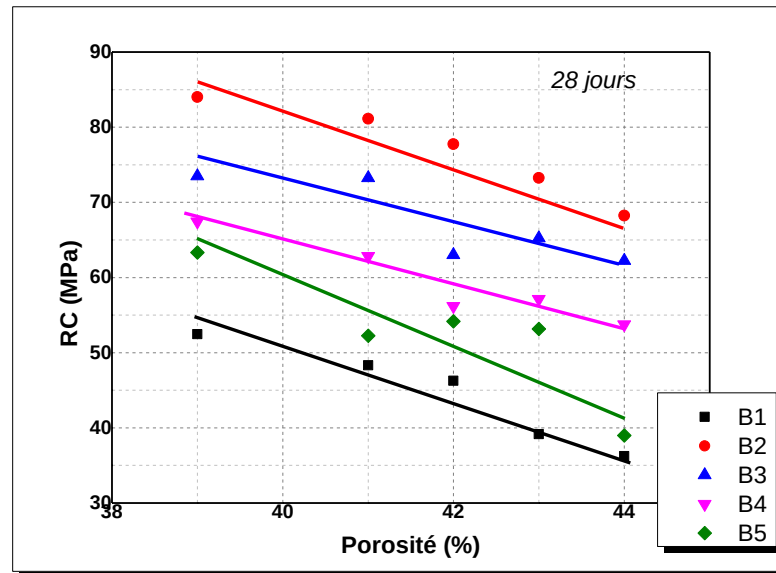


Figure 5.10 :Rc en fonction de la porosité à 28j

d) Evolution de la résistance du béton à la compression (Rc) dans le temps .

Pour l'analyse de l'accroissement de la résistance à la compression dans le temps, on a tracer les courbes représentant la résistance des bétons (B1, B2, B3, B4, B5) pour différents sables mixtes en fonction du temps vu la similitudes des courbes on represnte la variation de rc dans le temps avec des bétons à base du sable mixte S2 les autres figures sont exposée dans l'annexe. Ces figures montrent clairement que l'accroissement de Rc dans le temps a une forme hyperbolique. Cet accroissement est nettement plus rapide dans l'intervalle (0 - 7 jours) que dans l'intervalle (7 - 28 jours). [64]

D'après les courbes donnant la variation de la résistance à la compression dans le temps, on constate que Rc augmente au cours du temps quelque soit le type de sable mixte et la composition du béton utilisé dans cette recherche.

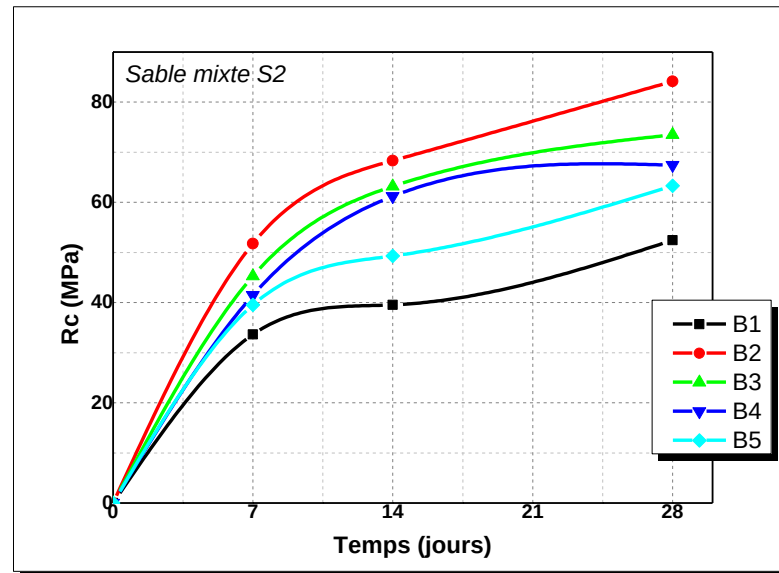


Figure 5.11 : Rc dans le temps avec sable mixte S2,

5-3-3 Masse volumique :

L'analyse des résultats exposés aux tableaux 5-10 jusqu'à 5-16 est effectuée comme suite :

- Effet du mortier (composition) ;
- Effet du sable mixte ;
- Effet de la porosité du sable mixte ;
- Evolution de la masse volumique dans le temps.

a) Effet du mortier (composition) sur la masse volumique :

En examinant avec attention les résultats exposés aux tableaux 5-10 à 5-16 et illustrés à la figure 5.12, on remarque qu'à 30% de mortier entrant dans la composition du béton la masse volumique affiche sa plus faible valeur pour tous les bétons (B1, B2, B3, B4, B5) à différents âges 1j, 7j, 14j, et 28 jours, à 40% de mortier la masse volumique affiche sa valeur optimale pour tous les bétons, au-delà de 40% de mortier la masse volumique affiche une baisse graduelle jusqu'à 70% de mortier. On note que la valeur optimale est obtenue avec la composition de 40% de mortier et 60% de gravier cela s'explique par le remplissage de presque tous les vides (porosité minimale de la matrice cimentaire avec les constituants utilisés).

En conclusion, 40% de mortier dans la matrice du béton conduit au remplissage des vides entre gros grains (gravier) et la masse volumique atteint sa valeur maximale de $2,49 \text{ g/cm}^3$.

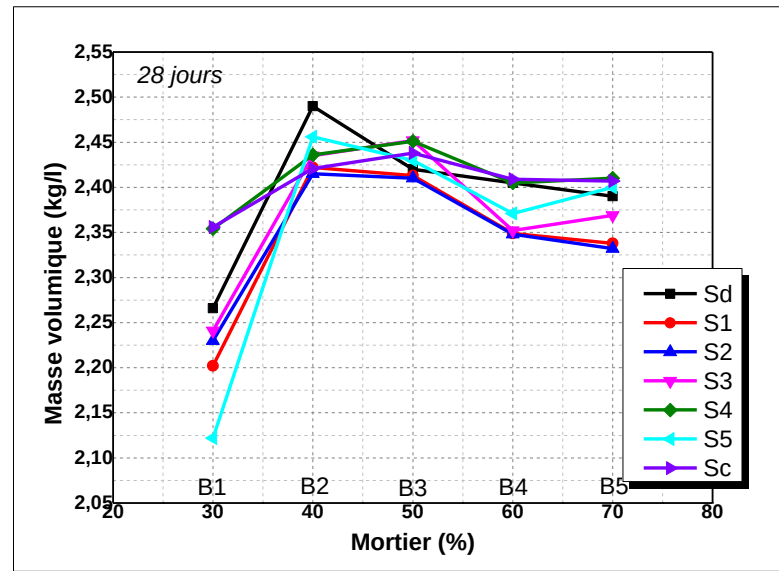


Figure 5.12 : Masse volumique à 28Jours en fonction pourcentage de mortier

b) Effet du sable mixte sur la masse volumique :

D'après les résultats trouvés et exposés aux tableaux 5-10 à 5-16 et représentés sur la figure 5.13, on constate une légère hausse de la masse volumique quand on augmente le pourcentage du sable concassé dans le sable mixte, cette hausse n'est pas très grande, elle est expliquée par l'amélioration de la compacité du sable mixte qui conduit à l'amélioration de la compacité des bétons (B1, B2, B3, B5) et par la suite l'amélioration de leurs masse volumique, on conclut alors que le traitement du sable de dune par sable concassé a contribué à l'amélioration des masses volumiques des bétons étudiés.

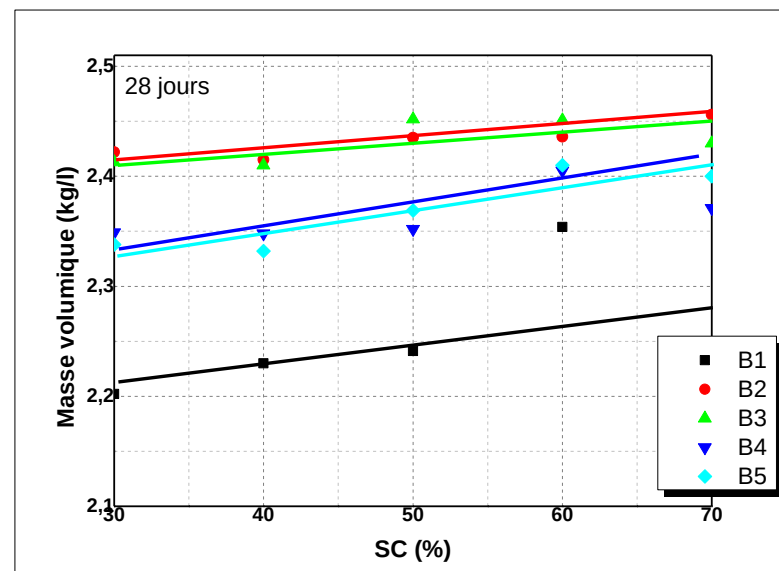


Figure 5.13 : Masse volumique à 28 Jours en fonction du sable mixte

c) Effet de la porosité du sable mixte sur la masse volumique :

En examinant, la figure 5.14, on remarque que l'utilisation du sable mixte de porosité plus grande apporte une amélioration de la masse volumique des bétons (B2, B3, B4, B5), cette amélioration est plus significative pour les bétons (B2 et B3) que pour les bétons (B4 et B5), cela est expliqué par l'arrangement des fines (apporter par le sable concassé) et des grains de ciment dans les pores entre les grains de sable mixte, ce qui conduit à une meilleure compacité du béton.

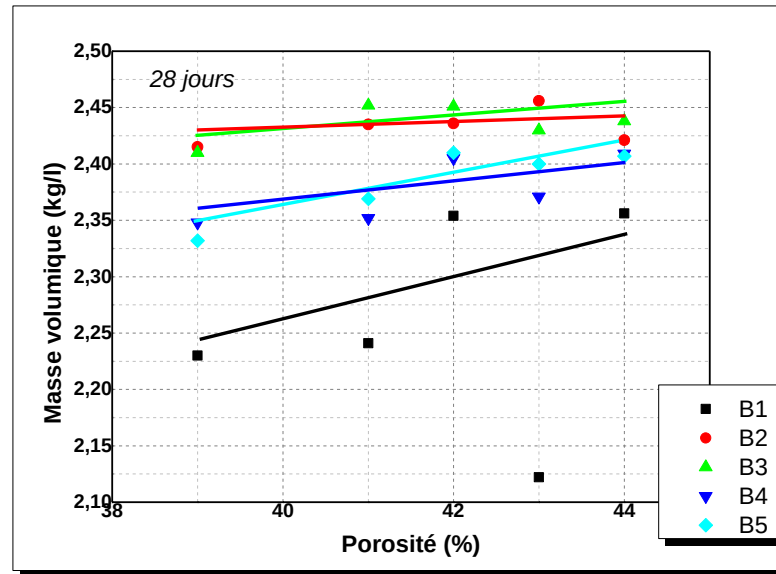


Figure 5.14 : Masse volumique à 28Jours en fonction de la porosité du sable mixte

d) Evolution de la masse volumique dans le temps :

On remarque que la masse volumique augmente légèrement pour tous les bétons étudiés (B1, B2, B3, B4, B5) avec n'importe quel sable mixte utilisé au cours du temps et aussi en augmentant le pourcentage du mortier dans la composition du béton et cela est dû essentiellement à l'hydratation et à l'absorption. Cette augmentation, malgré qu'elle soit faible, elle reste toujours significative.

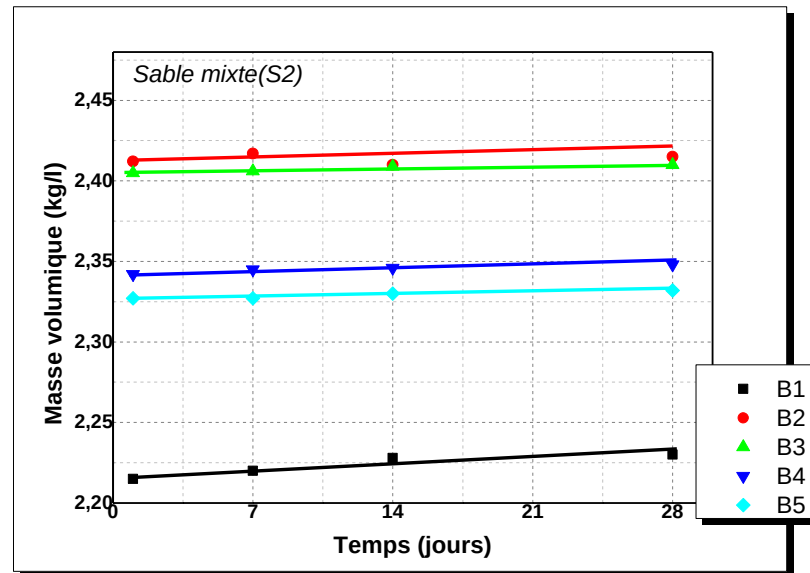


Figure 5.15 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S2

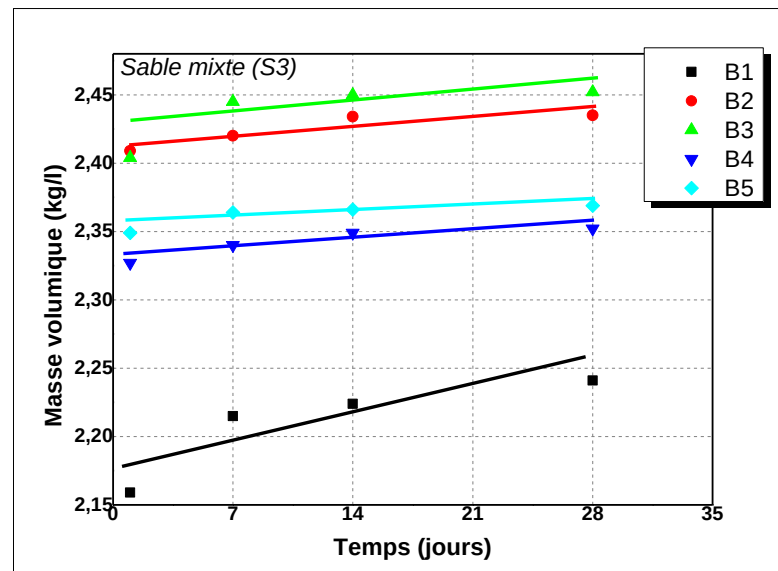


Figure 5.16 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S3

Coupe par sciage des éprouvettes cylindriques donnant la distribution des constituants du béton

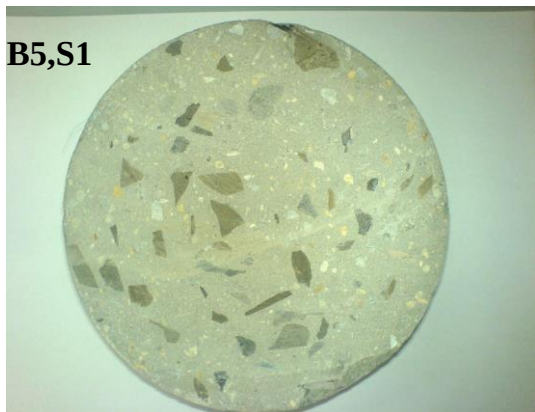
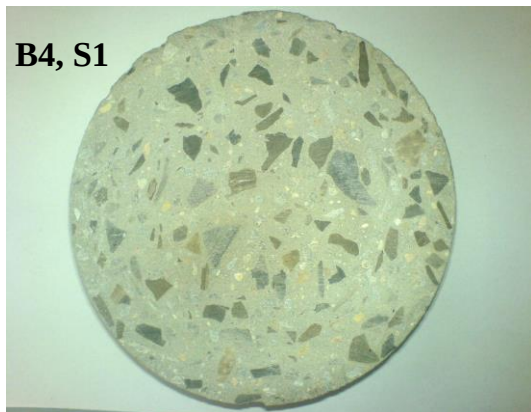


Photo1:(70%mortier,30%gravier)



Poto2:(60% mortier,40%gravier)

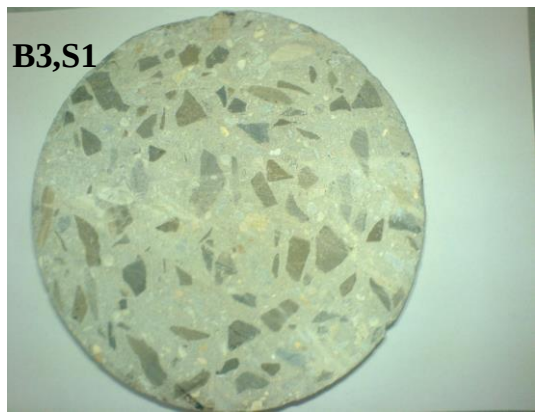
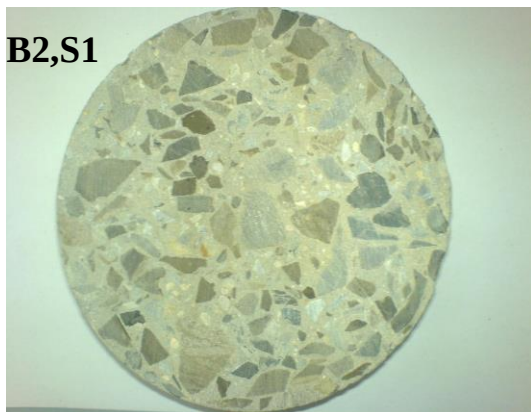
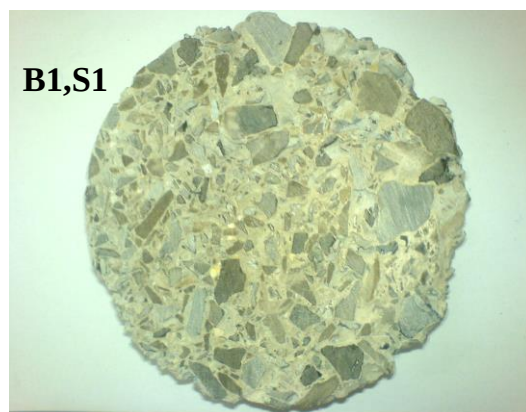


Photo3:(50%mortier,50%gravier)



Poto4:(40% mortier,60%gravier)



Poto5:(30% mortier,70%gravier)

5-4 Conclusion :

L'utilisation du sable concassé (déchets en grandes quantités issus du concassage de pierres) permet de dégager et de diminuer les aires de stockage dans les centrales de concassages, à la lutte contre la pollution de l'environnement et à la valorisation de ces déchets.

L'étude expérimentale du comportement physico-mécanique du béton à base de sable mixte (sable dunaire + sable calcaire de concassage) montre que l'ajout du sable concassé au sable de dune pour la fabrication des bétons est vivement recommandé surtout s'ils sont associés à des adjuvants ; tout cela nous permet d'avancer certaines conclusions:

- ✓ La masse volumique du béton accuse une légère baisse en augmentant le pourcentage de sable concassé.
- ✓ La masse volumique atteint une valeur maximale en utilisant 40% de mortier dans la matrice béton.
- ✓ Une légère baisse de la masse volumique est enregistrée quand la porosité du sable mixte augmente.
- ✓ L'augmentation du pourcentage de sable concassé engendre une augmentation de la quantité d'eau de gâchage.
- ✓ L'augmentation du pourcentage de mortier dans la matrice béton est accompagnée d'une réduction de l'eau de gâchage.
- ✓ L'utilisation du sable de carrière (sable concassé) améliore la résistance en compression du béton.
- ✓ L'utilisation de 50% de sable concassé dans la composition du sable mixte permet d'obtenir une amélioration appréciable de la résistance en compression du béton atteignant une valeur de 70 à 80 Mpa pour les bétons B3 et B4.
- ✓ L'utilisation de 50% à 70% de mortier dans la matrice de béton permet de réaliser des bétons de qualité.
- ✓ L'utilisation d'un adjuvant super plastifiant permet une réduction importante de l'eau de gâchage qui conduit à une baisse de la porosité de la matrice béton, permettant ainsi de réaliser des bétons performants.

CONCLUSIONS GENERALES

ET PERSPECTIVES

De nombreuses études se sont intéressées à la recherche de voies alternatives à l'utilisation des ressources alluvionnaires en voie d'épuisement, notamment les sables alluvionnaires, pour la fabrication des bétons hydrauliques. Parmi les solutions proposées, l'emploi des sables calcaires de concassage est souvent recommandé. Cependant, dans les pays de Maghreb, en Algérie notamment, leur utilisation est jusqu'à présent écartée quasi systématiquement de tout usage dans le bâtiment et les ouvrages d'art, malgré les avantages économiques et environnementaux que cette solution peut présenter. Notons que les spécifications normatives autorisent leur utilisation.

Cette situation résulte essentiellement de l'absence de références scientifiques fiables à l'échelle du pays, et d'un manque d'exemples de réalisation d'ouvrages de références pouvant convaincre les maîtres d'ouvrages et les entreprises.

Dans ce contexte, on a entamer une recherche dans le but de solutionner le problème (qui se posera dans les prochaines années) de la pénurie des sables alluvionnaires pour la réalisation des mortiers et bétons, par l'utilisation des sables calcaires de concassage et d'encourager les entrepreneurs et les maîtres d'ouvrages à utiliser ces ressources, et contribuer à lutter contre la pollution issue de ces déchets de carrières et préserver la nature et encourager d'autres chercheurs à travailler dans cette axe qui aboutira à la réalisation d'un manuel technique dédié à la généralisation de l'emploi des sables calcaires dans les différents domaines de la construction.

Les travaux de cette thèse concourent à ces objectifs. Ils s'intéressent plus particulièrement à la faisabilité de mortiers et bétons ordinaires ou superplastifiés, fabriqués rationnellement à partir de gravillons et une mixture de sable de dune et de sable de concassage calcaires. Sept sables mixtes sont élaborés à partir du sable concassé de la carrière d'El-Uche et du sable de dune de Boussaâda qui ont permis de corriger la granulométrie, améliorer les caractéristiques physiques du sable de dune et du sable de concassage afin de réaliser sept mortiers équivalents au béton avec adjuvant et sans adjuvant qui permettent de prédire de nombreuses propriétés des bétons. La formulation des différents bétons avec différentes compositions avec les différents sables mixtes a été réalisée, afin d'améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques de ce dernier.

Les mélanges ainsi réalisés ont servi à étudier en vraie grandeur, sur des mortiers et sur des bétons, l'influence de la porosité, du taux de sables concassés composant le sable mixte et la composition (taux de mortier composant la matrice cimentaire) sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles des mortiers et des bétons. Ils ont confirmé la parfaite faisabilité des bétons et des mortiers ordinaires et

superplastifiés. Les résultats obtenus montrent que les fines calcaires apportés par le sable concassé sont bénéfiques à l'amélioration des propriétés à l'état frais et durci des mortiers et des bétons. Par exemple, par la substitution de 40% à 50% de sable de dune par sable concassé permet l'amélioration des performances du mortier avec ou sans superplastifiant, les résistances optimales ont atteint 72,5MPa et 60MPa respectivement, au-delà de 50% de substitution on note une légère baisse des résistances. Pour les bétons adjuvantés, une composition de 40% de mortier (avec la substitution de 40% de sable de dune par sable concassé) et 60% de gravier donne la meilleure performance. La résistance en compression optimale R_c atteint une valeur de 84,5MPa. Au-delà de 40% de mortier composant la matrice du béton on note une baisse concomitante de la compacité qui se répercute sur la résistance du béton.

Compte tenu des quantités de sables généralement utilisées dans les bétons et mortiers courants ou superplastifiés, toutes les catégories normatives des sables de concassage peuvent alors être utilisées a priori, sous réserve toutefois de satisfaire aux autres exigences de qualité/propreté/durabilité.

Les sable mixtes ont donnés des résultats satisfaisant, les sables mixte S2, S3 sont les plus intéressantes et permettent d'optimiser les propriétés des mortiers et des bétons. Ce résultat constitue une voie nouvelle et économique pour le développement de ces nouveaux bétons et mortiers, en valorisant des sables concassés (déchets) souvent déclassés afin de se préparer à une future pénurie de sable de dune.

Par ailleurs, les présents travaux ont montré que les propriétés mécaniques des bétons à base de sables mixte avec superplastifiant ne sont pas réellement affectées par la présence d'une quantité de filler. Ce résultat est attribué au rapprochement du comportement mécanique du sable mixte et de la pâte chargée en fillers, qui rend ainsi le composite plus homogène mécaniquement. La liaison pâte-granulat, qui est souvent une zone de faiblesse, est alors améliorée. L'effet néfaste du surcroît d'eau est corrigé par l'incorporation de superplastifiant MEDADLOW 30.

Les présents travaux ont montrer le grand intérêt de l'utilisation des déchets issus de la fabrication des granulats calcaire à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sable mixte et des caractéristiques rhéologiques et mécaniques du mortier et du béton avec ou sans superplastifiant..

Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives. La plus importante concerne sans doute l'élaboration des matériaux concassés. Cette voie s'inscrit pleinement dans le concept développement durable et de protection de l'environnement, car elle constitue une réelle solution alternative à la surexploitation et à l'épuisement de ressources alluvionnaires surexploités.

Enfin, d'autres futurs travaux de recherche menés dans l'esprit de la présente démarche apporteraient des résultats complémentaires à ceux obtenus ici. L'ensemble de ces éléments serviraient alors à encouragé et substituer le sable de dune et préserver l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Çelik T., Marar T., 1996, Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, Cement and Concrete Research, Vol 26, N°7, 1996, 1121-1130.
- [2]: Mahzuz HMA, Ahmed AAM, Yusuf MA, 2011. Use of stone powder in concrete and mortar as an alternative of sand, African Journal of Environmental Science and Technology, 5, 381-8.
- [3]: Kim JK, 1997. The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete, Journal of Cement and Concrete Research, () 1719-29.
- [4]: Bederina M, Makhloufi Z, Bounoua A, Bouziani T, Queneudec M, 2013. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, Construction and Building Materials, 47 146-58.
- [5]: Menadi B, Kenai S, Khatib J, Aït-Mokhtar A, 2009. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, Construction and Building Materials, 625-633.
- [6]: Rajput SPS, Chauhan MS, 2014. Suitability of Crushed Stone Dust as Fine Aggregate in Mortars, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 87-94.
- [7]: Haque M, Ray S, Mahzuz HMA, 2012. Use of Stone Powder with Sand in Concrete and Mortar: A Waste Utilization Approach, ARPN Journal of Science and Technology, 613-618.
- [8]: Narasimha C, Atil BT, Sanni SH, 1999. Performance of concrete with quarry dust as fine aggregate - An experimental study, Civil Engineering and Construction Review, 12, 19-24.
- [9]: Dordi CM, Tendulkar MT, 1996. Aggregate for mortar and concrete, The Indian Concrete Journal, 269-76.
- [10]: Safiuddin M, Raman SN, Zain MFN, 2007. Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures, Journal of Applied Sciences Research, 3, 202-8.
- [11]: Praveen KK, Krishna R, 2015. Strength and workability of cement mortar with manufactured sand, International Journal of Research in Engineering and Technology, 186-9.
- [12]: Vijayaraghavan N, Wayal AS, 2013. Effect of manufactured sand on durability properties of concrete, American journal of engineering Research, 2, 437-440.
- [13]: Cabrera OA, Traversa LP, Ortega NF, 2011. Effect of crushed sand on mortar and concrete rheology, Materiales de Construcción, 61, 401-416.

- [14]: **Cortes DD, Kim HK, Palomino AM, Santamarina JC, 2008.** Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands, Cement and Concrete Research, 38, 1142-7.
- [15] : **F. Gorisse.** Essai et contrôle des bétons, Paris, 1985.
- [16] : **Georges Dreux.** Nouveau guide du béton , Eyrolles , Paris 1979
- [17]: **Abo-El-Enein SA, El-Sayed HA, Ali AH, Mohammed YT, Khater HM, Ouda AS., 2014.** Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume, HBRC Journal, 10, 43-8.
- [18]: **Omar OM, Abdelhameed GD, Sherif MA, Mohamadien HA, 2012.** Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties, HBRC Journal, 8, 193-203.
- [19]: **Jadhav PA, Kulkarni DK, 2013.** Effect of replacement of natural sand by manufactured sand on the properties of cement mortar, International Journal of Civil and Structural Engineering, 3, 621-8.
- [20] : **A. Kômar.** Matériaux et éléments de construction, Moscow, 1978.
- [21] : **V.S. Kolokolnikov.** Technologie des éléments en béton et béton armé, Moscow, 1970.
- [22] : **V. Savary.** Technologie de maçonnerie, paris, 1976.
- [23] : **R. La croix, A. Fuents, H. Thosier.** Traité du béton armé, Eyrolles , Paris 1982.
- [24] : **C.E. Wuerpel, 1944.** Aggregates for concrete (Washington, national Sand and Gravel Assoc.,).
- [25] : **ASTM standard,** C 33-78.
- [26] : **Techniques de l'ingénieur.** Traité de construction, C 902-1.
- [27] : **M. Xigherovich.** Matériaux de construction, Moscow, 1970.
- [28] : **B. Xkramtaev.** Détermination de la composition des bétons de différentes sortes, Moscow, 1970.
- [29] : **J. Berar, R. Roux.** Le rôle de granulats, revue canadienne du genie-civil, Vol 13, N°01, Quebec, 1986.
- [30] : **W.C. Hanna.** Additionnal information on inhibiting alkali-aggregate expansion. J. Amer. concrete inst., 48 , 1952.
- [31] : **M. Venuat.** La pratique des ciments et des bétons, Eyrolles, Paris, 1976.
- [32] : **Bernard Debuissou.** Encyclopédie pratique de la construction, Tome II, Paris, 1968.
- [33] : **Vu Han.** Matériaux de construction, Chine, 1963.

- [34] : **Kedjour Nasr-Eddine**. Propriétés et pathologie du béton O.P.U , Alger, 1993.
- [35] : **N.T. Tuyen**. Matériaux de construction, Hanoï, 1965.
- [36] : **G. Gortchakov,1976**. Composition, structure et propriétés des bétons à ciment, Moscow,
- [38] : **Granitex**. Fiche technique des adjuvants, Alger.
- [40] : **D.L. Bloem**. Preliminary tests of sugar on strenght of mortar, Nat. Ready-mixed concr. Assoc.Public. (Washington D.C, August 1959).
- [41] : **M.E. Prior and A.B. Adams**. ntroduction to producer's papers on water reducing admixtures and set-retarding admixtures for concrete, ASTM, sp. tech.Public N°266, 1960.
- [42] : **C.A. Vollick**. Effect of water reducing admixtures and setoretarding admixtures on the properties of concrete .
- [43] : **D.W. Quinion**. Superplasticizers in concrete - a review of international experience of long-term reliability, CIRIA report 62, London , 1976.
- [44] : **Concrete society**. Admixtures for concrete, technical report, London, 1967.
- [45] : **ACI committie 212**. Guide for use of admixtures in concrete, J.Amer. concr. inst, 68, N° 9, 1971.
- [46] : **V.M. Malhatra**. Superplasticizers in concrete, CANMET report MRP/MSL 77-213, Ottawa, Canada, 1977.
- [47] : **M.V. Ranga Rao**. Investigation of admixtures for high errly strength in concrete, Indian concrete, J. 50 , N°9, 1976.
- [48] : **V.M. Malhatra, 1979**. Mechanical properties and durability of superplasticized semi-light weight concrete, CANMET mineral sciences laboratory Report MPR/MSL 79-131, Ottawa, Canada,.
- [49] : **M. Xigherovich**. Adjuvants pour les bétons et mortiers, Moscow, 1971.
- [50] : **Presse de l'école national des ponts et chaussées LCPC** : «béton de sable ; caractéristiques et pratique» P237, 1994.
- [51] : **CHAUVIN.J.J.,:** «Les sables, guide pratique d'utilisation routière» ; Laboratoire régional de Bordeaux, centre d'étude technique de l'équipement du sud-ouest P(7-14), 1970.
- [52] : **R.S. Warshney**. Concrete technology, New Delhi, 1980.
- [53] : **de Larrard F., 2000**, Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.

- [54] : **V.P. Sizov**. Le projet de la composition du béton, Moscow, 1968.
- [55] : **L.I. Dvopkin, 1981..** Optimisation de la détermination de la composition du béton, Moscow,
- [56] : **Iy.M. Bajenov, 1975.** Le principe de la détermination de la composition du béton de différentes sortes, Moscow.
- [57] : **A.V. Satalin, 1962..** Détermination de la composition du béton d'après la résistance à la flexion, Moscow,
- [58] : **N.T. Tuyen, 1983.** Essais des matériaux de construction (Manuel didactique) Tome I, Hanoi,.
- [59] : **N.T. Tuyen, 1994.** Cours des matériaux de construction C.U Med Boudiaf M'Sila,.
- [60] : **H. Renaud, 1978.** Technologie du bâtiment gros oeuvre travaux de maçonnerie et finition, Foucher, Paris.
- [61] : **NF EN 206-1 (avril 2004) : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité + Amendement A1 (avril 2005) + Amendement A2 (octobre 2005) (Indice de classement : P18-325-1).**
- [62] : **M. Khigerovich.** Matériaux de construction, Moscow, 1970.
- [63] : **Taylor H.F.W.** « Cement chemistry ». Academic press, 1997, 475 p;
- [64] : **Baron J., Olivier J.P. et Weiss J.C.** « Les ciments courants ». In : Les bétons. Bases et données pour leur formulation. Editions Eyrolles, 1997;
- [65] : **Bertrand R., Coquillat G., 1992,** Les calcaires dans les bétons hydrauliques, CEBTP, pp. 6-13.
- [66] : **Buil M., Paillere A., 1984,** Utilisation des fillers fins dans les bétons, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur, N°30, Paris, pp 193-196.
- [67] : **Cimilli T., 1984,** Influence de la teneur en éléments fins sur les propriétés des bétons, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur, N°30, Paris, pp 199-201.
- [68] : **Bachiorrini A., Murat M., 1987,** Evolution microstructurale des composites du système ciment alumineux-granulat calcaire. II. Influence sur la porosité et les résistances mécaniques, Cement and Concrete Research, Vol 17, pp.397-403.
- [69] : **Detwiler R.J., Tennis P., 1996),** The use of Limestone in Portland Cement : A state of the Art Review, Portland Cement Association, RP 118, 39 p., Skokie, IL.
- [70] : **Çelik T., Marar T., 1996,** Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, Cement and Concrete Research, Vol 26, N°7, 1996, 1121-1130.

- [71]: **Sadhouari F., Goufi N., Guezzouli A., 2009**, Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons, 1st International Conference SBEIDCO, ENSET Oran, 247-254.
- [72]: **Guemmadi Z., Resheidat M., Houari H., Toumi B., 2008**, A better use of limestone filler in concrete, International Conference on Construction and Building Technology, ICCBT, 307-318.
- [73]: **N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis, S. Tsivilis, 2005**, Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cement,. Cement and Concrete Composites, 27, pp.191–196.
- [74]: **Courard L., Michel F., Martin M., 2008**, Valorisation des fillers calcaires dans la construction et le génie civil, Reflexions, le site de vulgarisation de l'Université de Liège.
- [75]: **Dale P. Bentz, Edgardo F. Irassar, Brooks Bucher, W. Jason Weiss, 2009**, Limestone Fillers to Conserve Cement in Low w/cm Concretes: An Analysis Based on Powers' Model, Concrete International, 31 (11) and (12), 41-46 and 35-39.
- [76]: **Bentz, D.P., and Peltz, M.A., 2008**, Reducing Thermal and Autogenous Shrinkage Contributions to Early-Age Cracking, ACI Materials Journal, 105 (4), 414-420.
- [77]: **Bucher, B., 2009**, Shrinkage and Cracking and its Relation to Cement Composition, MSCE Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
- [78]: **Bosiljkov V.B., 2003**, SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, Cement and Concrete Research, 33, 1279–1286.
- [79]: **Felekoglu B., 2006**, A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 1-9.
- [80]: **Felekoglu B., 2007**, Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources, Conservation and Recycling, 1-22.
- [81]: **Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus, Yoon-moon Chun, Fethullah Canpolat, Bruce W. Ramme, 2005**, Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete, Three-Day International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, October 5-7, Toronto, CANADA.
- [82]: **El Hilali A., 2009**, Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants BAP : influence des fines calcaires et des fibres végétales, thèse de l'Université Cergy-Pontoise, 200p.
- [83]: **Donza H., Cabrera O., Irassar E.F., 2002**, High-strength concrete with different fine aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 755-761.
- [84]: **Added M., Bedday A., 2003**, Propriétés géotechniques des sables calcaires de concassage en Tunisie, Annales de l'Equipement, volume XIII-N°2, pp 7-31.
- [85]: **Bedday A., 2000**, Etude du sable calcaire de concassage et son utilisation dans le béton hydraulique, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 205p.

- [86]: **Added M., 2005**, Impact de la qualité des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 175 p.
- [87]: **Akrout K., Mounaga P., Ltifi M., Ben Jemaa N., 2010**, Rheological mechanical and structural performances of crushed limestone sand concrete, International Journal of Concrete structures and materials, Vol.4, N°2, 97-104.
- [88]: **Achour T., 2007**, Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens, thèse ENIT Tunis / UHP Nancy, 208 p.
- [89]: **Achour T., Lecomte A., Ben Ouezdou M., Mensi R., Joudi I., 2008**, Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granat. Exemples tunisiens, Materials and structures, 41, 815-830.
- [90]: **Rmili A., 2010**, Étude de formulation et de comportement des bétons autoplacants : Incorporation du sable de concassage et du sable de désert, Thèse ENIT, 226 p.
- [91] : **Folliot A., 1982**, « Le ciment ». In : Le béton hydraulique. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées.
- [92] : **Houst Y.F., 1992**, « Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie ». Thèse de Doctorat, Université de Lausanne
- [93]: **Teoreanu I., Filot G., Hritcu C., 1979**, « Interaction Mechanism of $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ and $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ with water at various »;
- [94]: **Colleparidi M., Monosi S., Moricani A and Corradi M., 1979**. « Tetracalcium aluminoferrite hydration in the presence of lime and gypsum ». cem, concr, Res; 9, 431-437;
- [95]: **Baroghel V-B. , 1994**, « Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées;
- [96]: **Ollivier J-P., Vichot A., (sous la direction de), Décembre 2008** « La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement »;
- [97]: **Damidot D., Glasser F.P.** « Investigation of the $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system at 25 °C by thermodynamic calculations ». Cement and Concrete Research, vol. 25 n° 1, 1995, p. 22-28;
- [98]: **Gauffinet S., Finot E., Lesniewska E., Nonat A.** « Observation directe de la croissance d'hydrosilicate de calcium sur des surfaces d'alite et de silice microscopie à force atomique ». C.R. de l'Académie des Sciences, vol. 327, n° 4, 1998, p. 231-236;
- [99] : **Plassais A.** 2003, « Nanoporosité, Texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments » Thèse de doctorat en physique et chimie des matériaux de l'Université de Paris 6.

- [100]: **Diamond S. 1986**, «The microstructure of cement paste in concrete» In: Proceedings of the 8th International Congress on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, 1986, sous-thème 2.2: Microstructure of hardened cement paste and its effect on behaviour. Finep, Rio de Janeiro, vol.1, pp122-147;
- [101]: **Kantro D.L., Brunauer S., 1961**, Weise C.H. « Development of surface in the hydration of calcium silicates”. Advances in chemistry series, p. 199-219;
- [102]: **Greenberg J.A., Chang T.N., Anderson E. 1960**, « Investigation of colloidal hydrated calcium silicates”, I) Solubility products. Journal of American, Chemical Society, vol. 61, p. 1151-1157;
- [103] : **Regourd M., Hornain H.** « Applications de la microscopie électronique à balayage ». Revue des matériaux de construction, n° 693, 1975, p. 73-87;
- [104]: **Damidot D., Glasser F.P. 1995**, «Investigation of the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system at 25 °C by thermodynamic calculations ». Cement and Concrete Research, vol. 25 n° 1, p. 22-28;
- [105] : **Brunetaud X. 2005**, « Etude de l’influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l’amplitude de la réaction sulfatique interne au béton ». Thèse de doctorat en Physique-chimie des Matériaux, Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris.
- [106]: **Dodson V.H,1990**, “Concrete admixtures cart”. Van Nostrand Reinhold, New York,;
- [107]: **Robert J., Nicos S. and Lennart Bergström ,Juin-Juillet 2004**. “La Rhéologie des Matériaux Cimentaires (The Rheology of Cementitious Materials ». In : Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, N° 867, pp. 48-55.
- [108]: **Mielenz R. (1984)** « History of chemical admixtures for concrete” Conc. Int, vol.6 n°4 pp: 40-53;
- [109]: **Comparet C. Octobre 2004**, «Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d’un ciment Portland et des superplastifiants du béton». Thèse de Doctorat en Chimie – Physique, Université de Bourgogne - UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot.
- [110]: **Dakhmouche F-Z ,Juin 2000**. « Etude de l’effet des superplastifiants sur les propriétés des bétons frais et durcis et leur interaction avec les ciments algériens ». Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine.
- [111]: **Meyer A. May 1978**,«Experiences in the use of superplasticizers in Germany. Superplasticizers in concrete ». Proceedings of an International Symposium, Ottawa, Canada, 29-31,;
- [112]: **Cours GCI 712 chapitre 8, 2008** ,« Les adjuvants » Université Sherbrooke,;
- [113]: **Journée d’Information (Ciments- Bétons – Adjuvants), Alger, 2004** «Les adjuvants, définitions et opportunités d’utilisation», ERCE – CTC- Est - Granitex,;

- [114]: **Venuat M. 1984**, « Adjuvants et traitements techniques modernes d'amélioration des ouvrages en béton, ed. ED. l'auteur, Chatillon-sous-bagneux.306.
- [115]: **Young J.F. 1984**,« A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement paste containing organic admixtures», Cement and Concrete Research, 14, 439.
- [116]: **Popova A. 2000**, « Etude des interactions entre les hydrosilicates de calcium et les adjuvants superplastifiants ». Thèse de doctorat en chimie, Ecole Polytechnique.
- [117]: **Kim B.J et al. 2000**,« The absorption behaviour of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste .Cement and Concrete Research,. 30p. 887-893.
- [118]: **Hanechera S. and al. 1999**, “Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture and paste rheology”. Cement and Concrete Research,; p.1159-1165;
- [119]: **Ramachandran V.S et Feldman R.F, 1972**,“Effet du lignosulfonate de calcium sur l'aluminate tricalcique et ces produits d'hydratation. Matériaux et Construction,5 (26):p.67-76
- [120]: **Rossington E. (1968)**. « Adsorption of admixtures on Portland cement hydration products”. JACS, vol.51, n°1, pp:46-50;
- [121]: **Ushikawa S. et al. (1997)** “The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture”. Cement and Concrete Research, vol.27, n°1, pp: 37-50, Japan;
- [122]: **Darwin D., Gartner W., Russel W. (1994)**. «The mechanisms of superplasticizer action: theory and experiment”, 68th American society colloid and surface science symposium, Standford University, PaloAlto;
- [123] : **Prospectus sur le Glenium. , 2000**; « Les performances d'un pionner du béton ». Master Builders Technologies
- [124] : **Vichot A. (1990)**. “Les polyméthylènenaphtyl-sulfonates: modificateurs de la rhéologie”. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI;
- [125] : **Piotte M. (1993)**. “Caractérisation du poly(naphtalènesulfonate) – Influence de son contre-ion et de sa masse molaire sur son interaction avec le ciment”. Thèse de doctorat (Ph.D) de l'Université de Sherbrooke;
- [126] : **Collepardi M., Corradi M., Valente M. (1981)**. “Influence of Polymerization of Sulfonated Naphtalene Condensate and its Interaction with Cement”. Proceedings of the Second International Conference on Development in the Use of Superplasticizers, Malhotra V.M. ed., ACI SP 68-27, pp: 485-498;
- [127] : **Basile F., Biagini S., Ferrari G., Collepardi M., (1986)**. “Effect of Condensation Degree of Polymers Based on Naphtalene on Fluidities of Cement Pastes”. Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, vol. VI, pp: 260-263;

- [128] : **F., Biagini S., Ferrari G., Collepari M., (1986).** "Properties of Cement Mixes Containing Naphtalene Sulfonated Polymers of Different Molecular Weight". Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, vol. VI, pp: 264-268;
- [129]: **Simard M.A., Nkinamubanzi P.C., Jolicoeur C., Perraton D., Aitcin P.C., (1993).** "Calorimetry, Rheology and Compressive Strength of Superplasticized cement pastes". Cement and Concrete Research, vol. 23, pp: 939-950;
- [130] : **Fernon V. 29 Septembre 1994;** « Caractérisation de produits d'interaction adjuvants/hydrates du ciment », 3^{ème} Journée Technique Adjuvants, Technodes SA, Guerville,
- [131]: **Anderson P.J., Roy D.M., Gaidis M. 1988,**« The effect of superplasticizers molecular weight on its adsorption and dispersion of cement » Cement and Concrete Research 18, 980.
- [132]: **Ferrari G., Basile A., Bo Dal A., Mantonio A. 1986,**« The influence of the molecular weight of beta-naphthalenesulfonate based polymers on the rheological properties of cement mixes », Il cemento, 83, 445,;
- [133] : **Paillère A.M., Serrano J.J., Grimaldi G. (1990).** « Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumées de silice ». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées, 170, nov-déc., pp : 37-45;
- [134]: **Massaza F., Costa U. 1980,**« Effect of Superplasticizers on the C3A Hydration » Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. IV, pp: 529-534;
- [135]: **Ramachandran V.S. (1987).** « Use of Superplasticizers in Concrete », Il Cemento, vol. 84, pp : 608-611;
- [136] : **Paillère A.M., Alegre M., Ranc R., Buil M. (1985).** « Interaction entre les réducteurs d'eau-plastifiants et les ciments ». Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 136, Mars-Avril, pp: 105-108;
- [137] : **Vernet C., Noworyta G. (1992).** « Interaction des adjuvants avec l'hydratation du C3A : point de vue chimique et rhéologique », Journée technique : les couples ciment/adjuvant, Technodes S.A., Guerville;
- [138] : **Fontaine C. (1994).** « Le couple ciment/adjuvant : comment résoudre certaines incompatibilités », 3^{ème} Journée technique Adjuvants, Technodes SA, Guerville, 29 sept;
- [139]: **Collepari M., Corradi M., Baldini G., Pauri M. 1980,**« Influence of Sulfonated Naphtalene on the Fluidity of Cement Pastes » Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. III, , pp : 20-25;
- [140] : **Paillère A.M., Briquet Ph. 1980 ,**« Influence des résines de synthèse fluidifiantes sur la rhéologie de la déformation des pâtes de ciment avant et en cours de prise ». Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. III, , pp : 186-191;

- [141]: **Chiocchio G., Paolini A.E. 1985**,« Optimum Time of Adding Superplasticizers to Portland Cement Pastes», Cement and Concrete Research, vol. 15, , pp: 901-908;
- [142] : **Dupain R., Lanchon R.,Saint-Arroman J.C. 2000** ;Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.
- [143] :**Cimbeton (2006)**; Les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre, Paris.
- [144] :**Ouchi M. (1999)** ; State-of-the-art report on self-compactability evaluation, Concrete Engineering Series, N° 30, Japan, pp. 111-120.
- [145] :**Chanvillard G., d'Aloila L. (1994)** ; Prévision de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., 1994, 193, 39-51.
- [146] :**Nguyen T.L.H. (2007)** ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de Doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 139 p.
- [147] :**Tattersall G.H., Banfill P.G.F. (1983)** ; The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, London.
- [148] :**AFNOR. (2002)** ; Béton et constituants du béton. Tome 1 : Spécifications du béton et de ces constituants, 5^e édition, Paris, 431 p.
- [149] :**EL Barrak M., Mourret M., Bascoul A. (2008)** ; Selft-compacting concrete paste constituents : Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste, Cement & Concrete Composites.
- [150] : **[Aitcin P.C. (2001)]**; Bétons haute performance, Editions Eyrolles, France, 683 p.
- [151] :**Lapointe R. (mai 1997)** ; Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada,.
- [152] :**AFNOR. (2002)** ; Béton et constituants du béton. Tome 2 : Méthodes d'essai du béton, 5e édition, Paris, 510 p.
- [153] :**Dreux G., FESTA J. (1998)** ; Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles ; Paris, 409 p.
- [154] :**De Larrard F. (2000)**; Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.
- [155] :**Hu C. (1995)** ; Rhéologie des bétons fluides, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA16, Paris.
- [156] :**Neville A.M. (2000)** ; Propriétés des bétons, ed. CRIB., Paris, Eyrolles, 806 p.

- [157] : **Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P. (2000)** ; The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, *Cement and Concrete Research* 30, pp. 1543-1549.
- [158] : **Ngoc-Dong L. (2007)** ; Amélioration de la régularité du béton en production, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 248 p.
- [159] : **Cazacliu B., Guieysse B., Garcin O., Buisson F., Baudru Y., Chanut S., Lallemant- Gamboa I. (2007)** ; Laboratory evaluation of 9 mixers, rapport LCPC pour le projet européen Innocrete, 71 p.
- [160] : **Vandanjon J.O., De Larrard F., Dehousse B., Villaine G., Maillotr., Laplante P. (2000)** ; Homogénéisation des bétons en centrale de fabrication discontinue. Influence du temps de malaxage et du mode d'introduction des additions minérales, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol. 228.
- [161] : **Chopin D. (2003)** ; Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants. Optimisation du temps de fabrication, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 41
- [162] : **Baron J., Ollivier J.P. (1996)**; Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p.
- [163]: **Zivkovic S.D. (1992)** ; The effect of increased temperature on fresh and hardened concrete, in : *Concrete in hot climates*, Proceedings of the third international RILEM conference, Torquay, 21-25 september 1992, E. & F.N. Spon, Ed., London, 1992, 3-12.
- [164] : **Makhloufi Z., Bouhicha M. (2008)** ; Formulation du béton calcaire du turonien de Laghouat, Algérie Equipement, N° 44, mai, pp. 14-21.
- [165] : **Regourd M. (1982)** ; L'hydratation du ciment Portland, (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [166] : **Folliot A., Buil M. (1982)** ; La structuration progressive de la pierre de ciment, (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [167] : **Maso J.C. (1982)** ; La liaison pâte – granulats, (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [168] : **Rossi P., WU X. (1994)** ; Comportement en compression du béton : mécanismes physiques et modélisation, *Bulletin Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées*, 189 Janvier-Février, pp. 89-94.
- [169] : **Kakizaki M., Edahiro H., Tochigi T., Niki T. (1992)** ; Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete, *Katri Report N° 90*, 19 pp. (Kajima Corporation, Tokyo, 1992) (and also in ACI SP-132 (Detroit, Michigan, 1992).
- [170]: **Nielsen L.F. (1993)** ; Strength development in hardened cement paste : examination of some empirical equations, *Materials and Structures*, 26, N° 159, pp. 255-60.

- [171] :Ollivier J.P., Buil M. (1992) ; Conception des bétons : la structure poreuse, “La durabilité des bétons”, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Eds., Paris.
- [172] :U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1975) ; Concrete Manual, 8th EDN (Denver, Colorado).
- [173] :Gonnerman H.F., Lerch W. (1951) ; Changes in characteristics of portland cementas exhibited by laboratory tests over the period 1904 to 1950, ASTM Sp. Publ. N° 127.
- [174] :Delmas L., Baillot T. (2006) ; Influence de la mise en oeuvre sur la porosité des bétons, Projet de Recherches Technologiques, Institut National des Sciences Appliquées, Projet de Recherches Technologiques, 62 p.
- [175] :Plassais A. (2003) ; Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Mariez curie Paris 6, Physique et chimie des matériaux, janvier, 167 p.
- [176] :Sahu S. et col. (2004) ; Determination of water–cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy, Cement and Concrete Composites, 2004. 26(8): pp.987-992
- [177] :Pigeon D. (1999) ; Durabilité et réparation du béton, Cours de l'Université de Sherbrook, Canada.
- [178] :Powers T.C. (1949) ; The air-requirement of frost-resistant concrete. Proceedings of the Highway Research Board, 1949. 29: pp. 184-211.
- [179] :Dutron P. (1985) ; Introduction, in Le béton et l'eau, Saint-Rémy-lès-Chevreuse (France): Conseil International de la langue française. p. 1-211.
- [180] :Bouasker M. et col. (2006) ; Retrait chimique des mortiers au très jeune âge : influence des inclusions granulaires, in XXIVèmeRencontres Universitaires du Génie Civil, La Grande Motte, France, pp. 1-8.
- [181] :Rosler M., Odler I. (1985) ; Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes. I. Effect of porosity, Cement and Concrete Research, 15, N° 2, pp. 320-30.
- [182]:Sersale R., Cioffi R., Frigione G., Zenone F. (1991) ; Relationship between gypsum content, porosity, and strength of cement, Cement and Concrete Research, 21, N° 1, pp.120-6.
- [183] :Popovics S. (1990); Analysis of concrete strength versus water-cement ratio relationship, ACI Materials Journal, 57, N° 5, pp. 517-29.
- [184] :Stock A.F., Hannant D.J., Williams R.I.T. (1979); The effect of aggregateconcentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete, Mag. Concr. Res.,31, N° 109, pp. 225-34.
- [185] :Kawakami H. (1972); Effect of gravel size on strength of concrete with particular reference to sand content, Proc. Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, vol. IV, Concrete and Cement Past Glass and Ceramics, pp. 96-103 (Society of Materials Science, Kyoto, Japan).

[186] :De Larrard F., Belloc A. (1999) ; L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N°219, Janvier Février, pp.41-52.

[187] :Alexander K.M. et col. (1961), Discussion of Walker S. and Bloem D.L. (1960), "Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete", ACI Journal, Vol. 32, N° 9, pp.1201-1258.

[188] :Cordon W.A., Gillepsie H.A. (1963), Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste Which Influence the Strength of Concrete, Journal of the American Concrete Institute, Août.

[189] : MEYER A. (1963); Über den Einfluss des Wasserzementwertes auf die Frühfestigkeit von Beton, Betonstein Zeitung, N° 8, pp. 391-4.

[190]: WOOD S.L. (1991); Evaluation of the long-term properties of concrete, ACI Materials Journal, 88, N°. 6, pp. 630-43.

[191]: WASHA G.W., WENDT K.F. (1975); Fifty year properties of concrete, J. Amer. Concr. Inst., 72, N° 1, pp. 20-8.

[192]: WALZ K. (1976); Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren, Beton, 26, N° 3, pp. 95-8.

[193]: KLIEGER P. (1958) ; Effect of mixing and curing temperature on concrete strength, J. Amer. Concr. Inst., 29, 12, 1063-1081.

Annexe - A

Tableau annexe :1A : Analyse granulométrique du sable

Sable	tamis	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.125	0.08	Fond
S_d	<i>R.P (g)</i>	0	54	78.75	60.75	609	664.5	20.25	5.25
	<i>R.C %</i>	0	3.6	8.85	12.9	53.5	97.8	99.15	99.5
	<i>Tamisat %</i>	100	96.4	91.15	87.10	46.50	2.2	0.85	0.10
S₁	<i>R.P (g)</i>	0	240	320	69	472	263.7	9.33	39
	<i>R.C %</i>	0	16	37.33	41.93	73.40	90.98	97.20	99.80
	<i>Tamisat %</i>	100	84	62.67	58.07	26.60	9.02	2.80	0.2
S₂	<i>R.P (g)</i>	0	220	386	106	370	193	48	174
	<i>R.C %</i>	0	14.67	40.40	47.47	72.13	85	88.20	99.80
	<i>Tamisat %</i>	100	85.33	59.60	52.53	27.87	15	11.8	0.2
S₃	<i>R.P (g)</i>	3	216	450	109	317	270	65	68
	<i>R.C %</i>	0.2	14.6	44.6	51.87	73	91	95.33	99.87
	<i>Tamisat %</i>	99.8	85.4	55.4	48.13	27	9	4.67	0.13
S₄	<i>R.P (g)</i>	6	223	491	157	256	24.3	247	92
	<i>R.C %</i>	0.4	17.93	48	58.47	75.53	90.98	93.67	99.8
	<i>Tamisa %</i>	99.6	82.07	52	41.53	24.47	9.02	6.33	0.2
S₅	<i>R.P (g)</i>	0	237	573	175	225	85.25	14.75	189
	<i>R.C %</i>	0	15.8	54	65.67	80.67	86.35	87.33	99.93
	<i>Tamisat %</i>	100	84.2	46	34.33	19.33	13.65	12.67	0.07
S_c	<i>R.P (g)</i>	0	165.75	669.75	239.25	178.5	153.75	40.5	50.25
	<i>R.C %</i>	0	11.05	55.7	71.65	83.55	93.8	96.5	99.85
	<i>Tamisat %</i>	100	88.95	44.3	28.35	16.45	6.2	3.5	0.15

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

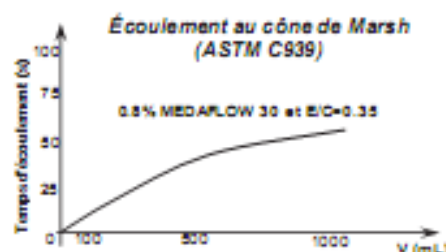
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	R _c (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 8 - 8,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.48 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation enant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposés aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation enant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



59

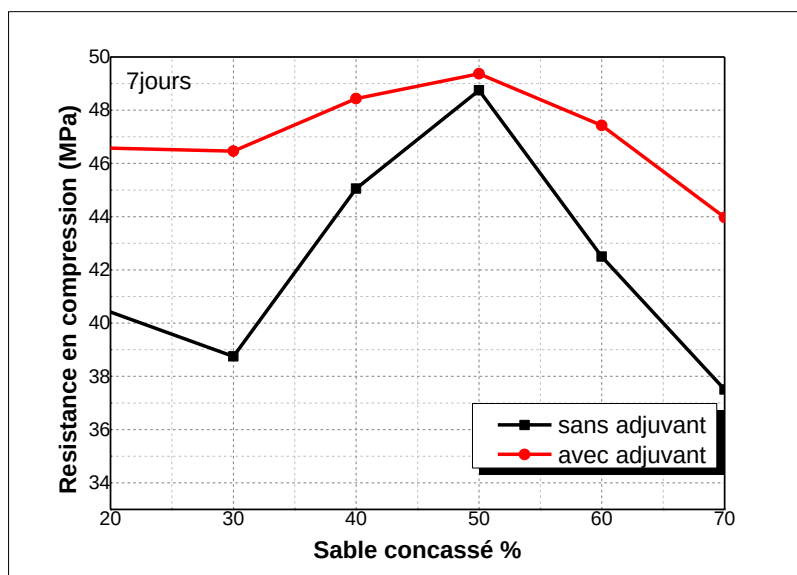
Annexe – B -

Figure 1B : Resistance en compression en fonction du sable concassé à 7 jours

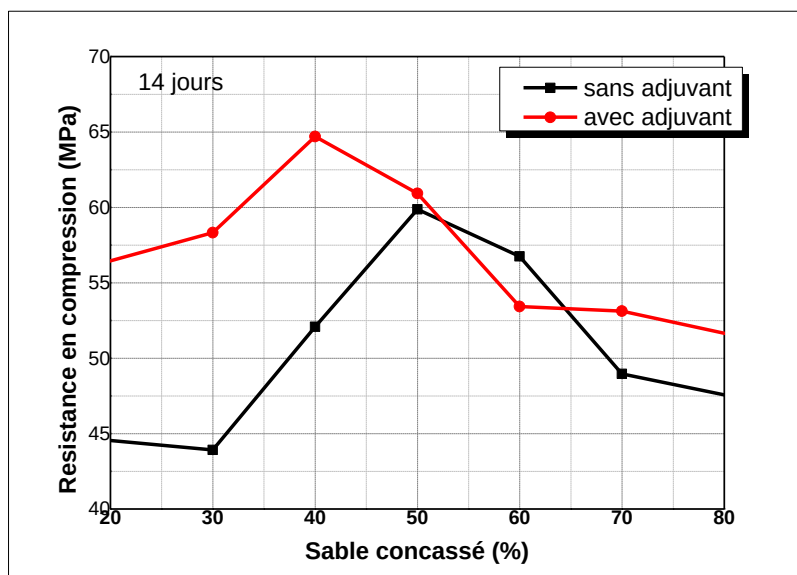


Figure 2 B : Resistance en compression en fonction du sable concassé à 14 jours

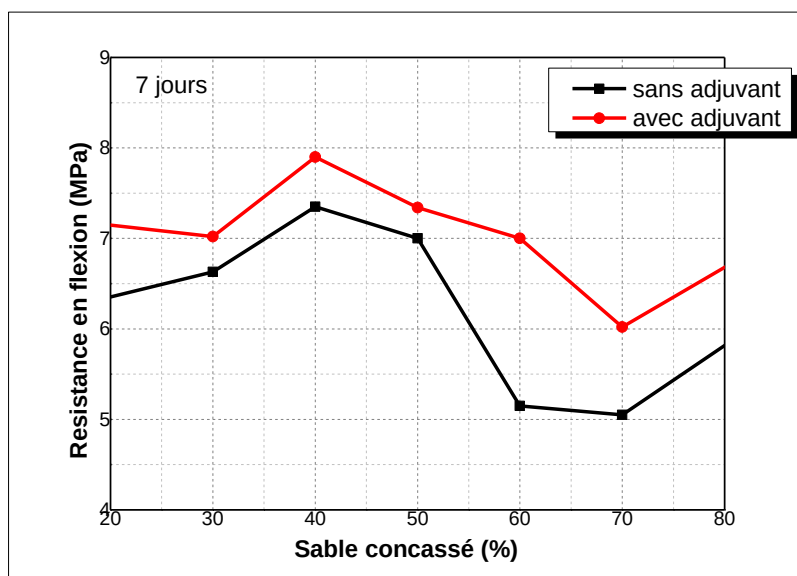


Figure 3 B : Resistance à la flexion en fonction du sable concassé à 7 jours

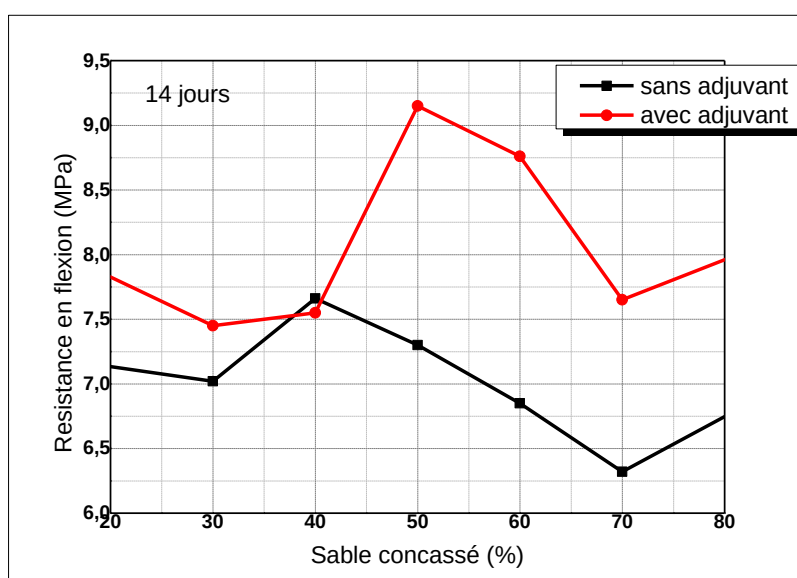


Figure 4 B : Resistance à la flexion en fonction du sable concassé à 14 jours

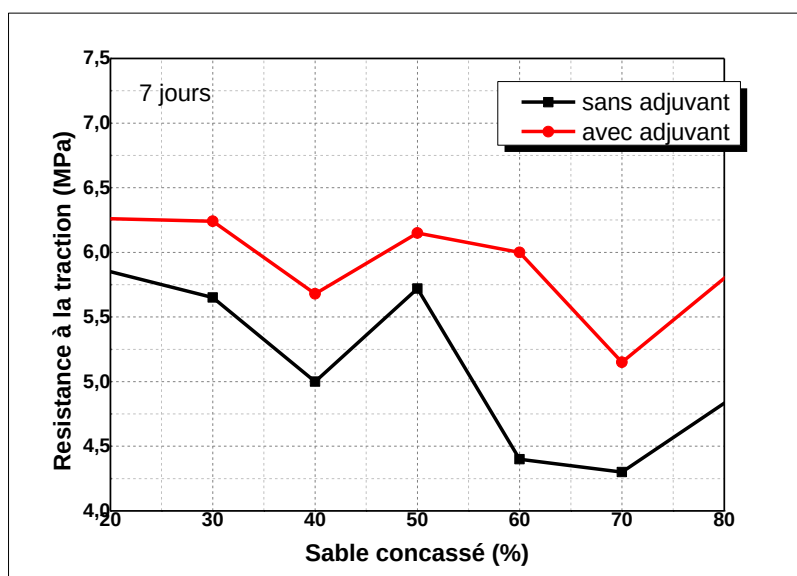


Figure 5 B : Resistance à la traction en fonction du sable concassé à 7 jours

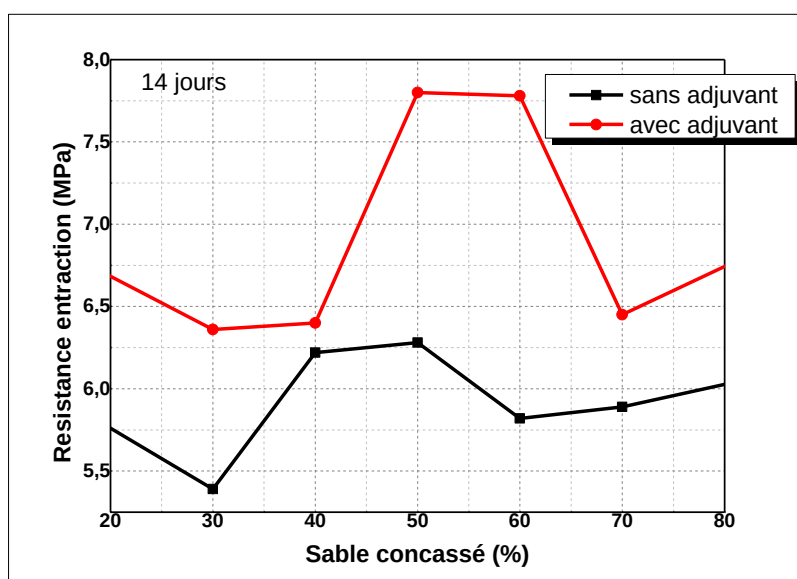


Figure 6 B : Resistance à la traction en fonction du sable concassé à 7 jours

Annexe – C -

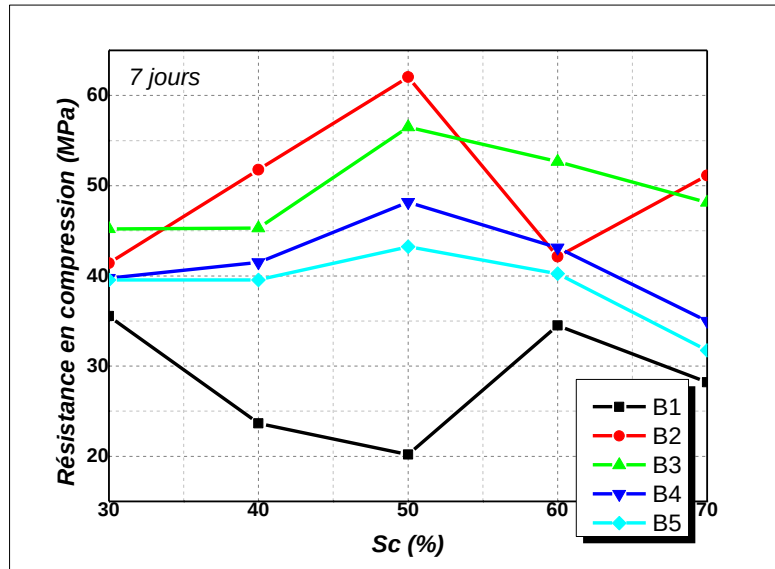


Figure : 1 C Résistance en compression en fonction du sable concassé à 7 jours

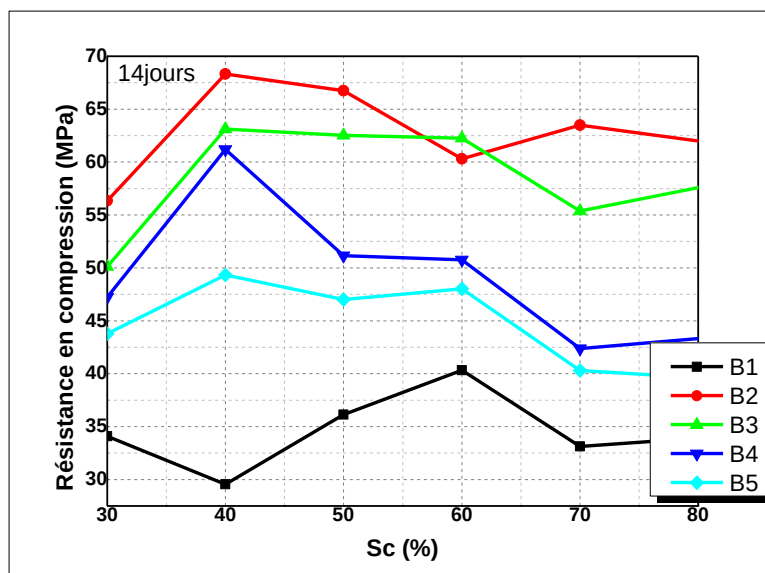


Figure : 2 C Résistance en compression en fonction du sable concassé à 14 jours

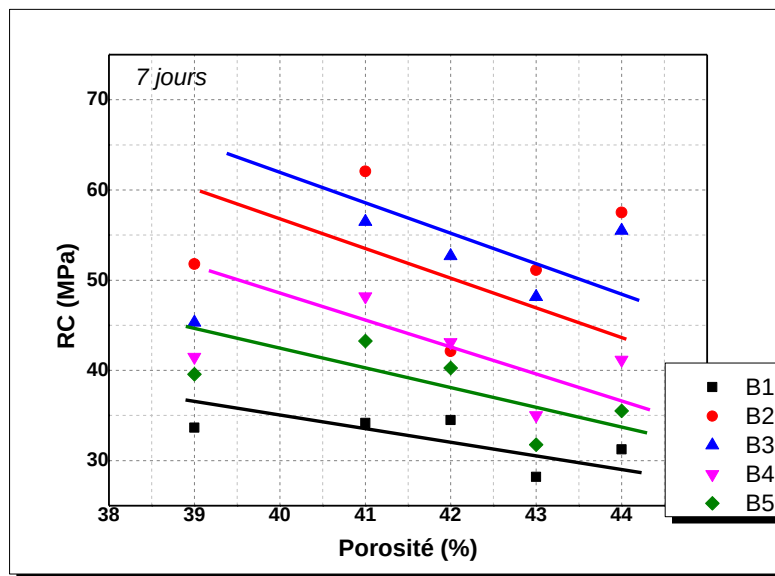


Figure : 3 C Résistance en compression en fonction de la porosité à 7 jours

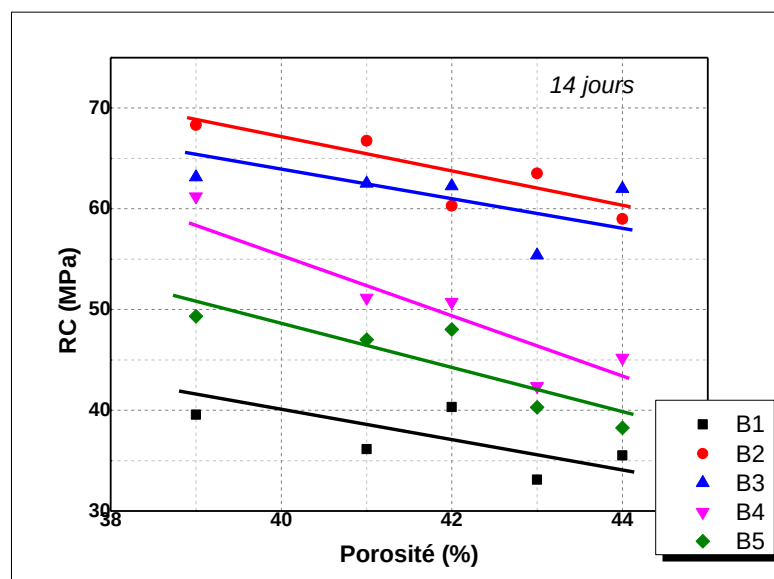


Figure : 4 C Résistance en compression en fonction de la porosité à 14 jours

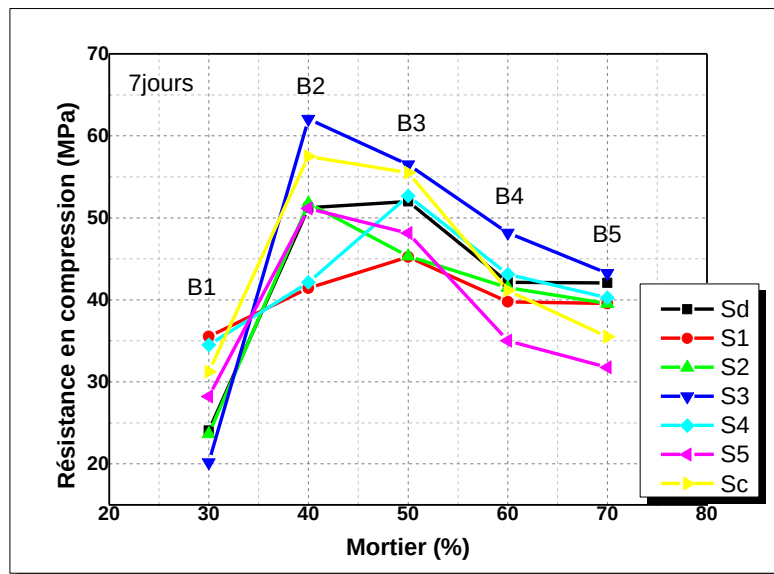


Figure : 5 C Résistance en compression en fonction du mortier à 7 jours

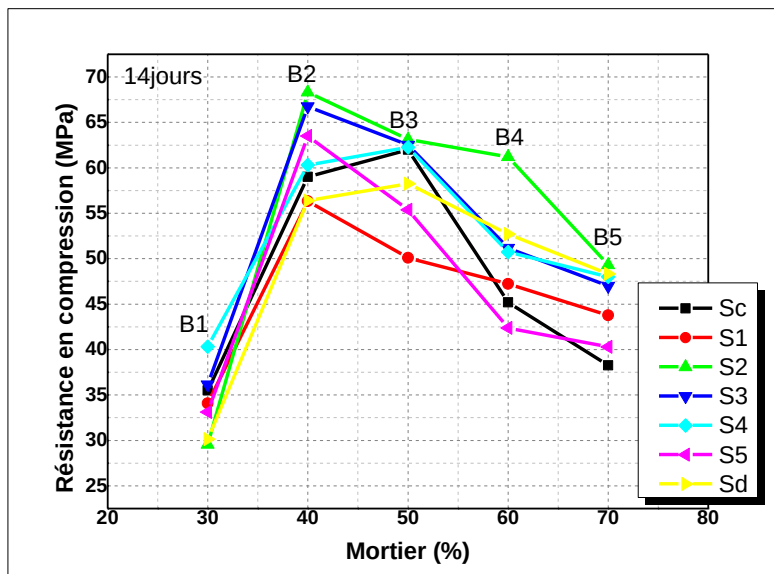


Figure : 6 C Résistance en compression en fonction du mortier à 14 jours

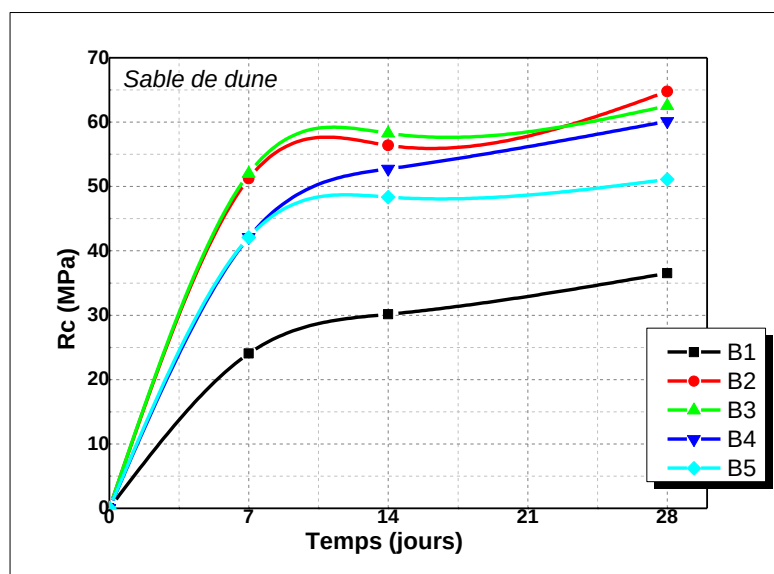


Figure 7 C : Résistance en compression dans le temps avec sable de dune

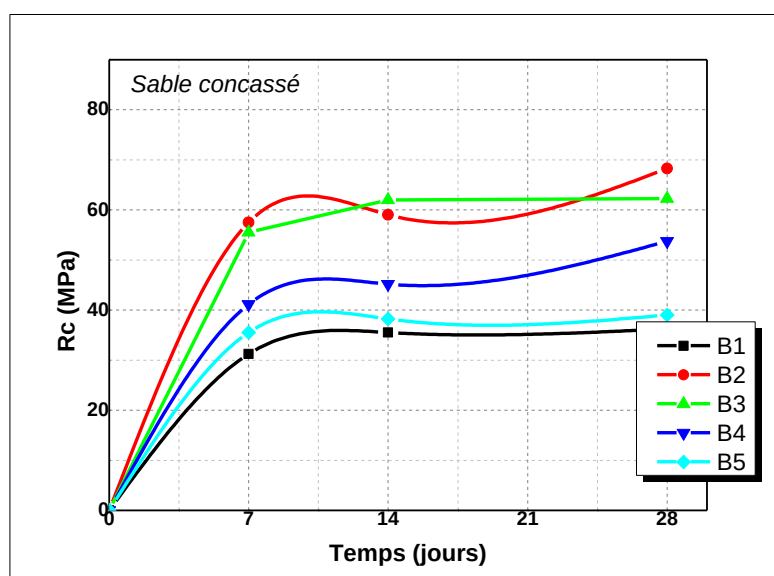


Figure 8 C : Résistance en compression dans le temps avec sable concassé

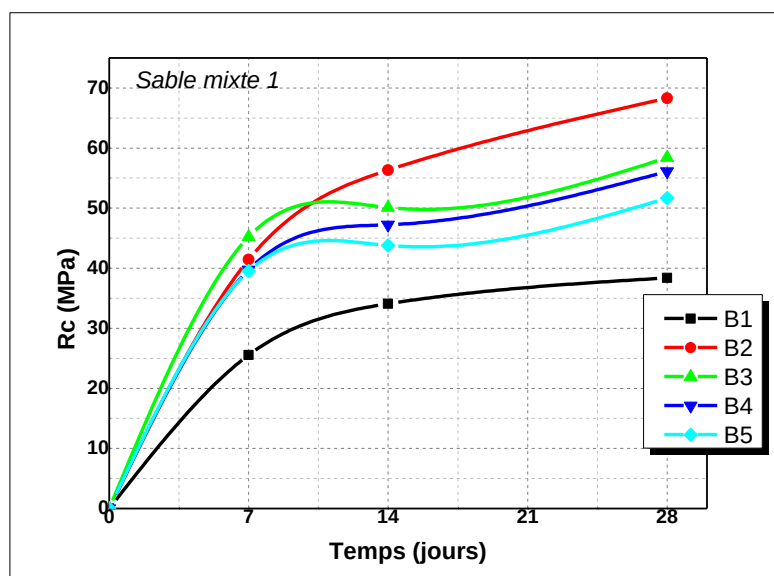


Figure 9 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S1

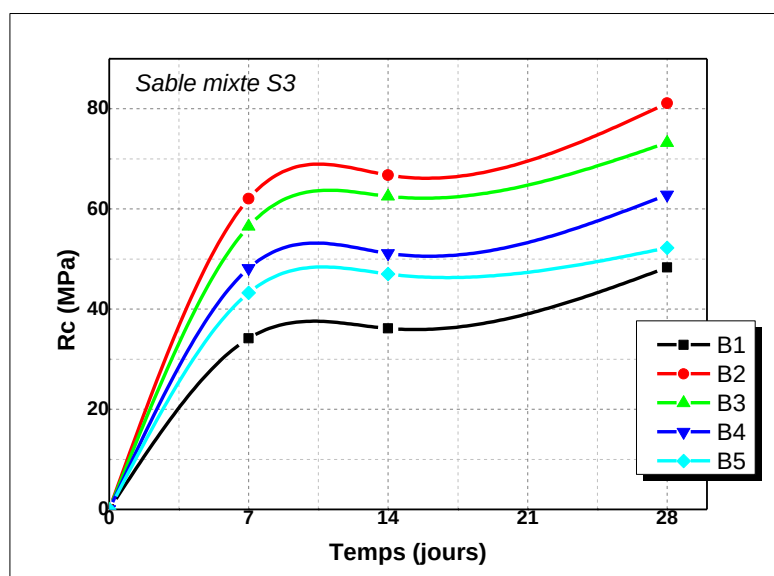


Figure 10 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S3

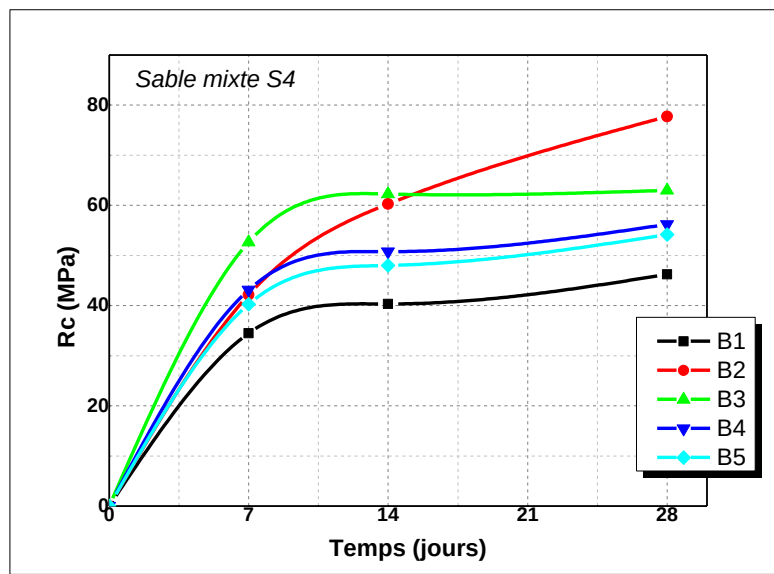


Figure 11 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S4

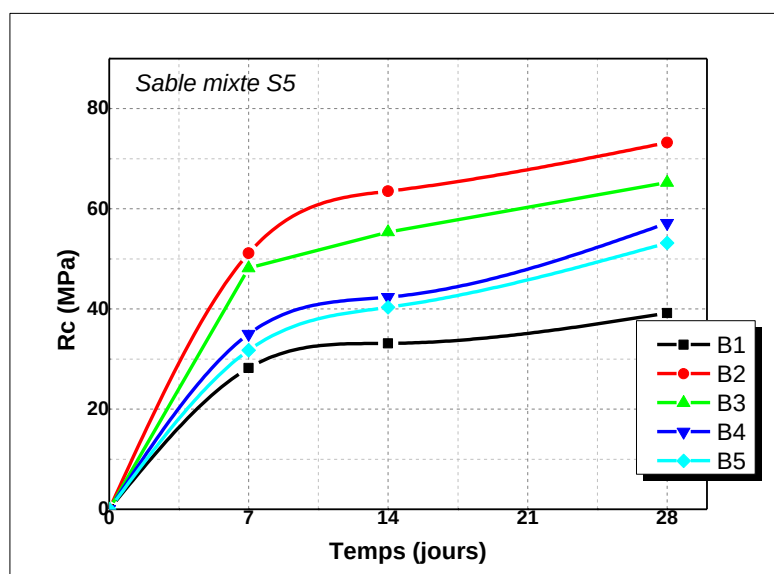


Figure 12 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S5

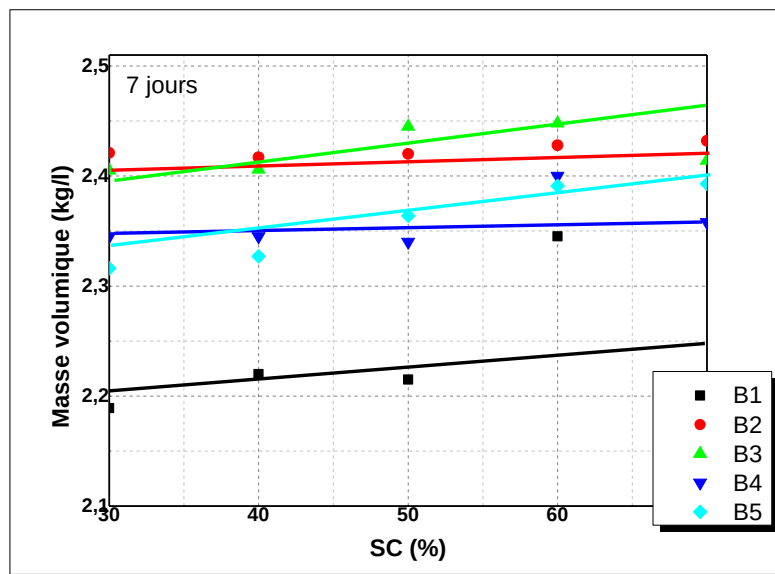


Figure 13 C : Masse volumique en fonction du sable concassé à 7 jours

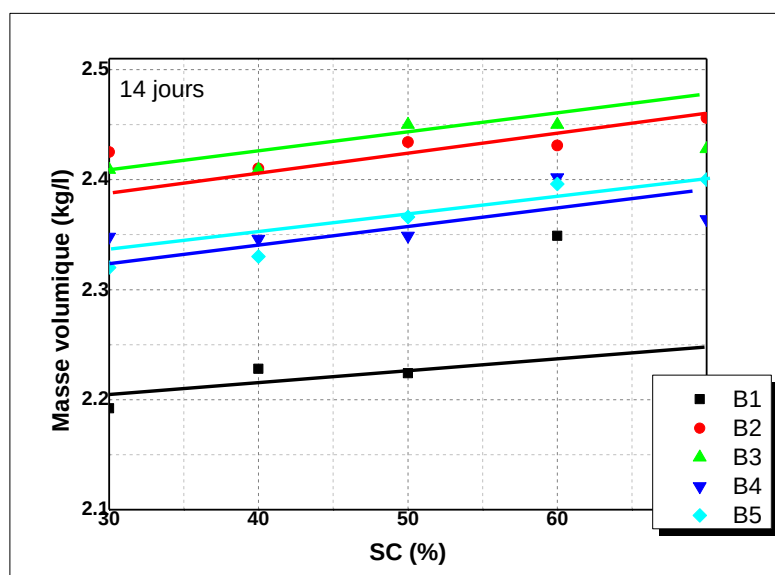


Figure 13 C : Masse volumique en fonction du sable concassé à 14 jours

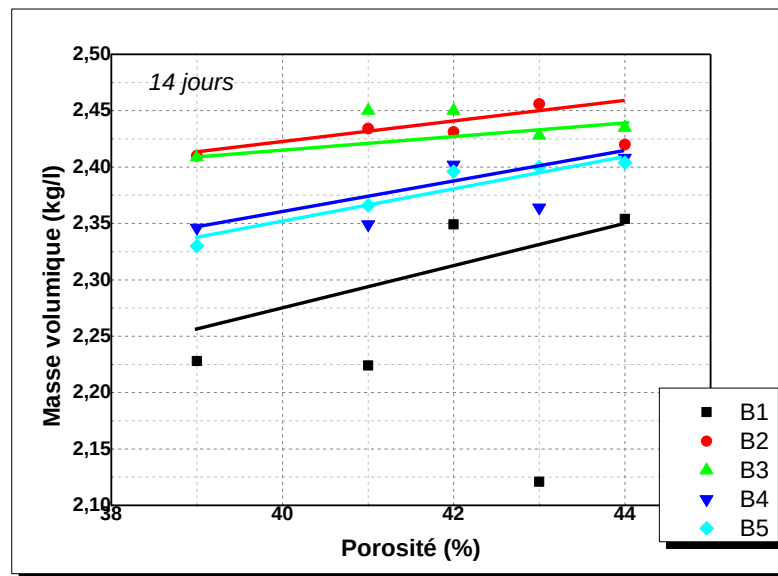


Figure 14 C : Masse volumique en fonction de la porosité à 14 jours

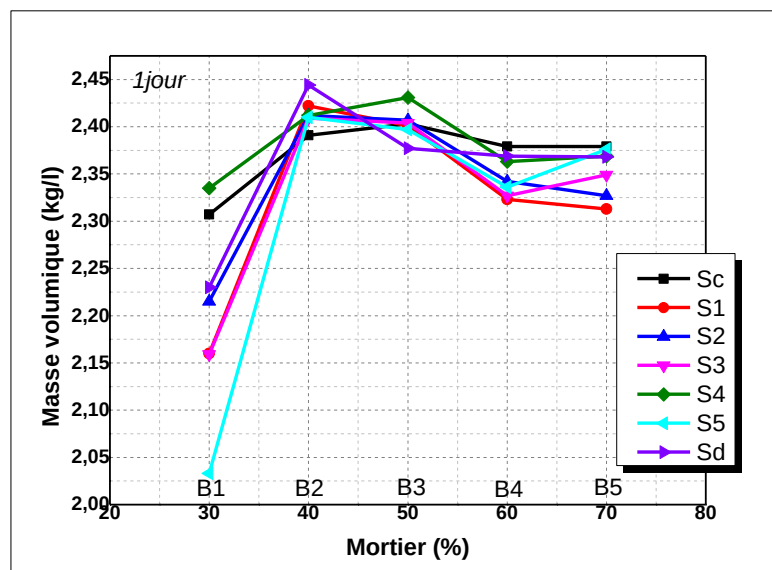


Figure 15 C : Masse volumique en fonction du pourcentage de mortier à 1 jour

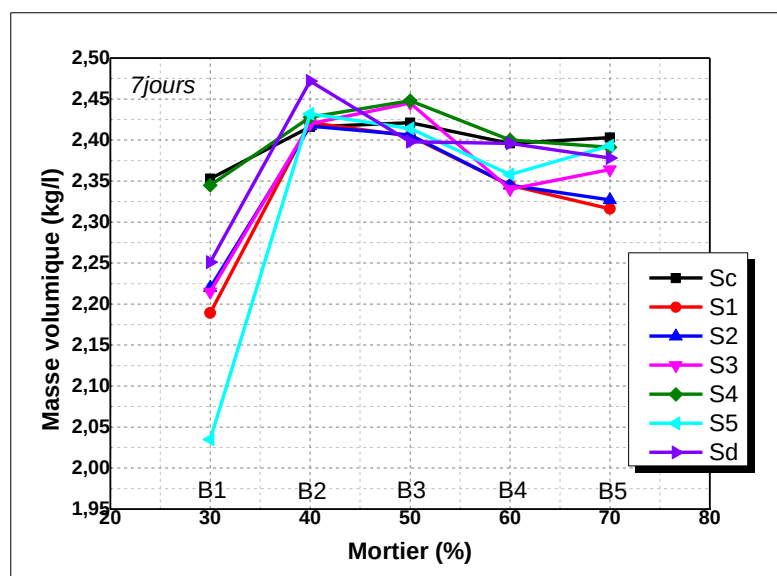


Figure 16 C : Masse volumique en fonction pourcentage de mortier à 7 Jours

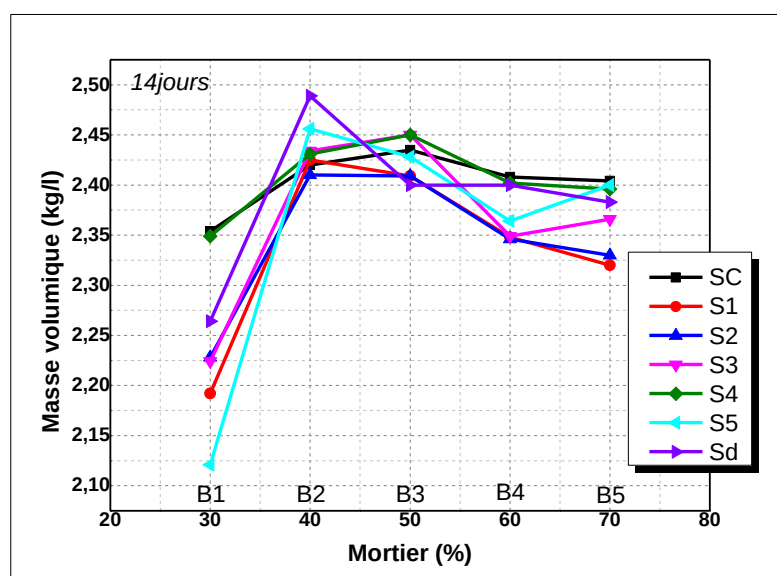


Figure 17 C : Masse volumique en fonction pourcentage de mortier à 14 jours

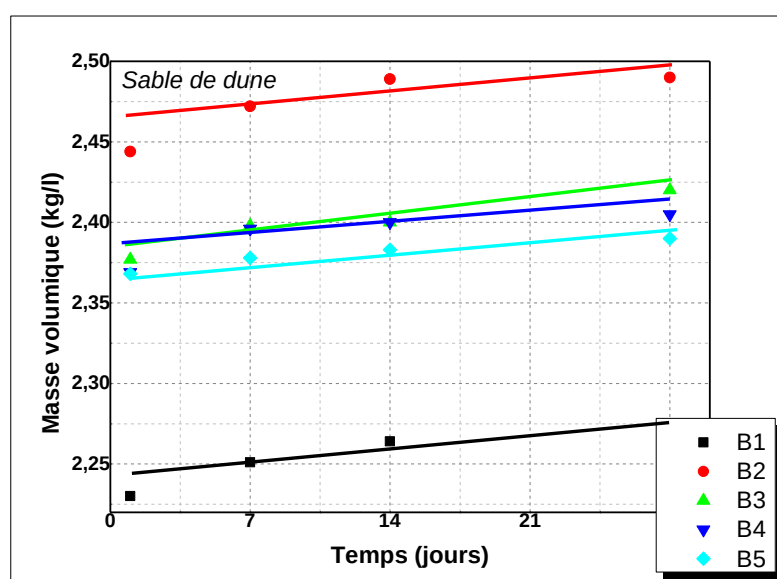


Figure 18 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable de dune

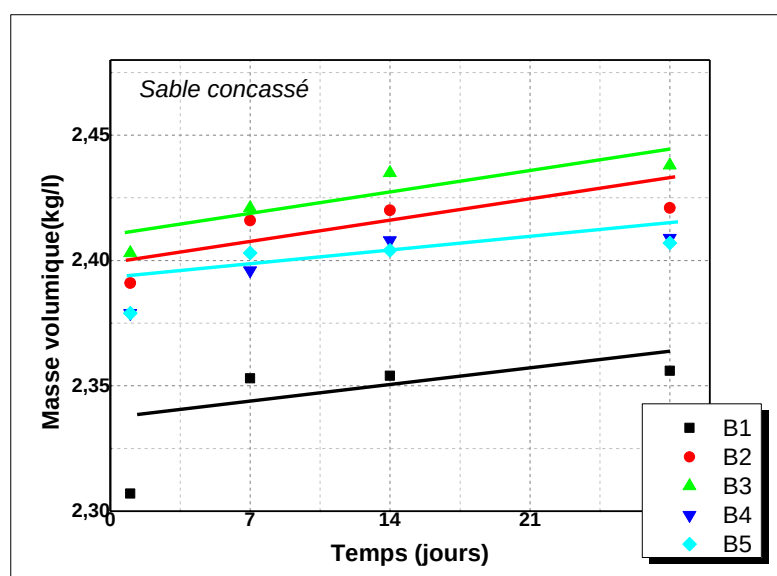


Figure 19 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable concassé

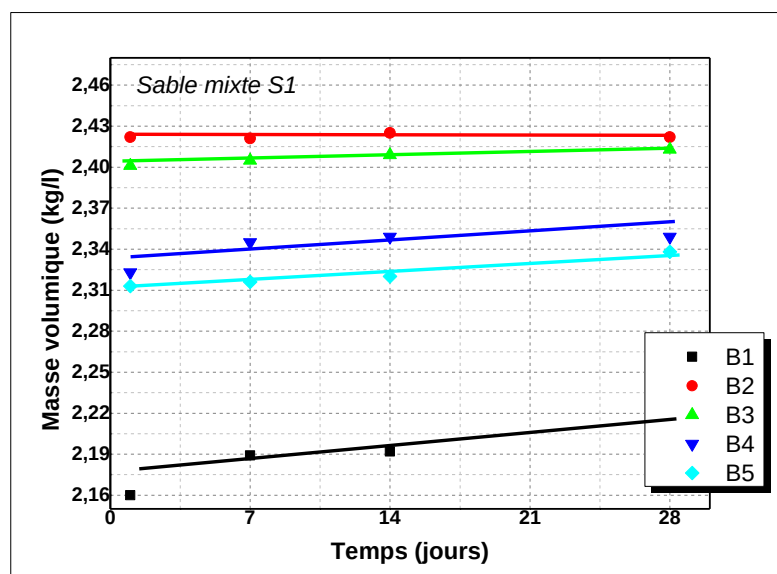


Figure 20 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S1

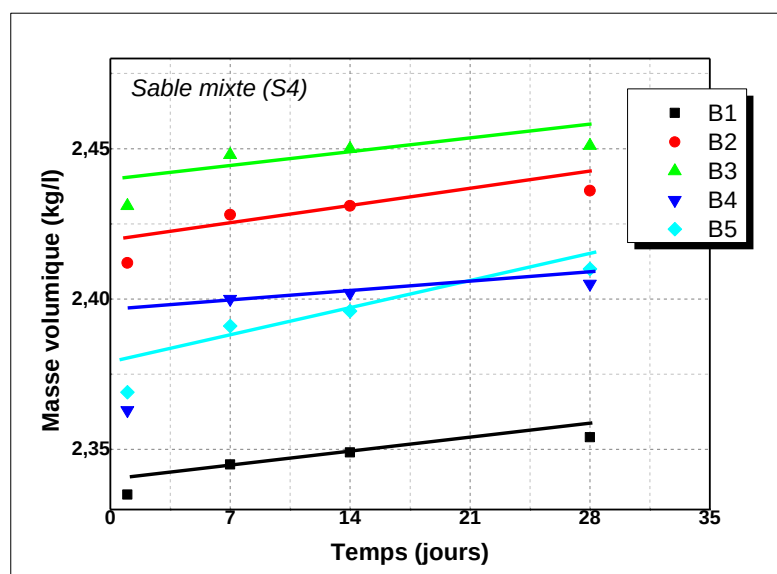


Figure 21 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S4

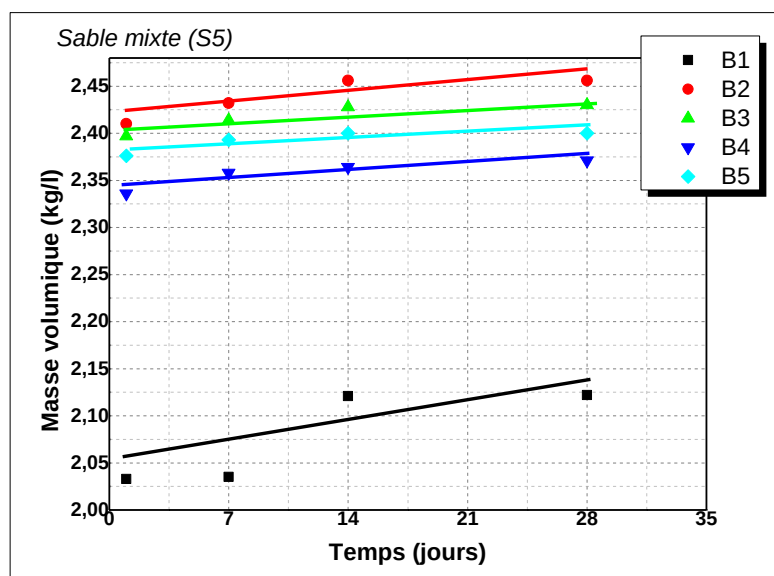
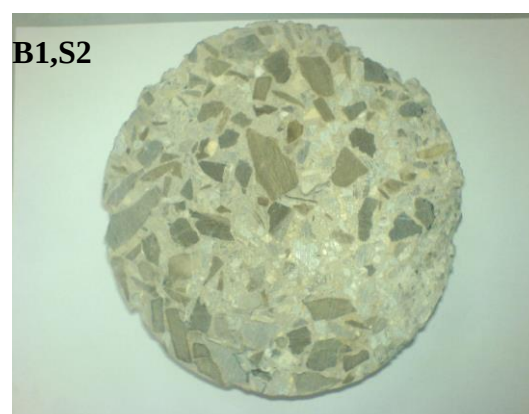
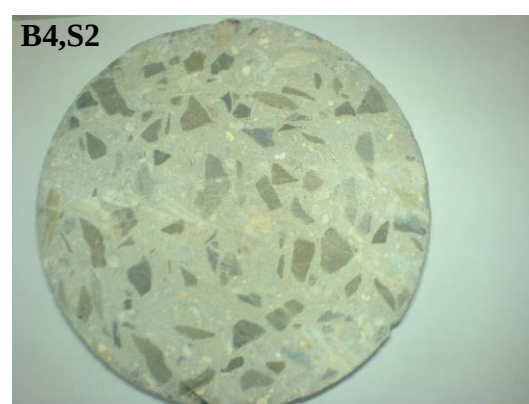
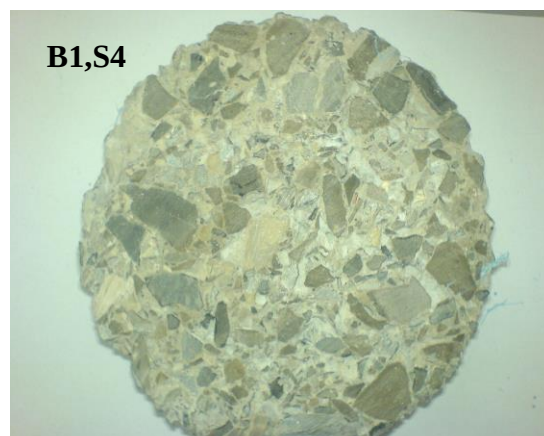
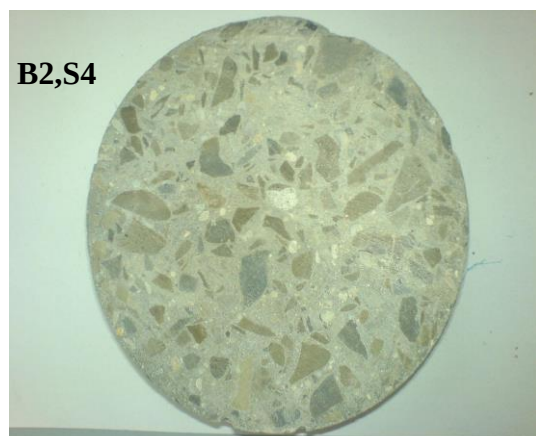
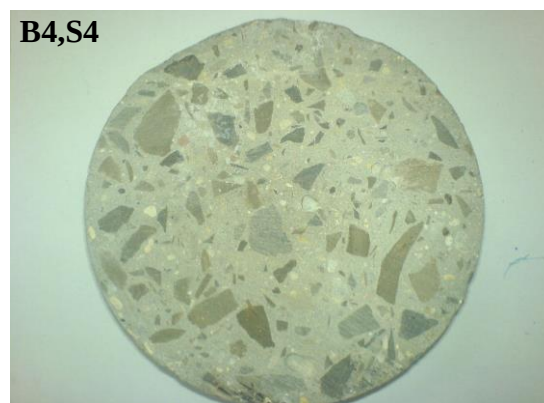
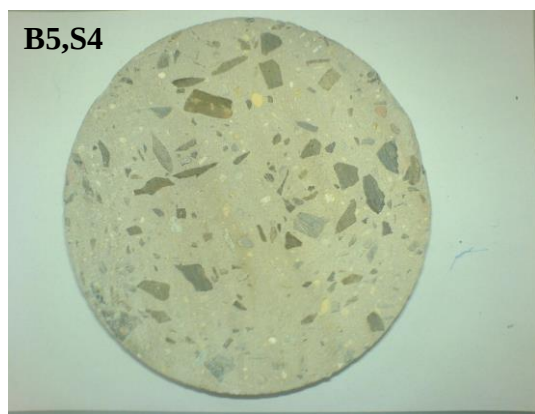
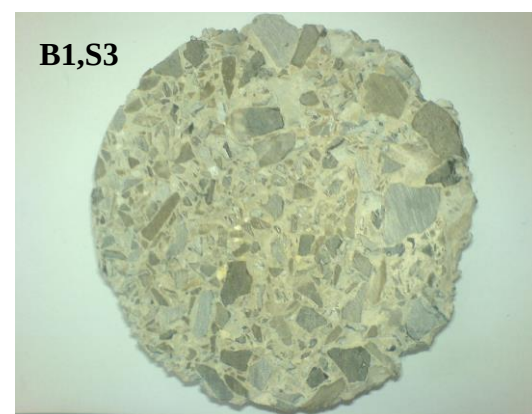
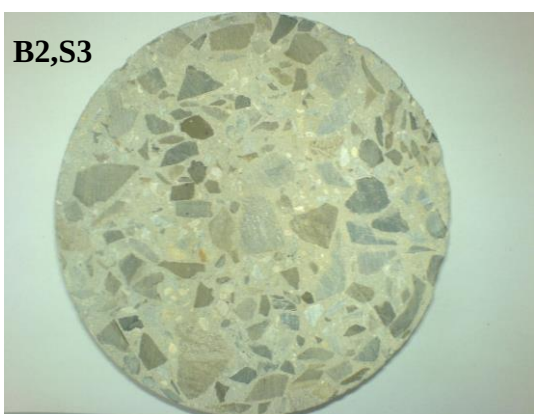
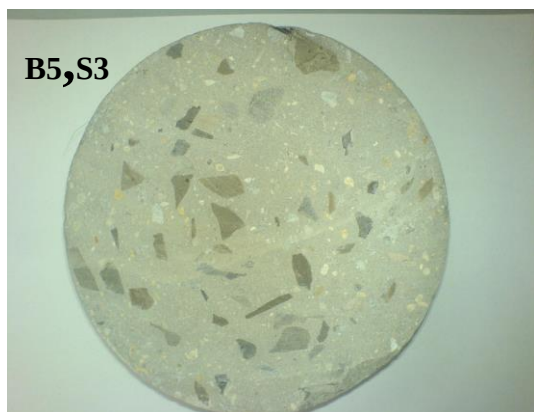
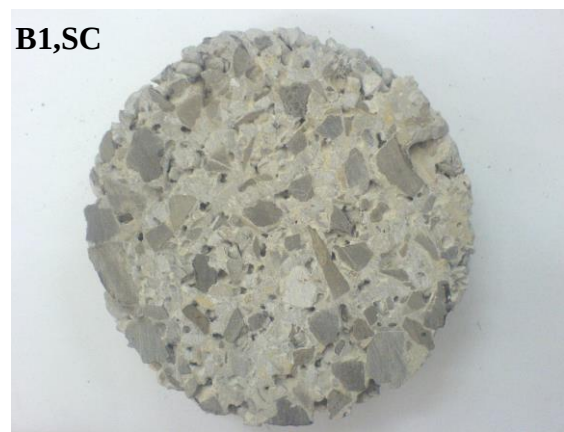
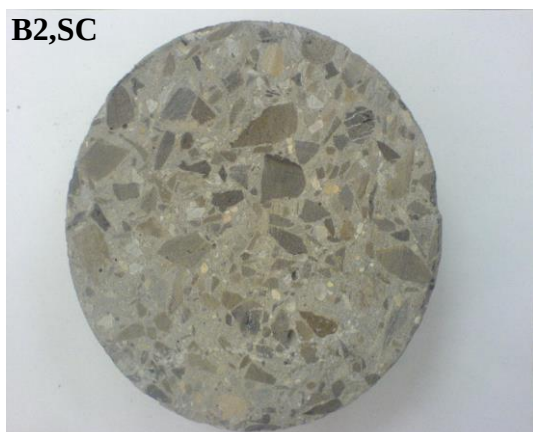
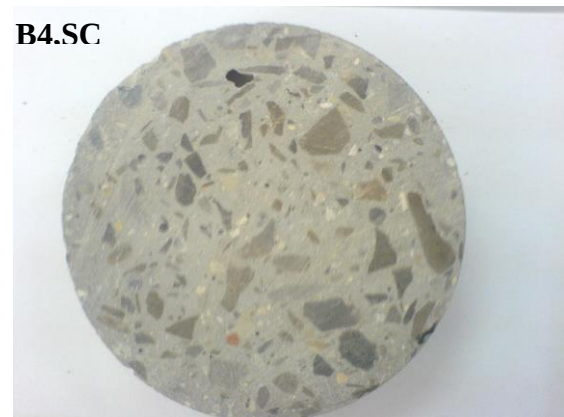
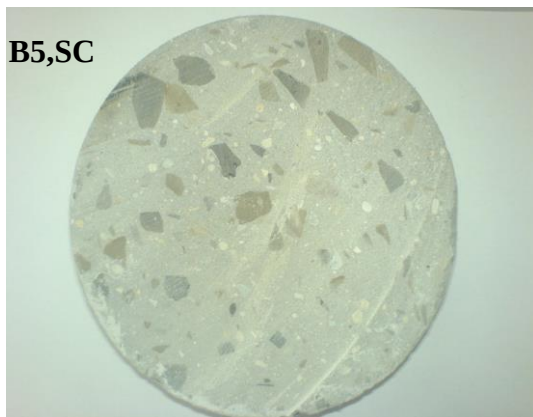
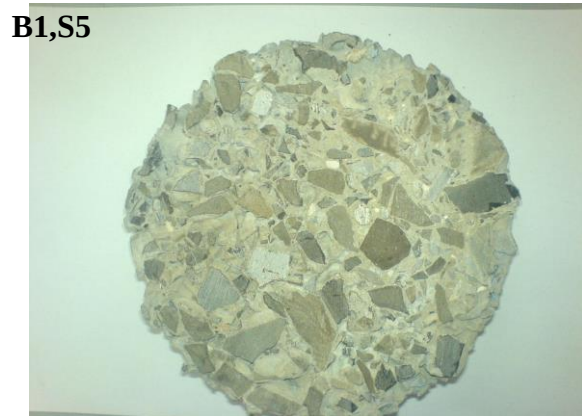
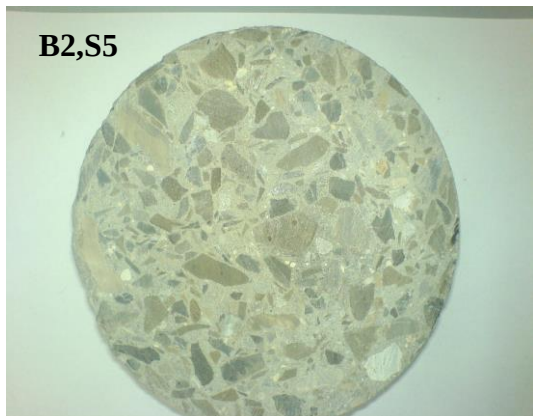
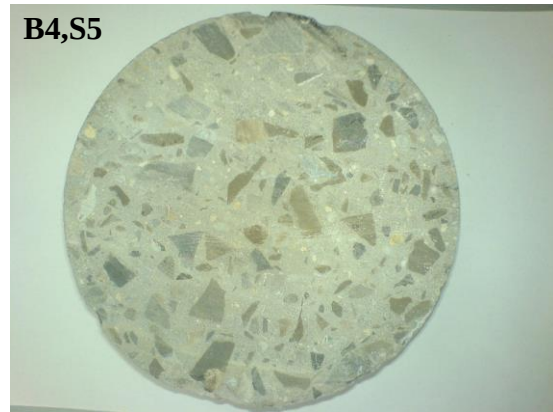
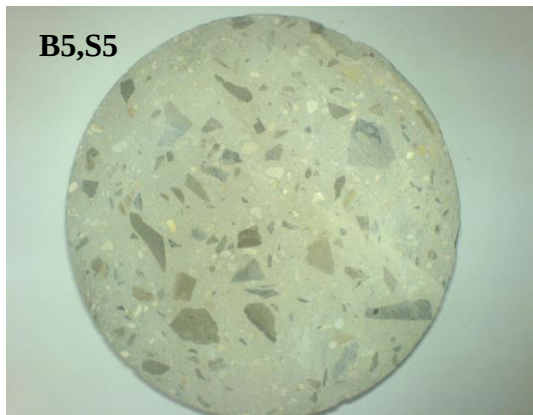


Figure 22 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S5

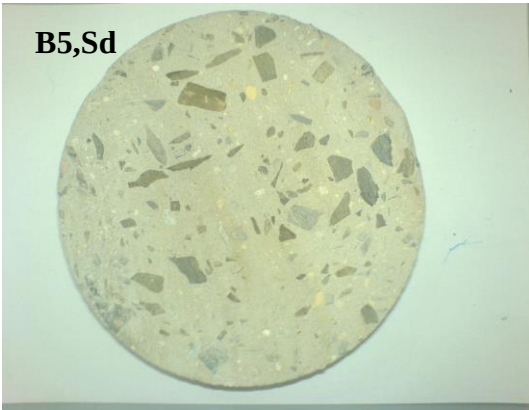
La distribution des grains dans les bétons



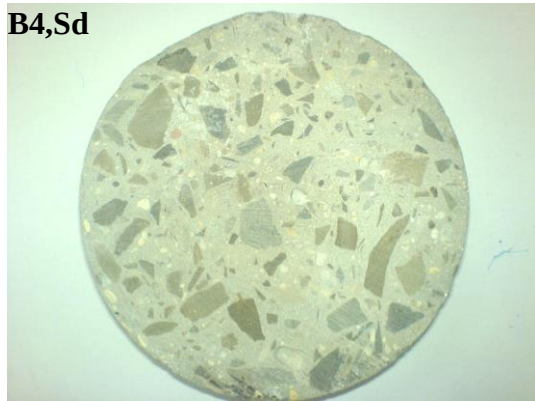




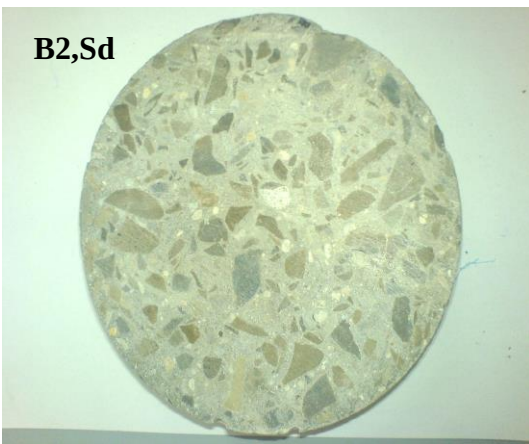
B5,Sd



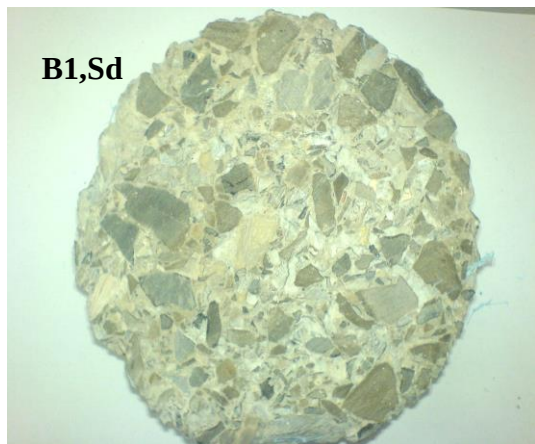
B4,Sd



B2,Sd



B1,Sd



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

**Université Mohamed Boudiaf - M'SILA
Faculté de Technologie
Département de Génie-Civil**



THESE

Présentée en vue de l'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences
(Spécialité : Génie-Civil – Option : Matériaux)

**Présentée par :
MAZA MEKKI**

THEME

**Analyse des propriétés physiques et mécaniques du mortier à
base de sable mixte (sable de dune et sable concassé)**

Soutenue Publiquement le 23/11/2016.....

Devant le jury :

KHEMISSA Mohamed :	Professeur / Université de M'sila / Président de jury
NACERI Abdelghani :	Professeur / Université de M'sila / Rapporteur
BENOUIS Abdelhalim :	Professeur / Université de Guelma / Examineur
BOUDAOUD Zine-Eddine :	Professeur / Université d'Oum-El-Bouaghi / Examineur
RAHMOUNI Zine-El-Abidine :	Professeur / Université de M'sila / Invité

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail de thèse.

En second lieu, je tiens à remercier Monsieur NACERI Abdelghani, Professeur à l'université de M'sila pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur KHEMISSA Mohamed, Professeur à l'université de M'sila, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent également à Messieurs : RAHMOUNI Zine-El-Abidine, Professeur à l'université de M'sila, BENOUIS Abdelhalim Professeur à l'université de Guelma et BOUDAUD Zine-Eddine Professeur à l'université d'Oum-El-Bouaghi, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous le personnel des laboratoires de la Cimenterie de Hammam Dalâa "LAFARGE".

Résumé:

Les gisements calcaires exploités par les centrales de concassages concentrées au Nord du pays génèrent des quantités importantes de résidus inférieurs à 3mm non exploités qui constituent à la fois une gêne environnementale et une perte de matière première et occupent des aires de stockage importantes. Le premier objectif de ce travail expérimental porte essentiellement sur l'utilisation de ces résidus comme composant du mortier et du béton en substituant une partie de sable de dune dans le but d'améliorer les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques du mortier et du béton, de diminuer le coût de réalisation des constructions et de préserver les aires de stockages et contribuer à lutter contre la pollution de l'environnement. L'addition du sable concassé au sable de dune nous a permis d'obtenir un sable mixte normalisé de meilleures caractéristiques (granulométrie, module de finesse, masse volumique apparente, masse spécifique, porosité, absorption d'eau). Cette investigation nous a permis aussi d'analyser les propriétés du mortier (béton) frais et durci et a révélé une amélioration notable des propriétés rhéologiques du mortier (béton) frais et propriétés mécaniques du mortier (béton) durcis, l'augmentation du pourcentage de sable concassé a engendré un besoin en eau plus important qui a un effet néfaste sur la résistance mécanique alors l'incorporation de 1% de MEDAFLOW 30 (un réducteur d'eau) a permis de maintenir la quantité d'eau réduite. L'ajout de 40% à 50% de sable concassé a donné lieu à une augmentation de la résistance mécanique du mortier et du béton.

Mots-clés: Propriétés physiques et mécaniques, sable de dune, sable concassé, mortier, béton, adjuvant

ABSTRACT

This experimental study investigates the effect of using binary natural fine aggregates (dune sand and crushed sand) on mortar and concrete. This method is utilized to modify the particle size distribution of various sands used in mortar (concrete). For this investigation, two sands were used: a dune sand (DS) and crushed sand (CS) at different proportions in mortar. The effect of the quality and grain size distribution of natural fine aggregates (DS and CS) on the physical properties of binary sand concrete (apparent or bulk density, absolute or gravity density, porosity, fineness modulus, particle size distribution and water absorption). The properties of fresh and hardened mortar (concrete) were also analysed. The results obtained showed that the mechanical strength of mortar depends on the nature and particle size distribution of sand studied. This study shows the potential of this method to make mortar with binary sand (dune and crushed fine aggregates) in order to improve the physical properties of sand. The increase in the quantity of mixing water generated by addition of quarry waste was modified by the addition of a superplasticizer or water reducing admixture (Medaflow 30) what led to the improvement of the physical and mechanical properties of the mortar. The inclusion of crushed sand (CS) at replacement levels of 40 % to 50% resulted in a increase in the mechanical strength of the mortar. However, the improved performance was observed when quarry waste as fine aggregate was used in presence of chemical admixture (1% of Medaflow 30).

Keywords: Crushed sand; dune sand; chemical admixture; mortar; concrete, physico-mechanical properties.

SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	XI
Introduction	1
Contexte général de la recherche.....	1
Intérêts de la recherche... ..	3
Aperçu sur la thèse.....	4

Premier Chapitre Revue Bibliographiques Sur Les Granulats, Bétons ET Mortiers

1.1. Introduction.....	3

A- Granulats

1.2. Classification des granulats.....	6
1.3. Sable.....	6
1.3.1 Sable de dune	8
1.3.2 Sable de carrière.....	9
1-4 Fabrication des graviers et sable concassés.....	10
1-5 La dépendance des sables concassés de la roche maternelle.....	10
1.6 Rôle du sable dans le mortier et le béton.....	10
1-7 Evaluation de la qualité des sables	11
1-7-1 Forme des grains	11
1-7-2 Adhérence au liant.....	12

1-7-3 Granularité (composition granulométrique)	12
1-7-4 Grosseur du sable	16
1-7-5 Porosité du sable.....	16
1-7-6 Absorption	17
1-7-7 L'altérabilité des granulats (gravier, sable) et réaction alcalis-granulats.....	18
1-7-8 Impureté du sable.....	18
1-7-9 Traitement des sables	20
1-7-10 Choix des sables.....	21

B- BETON ET MORTIER

1-8 Structure du béton et mortier.....	21
1-9 Propriétés du béton (mortier).....	21
1-10 Adjuvants utilisés dans les bétons et mortiers	23
1-10-1 Mode d'action de l'adjuvant	23
1-10-2 Différents types d'adjuvants.....	23
1-11 Composition du béton	26
1-11-1 Méthode des volumes absolus.....	26
1-12 Composition de mortier	31

Deuxième Chapitre

Etat Actuel Des Connaissances

2.1 Introduction	33

A- Valorisation des sables de concassage

2- 2 Travaux généraux	33
2.2.1 Valorisation des sables de concassage dans les mortiers et les bétons courants.....	33
2.2.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires.....	42

2.2.3 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans ; les dans les bétons à hautes performances.....	46
2.2.4 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les ; bétons courants.....	47
2.2.5 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les . bétons autoplaçants	52
2-2-6 Conclusion.....	54

B- Ciment et processus d'hydratation

2-3 Introduction	54
2-3-1 Le processus d'hydratation du ciment:.....	55
2-3-1-1 Hydratation des silicates	55
2-3-1-2 La chronologie d'hydratation	56
2-3-2 Les propriétés des principales phases hydratées.....	58
2-3-2-1 La portlandite	58
2-3-2-2 Les silicates de calcium hydratés	59
2-3-2-3 Les aluminates de calcium hydratés	60
2-3-2-4 L'ettringite	60

C - Les superplastifiants et leurs modes d'action

2-4 Historique	61
2-4 -1 Utilisation, adsorption et mode d'action des superplastifiants.....	62
2-4-2 Paramètres influents.....	64
2-4-3 Conclusion.....	67

D - Béton:

2-5-1 Introduction	67.
2-5-2 Historicité	68
2-5-3 Les composants d'un béton	69
2-5-3-1 Pâte de ciment	70
2-5-3-2 L'eau.....	71
2-5-3-3 Les adjuvants	72
2-5-3-4 Les granulats.....	73
2-5-4 Malaxage des constituants	76
2-5-5 Qualités essentielles d'un béton	77

Troisième Chapitre

Matériaux Et Méthodes De Caractérisation

3. Introduction	99.
3.1 Identification des granulats	99
3.1.1 Les graviers.....	100
3.1.2 Sables	104
3.2 Le ciment.....	115.
3.2.1 Caractéristiques physico – mécaniques.....	115
3.2.2 Analyse chimique du ciment.....	116
3.3 Adjuvant.....	117
3.3.1 Action du MEDAFLOW 30.....	118.
3.3.2 Domaine d'application.....	118
3.3.3 Dosage	119.
3.4 Eau de gâchage.....	119
3.5. CONCLUSION.....	120

Quatrième Chapitre

Mortier a Base De Sable Mixte

Avec Et Sans Adjuvant

4.1 Introduction	121
4.2 Définition.....	121
4.3 Rôles.....	122
4.4 Détermination de la composition du mortier.....	122
4.4.1 Détermination de la composition du béton.....	122
4.5 Essais et procédures.....	124
4.5.1 Détermination de la fluidité du mortier frais par méthode d'enfoncement du cône (Méthode RUSSE).....	124
4.5.2 Détermination de la masse volumique.....	124
4.5.3 Détermination de la résistance mécanique du mortier durci.....	125
4.5.4 Capacité d'absorption.....	126
4.6 Discussion des résultats.....	130
4.6.1 Fluidité.....	130
4.6.2 Masse volumique.....	131
4.6.3 Capacité d'absorption.....	132
4.6.4 Rapport E/C.....	132
4.6.5 Résistances mécanique.....	133
4.7 Conclusion.....	140

Cinquième Chapitre

Béton a Base De Sable Mixte Adjuvanté

5.1	Introduction.....	142
5.2	Essais, Procédures et Résultats.....	143
5.2.1	Détermination de la composition du béton.....	143
5.2.2	Détermination de la fluidité du béton frais.....	145
5.2.3	Détermination de la résistance à la compression des bétons durcis à différents âges.....	145
5.2.4	Détermination de la masse volumique.....	146
5.3	Discussion et analyse des résultats.....	152
5.3.1	Fluidité.....	153
5.3.1.1	Réduction d'eau de gâchage	153.
5.3.1.2	Rapport E/C	154
5.3.2	Résistance mécanique.....	156
5.3.3	Masse volumique.....	160
5.4	Conclusion	164
	Conclusions générales et perspectives	166
	Bibliographie	168
	Annexe	181

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Classification des grains (d'après les normes Anglaise).....	11
Tableau 1-2: Fluidité des bétons frais.....	27
Tableau 1-3: Dosage en eau dans les bétons.....	28
Tableau 1-4: Valeur du coefficient α	29
Tableau 1-5: Consommation approximative de ciment.....	32
Tableau 2.1: Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, d'après Taylor.....	54
Tableau 2.2 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abram-norme NF EN 206-1.....	78
Tableau 3.1 : masse volumique apparente et masse volumique spécifique du gravier.....	100
Tableau 3.2 : Porosité – compacités – indice des vides.....	101
Tableau 3.3 : Coefficient d'absorption d'eau du gravier.....	101
Tableau 3.4 : Résultats d'essais Los Angeles.....	102
Tableau 3.5 : Analyse granulométrique des fractions de gravier.....	102
Tableau 3.6 : Analyse chimique du gravier concassé.....	104
Tableau 3.7 Dénomination des différents sables mixtes.....	104
Tableau 3.8 : caractéristique physique du sable de dune et sable concassé.....	105
Tableau 3.9 : Coefficient d'absorption du sable et taux d'humidité des sables.....	106
Tableau 3.10 : Equivalent de sable de dune et sable concassé.....	106
Tableau 3.11 : Analyse granulométrique du sable de dune et du sable concassé	107
Tableau 3.12: module de finesse des sables.....	108
Tableau 3.13 : Analyse chimique du sable de dune et du sable concassé.....	114
Tableau 3.14 : Caractéristiques du ciment (CPJ CEMII/A 42.5).....	116

Tableau 3.15 : Compositions chimiques du ciment CPJ CMII/A 42,5.....	116
Tableau 3.16 : Caractéristiques du MEDAFLOW 30.....	118
Tableau 3.17 : Masse moléculaire du superplastifiant.....	118
Tableau 3.18 : Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage.....	119
Tableau 4-1 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m ³ de béton.....	123
Tableau 4-2 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés sans adjuvant.....	126
Tableau 4-3 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés avec 1% de MEDAFLOW 30.....	127
Tableau 4-4: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	127
Tableau 4-5: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%)de MEDAFLOW 30.....	127
Tableau 4-6 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	128
Tableau 4-7 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30.....	128
Tableau 4-8 : Résistance à la traction des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	128
Tableau 4-9 : Résistance à la traction des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30.....	129
Tableau 4-10 : Résistance à la flexion des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant.....	129

Tableau 4-11: Résistance à flexion des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30.....	129
Tableau 4-12 : Degré d'absorption des mortiers étudiés à base de sable mixte à l'âge de 28 jours.....	130
Tableau 5.1 : Dénomination du béton.....	142
Tableau 5.2 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m ³ de béton.....	144
Tableau 5.3 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable de dune.....	147
Tableau 5.4 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S1.....	147
Tableau 5.5 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S2.....	148
Tableau 5.6 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S3.....	148
Tableau 5.7 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S4.....	148
Tableau 5.8 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte S5.....	148
Tableau 5.9 : Composition (de 1m ³) des bétons étudiés à base du sable mixte concassé.....	149
Tableau 5.10 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable de dune.....	149
Tableau 5.11 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S1.....	149

Tableau 5.12 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S2.....	149
Tableau 5.13 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S3.....	150
Tableau 5.14 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S4.....	150
Tableau 5.15 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S5	150
Tableau 5.16 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable concassé.....	150
Tableau 5.17 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable de dune.....	151
Tableau 5.18 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S1.....	151
Tableau 5.19 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S2.....	151
Tableau 5.20 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S3.....	151
Tableau 5.21 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S4.....	152
Tableau 5.22 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S5.....	152
Tableau 5.23 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable concassé.....	152

Liste des figures

Figure 1-1: Forme d'un granulat.....	12
Figure 1-2 : Fuseau de spécification pour les sables (Normes françaises).....	13
Figure 1-3 : Fuseau granulométrique français pour les sables utilisés dans les bétons.....	13..
Figure 1- 4: Fuseau de spécification pour la composition granulaire des sable utilisés dans les bétons (Normes françaises)	14
Figure 1-5 : Fuseau de spécification Anglais pour les sables utilisés dans les bétons	15
Figure 1-6 : Fuseau de spécification Russe pour les sables utilisés dans les bétons.....	15
Figure 1-7 : Fuseau de spécification pour les sables utilisés dans les mortiers	15
Figure 1.8 : Contrôle de fluidité du béton frais.....	30
Figure 2-1: Performances mécaniques des bétons à différents taux de poussière.....	35
Figure 2-2 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières ajoutées	36
Figure 2-3 : Teneur en air et densité des bétons frais à différents tau.....	37.
Figure 2-4 : Résistance à la compression des mélanges à différents taux de fille. À gauche le mélange BGK et à droite le mélange BGS	37
Figure 2-5 : Consistance des pâtes de ciment en fonction du pourcentage de substitution....	38
Figure 2-6 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression des pâtes de ciment.....	38
Figure 2-7 : Variation du rapport eau/ciment en fonction du pourcentage de fillers.....	39
Figure 2-8 : Variation de la densité réelle en fonction du pourcentage de fillers.....	39
Figure 2-9 : Variation de l'air en fonction du pourcentage de fillers.....	39
Figure 2-10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fillers	40

Figure 2-11 : Déformation des mortiers sans fillers ou avec remplacement partiel de 10 % de ciment par des fillers calcaires en masse.....	41
Figure 2-12 : Déformation des mortiers remplacés par 10 % en masse de fillers calcaires, et du mortier de contrôle.....	42
Figure 2-13 : Système de filtration des déchets de carrières (marquage circulaire) et récupération sous forme de poudres (marquage rectangulaire)	43
Figure 2-14 : Résistance à la compression des pâtes de ciments	44
Figure 2-15 : Résistance à la compression des BAP, le sable est remplacé partiellement par les fillers de carrières	46
Figure 2-16 : Résistance à la compression des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines.....	48
Figure 2-17 : Résistance à la traction des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines.	49
Figure 2-18 : Retrait en fonction du pourcentage de fines	49
Figure 2-19 : Performances mécanique des bétons calcaires	52
Figure 2-20 : Courbes d'étalement au cône d'Abrams des BAP pour les différentes combinaisons de sable roulé et de sable de concassage.....	53
Figure 2-21 : Résistance à la compression des BAP réalisés par Rmili	53
Figure 2-22 : Résistance à la traction des BAP réalisés par Rmili.....	53
Figure : 2.23 (a) grains de ciment (b) structure cristalline de la portlandite ; (c) image au MEB de cristaux de portlandite	58
Figure : 2.24 morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'Alite.....	60
Figure : 2.25 Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une peolote d'ettringite.....	61
Figure 2.26 : Utilisation d'un superplastifiant.....	63

Figure 2.27 : Mécanisme d'action d'un superplastifiant à base de polycarboxylates.....	64
Figure 2.28: Mécanisme d'action successive (Exemple de superplastifiant « Glenium » à base de polycarboxylates).....	64
Figure 2.29 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	69
Figure 2.30 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé.....	71
Figure 2.31 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie.....	72
Figure 2.32 : Utilisation des superplastifiants.....	73
Figure 2.33 : L'effet du dosage du superplastifiant.....	73
Figure 2.34 : Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres.....	75
Figure 2.35 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire.....	75
Figure 2.36 : Cycle de malaxage.....	76
Figure 2.37 : Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage.....	77
Figure 2.38 : Influence de la température du béton frais sur la demande en eau et sur l'affaissement.....	79
Figure 2.39 : Perte d'affaissement d'un béton au cours du temps.....	80
Figure 2.40 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement.....	80
Figure 2.41 : Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide.....	81
Figure 2.42 : Valeurs des résistances de la figure 1.15 en fonction du rapport C/E.....	84
Figure 2.43 : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport C/E.....	84
Figure 2.44 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton.....	85

Figure 2.45 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton.....	85
Figure 2.46 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme....	86
Figure 2.47 : Développement de la résistance de bétons confectionnés avec différents ciments pour un dosage de 335 kg/m ³	87
Figure 2.48 : Développement de la résistance de bétons de rapport E/C de 0,49 confectionnés avec différents ciments.....	87
Figure 2.49 : Les différents pores d'un béton, positionnement selon le milieu extérieur.....	88
Figure 2.50 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires.....	89
Figure 2.51: Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, influence du rapport E/C,.....	90
Figure 2.52 : Composition volumique d'une pâte de ciment hydraté sans apport d'eau externe, selon le modèle de Powers,.....	91
Figure 2.53 : Relation entre la résistance à la compression de mortiers et la porosité calculée à partir du volume des pores de diamètre supérieur à 20 nm.....	92
Figure 2.54 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton.....	93
Figure 2.55 : Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5.....	94
Figure 2.56 : Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment.....	95
Figure 2.57 : Augmentation relative de la résistance dans le temps de bétons ayant différents rapports E/C confectionnés avec un ciment portland ordinaire.....	95
Figure 2.58 : Augmentation de la résistance de bétons (mesurée sur des cubes modifiés de 150 mm) sur une période de plus de 20 ans ; condition de conservation humide.....	96

Figure 2 .59 : Influence de la température des deux premières heures suivant la mise en place sur la résistance du béton.....	97
Figure 3.1 : gravier issu de pierres concassées.....	100
Figure 3.2 : Analyse granulométrique des fractions 3 /8 et 8/16.....	103
Figure 3.3 : DRX du gravier concassé.....	104
Figure 3.4 :(a) sable de dune de Boussaâda, (b) sable concassé d’el Euche.....	105
Figure 3.5 courbe granulométrique du sable de dune.....	108
Figure 3.6 : Courbe granulométrique du sable concassé.....	109
Figure 3.7 : Courbe granulométrique du sable mixte S1.....	109
Figure 3.8 : Courbe granulométrique du sable mixte S2.....	110
Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable mixte S3.....	110
Figure 3.10 : Courbe granulométrique du sable mixte S4.....	111
Figure 3.11 : Courbe granulométrique du sable mixte S5.....	111
Figure 3.12 courbe granulométrique des sables mixte.....	112
Figure 3.13 : DRX du sable de dune.....	112
Figure 3.14 : DRX du sable concassé.....	113
Figure 3.15: DRX du sable mixte (60% S.de dune ,40% S. concassé).....	113
Figure3.16 : DRX du sable mixte (40% S.de dune, 60% S. concassé).....	113
Figure 3.17 : DRX du sable mixte (30% S.de dune ;70% S concassé).....	114
Figure 3.18 : DRX du sable mixte (70% S.de dune ;30% S concassé).....	114
Fig. 4-1 : Modélisation du mortier au béton équivalent (MBE).....	121
Figure 4-2 : Confection des éprouvettes prismatiques en mortier.....	124
Figure 4-3 : Détermination de la masse volumique des éprouvettes par pesage.....	124
Figure 4-4 : Mesure de la résistance à la flexion des éprouvettes 4X4X16 cm.....	126
Figure 4-5 : Mesure de la résistance à la compression sur demi- prismes.....	126

Figure 4-6 : Variation d'E/C du mortier en fonction du % de sable concassé	131
Figure 4-7 : Variation de la masse volumique du mortier en fonction du % de sable concassé.....	131
Figure 4-8 : Capacité d'absorption du mortier en fonction du % de sable concassé.....	132
Figure 4-9 : E/C fonction de la porosité du sable mixte.....	133
Figure 4-10 : E/C fonction de la capacité d'absorption du sable mixte sans adjuvant.....	134
Figure 4-11 : E/C fonction de la capacité d'absorption du mortier mixte avec adjuvant.....	134
Figure 4-12 : Resistance en compression à 28 jours en fonction du % de sable concassé....	136
Figure 4-13 : Resistance en flexion à 28 jours en fonction du % de sable concassé.....	136
Figure 4-14: Resistance en traction à 28 jours en fonction du % de sable concassé.....	137
Figure 4-15: Résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte.....	138
Figure 4-16 : Résistance à la flexion à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte...	138
Figure 4-17 : Résistance en traction des mortiers à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte.....	139
Fig 4- 18: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant...	139
Fig 4- 19: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant...	139
Fig 4- 20: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant	140
Fig 4- 21: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant.....	140
Fig 4- 22: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant.....	140
Fig 4- 23: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant	140
Figure 5.1 : compositions des bétons étudiés.....	142
Figure 5.2 : Mesure de l'affaissement du béton frais au cône d'Abrams.....	145
Figure 5.3 : Mode de Conservation des échantillons avant leur écrasement.....	147

Figure 5.4 : Sciage des éprouvettes 16 x 32 cm de béton.....	147
Figure 5.5 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de mortier.....	155
Figure 5.6 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de sable concassé.....	155
Figure 5.7 : Rapport E/C en fonction de la porosité du sable mixte.....	156
Figure 5.8 :Rc en fonction du mortier à 28j	157
Figure 5.9 :Rc en fonction du sable mixte à 28j	158
Figure 5.10 :Rc en fonction de la porosité à 28j	159
Figure 5.11 : Rc dans le temps avec sable mixte S2.....	160
Figure 5.12 : Masse volumique à 28Jours en fonction pourcentage de mortier	161
Figure 5.13 : Masse volumique à 28 Jours en fonction du sable mixte.....	161
Figure 5.14 : Masse volumique à 28Jours en fonction la porosité du sable mixte.....	162
Figure 5.15 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S2.....	163
Figure 5.16 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S3	163
Photo1:(70%mortier,30%gravier)	164.
Poto2:(60% mortier,40%gravier).....	164
Photo3:(50%mortier,50%gravier)	164
Poto4:(40% mortier,60%gravier)	164
Poto5:(30% mortier,70%gravier)	164

INTRODUCTION

Contexte général de la recherche :

Le sud de l'Algérie est connu pour ses dunes de sable, qui ornent les cartes postales et sont des destinations touristiques, mais aussi qui engloutissent les terres et les palmeraies et envahissent certaines oasis. De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple. En génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie, sont autant de raisons qui poussent à poursuivre l'exploitation de ce produit.

Les dix dernières années L'Algérie a connue une explosion dans le domaine de la construction des bâtiments, des infrastructures, des ouvrages d'art, la construction de routes et de 1300km d'autoroute pour répondre aux besoins toujours en hausse des citoyens et le développement du pays, alors de gros approvisionnements en matériaux sont exigés, les sables roulés alluvionnaires sont les plus couramment utilisés pour la confection des bétons et mortiers entrant dans ces ouvrages, les prélèvements excessifs de ces sables risque fortement de contribuer à l'épuisement des ressources et de provoqué des retombées néfastes sur l'environnement.

Le même problème se pose dans plusieurs régions du monde et vivent la même situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats pour mortier et béton. Les sables de concassage présentent sans aucun doute la meilleure alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières sont souvent considérés par les utilisateurs comme des « déchets », car ils sont riches en fines, parfois argileuses au demeurant. Ils sont alors quasi-systématiquement écartés pour un usage dans les bétons, bien que les spécifications d'emploi le permettent dans de nombreux cas.

Plusieurs pays ont déjà été amenés à prendre des mesures de préservation des ressources alluvionnaires en imposant des règles strictes limitant les prélèvements. L'Algérie par exemple a élaboré en 2005 [Loi n° 05-12, 2005] une instruction ministérielle organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux [Instruction,

2007]. Une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable. C'est le cas aussi au Maroc où une loi relative à l'exploitation des carrières a été promulguée en 2002 [Dahir n° 1-02-130, 2002]. Elle vise à valoriser les sables de concassage lavés en tant qu'alternative aux sables alluvionnaires pour la fabrication des bétons hydrauliques [Norme Marocaine 10.1.165, 1995]. Cette loi introduit de nouvelles exigences normatives propres à ce matériau.

Pour surmonter la forte demande en agrégats, il est nécessaire d'assurer une exploitation rationnelle des ressources disponibles dans le pays par une valorisation de déchets minéraux tels que les déchets de carrière, laitier de haut fourneau, déchets de briques, déchets de tuiles et céramiques et les déchets de sous-produits industrielle qui sont jusqu'à présent rarement utilisés en Algérie. Dans le cadre d'une politique de préservation du patrimoine national, Il est donc indispensable et nécessaire d'utiliser les déchets de carrières, déchets de sous-produit industriels,...etc dans la production de matériaux de construction.

En Algérie, des agrégats fins naturels ont été traditionnellement utilisés dans les mortiers et bétons. Cependant, de plus en plus de restrictions environnementales relatives à l'exploitation du sable de rivières et du sable de dune ont donné lieu à une recherche de matériaux alternatifs pour produire des granulats fins, en particulier près des grandes zones d'extension de grande agglomération et villes. Les granulats fins issus de la fabrication des graviers par les centrales de concassages (carrières) sont alors apparus comme une alternative intéressante aux agrégats fins naturels (sable de dunes) pour la fabrication des mortiers de ciment et de différentes sortes de bétons.

Les agrégats fins sont des matériaux granulés inertes utilisés dans la fabrication des mortiers et bétons. Pour réaliser un bon mélange de mortier et béton, les granulats fins doivent être propres, dur, fort et ne comportant pas de produits chimiques absorbés et d'autres matières fines qui pourraient entraîner la détérioration du béton et du mortier. Malheureusement, la majorité des sables naturels utilisés (sable de rivière, sable de dunes et le sable de mer) sont choisis pour des raisons de coût et de disponibilité [1,4]

Les propriétés du sable affectent la durabilité et la performance du mortier. Comme les granulats fins sont le composant essentiel du mortier, la forme et la texture des particules de sable concassé pourrait conduire à l'amélioration de la résistance du béton grâce à l'angularité et la rugosité des particules qui offrent un meilleur mode de serrage et une meilleure adhérence pâte ciment particules [6,8].

Les agrégats ont une influence significative sur les deux propriétés essentielles rhéologiques et mécaniques du mortier et du béton. Leur poids spécifique, la distribution de la taille des particules et la texture de surface influent nettement les propriétés des mortiers et bétons à l'état frais. D'autre Part, la composition minéralogique, la ténacité et le degré d'altérabilité des agrégats affectent les propriétés du mortier et du béton à l'état durci [7,10].

La durabilité des ouvrages est l'une des majeurs préoccupations des maîtres d'ouvrages, alors une grande importance est donnée à la qualité des granulats utilisés qui ne peut être sous-estimée. Les agrégats occupent généralement entre 60% et 75 % du volume du béton (70 % à 85 % en masse) et influent fortement les propriétés du béton frais et durci. Par conséquent, la sélection des agrégats est un processus important.

Bien que certaines caractéristiques globales des propriétés qui sont prises en compte lors de la sélection des agrégats devraient comprendre les paramètres suivants: la forme des particules, la texture de la surface, l'abrasion, la masse volumique, la masse spécifique, porosité et l'absorption d'eau [11,14].

Intérêts de la recherche

✓ Intérêt général

L'intérêt premier de cette recherche est la valorisation des sables de concassage pour la fabrication des mortiers et bétons, avec ou sans superplastifiant, en tant que ressource alternative aux sables alluvionnaires surexploités. Ainsi, les ressources alluvionnaires encore disponibles pourront être préservées pour les usages les plus nobles (bétons performants par exemple) [9, 15, 17].

Nous nous sommes donc intéressés à la valorisation de ce type de sable. Compte tenu de sa granulométrie (sable très fin, naturellement inférieur à 0.5 mm), de sa morphologie, de sa propreté et de sa dureté, nous nous sommes focalisés sur sa valorisation dans les Bétons et mortiers.

Nous pouvons raisonnablement penser que le remplacement d'une partie de sable de dune par le sable concassé permet d'améliorer les caractéristiques du mortier et béton et de contribuer à la préservation de la nature des fines générées par les carrières.

On propose aussi d'utiliser le sable mixte (de concassage et de dune) pour fabriquer des bétons autoplaçants, l'idée innovante étant que les sables calcaires fillérisés apportent directement la majeure partie des fines nécessaires au mélange. Incidemment, il s'agit également d'améliorer la durabilité des bétons et mortiers actuels car les sables alluvionnaires utilisés sont généralement pauvres en fines (lavage), conduisant ainsi à des bétons plutôt poreux. Ils contiennent parfois aussi des sels marins pouvant compromettre la pérennité des armatures. Les sables calcaires concassés ne présentent pas cet inconvénient.

✓ Intérêts scientifiques :

Ces dernières années, le béton est devenu, grâce à des progrès scientifiques qui ont mobilisé les principales disciplines de la science des matériaux, d'une extraordinaire diversité. S'il est toujours le matériau de construction le plus simple à fabriquer et à mettre en œuvre, avec des matières premières courantes et un matériel rudimentaire, il est aussi capable,

aujourd'hui, grâce à une technologie de formulation sophistiquée, d'approcher les performances mécaniques de l'acier, de présenter une résistance exceptionnelle aux attaques

physiques et chimiques et son extraordinaire aptitude à répondre à des cahiers des charges de plus en plus exigeants et celui d'un merveilleux champ d'expérience pour la Science.

Un mélange bien dosé entraîne un squelette granulaire le plus compact possible, cela va donc favoriser certaines propriétés du béton à l'état frais (écoulement et aptitude au filage) mais aussi certaines propriétés du matériau à l'état durci (résistance et durabilité) [1].

La porosité du béton et du mortier dépendent du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores.[2]

Mais sachant bien que la matrice du béton est composée de mortier et de gros granulats (graviers) donc pour obtenir un béton de qualité supérieure il faut donner beaucoup d'attention aux constituants de la matrice du béton (mortier et graviers), il est souvent avancé que l'adhésion entre le gravier et le mortier conditionne la résistance mécanique des bétons [3, 4].

On constate que le sable est l'élément inerte essentiel entrant dans la composition du mortier, une granularité continue du sable permet d'obtenir un squelette plus résistant et plus compact suite au remplissage successif par des grains de dimensions inférieures des vides laissés entre les grains de dimensions supérieures [5].

Le sable de dune, du fait du taux de fines élevé qu'il renferme et de l'homogénéité de ses particules qui engendrent des vides, aura naturellement pour effet d'accroître leur eau de mouillage, leur présence devrait, donc, conduire à un accroissement du rapport E/C et une diminution de l'adhérence des particules à la pâte de ciment entraînant inévitablement une baisse des performances mécaniques des mortiers [6].

L'ajout du sable concassé (résidus) contribue à l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques du béton et du mortier en corrigeant la granulométrie, diminuer la porosité du sable de dune, valoriser les ressources existante et contribuer à préserver l'environnement des fines générées par les carrières.

Alors, la formulation d'un béton ou d'un mortier sans ou avec adjuvant à partir de sable mixte ouvrirait de nouvelles perspectives aux chercheurs et aux entreprises de génie civil, en Algérie comme ailleurs.

Aperçu sur la thèse :

Cette thèse est constituée de six chapitres.

Chapitre 1 : Revue générale (donnant des généralités sur les caractéristiques des composants du béton et mortier, ainsi que les différentes méthodes de compositions).

Chapitre 2 : Etat actuel de connaissance sur : la valorisation des sables de concassages, l'hydratation du ciment, les superplastifiants et leurs modes d'action, les paramètres essentiels influant les caractéristiques rhéologiques, mécaniques du béton à l'état frais et durcis.

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux utilisés, description du matériel et essais effectués).

Chapitre 4 : Mortiers à base de sable concassés avec et sans adjuvants (comportant la discussion des résultats obtenus).

Chapitre 5 : Béton à base de sable concassés avec et sans adjuvants (comportant la discussion des résultats obtenus).

Chapitre 6 : Finalement, ce mémoire s'achève sur une conclusion générale des travaux réalisés et présenter les perspectives d'études de ces nouveaux mortiers et bétons fabriqués à partir de sable mixte (de dune et concassé) avec et sans adjuvant.

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRANULATS, BETON ET MORTIER

1-1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présente une revue générale en ce qui concerne les propriétés principales des granulats, notamment des granulats fin (sable), des adjuvants chimiques et quelques notions sur les bétons et mortiers dans lesquels les sables et les adjuvants sont souvent utilisés. Cela concerne l'objectif de cette présente thèse.

A- Granulats :

1-2 Classification des granulats :

Les granulats sont classés en catégories en fonction de leurs dimensions. Les règles AFNOR recommandent la classification et les appellations suivantes en fonction des diamètres des trous de passoire pour tamisage. [20-24]

-Farine, fines ou filler	- 0 - 0,1mm;
-Sable fin	- 0,1 – 0,4mm;
-Sable moyen	- 0,4 - 1,6mm;
-Sable gros	- 1,6 - 6,3mm;
-Gravillons (graviers) petit	- 6,3 - 10 mm;
-Gravillons moyens	- 10 - 16 mm;
-Gravillons gros	- 16 - 25 mm;
-Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) petits	- 25 - 40 mm;
- Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) moyens	- 40 - 63 mm;
- Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) gros	- 63 - 100 mm.

Cette classification s'avère très détaillée et la limite de séparation du sable (granulat fin) et du gros granulat (gravier) est 6,3 mm. Dans la pratique actuelle cette limite est fixée à 5 mm [20-21-24].

1.3 Sable :

On appelle couramment sables les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 35%.

A cette définition se rattachent les sables de concassage mais lorsque l'on parle "sables" on pense essentiellement aux sables naturels ; ces derniers sont abondant dans de nombreux pays où les réserves sont quasi inépuisables.

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches suivies d'un transport fluvial et par fois éolien. En règle générale, les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressive vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les plus résistants ; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituées de quartz devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît.

C'est ainsi que la fraction comprise entre 0,2 et 0,5mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%. Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent :

- grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau) ;
- grains ronds et mats (déplacement par le vent) ;
- grains non usés.

À côté du quartz, on trouvera dans la fraction la plus grossière des débris de roche et, présents en faibles quantités des débris de feldspath. Il est à noter que ces derniers sont surtout sous forme d'argile obtenue par destruction du réseau minéral par hydrolyse et en particulier en climat tropical caractérisé par une attaque chimique intense.

À cette composition classique des sables, peuvent s'ajouter des sulfates et des carbonates provenant de la cristallisation sous l'action de l'évaporation de sels en solution (en particulier dans les zones arides à faible pluviosité et forte évaporation).

En définitive, selon leur histoire géologique, les sables se distingueront les uns des autres par une multitude d'aspect : granulométrie, teneur et nature des fines, nature minéralogique, angularité, dureté, présence de matières humiques.

En Algérie, on fabrique des graviers de fraction 3/8 , 8/15 , 15/25,... C'est évident que la fraction qui précède la fraction 3/8 est considérée comme sable concassé.

On distingue les différents types de sable suivants.

i/ sable de dune : C'est une variété de sable de mer de qualité médiocre, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins.

ii/sable de carrière: Exploité à la carrière, souvent il contient de l'argile qui enrobe les grains de sable et empêchent ainsi la bonne adhérence pour remédier. Il faut un lavage pour débarrasser le sable des poussières et impuretés.

iii/sable de mer: Il est exploité sur les plages de mer. Il est généralement propre mais fin et chargé de sel et il est employé dans le béton après lavage. Mais il faut éviter son utilisation pour les ouvrages en élévation (dans le béton armé).

iv/ sable de rivière : Il est extrait par dragage du lit des cours d'eau. En général il est propre, mais il faut éviter que la fraction fine du sable soit emportée par le courant d'eau lors du dragage. Car le manque de la partie fine augmente la quantité du ciment dans le béton ou mortier.

v/Sable artificielle: c'est un sable de broyage ou de concassage obtenu à la centrale de concassage en broyant des roches dures, des tuiles, des briques et des scories (sous produits des hauts fourneaux).

Le sable de dune est un sable naturel et le sable de carrière est appelé concassé qui font l'objet d'étude de cette présente thèse.

1.3.1 Sable de dune :

Le sable de dune est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation de différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée à partir du quartz. Il se caractérise par une granulométrie fine et très serrée [51].

Aujourd'hui, lorsqu'on évoque le sable de dune, c'est principalement pour rappeler qu'il englutit les terres, les palmeraies, et menace d'envahir certaines oasis.

Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers. Mais, l'utilisation de cette matière avec sa forme actuelle, comme constituant principal du béton, n'apparaissait qu'après la naissance du béton de sable en 1853 par COIGNET.F [50].

Pourtant, en modifiant notre point de vue, le sable de dune peut être considéré comme une source quasi inépuisable de matériau. L'utilisation et l'exploitation future de ce type de sable constituent ainsi une des nouvelles préoccupations des chercheurs et intéressent différents domaines comme la microélectronique, l'énergie solaire (cellule photovoltaïque), la métallurgie, le génie civil, et le génie mécanique. Ses applications et son exploitation sont liées à sa teneur en silice et à la taille, la forme et la nature de ses grains .

Un grand intérêt s'inscrit pour la valorisation du sable de dune, son exploitation en génie civil présente un grand atout économique et environnemental pour l'Algérie. La hausse de la demande du sable de construction dans ce pays et l'incapacité des carrières locales à fournir du sable fin de granulométrie inférieure à 2 mm s'impose.

1.3.2 Sable de carrière :

Les matériaux de carrières calcaires sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées, par effet de blocage mécanique du système, du moins si leur résistance intrinsèque le permet. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau

(efficace) plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

Généralement, les sables de concassage présentent une bonne distribution granulaire, comparativement aux sables de rivières lavés qui manquent souvent de fines. Les classes granulaires de la plage [0,1 - 0,5 mm] présentent dans les sables de concassage sont essentielles à la stabilité du béton frais [53].

1-4 Fabrication des graviers et sable concassés :

Dans la nature la décomposition des roches peut-être naturelle sous l'action des éléments climatiques (gel, ruissèlement des eaux). Pour la décomposition artificielle, on choisit alors des affleurements d'un accès facile que l'on abat par tranches verticales de 3 à 6m de haut au moyen d'explosifs. Les débris d'explosion sont morcelés au marteau piqueur, puis envoyés dans des concasseurs successifs qui les réduisent à la grosseur voulue. Les produits concassés sont tirés les passoires tournantes appelées trommels et les éléments trop gros sont retournés aux concasseurs. On obtient ainsi des graviers de différentes fractions et du sable concassé.[24]

1-5 La dépendance des sables concassés de la roche maternelle :

Le sable concassé dépend de la roche maternelle en composition chimique, minéralogique, description pétrographique, dureté, stabilité physique et chimique et même de la couleur. Mais les autres propriétés sont différentes de la roche maternelle la forme, la texture de la surface, l'absorption d'eau,...etc. [20]

Les granulats en générale et le sable en particulier doivent provenir des roches :

-Stables, c'est-à-dire inaltérables à l'air, à l'eau et au gel. Ce qui exclut les roches feldspathiques et les schistes;

-Dures et n'ayant pas tendance à se feuilletter (comme nombreux, calcaires et schistes). Inattaquables par les ciments (certaines roches alcalines sont attaquées par les ciments alumineux).[24]

1-6 Rôle du sable dans le béton et mortier :

Dans le béton, le granulat occupe 3/4 de son volume et le sable occupe presque un tiers du volume total des granulats (sable et gravier).

Le mauvais sable ne donne pas des bétons et des mortiers de haute qualité. Il influe considérablement sur la stabilité et la performance structurale de ces derniers. Le sable (granulat) est toujours moins cher que le ciment, c'est pourquoi l'augmentation du dosage en sable conduit à une diminution du coût des bétons et mortiers. Mais la qualité du béton et mortier est surtout importante, alors il faut choisir le sable adéquat pour confectionner ces matériaux.

1-7 Evaluation de la qualité des sables :

1-7-1 Forme des grains :

Les normes Anglaise classent les formes des grains du granulat comme indiqué dans le tableau 2-1.[24]

Tableau 1-1: Classification des grains
(d'après les normes Anglaise) [24]

Classe	Description	Exemple
Ronde	Forme arrondie par l'attrition de l'eau	Sable déposé sur les rivières des fleuves, plages de mer, emporté par le vent
Irrégulière	Naturellement ou artificiellement irrégulier par l'attrition, et ayant des arrêtes arrondies	-----
Forme de plaquette	Matériaux dont l'épaisseur est relativement moins que les deux autres dimensions	-----
Anguleuse	Matériaux ayant des arrêtes vives et surface rugueuse	Gravier et sable concassé, laitier concassé
Forme d'aiguillé	Matériaux dont la longueur est considérablement plus grande que les deux autres dimensions	-----
Forme d'aiguillé et de plaquette	Matériaux ayant la longueur considérablement plus grande que la largeur et cette dernière est plus grande que l'épaisseur	-----

On distingue les formes suivantes pour les sables naturels : Anguleux ,sub-anguleux, sub-arrondie, rond et très rond.

Pour le granulat artificiel les concasseurs à mâchoires ont tendance à produire des granulats de mauvaise forme, écaillé, plaquettes, éléments plats [20]. Le coefficient volumétrique C_v permet de donner une idée précise sur la forme de l'élément considéré [29]. Pour un grain il est défini comme le rapport entre le volume V de grain et le volume V' de la sphère circonscrite de diamètre d (d - étant la plus grande dimension du grain) (voir figure 1-1)

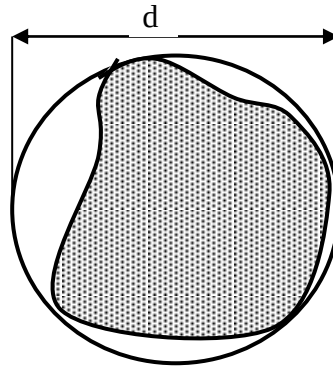


Figure 1-1: Forme d'un granulat

Pour un ensemble de grains on a :

$$C_V = \sum V_i / \sum (\pi d_i^3 / 6)$$

Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de plats et un coefficient élevé correspond à un granulat "cubique" ou "arrondi".

La notion de coefficient volumétrique est juste pour toutes sortes de granulats, y compris le gravier et le sable. Mais pour le sable le coefficient volumétrique est très difficilement réalisable par suite de la petite grosseur de ses grains surtout de la partie fine.

1-7-2 Adhérence au liant:

L'adhérence est un facteur important de la résistance à la traction des bétons et mortiers ainsi que leur résistance à la compression. A cet égard, les granulats (graviers et sable) des roches altérables et susceptibles de réagir au contact de ciment, sont à utilisées avec précaution.

Les sulfates (ex gypse) et les sulfures (ex pyrite) provoquent la désagrégation du béton par augmentation de volume des parties qui les contiennent. Le sable concassé possède une bonne adhérence avec le ciment dans les bétons et mortiers par suite de sa forme anguleuse et ses surfaces rugueuses. L'interaction chimique des granulats avec la pâte de ciment se manifeste en cas des sables d'origine calcaire et dolomitique [22,24].

1-7-3 Granularité (composition granulométrique) :

La composition granulométrique est présentée par les proportions des grains de différentes grosseurs. Les sables doivent avoir la bonne granularité, c'est-à-dire avoir des proportions rationnelles des grains de différentes dimensions, pour qu'ils aient la porosité minimale. La bonne granularité conduit à la bonne qualité du sable [22, 23, 24].

La composition granulométrique d'un sable est déterminée en tamisant le sable sec à travers un jeu standard de tamis dont les dimensions des trous sont de haut en bas : 5;2,5;1,25; 0,63; 0,315; et 0,14 mm ou encore des tamis intermédiaires. On détermine alors le refus partiel et le refus cumulé sur chaque tamis et le tamisât passant à travers chaque tamis.

La composition granulométrique est exprimée par une courbe granulométrique qui est formée sur la base des tamisât ou refus cumulés. Cette courbe doit se trouver entièrement dans

une zone normalisée (dite fuseau de spécification), ce qui traduit une bonne granularité du sable. Le fuseau de spécification est prescrit dans les normes de différents pays sous différentes formes. Ci-dessous nous présentons quelques uns dans les figures 1-2 jusqu'à 1-7.

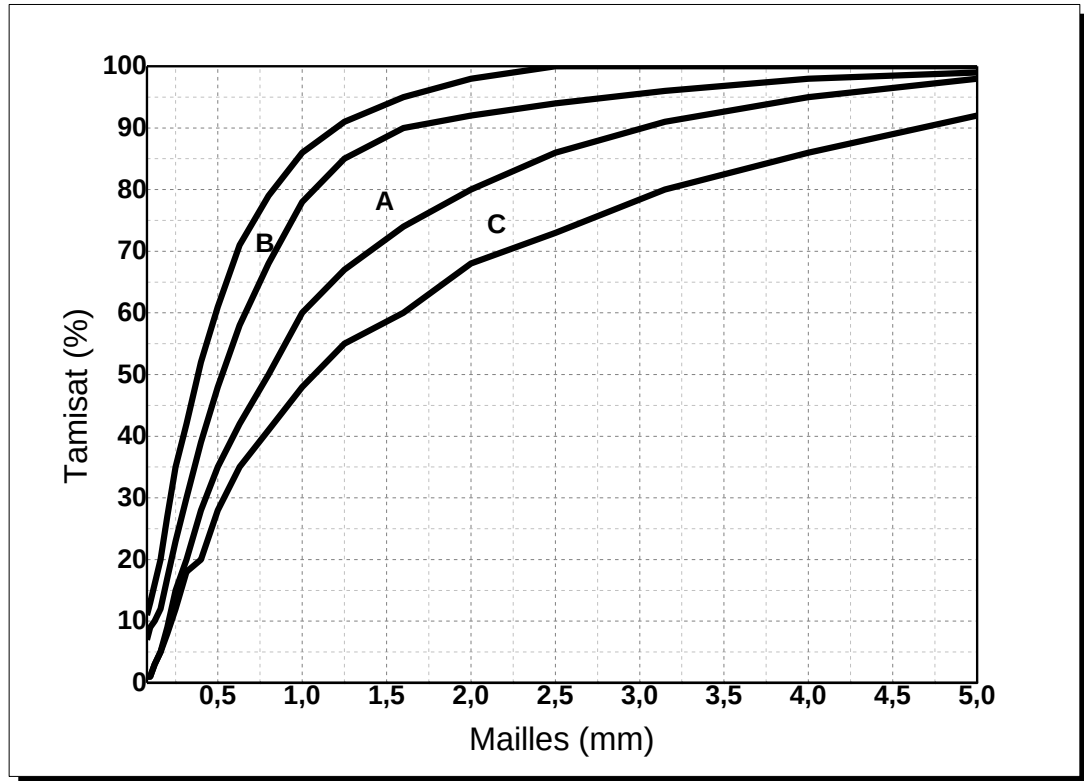


Figure 1-2 : Fuseau de spécification pour les sables (Normes françaises) [16]

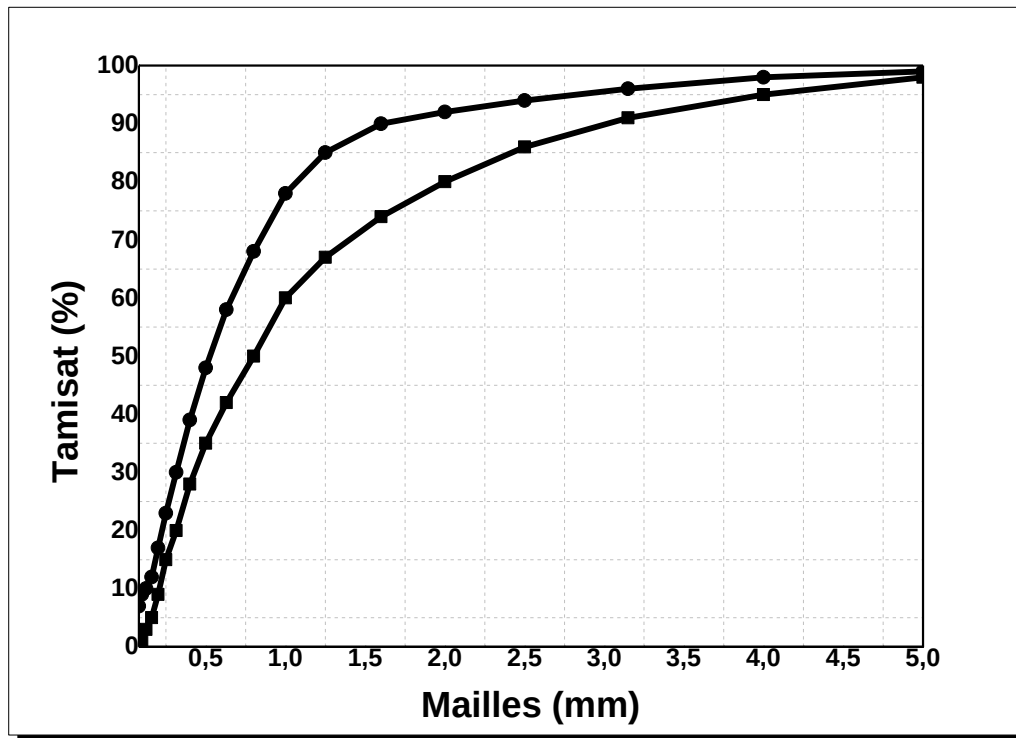


Figure 1-3 : Fuseau granulométrique français pour les sables utilisés dans les bétons. [16]

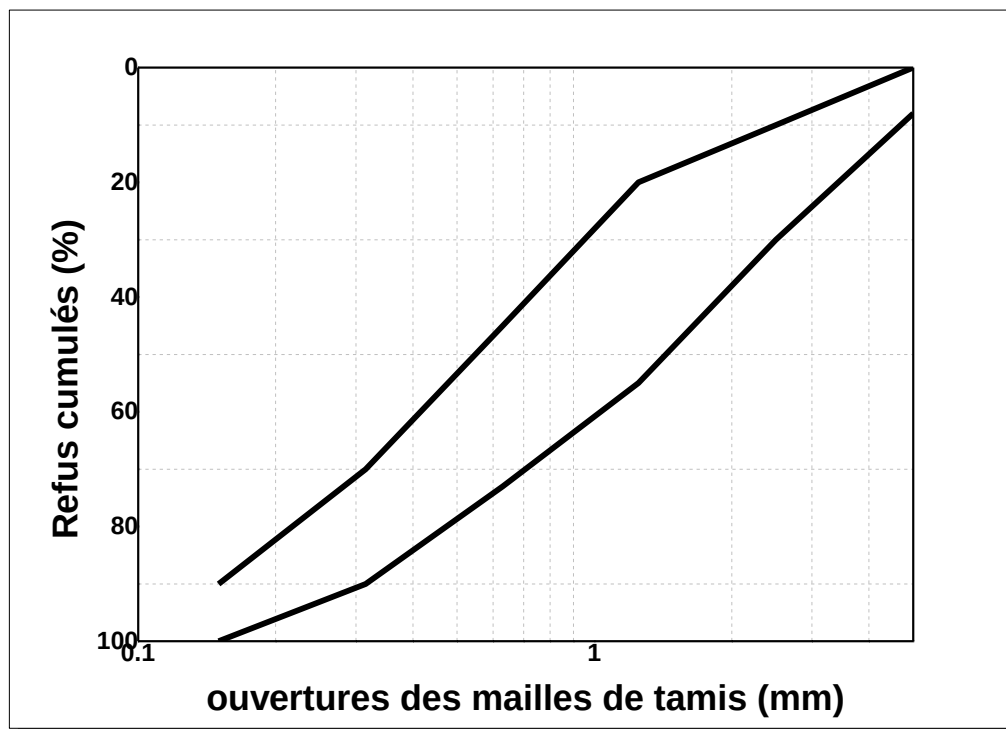


Figure 1-4 : Fuseau de spécification pour la composition granulaire des sables utilisés dans les bétons (Normes françaises) [16]

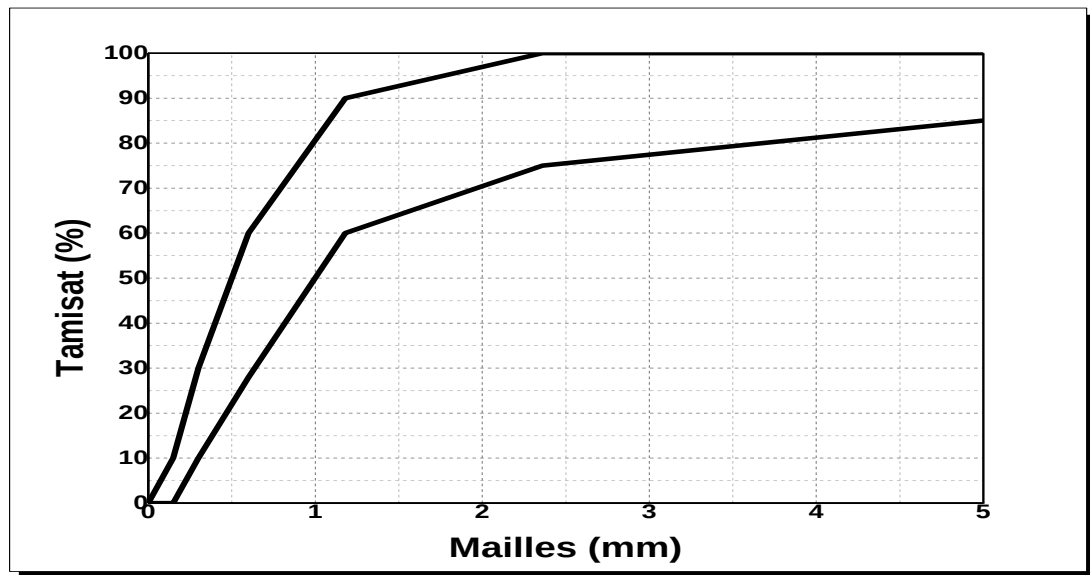


Figure 1-5: Fuseau de spécification Anglais pour les sables utilisés dans les bétons [24]

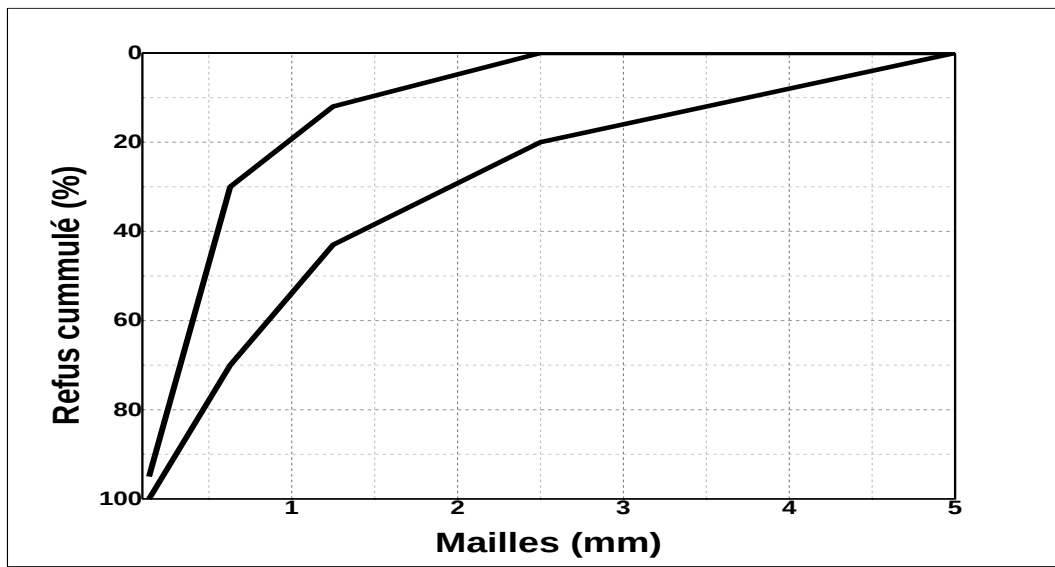


Figure 1-6: Fuseau de spécification Russe pour les sables utilisés dans les bétons [20]

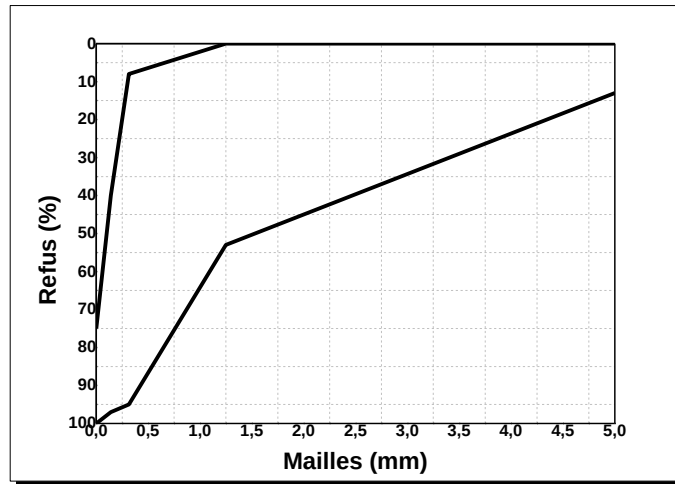


Figure 1-7: Fuseau de spécification pour les sables utilisés dans les mortiers [35]

A noter que : le fuseau de spécification français (Fig 1-2) comprend trois zones: zone "A" destinée aux sables préférentiels avec module de finesse 2,20 – 2,80, zone "B" pour les sables un peu trop fin avec module de finesse 1,80 à 2,20 et zone "C" pour les sables un peu trop gros avec module de finesse 2,80 – 3,20. Tandis que les autres fuseaux de spécification français (Fig. 1-3 ,Fig. 1-4), fuseau Anglais (Fig. 1-5) et le fuseau de L'ex- URSS (Fig. 1-6) comprennent uniquement une zone autorisée. Les courbes granulométriques des sables un peu trop fin se trouvent au dessus de cette zone et les sables un peu trop gros, leurs courbes sont situées au dessous de la dite zone autorisée.

Le fuseau granulométrique des sables utilisés dans les mortiers (Fig. 1-7) est plus large que celui utilisé dans les bétons car les mortiers ont des résistances en générale moins importante que celles des bétons.

1-7-4 Grosseur du sable :

La grosseur du sable n'est pas exprimée par le diamètre maximal des grains comme dans le cas des graviers et pierres concassées. Elle est exprimée en général par la grosseur de l'ensemble et cela d'une façon approximative. Alors on peut juger la grosseur du sable à travers la courbe granulométrique; Si la courbe se trouve en haut par rapport au fuseau de spécification le sable est gros. Si la courbe se trouve en bas le sable est dit fin.

Auparavant, en Ex –URSS on a calculé le diamètre moyen de l'ensemble des grains pour évaluer la grosseur du sable. Cependant le module de finesse s'avère plus important car il est utilisé fréquemment dans tous les pays pour apprécier la grosseur du sable [20, 21,26].

Le module de finesse est donné par la relation suivante :

$$M_f = (R_c^{0,16} + R_c^{0,315} + R_c^{0,63} + R_c^{1,25} + R_c^{2,5} + R_c^5) / 100$$

où

$R_c^{0,16}$, $R_c^{0,315}$, $R_c^{0,63}$, $R_c^{1,25}$, $R_c^{2,5}$, R_c^5 sont les refus cumulés des tamis de dimension de mailles 0,16, 0,315, 0,63, 1,25, 2,5 et 5 mm respectivement. D'après Komar [20], on distingue des sables selon leur module de finesse :

Sable gros	$M_f > 2,5;$
Sable moyen	$M_f > 2,5 - 2;$
Sable fin	$M_f > 2 - 1,5;$
Sable très fin	$M_f > 1,5 - 1.$

En générale on utilise de préférence des sables moyens et gros, parce qu'ils donnent des bétons et mortiers de meilleure performance malgré le dosage important en ciment.

1-7-5 Porosité du sable :

On distingue la porosité des grains séparés et la porosité de l'ensemble des grains. La porosité d'un grain est déterminée par la quantité des pores et vides dans celui-ci. Les grains du sable sont de petites dimensions, c'est pourquoi l'opération de détermination des pores du grain est très difficile et même impossible. Par contre, la détermination des pores et vides de l'ensemble des grains est plus simple. Dans ce dernier cas, non seulement on détermine les pores et les vides des grains mais aussi les vides qui existent entre les grains.

La bonne granularité du sable assure une faible porosité, ce qui traduit la bonne qualité de celui-ci et sa bonne performance dans le béton et mortier. Il exige peu de ciment pour combler tous les vides entre les grains du sable. En générale la fluidité du béton (mortier) frais et la résistance du béton (mortier) durci sont d'autant plus grandes que la porosité du sable est plus faible. La porosité du sable (l'ensemble des grains) peut-être calculée comme suite:

$$P = (1 - \gamma_s / \rho_s) \cdot 100\%$$

Où:

γ_s = masse volumique apparente du sable ;

ρ_s = Masse spécifique du sable

La masse volumique apparente du sable à l'état lâche est plus faible que celle à l'état compact. C'est pourquoi la porosité du sable à l'état compact est toujours inférieure à celle à l'état lâche.

1-7-6 Absorption:

Lors du contact avec l'eau, cette dernière s'infiltre dans les grains et remplit les vides entre les grains. Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très importante jusqu'à 20 – 25% du poids du sable [20]. Le sable fin absorbe plus d'eau par suite de sa porosité importante et sa grande surface spécifique.

Il faut prendre en compte cette humidité qui comprend la quantité d'eau se trouvant dans les grains du sable, sur leurs surfaces et dans les vides entre les grains.

Lors de la détermination de la composition du béton et mortier, si cette mesure n'est pas prise alors la quantité d'eau de gâchage devient superflue, ce qui diminue la résistance du béton d'après la loi "la résistance est fonction du rapport E/C"[27].

Dans [28], on présente une notion dite "besoin en eau" du sable que l'on détermine comme suite:

- ✓ On détermine d'abord le rapport $(E/C)_c$ requis pour une pâte de ciment ayant une consistance normale (l'étalement du cône sous l'action de vibration d'une table à secousses est égale à 170mm);
- ✓ On détermine ensuite le rapport $(E/C)_m$ requis pour un mortier de composition pondérale 1:2(c'est-à-dire une part de ciment mélanger à deux part de sable en poids) confectionné à base sable étudier et ayant une fluidité normale même fluidité que la pâte de ciment (c'est-à-dire l'étalement est aussi égale à 170mm).
- ✓ Enfin, on calcul le besoin en eau par la relation:

$$Be = [(E/C)_m - (E/C)_c]/2 \times 100\%$$

D'après [28] le besoin en eau est un facteur important au biais duquel on peut connaître l'influence du granulat sur les propriétés principales du béton (mortier) telle que la fluidité et la résistance.

1-7-7 L'altérabilité des granulats (gravier, sable) et réaction alcalis-granulats:

Ce problème à été étudié profondément aux U.S.A et au Canada [29,30].Le sable peut contenir d l'opale et des calcaires dolomitiques. Ces derniers peuvent réagir avec l'alcalis existant dans le ciment formant de nouveaux composés chimiques expansifs, ce qui peut causer des contraintes internes menant à la fissuration du béton [31].

Deux conditions nécessaires favorisant la réaction alcalis-granulat. La présence de SiO_2 hydraté dans le granulat et la teneur en alcalin supérieure à 0,6% dans le ciment utilisé pour le béton et mortier [15]. La teneur en alcalin dans le ciment est donner comme suite:

%Alcalin = $\text{Na}_2\text{O} + 0,638\text{K}_2\text{O}$ (d'après ASTM [15]).

Les granulats (sables) ayant des réactions alcalines sont appelés granulats réactifs et les autres sont appelés non réactifs. La réaction commence par l'attaque de l'hydroxyde alcaline, dérivée de l'alcalis (Na_2O et K_2O) dans le ciment, sur la silice dans le granulat. Alors se forme un gel d'alcali-silicate et une altération des bords des grains de granulat. Ce gel est de type "d'expansion illimité", il absorbe l'eau pour augmenter son volume ce qui provoque une fissuration et la destruction de la pâte de ciment.

1-7-8 Impureté du sable:

Le granulat en général et le sable en particulier contient souvent une ou plusieurs matières étrangères appelées impureté. D'après [20] on distingue deux types : impureté prohibée, impureté tolérée.

- ✓ L'impureté prohibée : Comme le charbon, le bois ou leurs résidus (cendres, mâchefer,...etc.), l'argile en morceaux et les scories comme matières faibles moins adhérente avec le ciment et pour cette raison elles peuvent diminuer la résistance et d'autres propriétés mécanique du béton et mortier.
Les matières organique même en faible quantité peuvent nuire au durcissement du ciment et les acides humiques formés par la décomposition des déchets végétaux se combinent aux alcalins du ciment. Par suite de sa nuisance ce type d'impureté est presque interdite dans le granulat en général et dans le sable en particulier.
- ✓ L'impureté tolérée comme les sulfates (gypse) et sulfure (pyrite), la teneur de ceux-ci dans le granulat est transformée en teneur en SO_3 qui ne doit pas dépasser la limite autorisée de 1%. Les matières solubles et extra-fines sont tolérées à condition de ne pas dépasser 5%. Remarquons que les matières extra-fines comme l'argile et les poussières peuvent former une pellicule sur les surfaces des grains de sable, ce qui empêche l'adhérence de ceux-ci à la pierre de ciment dans le béton et mortier.

Par conséquent il y aura une chute de résistance de ces matériaux, surtout la résistance à la traction et à la flexion.

En outre, l'argile et les poussières absorbent l'eau et augmentent ainsi le besoin en eau du sable, ce qui conduit aussi à une chute plus au moins importante de la résistance du béton et mortier [20, 21,22]. La teneur de cette impureté est autorisée différemment dans les pays du monde:

- ✓ En Ex-URSS les normes spécifient que la teneur en argile et poussière ne doit pas dépasser 2% pour les bétons de classe inférieurs à 300 et de 1% pour les bétons de classe supérieurs ou égale à 300.
Pour les granulats concassés d'origine calcaire la teneur autorisée est de 3% pour les bétons de classe inférieur à 300 et 2% pour les bétons de classe supérieure ou égale à 300 [23].
- ✓ la norme Anglaise (BS882:1973) spécifie les teneurs suivantes autorisées en argile, limon et poussière :
 - *15% (en poids) dans les sables concassés des roches;
 - * 3% (en poids) dans les sables naturels ou concassés des cailloux.
- ✓ Aux U.S.A on autorise presque les même teneurs, mais en tient compte de différentes sortes de bétons : Bétons soumis à l'abrasion et d'autres [24]. Dans le premier cas la

teneur des matières fines traversant le tamis de dimension 75μ (N° 200) est limitée jusqu'à 3% du poids du sable et dans le deuxième cas cette limite est de 5%. On prescrit séparément la teneur en argile, limon et particules friables inférieur à 3% dans les sables.

La norme américaine ASTM (C33-78) [25], spécifie la teneur autorisée des particules friables comme suites:

Type de particules	Teneur maximale dans le sable, %
- particules friables	3,0
- particules tendres	--
- charbon	0,5 - 1

Les argiles présentes la pollution la plus fréquente. Leur présence entraine toujours une diminution de résistance alors il faut veillez à ne pas dépasser les limites spécifiées pour chaque technique [25].

La répartition des impuretés doit être uniforme, en aucun cas on ne doit trouver des morceaux d'impuretés ayant un volume supérieur à $0,5 \text{ cm}^3$. La teneur en matière extra-fines (limon, argile et poussière) est déterminée par méthode de lavage ou à travers l'équivalent de sable.

1-7-9 Traitement des sables:

Le traitement du sable consiste à le faire débarrasser de ces éléments nuisibles à sa qualité c'est-à dire le faire débarrasser des impuretés des éléments poussiéreux, argileux, vaseux, des sels, des sulfates, mica, ...etc.

Afin d'obtenir un sable de qualité fiable et de composition granulométrique acceptable, et parmi les méthodes de traitement nous citons : Méthode de lavage, méthode de ventilation et méthode de mélange de sables.

✓ Méthode de lavage :

Cette méthode consiste à éliminer une partie des grains fins c'est-à-dire éliminer l'excès de filler et diminuer le taux d'impureté existant dans le sable. Cette méthode présente des avantages et des inconvénients. Parmi les avantages on cite : Méthode simple et propre, élimine en même temps les grains fins et les impuretés de toutes natures. Parmi les inconvénients on cite : demande beaucoup d'énergie pour le séchage après lavage et un coût élevé [61].

✓ Méthode de ventilation:

Cette méthode à pour but d'éliminer l'excès de filler et elle présente les avantages et les inconvénients suivants :

- Avantages :

- * Le sable sera utilisé directement après traitement, car il reste à l'état naturel sec;
- * Pas besoin d'eau qui est rare dans certaines régions ;
- * la réalisation est facile et plus rapide par rapport à la méthode de lavage.
 - Inconvénients :
- * Elimine uniquement les grains fins mais les impuretés peuvent rester encore dans le sable,
- * Demande beaucoup d'énergie pour faire fonctionner les ventilateurs,
- * Pollution de l'environnement par la poussière [61].

✓ **Méthode de mélange des sables :**

Cette méthode de mélange de deux sables est destinée pour l'obtention d'un sable de bonne composition granulométrique si la granulométrie du sable s'avère incompatible (courbe granulaire ne se trouve pas entièrement dans le fuseau de spécification). Il faut l'améliorer en ajoutant les fractions manquantes ou insuffisantes ou en éliminant les fractions superflues. Ceci est difficile à réaliser en pratique pour les grandes quantités de sable aux chantiers, par suite du manque d'équipements nécessaires en particulier les tamis de différentes dimensions.

On utilise souvent la méthode du mélange de deux sables avec un ou deux sables pour obtenir un sable mixte compatible. Alors il faut déterminer la proportion de chaque sable dans le mélange en employant " le diagramme rectangulaire " cette méthode est exposée en détail dans [35].

1-7-10 Choix des sables :

Le choix des granulats (gravier et sable) pour les bétons et mortiers peut-être fait en fonction de plusieurs critères dont les principaux sont :

- La résistance aux ambiances agressives ;
- Les caractéristiques mécaniques (du granulat et de la roche maternelle);
- L'adhérence au liant. [16]

D'après [15], quand le choix est possible, il porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la forme, la granulométrie et l'altérabilité. En fait dans bien des cas le choix est restreint, du fait de la distance qui sépare le chantier de la carrière et de l'indice de coût du transport sur le prix de revient. Mais il est parfois nécessaire de s'approvisionner à une carrière plus éloignée afin de satisfaire aux exigences des cahiers de charges.

B- Béton et Mortier :

1-8 Structure du béton et mortier :

Un béton est fait de bons matériaux mélangés en proportions calculées soigneusement pour obtenir une masse parfaitement homogène [32]. D'après sa structure le béton durci est considéré comme un conglomérat naturel, dans lequel les grains de sable s'arrangent dans les vides entre les grains de gravier et les grains sont liés les uns aux autres par des couches minces de la pierre de ciment. Le gravier représente le squelette du béton, ce qui permet à ce dernier de résister aux charges appliquées.

Le mortier peut-être considéré comme un béton sans gros granulats (gravier ou pierre concassée) dans lequel le sable joue le rôle de squelette et la pierre de ciment vient occuper les vides entre les grains de sable [33].

1-9 Propriétés du béton (mortier):

Le béton frais (après gâchage) et le béton durci (après durcissement) possèdent des propriétés importantes qu'on doit déterminer pour apprécier la qualité de ce matériau [34,35]. Les propriétés principales sont. L'ouvrabilité (maniabilité), résistance et durabilité.

L'ouvrabilité est l'aptitude que présente le béton à être transporté sans ségrégation et sans ressuage de l'eau et l'aptitude à être mis en œuvre facilement sans malfaçon (c'est à dire assurer une grande homogénéité) [31,36]. Une bonne ouvrabilité à pour but une garantie d'une grande qualité du béton durci. L'aspect principal de l'ouvrabilité est la fluidité qui est influée par les facteurs suivants :

- Granularité des granulats, leurs formes et l'angularité de surface des grains ;
- La composition du béton surtout le dosage en eau dans le béton et l'addition des fluidifiants et plastifiants.

La résistance du béton (mortier), se traduit par la capacité du béton (mortier) de résister aux charges. Cette propriété dépend nettement de la qualité des granulats, du ciment et de la composition du béton (mortier).

La résistance du béton peut être exprimée par l'expression suivante [20,37]:

$$R_b = A.R_c(\% \pm 0,5) ;$$

où: A: coefficient dépendant de la qualité des granulats et ciments, A est d'autant plus grand que la qualité des granulats et ciments est meilleurs [20].

$$R_b = G.R_c(\% - 0,5)$$

où:

G: coefficient granulaire déterminé en fonction de la qualité des granulats et de la dimension maximale du gravier. Ces expressions sont utilisées en EX-URSS et en France pour déterminer la composition du béton.

Comme le béton, le mortier possède les mêmes propriétés mais les méthodes et les équipements pour déterminer ses propriétés sont différents de ceux qui sont utilisés dans le cas du béton. Même la résistance du mortier est exprimée par d'autres expressions que celles du béton. Nous citons ici deux expressions de la résistance des mortiers [20]:

$$R_m = 0,25 R_c (C/E - 0,4) , \quad \text{où } R_c \text{ activité du ciment .}$$

Cette relation est valable pour les mortiers posés sur une base compacte. Si la base est poreuse, elle aspire l'eau du mortier en le rendant compacte, la résistance croît de 1,5 fois à peu près [20].

La résistance du mortier dépend aussi de la consommation du ciment et de la qualité du sable ce que l'on voit de l'expression suivante :

$$R_m = K.R_c (C - 0,05) + 4$$

où : K : Coefficient dépendant de la grosseur du sable.

- Pour les sables fins	K = 0,50 - 0,70
- Pour les sables moyens	K = 0,80
- Pour les sables gros	K = 1,00

C : Dosage en ciment.

1-10 Adjuvants utilisés dans les bétons et mortiers :

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps, les romains additionner par fois du sang d'animal et des blancs d'œufs comme plastifiants à leurs bétons dès 1850.

Les additions de chlorure de calcium comme accélérateur, du sucre comme retardateur, datent du début du siècle.

La commercialisation de ces ajouts a commencé plus tard vers 1910-1920, il s'agissait surtout, à l'époque d'hydrofuges et d'accélérateurs. Les plastifiants furent commercialisés en 1935, les entraîneurs d'air vers 1948, plus récemment, sont apparus les antigels et les produits de cure et depuis 1960 les adjuvants non pas cesser de se multiplier de se diversifier.

Les fabricant mettent au point des produits mieux adaptés aux besoins de la construction moderne grâce au développement de l'industrie chimique [31].

Avec l'évolution de l'utilisation des adjuvants dans plusieurs pays, alors il est considéré comme cinquième composant du béton et comme quatrième composant du mortier.

Un grand nombre d'adjuvants de différentes sortes ont été étudiés, fabriqués et utilisés [38,41,42,43,44,45,46,47,48,49].

On distingue les additions minérales et les adjuvants chimiques. Un adjuvant chimique est un produit qui, ajouté en faible quantité (proportions), améliore certaines propriétés du béton (mortier) par action chimique sur la pâte de ciment ils doivent satisfaire aux conditions particulières de chaque ouvrage [61].

En général chaque adjuvant à une action principale qui le définit et d'après laquelle il est classé, cependant il peut présenter d'autres actions secondaires.

1-10-1 Mode d'action de l'adjuvant :

Comme il est impossible d'avoir un ciment qui ne flocule pas, la solution est de lutter contre cette tendance qu'ont les grains de ciment à floculer. Ainsi, pour diminuer la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter, les fabricants d'adjuvants ont développé des molécules déjà bien connues pour leurs propriétés dispersantes.

Les grains de ciment Portland présentent un grand nombre de charges électriques sur leurs surfaces, si bien que lorsqu'ils rentrent en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, ils ont tendance à floculer. L'action mécanique des malaxeurs et des gros granulats durant le malaxage du béton n'est pas suffisante pour éliminer complètement ce phénomène de floculation des grains de ciment. Cette formation de floccs stables empêche la dispersion uniforme des grains de ciment et emprisonne à l'intérieur des floccs une certaine quantité d'eau qui n'est plus disponible pour lubrifier le mélange.

Pour obtenir une bonne ouvrabilité, il faut ajouter beaucoup plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater les grains de ciment. L'addition de cette eau de maniabilité produit une pâte de ciment hydratée poreuse.

Deux effets néfastes peuvent alors apparaître: une perte de résistance et une augmentation de la perméabilité. Ces effets diminuent donc la durabilité du béton.

D'un point de vue technologique, un ciment idéal serait donc un ciment où la seule quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des grains de ciment suffirait, dans un premier temps, pour obtenir un mélange suffisamment maniable pour se mettre facilement en place.

Une fois la mise en place terminée, l'eau de gâchage remplirait alors son rôle chimique, c'est-à-dire celui d'hydrater les grains de ciment en une masse de porosité minimale puisque la moindre goutte d'eau introduite initialement dans le béton se trouverait finalement liée chimiquement aux grains de ciment.

1-10-2 Différents types d'adjuvants :

✓ Accélérateur de prise :

Ce sont des produits solubles dans l'eau, ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Les produits de base qui entrent dans la composition des accélérateurs sont :

- Les chlorures : Calcium, Sodium, Aluminium,... (Leur utilisation est réglementée).

- Les bases alcalines : Soude, Potasse, Ammoniac, ainsi que leurs sels, Carbonate, Aluminate, Borate de soude ou de potasse, des Nitrates,..., se sont surtout des alcalins (soude, potasse) qui sont utilisés pour la prise et les chlorures (CaCl_2) pour le durcissement.

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2 % du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont utilisés pour le bétonnage en temps froid où lorsque un durcissement rapide est souhaitée. Ils augmentent le retrait, diminuent légèrement les résistances finales et accélèrent la corrosion des aciers (surtout CaCl_2 il est interdit en cas du béton précontraint).

✓ **Les retardateurs de prise :**

Ils agissent chimiquement, ils donneraient naissance à des produits colloïdaux enveloppant les grains de ciment et retarderaient ainsi la progression de l'hydratation pendant un certain temps, alors retarder le début de prise. Ils sont surtout employés pour la reprise de bétonnage, les transports du béton sur une grande distance et les bétonnages par temps très chaud. Comme retardateurs de prise on peut citer les produits suivants :

- Les acides phosphoriques, fluorhydriques, humiques ;
- Les lignosulfonates (de Calcium, de Sodium, d'ammoniac) qui contiennent des doses plus ou moins importantes de sucres;
- Les acides et sels d'acides hydroxy-carboxyliques;
- Les hydrates de carbone (glucose, saccharoses, amidon, cellulose) ;
- La glycérine, les phosphates et fluorures, les oxydes de zinc et de plomb.

En général, ces produits sont utilisés en très faibles doses. Ils ne modifient en principe que très légèrement les autres propriétés du béton.

✓ **Entraîneur d'air :**

Les adjuvants agissent en créant dans le béton un très grand nombre de petites bulles d'air (de 10 à 200 μ de diamètres). Ces petites bulles d'air ont un double rôle :

- Ils améliorent la résistance au gel du béton durci. En effet, les très nombreuses petites bulles d'air constituent des micro-vases d'expansion pour interstitielle en cas de gel;
- Ils améliorent la plasticité et l'ouvrabilité du béton. Les bulles d'air agissent comme étant des grains fins constituent de petites billes souples et sans frottement.

Les entraîneurs d'air sont, en général : des résines de bois traités, des lignosulfonates, des huiles minérales, des graisses. Ils sont commercialisés sous forme de liquide, de sel soluble ou de poudre à ajouter au moment du malaxage.

✓ **Hydrofuges :**

Ces produits protègent de l'humidité en arrêtant l'absorption capillaire et en améliorant l'étanchéité des bétons à l'eau sous pression. Ils agissent surtout physiquement en bouchant les pores et canicules grâce aux particules très fines qu'ils contiennent ou aux produits précipitables ou gonflant. On distingue :

- Les hydrofuges de masse : présentés sous forme de liquide ou de poudre à mélanger à l'eau de gâchage. Ce sont des produits fins qui obturent les pores dans le béton. On peut citer les hydrofuges suivants : Bentonite, filler.

- Les hydrofuges de surface : S'applique au béton durci. Ce sont des produits de traitement superficiel à base de silicate ou de fluosilicate,....

✓ **Antigels :**

Ce sont des produits (chlorures, résines,...) utilisés pour le bétonnage par temps froid (-10°C).

✓ **Produits de cure :**

Ce sont des produits résineux, qui pulvérisés sur la surface du béton frais, le recouvrant d'un film continue imperméable légèrement coloré s'éliminant après quelques semaines sans laisser de trace qui empêche l'évaporation de l'eau. Les produits de cure sont à base de :

- Résines, cires, ou paraffines en émulsion aqueuse ;
- Résines naturelles ou synthétiques dissoutes dans des solvants spéciaux (pétrolier) ;
- De cire ou de paraffines dissoutes dans un solvant pétrolier;
- De caoutchouc chloré.

✓ **Les fluidifiants (réducteurs d'eau) :**

Ce sont des adjuvants qui permettent soit réduction de la teneur en eau pour une même ouvrabilité, soit une augmentation de l'ouvrabilité à une même teneur en eau. Ces adjuvants améliorent l'aptitude à la déformation des bétons frais et mortiers sous l'effet d'un moyen de serrages donnés.

Ce sont souvent des produits organiques capables d'abaisser la tension superficielle ou interfaciale des liquides et de l'eau en particulier. Ils lubrifient les grains de ciment ceux-ci sont défloculés et individualisés et cette dispersion facilite le mouillage. Les fluidifiants les plus connus actuellement sont à base de :

- Lignosulfanates de Calcium (sous produit de la fabrication du papier par voie chimique): ce type de fluidifiant se présente sous forme d'un liquide soluble dans l'eau, directement mélangé à l'eau de gâchage à raison de 0,2 à 0,5 % du poids de ciment ce qui permet une diminution de 15 à 20 l d'eau /m³ de béton.

✓ **Les plastifiants :**

Ce sont des produits pulvérulents extrêmement fins. Ils ont le rôle d'améliorer la stabilité et l'homogénéité du béton en diminuant le ressuage et en augmentant la cohésion.

Ces adjuvants comportent souvent des produits très fins dont la majorité des grains est inférieure à 10 µ qui complètent la granulométrie du béton. On peut citer les plastifiants suivants : La bentonite (argile colloïdale) ; la chaux grasse ; le calcaire broyé et les pouzzolanes broyées [60]. Ces produits fins augmentent la viscosité du béton frais et diminuent la ségrégation.

1-11 Composition du béton :

La composition du béton est un facteur très important qui est l'objet d'étude de plusieurs chercheurs dans le monde et présentée dans plusieurs ouvrages [20, 51, 52, 54, 55, 56, 57].

La composition du béton à pour but de déterminer les proportions de divers constituants (ciment, sable, eau, gravier et adjuvants possibles) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera , après durcissement, les meilleurs caractéristiques (étanchéité, résistance, faible retrait,...).

Il y a beaucoup de méthodes de détermination de la composition du béton proposées et appliquées dans différents pays du monde :

- Méthode de Bolomey (méthode à granularité continue);
- Méthode de Valette à caractère expérimental (elle consiste à rechercher un béton plein à minimum de grains fins (sable), la granularité est discontinue.
- Méthode de Faury : Cette méthode tient compte, des coefficients
 - * de l'effet de paroi ;
 - * De la nature des grains ;
 - * De la plasticité recherchée ;
 - * De la vibration.

En principe elle aboutit à une granularité continue.

- Méthode générale du CES (Centre d'Essais des Structures) : elle est issue d'une synthèse des méthodes précédentes [62].
- Méthode pratique de Dreux-Gorisse [15,49].
- Méthode des volumes absolus [20].

1-11-1 Méthode des volumes absolus :

Cette méthode à été formulée par l'académicien de l'ex-URSS B.G.Scramtaiev. Elle a été considérée comme la plus rationnelle au concours en Ex URSS en 1960. Cette méthode est basée sur le principe suivant :

La somme des volumes absolus de tous les matériaux composant 1 m³ de béton frais est égale à 1000 litres. C'est à dire la porosité du béton frais est considérée nulle [20, 35]. D'après cette méthode de la détermination de la composition du béton comprend quatre parties suivantes :

A- Définir les données nécessaires :

1- Déterminer la grosseur maximale des grains de gros granulats D_{max} .

$D_{max} \leq (1/3 - 1/4)$ d'épaisseur de l'élément de construction;

$D_{max} \leq (2/3 - 3/4)$ de la distance entre deux barres de l'armature.

2- Déterminer la fluidité requise du béton frais d'après le tableau 1-2 :

Tableau 1-2: Fluidité des bétons frais [20]

Type des constructions ou des éléments de construction	Affaissement du cône d'Abrams, Cm
-Lits des fondations des bâtiments et des chaussées, sols.	0
-Revêtement des routes et d'aérodromes, constructions massives sans armatures (murs d'appuis, blocs massifs, fondations)	0 - 2
-Dalles, poutres, poteaux de grandes et moyennes section	2 - 4
-Constructions à parois minces, à armatures très dense	4 - 6

3- Si le sable n'est pas admissible au point de vue granularité, il est indispensable de le mélanger avec un autre sable et d'établir le rapport optimal entre les deux sables.

4- Si le gravier ou la pierre concassée est composés de plusieurs fractions, il est indispensable d'établir le rapport optimal entre eux en utilisant le diagramme de la meilleure granularité ou en faisant le choix d'une composition où la quantité des vides soit plus petite possible.

5- Déterminer les caractéristiques des matériaux utilisés par l'essai.

- Classe du ciment (activité du ciment).
- Masse volumique apparente et masse spécifique du ciment, sable et gravier (pierre concassée) à l'état sec
- Porosité du gravier (pierre concassée) calculée après sa masse volumique apparente et masse spécifique.

B- Calcul de la composition du béton :

1- Déterminer le rapport C/E selon les expressions :

a/ Pour béton à $C/E \leq 2,5$

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0,5) \quad (1) ;$$

D'où :

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5 \quad ;$$

b/ Pour béton à $C/E > 2,5$;

$$R_b = A' \cdot R_c (C/E + 0,5) \quad (2) .$$

D'où :

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A' \cdot R_c} - 0,5$$

2- Déterminer la quantité d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton frais. D'après sa fluidité et le type de gros granulat (gravier ou pierre concassée) en employant le tableau 1-3 :

Tableau 1-3: Dosage en eau dans les bétons [20]

Fluidité du béton frais (affaissement du cône d'Abrams) (cm)	Quantité d'eau dans 1 m ³ du béton, (l) par rapport à la grosseur du gravier, (mm)		
	10	20	40
0	175	160	145
1	185	170	155
2	190	175	160
3	195	180	165
5	200	185	170
7	205	190	175
8	210	195	180
10	215	200	185

Remarque :

Les données du tableau sont justes pour les bétons au ciment portland, au sable moyen et au gravier utilisé comme gros granulat.

Dans des conditions différentes la quantité d'eau indiquée au tableau, augmente :

- En cas d'utilisation d'un ciment portland pouzzolanique, (de 15 à 20 l/m³);
- En cas où le gravier est remplacé par des pierres concassées de 10 l/m³ ;
- Pour le sable fin, de 10 l/m³.

3- Déterminer la quantité de ciment pour 1 m³ de béton frais :

$$C = E \cdot C/E, \quad (\text{Kg}).$$

4- Déterminer la quantité de gravier (pierre concassée) pour 1 m³ de béton frais. D'après le principe de la méthode, la somme des volumes absolus de tous les composants du béton frais est égale 1 m³. (1000 l).

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g} = 1000 \quad (3)$$

Où :

C, E, S et G sont respectivement les dosages en ciment, eau, sable et gravier (pierres concassées) en Kg.

ρ_c , ρ_e , ρ_s et ρ_g , sont respectivement les masses spécifiques de ces matériaux, en Kg/m³ ; $\rho_e = 1$

La solution ciment-sable remplit les vides entre les grains du gravier (pierres concassées) avec un certain écartement alors on peut écrire :

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + E = P_g \cdot \frac{G}{\gamma_g} \cdot \alpha \quad (4)$$

Où :

P_g : porosité du gravier ; G/γ_g : volume apparent du gravier et $P_g.G/\gamma_g$: volume des vides.

α : Coefficient d'écartement (ou coefficient d'excès de mortier) α est défini d'après le tableau 1-4 pour les bétons fluides.

Tableau 1-4: Valeur du coefficient α [20]

Dosage en ciment (Kg) dans 1 m ³ de béton frais	Valeur de α				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,30	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,40	1,46	-	-	-

En résolvant simultanément les équations (3),(4), on détermine la quantité du gravier (Kg) pour 1 m³ de béton frais :

$$G = \frac{1000}{P_g \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}} \quad (5)$$

5/ Déterminer la quantité du sable (Kg) pour 1 m³ de béton frais. La quantité du sable est déterminée à partir de l'équation (3) :

$$S = \left| 1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_E} + \frac{G}{\rho_G} \right) \right| \rho_s \quad (6)$$

Ainsi sont déterminés les composants pour 1 m³ de béton frais (C,E,S,G) .

C/ Contrôler la composition calculée et déterminer la composition de laboratoire :

1- Contrôler la fluidité du béton frais par l'essai de l'affaissement du cône d'Abrams .

(Ac) alors trois cas peuvent se présenter :

- $Ac = Ac$ requis, la composition calculée est admise.

- $Ac < Ac$ requis alors on ajoute une certaine quantité de ciment et d'eau sans changer C/E pour parvenir à Ac requis . Enfin, calculer de nouveau la composition du béton.

- $Ac > Ac$ requis alors on ajoute peu à peu du sable et du gros granulat tout en maintenant leur rapport constant.

On arrive ainsi à obtenir la fluidité requise, après cela calculer de nouveau la composition du béton que l'on appelle composition modifiée.

2/ Contrôler la résistance du béton : On prépare trois gâchages :

i- Avec la quantité de ciment de la composition modifiée (C_1) ;

ii- Avec la quantité de ciment de composition modifiée + 10% (C_2) ;

iii- Avec la quantité de ciment de la composition modifiée - 10% (C_3) .

Les quantités d'eau, du sable et du gravier (pierres concassées) sont celles de la composition modifiée après le contrôle de fluidité. À partir de chaque mélange on prépare trois éprouvettes cylindriques ou cubiques que l'on conserve dans des conditions normales ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $w = 100\%$) pendant 28 jours, puis les éprouvettes sont soumises à l'écrasement.

D'après les résultats obtenus on trace la courbe de la résistance à la compression du béton en fonction de la quantité de ciment Fig 1-8. A partir de cette courbe on détermine la quantité de ciment (C^*) correspondant à la résistance requise du béton, ainsi on obtient la composition de laboratoire.

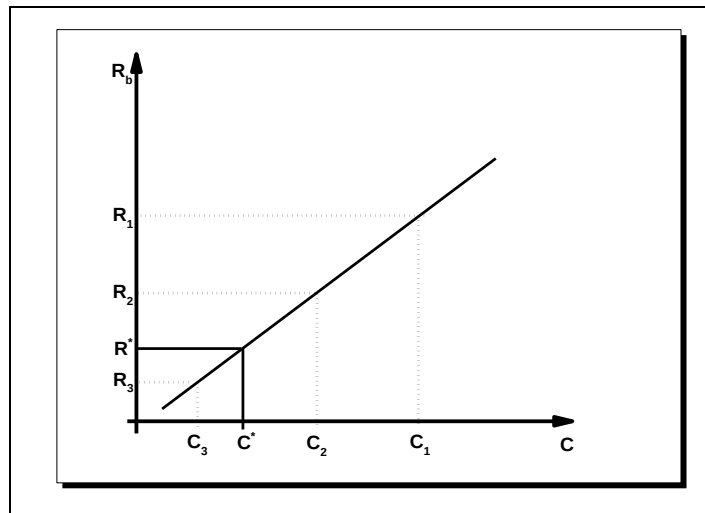


Figure 1.8 : Contrôle de fluidité du béton frais [20].

D/ Déterminer la composition d'exploitation (de chantier) :

En général le sable et le gravier (pierre concassées) au chantier sont humide, soit un taux d'humidité de W_s % et W_g %. On doit alors modifier les quantités du sable, du gravier et de l'eau comprises dans la composition de laboratoire pour avoir la composition d'exploitation du béton.

Les quantités de sable, gravier (pierres concassées) humide et eau pour 1 m^3 de béton frais sont calculées comme suite :

$$S_{ex} = S_l \left(1 + \frac{W_s}{100}\right)$$

$$G_{ex} = G_l \left(1 + \frac{W_g}{100}\right) \quad ;$$

$$E_{ex} = E_l - \frac{W_s}{100} \cdot S_l - \frac{W_g}{100} \cdot G_l$$

La quantité de matériaux nécessaire pour le dosage d'une bétonneuse de capacité V est C_V , E_V , ρ_V et G_V .

Notons que le volume d'un mélange de béton (V_b) est toujours inférieur à la somme des volumes apparents des matériaux secs constituant le mélange (V_c , V_s , V_g). Car les petits grains se placent dans les vides entre les gros grains.

Le coefficient de rendement du béton β est défini par la relation suivante :

$$\beta = \frac{V_b}{V_c + V_s + V_g} < 1 \quad ;$$

β varie entre 0,67 - 0,80 .

V_c , V_s , V_g masses volumiques apparentes du ciment, sable et du gravier en l .

$\beta.V$ quantité du béton frais obtenu dans la bétonneuse de capacité V en l.

$$C_V = \beta V \cdot C_l / 1000 \quad ; \quad E_V = \beta V \cdot E_l / 1000$$

$$S_V = \beta V \cdot S_l / 1000 \quad ; \quad G_V = \beta V \cdot G_l / 1000$$

Si le sable et le gravier sont humides, il faut modifier E_v , S_v , G_v et C_v par la méthode déjà indiquée ci-dessus.

En cas d'utilisation d'adjuvants chimiques comme les plastifiants et les accélérateurs, il faut calculer la quantité d'adjuvant dans 1 m³ de béton frais après la proportion spécifiée (en général, la proportion d'un adjuvant en matière sèche est de 0,2 - 0,25% de la masse du ciment et la proportion de CaCl_2 est de 1,5 - 2 %).

Si l'adjuvant est utilisé sous forme liquide alors il faut déterminer sa teneur en eau et diminuer la quantité d'eau contenu dans l'adjuvant de l'eau de gâchage.

Cette méthode s'avère simple, logique et facile à appliquer dans la pratique. C'est pourquoi elle est utilisée dans cette présente thèse pour déterminer la composition des bétons étudiés sans adjuvant et avec adjuvant.

1-12 Composition de mortier:

Il existe des méthodes différentes pour la détermination de la composition des mortiers. Parmi ces méthodes, on expose une assez simple et efficace qui comporte les étapes suivantes [35].

1- Détermination de la quantité de ciment (C en Kg) pour 1 m³ de sable (ou 1 m³ de mortier):

$$C = \frac{R_m}{0,7 \cdot R_c} \cdot 1000 \quad \text{Kg}$$

Où :

R_m : résistance du mortier.

Rc : classe (activité) du ciment.

Le volume apparent du ciment est donné par $V_c = C/\gamma_c$, l où : γ_c : masse volumique apparente du ciment, Kg/l.

2- Détermination de la quantité (En volume) de la pâte de chaux (s'il s'agit d'un mortier mixte) pour 1 m³ de sable :

$$V_{pc} = 0,17 (1 - 0,002 C) \quad ,$$

3- Expression de la composition du mortier (en volume) ciment, chaux et sable ($V_c : V_{pc} : 1$) où le volume du sable est égale à 1 m³.

4- Dosage en eau :

Le dosage en eau est déterminé par tâtonnement, en effectuant l'essai de fluidité afin d'obtenir la fluidité requise. En cas de manque d'essais, on peut le déterminer approximativement par la relation suivante:

$$E = 0,65 (C + P_c).$$

où:

P_c : Poids de la pâte de chaux.

A noter que si la chaux n'est pas utilisée dans le mortier, le facteur V_{pc} dans la relation sera supprimé.

En présence d'un adjuvant (fluidifiant ou plastifiant) le dosage en eau peu être plus ou moins réduit pour avoir la fluidité requise du mortier frais . Alors la résistance du mortier durci augmente sensiblement.

On peut conserver la résistance requise en diminuant le dosage en ciment, cela conduit à un effet économique important.

La consommation approximative du ciment pour les travaux de finissage de surface des panneaux et gros blocs et données dans le tableau 1-5 :

Tableau 1-5: Consommation approximative de ciment [20]

Type de mortier	Classe du mortier	Consommation de ciment (Kg/m ³)		
		300	400	500
Mortier à sable de roches broyées	75	320	270	240
Idem	100	370	310	280
Idem	150	470	390	350

CHAPITRE 2 :**ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES****2.1 Introduction :**

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des principaux travaux concernant les travaux généraux s'intéressant à la valorisation des sables de concassage dans les mortiers et les bétons courants avec ou sans superplastifiants, le mécanisme d'hydratation du ciment, la performance des superplastifiant.

Ce chapitre présente également les bétons ordinaires, les bétons autoplaçants, les bétons à hautes performances et leurs constituants.

a- Valorisation des sables de concassage**2- 2 Travaux généraux :****2.2.1 Valorisation des sables de concassage dans les mortiers et les bétons courants :**

Depuis les années mille neuf cent quatre vingt, les possibilités d'emploi des granulats calcaires dans la confection des bétons ont été étudiés. Certaines études françaises [65] ont tout d'abord montré que les calcaires de dureté moyenne à faible permettent de confectionner des bétons de caractéristiques très satisfaisantes, comparables à celles de bétons de granulats silico-calcaires ou siliceux. Mais ces bétons nécessitent souvent plus d'eau, notamment lorsque la teneur en éléments fins augmente, entraînant alors une baisse de résistance mécanique.

Toutefois, au jeune âge (< 48 heures), les résistances des bétons calcaires sont généralement supérieures à celles des bétons silico-calcaires ou siliceux. Les écarts de résistance trouvés semblent plus liés à la nature et au dosage en ciment qu'à la résistance propre des granulats [65]. Pour les mélanges granulaires pauvres en fines, une teneur minimale en ciment de 330 kg/m³ est recommandée [65].

D'autres études [66] ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle « actif » exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment. Des essais réalisés sur mortier [67] ont montré que, pour une porosité constante donnée, le mortier calcaire est toujours plus résistant que le mortier siliceux.

D'autres recherches ont été réalisées sur des bétons calcaires par Bachiorrini et Murat [68]. Elles ont montré que de très bons bétons hydrauliques pouvaient être obtenus avec des gravillons et des sables calcaires durs concassés ou broyés et renfermant 15 à 20 % de fines. Les calcaires durs peuvent ainsi être utilisés comme granulats pour bétons performants ou exposés à des conditions sévères. Ces bétons présentent d'excellentes propriétés physiques synonymes de durabilité (compacité, perméabilité) et des résistances mécaniques

généralement supérieures à celles des bétons de granulats alluvionnaires confectionnés avec des sables lavés peu ou pas fillérisés. La fillérisation des sables calcaires améliore donc sensiblement les performances mécaniques des bétons, sans avoir par ailleurs d'effets sensibles sur le retrait et la durabilité. Ces travaux comportent aussi une étude sur mortiers. Les résultats ont montré que les mortiers avec sables calcaires desquels toutes les fines sont extraites sont ceux qui donnent les performances mécaniques les plus médiocres.

L'introduction des fines dans le sable améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques de tous les mélanges étudiés [68]. Les courbes de résistances en fonction de la teneur en fines ont alors une allure en cloche aplatie avec un optimum qui se situe sensiblement à 12% de fines dans le sable. A 15% et à consistance de mortier constante, le retrait hydraulique augmente. Mais le facteur qui influe le plus sur ce terme est la propreté des fines, jugée par la valeur de bleu. Les autres facteurs déterminants de la durabilité sont la quantité d'air occlus ainsi que la nature et le dosage en ciment. Le caractère « actif » des fillers calcaires a été quantifié en leur affectant un coefficient apparent « d'activité liante » k , à partir de la loi de Bolomey et en considérant non pas le rapport C/E mais le rapport généralisé $(C + kF)/E$, avec F la quantité de fillers calcaires en kg par m^3 . Les coefficients k obtenus aux diverses échéances sur les mortiers s'échelonnent entre 0,25 et 0,45 avec les valeurs les plus fréquentes situées aux alentours de 0,30.

Les fillers calcaires ont donc bien une activité liante. Par ailleurs, l'analyse du couple liant-granat a montré notamment des phénomènes particuliers dans la zone de transition entre pâte de ciment Portland et grains calcaires (néoformations hydratées). Les auteurs considèrent alors que les fillers calcaires ont pour principales actions :

- ✓ l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire ;
- ✓ une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés, c'est-à-dire un effet réellement hydraulique ;
- ✓ des réactions physico-chimiques avec la calcite et les aluminates du ciment donnant lieu à des néoformations hydratées.

Ces travaux ont apporté une meilleure connaissance du rôle des fines dans les sables calcaires. Les expériences réalisées à la suite sur des grands chantiers ainsi que les travaux de l'industrie cimentière sur les ciments avec fillers ont permis le développement d'un nouveau constituant des bétons hydrauliques ; les additions de fillers calcaires.

En effet, d'autres travaux ont montré que l'utilisation d'un filler inerte est théoriquement avantageuse dans les bétons maigres, car sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides intergranulaires [53].

Les fillers calcaires n'étant pas inertes, leur utilisation est encore plus bénéfique si le ciment contient un taux élevé de C3A. L'effet accélérateur est contrôlé par la surface spécifique du produit. Plus il est fin, plus cet effet est important. Un filler calcaire très fin demande cependant plus d'eau. Il n'a donc d'intérêt que si une plus grande quantité de

superplastifiant est utilisée, car les fillers calcaires consomment du superplastifiant, au même titre que le ciment. Comme son utilisation ne permet qu'une faible réduction de la quantité de ciment, il y a donc un équilibre économique à trouver. Pour les bétons à haute résistance, les fillers calcaires deviennent réellement intéressants grâce à l'emploi d'un superplastifiant [53].

La quantité optimale de filler calcaire augmente quand la dose de superplastifiant augmente et quand la résistance visée diminue. L'utilisation des fillers entraîne aussi une légère augmentation du retrait total [53]. Mais elle n'influe pas sur la durabilité générale du matériau (à maniabilité et résistance égales) si les fillers ne sont pas surdosés [69], sauf pour la résistance à l'écaillage.

Des études réalisées en Turquie [70] se sont intéressées aux problèmes des poussières provenant du concassage des roches calcaires et à la possibilité de leur utilisation dans les bétons en tant qu'addition. Elles ont consisté à étudier l'influence du taux de poussières de concassage sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons, à l'état frais et durci. Le sable a été partiellement remplacé par 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de poussières. Il a été constaté que lorsque le taux de poussières augmente, le volume d'air et l'affaissement diminuent. Un ajout de poussières de concassage jusqu'à 15% contribue à la diminution de l'absorption des bétons [66]. Par contre, au delà de 15 % l'absorption augmente. Les performances mécaniques des bétons réalisés sont représentées par la Fig. 2.1.

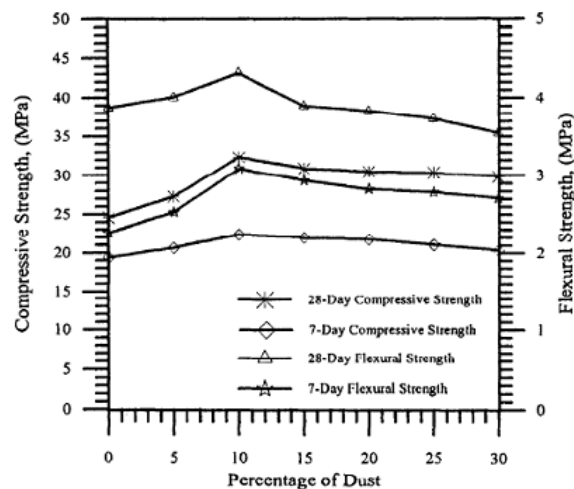


Fig. 2.1 : Performances mécaniques des bétons à différents taux de poussières [70]

Les mélanges les plus performants sont ceux qui contiennent 10 % de poussières. Au-delà, les performances mécaniques diminuent progressivement. Les mélanges contenant 5 % de poussières n'ont pas assez de fillers pour augmenter la compacité de la pâte de ciment, et ils présentent une résistance inférieure à ceux obtenus avec 10% d'ajout. Pour les mélanges ayant plus de 10%, les auteurs supposent qu'il n'y a pas assez de pâte de ciment pour enrober les granulats, ce qui entraîne une diminution de la résistance [70].

Le retrait de séchage de ces bétons est présenté Fig.2.2. Il augmente pour des taux de poussières allant de 0 à 10 % ; il diminue ensuite pour les taux supérieurs ou égaux à 10%. Les bétons les plus résistants sont les mélanges les plus compacts, les moins poreux et

qui s'opposent le plus à la pénétration de l'eau. Cependant, ce sont les mélanges qui ont enregistré le retrait le plus élevé [70].

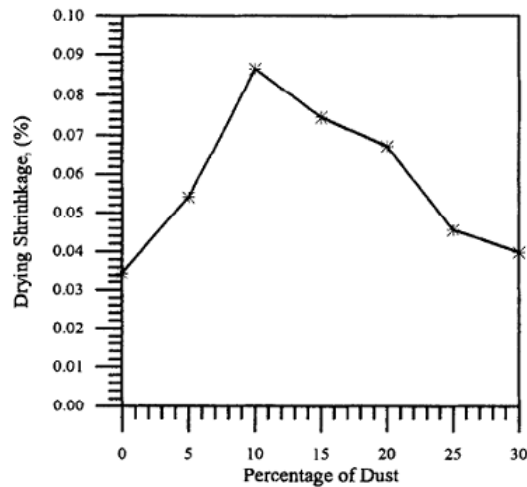


Fig. 2.2 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières ajoutées [70]

En Algérie, la demande croissante en granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières, suivi d'une exploitation anarchique des sables de mer. Par ailleurs, 20 % de sables fabriqués en carrières ne sont pas utilisés pour la construction à cause de leur teneur en fines supérieure à 12 % (limite normative actuelle [71], et les fillers résultants du processus de concassage sont considérés comme des résidus inexploitable. Pour limiter l'utilisation des sables de mer et dans le but de valoriser les matériaux locaux, une étude (Sadhouari et al) a été réalisée avec deux sables de concassage provenant de deux gisements différents (sable de Kristel noté SCK et sable de Sidi Ali Benyoub noté SCS). Des sables mélanges ont été fabriqués en combinant 60% des sables de concassage avec 40% du sable de mer (provenant de Terga). Les résultats observés sur mortiers ont montré que les résistances obtenues avec les sables de concassage seuls n'atteignent que 75 à 90 % des résistances obtenues avec les sables combinés. De plus, la montée en résistance des mortiers combinés est plus rapide que celle des mortiers à base de sable de concassage seul [71].

La résistance à la compression est très influencée par la variation de teneur en fines. Pour contribuer à la valorisation des sables de concassage dans les bétons, trois bétons ont été formulés avec les sables de concassage (SCK et SCs) et le sable de mer (SmT). Ces bétons sont référenciés respectivement BGK BGS et BT. Les bétons réalisés avec les sables de concassage ont été formulés avec différentes teneurs en fines, de l'ordre de 0, 5, 10, 15 et 20 %.

Les résultats obtenus à l'état frais (Fig.2.3) ont montré que le pourcentage d'air occlus en fonction du pourcentage de fines passe par un minimum situé entre 10% et 15% pour les deux séries des bétons. Corrélativement, la densité réelle du béton augmente rapidement lorsque le taux de fines passe de 0 à 15%. Au delà, elle diminue pour les deux séries de bétons. Les fines calcaires ont donc une influence positive, puis négative sur la densité, selon la quantité présente dans les mélanges. D'autre part, les fines confèrent au béton frais

une certaine cohésion et un pouvoir de rétention d'eau qui permet le maintien de l'homogénéité, en s'opposant au ressuage et à la ségrégation.

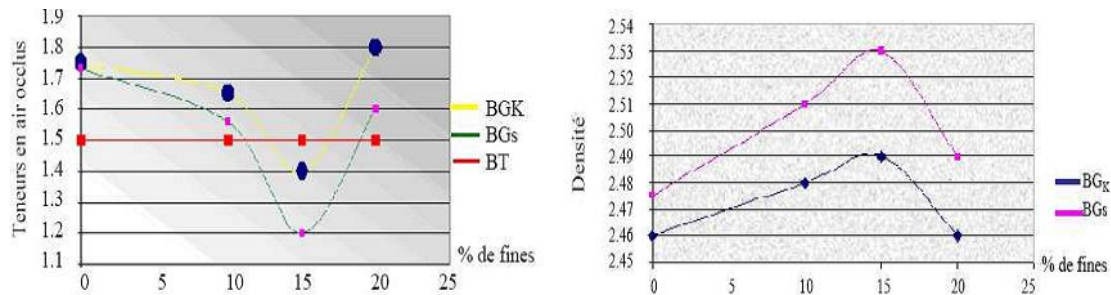


Fig. 2.3 : Teneur en air et densité des bétons frais à différents taux de filler [71]

A l'état durci, les courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de fines présentent la même allure, quel que soit l'âge des différents types de bétons, comme le montre la Fig. 2.4. A toutes les échéances, la résistance augmente avec le taux de fillers pour atteindre un maximum vers 15% de fines, puis chute modérément ensuite [71].

En conclusion, les auteurs considèrent que le sable de concassage est une solution intéressante, à condition que sa teneur en fines soit optimale ou bien qu'il soit combiné avec un sable de mer.

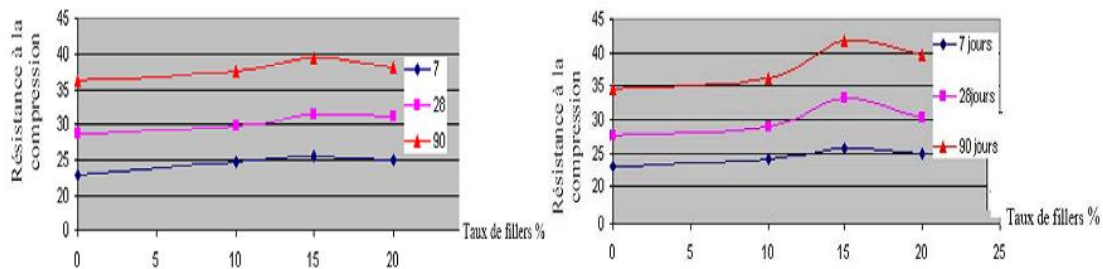


Fig. 2.4 : Résistance à la compression des mélanges à différents taux de fillers [71].

À gauche le mélange BGK et à droite le mélange BGS

D'autres recherches se sont intéressées à un critère optimal d'utilisation des fines calcaires dans les mélanges cimentaires algériens [72]. En général, il a été confirmé qu'un ajout de 5% de fillers calcaires dans le ciment (clinker) n'affecte pas sa résistance mécanique. Ce thème a fait l'objet de plusieurs recherches car il présente des avantages techniques, économiques et écologiques intéressants. En effet, il permet à la fois d'augmenter la résistance à la compression au jeune âge, de produire un ciment au coût de production à la tonne moins élevé, dont les émissions de CO₂ et de NO₂ sont réduites.

La substitution du ciment Portland par des fillers calcaires a été étudiée sur des pâtes de ciment à l'état frais et durci [72]. Quatre fillers de finesses variables ont remplacé le ciment avec les pourcentages suivants : 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 40%.

Les résultats ont révélés que la substitution du ciment portland par les fillers calcaires les plus fins, à un taux de 15%, réduit légèrement la consistance des pâtes (voir Fig.2.5) ainsi que le temps de prise. Les fillers jouent ici le rôle de « superplastifiant ».

Par ailleurs, la substitution du ciment par les fillers calcaires diminue la porosité totale et améliore la résistance à la compression, notamment si les fines ont une surface spécifique élevée et si la substitution est de l'ordre de 15%, comme le montre la Fig.2.6. L'accélération de l'hydratation de C3A et C3S, la formation des carboaluminates, la nature de la zone de transition entre fillers et pâte de ciment sont des facteurs qui sont conditionnés par la finesse des fillers.

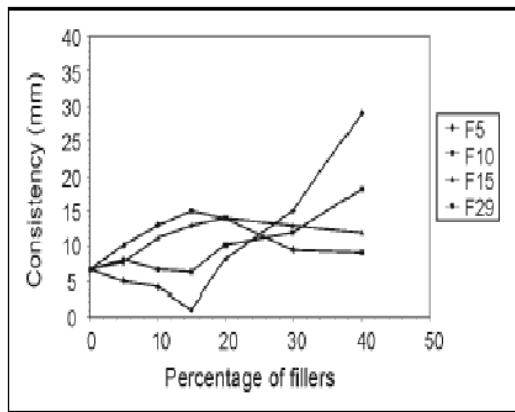


Fig. 2.5 : Consistance des pâtes de ciment en fonction du pourcentage de substitution [72]

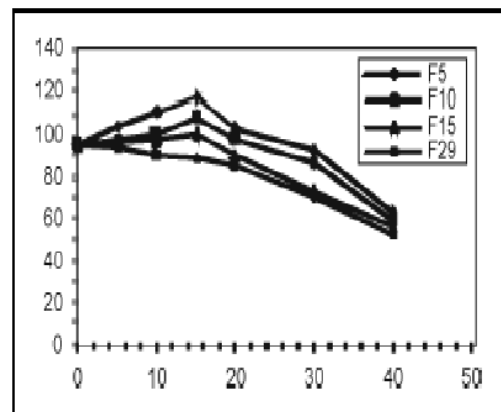


Fig. 2.6 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression des pâtes de ciment [72].

Vingt mélanges ayant différents taux de fines (0, 6, 12, 18 et 24%) ont aussi été confectionnés avec deux types de sable A et K et pour deux courbes granulaires de mélanges : l'une continue et l'autre discontinue [72]. Les mélanges formulés sont désignés par AC et KC s'il s'agit d'une courbe granulaire continue et par AD et KD si la courbe granulaire du mélange est discontinue. Il a été remarqué que les éléments fins ont une influence importante sur le rapport E/C. Plus le taux de fillers est important, plus la demande en eau nécessaire à l'obtention du même affaissement est importante (Fig. 2.7). Au-delà d'un taux de fillers de 18 % approximativement, la demande en eau devient moins importante. Les auteurs font l'hypothèse ici que la surface spécifique élevée des fillers conduit à former une microstructure colloïdale qui retient l'eau... Ces observations sont valables pour les deux squelettes granulaires étudiés, continu et discontinu, indépendamment de la nature minéralogique du sable utilisé [72].

Approximativement, pour un taux de fillers de 18%, les fillers se comportent comme un fluidifiant. Selon Bertrand et Coquillat, pour une consistance plastique, le taux de fillers optimal semble se situer entre 8 et 12 % dans le sable. Ainsi, il est nécessaire de considérer un nouveau paramètre faisant intervenir les effets de l'activité colloïdale des fillers. Les auteurs concluent que :

- ✓ pour un coefficient d'activité élevé, la meilleure maniabilité est atteinte [73] pour un taux de fillers de 8 % ;
- ✓ la demande en eau devient considérable pour le coefficient d'activité le plus élevé.

Les auteurs affirment que le coefficient d'activité est égal à 0,5 dans le cas présent, ce qui explique qu'ils sont allés jusqu'à 18 % pour atteindre l'optimum.

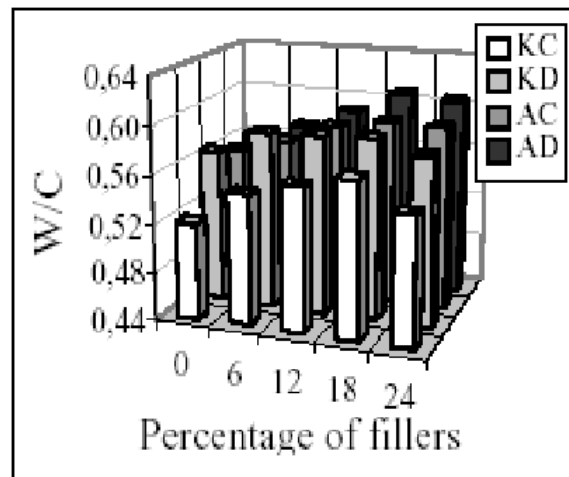


Fig. 2.7 : Variation du rapport eau/ciment en fonction du pourcentage de fillers [72].

Entre 0 et 12%, la densité augmente rapidement en fonction du taux de fillers. Le maximum de densité est observé entre 15 et 18 % (Fig. 2.8). Au-delà, une diminution est observée pour tous les mélanges. Ainsi, les fillers ont une influence tantôt positive, tantôt négative sur la densité. L'influence des fillers est plus marquée pour les bétons discontinus. A l'opposée de la densité, le pourcentage d'air diminue avec l'ajout de fillers, l'optimum est observé aux environs de 18% (Fig. 2.9). Pour les valeurs comprises entre 0 et 12%, les courbes sont presque constantes [72].

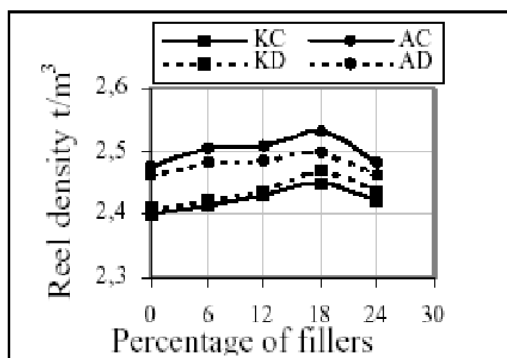


Fig. 2.8 : Variation de la densité réelle en fonction du pourcentage de fillers [72].

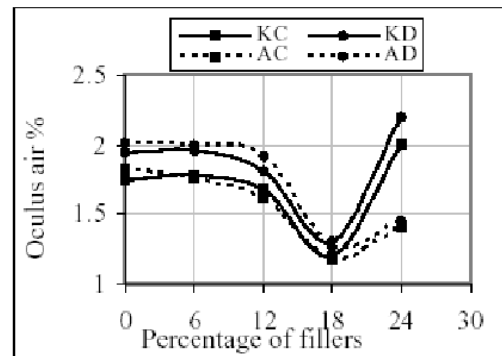


Fig. 2.9 : Variation de l'air en fonction du pourcentage de fillers [72].

La résistance à la compression de tous les mélanges augmente avec le temps, comme le montre la Fig. 2. 10, selon une cinétique qui semble indépendante du taux de fillers ou du type de béton.

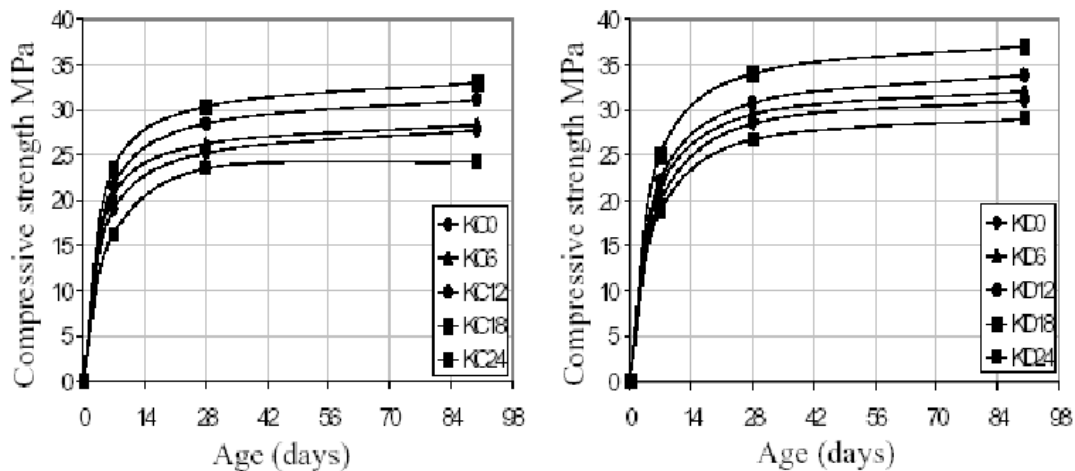


Fig. 2.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fillers [72].

D'après ces résultats, les auteurs parviennent à la conclusion que les fines calcaires jouent les rôles suivants :

- ✓ rôle de remplissage en comblant le manque d'éléments fins dans le ciment
- ✓ rôle rhéologique en dispersant les grains de ciment diminuant ainsi la demande en eau
- ✓ rôle chimique et physique par la formation des carboaluminates.

En Belgique, les fillers calcaires ont été longtemps considérés comme inertes au sens des normes « béton » [74]. Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'une certaine activité « liante » pouvait leur être attribuée. Par exemple, une étude a été menée au Sud de la Belgique afin d'évaluer l'effet de l'application du coefficient k à différents fillers calcaires de production locale. Six fillers ont été sélectionnés pour évaluer leurs effets sur les propriétés de mortiers et de bétons [74]. Le concept du coefficient k , tel que défini dans la norme européenne EN 206-1 pour les additions à caractère hydraulique et pouzzolanique, a été utilisé pour formuler les bétons. La composition du béton de référence sans fillers a été choisie pour satisfaire les exigences de durabilité pour une application en Belgique, dans un environnement extérieur (gel et contact avec la pluie).

Les résultats de cette recherche intégrant des aspects de durabilité à long terme ont montré que, malgré la diminution de la teneur en ciment et l'augmentation du rapport eau/ciment des bétons additionnés de fillers calcaires, des propriétés équivalentes sont obtenues en termes de résistance à la compression, d'absorption d'eau par immersion, de retrait de séchage et de résistance à la carbonatation. Par contre, l'absorption d'eau capillaire est systématiquement augmentée et un gonflement important est observé avec certains fillers en cas d'immersion dans une solution à haute teneur en sulfates. Les résultats indiquent également que la contamination des fillers par des particules argileuses contribue à augmenter la demande en eau des bétons [74].

Ces dernières années, la plupart des bétons sont formulés en adoptant un rapport e/c inférieur à 0,45, voire même parfois inférieur à 0,35. Les modèles de résistances impliquent que pour ces bétons, une fraction de ciment se comporte comme un filler inerte puisqu'il n'y a pas assez d'eau pour assurer une hydratation complète. C'est dans ces bétons que le remplacement partiel du ciment par un fillers moins cher et plus respectueux de l'environnement, comme un fillers calcaire par exemple, est le plus intéressant. Une étude a analysé la porosité capillaire totale des pâtes de ciment contenant différents taux de fillers calcaires [75], afin de trouver le pourcentage optimum de remplacement partiel du ciment par ces fillers.

La finesse des fillers calcaires a été aussi prise en compte en utilisant des fillers de tailles médianes différentes. Les résultats obtenus ont montré que le remplacement partiel du ciment par des fillers calcaires, jusqu'à 15 % en masse, pour des bétons ayant un rapport e/c égal à 0,3 et qui présentent une hydratation maximale dans des conditions saturées, est tout a fait possible sans affecter la porosité capillaire et les propriétés à long terme. Les bétons à faible rapport e/c présentent toutefois des déformations significatives dues à la fissuration au jeune âge.

A l'inverse, sur mortiers, la finesse des fillers limite plus ou moins les déformations, selon leur finesse. La Fig. 2.11 présente les déformations d'un mortier témoin et de deux mortiers à 10% de fillers fins ou grenus, ayant même rapport e/c et des résistances à la compression comparables. On constate que l'utilisation d'un filler moins fin est très avantageuse [75].

Quand les fillers sont fins, la distance entre les grains de la pâte de ciment à l'état frais sont réduites, ce qui augmente la tension capillaire et provoque des retraites plus amples (Fig. 2.11). Quand les fillers sont plus grossiers et de granularité comparable à celle du ciment, la compacité de la pâte est plus faible. La tension capillaire est alors moindre ainsi que le retrait (Fig. 2.11) [75].

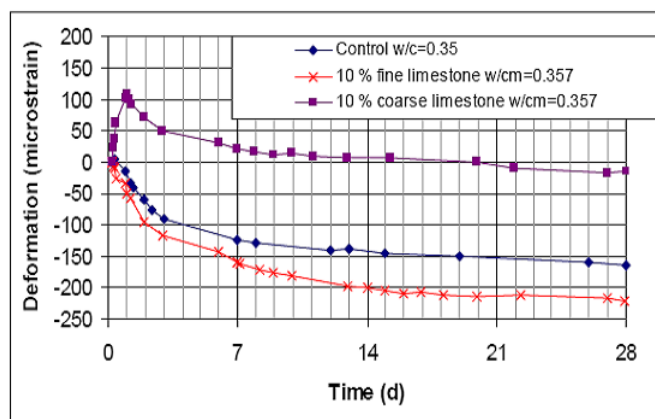


Fig. 2.11 : Déformation des mortiers sans fillers ou avec remplacement partiel de 10 % de ciment par des fillers calcaires en masse [76].

D'autres résultats, présentés Fig. 2.12, illustrent aussi le retrait des mortiers confectionnés avec un rapport e/c égal à 0,3 et un ciment substitué par 10 % de fillers calcaires en masse. Ils ont été obtenus en utilisant trois fillers de finesses différentes ayant un diamètre moyen de particules compris entre 3 et 100 μm . Le filler intermédiaire est de même finesse que le ciment avec un diamètre moyen de 17 μm [75]. Les courbes confirment le potentiel de réduction du retrait au jeune âge des fillers grossiers[77].

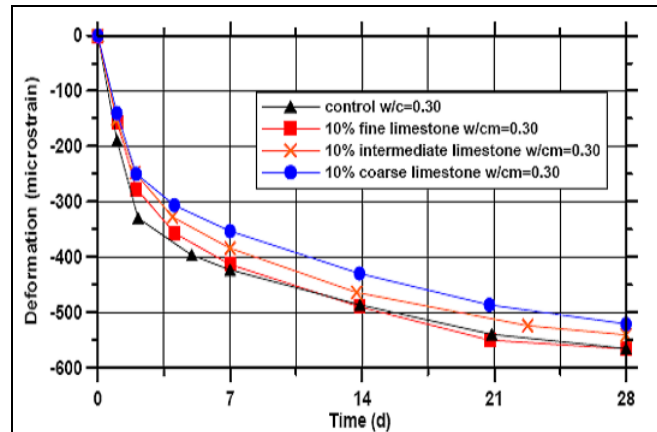


Fig. 2.12 : Déformation des mortiers remplacés par 10 % en masse de fillers calcaires, et du mortier de contrôle (sans fillers) [77].

Ces analyses montrent que pour les bétons à faible rapport e/c , le ciment peut être remplacé partiellement par des fillers calcaires à des pourcentages supérieurs à la valeur courante de 5 % déclarée par exemple dans la spécification de l'ASTM C150. Les diminutions de résistance à la compression observées expérimentalement dans ces essais sont de l'ordre de 7 % pour un remplacement de 10 % et de l'ordre de 12 % pour 20 % de remplacement. Ces pertes peuvent être contrôlées par une légère réduction du rapport e/c . Le remplacement partiel du ciment par des fillers calcaires dans des bétons à faible rapport e/c semble donc être très intéressant. Mais, dans les faits, cette possibilité n'est pas encore exploitée [75].

En conclusion, on retiendra que ces recherches sont encourageantes pour l'utilisation des sables de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des bétons hydrauliques.

2.2.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants :

L'incorporation partielle ou totale du sable de concassage dans la composition des Bétons AutoPlaçants ou BAP donne des caractéristiques rhéologiques acceptables lorsque la composition est adaptée. Une teneur élevée en fillers est nécessaire pour éliminer les frottements inter granulaires et des dosages en eau et en superplastifiant modérés sont conseillés pour éviter les ségrégations et les blocages de l'écoulement [78].

Une étude réalisée en Turquie a été dédiée à l'utilisation des volumes importants de

déchets de carrières calcaires dans l'industrie du béton, notamment les fillers [79]. Ceux-ci sont nuisibles à l'environnement et doivent être traités par des systèmes de filtration adaptés (Fig. 2.13).

En béton ordinaire, l'utilisation de ces fillers est limitée car ils augmentent la demande en eau et réduisent concomitamment la résistance. Par contre, dans les BAP, ces fillers peuvent être introduits en masse puisque la fluidité est maintenue en utilisant un superplastifiant. Il existe alors deux voies pour conserver la stabilité et la fluidité des BAP. La première consiste à augmenter la viscosité du béton frais en augmentant le volume de pâte, c'est-à-dire le dosage en ciment et/ou en additions minérales comme les cendres volantes par exemple. Mais ceci peut provoquer une plus grande chaleur d'hydratation et un retrait accru lors du séchage. Toutefois, les fillers calcaires n'ont pas ces inconvénients. La deuxième voie repose sur l'emploi d'un agent de viscosité. Mais les produits disponibles coûtent assez cher, et ils génèrent souvent un volume important d'air entraîné.



Fig. 2.13 : Système de filtration des déchets de carrières (marquage circulaire) et récupération sous forme de poudres (marquage rectangulaire) [79].

Les travaux déjà réalisés ont montré que l'utilisation des fillers calcaires :

- ✓ augmente significativement la maniabilité des mortiers et des BAP
- ✓ réduit le dosage en superplastifiant tout en maintenant une fluidité constante
- ✓ présente plusieurs avantages, dont ceux de réduire le coût des BAP et d'utiliser des matériaux qui posent des problèmes de stockage et d'environnement [78].

Pour montrer l'intérêt de l'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du béton (dont celle des BAP) [79], dix pâtes de ciment ont été formulées, les unes contenant des fillers calcaires issus des systèmes de filtration des carrières (QLP), les autres contenant des fillers calcaires traités (PLP). Les différents mélanges ont été réalisés en substituant le ciment par 10, 20, 30 et 40 % de fillers calcaires, de l'un ou de l'autre type. Deux pâtes pures de ciment, sans et avec superplastifiant, ont servi de référence. Les résultats ont montré

que les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/(ciment+fillers) constants.

Pour la résistance à la compression (Fig. 2.14), les fillers calcaires n'ont pas tous la même efficacité. L'amélioration la plus grande est obtenue avec 10% de fillers issus des filtres de carrières (QLP). Au-delà de cette valeur, la résistance diminue.

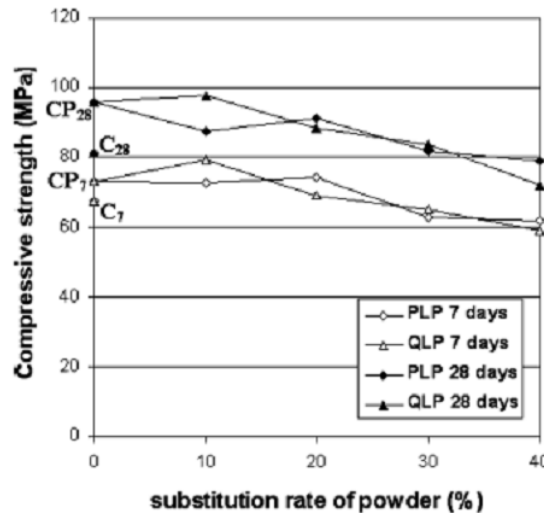


Fig. 2.14 : Résistance à la compression des pâtes de ciments [79].

Des BAP contenant ces deux types de fillers ont été formulés [79], et leurs performances ont été comparées à celles d'un mélange de contrôle sans addition. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- ✓ pour les BAP de classe de résistance courante (30 MPa) contenant 300 à 310 kg de ciment, les fillers issus des systèmes de filtration de carrières peuvent être utilisés ;
- ✓ pour des classes plus élevées (45 à 50 MPa), ces fillers peuvent aussi être utilisés mais il faut aussi augmenter le dosage de ciment sous peine d'une diminution de la résistance ;
- ✓ le coût des BAP contenant ces fillers est réduit de 0,05 à 0,1 \$/MPa/m³ par rapport au coût d'un BAP ne contenant que du ciment, ce qui donne, pour une résistance moyenne de 30 MPa, une réduction de l'ordre de 1,5 à 3 \$/m³.

Ainsi, l'utilisation des fillers calcaires obtenus par les systèmes de filtration des carrières dans les bétons autoplaçants présente une solution économique et environnementale intéressante [79]. Des BAP contenant ces deux types de fillers ont été formulés [79], et leurs performances ont été comparées à celles d'un mélange de contrôle sans addition.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- ✓ pour les BAP de classe de résistance courante (30 MPa) contenant 300 à 310 kg de ciment, les fillers issus des systèmes de filtration de carrières peuvent être utilisés ;
- ✓ pour des classes plus élevées (45 à 50 MPa), ces fillers peuvent aussi être utilisés mais il faut aussi augmenter le dosage de ciment sous peine d'une diminution de la résistance ;
- ✓ le coût des BAP contenant ces fillers est réduit de 0,05 à 0,1 \$/MPa/m³ par rapport au coût d'un BAP ne contenant que du ciment, ce qui donne, pour une résistance moyenne de 30 MPa, une réduction de l'ordre de 1,5 à 3 \$/m³

Ainsi, l'utilisation des fillers calcaires obtenus par les systèmes de filtration des carrières dans les bétons autoplaçants présente une solution économique et environnementale intéressante [79].

Une autre étude comparant l'utilisation d'un sable riche et d'un sable pauvre en fines dans les bétons autoplaçants a été menée en Turquie [80]. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés pauvres en fines, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci. Ces travaux ont permis de conclure que :

- ✓ pour remplacer les fines contenues dans les BAP, des sables concassés riches en fines (15 à 20 % en masse) peuvent être utilisés. Le choix du type de sable apparaît donc important pour obtenir une bonne résistance à la compression avec un minimum d'addition ;
- ✓ l'utilisation d'un sable calcaire de concassage a été bien appréciée par les praticiens;
- ✓ l'essai au bleu de méthylène est une méthode efficace pour choisir un sable approprié ayant un pourcentage élevé en fines, à défaut de méthodes plus sophistiquées comme la microscopie SEM.

La possibilité d'utiliser les calcaires de carrières en vue de développer des BAP économiques a été aussi étudiée au Canada [81]. Dans une première étape, le remplacement partiel du ciment par un taux croissant de cendres volantes de 0, 20, 35, 45 et 55% a été étudié. Le mélange à 35% de cendres volantes a été choisi comme mélange de référence puisqu'il améliore la résistance, diminue le coût des matériaux et diminue aussi le

dosage en agent de viscosité. La deuxième partie est consacrée à la confection de bétons composés par le mélange de référence avec 0, 10, 20, 30, 40, 50% de fillers calcaires provenant des carrières (en remplacement du sable naturel). Les résultats obtenus ont montré que:

- ✓ le remplacement partiel du sable par 50% en masse des fines de carrière diminue le coût des BAP sans affecter la résistance à la compression (voir Fig. 2.15) ;
- ✓ une diminution du dosage du réducteur d'eau a été observée ;
- ✓ la résistance à la compression diminue à jeune âge mais elle augmente à long termes.

Le remplacement partiel du sable par des fines calcaires et du ciment par des cendres volantes réduit donc largement le coût des BAP et donne des résistances à 28j et à long termes comparables à celles des BHP.

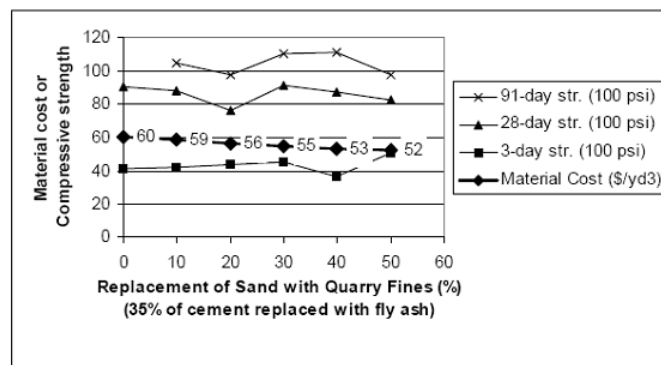


Fig. 2.15 : Résistance à la compression des BAP, le sable est remplacé partiellement par les fillers de carrières [81].

Les fillers non pouzzolaniques sont fréquemment utilisés pour optimiser la compacité des particules et le comportement des pâtes de ciment dans les bétons autoplacants. Il a été démontré (Bosilijkov) que les fillers calcaires provenant du concassage des granulats ont une influence positive sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Pour les BAP ayant un dosage en ciment de l'ordre de 380 et 390 kg/m³, une substitution jusqu'à 50% du volume de ciment par des fillers calcaires provenant du concassage des granulats peut être utilisées. Les résultats montrent que si les fillers calcaires sont bien gradués, ils augmentent significativement la déformabilité de la pâte. Quand un grand volume de fillers est ajouté aux BAP, leur résistance à la compression à 28 jours est améliorée. Ces fillers permettent de diminuer le coût des BAP.

Il a été démontré aussi que l'ajout de fillers calcaires de surface spécifique Blaine élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné, augmente leur compacité, améliore leur résistance à la ségrégation et la robustesse de leur formulation [82]. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe significativement sur la demande en superplastifiant (SP). Une augmentation de la surface Blaine des fillers conduirait (étonnamment) à une diminution du dosage en SP et à une diminution de l'ouvrabilité au cours du temps [82].

Comme précédemment, ces différentes recherches contribuent à valoriser l'utilisation des fillers calcaires et des sables de concassage dans les BAP.

2.2.3 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons à hautes performances

Dans les travaux de Donza, Cabrera et Irassar[83] , les performances de bétons formulés avec un sable de concassage ont été comparées à celles obtenues avec un sable naturel. Les deux types de bétons ont été formulés avec le même dosage en ciment, le même rapport e/c et la même maniabilité a été visée en modulant le dosage en superplastifiant.

Les résultats obtenus ont montré que les bétons avec sables de concassage nécessitent un dosage plus élevé en superplastifiant que les bétons aux sables naturels. Ils présentent en revanche des résistances mécaniques supérieures à celles obtenues avec le sable naturel, à tout âge d'essais.

Les sables concassés peuvent donc être utilisés pour obtenir des bétons à hautes performances (BHP) ayant des propriétés mécaniques similaires ou meilleures à celles obtenues avec un sable naturel de bonnes caractéristiques. D'autres recherches réalisées sur des mortiers confectionnés avec des sables remplacés partiellement par un pourcentage croissant de poussières de concassages, allant de 0 jusqu'à 20%, ont été effectuées [70]. Au jeune âge, une amélioration de la résistance à la compression des mortiers contenant les poussières de concassage a été remarquée, bien que la demande en eau et la porosité de ces mélanges soient supérieures. Le gain de résistance au jeune âge est attribué à l'accélération de l'hydratation du aux effets de l'introduction des poussières de concassage. A long terme, aucun effet nuisible n'a été observé. Il est montré ainsi que les sables et les fillers issus de concassage sont capables également d'améliorer les performances des BHP.

2.2.4 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons courants (travaux Tunisiens)

L'épuisement des réserves en sables alluvionnaires, suite au développement urbain des grandes villes tunisiennes, nécessite des solutions de substitution de ces matériaux [84]. Les stocks potentiels en sable de concassage d'âge et de qualité variables, qui existent dans les différentes carrières exploitant des roches carbonatées, méritent d'être identifiés afin d'étudier leur conformité par rapport aux exigences normatives applicables dans le domaine du bâtiment.

Pour ces raisons, l'influence du remplacement partiel ou total du sable siliceux par du sable calcaire concassé sur les performances rhéologiques et mécaniques des bétons a fait l'objet de plusieurs études. Certaines se sont intéressées aux propriétés des sables calcaires de concassage issus des principales carrières de Tunisie, en tenant compte de la qualité de la roche exploitée [84 ;85]. Les sables analysés présentent pour la plupart des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques conformes aux exigences de la

réglementation en vigueur pour les sables à bétons hydrauliques [NT 21.30, 2002], excepté pour les teneurs en fines qui sont relativement fortes en général ($> 15 \%$) et pour la propreté mesurée à l'aide de l'essai de l'équivalent de sable (valeur comprise entre 17 et 86). Des analyses complémentaires ont montré également que les sables

analysés peuvent être rendus conformes aux différentes exigences par de simples corrections (lavage par exemple), puisque leurs constituants minéralogiques ne renferment pas d'éléments nuisibles en forte proportion, comme les sulfates, les chlorures, les matières organiques, etc.

Les résistances à la compression obtenues sur des bétons de sables calcaires de concassage sont souvent supérieures à celles des bétons de sable alluvionnaire siliceux, à dosage en ciment et en eau identiques [85]. Un sable calcaire conforme aux exigences normatives améliore sensiblement les performances du béton hydraulique [84]. Ces auteurs attribuent essentiellement

ces améliorations à la nature calcaire, à la forme et à la granulométrie du sable. En effet, la distribution granulaire étalée, la forme anguleuse des grains et la finesse du sable calcaire concassé

permettent un meilleur accrochage entre la pâte de ciment et les grains, un meilleur enchevêtrement granulaire et finalement une meilleure compacité du béton. Ainsi le béton obtenu serait plus résistant et durable [84].

L'influence de la finesse des fines des sables de concassage sur les caractéristiques mécaniques, rhéologiques et physiques des mortiers a été étudiée par Bedday [85] dans le but d'évaluer la quantité optimale de fillers susceptible d'améliorer ou du moins ne pas dégrader les performances. Il a été observé que la quantité d'eau de gâchage augmente avec le pourcentage de fines et avec leur finesse. En ayant plus de fillers très finement broyés, la surface spécifique Blaine (SSB) des grains devient plus grande et, selon les auteurs, la quantité d'eau nécessaire pour mouiller les grains sera plus grande. Par conséquent, pour avoir une maniabilité constante, le dosage en eau croît avec la quantité de fines et avec leur finesse.

Une surface spécifique plus grande adsorbe plus d'eau, ce qui va à l'encontre de l'apport bénéfique de ces fines qui jouent un rôle lubrifiant et peuvent améliorer l'ouvrabilité [85].

A l'opposé, les mélanges dépourvus de fines nécessitent aussi un besoin nettement supérieur en eau. Le manque de fines provoque une granularité discontinue et un manque de maniabilité et par la suite un apport supplémentaire en eau pour atteindre la maniabilité recherchée [85]. Les résistances à 28 jours des mélanges à base de sable de concassage dont les fillers ont une surface spécifique Blaine ou SSB de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ sont supérieures à celles obtenues avec le sable normalisé [CEN EN 196-1], l'augmentation maximale est de l'ordre de 30% pour 20% de fines [85] (Fig. 2. 16).

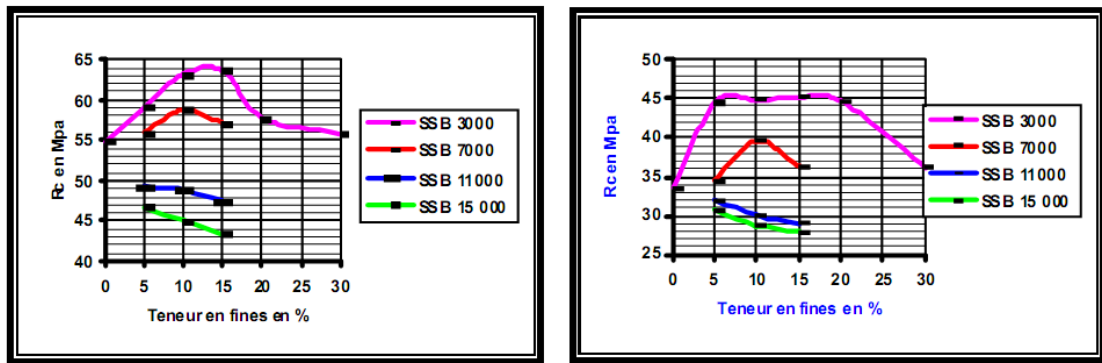


Fig. 2.16 : Résistance à la compression des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C [85] .

En ce qui concerne la résistance à la flexion, elle est peu influencée par l'ajout de fines comme le montre la Fig.2.17.

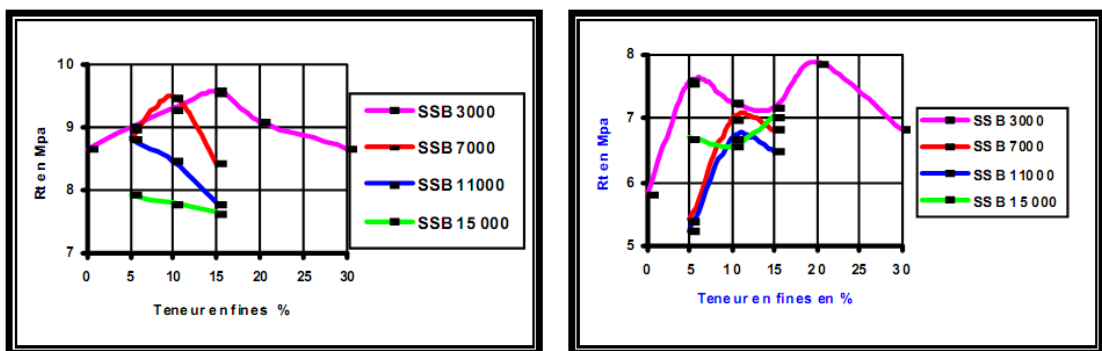


Fig. 2.17 : Résistance à la traction des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C [85].

Les résultats obtenus montrent clairement l'apport positif des fines, surtout lorsque leur SSB est faible (3000 à 7000). Selon l'auteure, cet apport réside dans un meilleur accrochage et une plus forte adhésion entre le liant et les granulats [85]. Le retrait a été étudié sur des mortiers à base de sable de concassage ayant différentes SSB et dans les conditions de chantiers tunisiens en été (hygrométrie 40 % et température 38 °C). L'allure générale des résultats obtenus à 28 j est présentée Fig. 2.18.

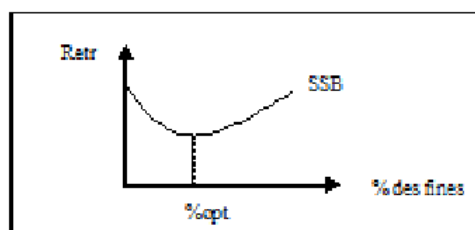


Fig. 2.18 : Retrait en fonction du pourcentage de fines

Un optimum est observé. Il est de l'ordre de :

- 5 % de fines pour les fortes SSB (11 000 et 15 000 cm²/g),
- 10 % de fines pour la SSB (7000 cm²/g),
- et 15 % de fines pour la SSB (3000 cm²/g).

Au delà de ces pourcentages, une augmentation sensible du retrait est remarquée. La perte de masse des mortiers avec 20 % de fines de SSB 3000 cm²/g est de l'ordre de 4 %. Elle atteint 6 % pour les mortiers avec 30% de fines. Le besoin en eau supplémentaire qu'imposent la finesse et la quantité des fines, au-delà de l'optimum, pour permettre la mise en place du mortier, explique cette différence [85]. La présence de fines de faible valeur de SSB conduit à une augmentation de la compacité, sans ajout d'eau, ce qui permet de limiter le retrait. Avec des fines de grandes valeurs de SSB, la quantité d'eau de gâchage est augmentée. Celle-ci va s'évaporer par la suite, ce qui conduit à une augmentation du retrait total [85].

Par ailleurs, les bétons silico-calcaires confectionnés en Tunisie présentent souvent des courbes granulométriques discontinues, contrairement aux bétons tout calcaire qui montrent une continuité granulométrique entre le sable et le gravillon. La compacité et les performances des bétons ainsi réalisés sont améliorées [85]. En substituant partiellement ou totalement le sable siliceux roulé par un sable de concassage de qualité (tel que le sable de la carrière de Jbel Ressas par exemple), les caractéristiques physiques et mécaniques obtenus sont supérieures à celles du béton silico-calcaire.

La durabilité de ces bétons vis-à-vis des attaques chimiques par des solutions concentrées en Na₂SO₄ et MgSO₄ a été étudiée, conformément au mode opératoire de la norme ASTM C 88. Il apparaît que le béton de sable de concassage est plus résistant à ces sulfates que celui du béton de sable alluvionnaire [85].

L'utilisation d'un sable de concassage riche en fines permet aussi de corriger la granulométrie du béton [86].

Des mortiers ont été confectionnés avec des sables reconstitués ayant un module de finesse variant de 0,5 à 4, par pas de 0,5, et des sables reconstitués à partir d'un sable commercialisé par le CTMCCV (Centre Technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et de Verre), de nature non précisée, auquel des fines calcaires ont été ajoutées par pas de 2 [86]. Les résistances mécaniques obtenues sont maximales pour un module de finesse de 2,5 (l'intervalle adéquat varie de 1,5 à 3,2), pour des teneurs en fines situées entre 8 et 18 %. Pour des teneurs supérieures, des chutes de résistance, allant jusqu'à 50%, sont observées [86]. Les mortiers les plus stables ayant des caractéristiques mécaniques optimales sont ceux réalisés avec des sables ayant une propreté (Equivalent de Sable ES) comprise entre 65 et 80%. La propreté optimale est située entre 65 et 75% pour les fines de nature calcitique. Des mesures de retrait et de gonflement

ont été réalisées sur ces mortiers. Les résultats ont montré que les valeurs minimales des variations volumétriques et de masse sont obtenues pour des quantités de fines variant entre 12 et 14%. Par contre, pour les teneurs en fines inférieures à 8% ou supérieures à 18%, les mortiers sont moins stables.

Ces résultats obtenus avec des sables reconstitués ont été aussi validés en utilisant 24 sables naturels (siliceux et calcaires de concassage). Les mortiers confectionnés avec des sables de concassage ont donnés des résistances mécaniques meilleures que celles obtenues avec les sables siliceux roulés, et même pour le sable reconstitué de qualité conseillée [86].

L'étude réalisée par Akrouf, Mounaga, Ltifi et Ben Jamma [87] a consisté à étudier l'effet des taux de fillers des sables de concassage sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. 72 mélanges ont été formulés en utilisant trois types de sable (un sable siliceux servant de référence, un sable concassé et un sable constitué par un mélange de 60% de sable concassé et 40% de sable siliceux). Pour chaque type de sable, quatre bétons ont été formulés: un béton ferme, un béton plastique, un autre très plastique et un béton fluide.

Les résultats obtenus ont montré que les bétons formulés avec un sable calcaire concassé consomment un peu plus d'eau par rapport à des bétons à base d'un sable siliceux, à affaissement constant et pour un dosage en ciment de 350 kg/m³. La différence observée a été attribuée au pourcentage élevé de fines du sable concassé. La résistance à la compression du béton confectionné avec le sable concassé est inférieure de 22% par rapport à celui avec le sable siliceux.

L'influence de la substitution du sable siliceux par le sable calcaire concassé vis-à-vis des attaques des ions chlorures a été aussi étudiée sur des mortiers. La diffusion des chlorures a été déterminée par deux tests ; un test de migration et un test d'immersion [87]. Les résultats du test de migration ont montré que le coefficient de diffusion des ions chlorures est plus grand pour le mortier de sable siliceux que pour le mortier de sable concassé [87]. Ce coefficient dépend aussi du rapport eau/ciment. Pour le test d'immersion, l'utilisation du sable calcaire concassé influence positivement la résistance aux chlorures ; le coefficient apparent de diffusion est toujours inférieur pour les mortiers confectionnés avec le sable concassé [87].

Cependant, la pénétration des chlorures augmente avec le temps d'exposition. La faisabilité de bétons hydrauliques courants avec des granulats calcaires provenant de différents gisements tunisiens, pour limiter le recours aux granulats de bonnes caractéristiques mécanique, physique et chimique, a été étudiée par Achour [88]. Les ressources alluvionnaires de qualité sont surexploitées, voire épuisées, notamment à proximité des centres de consommations comme la région de Tunis et la zone touristique côtière [88].

Dans le cadre de cette recherche, un inventaire évaluant les potentialités du pays en matière de ressources minérales a été effectué. Il a permis de montrer que, compte tenu de l'évolution de la demande, certaines régions du pays seront déficitaires dans un futur

proche. L'ouverture de nouvelles carrières est ainsi recommandée dans les formations géologiques calcaires majoritaires en Tunisie. Six gisements ont été choisis comme source d'approvisionnement potentiel apte à donner des granulats à bétons.

Les performances obtenues sur les bétons montrent que la plupart des granulats issus de ces formations peuvent répondre à priori aux exigences des normes tunisiennes en vigueur pour un emploi dans les bétons hydrauliques, comme le montre la Fig. 2.19. [88].

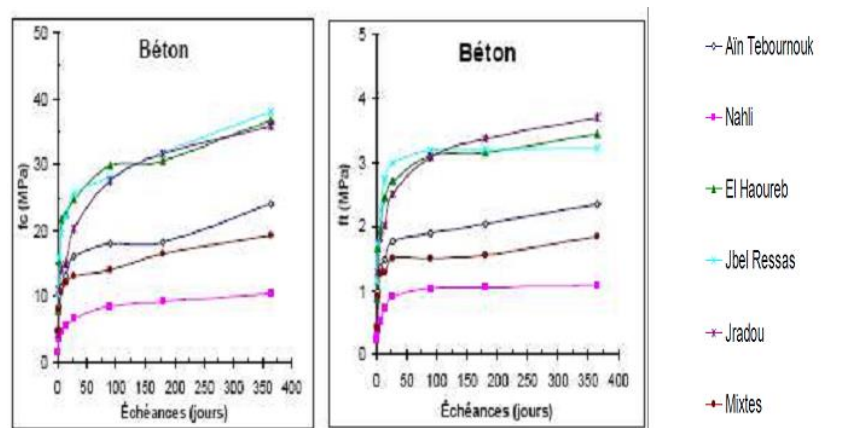


Fig. 2.19 : Performances mécaniques des bétons calcaires [88].

Ces travaux ont contribué aussi à une meilleure connaissance du comportement mécanique des bétons calcaires. Il a été montré que le taux de fillers influe sur l'adhérence pâte-granulat. Les fillers calcaires associées à la pâte de ciment modifient les propriétés de rigidité de la matrice, de sorte qu'elles se rapprochent de celle du granulat, améliorant ainsi l'ancrage mécanique de la liaison et la résistance à la compression [89].

2.2.5 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants :

La formulation de bétons autoplaçants (BAP) avec des matériaux locaux tunisiens, comme les sables de concassage et le sable de désert, a été étudié récemment en Tunisie [90]. La substitution progressive de ces deux produits au sable alluvionnaire additionné de fillers d'apports dans la composition des BAP étudiés a permis d'analyser l'effet du type de sable sur le comportement à l'état frais et durci. Les essais ont consisté à réaliser différentes combinaisons binaires des trois sables choisis, à différentes teneur en superplastifiant (SP). Seuls sont résumés ici les résultats des mélanges sable roulé - sable de concassage.

A faible dosage en SP, les BAP se comportent à l'état frais comme des bétons ordinaires (consistance mesurée au cône d'Abrams, voir Fig. 2.20). A dosage en SP plus élevé, la substitution du sable roulé par le sable de concassage provoque une

légère diminution de la fluidité, excepté pour la substitution à 30% (étalement maximum quel que soit le dosage en SP). La baisse de fluidité des autres combinaisons est attribuée à l'augmentation des frottements intergranulaires induits par les gros grains anguleux du sable de concassage. Toutefois, l'ajout d'une quantité importante en fillers permet a priori de diminuer ces frottements, comme l'indique le BAP à 100% de sable de concassage.

L'utilisation partielle ou totale du sable de concassage dans les BAP conduit donc à des propriétés rhéologiques acceptables.

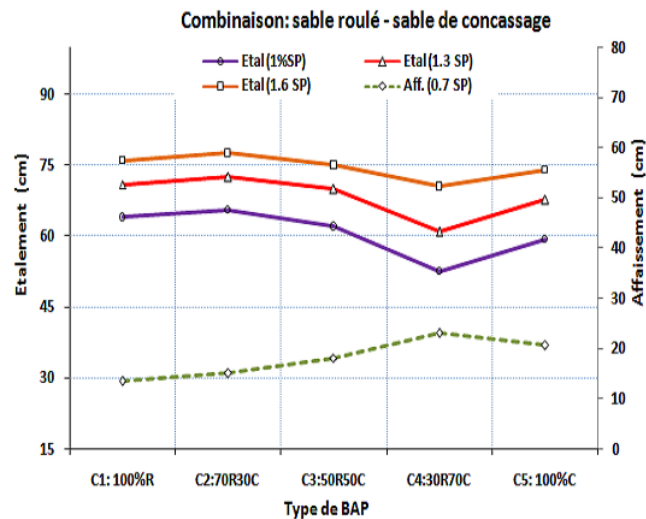


Fig. 2.20 : Courbes d'étalement au cône d'Abrams des BAP pour les différentes combinaisons de sable roulé et de sable de concassage [90].

A l'état durci, la substitution progressive du sable de concassage par le sable roulé provoque une augmentation de la résistance à la compression. Elle est de l'ordre de 30 % pour les BAP ne contenant que du sable de concassage (Fig. 2.21)

A la traction, le comportement des BAP est similaire (Fig. 2.22). Les gains de résistance à la flexion et au fendage sont respectivement de 52 % et 31 % pour les BAP à 100% de sable de concassage, par rapport au BAP à 100 % de sable roulé.

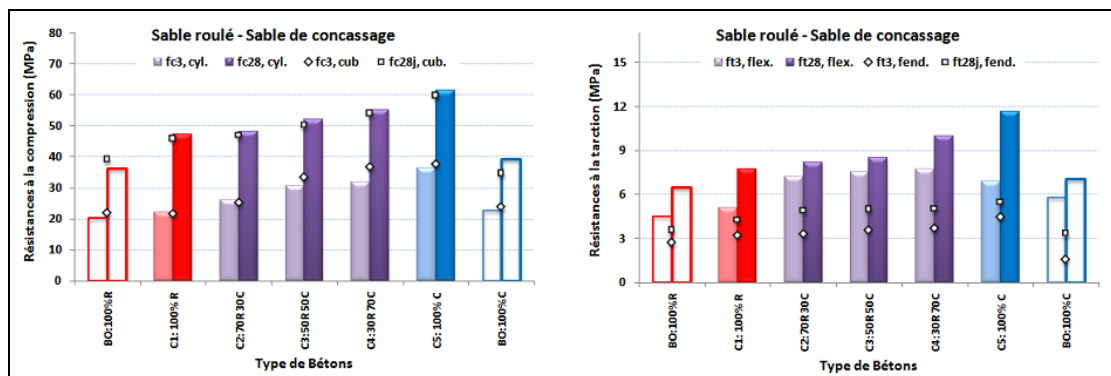


Fig. 2.21 : Résistance à la compression des BAP réalisés par Rmili [90].

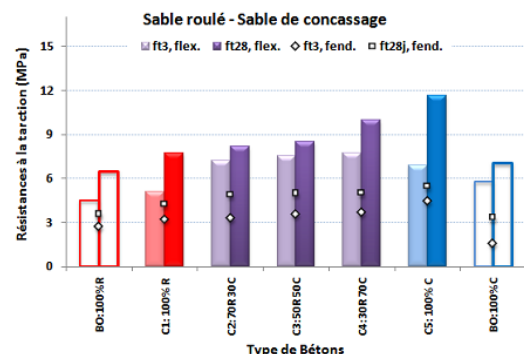


Fig. 2.22 : Résistance à la traction des BAP réalisés par Rmili [90].

Par ailleurs, l'utilisation du sable de concassage diminue le coefficient d'absorption d'eau par capillarité et augmente légèrement le module d'élasticité [90]. Le remplacement partiel ou total du sable roulé par un sable de concassage dans la composition des BAP apparaît donc comme une alternative intéressante.

2-2-6 Conclusion :

De nombreuses études se sont intéressées à la recherche de voies alternatives à l'utilisation des ressources alluvionnaires en voie d'épuisement, notamment les sables alluvionnaires, pour la fabrication des bétons hydrauliques. Parmi les solutions proposées, l'emploi des sables calcaires de concassage est souvent recommandé. Cependant, dans les pays de Maghreb, en Algérie, leur utilisation est jusqu'à présent écartée quasi systématiquement de tout usage dans le bâtiment et les ouvrages d'art, malgré les avantages économiques et environnementaux que cette solution peut présenter. Notons que les spécifications normatives autorisent leur utilisation. Cette situation résulte essentiellement de l'absence de références scientifiques fiables à l'échelle du pays, et d'un manque d'exemples de réalisation d'ouvrages de références pouvant convaincre les maîtres d'ouvrages et les entreprises.

B- Ciment et processus d'hydratation :

2-3 Introduction :

Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland, car c'est lui qui assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant.

Ce clinker résulte de la réaction à haute température (autour de 1450 °C) du mélange des quatre oxydes principaux. Ceux-ci proviennent, pour la plus grande part, de roches naturelles extraites de carrières: les calcaires apportent l'oxyde de calcium, les argiles apportent la silice, l'alumine et l'oxyde de fer, les marnes apportent les quatre oxydes à la fois.

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques. Les quatre principaux sont l'oxyde de calcium (CaO), le silicium (SiO₂), l'aluminium (Al₂O₃), l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et représentent environ 95% en masse. Les oxydes sont combinés dans le clinker pour former les quatre minéraux anhydres principaux. Le Tableau 1.1 regroupe la composition minéralogique moyenne d'un ciment Portland.

Tableau 2.1: Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment Portland, d'après Taylor [63]

Nom du composant	Formule chimique	Notation cimentaire	% massique des différentes phases
Silicate tricalcique (Alite)	3CaO SiO ₂	C ₃ S	60 à 65%
Silicate bicalcique (Belite)	2CaO SiO ₂	C ₂ S	10 à 20%
Aluminate tricalcique	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A	8 à 12%
Aluminoferite tricalcique	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8 à 10%

D'autres phases mineures ($\text{CaO}_{\text{libre}}$, CaCO_3 , MgO , R_2SO_4 , Na_2O , K_2O , ...) sont associées à ces principaux minéraux. L'examen au microscope optique, à des échelles de l'ordre de 50 à 100 μm , montre des cristaux de quelques micromètres de silicates bi et tricalciques (C_2S et C_3S), enrobés dans une matrice d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF et d'aluminate tricalcique C_3A cryptocristallins [64].

La cristallisation de ces minéraux est fonction de la composition et de la finesse du "cru", de la température de cuisson (les conditions de cuisson influent sur la morphologie des cristaux), ainsi que du type de combustible. La vitesse de refroidissement influe sur la taille des cristaux des constituants: avec un refroidissement lent, on obtient de gros cristaux bien développés et dont l'hydratation sera plus difficile que celle des petits cristaux résultant d'un refroidissement rapide [91].

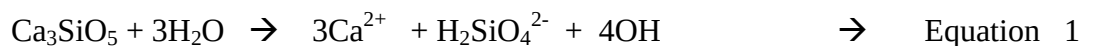
2-3-1 Le processus d'hydratation du ciment:

2-3-1-1 Hydratation des silicates

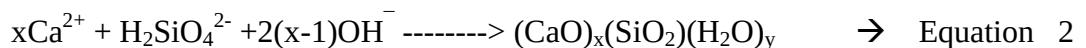
* *Le silicate tricalcique :*

Plusieurs études effectuées au laboratoire ont permis de décrire le mécanisme d'hydratation des phases silicates qui sont les composantes majoritaires du ciment Portland. Il existe trois réactions chimiques simultanées liées à l'hydratation du C_3S .

- dissolution congruente du C_3S suivant la réaction chimique suivante:



- précipitation des hydrosilicates de calcium notés C-S-H ;



-précipitation des hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, appelé portlandite :



La première réaction est très rapide générant des espèces ioniques en solution, laquelle atteint rapidement la saturation par rapport aux hydrosilicates de calcium. Il y a alors formation de germes de C-S-H essentiellement sur la surface du silicate tricalcique. La stoechiométrie des C-S-H, caractérisée par son rapport molaire C/S (CaO/SiO_2), n'excède jamais 2. La solution continue donc de s'enrichir en ions calcium jusqu'à atteindre la saturation par rapport à l'hydroxyde de calcium qui précipite à son tour (Equation 3).

* *Le silicate bicalcique :*

Le C_2S s'hydrate de la même façon que le C_3S , cependant avec une activité moindre. La réaction peut être décrite par l'équation 4:



Les produits d'hydratation sont identiques à ceux de C_3S , mais il y a comparativement une plus forte proportion de C-S-H. L'hydratation et le développement de la microstructure sont environ 90 fois plus lents que pour C_3S . La naissance des cristaux de $Ca(OH)_2$ est également plus lente qu'avec C_3S [92].

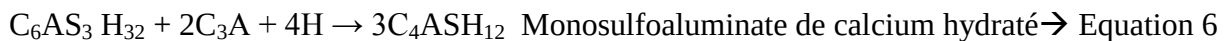
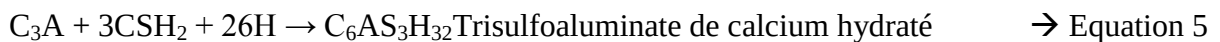
* Les phases aluminates

Les phases aluminates, aluminate tricalcique C_3A et aluminoferrite-tétracalcique C_4AF , sont les composantes complémentaires aux phases silicates dans un ciment.

- Le C_3A présente une réactivité importante dans l'eau se traduisant par le phénomène de prise éclair lié à la précipitation des hydroaluminates de calcium. Cette prise rapide conduit à une perte d'ouvrabilité de la pâte de ciment et à des résistances mécaniques faibles. Pour éviter ce raidissement de la pâte, le cimentier incorpore du sulfate de calcium sous forme de gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, d'hémihydrate (plâtre) $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ ou d'anhydrite $CaSO_4$. En présence d'une quantité de sulfates suffisante, le premier produit d'hydratation est l'ettringite (équation 5).

Lorsque la teneur en sulfates diminue, l'ettringite se convertit en monosulfo aluminate hydraté (équation 6).

L'hydratation de C_3A dépend, comme pour les autres minéraux du ciment, de facteurs tels que la température, le rapport eau/solide, la surface spécifique, la taille de l'échantillon et la présence d'adjuvants ou d'ajouts [92].



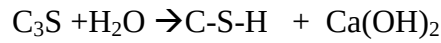
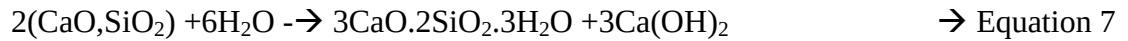
* La phase ferrite

Les études récentes confirment que l'hydratation de la phase ferrite des ciments Portland est semblable à celle de C_3A , aussi bien en présence qu'en l'absence de gypse. Toutefois, sa vitesse d'hydratation est beaucoup plus lente. La spectrométrie Mossbauer [93] permet de montrer que, à température et pression normale, l'hydratation de C_4AF donne une série d'isomorphes hydratés et $Fe(OH)_3$. Lorsqu'on ajoute du gypse, la séquence d'hydratation de la phase ferrite est la même que pour C_3A : il se forme de l'ettringite où Fe est substitué à Al et $Fe(OH)_3$. Collepardi et al. [94] trouvent que l'ettringite obtenue par hydratation de C_4AF en présence de gypse est plus stable que celle produite par C_3A dans les mêmes conditions. L'hydratation de la ferrite de calcium, C_2F , conduit à la formation de C_4FH_{13} et $Fe(OH)_3$.

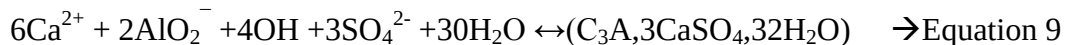
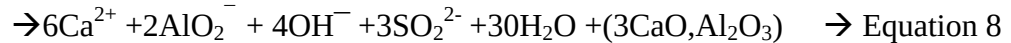
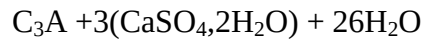
2-3-1-2 La chronologie d'hydratation

Au cours de la période de gâchage, les phases du ciment anhydre passent en solution dans la phase aqueuse pour donner des ions (Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} ...). Cette dissolution initiale est très rapide et exothermique. Dès les premières minutes, il se forme deux hydrates (C-S-H et l'ettringite).

- le silicate de calcium hydraté (C-S-H), formé par combinaison des ions Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ et OH^-



- l'ettringite, trisulfoaluminate de calcium hydraté formé par combinaison des ions Ca^{2+} , AlO_2^- , SO_4^{2-} et OH^-



Les grains de C_3A se recouvrent donc d'un écran d'ettringite très finement cristallisé. La formation de cette ettringite entraîne des forces d'expansion qui résultent de l'augmentation du volume des solides. Cette expansion provoque l'éclatement de la croûte d'ettringite et l'hydratation du C_3A . Mais à cet endroit, de l'ettringite se forme à nouveau et protège encore le C_3A de l'hydratation.

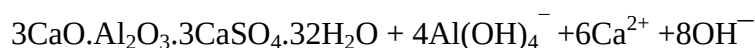
Par la suite, on remarque que l'élévation rapide du pH et de la teneur en calcium et en OH^- de l'eau de gâchage ralentit la dissolution des constituants du clinker. Cette étape est appelée « phase dormante » ou « d'induction » qui est influencée par les adjuvants et la température du milieu [95]. La formation d'ettringite et de C-S-H se poursuit lentement, et la phase aqueuse se sature en $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La durée de cette période est de quelques heures.

Les réactions qui entraînent la prise sont déclenchées par la précipitation de la portlandite, qui survient au bout de plusieurs heures (≈ 5 heures). La brutale consommation d'ions Ca^{2+} et OH^- par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ accélère la dissolution de tous les constituants du ciment.

On observe une augmentation du flux thermique correspondant à la précipitation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de C-S-H, assez lente au départ car la précipitation de la portlandite est endothermique.

La formation des hydrates se faisant plus rapide, le nombre de « points de colle » entre les grains augmente rapidement. La fin de la période de prise est caractérisée par une accélération de l'hydratation.

Dans la plupart des ciments Portland, la proportion molaire de gypse est inférieure à celle de l'aluminate. La formation d'ettringite, très rapide en fin de la période de prise et début de la période de durcissement, aboutit à l'épuisement du gypse (entre 9 et 15 heures), l'ettringite devient alors la source d'ions sulfates SO_4^{2-} pour former avec le C_3A excédentaire le monosulfo-aluminate de calcium hydraté ($\text{C}_3\text{A}, \text{CaSO}_4, 12\text{H}_2\text{O}$).





→ Equation 10

La présence de C_3A n'est pas indispensable à la prise, mais C_3A accélère le durcissement de la pâte en augmentant la chaleur et donc la vitesse d'hydratation des silicates de calcium, les grains de clinker se recouvrent d'une couche de plus en plus épaisse, ce qui ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. Après une quinzaine d'heures s'établit la période de ralentissement diffusionnel. Dans la majorité des cas, une partie du ciment restera ainsi anhydre, bien que l'hydratation se poursuive lentement pendant plusieurs années.

2-3-2 Les propriétés des principales phases hydratées

2-3-2-1 La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Sa solubilité dans l'eau est de l'ordre de 22 mol/L à 25 °C, soit environ 1,6 g/L [96], ce qui correspond à un pH d'équilibre de 13. Sa présence dans la pâte de ciment, par son équilibre de solubilité, maintient le pH de la solution interstitielle élevé. Sa solubilité diminue avec la température. C'est également une des phases les mieux cristallisées. Elle cristallise sous forme de cristaux hexagonaux plus ou moins développés dans la pâte de ciment, ces cristaux sont bien orientés sous forme de couche dans l'auréole de transition, ou en bordure des bulles d'air. Sa structure cristalline est de type hexagonal. Elle est constituée de plans d'ions calcium (plan ab) en environnement octaédrique assuré par 3 ions OH^- de part et d'autre du plan, ce qui constitue un feuillet d'hydroxyde qui est répété selon l'axe c (Figure 2. 23).

En raison de la grande taille de ses cristaux, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présente une faible surface spécifique. La portlandite peut aussi se trouver à l'état amorphe lorsqu'elle ne trouve pas assez d'espace pour cristalliser.

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique mais, par contre, cet hydrate joue un rôle notable pour des questions de durabilité [95] [96], car il opère un effet tampon en maintenant un pH basique.

La teneur initiale en portlandite est une donnée d'entrée de la plupart des modèles de carbonatation des bétons.

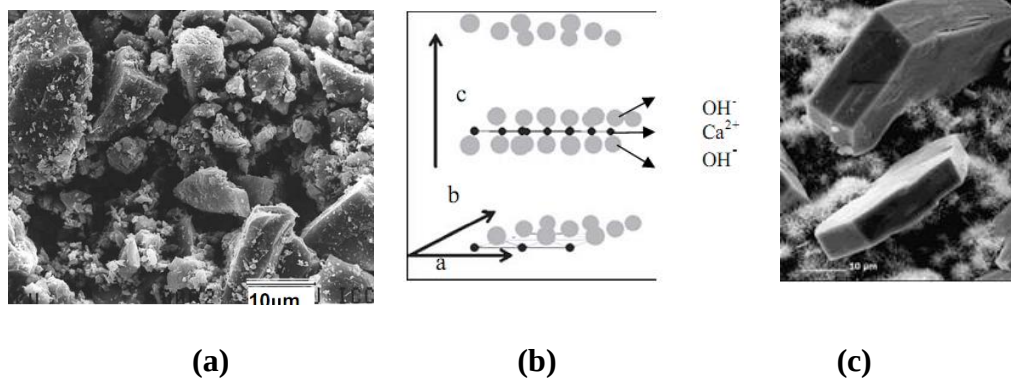


Figure : 2.23 (a) grains de ciment (b) structure cristalline de la portlandite ;
(c) image au MEB de cristaux de portlandite [97]

2-3-2-2 Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Les C-S-H constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment. On parle souvent de gel de C-S-H en se référant à des composés amorphes. Ce sont en fait des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes aux autres (Figure 2.24). Les dimensions typiques de ces particules sont de l'ordre de $60 \times 30 \times 5$ nm³[98]. Ces nano cristallites de forme lamellaire sont constitués de deux ou trois feuillets avec une étendue d'environ 5 nm comme le décrit le modèle de Feldman-Sereda [99].

La famille des C-S-H est formée d'une grande variété de silicates de calcium hydratés. Une des caractéristiques importantes qui différencie ces espèces est le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport Ca/Si). Trois phases de C-S-H sont distinguées : C-S-H- α correspondant à $0,66 < \text{Ca/Si} < 1$, C-S-H- β correspondant à $1 < \text{Ca/Si} < 1,5$, C-S-H- γ correspondant à $1,5 < \text{Ca/Si} < 2$ [96].

On distingue souvent également les C-S-H par leur morphologie [96], en particulier les C-S-H externes (outer product) de morphologie plutôt fibrillaire, qui se développent à partir de la surface des grains anhydres dans les pores de la pâte et les C-S-H internes (inner

product) de morphologie plus compacte, qui occupent l'espace libéré par le grain d'alite qui se dissout (Figure 2.24). Les particules de C-S-H peuvent être classées en 4 types morphologiques selon Diamond [100] :

Type I: il se présente en feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux et rayonnent autour du grain de ciment. Cette cristallisation aciculaire recouvre progressivement les grains anhydres et leur donne un aspect dit « en hérissos ». Cette morphologie fibreuse est surtout visible aux premiers âges de l'hydratation.

Type II: il se présente sous forme alvéolaire (nid d'abeilles).

Type III: il apparaît souvent comme de petits disques ou des sphères (0,2 μm) assemblés pour former des particules plus massives sans forme particulière. On le trouve dans les pâtes matures.

Type IV: il s'agit d'une structure particulièrement dense et amorphe.

Les types I et II cristallisent en début de prise dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Par contre, les types III et IV seraient plutôt des hydrates tardifs qui occuperaient la place des grains anhydres d'origine; pour cela, ils sont appelés hydrates internes [95].

Du fait de la petite taille des particules qui le composent, la surface spécifique du C-S-H est très élevée (de l'ordre de 250 m²/g) [101].

Le C-S-H est très peu soluble dans une solution saturée par rapport à la portlandite (quelques $\mu\text{mol/L}$, soit de l'ordre de 1 mg/L). Sa solubilité augmente quand la concentration en hydroxyde de calcium en solution diminue. Si le pH descend en dessous de 10, il se dissout au profit de la silice qui devient moins soluble [102].

Les silicates de calcium hydratés restent des corps mal définis et mal cristallisés non identifiables par DRX. C'est pour cela que cette phase est souvent appelée « gel », en rapport avec son faible degré de cristallinité et le fait qu'elle soit gorgée d'eau.

L'espace inter feuillet peut être qualifié de première classe de porosité. Les autres classes de porosité naissent de l'agencement des lamelles [99].

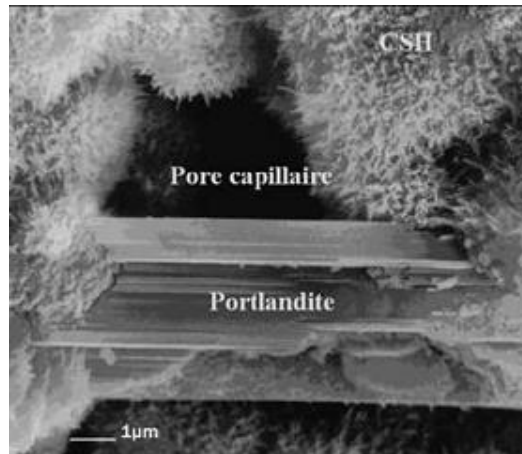


Figure : 2.24 morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'Alite [103]

2-3-2-3 Les aluminates de calcium hydratés

On distingue les phases hexagonales (C_2AH_8 – C_4AH_{13}) et la phase cubique C_3AH_6 .

* *Le C_3AH_6 ou hydrogrenat*

Le C_3AH_6 , $Ca_3Al_2(OH)_{12}$ est la forme la moins soluble des aluminates de calcium hydratés et la plus stable. Il présente la même structure cristalline que le grenat $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ (Katoite) [104]. L'hydrogrenat est le produit de l'hydratation des ciments alumineux, on le trouve rarement dans les ciments Portland hydratés à des températures normales.

* *Les phases hexagonales*

Les hydrates les plus stables sont les carboaluminates de calcium qui se forment dans les ciments contenant des ajouts calcaires ou simplement à partir des carbonates dissous dans la solution interstitielle du fait du contact avec le CO_2 atmosphérique.

2-3-2-4 L'ettringite

L'ettringite ($C_3A_3CSH_{32}$) cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (Figure 2.25), souvent rayonnantes (oursins) autour des grains de ciment anhydres dans une pâte de ciment âgée. Ces aiguilles se retrouvent parsemées dans les fibres de C-S-H [95]. Le nombre de molécules H_2O de la formule de l'ettringite est mal connu, il peut être 30, 31, ou 32 H_2O suivant la température et la pression partielle de vapeur d'eau du milieu.

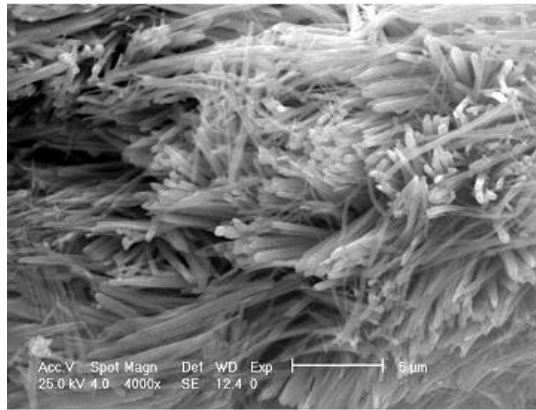


Figure : 2.25 Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une peolote d'ettringite [105]

C - Les superplastifiants et leurs modes d'action :

2-4 Historique

L'introduction des superplastifiants dans le béton a été le fruit du hasard. Du noir de charbon avait été ajouté au béton pour changer la couleur de la ligne médiane d'une autoroute à trois voies. Cela a dégradé la maniabilité du béton, un dispersant a donc été introduit pour contrecarrer l'effet du noir de charbon. Le béton, une fois pris, se caractérisait par des propriétés qui indiquaient l'influence positive du dispersant [106]. Les ouvriers avaient probablement ajouté moins d'eau en raison de la dispersion accrue, et le matériau durci avait montré une résistance supérieure [107].

Mielenz [108] nous apprend que les effets dispersifs des sels d'acides sulfuriques et d'acides naphtalènes sulfoniques furent utilisés pour la première fois en 1936 par H.L. Kennedy. En 1938, un premier brevet américain sur l'emploi d'agent dispersant à base d'acide aromatique sulfonique condensé avec la formaldéhyde, est octroyé à G.R. Tucker. En 1939, un second brevet sur les effets dispersifs des sels solubles d'acides sulfoniques est enregistré par J. Scripture [109].

Les lignosulfonates, obtenus par traitement du bois avec le bisulfite, sont utilisés en tant que dispersants vers 1950. Cependant, ce sous-produit de l'industrie de la pâte à papier contient du glucose qui retarde fortement la prise. Ces molécules organiques ne sont pas très longues, donc leur effet neutralisant sur les particules de ciment sera plus ou moins local. En utilisant de tels adjuvants, la réduction de la quantité d'eau de gâchage se trouve entre 8 et 10 %, ce qui est nettement insuffisant pour éliminer totalement l'eau excédentaire (non nécessaire à l'hydratation du ciment) [110].

La découverte au début des années 60 par les japonais (1962) et les allemands (1964) des propriétés dispersantes des lignosulfonates modifiés (LMS), des polynaphtalènes sulfonates (NSF) et des polymélamines sulfonates (MSF) ont permis à la technologie du béton de progresser. Il est devenu possible de fabriquer des bétons fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons de très faible rapport E/C et faciles à mettre en place.

Dans la présente décennie, une nouvelle famille de produits à base de polymères carboxyliques, acryliques ou de polyéthylène a été proposée et utilisée. Ces polymères qui ne contiennent pas de groupes sulfoniques, avec leurs molécules de longues chaînes latérales sont plus efficaces que les MSF et NSF. Ils ont été développés pour l'utilisation dans l'industrie du béton où qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

2-4 -1 Utilisation, adsorption et mode d'action des superplastifiants

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la Figure 2.26 [114] permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble. Young [115] constate qu'aux premiers stades de l'hydratation du ciment, les adjuvants anioniques sont préférentiellement adsorbés sur les phases aluminates. L'adsorption de superplastifiant par les C_3A et C_4AF purs est plus importante que par du C_3S et du C_2S purs.

La plupart des travaux effectués sur l'hydratation du C_3A influencée par la présence des adjuvants concluent que l'hydratation du C_3A est retardée par les superplastifiants [116]. Hanchara [117] et Kim [118] ont observé que l'adsorption des superplastifiants est plus importante pour les ciments présentant un taux en C_3A élevé et en concluent que l'adsorption des superplastifiants a lieu de façon préférentielle sur cette phase. Ces auteurs omettent cependant de préciser si l'adsorption observée a effectivement lieu sur la phase anhydre C_3A ou bien sur ces ou l'un de ces hydrates [109]. D'autres auteurs tel que Ramachandran [119] semblent s'accorder sur le fait que les superplastifiants s'adsorbent de manière décroissante selon la séquence : $C_3A > C_4AH_{13} > C_3AH_6$. Comparet [109] a mesuré l'adsorption des superplastifiants sur des phases pures les plus stables qu'il a synthétisées sans prendre en considération le C_3A du fait de sa grande réactivité. Il a pu mettre en évidence que les superplastifiants s'adsorbaient de façon préférentielle sur les hydrates du fait de leurs plus grandes surfaces spécifiques et il a établi un classement qui reflète l'évolution des surfaces spécifiques des minéraux : $CSH > Ca(OH)_2 > C_3AH_6 > Ettringite > Monosulfoaluminate >> C_3S$ (classement par ordre décroissant du pouvoir adsorbant).

En raison des compositions chimiques différentes, les particules de ciment peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes les autres. Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité.

Les molécules des superplastifiants viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ces superplastifiants peuvent agir soit:

- ✓ Par formation d'une couche lubrifiante [120], séparant les grains les uns des autres. Il suffit d'une très faible quantité de superplastifiant pour recouvrir d'une couche de quelques molécules d'épaisseur certains "sites" préférentiels des grains. Les particules de ciment se déplacent alors plus facilement les unes par rapport aux autres sans avoir à vaincre des forces plus élevées de cisaillement, comme c'est le cas d'une agglomération des grains;

- ✓ Par répulsion [121], les adjuvants neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules pour empêcher le contact entre les grains de s'opérer et amener une défloculation de ces grains;
- ✓ En réduisant la tension superficielle de l'eau par rapport au ciment et aux éléments les plus fins;
- ✓ Par un mécanisme d'actions successives. Les superplastifiants à base de polymères carboxyliques se différencient des superplastifiants traditionnels par une action liant la répulsion électrostatique et l'effet stérique [122]. C'est en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment grâce à la longueur des chaînes latérales des polymères que l'encombrement spatial améliore l'état dispersé (Figure 2.27). Cette réaction est la combinaison de deux actions successives (Figure 2.28) qui permettent de s'opposer à la perte de l'ouvrabilité dans le temps. Dès l'incorporation du superplastifiant dans le mélange cimentaire, une première partie agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive.

L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires. Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc la dispersion, évitant ainsi la perte d'efficacité dans le temps [123,113].

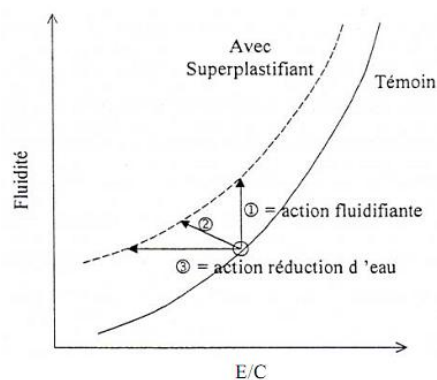


Figure 2.26 : Utilisation d'un superplastifiant [114]

- 1-Augmentation de la fluidité à teneur en eau égale
- 2-Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3-Diminution de la teneur en eau à fluidité égale.

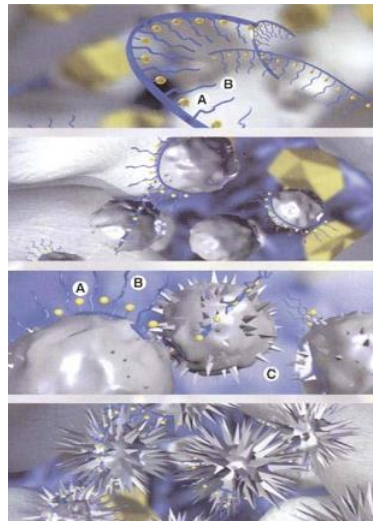


Figure 2.27 : Mécanisme d'action d'un superplastifiant à base de polycarboxylates [123]

A : répulsion électrostatique , B : effet stérique

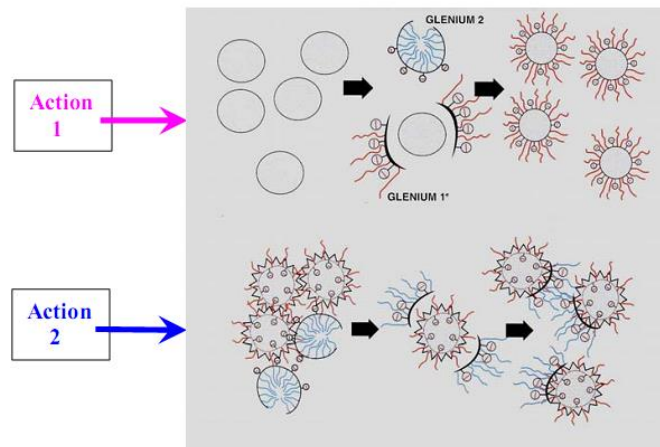


Figure 2.28: Mécanisme d'action successive (Exemple de superplastifiant « Glenium » à base de polycarboxylates)

2-4-2 Paramètres influents :

✓ Influence de la masse moléculaire du superplastifiant :

L'adsorption du superplastifiant dépend de sa masse moléculaire : lorsqu'elle augmente, l'adsorption et l'effet fluidifiant augmentent simultanément [124], [125], [126], [127], [128], [129]. La masse moléculaire du NSF peut varier de 2000 à 50000 Da [130] et celle du MSF de 7900 à 20000 Da [131]. Elle dépend des conditions de préparation par polycondensation. L'effet fluidifiant du superplastifiant dépend de sa masse moléculaire. Cependant, Ferrari et al. [132] trouvent que le superplastifiant NSF de masse moléculaire comprise entre 6000 et 8000 Da exerce un meilleur effet fluidifiant sur les ciments utilisés. Ils ont remarqué une

diminution de l'efficacité fluidifiante pour des masses moléculaires supérieures à 8000 Da dans le cas de deux ciments riches en A C3 (9 % et 10,5 %). Les résultats de Piotte [125] confirment que certains polymères NSF de haute masse moléculaire ne fluidifient pas les suspensions de ciment. L'effet de la masse moléculaire dépend ainsi de la composition du ciment [131], [132].

✓ ***Influence du dosage en superplastifiant :***

L'incorporation du superplastifiant dans le ciment conduit à une augmentation de la fluidité des pâtes de ciment. Paillère et al. [133] mettent en évidence l'existence de trois plages de dosages influençant le maintien de la maniabilité du béton:

- * une plage de faibles pourcentages d'adjuvant inférieurs à 1 % d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est faible, sa durée maximale étant de 15 min;
- * une plage de pourcentages élevés en adjuvant. Elle concerne des dosages en superplastifiant supérieurs à 1 % et pouvant atteindre jusqu'à 3 % en extrait sec. On constate ici un phénomène de refluidification du matériau hydraulique en fonction du temps, c'est-à-dire une augmentation de l'effet fluidifiant au cours du temps (après repos).
- * une plage de pourcentages très élevés en adjuvant. Les valeurs sont supérieures à 3 ou 4% d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est très faible.

L'addition du superplastifiant conduit également à un retard de l'hydratation du ciment, donc à un ralentissement du dégagement de la chaleur d'hydratation et à une augmentation du temps de prise. L'effet retardateur du superplastifiant est étroitement lié aux dosages de ce produit. Il augmente graduellement lorsque la concentration en superplastifiant augmente. Ce retard est dû, d'une part, à l'adsorption du superplastifiant sur le C3A, ce qui empêche le contact de l'eau avec ce composé et, d'autre part, à la formation des particules plus fines d'ettringite dont la texture est plus dense en présence de superplastifiant. Plus l'adsorption est forte, plus le retard est amplifié. Ce dernier est plus marqué par la faible teneur en C3A du ciment [134]. L'effet retardateur du superplastifiant contribue à l'intensification de son effet plastifiant. Un retard important peut entraîner une réduction de la résistance à la compression aux jeunes âges (à 1 jour) [129].

✓ ***Influence du contre ion :***

Les résultats de Simard et al. [129] ont montré que l'effet fluidifiant du polynaphtalène sulfonate dépend du type de contre-ion de ce superplastifiant. La présence des ions calcium diminue l'effet fluidifiant du NSF par rapport aux ions sodium. En revanche, l'effet retardateur du superplastifiant est indépendant du type de contre-ion. Piotte et al. [125] ont noté que les polynaphtalènes sulfonates (M-NSF) dont le contre ion (M) est un alcalin (monovalent inorganique) présentent tous un effet semblable sur la viscosité et le temps d'écoulement des suspensions étudiées. Par contre les contre-ions alcalino-terreux (divalents inorganiques) et

les contres-ions organiques ont tous un effet particulier sur l'efficacité du polymère : soit sur la fluidité initiale, soit sur la perte de fluidité en fonction du temps.

✓ ***Influence du mode d'introduction du superplastifiant :***

Le mode d'introduction du superplastifiant peut également influencer la fluidité des pâtes de ciment et la vitesse d'hydratation durant la période dormante. Le superplastifiant est généralement plus efficace lorsque son addition est différée [126] [135], [136], [137], ou fractionnée (une fraction 1/3 dans l'eau de gâchage et 2/3 à la fin du malaxage) [133], [138].

Collepari et al. [139] observent que l'addition différée du superplastifiant (2 min 30 après mélange eau-ciment) conduit à une augmentation de la fluidité.

Paillère et Briquet [140] signalent que les polymères de synthèse incorporés en différé (30 min et plus après fabrication des mélanges hydrauliques) présentent un effet fluidifiant très élevé. Chiocchio et Paolini [141] rapportent que l'addition différée du superplastifiant (NSF ou MSF) de quelques minutes augmente la fluidité par rapport à une addition dans l'eau de gâchage.

Dans ce cas, la diminution de l'ouvrabilité en fonction du temps est faible et la nature du superplastifiant n'influence pas ce changement de fluidité au cours du temps. Le moment d'addition optimal est de deux minutes après le mélange eau-ciment. Il correspond au début de la période dormante de l'hydratation du ciment (sans adjuvant).

Dans le cas de l'addition du superplastifiant dans l'eau de gâchage, le polymère est sensiblement adsorbé sur le ciment et le sulfate de calcium. Ainsi, seulement une faible quantité de superplastifiant reste disponible dans la solution interstitielle et son effet dispersant sur C_3S et C_2S est alors considérablement réduit. De plus, le sulfate de calcium ne peut plus réagir pleinement avec le C_3A pour réguler la prise éclair, ce qui dégrade l'ouvrabilité. En revanche, une addition différée de quelques minutes laisse un temps suffisant aux sulfates pour former une coquille d'ettringite qui bloquera temporairement l'hydratation du ciment avant que le superplastifiant ne soit introduit, les molécules de superplastifiant n'entrent donc pas en compétition avec le sulfate de calcium pour réagir avec le C_3A , elles demeurent disponibles pour disperser le C_3S et le C_2S . Paillère et al. [133] montrent l'intérêt de l'addition fractionnée du superplastifiant: une fraction dans l'eau de gâchage, l'adjuvant jouant son rôle de plastifiant réducteur d'eau, et la fraction restante à la fin du malaxage, voire avant la mise en œuvre des bétons, l'adjuvant jouant alors son rôle fluidifiant. Un superplastifiant qui serait efficace indépendamment du mode d'introduction serait mieux apprécié dans les centrales pour béton prêt à l'emploi ou de préfabrication afin de réduire la variabilité du slump du béton frais comme le cas pour les superplastifiants à base de polymères acryliques [123].

✓ ***Effets des superplastifiants à long terme :***

- La résistance des bétons à longterm est limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des superplastifiants, on va

pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible ; le résultat est une augmentation des résistances finales.

- Le béton d'enrobage qui est la surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention, car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que : le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques ou les agressions chimiques tel que le CO₂. Les superplastifiants sont là pour limiter grandement ces risques, notamment en augmentant la compacité des bétons et en protégeant les armatures pour un meilleur enrobage.

2-4-3 Conclusion :

La teneur en portlandite des matériaux cimentaires est un indicateur performantiel de la durabilité des structures en béton armé vis-à-vis de la carbonatation, puisque la portlandite représente la réserve de basicité des matériaux cimentaires qui permet, en maintenant un pH élevé autour de 13, de protéger par passivation les aciers de la corrosion.

Les superplastifiants à base de polycarboxylates sont des adjuvants qui ne contiennent pas de groupes sulfoniques. Ils arrivent à réduire l'eau d'environ 30 à 40 % grâce à leurs molécules de longues chaînes latérales et un poids moléculaire élevé. Leur structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique. Une première partie du superplastifiant agit immédiatement dès l'incorporation dans le mélange cimentaire, tandis que la seconde partie est libérée au fur et à mesure que la basicité du mélange augmente, ce qui permet de prolonger l'ouvrabilité sans effet retardateur.

La formulation des bétons adjuvés dépend du comportement du couple ciment-superplastifiant. Ce comportement est fonction de la réactivité du ciment d'une part et de l'efficacité du superplastifiant d'autre part. Certains ciments, en présence de certains types de superplastifiants, peuvent perturber la prise : retard de plusieurs heures, fausse prise immédiate, prise éclair.

D- Béton:

2-5-1 Introduction :

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

La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sur, des matériaux de base qui entrent dans la formulation mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation). Il s'agit de déterminer la meilleure qualité du béton qu'on puisse obtenir.

Pour ne citer que la résistance à la compression du béton qui reste, la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité [142], nous allons examiner

ci-après les différents facteurs ayant une influence sur cette résistance, et sur lesquels on pourra compter pour l'amélioration de la qualité du béton.

2-5-2 Historicité :

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [143].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

Au 20^{ième} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculants et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et de durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons de démoulage immédiat à plus de 25 cm pour les bétons autoplacants. De même, les résistances requises à 28 jours en compression peuvent s'échelonner depuis des valeurs modestes, de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPa et plus pour certains produits spéciaux préfabriqués.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplacants. L'étude du matériau n'est plus seulement gouvernée par l'amélioration

de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Nous disposons actuellement de bétons particulièrement fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration et qui sont devenues prioritaires. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 [144]. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes). Les BAP sont utilisés entre autres pour réaliser des éléments de structure préfabriqués, des réservoirs, des plates-formes de pont, des colonnes architecturales et ainsi que des ancrages pour de grands ponts.

2-5-3 Les composants d'un béton :

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure 2.29) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 μ m (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [145].

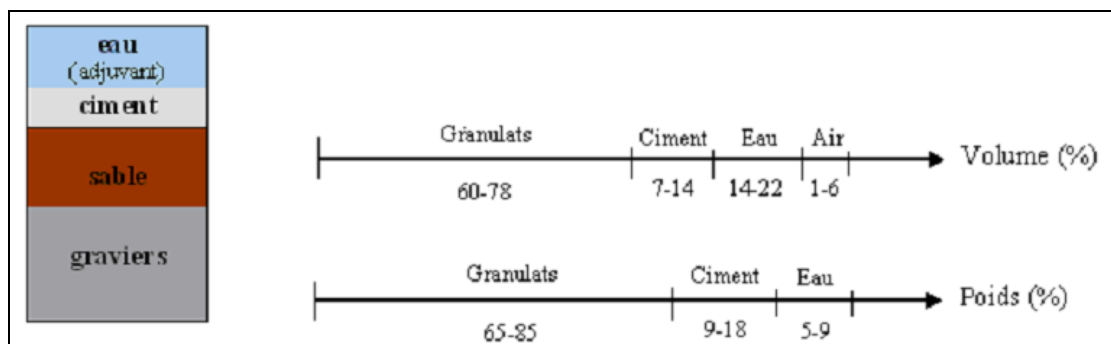


Figure 2.29 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire

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

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,...) peuvent être rajoutés dans le but de modifier les propriétés du béton.

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

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

2-5-3-1 Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment + additions + eau efficace + air + adjuvants. La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension de particules colloïdales suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau. Les forces colloïdales et la force de la pesanteur régissent alors complètement ses propriétés macroscopiques [146].

✓ Le ciment

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. C'est un liant hydraulique à la base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu [147]. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant d'accélérer pendant la phase de prise. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, les ciments les plus utilisés sont les CEM II de classe 32,5 – 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Ce sont des ciments bien adaptés aux usages les plus courants du bâtiment, dans les environnements 1 et 2 au sens de la norme P 18-305 [148].

El Barak et col. (2008)[149] ont montré que le dosage en ciment a un effet sur la viscosité du béton pour un gradient de vitesse petit.

✓ Additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [146]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulo-métrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la

ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique [150]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [151].

2-5-3-2 L'eau:

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité. Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [148], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

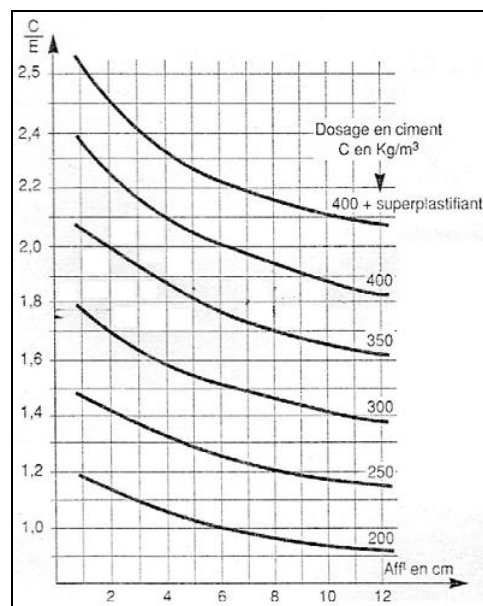


Figure 2.30 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé [153]

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure 2.30 montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé.

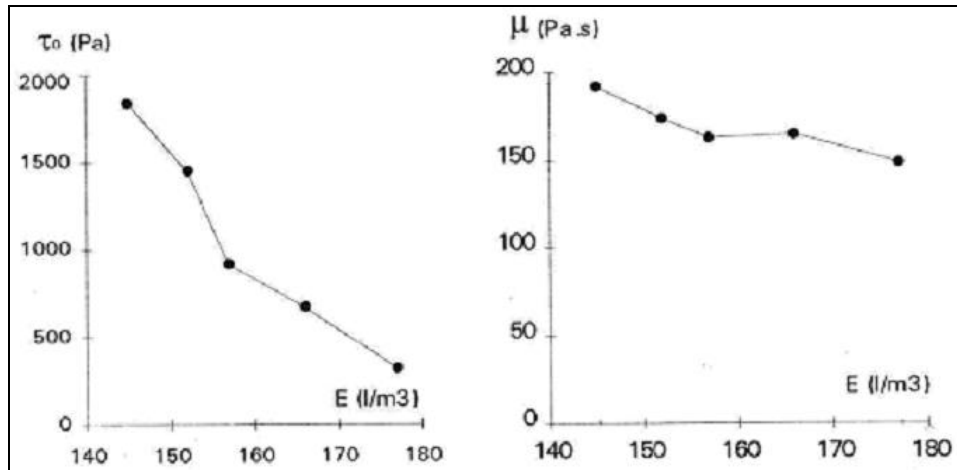


Figure 2.31 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [154]

Un ajout d'eau conduit également à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la figure 2.31.

2-5-3-3 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égale à 5% du poids du ciment permettant d'améliorer certains de ses propriétés [142]. Ils fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les superplastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent suivant leur nature à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [146]. Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des superplastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau.

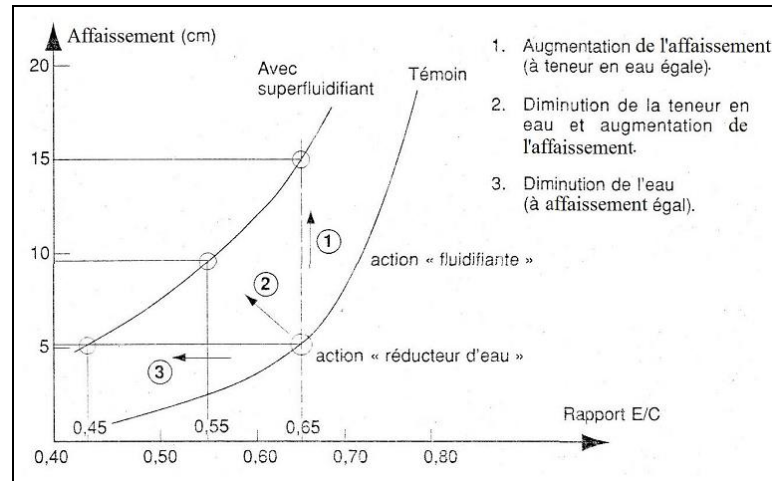


Figure 2.32 : Utilisation des superplastifiants [153]

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la figure 2.32, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en termes de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces.

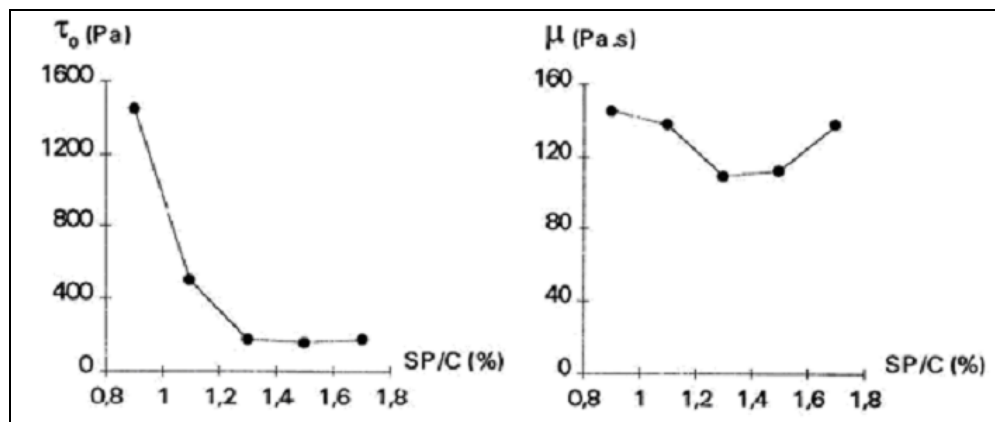


Figure 2.33 : L'effet du dosage du superplastifiant [155]

Dans sa thèse, Hu (1995) a étudié l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. Il a ainsi montré que les superplastifiant diminuent le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, mais que l'effet sur la viscosité reste modeste (figure 2.33).

2-5-3-4 Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la

confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci. Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico chimiques et mécaniques.

On a constaté qu'un granulat peut paraître insatisfaisant sous certains aspects, alors qu'aucun problème n'a été détecté lorsqu'il a été utilisé dans le béton. Par exemple, une éprouvette de roche peut se rompre lorsqu'elle est soumise au gel, mais ne pas se briser si elle est confinée dans du béton. Cela est d'autant plus vrai lorsque les granulats sont bien enrobés d'une pâte de ciment de faible perméabilité. Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton de qualité. Ceci dit, les essais sur les granulats sont d'une aide précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons [156].

La phase granulaire résiste au cisaillement suivant un processus mécanique faisant intervenir l'enchevêtrement et les frottements des grains (loi de Coulomb). Ces processus dépendent à la fois des caractéristiques physiques des granulats (dimension, forme, masse, etc.) et de leur concentration dans le mélange [146]. Le seuil de cisaillement τ_0 du mélange est régi par le nombre et la nature des contacts entre les granulats.

En général, la forme des granulats a un effet appréciable sur la maniabilité du béton. En effet, les granulats roulés avec leurs formes présentent l'avantage d'avoir un plus petit volume de vide intergranulaire, ce qui nécessite une faible quantité de pâte de ciment pour le remplir et réduisent généralement la demande en eau. Ils présentent aussi une bonne résistance intrinsèque mais développent une liaison médiocre avec la pâte de ciment. Par contre, les granulats concassés nécessitent une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités et de leurs absorptions [157], mais ils sont réputés avoir une excellente adhérence avec la matrice cimentaire, à cause de leurs natures chimiques, leurs porosités et leurs rugosités [154].

La figure 2.34 montre que la quantité d'eau est plus forte avec le granulats concassé, à cause de son absorption et de sa compacité. Mais dès que le mélange devient assez riche, il n'y a plus aucun effet de la forme du granulats sur le rapport optimal gravillon/sable (G/S). Enfin, la consommation en ciment est plus forte avec le granulats roulé, à cause de sa mauvaise adhérence à la pâte de ciment.

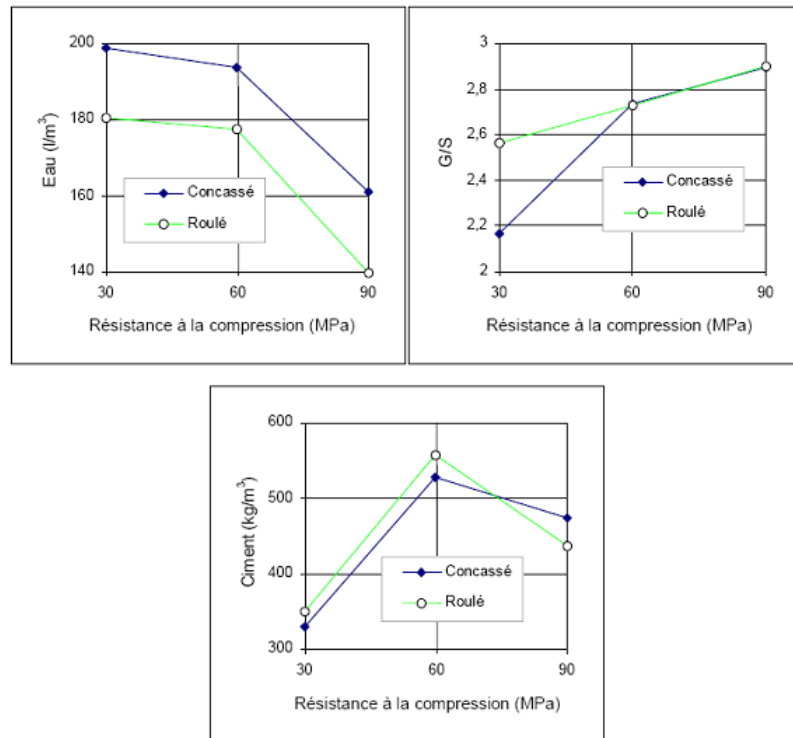


Figure 2.34 : Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres [154]

L'étendue de taille des grains des bétons peut être illustrée dans la figure 2.35.

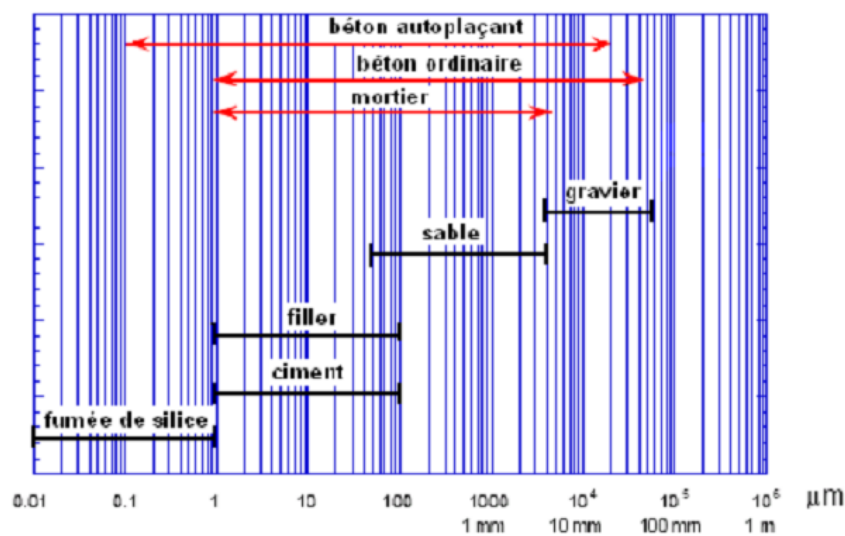


Figure 2.35 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire [146]

A partir de la figure 2.35, on constate clairement dans le cas des bétons ordinaires, la présence des gros granulats et l'absence de la fumée de silice.

2-5-4 Malaxage des constituants :

Après le dosage, les constituants sont versés dans un malaxeur et mélangés à l'aide d'un système de pales de brassage. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et/ou addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant. L'objectif du malaxage est de répartir des constituants de nature et de tailles différentes en vue d'obtenir un mélange le plus homogène possible. La répartition homogène s'accompagne d'une structure optimale, attendue pour un mélange poly-phasique comme le béton: le ciment entre en contact avec l'eau, les petits grains s'empilent dans les vides des plus gros grains et la pâte enrobe les granulats. L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage.

La durée totale du cycle de malaxage (figure 2.36) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

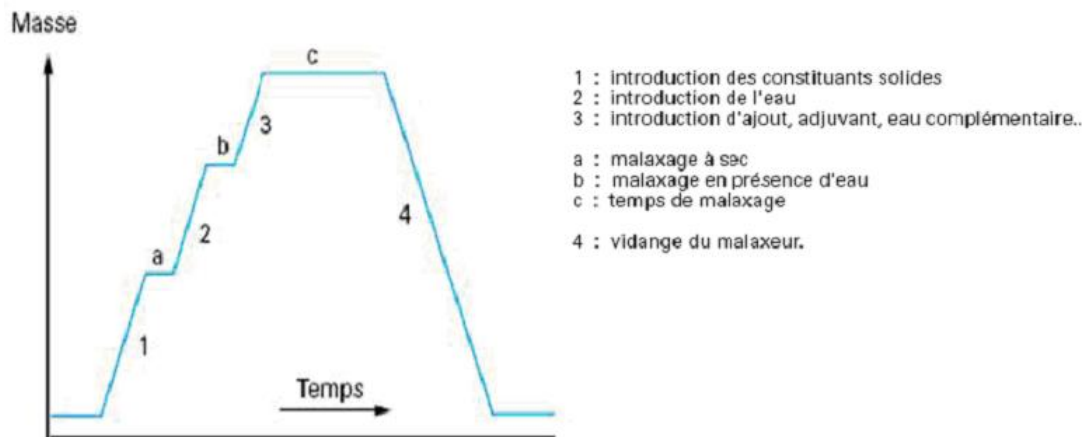


Figure 2.36 : Cycle de malaxage [158]

Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.

Le temps est un paramètre prédominant pour l'homogénéisation du béton lors de son malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air « piégés ». Ceci accroît donc la densité et la compacité du béton (figure 2.37).

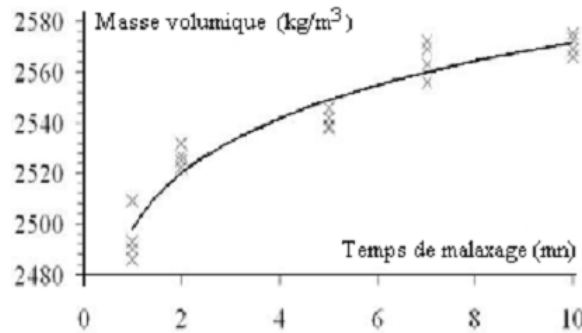


Figure 2.37 : Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage [159]

Parfois, une perte de la maniabilité du béton peut être observée lors de la prolongation du temps de malaxage. Ces phénomènes ont reçu des explications différentes selon les auteurs :

- ✓ selon Vandanjon (2000)[160], l'augmentation de la surface spécifique des particules primaires, c'est à dire des amas qui restent groupés lors des mouvements de cisaillement dans le béton frais tend à accroître le seuil;
- ✓ selon Chopin (2003)[161], l'effet de défloculation importante de l'adjuvant accroît le frottement et donc le seuil.

2-5-5 Qualités essentielles d'un béton :

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

2-5-5-1 A l'état frais

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides. Ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisante pour permettre la mise en œuvre souhaitée [145].

Deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques.

➤ Ouvrabilité

Après avoir été malaxé, le béton frais doit rapidement être mis en œuvre sur le chantier pour diverses opérations : vidange dans les coffrages, serrage (par vibration, piquage...) et talochage, ... La manière dont le matériau se comporte est gouvernée par son ouvrabilité.

L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange. Dreux et Festa (1998)[153] écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage ». Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction. En effet, selon ces auteurs, la plupart des qualités de l'ouvrage telles que la compacité et la résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, l'enrobage et l'adhérence des armatures, les parements de belle apparence, l'étanchéité, etc., dépendent de l'ouvrabilité.

Au-delà de la mise en place sur le chantier, Faury (1958) souligne que l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de malfaçons. Ces propriétés doivent donc être classées en deux groupes distincts suivant qu'elles s'appliquent au transport ou à la mise en œuvre du mélange.

Dans la pratique, il existe plusieurs méthodes de transport (en bétonnière, en wagonnette, en benne, en camion...) et plusieurs processus de mise en œuvre (pompage, vibration, projection, compactage...). C'est pourquoi de nombreux tests technologiques ont été proposés pour s'adapter à cette diversité. Ces essais permettent de mesurer empiriquement certaines caractéristiques dépendant de l'ouvrabilité. Nous pouvons citer quelques appareils recensés dans la littérature: le cône d'Abrams et l'étalement à la table à secousses [153]. Pour les bétons très secs, on pourra utiliser l'essai V.B., qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour qu'un cône de béton se mette à l'horizontale dans un récipient cylindrique périphérique, une fois soumis à une vibration. Le maniabilimètre L.C.L. [162] fonctionne sur le même principe, et la vibration est déclenchée lorsque l'on retire la trappe. Un temps long signifie que le béton est ferme.

L'affaissement au cône d'Abrams ou « slump test » est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés. Il est décrit dans la norme Algérienne NA 431. Pour effectuer cet essai, on remplit tout d'abord un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm) de béton. Le remplissage est exécuté en trois couches serrées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide. La norme EN 206-1 spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams - norme NF EN 206-1

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥ 220

Lors du remplissage du coffrage, l'affaissement du béton est un des facteurs faisant varier la pression du béton sur le coffrage, paramètre important lors de leur dimensionnement. [153].

Zivkovic (1992) [163] a montré que, plus la température des constituants du béton augmente, plus la demande en eau est importante et d'un autre côté l'affaissement diminue comme indiqué sur la figure 2.38. Sur cette figure, la courbe 1 donne l'affaissement au cône d'Abrams pour un même dosage en eau (180 l/m^3) et la courbe 2 la demande en eau nécessaire à l'obtention d'un même affaissement de $7,5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$. Quand la température s'élève de 20° à 40° , la demande en eau passe de 190 à 220 l/m^3 .

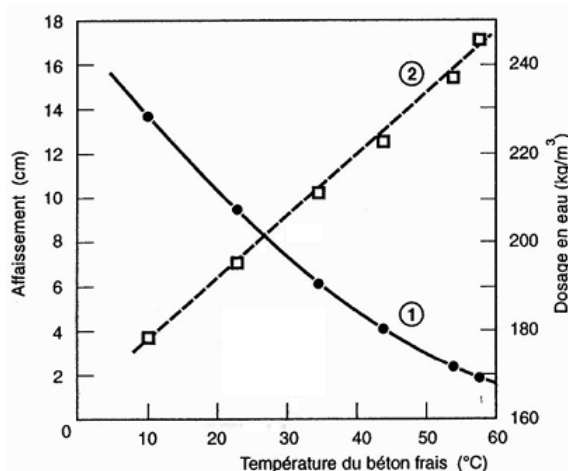


Figure 2.38 : Influence de la température du béton frais sur la demande en eau et sur l'affaissement [163]

Les mesures de l'affaissement ont été effectuées sur des bétons frais, dosés à 300 kg/m^3 de CPA-CEM I A, préparés avec des constituants à différentes températures et conservés, ensuite, à $22 \pm 2^\circ \text{C}$.

Le béton avant même d'être sorti du malaxeur commence à évoluer : premières réactions chimiques entre le ciment et l'eau, dessiccation, etc. A cause de cela, la valeur de l'affaissement au cône au moment de la livraison sur le chantier est toujours inférieure à celle mesurée à la sortie du malaxeur (perte d'affaissement). A l'évidence, c'est la consistance du béton au moment de sa livraison qui doit être égale à la valeur cible.

L'ingénieur qui formule un béton doit donc tenir compte du délai de livraison du béton et mesurer sa consistance trente minutes, voire une heure après la fabrication. Si le bétonnage a lieu l'été, il doit aussi tenir compte de la température. La figure 2.39 montre combien cette précaution est nécessaire car il peut y avoir des différences sensibles d'un béton à l'autre [162].

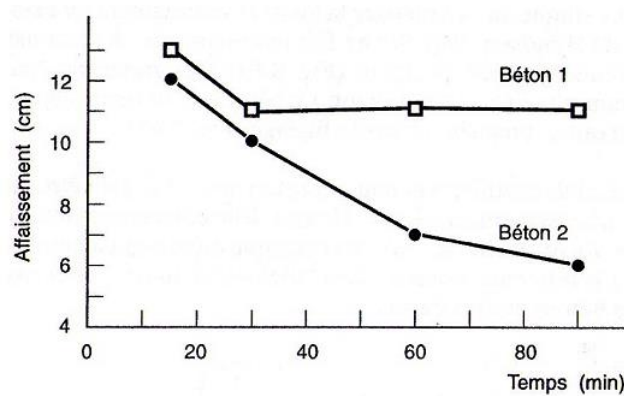


Figure 2.39 : Perte d'affaissement d'un béton au cours du temps [162]

Les bétons 1 et 2 ont les mêmes proportions ($E=200 \text{ l/m}^3$, $C=300 \text{ l/m}^3$) et diffèrent seulement par l'origine du ciment. Après malaxage, le béton est conservé sans agitation à 20°C . La consistance du béton frais est mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams après différentes durées d'attente. A la sortie du malaxeur, les deux bétons ont une consistance très plastique. Soixante minutes après, celle du béton 1 est toujours très plastique, alors que celle du béton 2 est devenue plastique.

Makhloufi et Bouhicha (2008)[164] ont montré l'évolution de la résistance en fonction de l'affaissement sur la figure 2.40. Ils ont remarqué une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C . Pour chacun des dosages en ciment considérés de CPJ-CEM II/A d'Ain Touta, plusieurs mélanges de béton ont été confectionnés, en faisant varier le rapport E/C . Le rapport optimal G/S a été gardé constant ($G/S = 1,47$) et les quantités des granulats de types calcaires concassés utilisés sont les suivantes : Sable 0/5 = 704,41 kg, Gravillon 5/15 = 399,32 kg et Gravillon 15/25 = 635,44 kg.

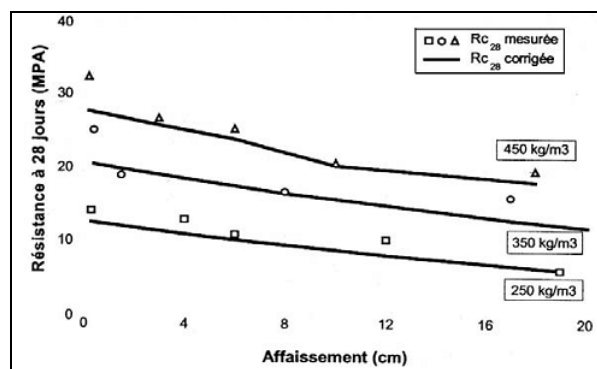


Figure 2.40 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement [164]

Il convient de noter que les valeurs des résistances mesurées et corrigées sont proches les unes des autres pour les dosages en ciment considérés.

2-5-5-2 A l'état durci :

Le béton frais va évoluer pour aboutir au produit durci recherché. Il est incontournable de suivre l'évolution du béton sous différents aspects :

- ✓ Chimique, car il s'agit bien d'un ensemble de réactions,
- ✓ Physique, car le développement de la microstructure s'accompagne de phénomènes physiques qui définiront un état initial de la structure,
- ✓ Mécanique, car les aspects précédents conduisent à des cinétiques variables et des performances modulées en conséquence [145].

Le béton durci est un solide hétérogène formé de granulats enrobés par une pâte de ciment, il apparaît donc en première analyse, que ses propriétés mécaniques dépendent : de celles de la pâte liante, de celles des granulats et de l'adhérence pâte-granulats.

➤ **Résistance à la compression :**

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures (exception faite par exemple du domaine routier). C'est donc en général la résistance en compression qui sert de caractérisation de base du béton durci.

Cette résistance en compression est déterminée suivant la norme européenne NF EN 12390-3. La résistance à 28 jours après un mûrissement à l'eau sert en général de référence. La norme EN 206 définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30). X est la résistance caractéristique (c'est-à-dire garantie dans 95% des cas) mesurée sur cylindre 16x32 cm, tandis que Y est la résistance (du même béton) mesurée sur cube 15x15 cm.

La résistance à la compression s'explique par la réaction d'hydratation du ciment Portland, mélange de clinker et de gypse finement co-broyés. Le clinker se compose principalement des quatre minéraux suivants dans des proportions variables : silicate tricalcique C3S, silicate bicalcique C2S, aluminat tricalcique C3A et aluminoferrite tétracalcique C4AF.

La réaction du C2S et du C3S avec l'eau conduit à la formation d'hydrates dont les principaux sont les cristaux de C-S-H ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), qui sont en majeure partie responsables du durcissement de la pâte de ciment, permettant à cette dernière de reprendre les charges extérieures et donc de participer à la résistance macroscopique du béton [165],[166].

La liaison entre la pâte durcie et les granulats qu'elle enrobe conditionne également la résistance mécanique du béton. On observe, autour des granulats dans le béton durci, une zone de pâte hydratée particulière : l'auréole de transition. Cette auréole a des propriétés différentes de la pâte dans sa masse, en fonction de la porosité des granulats. Dans le cas de granulats non poreux, l'auréole comporte une couche de cristaux de grandes dimensions, très

poreuse et de cohésion faible, générant des zones de faiblesse pour les bétons soumis à des actions mécaniques [167].

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment, etc.

1- Essai de résistance à la compression :

Le plus courant des essais sur béton durci est la résistance à la compression, en partie parce que cet essai est facile à exécuter et aussi parce que de nombreuses caractéristiques du béton, mais pas toutes, peuvent être qualitativement reliées à sa résistance.

Toutefois, la raison principale de cet essai est l'importance intrinsèque de la résistance à la compression lors de la conception structurale. Même s'il est universellement utilisé dans le domaine de la construction, l'essai de résistance à la compression présente quelques inconvénients, mais il constitue, à parler franc, un élément du bagage culturel de l'ingénieur [168].

Les résultats de l'essai de résistance à la compression peuvent être affectés par différents paramètres : le type d'éprouvette et ses dimensions, le type de moule, de mûrissement, la préparation des faces d'essai sur lesquelles s'exerce la compression, la rigidité de la presse, la vitesse d'application de la charge. Pour toutes ces raisons, les essais doivent être effectués selon une procédure bien précise sans dévier des spécifications imposées.

Les essais de résistance à la compression effectués sur des éprouvettes préparées de façon normalisée, incluant un serrage ou un compactage à 100% et un mûrissement dans l'eau pendant une période donnée, donnent des résultats représentant la qualité du béton. Bien sûr, le béton dans la structure peut présenter une qualité inférieure, par exemple, par suite d'une mauvaise mise en œuvre, d'un compactage ou vibration inadéquats, d'un phénomène de ségrégation ou d'un mauvais mûrissement. Ces effets sont importants si l'on désire savoir à quel moment on peut décoffrer, pour suivre la construction ou mettre la structure en service. Pour cette raison, les éprouvettes d'essai sont mûries dans des conditions se rapprochant le plus possible de celles existant dans la structure réelle.

Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques. Les plateaux ou contre-plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises.

2- Influence du rapport eau/ciment :

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en première approximation la qualité de la matrice cimentaire. Nous présentons dans cette section des résultats, issus de la littérature, d'essais de compression simple, réalisés sur mortiers (ou bétons) avec différents rapports E/C.

La figure 2.41 montre que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole. Cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulats et l'âge. La résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Une des propriétés géométriques d'une hyperbole ($y=k/x$) est que la relation existant entre y et $1/x$ est linéaire. La relation entre la résistance et le rapport C/E est donc approximativement linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre environ 1,2 et 2,5. Cette relation linéaire, tout d'abord suggérée par Neville (2000)[156], a été confirmée par Alexander et Ivanusec (1982) et par Kakizaki et col. (1992)[169]. Cette relation est plus facile à utiliser que la courbe représentant le rapport eau/ciment, particulièrement lorsqu'une interpolation est nécessaire. La figure 2.42 présente les valeurs de la figure 1.16 en fonction du rapport ciment/eau porté en abscisses. Les valeurs indiquées sont applicables uniquement pour un ciment donné, la relation entre la résistance et rapport ciment/eau doit donc être déterminée pour tout autre cas pratique.

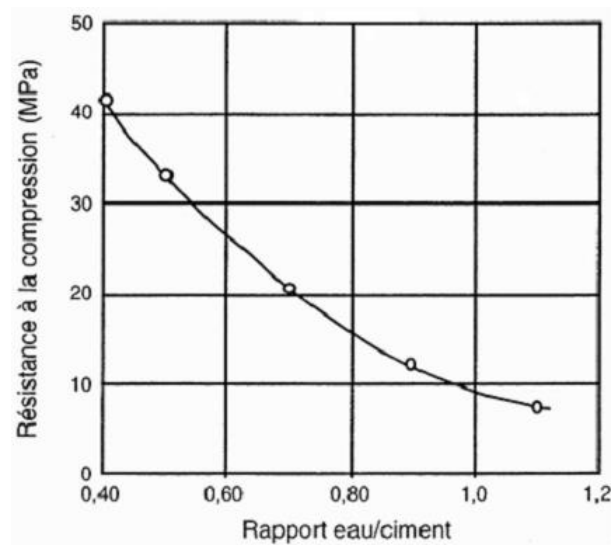


Figure 2.41 : Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide [156]

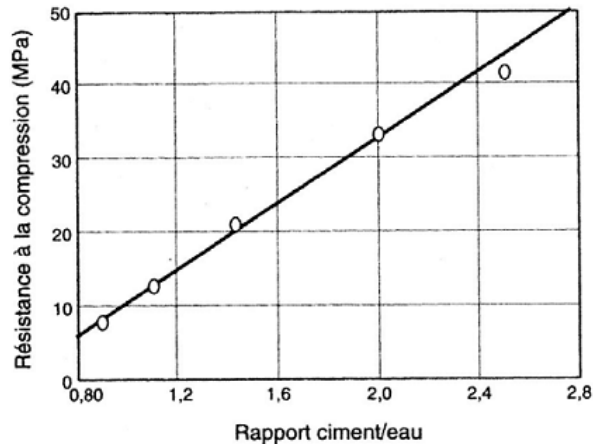


Figure 2.42 : Valeurs des résistances de la figure 1.15 en fonction du rapport C/E [156]

Nielsen (1993) [170] a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport C/E n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2.6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38. Comme on le voit sur la figure 2.43, pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.

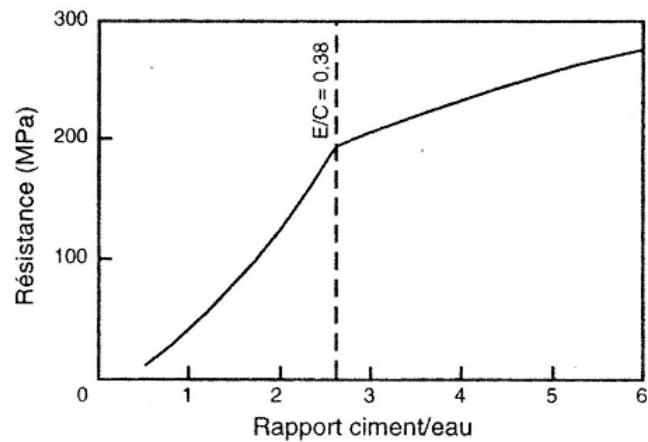


Figure 2.43 : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport C/E [170]

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton [171]. La figure 2.44 montre que la résistance à la compression du béton est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand [145].

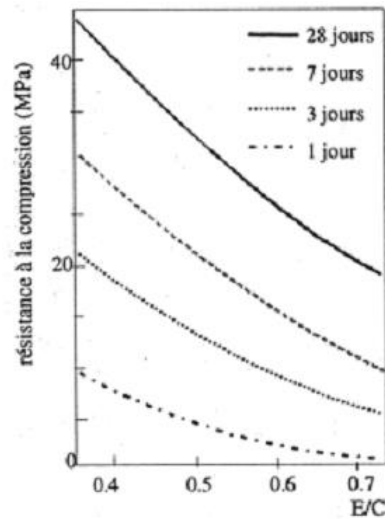


Figure 2.44 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton [145].

La résistance a été mesurée sur des cylindres de 15x30 cm et les bétons ont été préparés avec un ciment de type I (ASTM), sans air entraîné

3- Influence du dosage en ciment :

Pour une même ouvrabilité, une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

La figure 2.45, illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton [162]. En effet, pour obtenir le même affaissement (7cm), le béton dosé à 377 kg/m³ de ciment a demandé 192 l/m³ d'eau, soit un rapport E/C de 0,51, alors qu'il a fallu 186 l/m³ d'eau pour le béton dosé à 347 kg/m³ de ciment, soit un rapport E/C de 0,54. En se référant à la figure 2.44, il est alors possible d'expliquer les résultats présentés par la figure 2.44, qui montrent clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.

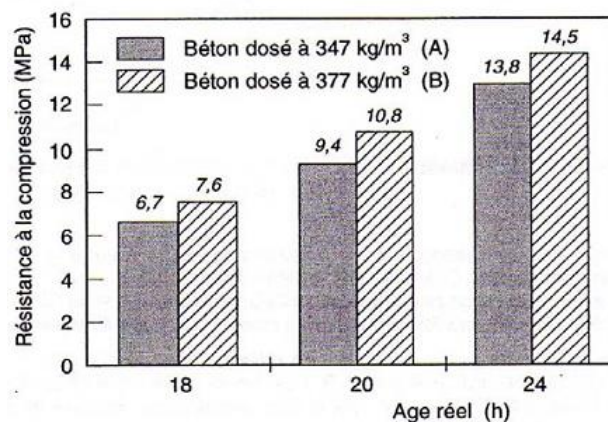


Figure 2.45 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [162]

Les bétons ont été gâchés avec 347 kg/m³ (A) et 377 kg/m³ (B) de CPJ-CEM II 42,5 R et les résistances ont été mesurées sur des éprouvettes 11×22 cm confectionnées dans des moules en carton.

4- Influence du type de ciment

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la figure 2.46. Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R, c'est-à-dire que, plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances sont élevées, à toutes les échéances. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [162].

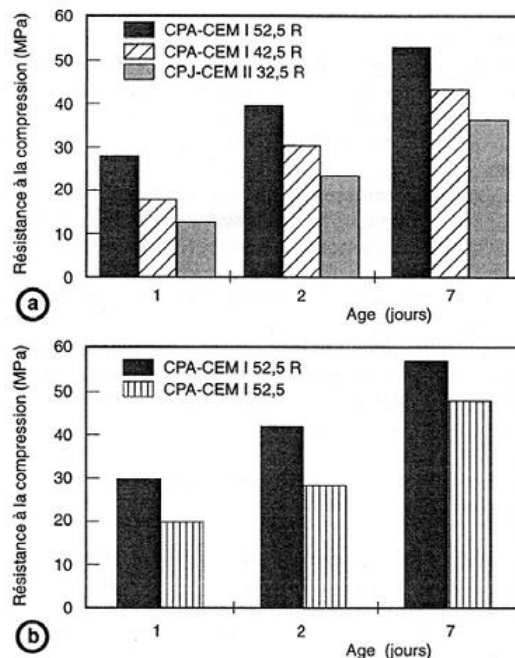


Figure 2.46 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [162]

D'après U.S. Bureau of réclamation (1975)[172], la figure 2.47, illustre la vitesse de développement de la résistance de bétons confectionnés avec un dosage unique de différents ciments. Alors que les vitesses de montée en résistance varient considérablement, on constate peu de différence de résistance entre tous ces ciments à 90 jours. A la figure 2.48, pour un même rapport E/C, Gonnerman et Lerch (1951)[173] ont constaté dans certains cas des différences plus importantes. Or, la tendance générale montre que les ciments à vitesse de durcissement peu élevée ont une résistance finale plus élevée. Par exemple, la figure 2.47 montre un ciment de type IV qui présente la plus faible résistance à 28 jours, mais développe la deuxième plus forte résistance à 5 ans. La comparaison des figures 2.47 et 2.48, démontre que les différences entre les ciments ne sont pas facilement quantifiables.

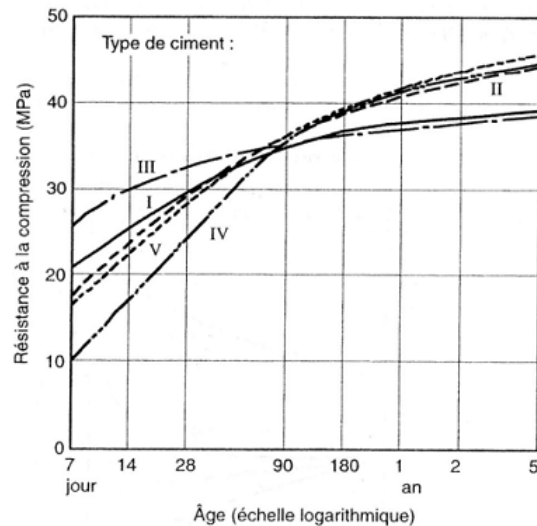


Figure 2.47 : Développement de la résistance de bétons confectionnés avec différents ciments pour un dosage de 335 kg/m³ [172]

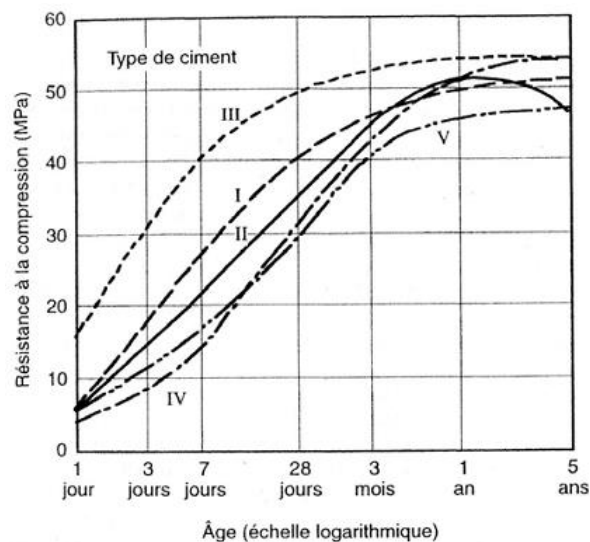


Figure 2.48 : Développement de la résistance de bétons de rapport E/C de 0,49 confectionnés avec différents ciments [173]

5- Influence de la porosité

Tout milieu poreux est constitué de deux domaines distincts : la charpente du milieu (bordure solide) et son complément que constitue le volume poreux. La porosité (N) d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides. Si V_t est le volume total de l'échantillon, V_p le volume poreux ou le volume des vides et V_s le volume réel de la phase solide, on a alors (2.49) :

$$N \% = \frac{V_p}{V_t} 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} 100 \dots\dots\dots 1.4$$

✓ Géométrie et positionnement des pores

Ces vides se distinguent par leur forme : lorsque les formes sont convexes, globuleuses, ce sont des pores ; lorsqu'elles sont grandes, plates et étendues, ce sont des fissures. Lorsque les vides communiquent entre eux, il s'agit d'une porosité ouverte (ou libre). Lorsque les vides sont isolés, c'est une porosité occluse ou fermée. La figure 2.49 présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

- les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).
- les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.
- les bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités.

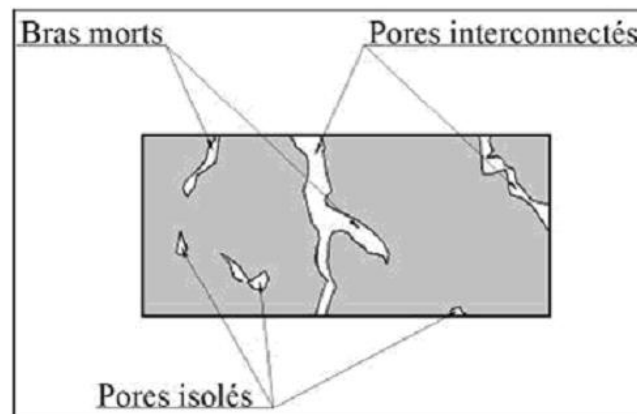


Figure 2.49 : Les différents pores d'un béton, positionnement selon le milieu extérieur

La porosité d'un béton apparaît comme un paramètre extrêmement important puisqu'il conditionne la rugosité de surface ainsi que la quantité d'eau potentiellement présente dans le matériau. Un matériau présentant une porosité importante offre également une surface de réaction importante entre le matériau et les substances chimiques agressives avec lesquelles il est en contact. Ceci entraîne une vitesse de dégradation potentiellement plus élevée.

✓ Tailles des porosités

Le réseau poreux des matériaux cimentaires tels que les bétons, les mortiers ou encore les pâtes de ciment recouvre une large gamme d'échelles (du picomètre au centimètre). La figure 2.50 présente les différents types de porosités que l'on rencontre dans les matériaux cimentaires en fonction de leur taille et de leur géométrie.

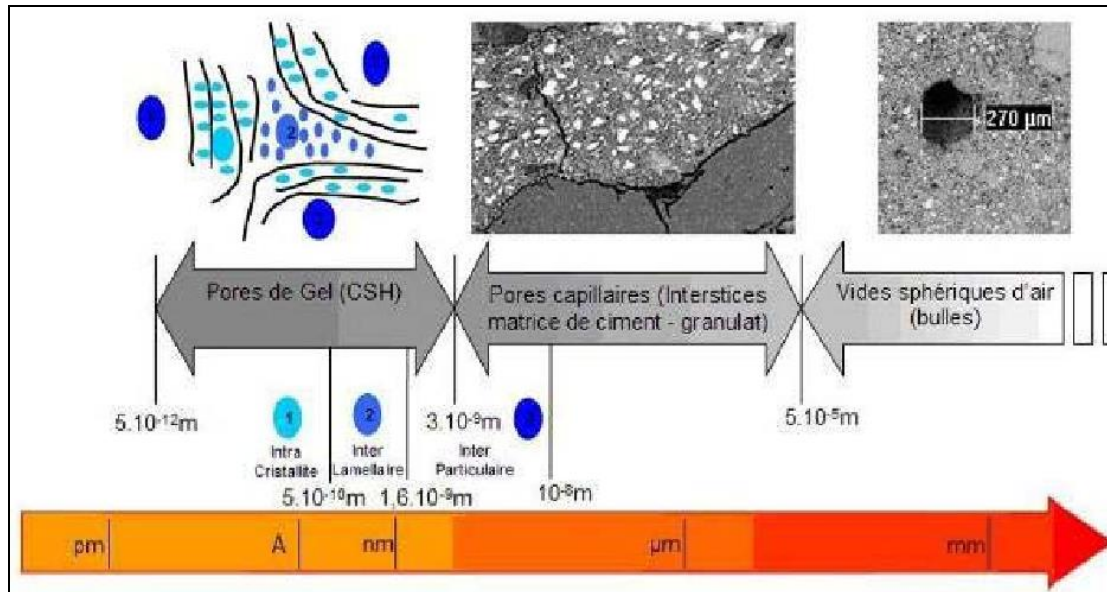


Figure 2.50 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires

La porosité des matériaux cimentaires est constituée de :

- vides d'air occlus, généralement de forme sphérique et de dimension supérieure à 50 micromètres. Ces vides sont générés par le piégeage dans le matériau à l'état frais de bulles d'air qui ne parviennent pas à s'échapper malgré le serrage (vibrations, chocs) de la pâte.
- pores capillaires, ils peuvent être modélisés sous la forme de tubes tortueux dont le diamètre varie entre 1 micromètres et 50 micromètres. Ces porosités sont liées à l'hydratation des grains de ciment ainsi qu'à la présence de granulats.
- pores de gel, ces pores sont liés à la structure lamellaire même des CSH (silicates de calcium hydratés) et de dimension de l'ordre du nanomètre [175].

Ces porosités sont liées à la structure propre du matériau (structure et arrangement des cristaux) mais également à sa mise en oeuvre. Le rapport E/C est un facteur de grande importance car, si l'augmentation de la quantité d'eau dans les matériaux cimentaires à l'état frais permet d'améliorer l'ouvrabilité du matériau, elle augmente sa porosité [176]. En effet, l'eau présente en excès, qui ne sert donc pas aux différents processus d'hydratation du ciment, s'évapore lors du séchage du matériau laissant les emplacements qu'elle occupait vides [156].

Lors de fabrication de la pâte fraîche, les grains de ciment sont mis en suspension dans l'eau. Le rapport E/C influence ainsi l'espacement initial entre les grains de ciment.

Plus l'espacement initial entre les grains de ciment est important, plus l'espace à combler lors de l'hydratation est grand et plus la formation de vide est favorisée, les hydrates ne pouvant pas combler tout l'espace comme illustré par la figure 2.51.

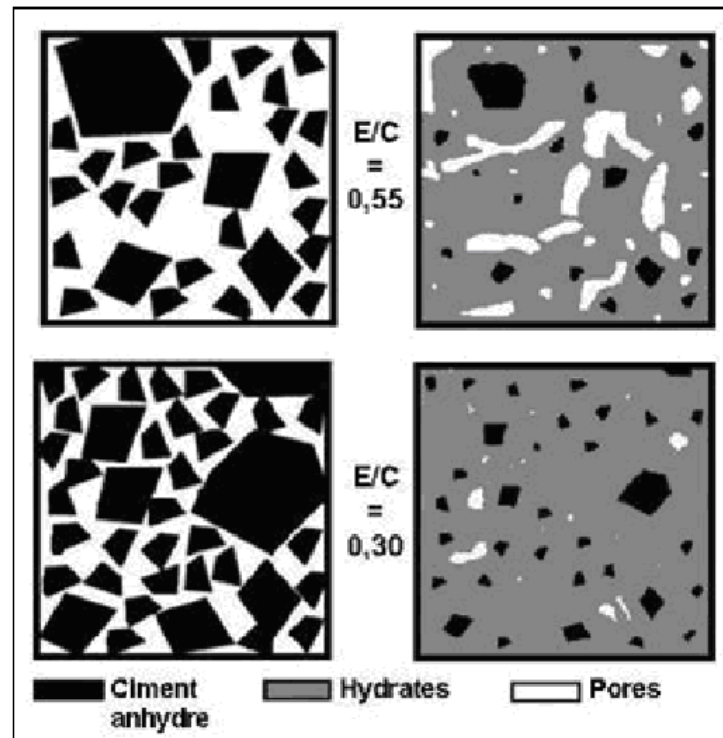


Figure 2.51: Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, influence du rapport E/C, [77]

En ne considérant que la stoechiométrie des réactions d'hydratation du clinker, le rapport E/C minimum pour obtenir des réactions chimiques complètes est de 0,22. Pour un ciment Portland le rapport est de 0,36. Cependant, Powers a montré que l'hydratation complète du ciment ne peut pas être obtenue avec un rapport E/C inférieur à 0,42 [178] car les gels de CSH absorbent de l'eau qui ne sera alors plus disponible pour l'hydratation des composants du clinker.

Avec un rapport E/C supérieur à 0,42, la quantité d'eau est supérieure à celle nécessaire à l'hydratation complète du ciment. Les grains de ciment sont éloignés, leur hydratation ne permet pas de combler tout l'espace. Lorsque l'hydratation arrive à son terme, il reste une quantité d'eau importante dans le matériau (sous forme d'eau libre), ce qui engendre la formation d'une porosité capillaire importante, favorisant la perméabilité du matériau et diminuant sa résistance mécanique. L'utilisation d'un E/C élevé favorise l'absorption de fluide et la perméabilité du matériau et ainsi la pénétration d'agents potentiellement agressifs vers le coeur du matériau [179].

Avec un rapport E/C de 0,42, l'ensemble des grains de ciment peut s'hydrater. Cette hydratation entraîne la création de vides non remplis d'eau. En effet, la formation des hydrates conduit à la formation de composés dont le volume est inférieur aux volumes de l'eau et du ciment utilisés pour la confection de la gâchée (volume des hydrates = volume du ciment + 0,736 x volume de l'eau). Ce phénomène est appelé contraction de Le Châtelier [180].

Avec un rapport E/C inférieur à 0,36, les grains de ciment sont initialement proches les uns des autres. Toute l'eau sera consommée par les réactions d'hydratation des grains de ciment qui ne seront pas tous hydratés complètement et très peu d'espaces seront laissés vides entre les hydrates. Ceci permet d'obtenir des matériaux ayant une porosité capillaire limitée et de bonnes propriétés mécaniques, l'ensemble des grains de ciment ne sera pas complètement hydraté, ce qui ne nuit pas à la résistance du matériau.

L'influence du rapport E/C sur la porosité capillaire et sur le taux de ciment non hydraté est illustrée par la figure 2.52.

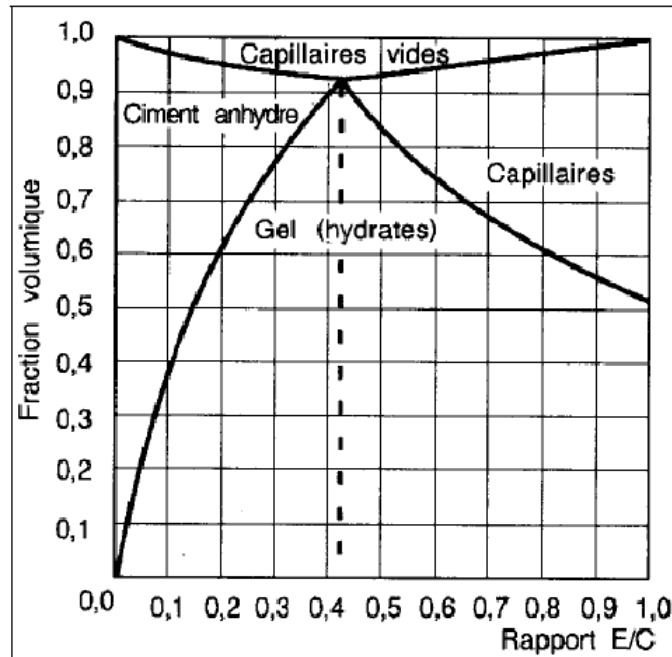


Figure 2.52 : Composition volumique d'une pâte de ciment hydraté sans apport d'eau externe, selon le modèle de Powers, [171]

La résistance du béton est fondamentalement dépendante du volume des vides qu'il comporte.

L'influence de la porosité de la pâte de ciment hydraté sur la résistance a fait l'objet de plusieurs recherches. L'application directe des résultats de laboratoire, déterminés à partir d'essais sur des éprouvettes de pâte pure confectionnées avec soin, à des éprouvettes de béton doit être faite avec prudence, mais la compréhension de l'effet de la porosité sur la résistance de la pâte de ciment hydraté est importante. Il n'y a aucun doute que la porosité, définie comme étant le volume total de l'ensemble des vides supérieurs à ceux des vides de gel et exprimée en pourcentage du volume global de la pâte de ciment hydraté, est un des facteurs principaux influençant la résistance de la pâte de ciment. Une relation linéaire entre la résistance et la porosité a été établie par Rossler et Odler (1985), pour des valeurs de porosité comprises entre 5 et 28%. L'effet des vides d'un diamètre inférieur à 20 nm semble négligeable [181].

La relation entre la résistance du mortier et la porosité, en se basant sur le volume des vides de plus de 20 nm de diamètre, est présentée à la figure 2.53. L'effet de la distribution de la dimension des vides sur la résistance doit donc être pris en compte en plus de la porosité totale. De façon générale, pour une porosité donnée, la diminution de la dimension des pores entraîne une augmentation de la résistance de la pâte de ciment.

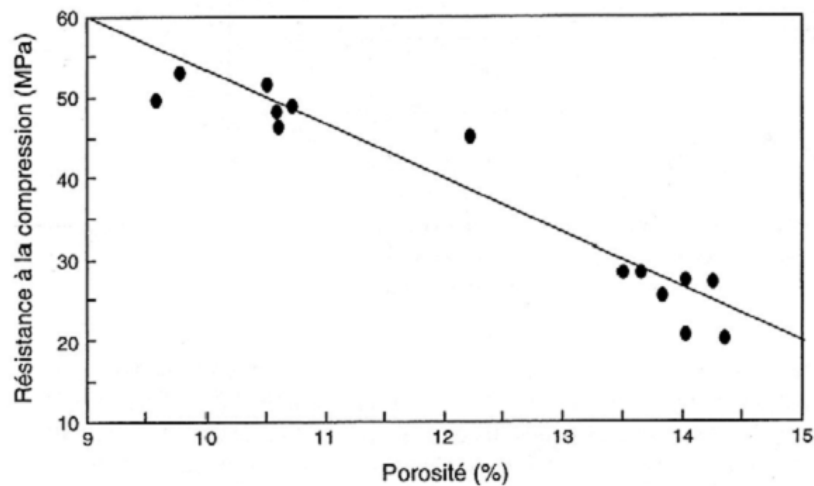


Figure 2.53 : Relation entre la résistance à la compression de mortiers et la porosité calculée à partir du volume des pores de diamètre supérieur à 20 nm [182]

Strictement parlant, la résistance du béton est influencée par le volume de tous les vides contenus dans le béton : air occlus, pores capillaires, pores de gel et air entraîné [156].

La mise en place du béton engendre toujours une certaine quantité d'air occlus. Ce volume dépend de l'énergie de serrage, plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus.

La quantité d'air occlus varie dans un béton courant entre 1 et 2.5 %, si l'on réalise que 1 % d'air, occupant le même volume que dix litres d'eau, réduit pareillement la résistance à la compression, on conclut à l'évidence que l'air occlus dans un béton doit toujours être mesuré et pris en compte [162].

6- Influence du rapport granulats/ciment :

Le rapport granulats/ciment (G/C) est un facteur de deuxième importance quand à la résistance, mais, pour un rapport E/C constant, Erntroy et Shacklock (1954) cités par Neville (2000), ont montré qu'un béton plus faiblement dosé était plus résistant (figure 2.54).

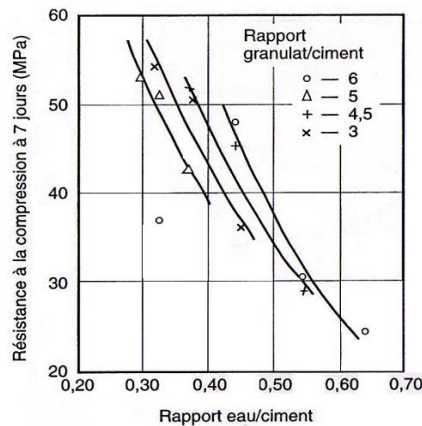


Figure 2.54 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [156]

Les raisons de ce comportement ne sont pas bien connues. Dans certains cas, une partie de l'eau peut être absorbée par le granulat : plus il y a de granulat, plus la quantité d'eau absorbée est importante, ce qui contribue à réduire le rapport eau/ciment réel du béton. Dans d'autre cas, une plus forte teneur en granulats contribue à diminuer le retrait et le ressuyage, ce qui diminue les désordres dans les liaisons granulat et pâte de ciment. De même, les modifications thermiques dues à la chaleur d'hydratation du ciment sont plus faibles [183]. L'explication la plus probable provient toutefois du fait que la teneur totale en eau par mètre cube de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment que dans un béton fortement dosé en ciment. Il en résulte que le pourcentage de vides par rapport au volume total de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance.

Les études portant sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que, lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20 %, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, on constate une augmentation [184]. L'allure générale de ce comportement est représentée à la figure 2.55.

Cette tendance se vérifie quel que soit le rapport eau/ciment [185].

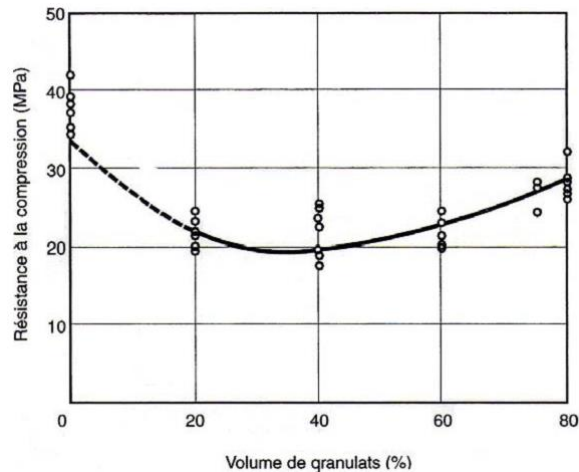


Figure 2.55 : Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5 [184]

Stock et col. (1979) ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie, liés par la même matrice. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Malheureusement, les essais de résistance à la compression sur les éprouvettes cubiques ont donné des résultats assez dispersés. Il est à noter que l'effet du granulat, qui n'est pas monotone, peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand l'ouvrabilité diminue [186].

7- Influence de la taille maximale du granulat

Walker et Bloem (1960) ont publié un article qui suscita à l'époque beaucoup de discussions [187] : la majorité des résultats présentés montraient un effet négatif de la dimension maximale du granulat (D) sur la résistance à la compression, à rapport E/C constant. Cette constatation étonna la communauté scientifique, celle-ci présumant généralement qu'avec un D important, le béton, plus compact, présenterait une résistance mécanique supérieure et une meilleure durabilité.

Cependant, deux causes exercent des effets contradictoires : pour une quantité donnée de ciment, en augmentant le D , on tend vers une réduction de la demande en eau, tandis que la résistance obtenue à rapport E/C donné diminue. Par conséquent, quand le volume du ciment et l'ouvrabilité restent constants, on a un effet du D sur la résistance à la compression qui n'est pas monotone. Une valeur optimale de la dimension du granulat existe, qui décroît quand la quantité de ciment augmente [188].

L'effet négatif de l'augmentation de la dimension maximale du granulat dans le béton s'applique à l'échelle de toutes les grosseurs, mais l'effet de la dimension des grains sur la diminution de la demande en eau est particulièrement important en dessous de 38,1 mm. Pour des dimensions supérieures, le bilan des deux effets dépend du dosage du béton [156], (figure 2.56).

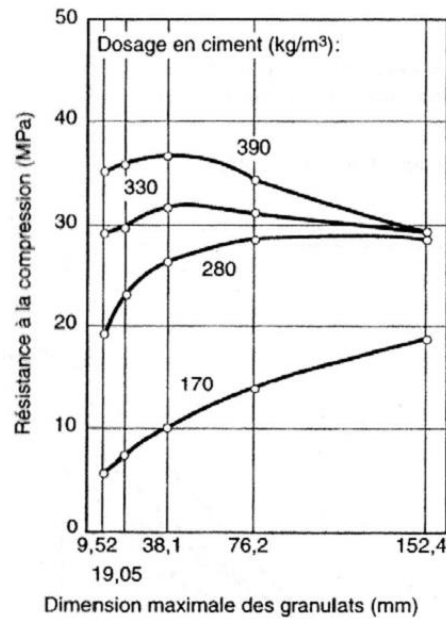


Figure 2.56 : Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment [156]

8- Influence de l'Âge

Meyer (1963) a montré que l'augmentation de la résistance (exprimée en pourcentage de la résistance à long terme) des bétons à faible rapport E/C est plus rapide que celle des bétons ayant un rapport E/C plus élevé (figure 2.57). Ceci s'explique par le fait que les grains de ciment sont plus près les uns des autres et que le réseau de gel continu s'établit plus rapidement.

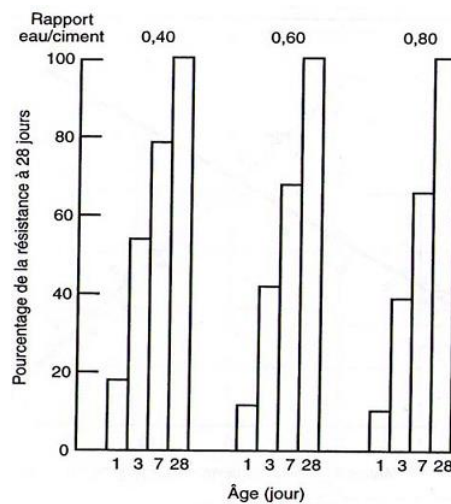


Figure 2.57 : Augmentation relative de la résistance dans le temps de bétons ayant différents rapports E/C confectionnés avec un ciment portland ordinaire [189]

Il est important de connaître l'évolution de la résistance en fonction du temps lors de la mise en service d'une structure, c'est-à-dire lorsque cette dernière devra supporter, à un âge plus éloigné, la charge totale pour laquelle elle a été dimensionnée. Dans ce cas, le gain de résistance après l'âge de 28 jours peut être pris en compte lors du dimensionnement de la structure. Dans d'autres situations, comme dans le cas des bétons précontraints, préfabriqués ou lorsque les coffrages doivent être enlevés rapidement, il est important de connaître la résistance au jeune âge.

La figure 2.58 présente l'évolution de la résistance en fonction du temps pour des bétons de rapports E/C de 0,40, 0,53 et 0,71 confectionnés avec un ciment de type I en 1948 et conservés constamment dans l'eau [Wood, 1991].

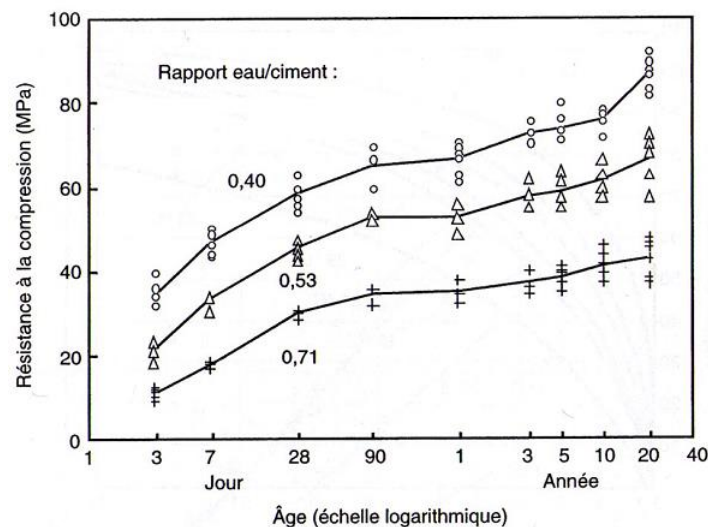
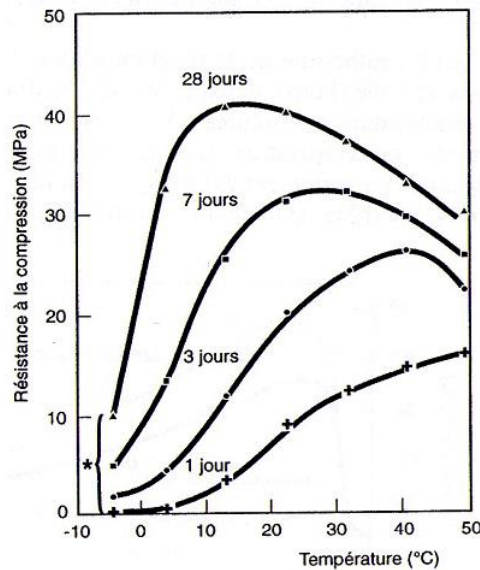


Figure 2.58 : Augmentation de la résistance de bétons (mesurée sur des cubes modifiés de 150 mm) sur une période de plus de 20 ans ; condition de conservation humide [190]

En ce qui concerne la résistance à long terme, les ciments portland américains fabriqués au début du 20^{ème} siècle (ayant une forte teneur en C2S et une faible surface spécifique) présentaient une augmentation de la résistance pour des bétons sur chantier proportionnelle au logarithme de l'âge jusqu'à 50 ans. La résistance à 50 ans était typiquement 2,4 fois celle mesurée à 28 jours. Toutefois, depuis les années trente, les ciments ayant une plus faible teneur en C2S et une plus grande surface spécifique atteignent leur résistance maximale entre 10 et 25 ans et, par la suite, perdent un peu de cette résistance [191]. Les ciments portland allemands fabriqués en 1941 et utilisées pour des applications extérieures ont présenté après 30 ans une résistance égale à 2,3 fois celle mesurée à 28 jours. L'augmentation relative de la résistance était plus importante pour les rapports eau/ciment élevés. En comparaison, les ciments à base de laitiers de haut fourneau permettaient une augmentation de l'ordre de 3,1 fois [192].

9- Influence de la température

L'influence de la température de fabrication puis de mûrissement du béton sur ses résistances à court et à long terme a fait l'objet de plusieurs études au cours des soixante dernières années. De façon générale, toutes les études ont montré que : plus la température de fabrication et/ou de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont les résistances.



*Béton fabriqué à 4°C et conservé immédiatement à -4°C

Figure 2.59 : Influence de la température de mûrissement du béton sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances [193]

La figure 2.59 montre que plus la température de fabrication et de mûrissement du béton est élevée, plus la résistance à un jour de ce béton est élevée ; alors que pour les âges de trois à vingt-huit jours l'influence de la température change radicalement. En effet, pour chacun des âges étudiés à partir de trois jours, il existe une température optimale à laquelle correspond le maximum de résistance. En fait, cette température optimale de mûrissement diminue lorsque l'échéance considérée augmente. Cependant, les causes à l'origine des réductions de résistances observées à long terme pour les bétons mûris à des températures élevées sont beaucoup plus complexes et suscitent encore aujourd'hui des questions [162].

Bien qu'une température plus élevée durant la mise en place et la prise augmente la résistance au très jeune âge, elle peut avoir un effet inverse sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation présentant une structure physique moins compacte, probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli. En se basant sur la règle du rapport gel/espace, cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement, dans laquelle un rapport gel/espace élevé sera éventuellement atteint.

Conclusion

On constate que l'utilisation des sables calcaires de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des mortiers et des bétons a fait déjà l'objet de plusieurs études et recherches. Elles ont été menées le plus souvent dans le but d'encourager l'utilisation de ces matériaux en tant qu'alternative aux granulats alluvionnaires en voie d'épuisement, donc de prévenir une future pénurie. Mais, jusqu'à présents, ces études n'ont pas abouti partout puisque l'utilisation du sable de concassage dans le secteur du bâtiment et des centrales à bétons ne s'est pas encore développé et concrétisé. En effet, bien que l'avantage économique et environnemental de l'emploi de ces matériaux dans les bétons hydrauliques paraisse démontré, ils ne sont pas encore utilisés dans la formulation des bétons hydrauliques en Algérie, du moins à l'échelle industrielle. Les maîtres d'ouvrages et les entreprises ne sont pas encore convaincu de leurs performance refusent jusqu'à présent de recourir à ces bétons, faute probablement d'exemples de réalisation servant de références, sous forme d'ouvrages pilote ou de chantiers expérimentaux.

Par ailleurs, la plupart des études ont été réalisées sur des mortiers en substituant une part du ciment ou bien du sable par des fillers calcaires. Les sables peuvent être constitués par un mélange de sable alluvionnaire et de sable de concassage. Il apparaît donc nécessaire de compléter les travaux déjà réalisés par une étude théorique et expérimentale rationnelle destinée à conforter les connaissances déjà acquises et à en proposer si possible de nouvelles pouvant servir par exemple à la modélisation. Il s'agit aussi de statuer sur la pertinence des spécifications normatives des sables à béton actuelles, en particulier pour ce qui concerne le taux de fillers, et de les faire admettre, par l'exemple notamment, à la communauté scientifique et industrielle. Cette recherche doit non seulement concerner les mortiers et les bétons traditionnels, mais aussi les bétons superplastifiés et les BAP dans lesquels la teneur en fillers joue un rôle déterminant. Cet aspect n'a pas encore fait l'objet de recherches avérées. Cette solution pourrait constituer un vecteur original conduisant les praticiens à l'utilisation des sables calcaires fillérisés dans les mortiers et les bétons hydrauliques.

Finalement, les travaux réalisés durant cette recherche apportent une meilleure connaissance du comportement mécanique des mortiers et bétons calcaires. Ils forment aussi un ensemble assez complet de résultats originaux devant permettre, aux exploitants, et aux chercheurs de mieux caractériser les ressources granulaires en vue de leur valorisation dans les mortiers et bétons hydrauliques de demain. Elles constituent également un support théorique et pratique pour adapter les exigences des cahiers de charges à ces matériaux.

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET METHODE DE CARACTERISATION

3. Introduction :

La qualité du béton (mortier) est intimement liée à celle de ses constituants et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de son volume, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton (mortier), mais, selon leurs propriétés, ils peuvent affecter la durabilité et les performances structurales du béton (mortier).

Les granulats sont donc, un constituant essentiel des bétons (mortiers) qui conditionnent à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. En fait, on ne peut confectionner un béton (mortier) résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres. L'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats, car ces derniers confèrent au béton (mortier) une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment à elle seule.

Dans la composition des bétons et mortiers, il faut autant que possible pour des raisons économiques utiliser les matériaux locaux. Les granulats naturels sont soit directement obtenus par criblage et les grains se présentent alors sous une forme plus ou moins arrondie (granulat roulé), soit issus d'un concassage et les grains présentent des arêtes (granulat concassé). Cette distinction constitue une donnée de base lors de la formulation d'un béton (mortier). D'autres propriétés, spécifiques aux granulats, jouent un rôle majeur dans les caractéristiques d'un béton (mortier). Il s'agit essentiellement de : la granulométrie, les masses volumiques, la porosité, la propreté, le coefficient Los Angeles des granulats, la finesse du sable, le coefficient d'absorption et. En plus de l'identification des granulats, leur origine et leur provenance l'étude s'intéresse au type d'adjuvant utilisé, du ciment et leurs provenances ainsi que la détermination de leurs principales caractéristiques.

3.1 Identification des granulats :

Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers constituent le squelette du béton et plus de 70% de son volume et influent donc fortement sur ses caractéristiques ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques.

Les essais sur les diverses propriétés des granulats sont effectués sur des échantillons du matériau et, de ce fait, les résultats ne sont valables, d'une certaine manière, que pour les granulats de l'échantillon.

3.1.1 Les graviers :

Les graviers utilisés proviennent de la station de concassage de Cosider à El-Euch (wilaya de Bordj-Bou-Argeridj). Dans cette investigation sont utilisées deux fractions 3/8 et 8/16. Après essais, on a pris 30% (3/8) et 70% (8/16) c'est les pourcentages qui ont donnés une porosité minimale du mélange des deux fractions.



Figure 3.1 : gravier issu de pierres concassées

✓ Masse volumique apparente :

Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme NA 255. Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, qui est une méthode simple et rapide.

Les deux fractions de gravier (3/8, 8/16) ont donnés des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m^3 et 2700 kg/m^3 . Les résultats des masses volumiques obtenus pour les deux fractions de gravier, sont récapitulés sur le tableau 3.1.

Les résultats des essais de compacité, porosité et indice des vides réalisés, sur les deux fractions de gravier (3/8, 8/16), sont récapitulés sur le tableau 3.2.

Tableau 3.1 : masse volumique apparente et masse volumique spécifique du gravier

Gravier (fraction)	Masse volumique apparente (ρ) (Kg/l)	Masse spécifique (γ) (Kg/l)
3/8	1,3	2,54
8/16	1,37	2,54
30%(3/8)+70%(8/16)	1,35	2,54

Tableau 3.2 : Porosité – compacités –indice des vides

Gravier (fraction)	Porosité (P)%	Compacité (C)%	Indice des vides (e)
3/8	49	0,51	96,08
8/16	46	0.54	85.18
30%(3/8)+70%(8/16)	47	0.53	88.67

✓ Coefficient d'absorption :

L'absorption de l'eau par les granulats est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement. Le rapport entre l'augmentation de la masse immergée et la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption ou coefficient d'absorption.

Ce coefficient mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est élevée, moins la durabilité du béton est assurée dans un milieu agressif. En particulier la pénétration de l'eau dans les pores des granulats, donc du béton, fragilise la structure en cas de gel. Par ailleurs dans un milieu à faible hygrométrie, de l'ordre de 60 à 70 %, la vitesse de pénétration de la carbonatation est plus rapide. Enfin lors du malaxage du béton, l'emploi de granulats à fort coefficient d'absorption peut provoquer un léger raidissement s'ils n'ont pas été pré-mouillés avant leur introduction dans le malaxeur. [2]

Les deux fractions de gravier ont donnés des coefficients d'absorption qui répondent aux exigences de la norme P18-541 ($\leq 5\%$). Les coefficients d'absorption des deux fractions de gravier sont récapitulés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Coefficient d'absorption d'eau du gravier.

Gravier (fraction)	Coefficient d'absorption
3/8	1,3
8/16	0,46

✓ Résistance au choc (Essai Los Angeles) :

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles (LA). L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets métalliques normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles pendant 15 minutes. Cet essai est également utilisé pour vérifier la sensibilité au gel des gravillons conformément à la norme NF P18-593.

D'après les résultats d'essais La carrière de El-Euch (Bordj bou arreridj) produis des graviers qui convienne à la fabrication des bétons et répondant aux exigences de la norme qui exige des valeurs maxima tolérées inférieures à 40 %. Les résultats de l'essai Los Angeles sont récapitulés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Résultats d'essais los Angeles

Gravier (fraction)	M (kg)	m (kg)	L _A
G 3/8	4	1,115	27,875
G 8/16	5	1,118	22,36

✓ Analyse granulométrique (NF P18-560):

L'analyse granulométrique consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

Les agrégats destinés au mélange des bétons doivent être composés de grains de dimension différente afin d'assurer un volume minimal des vides les résultats d'analyse sont présentés au tableau 3.5, la courbe granulométrique est présentée par la figure 3.2.

Tableau 3.5 : Analyse granulométrique des fractions de gravier.

fractions	Tamis(mm)	8	6.3	5	4	3.15	2.50	Fond
3/8	R P (g)	2	12	223	1214	418	85	45
	R C (g)	2	14	237	1451	1869	1954	1999
	Tamisat %	99.9	99.3	88.15	27.45	6.55	2.3	0.05
8/16	Tamis(mm)	16.00	12.50	10.00	8.00	6.30	Fond	/
	R P (g)	4.8	1433.1	818.1	852	177	12.9	/
	R C (g)	4.8	1437.9	2256	2808	2985	2997.9	/
	Tamisat %	99.84	52.07	24.8	6.4	0.5	0.07	/

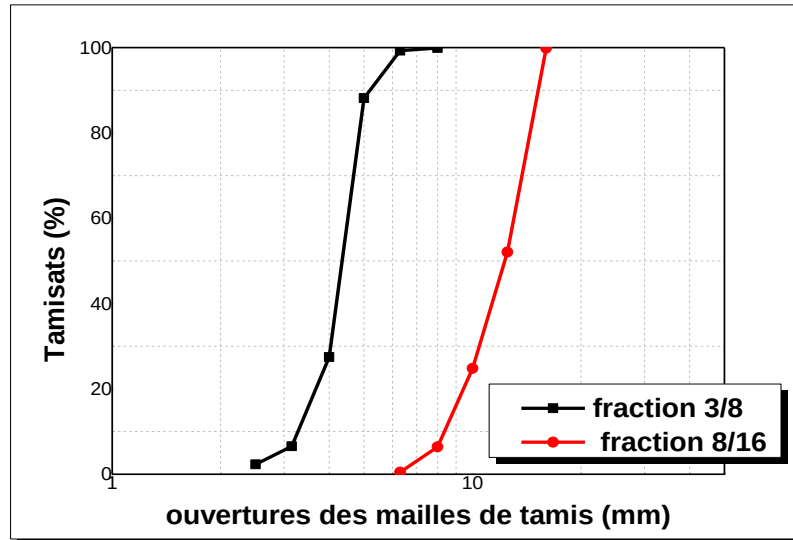


Figure 3.2 : Analyse granulométrique des fractions (3 /8 et 8/16).

✓ Analyse élémentaire par diffractométrie des rayons X :

La diffractométrie par rayon X est une méthode d'analyse qui étudie les processus de diffusion, d'absorption et d'émission des rayons X. En effet, lorsqu'un échantillon est bombardé par des rayons X, ce rayonnement provoque l'émission de son spectre. Ce spectre est appelé diffraction par rayon X (DRX) car le mode d'excitation concerne les photons. Le spectre est formé de raies caractéristiques des différents éléments présents dans l'échantillon.

Pour effectuer une analyse de DRX, on procède de la manière suivante :

- broyage de l'échantillon (de la même manière que pour la diffraction des rayons X ;
- préparation de perles ou pastilles.

L'échantillon à analyser est irradié par un faisceau de rayons X primaires. L'analyse des rayons X secondaires caractéristiques émis par l'échantillon renseigne sur la composition de ce dernier. Les rayonnements X caractéristiques d'un atome étant, en première approximation, indépendants de son état chimique, cette méthode fournit des spectres particulièrement simples, mais qui ne nous renseignent que sur la composition élémentaire. La DRX est généralement une technique d'analyse globale portant sur une surface de plusieurs cm^2 .

Les résultats d'analyse élémentaire par DRX (réalisée à la cimenterie « LAFARGE » à Msila) menée sur le gravier concassé ont révélé les principaux éléments constitutifs du gravier et sont groupés dans le tableau 3.6 et présentés graphiquement sur la Figure 3.3

Nous remarquons un pic d'environ 100 % de calcite qui traduit la dominance du CaO, les autres éléments présents à de faibles pourcentages.

Tableau 3.6 : Analyse chimique du gravier concassé

Eléments	%
R_wp	5,7
Calcite	95,1
Dolomite	0,4
Quartz	1,92
Pyrite	0,34
Illite	0,78
Chlorite	0,76
Kaolinite	0,69
Albite	0
CO ₂ _XRD	42,01

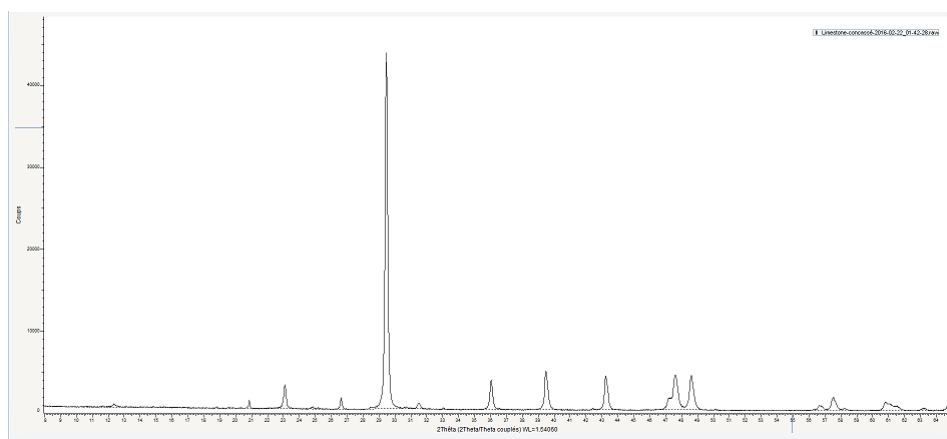


Figure 3.3 : DRX du gravier concassé

3.1.2 Sables :

Dans cette recherche deux sables de base de fraction 0/3 mm sont utilisés, de nature minéralogiques et de provenance différente à savoir le sable de dune provenant de la région de Boussada (wilaya de M'sila) et le sable calcaire de la région d'El Euche (wilaya de bordj bou arreridj) pour composer différent sable mixte présentés au tableau 3.7

Les caractéristiques physiques essentielles des sables mixtes utilisés sont déterminées au laboratoire du département de génie civil selon les normes AFNOR.

Tableau 3.7 Dénomination des différents sables mixte

Sable	Dénomination du sable mixte						
	S _d	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _c
Sable concassé%	0	30	40	50	60	70	100
Sable de dune %	100	70	60	50	40	30	0



(a)



(b)

Figure 3.4 :(a) sable de dune de Boussaada ,(b) sable concassé d'el Euhe

On procède comme précédemment pour la détermination des caractéristiques mécaniques des sables mixtes, les résultats sont récapitulés au tableau 3.8

Tableau 3.8 : caractéristique physique du sable de dune et sable concassé

Sable	Caractéristiques physiques			
	Masse volumique apparente L/C (kg/l)	Masse spécifique (kg/l)	Porosité (%)	Coefficient d'absorption(%)
Sable de dune	1,52/1,66	2,61	42	1,236
Sable concassé	1,49/1,72	2,67	44	1,252

✓ Humidité :

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre 20 à 25% de son poids). Si son humidité est comprise dans la limite de 0 à 3% on l'appelle sable sec [2].

L'humidité des granulats est défini par le rapport entre la masse de l'échantillon, prélever et la masse de matériau sec après étuvage, cet essai est réalisé selon les normes. L'humidité est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100\%$$

où :

M_h : Poids du sable humide (Kg) ;

M_s : Poids du sable sec (Kg) .

On peut conclure que tous ces sables sont considérés comme sec lors de leur prélèvement.

✓ Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption d'eau A% des granulats est défini par le rapport entre l'augmentation de masse de l'échantillon, provoquée après 24 heures d'immersion dans

l'eau, et la masse du matériau sec. Les résultats d'essai d'absorption (A%) et d'humidité (W%) sont regroupés dans le tableau 3.9

Tableau 3.9 : Coefficient d'absorption du sable et taux d'humidité des sables.

sable	S _d	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _c
A(%)	1.236	1.238	1.240	1.241	1.245	1.249	1,252
W (%)	1.500	1.502	1.505	1.501	1.503	1.499	1.502

✓ Equivalent de sable

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme P 18-541.

Les essais nous ont donné un équivalent de sable de 78,33 % pour le sable de dune de Bousaada (M'sila) et un équivalent de sable de 73,21 pour le sable de concassage de la carrière d'El Euche (Bordj Bou Arreridj). Le sable de dune et le sable de concassage de carrières sont propres et répondent aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe les limites à $ESV \geq 65$ et $ESP \geq 60$, pour les sables concassés ou broyés.

Pour les sables, le dispositif de contrôle est à double détente. Dans notre cas, les essais d'équivalent de sable ont donné des résultats conformes à la norme suscitée, de ce fait, l'essai de bleu à la tache (V_{Bta}) n'est pas exigé [Baron et Ollivier, 1996].

Les résultats de l'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Equivalent de sable de dune et sable concassé

sable	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable au piston
Sable de dune	78,33	76,29
Sable concassé	73,21	70,97

Remarque :

On remarque que le sable de dune est propre et convient parfaitement pour les bétons de haute qualité (faible pourcentage de farines argileuse), et le sable concassé est un sable légèrement argileux de propriétés admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

✓ Composition granulométrique :

La composition granulométrique est représentée par les proportions des grains de différentes grosseurs. Les sables doivent avoir des proportions rationnelles des grains de différentes dimensions pour qu'ils aient une porosité minimale. Une bonne composition granulométrique conduit à une bonne qualité de sable [15,20,37,60] .

La procédure opératoire des essais est la suivante :

Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond. Verser le matériau sec dans la colonne de tamis. , et agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle.

Poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis, et vérifier la validité de l'analyse granulométrique (différence entre la somme des masses de refus et de tamisa et de la masse initiale).

Selon l'analyse faite au laboratoire du département de génie civil, les résultats d'analyse du sable de dune et du sable concassé sont récapitulés au tableau 3.11 pour les sables mixtes les résultats sont présentés en partie annexe:

Tableau 3.11 : Analyse granulométrique du sable de dune et du sable concassé

Sables	Tamis	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,125	0,08	Fond
Dune	R.P (g)	0	54	78.75	60.75	609	664.5	20.25	5.25
	R.C%	0	3.6	8.85	12.9	53.5	97.8	99.15	99.5
	Tamisat %	100	96.4	91.15	87.10	46.50	2.2	0.85	0.10
Concassé	R.P (g)	0	165.75	669.75	239.25	178.5	153.75	40.5	50.25
	R.C%	0	11.05	55.7	71.65	83.55	93.8	96.5	99.85
	Tamisat %	100	88.95	44.3	28.35	16.45	6.2	3.5	0.15

✓ Module de finesse :

C'est un facteur très important qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés sur les tamis de mailles (0,10 -0,20 - 0,50 - 1,00 - 2,00) mm sur cent, il est donné par la relation suivante.

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

où:

R_c : refus cumulés.

Tableau 3.12: module de finesse des sables

sable	S_d	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_c
M_f	1.77	2.59	2.59	2.75	2.91	3.02	3.16
Type de sable	Sable fin	Sable moyen	Sable moyen	Sable moyen	Sable moyen	Sable gros	Sable gros

Le sable de dune (S_d), présente un module de finesse de 1,77 classé comme sable fin et les sables mixtes S_1, S_2, S_3 et S_4 leurs module de finesse est compris entre 2,59 et 2,91 sont classés comme sable moyen, le sable mixte S_5 et le sable concassé S_c sont classé comme gros sable ils contiennent peu de fines.

Les courbes granulométrique du sable de dune, du sable concassé et les sables mixtes sont représentées sur les figures 3.5 à 3.11, la figure 3.12 réunie l'ensemble des courbes granulométriques pour comparaison.

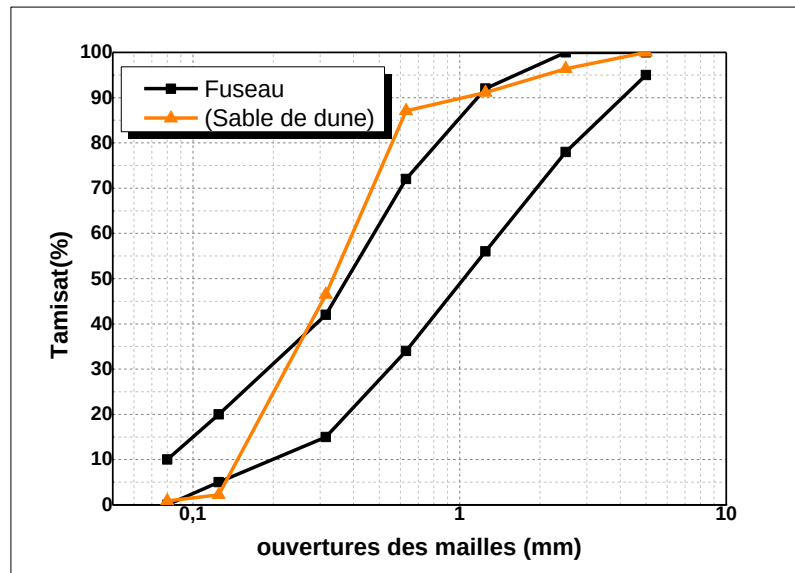


Figure 3.5 courbe granulométrique du sable de dune

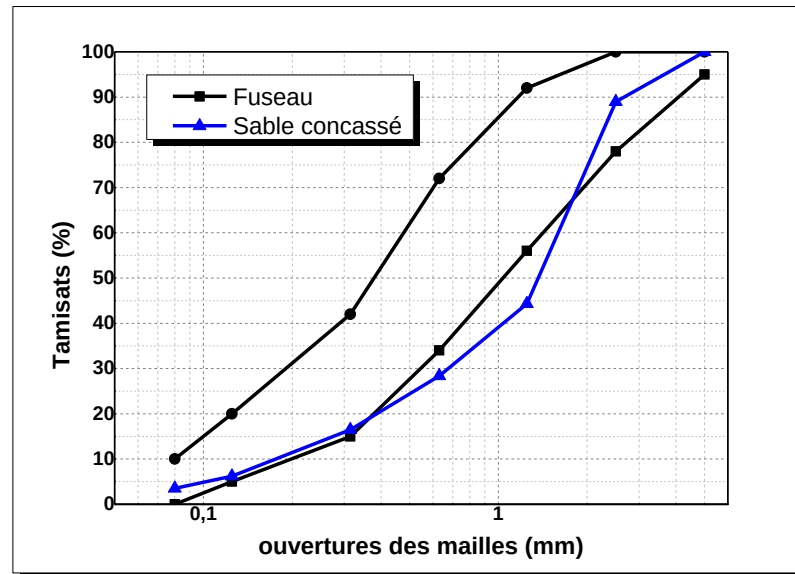


Figure 3.6 : Courbe granulométrique du sable concassé

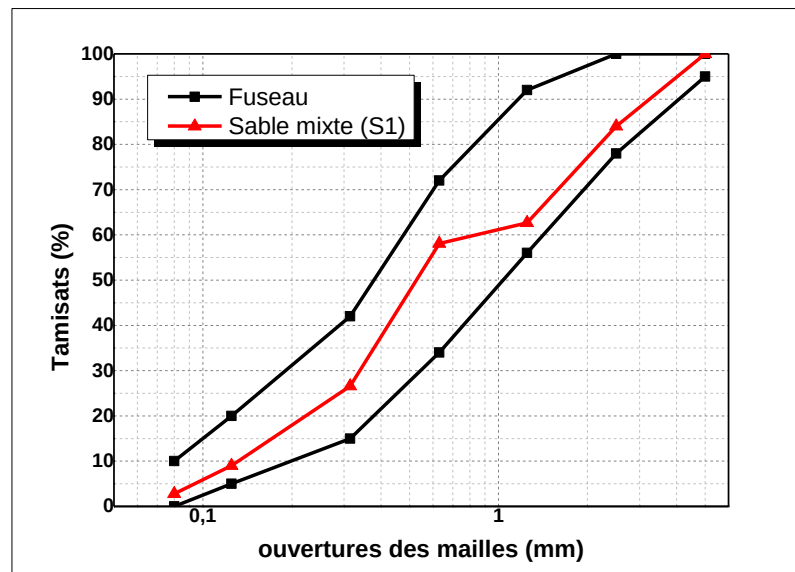


Figure 3.7 : Courbe granulométrique du sable mixte S1

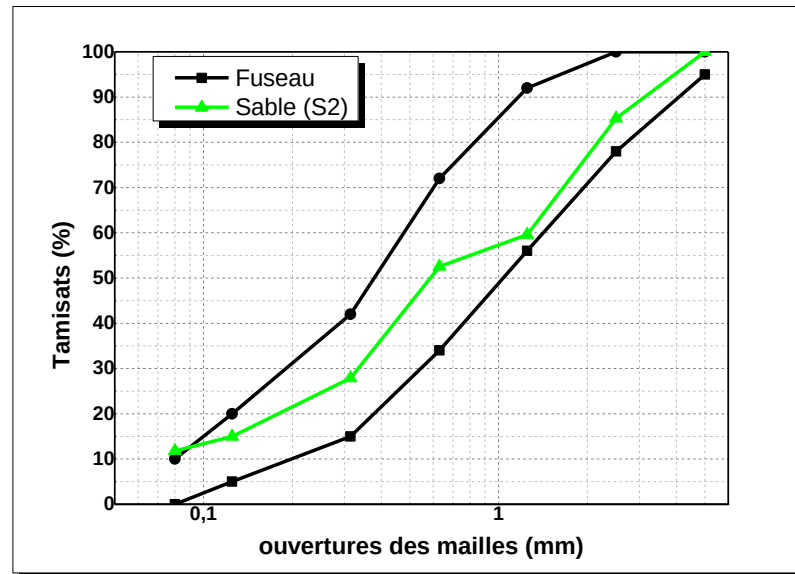


Figure 3.8 : Courbe granulométrique du sable mixte S2

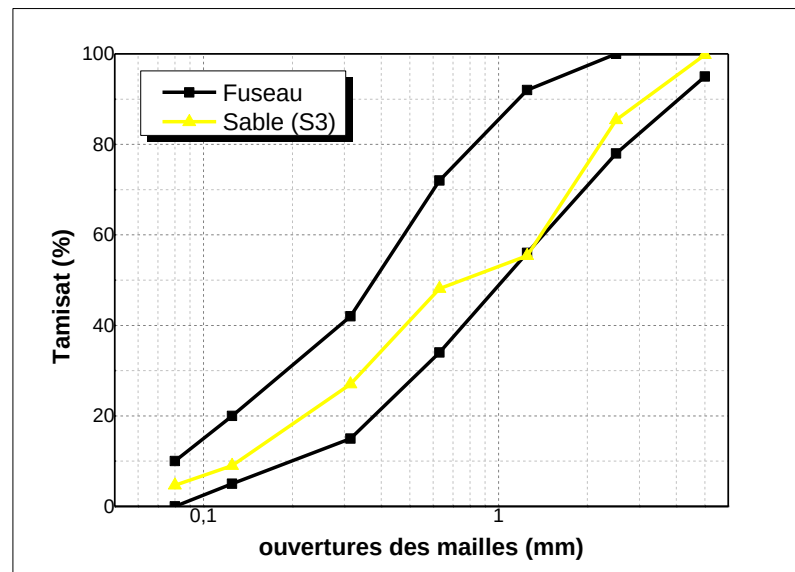


Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable mixte S3

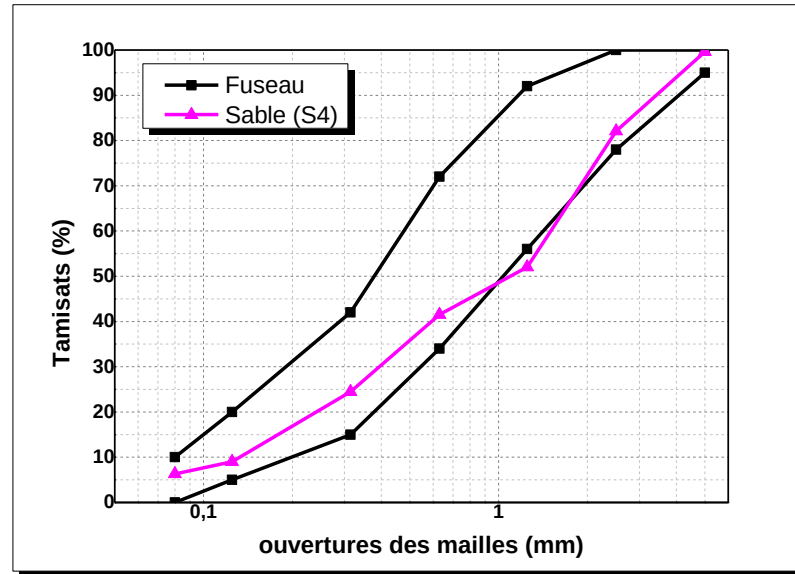


Figure 3.10 : Courbe granulométrique du sable mixte S4

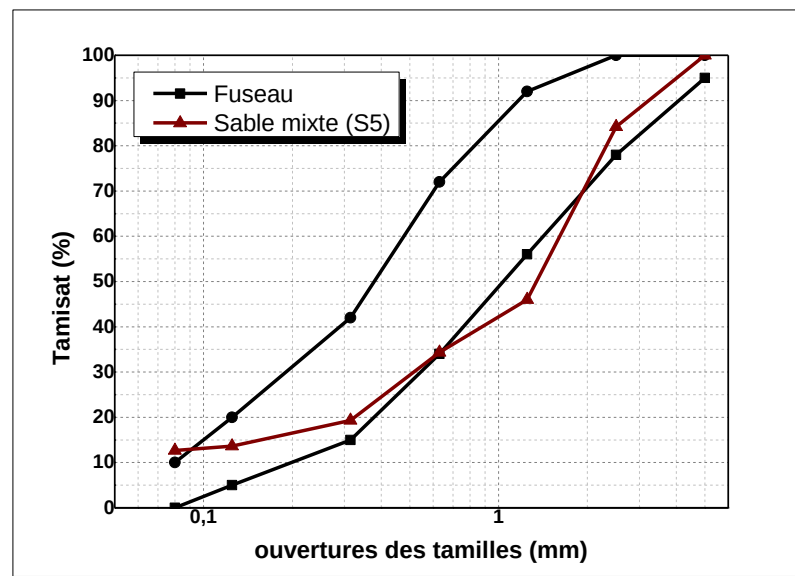


Figure 3.11 : Courbe granulométrique du sable mixte S5

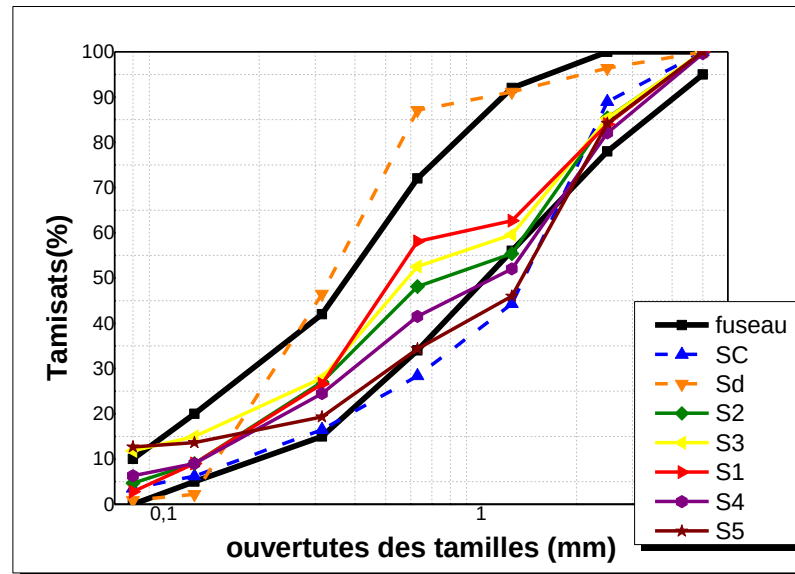


Figure 3.12 courbe granulométrique des sables mixte

✓ Propriétés chimiques et minéralogiques :

Les résultats d'analyse élémentaire par DRX réalisé au laboratoire de la cimenterie LAFARGE à Hamam EDhalaa (M'sila) sur le sable de dune, le sable concassé et les sables mixtes sont présentés au tableau 3.13, graphiquement sur les figures (3.13, à 3.18,).

Nous remarquons un pic d'environ 90 % de silice qui traduit la dominance du SiO_2 dans le sable de dune, les autres éléments présents à de faibles pourcentages.

Pour le sable concassé on note un pic d'environ 90% de calcite qui traduit la dominance du CaO , les autres éléments sont présents à de faibles pourcentages.

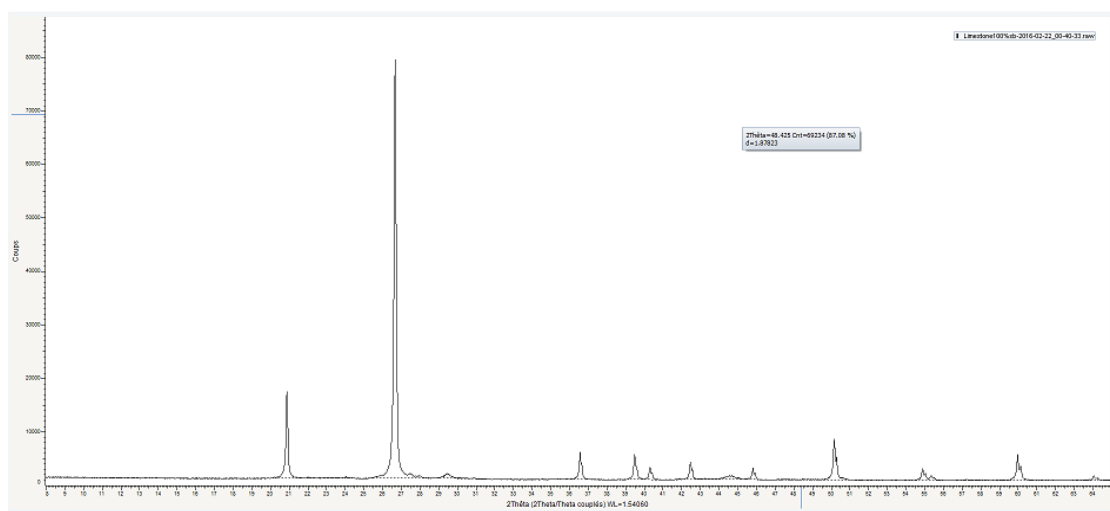


Figure 3.13 : DRX du sable de dune

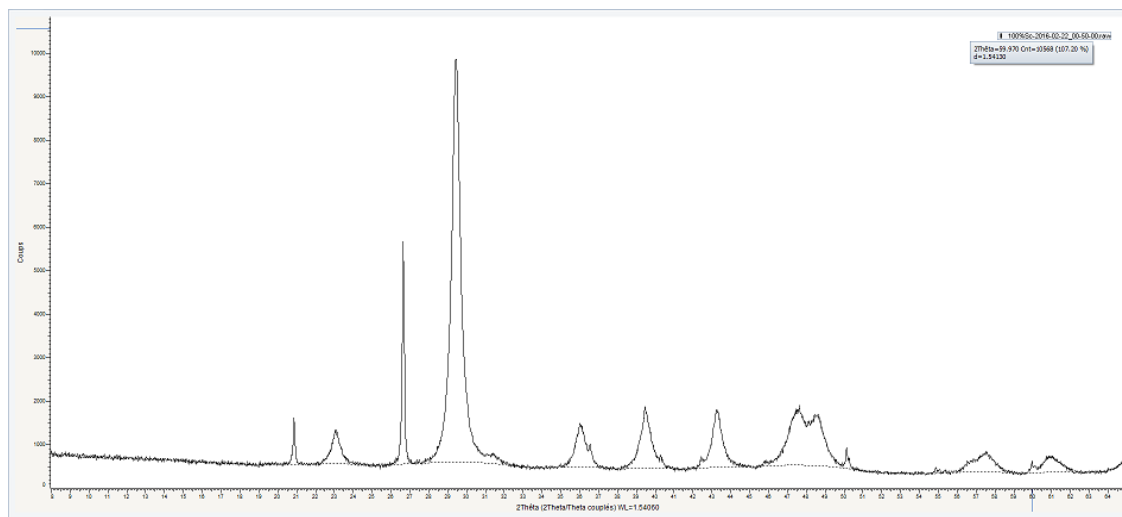


Figure 3.14 : DRX du sable concassé

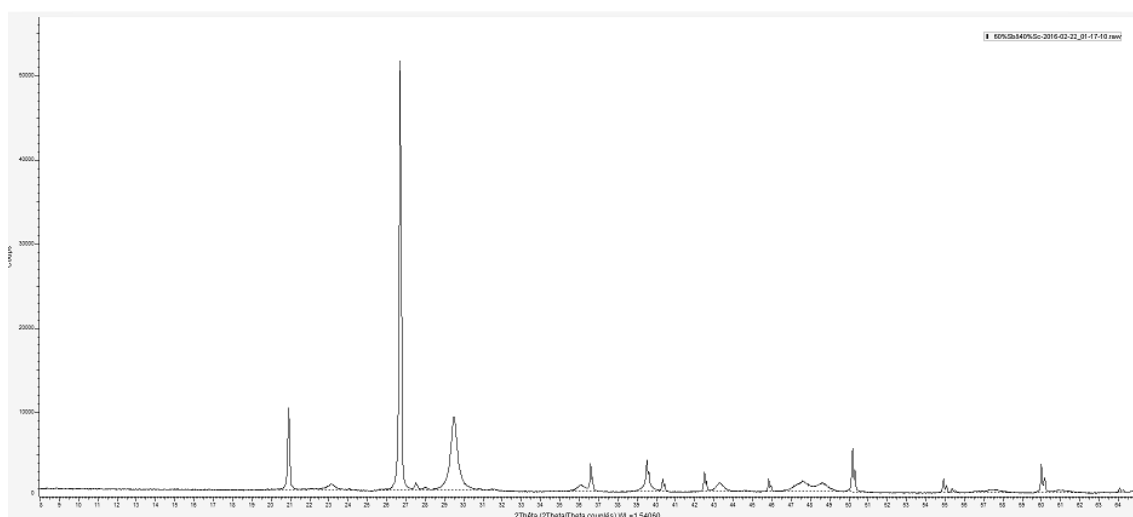


Figure 3.15: DRX du sable mixte (60% S.de dune ,40% S. concassé)

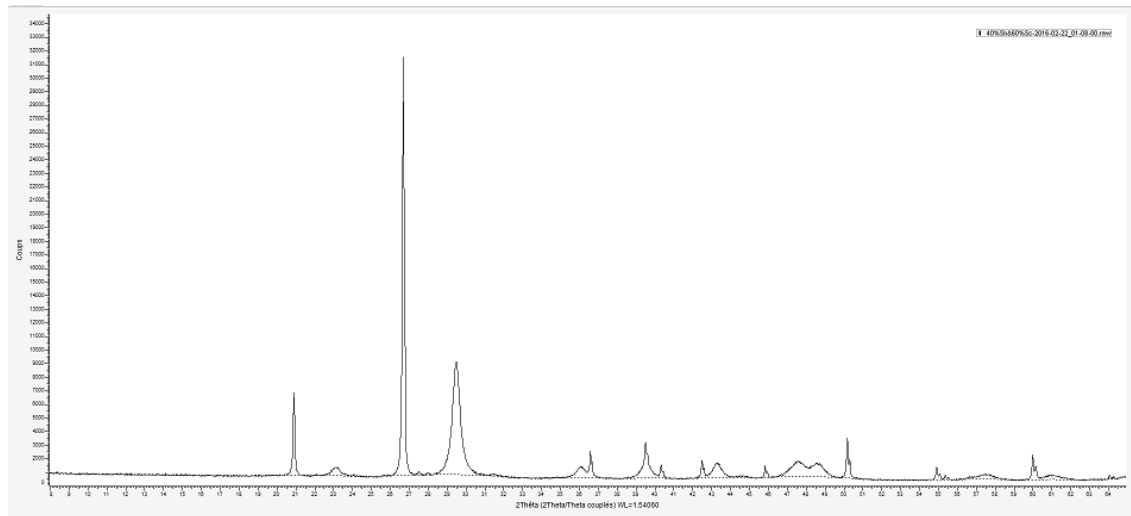


Figure3.16 : DRX du sable mixte (40% S.de dune, 60% S. concassé)

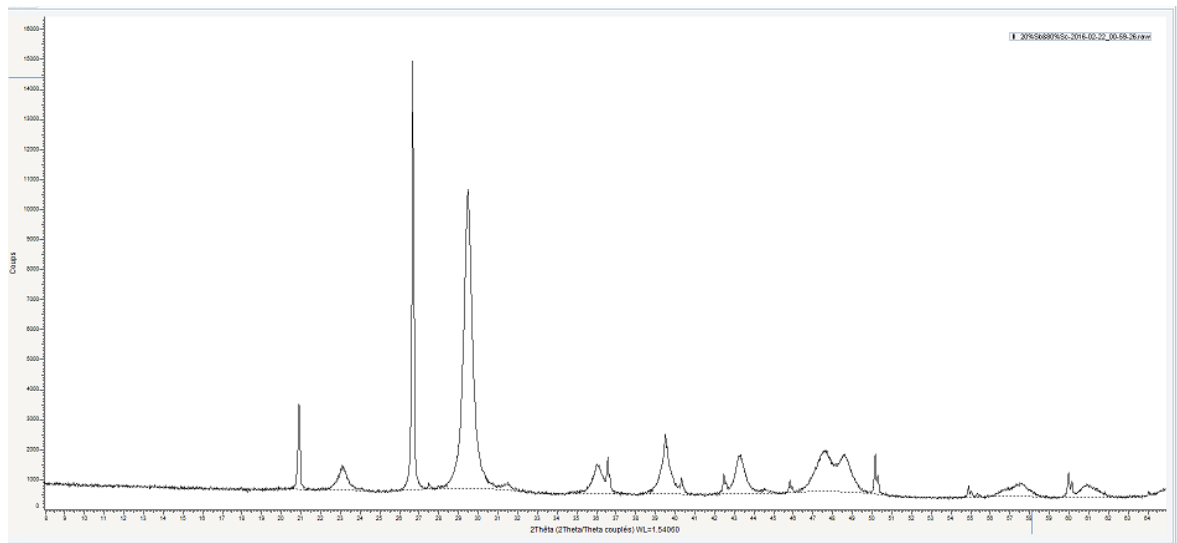


Figure 3.17 : DRX du sable mixte (30% S.de dune ;70% S concassé)

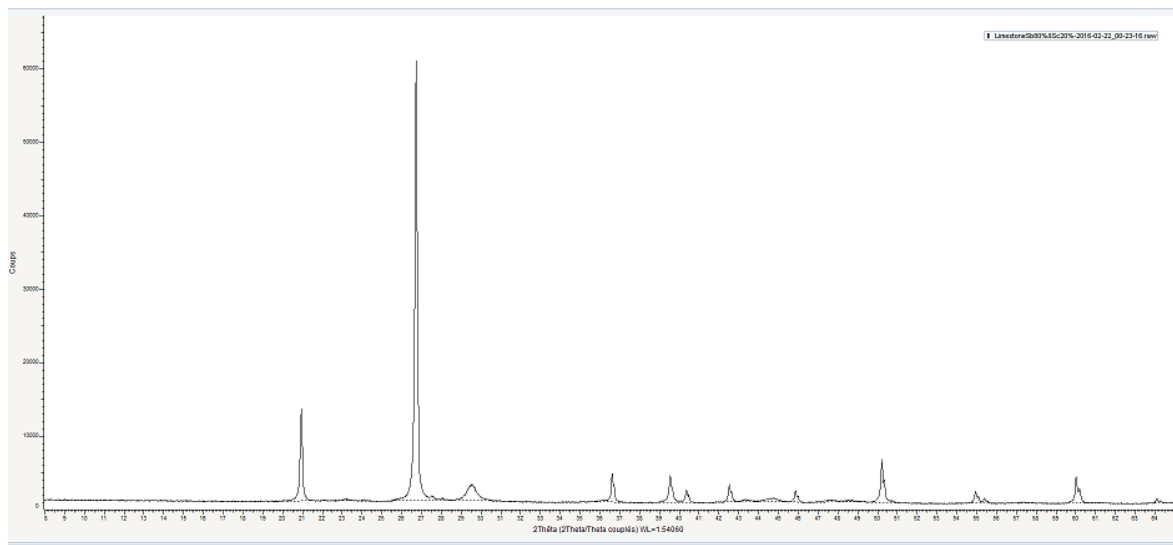


Figure 3.18 : DRX du sable mixte (70% S.de dune ;30% S concassé)

Tableau 3.13 : Analyse chimique du sable de dune et du sable concassé :

Sable Eléments %	Sable concassé	Sable de dune
R_wp	6,81	8,29
Calcite	88,16	2,64
Dolomite	0,02	0,51
Quartz	8,2	88,5
Pyrite	0,1	0
Illite	2,11	2,73
Chlorite	0,14	0,3
Kaolinite	1,27	1,04
Albite	0	4,27
CO ₂ _XRD	38,77	1,41

3.2 Le ciment:

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé, CPJ- CEM II/A 42.5 qui contient 15 % de fillers calcaires produit par la cimenterie d'Ain-Touta. Obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment ont été déterminées au laboratoire de la cimenterie d'Ain-Touta.

3.2.1 Caractéristiques physico – mécaniques

✓ Masses volumiques (apparente et absolue)

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons utilisé deux méthodes pour le calcul de la masse volumique absolue, la méthode du densitomètre Le Chatelier ainsi que celle du pycnomètre à liquide et pour chacune d'entre-elles nous avons réalisé trois essais.

✓ Essai de consistance

L'objectif de cet essai est de déterminer, pour le ciment CEM II/A 42.5 que nous avons utilisé, la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3.

✓ Essai de prise

Nous avons réalisé l'essai de l'aiguille Vicat à l'aide de la méthode expérimentale normalisée (NF EN 196-3) qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise, comprise entre deux échéances : le temps de début et de fin de prise Vicat, définis par des hauteurs normalisés d'enfoncement de l'aiguille. Trois essais simultanés à l'aiguille Vicat ont été réalisés sur la pâte de ciment étudiée.

✓ Surface spécifique Blaine

Les surfaces spécifiques Blaine ont été déterminées par le perméabilimètre de Blaine (NFP 15-442) dont le principe est de déterminer le temps mis par l'air pour traverser une certaine quantité de poudre. La consistance normale des pâtes de ciment a été suivie par l'appareil de Vicat. Les caractéristiques mécaniques ainsi que les propriétés physiques ont été mesurées par les laboratoires des cimenteries, les résultats sont récapitulés au tableau 3.14

Tableau 3.14 : Caractéristiques du ciment (CPJ CEMII/A 42.5)

Consistance normale (%)	26,00 - 28,00
Début de prise (mn)	150 - 180
Fin de prise (mn)	210 - 270
Poids spécifique (g/cm ³)	3.08
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3509
Résistance à la compression à 2j (MPa)	18.00 – 23,00
Résistance à la compression à 7j (MPa)	32.00 – 38.00
Résistance à la compression à 28j (MPa)	>42.00
Retrait a 28 jours (µm/m)	< 1000
Stabilité (mm)	0,0– 20.00

3.2.2. Analyse chimique du ciment :

L'analyse chimique du ciment CPJCEMII/A42,5 réalisé au laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta montre une prédominance d'oxyde de calcium (54,19 %), présence de la silice de l'ordre de (18 %), d'autres constituants à faible pourcentage peuvent être classés avec les impuretés comme des oxydes (d'aluminium, fer, magnésium, potassium) et une perte au feu faible.

La composition chimique du ciment composé CPJCEMII/A42,5 est représenté au tableau (3.15).

Tableau 3.15 : Compositions chimiques du ciment CPJ CMII/A 42,5.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P.F	Ins
%	54,19	21,25	5,32	2,41	1,52	0,79	0,09	1,89	7,4	5,12

3.3 Adjuvant :

La plupart des bétons (mortiers) modernes incorporent des superplastifiants dans leur formulation. Ces produits "défloculants" améliorent l'ouvrabilité à quantité d'eau constante. Ils permettent d'atteindre des rapports eau/liant inférieurs à 0,50, en conformité avec les spécifications de la norme NF EN 206 [4]

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex implanté à OUED SMAR (wilaya d'ALGER) et commercialisé sous le nom de « MEDAFLOW 30 », il est à base de polycarboxylates, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5 à 2 % (en extrait sec) du poids de ciment, ajouter au béton gâchée lors du malaxage quelques minutes avant la fin du malaxage [64].

Le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération, il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Il permet d'obtenir des bétons de très haute qualité en plus de sa fonction principale de superplastifiant il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable et ne présente pas d'effet retardateur.

Les caractéristiques essentielles recueillies sur la fiche technique sont données au tableau 3.16.

Tableau 3.16 : Caractéristiques du MEDAFLOW 30

Forme	Couleur	P-H	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Jaunâtre	6 – 6,5	1,07 ± 0,01	< 1g/l	30%

La chromatographie par perméation de gel est un essai qui permet la détermination de la masse moléculaire du superplastifiant.

Tableau 3.17 : Masse moléculaire du superplastifiant

Superplastifiant	Masse moléculaire Moyenne en nombre	Masse moléculaire Moyenne en masse	Indice de polydispersité
MEDAFLOW 30	44700	58714	1,31

3.3.1 Action du MEDAFLOW 30

- ✓ sur le béton frais il permet :
 - L'obtention d'un E/C très faible ;
 - L'amélioration considérable de la fluidité ;
 - Une très bonne maniabilité ;
 - Un long maintien d'ouvrabilité ;
 - D'éviter la ségrégation ;
 - De faciliter la mise en œuvre du béton.
- ✓ sur le béton durci il permet :
 - D'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme ;
 - De diminuer la porosité ;
 - D'augmenter la durabilité ;
 - De diminuer le retrait et le risque de fissuration.

3.3.2 Domaine d'application :

- Béton à haute performance.
- Béton auto plaçant.
- Béton pompé.
- Béton précontraint.
- Béton architecturant.

3.3.3 Dosage :

Le dosage de MEDAFLOW 30 varie entre 0.5 et 2% du poids de ciment d'après les prescriptions recommandées par le fabricant. Le pourcentage utilisé dans cette recherche pour tous les mortiers et bétons est de 1%.

Remarque :

On remarque que cet adjuvant est une solutions neutre ($\text{Ph} \approx 7$) donc ne présente pas de danger pour une manipulation à main nue . Mais pour plus de sécurité on préconise l'utilisation des gants lors des manipulations.

3.4 Eau de gâchage :

Pour le gâchage des mélanges des mortiers et bétons on utilise une eau dépourvue d'éléments nuisibles qui empêcheraient le durcissement normale du béton (mortier). Ce sont, les acides, les sulfates, les graisses, les huiles, le sucre, ..., etc. Comme il est interdit d'employer des eaux souillées dont le Ph est inférieur à 4.

L'eau de mer ou autres eaux contenant des sels minéraux peuvent être employées à conditions que la teneur en sels ne dépasse pas 2%. La qualité de l'eau pour la confection des bétons s'établis par l'analyse chimique ou en procédant à des essais comparatifs des résistance d'éprouvettes de béton gâchés avec l'eau testée et une eau potable pure , essayés à 28 jours et conservées dans des conditions normales . L'eau est considérée comme bonne si les éprouvettes préparées avec cette eau ont la même résistance que celle préparée avec l'eau potable. De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30g/l de chlorure de sodium pour la fabrication de béton armé ou prés contrainte.

Pour la confection des différents bétons et mortiers, nous avons utilisé l'eau distribuée par le réseau du service public de la ville de M'Sila (Algérie).

Les résultats de l'analyse chimique de cette eau ont été réalisés au laboratoire de L'Algérienne des eaux et sont présentés dans le tableau 3.18. Ils répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211), (2003).

Tableau 3.18 : Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage.

Elément	TC^0	PH	NO^{-3}	Cl^-	SO^{-4}	Ca^{+2}
Teneur (mg/l)	21.00	7.57	15.00	220.1	272.4	176.00

3.5. CONCLUSION :

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ces masses volumiques sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 et sa consistance est conforme à la norme NF EN 196-3. De même, ces résistances en compression obtenues à 2, 7 et 28 jours sont conformes aux exigences de la norme EN 196-1.

Les essais réalisés, sur les deux fractions (3/8 et 8/16) des graviers et du sable concassé de la carrière choisie (El- Euch) et le sable de dune de Bousaada, ont présentés de bonnes propriétés physiques, physico- chimiques et mécaniques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme P 18-541. Pour notre étude, ces granulats ont été utilisés en tant que tel, nous n'avons pratiqué aucun traitement (lavage) pour formuler des bétons et mortiers. L'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons (mortiers) de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des parements, de résistances et de durabilité.

Il est toutefois raisonnable d'ajouter que, bien que les différentes propriétés des granulats puissent être examinées, il est difficile de définir la qualité des granulats autrement qu'en la comparant à celle des bétons (mortiers) confectionnés avec eux. Un granulat dont les propriétés paraissent satisfaisantes produira toujours un bon béton (mortier). Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton (mortier) de qualité. Au cours de cette étude, nous allons procéder à la confection de quatorze mortiers et trente cinq bétons en utilisant le ciment de Ain-Touta (Batna) ainsi que les granulats concassés de la carrière d'El-Euch (Bordj Bou Arreridj), le sable de dune de (Boussaâda) et le superplastifiant MEDAFLOW 30 fabriqué par GRANITEX (Alger) .

CHAPITRE 4 : MORTIER A BASE DE SABLE MIXTE AVEC ET SANS ADJUVANT

4-1 Introduction :

Dans ce chapitre sont présentées la composition du mortier, les essais effectués (fluidité, résistance, masse volumique et capacité d'absorption) et la discussion des résultats.

Nous tenons à rappeler la définition et les rôles essentiels des mortiers.

4-2 Définition :

Le mortier est un mélange intime dans des proportions convenables (suivant la destination et l'emploi du mortier) de sable, de liant, d'eau et parfois d'adjuvants pour former une pâte de plasticité déterminée après mélange et une sorte de pierre naturelle après durcissement.

Il est parfois habile d'étudier le comportement des bétons par le biais d'études sur des mortiers judicieusement choisis. Ces mortiers présentent alors l'avantage d'être plus faciles à tester, les volumes de matériau requis étant plus faibles du fait de la diminution du volume représentatif.

Deux stratégies de détermination de la composition de mortiers associés à des bétons sont :

- La première concernant l'obtention de mortiers en faisant passer le béton malaxé à travers le tamis 05mm et séparer le gros granulat (gravier) du mortier et ainsi on obtient le mortier équivalent mais cette méthode s'avère pas pratique car une quantité d'eau est absorbée par les graviers et une partie de ciment reste collée aux gros granulats.
- La seconde est de déterminée théoriquement à partir d'une des méthodes de composition du béton répandue et déterminer la quantité de gros granulat, la quantité de sable, la quantité de ciment et la quantité d'eau nécessaire, alors ainsi la composition du mortier équivalente (sable, ciment, eau) est déterminée.

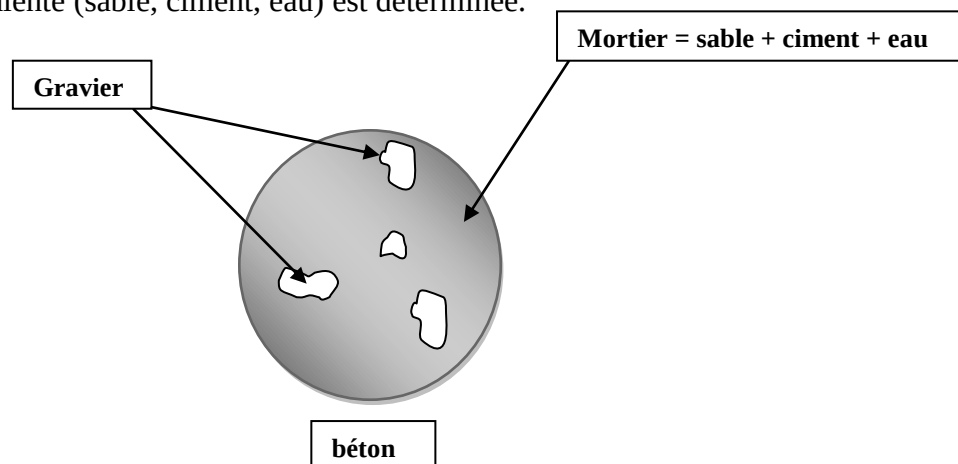


Fig. 4-1 : Modélisation du mortier au béton équivalent (MBE)

4-3 Rôles :

Le rôle principal du mortier équivalent est d'améliorer la performance des caractéristiques rhéologiques à l'état frais et les caractéristiques mécaniques à l'état durci du béton, donc le mortier équivalent doit remplir les exigences suivantes :

- Une bonne maniabilité pour faciliter la mise en place ;
- Une bonne compacité, donc une faible absorption d'eau pour assurer une bonne étanchéité ;
- Une bonne résistance (R_c) à la compression ;
- Une résistance à la traction (R_t) adéquate pour réduire la fissuration.

Nous avons jugé nécessaire d'étudier l'effet de la substitution d'une partie de sable de dune par le sable concassé (traitement de sable de dune par le sable concassé) et l'ajout de 1% de l'adjuvant MEDAFLOW 30 sur les caractéristiques suivantes :

- La fluidité ;
- La masse volumique ;
- La résistance mécanique ;
- La capacité d'absorption ;

4-4 Détermination de la composition du mortier:

La composition du mortier équivalent est tirée à partir de la composition du béton en appliquant la méthode « SCRAMTAIV » dite méthode des volumes absolus choisie pour sa rationalité et son application très simple [20].

4-4-1 Détermination de la composition du béton.

- ✓ Détermination du rapport (E/C) :

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0,5) \quad ; \text{ d'où } :$$

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5$$

Avec :

$$R_b = 400 \text{ Bars (Classe du béton);}$$

$$A = 0,6 \text{ béton de qualité ordinaire ;}$$

$$R_c = 425 \text{ Bars (Activité du ciment).}$$

Alors :

$$\frac{C}{E} = \frac{400}{0,6 \cdot 425} + 0,5 = 2,068 \Rightarrow \frac{E}{C} = 0,483$$

- ✓ Détermination du volume d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton frais:
D'après le tableau 2.3 préétabli avec une fluidité égale à 6cm.

$$E = 200 + 20 = 220 \text{ l/m}^3.$$

- ✓ Détermination de la quantité de ciment nécessaire pour 1 m³ de béton frais:

$$C = E \cdot C/E ; C = 220 \times 2,068 = 454,96 \text{ Kg/m}^3.$$

- ✓ Détermination de la proportion de gravier pour 1 m³ de béton frais :

$$G = \frac{1000}{P_g \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}}$$

où :

$\gamma_g = 2,54 \text{ Kg/l}$ masse spécifique du gravier ;

$P_g = 0,47$ Porosité du gravier ;

$\rho_g = 1,35 \text{ Kg/l}$: Masse volumique apparente du gravier ;

$\alpha = 1,46$ Coefficient d'écartement.

Alors :

$$G = \frac{1000}{0,47 \frac{1,46}{1,35} + \frac{1}{2,54}} = 1108,65 \text{ Kg}.$$

- ✓ Détermination de la quantité de sable pour 1m³ de béton frais :

$$S = (1000 - (\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{\gamma_e} + \frac{G}{\gamma_g})) \cdot \gamma_s$$

$$S = (1000 - (\frac{454,96}{3,1} + \frac{220}{1} + \frac{1108,65}{2,54})) \cdot \gamma_s = 196,762 \cdot \gamma_s$$

où :

γ_s masse spécifique du sable.

Tableau 4-1 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m³ de béton

Sable mixte	S _d (kg)	S1(kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4(kg)	S5(kg)	Sc (kg)
Poids	513,55	515,52	515,52	521,42	519,45	521,42	525,35

Pour une fluidité souhaitée correspondant à un affaissement au mini cône de 4 à 6 cm la quantité d'eau nécessaire retenue est $E = 385 \text{ l}$ pour 1m³ de mortier (à base de sable de dune).

La quantité du gravier est remplacée par le mortier

$$(S + C) = G, \quad \frac{C}{S_d} = 0,886$$

$$S + S = 1108 \text{ kg} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{C}{S_d} = \frac{455}{531,52} = 0,886 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{à partir des équations 1 et 2} \rightarrow S + 0,886S = 1108 \text{ kg} \rightarrow S = \frac{1108}{1,866} = 587,487 \text{ kg}$$

$$C = 0,886 \times S_d = 0,886 \times 587,49 = 508,76 \text{ kg}$$

La composition de 1m³ de mortier à base de sable de dune :

S = 513,55 + 587,49 = 1101,04 kg, C = 454,96 + 508,76 = 963,72 kg, E = 380l

De la même façon est déterminée la composition du mortier à base de différents sables mixte et les résultats sont groupés aux tableaux 4- 2 et 4-3

4-5 Essais et procédures :

4-5-1 Détermination de la fluidité du mortier frais par méthode d'enfoncement du cône

La fluidité est la capacité du mortier frais de couler sous l'effet de son poids propre. On peut exprimer la fluidité d'une pâte de mortier, par la profondeur d'enfoncement (en cm) dans la pâte, d'un cône métallique pesant 300 g et a ayant un angle au sommet de 30°[59] . Cet essai est réalisé pour les mortiers à base de sable mixtes (Sd, S1, S2, S3, S4, S5, Sc) avec et sans adjuvant. Les résultats obtenus sont groupés aux tableaux 4-1 et 4-2.

4-5-2 Détermination de la masse volumique :

La masse volumique est déterminée juste avant l'écrasement à chaque âge, en pesant l'éprouvette. La masse volumique est donnée par la relation suivante .

$$\gamma = M/V ;$$

où :

M : masse de l'éprouvette ;

V : Volume de l'éprouvette.

Les résultats obtenus sont groupés aux tableaux 5-9 à 5-12 donnant les valeurs moyennes de 3 essais.



Figure 4-2 : Confection des éprouvettes prismatiques en mortier



Figure 4-3 : Détermination de la masse volumique des éprouvettes par pesage

4-5-3 Détermination de la résistance mécanique du mortier durci

La résistance mécanique d'un mortier après durcissement dépend de l'activité du rapport eau / ciment (E/C) et de la quantité du sable utiliser. La résistance mécanique d'un mortier est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression.

Mode opératoire:

- Préparer le mélange de mortier avec une composition soigneusement calculée. Les composants sont malaxés jusqu'à obtention d'une pâte bien homogène. Les mélanges de mortier sont obtenus à partir de différents sables mixtes (Sd, S1, S2, S3, S4, S5 et Sc) avec un rapport C/S $\approx 0,9$ et avec une fluidité plus au moins constante (affaissement ≈ 4 à 6 cm) pour différents dosages d'adjuvants afin d'avoir les résistances correspondantes .
- On lubrifie les moules de mortier de dimensions (4x4x16) cm.
- On remplit les moules métalliques avec le mortier frais préparé avec un certain excès. On les tasse avec une tige métallique et en suite on leur fait subir une série de vibration sur une table à secousses. Cette vibration durera 30 s environs (à raison de 30 coups) jusqu'à l'apparition d'une couche de laitance sur la surface.
- On nivelle la surface du mortier au ras de bord.
- Les éprouvettes sont conservées à l'abri du soleil dans une ambiance humide.
- Le démoulage des éprouvettes se fait après 24 heures.
- A l'âge de 7,14 et 28 jours les éprouvettes sont soumises aux essais de flexions et de compressions
- L'essai de flexion est réalisé sur l'appareil de flexion. On place l'éprouvette symétriquement sur deux mâchoires. Ces dernières servent comme appuis et une troisième destinée à appliquer un moment fléchissant. Après rupture de l'éprouvette la valeur de la contrainte à la flexion (R_f) et à la traction (R_t) sont directement lues en N/cm² sur une régle graduée. Les deux morceaux obtenus après rupture sont testés en compression. L'essai à la compression est réalisé sur une presse hydraulique où l'éprouvette est placée au milieu du plateau de la presse. La surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de 16 cm² (4x4 cm²) . L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en KN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai. La résistance à la compression est déterminée par la moyenne de trois essais cette résistance est donnée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{P_{\max}}{S} \quad (\text{bars})$$

où :

$P_{\max}$: charge maximal de rupture en (kgf) ;

S : section de l'éprouvette (cm²);

Les résultats obtenus sont groupés dans les tableaux 5-13 jusqu'à 5-20 .



Figure 4-4 : Mesure de la résistance à la flexion des éprouvettes 4X4X16 cm



Figure 4-5 : Mesure de la résistance la compression sur demi-prismes

4-5-4 Capacité d'absorption :

La capacité d'absorption d'un mortier donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mesurer en évidence la compacité du mortier durci. Plus le mortier est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche. La capacité d'absorption est déterminée par une méthode simple. Les éprouvettes de mortiers sont pesées après étuvage (à 105°C) jusqu'à stabilisation de leurs poids soit (P_s). Ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau pendant 24 heures puis retirées et pesées, soit P_h leur poids. La capacité d'absorption est donnée par la relation suivante :

$$A(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau 5-21 donnant les valeurs moyennes de trois essais.

Tableau 4-2 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Sable (kg)		Ciment (kg)	C/S	E (l)	E/C
		S.de dune	S. Concassé				
MSD	S.D	1101.35	0	975,52	0.886	385	0.394
MS1	S1	772.76	331.82	974.57	0.883	392	0.402
MS2	S2	662.44	441.63	974.57	0.883	400	0.410
MS3	S3	556.5	556.5	971.43	0.873	403	0.415
MS4	S4	444,03	666,04	972.38	0.876	416	0.428
MS5	S5	333,9	779.09	971.44	0.873	425	0.437
MSC	S.C	1119.13	0	969.21	0.866	443	0.457

Tableau 4-3 : Composition et fluidité des mortiers à base de sable mixte étudiés avec 1% de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Sable (kg)		Ciment (kg)	C/S	E (l)	Adj (kg)	E/C	Réduction d'eau (%)
		S.de dune	S. Concassé						
MSD	S.D	1101.35	0	975,52	0.886	301,4	9.76	0.309	21.71
MS1	S1	772.76	331.82	974.57	0.883	307	9.75	0.315	21,68
MS2	S2	662.44	441.63	974.57	0.883	308	9.75	0.316	23.01
MS3	S3	556.5	556.5	971.43	0.873	310	9.72	0.319	23.11
MS4	S4	444,03	666,04	972.38	0.876	312	9.73	0.321	25.00
MS5	S5	333,9	779.09	971.44	0.873	312	9.72	0.324	26,63
MSC	S.C	1119.13	0	969.21	0.866	326	9.69	0.336	26.49

Tableau 4-4: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Masse volumique (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	2.258	2.266	2.285	2,320
MS1	S1	2.289	2.305	2.348	2,402
MS2	S2	2.270	2.293	2.328	2,348
MS3	S3	2.266	2.270	2.381	2,324
MS4	S4	2.254	2.289	2.309	2,313
MS5	S5	2.281	2.301	2.304	2,324
MSC	SC	2.297	2.309	2.348	2,371

Tableau 4-5: Masse volumique des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Masse volumique (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	2.309	2.328	2.355	2.371
MS1	S1	2.309	2.324	2.394	2.414
MS2	S2	2.285	2.313	2.339	2.367
MS3	S3	2.281	2.371	2.383	2.391
MS4	S4	2.273	2.309	2.348	2.363
MS5	S5	2.289	2.316	2.332	2.387
MSC	SC	2.332	2.328	2.367	2.314

Tableau 4-6 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Résistance à la compression (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	43.75	45.79	52,19
MS1	S1	38.75	43.92	53,12
MS2	S2	45.05	52.08	57,81
MS3	S3	48.75	59.87	59,37
MS4	S4	42.50	56.75	57,81
MS5	S5	37.50	48.96	47,75
MSC	SC	43.75	44.79	47,50

Tableau 4-7 : Résistance à la compression des mortiers étudiés à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Résistance à la compression (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	46.80	52.71	61,43
MS1	S1	46.46	58.33	69,37
MS2	S2	48.44	64.69	72,29
MS3	S3	49.37	60.93	69,37
MS4	S4	47.43	53.43	67,18
MS5	S5	43.97	53.12	65,29
MSC	SC	45.52	48.71	58,53

Tableau 4-8 : Résistance à la traction des mortiers étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Résistance à la traction (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	6.25	6.50	7,05
MS1	S1	5.65	5.39	6,65
MS2	S2	5.00	6.22	7,05
MS3	S3	5.71	6.28	7,03
MS4	S4	4.40	5.82	6,65
MS5	S5	4.30	5.89	6,58
MSC	SC	5.90	6.30	6,42

Tableau 4-9 : Résistance à la traction des mortiers étudiés
à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Résistance à la traction (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	6.30	7.33	7,80
MS1	S1	6.24	6.36	7,15
MS2	S2	5.68	6.40	8,40
MS3	S3	6.15	7.80	8,23
MS4	S4	6.00	7.78	7,15
MS5	S5	5.15	6.45	6,61
MSC	SC	7.10	7.33	7,50

Tableau 4-10 : Résistance à la flexion des mortiers
étudiés à base de sable mixte sans adjuvant

Mortier	Sable mixte	Résistance à la flexion (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	5.80	7.36	8,00
MS1	S1	6.63	7.02	8,26
MS2	S2	7.35	7.66	8,35
MS3	S3	7.00	7.30	8,20
MS4	S4	5.15	6.85	7,71
MS5	S5	5.05	6.32	7,16
MSC	SC	7.35	7.60	8,26

Tableau 4-11: Résistance à flexion des mortiers étudiés
à base de sable mixte avec (1%) de MEDAFLOW 30

Mortier	Sable mixte	Résistance à la flexion (MPa)		
		7 jours	14 jours	28 jours
MSD	SD	7.40	8.58	9,00
MS1	S1	7.02	7.45	8,62
MS2	S2	7.90	7.55	9,35
MS3	S3	7.34	9.15	9,50
MS4	S4	7.00	8.76	8,35
MS5	S5	6.02	7.65	7,75
MSC	SC	8.00	8.58	8,70

Tableau 4-12 : Degré d'absorption des mortiers étudiés
à base de sable mixte à l'âge de 28 jours

Mortier	Sable mixte	Degré d'absorption (%)	
		Sans adjuvant	avec (1%) d'adjuvant
MSD	SD	9,86	6,86
MS1	S1	10,18	7,41
MS2	S2	10,31	7,55
MS3	S3	10,91	7,66
MS4	S4	11,07	7,86
MS5	S5	11,39	7,72
MSC	SC	11,8	8,15

4-6 Discussion des résultats :

4-6-1 Fluidité:

La fluidité ou consistance est la capacité du mortier de couler sous son poids, cette caractéristique rhéologique du mortier frais doit être contrôlée au cours des gâchées successives et permet de s'assurer de la régularité de la quantité d'eau entrant dans la composition du mortier.

L'influence du pourcentage de sable concassé avec l'incorporation de 1% d'adjuvant, sur la fluidité mesurée, nous amène à examiner et analyser la réduction d'eau constatée puisque la fluidité est maintenue plus ou moins constante (4 à 6 cm).

La figure 4.6 montre que l'augmentant du pourcentage de sable concassé pour tous les mortiers étudiés est engendré par une augmentation de la quantité d'eau de gâchage. Cela est dû principalement à la force de cohésion entre les grains de sable de forme anguleuse et à la présence de fines (qui absorbent l'eau) que contient le sable concassé, cette augmentation d'eau de gâchage dépasse 8% pour le mortier sans adjuvant, elle atteint 3% pour le mortier avec adjuvant.

L'incorporation de 1% de MEDAFLOW30 permet une réduction sensible d'eau de gâchage pour tous les mortiers malgré les pourcentages élevés de sable concassé utilisés. Cette réduction atteint et dépasse même 27% car l'adjuvant permet une défloculation des particules fines (ciment) ce qui permet un accroissement de la compacité (effet géométrique), lubrifie les surfaces solides en diminuant les contraintes de friction entre particules (effet mécanique). [15]

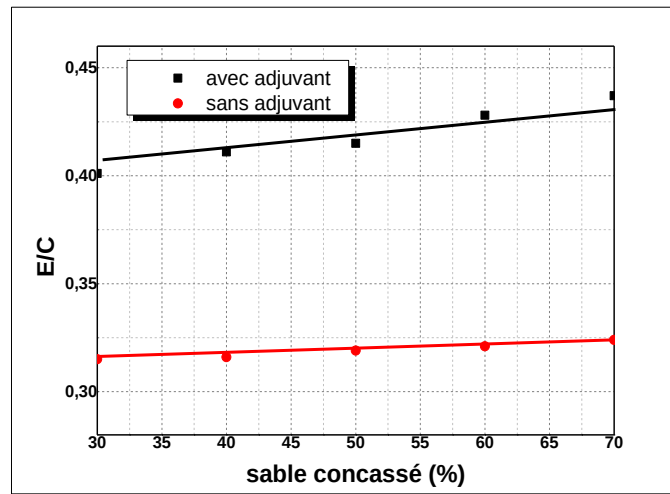


Figure 4- 6 : Variation d'E/C du mortier en fonction du % de sable concassé

En conclusion l'utilisation d'un pourcentage élevé de sable concassé entraîne une augmentation de l'eau de gâchage mais l'incorporation de 1% de MEDAFLOW30 permet de réduire sensiblement cette augmentation de l'eau de gâchage du mortier cela est visible sur la figure 4-6 la pente de la droite pour mortier sans adjuvant est supérieure à la pente de la droite du mortier avec adjuvant.

4-6-2 Masse volumique:

En analysant les résultats représentés sur la figure 4-7, on constate généralement une baisse de la masse volumique lorsque le pourcentage de sable concassé augmentant, cette baisse est peu significative (3,7%). L'incorporation de 1% de MEDAFLOW 30 a permis l'amélioration de la masse volumique cela est dû principalement à la réduction d'eau et à la lubrification des particules qui est suivit par un meilleur mode de serrage ce qui rend alors le mortier plus compact. A titre d'exemple le mortier à base du sable mixte S1, présente la meilleure compacité (voir tableau 1) qui conduit à un mortier de masse volumique supérieure.

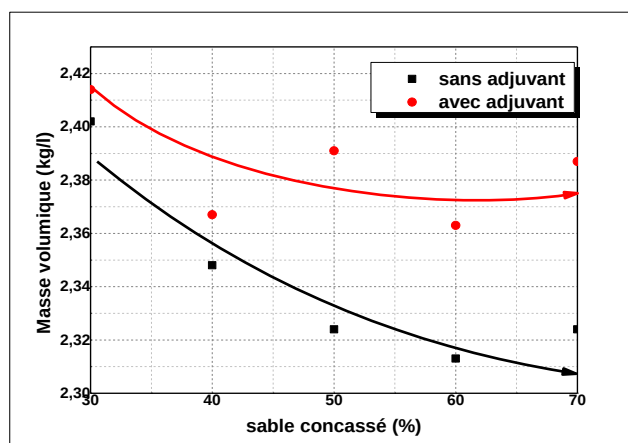


Figure 4-7 : Variation de la masse volumique du mortier en fonction du % de sable concassé

4-6-3 Capacité d'absorption:

La capacité d'absorption d'eau d'un mortier donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du mortier durci. Plus le mortier est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche.

La figure 4-8, nous permis de constater et de noter que la capacité d'absorption d'eau augmente jusqu'à 24% en augmentant le pourcentage de sable concassé pour les mortiers sans adjuvant, pour les mortiers à 1% de MEDAFLOW30 l'augmentation de la capacité d'absorption atteint 18%. On constate que l'utilisation du superplastifiant permet une diminution de la capacité d'absorption à titre d'exemple la capacité d'absorption du mortier avec le sable mixte S5 a diminuée de 53% en utilisant 1% d'adjuvant. C'est-à-dire que le MEDAFLOW 30 a permet la réduction du nombre de vides et des pores existants dans le mortier qui devient ainsi plus compact, plus résistant et plus étanche à l'eau

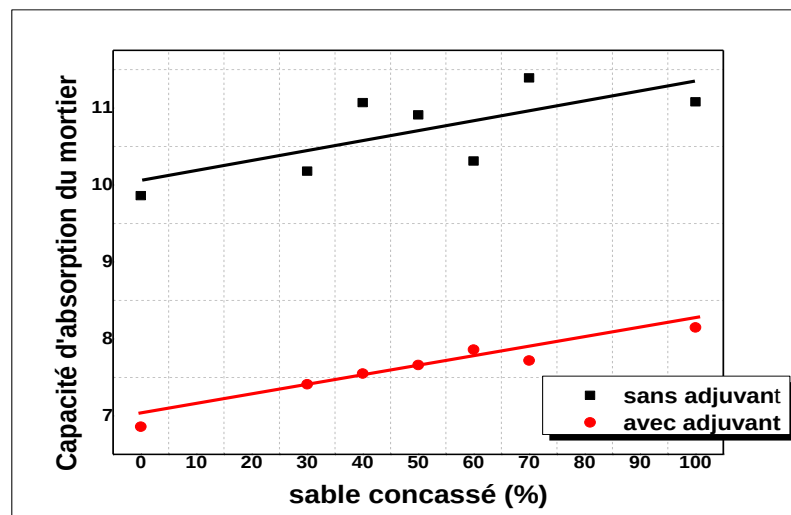


Figure 4-8 : Capacité d'absorption du mortier en fonction du % de sable concassé

4-6-4 Rapport E/C:

L'eau de gâchage est l'un des paramètres principaux qui influent sur la maniabilité du mortier frais et sur la résistance et la compacité du mortier durci. La résistance croît en même temps que le dosage en ciment et elle décroît en fonction du dosage en eau c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport E/C comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. [156]

✓ Effet de la porosité du sable mixte sur le rapport E/C du mortier :

La porosité du mortier dépend du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores. [154]

On constate sur la figure 4-9 que l'augmentation de la porosité du sable mixte est engendrée par une hausse de plus de 11%, du rapport E/C des mortiers sans adjuvant, pour les mortiers avec adjuvant cette hausse atteint 6,33%, on note aussi que l'utilisation du MDAFLOW 30 engendre une diminution du rapport E/C de plus de 35% car ce dernier baisse la force de cohésion entre les grains, lubrifie et facilite le réarrangement des grains et le mortier devient moins poreux donc plus compact et plus étanche.

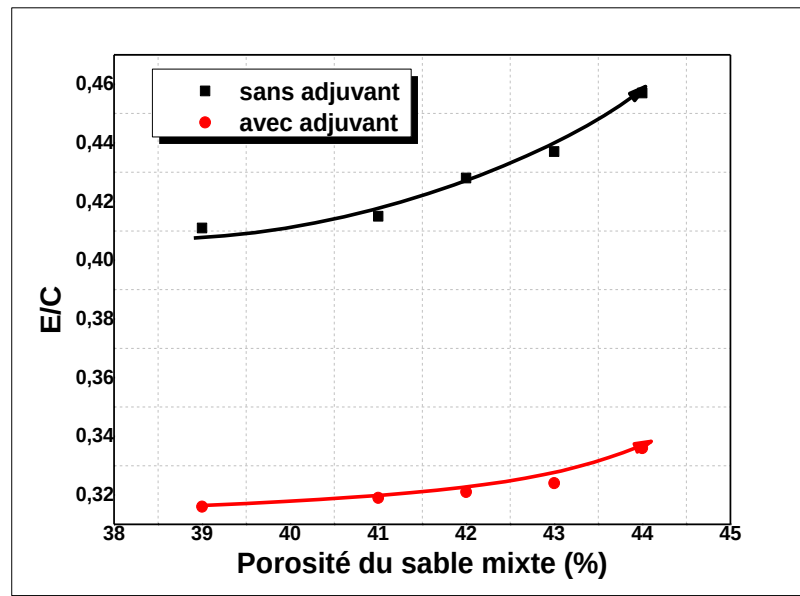


Figure 4-9 : E/C fonction de la porosité du sable mixte

✓ Effet de la capacité d'absorption du mortier sur le rapport E/C:

L'analyse des résultats représentés sur les figures 4-10 et 4-11 montrent que la réduction du rapport E/C est suivie par une baisse de la capacité d'absorption du mortier à base de sable mixte avec ou sans adjuvant ; la réduction du rapport E/C de 8,74% est suivie par une réduction de la capacité d'absorption de 18,45% pour les mortier avec adjuvant ; pour les mortiers sans adjuvant la réduction du Rapport E/C de 16% est engendrée par une baisse de la capacité d'absorption de 19,67%. Donc l'incorporation du MEDAFLOW30 réduit la capacité d'absorption le mortier devenant ainsi compacte, étanche et plus résistant [150].

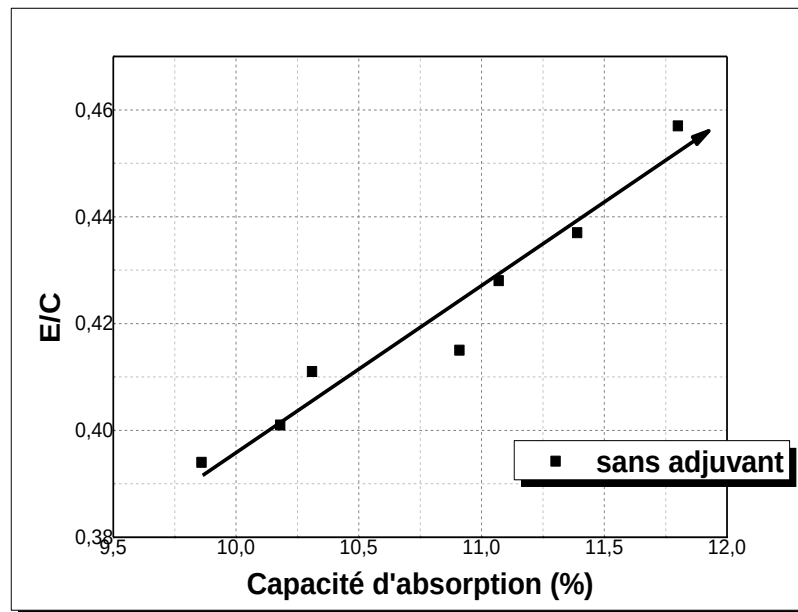


Figure 4-10 : E/C fonction de la capacité d'absorption du sable mixte sans adjuvant

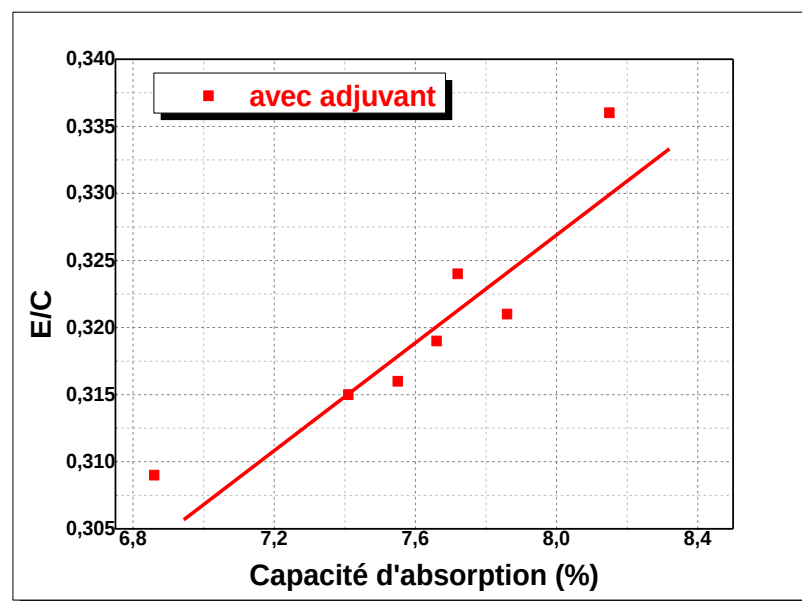


Figure 4-11 : E/C fonction de la capacité d'absorption du mortier mixte avec adjuvant

4-6-5 Résistances mécanique:

La résistance mécanique d'un mortier après durcissement dépend de l'activité du ciment, du rapport eau/ciment (E/C) et de la qualité et quantité du sable utilisé. Elle est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression.

On prépare le mélange de mortier avec une composition soigneusement calculée, les composants sont malaxés, jusqu'à obtention d'une pâte bien homogène. Les mélanges de mortier sont obtenus à partir de différents sables mixtes (S_C , S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , et S_d), avec un rapport $C/S \approx 0,9$ sans adjuvant et avec 1% d'adjuvant. Ensuite on lubrifie et on

remplit les moules métalliques de dimensions (4 x 4 x 16) cm avec le mortier frais, le démoulage des éprouvettes se fait après 24 h, à l'âge de 7, 14 et 28 jours les éprouvettes sont soumises aux essais de flexion et de compression. EN 1015-11.

✓ **Effet du traitement du sable de dune par sable concassé sur la résistance:**

La figure : 4-12 montre que la résistance en compression du mortier sans adjuvant s'améliore à partir de 30% d'ajout de sable concassé jusqu'à 50% d'ajout, la résistance maximale étant obtenue à 50% d'ajout ; pour le mortier avec adjuvant l'amélioration est constatée à partir de 30% d'ajout de sable concassé jusqu'à 40% et la résistance maximale est obtenue à 40% d'ajout, la diminution de la résistance est notable au-delà de 70% d'ajout cela est due essentiellement à l'augmentation de l'eau de gâchage qui engendre une porosité plus grande le mortier devient alors moins compact et moins résistant, on remarque aussi que l'utilisation du MEDAFLOW 30 ralentit sensiblement la baisse de résistance du mortier (il améliore le réarrangement des grains) et le gain de résistance dépasse 35% (pour le mortier à base de sable mixte S5).

La figure : 4-13, montre que la résistance en flexion pour les mortiers sans adjuvant affiche une faible amélioration visible à partir de 30% d'ajout de sable concassé. Au-delà de 40% d'ajout, on observe une baisse de résistance qui se poursuit jusqu'à 70% d'ajout. Pour les mortiers avec adjuvant, l'amélioration est notable à partir de 40% d'ajout de sable concassé et cette amélioration se poursuit jusqu'à 60% d'ajout; au-delà de cet ajout, on remarque une baisse de résistance de flexion. L'incorporation de 1% de superplastifiant (MEDAFLOW 30) permet un gain de résistance qui dépasse 24%.

La figure : 4-14, nous permet de constater que l'amélioration de la résistance en traction pour les mortiers sans adjuvant commence à être visible à partir de 40% d'ajout de sable concassé, la résistance optimale est atteinte à 50% d'ajout, une baisse de résistance est enregistrée à partir de 60% d'ajout. Pour les mortiers avec adjuvant, on constate une amélioration de la résistance à partir d'un pourcentage supérieur à 30% d'ajout de sable concassé et la résistance optimale est obtenue à 40% d'ajout, la baisse de résistance est affichée en dépassant 60% d'ajout, l'adjuvant permet un gain de résistance qui dépasse 26%.

Finalement, on conclut qu'à partir de 30% d'ajout de sable concassé on constate une amélioration des résistances à la compression, flexion et traction des mortiers avec ou sans adjuvant, on remarque que l'utilisation du MEDAFLOW30 améliore les résistances R_c , R_t et R_f du mortier de plus de 24%.

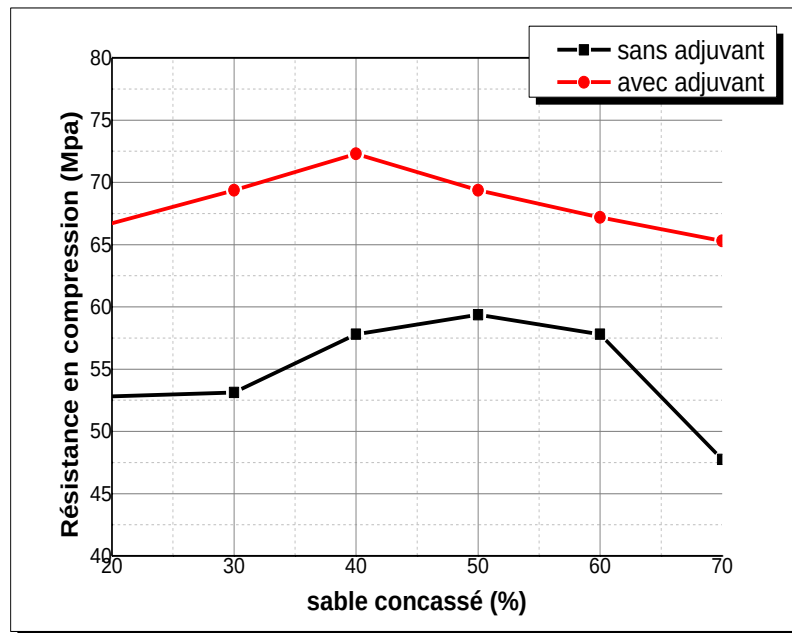


Figure 4-12 : Resistance en compression à 28 jours en fonction du % de sable concassé

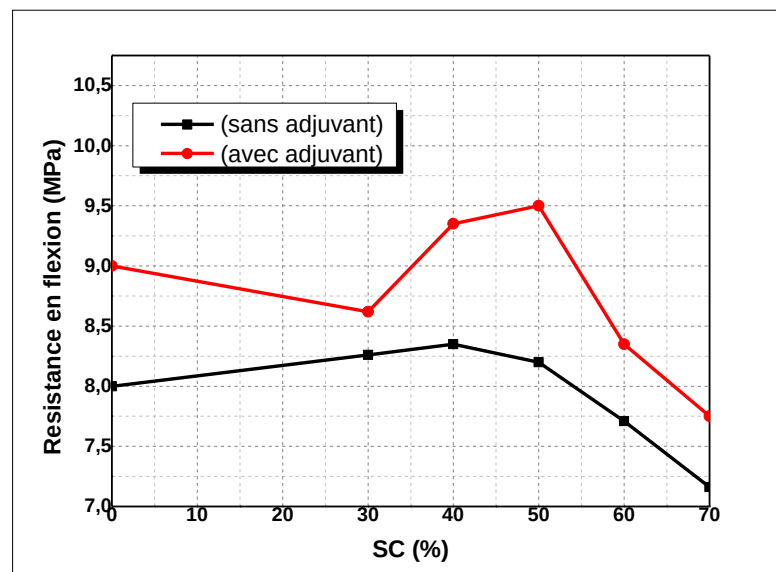


Figure 4-13 : Resistance en flexion à 28 jours en fonction du % de sable concassé

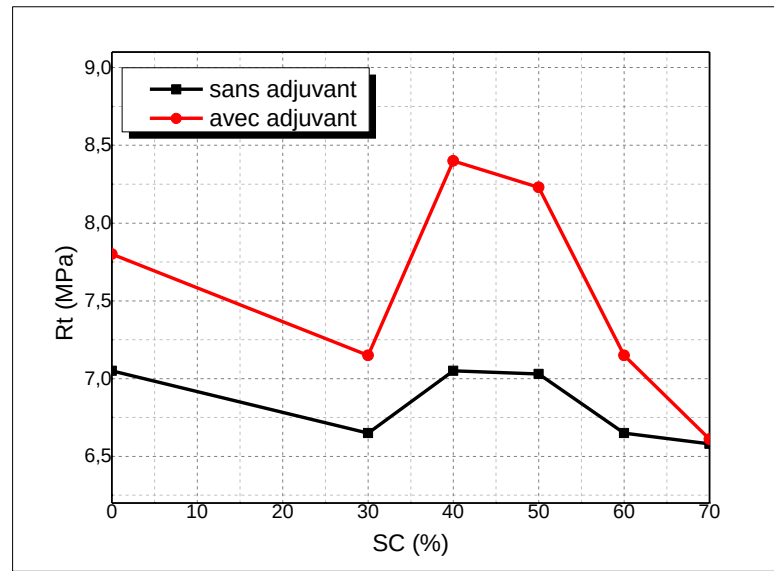


Figure 4-14: Resistance en traction à 28 jours en fonction du % de sable concassé

✓ Effet de la porosité du sable mixte sur la résistance du mortier:

D'après les figures représentées ci-dessous, on remarque que les résistances R_c , R_t et R_f respectivement de compression, traction et flexion diminuent lorsque la porosité du sable mixte augmente, on constate également que les résistances optimales de compression et de traction sont obtenues à une porosité de 39% environ, pour les mortiers à base de sable mixte avec ou sans adjuvant ; en flexion par contre, on remarque que la résistance optimale est obtenue à une porosité de 41%. A titre d'exemple, en utilisant le sable mixte S2 (40% de sable concassé, 60% de sable de dune) on atteint les résistances optimales respectivement de compression et de traction du mortier avec adjuvant $R_c = 72,39\text{Mpa}$, $R_t = 8,40\text{ Mpa}$ et la résistance optimale en flexion pour le mortier avec adjuvant est obtenue en utilisant le sable mixte S3 (50% de sable concassé, 50% de sable de dune $R_f = 9,50\text{Mpa}$.

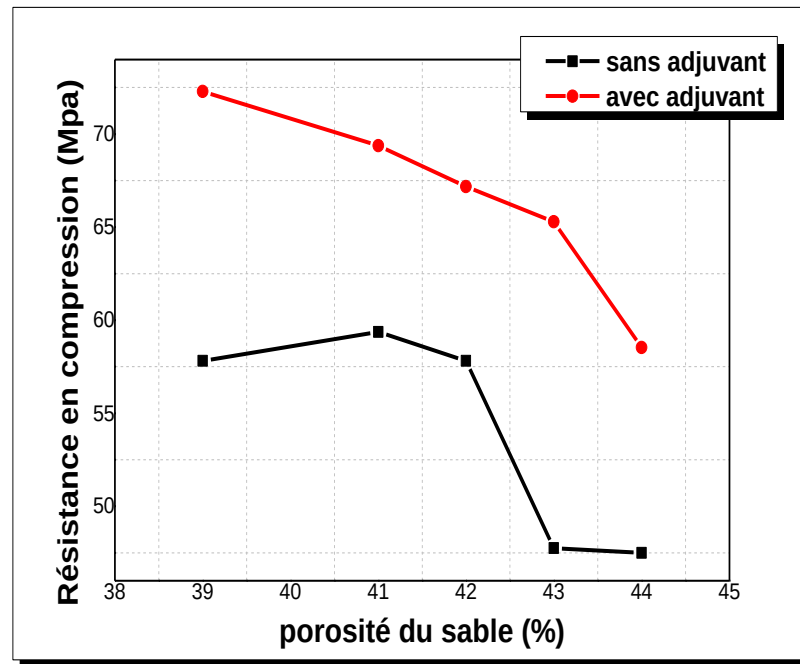


Figure 4-15: Résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte

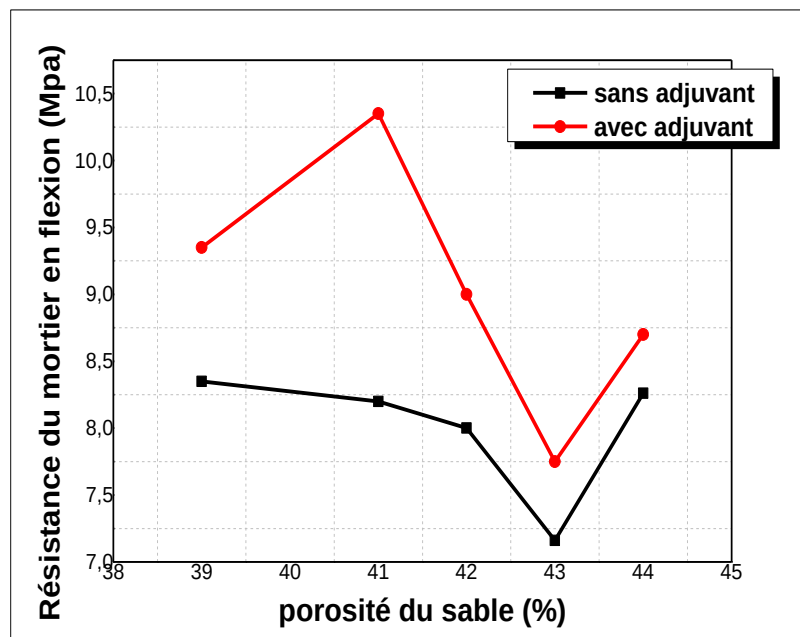


Figure 4-16 : Résistance à la flexion à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte

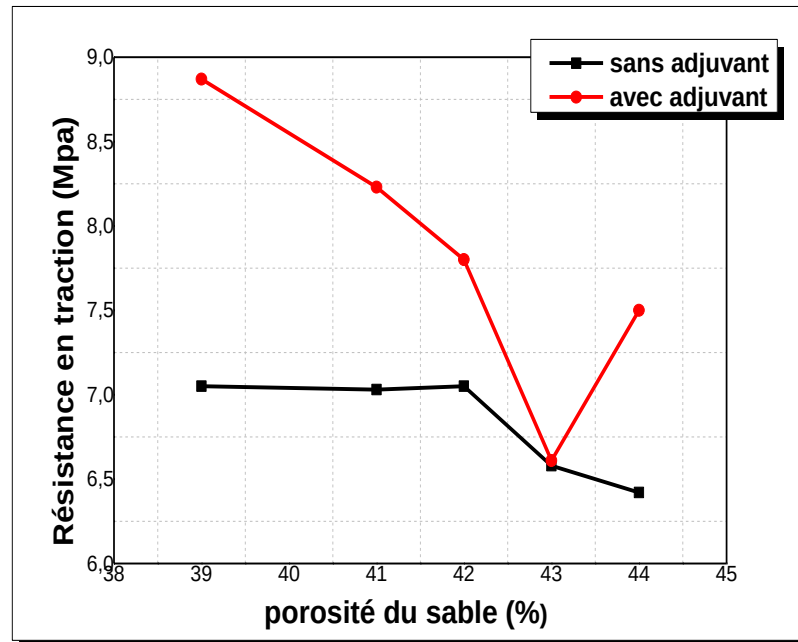


Figure 4-17 : Résistance en traction des mortiers à 28 jours en fonction de la porosité du sable mixte

✓ Evolution dans le temps de la résistance mécanique du mortier :

D'après les courbes donnant l'évolution la résistance mécanique R_c , R_t , et R_f respectivement de compression, de traction et de flexion pour les mortier à base du sable de dune traiter par sable concassé pour différents pourcentages dans le temps représentées par les Figures 4-18 à 4-23 , on note que l'accroissement est de forme hyperbolique rapide dans l'intervalle (0 -7 jours) et lent dans l'intervalle (14-28jours) pour tous les mortiers avec ou sans adjuvant. L'utilisation de l'adjuvant MEDAFLOW 30 est engendré par un accroissement de la résistance mécanique dans le temps, quelque soit le pourcentage de sable concassé utilisé et quelque soit la porosité du sable mixte.

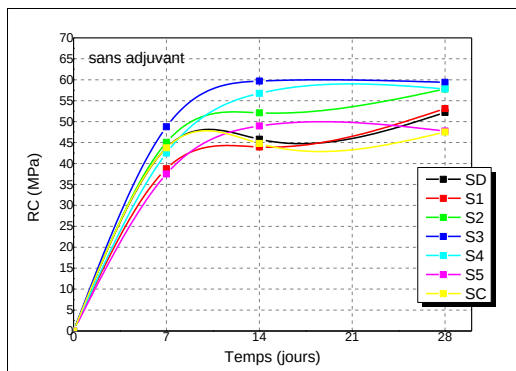


Fig 4- 18: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant

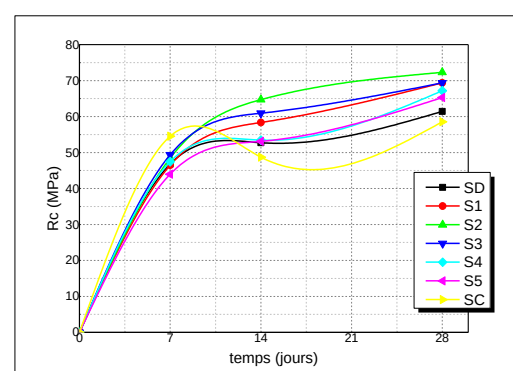


Fig 4- 19: Résistance en compression des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant

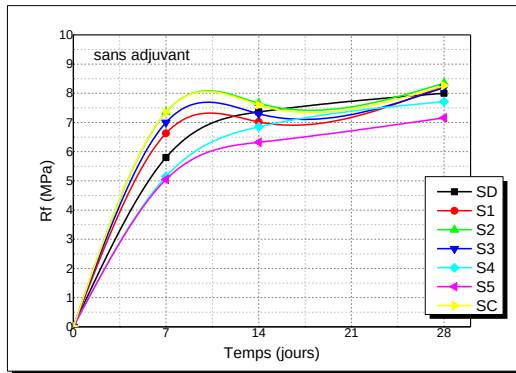


Fig 4- 20: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant

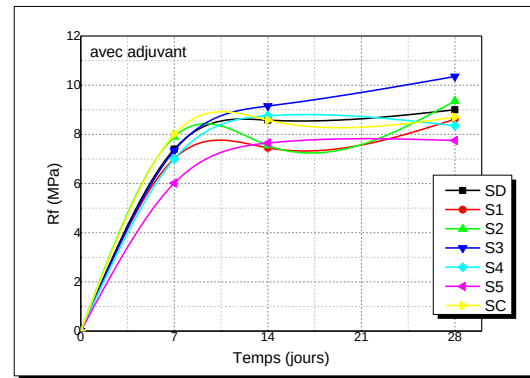


Fig 4- 21: Résistance en flexion des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant

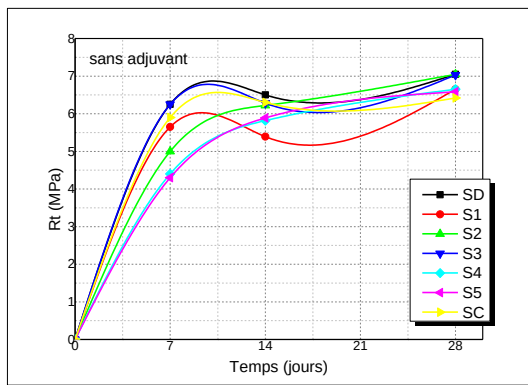


Fig 4- 22: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte Sans adjuvant

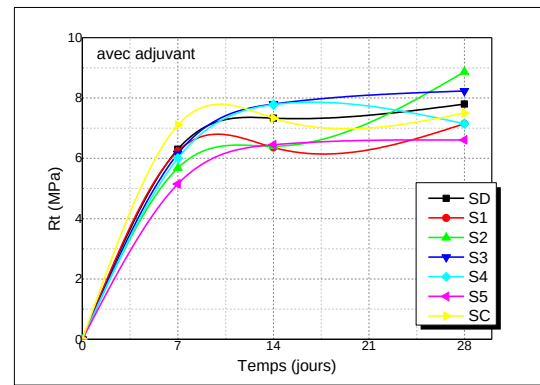


Fig 4- 23: Résistance en traction des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant

4-7 Conclusion :

L'objectif principal de ce travail expérimental est de valoriser les matériaux locaux et les déchets de carrière en les utilisant dans la fabrication des mortiers et bétons dans divers projets de construction (bâtiments, routes, ouvrages d'art ...,etc) et préserver le patrimoine du pays en matière de sable de dune.

Cette investigation nous a permis d'aboutir à des résultats très satisfaisants qui confirment que le traitement du sable de dune (par substitution) par les déchets issus de la fabrication des graviers conduit à une amélioration notable de la résistance mécanique (de compression, traction et de flexion) qui est due essentiellement à la correction des caractéristiques physiques du sable mixte.

Les résultats obtenus précisent de façon claire que l'amélioration est notable à partir de 30% jusqu'à 50% d'ajout de sable concassé, malgré que cet ajout du sable de concassage soit engendré par une petite hausse du rapport E/C qui influe négativement sur la résistance mécanique [53].

L'utilisation de 1% de superplastifiant (MEDAFLOW 30) a permis de réduire l'eau de gâchage de plus de 25% alors l'effet du sable de concassage (baisse de E/C) est rapidement corrigé.

L'étude de l'effet du traitement du sable de dunes par sable concassé avec divers pourcentages (0%, 30%, 40%, 50%, 60% et 70%) nous a permis de conclure ce qui suit :

- ✓ L'ajout du sable concassé permet l'amélioration des propriétés physiques du sable mixte (granularité améliorée, faible porosité, compacité élevée, adhérence pâte ciment-granulats améliorée,..., etc);
- ✓ L'utilisation du sable mixte améliore également la résistance mécanique (compression, flexion et à la traction) du mortier;
- ✓ Le traitement (ajout) du sable de dunes de 30% jusqu'à 50% de sable concassé et l'utilisation du superplastifiant (1% de Medaflow30) augmentent la résistance à la compression, à la flexion et à la traction plus de 24%.
- ✓ Avec 1% de superplastifiant (MEDAFLOW 30), la résistance de compression optimale du mortier est réalisée avec le sable mixte S2 (40% d'ajout de sable concassé) elle est de l'ordre de 72,39 MPa, la résistance optimale de traction du mortier est obtenue avec le même sable mixte S2 est elle affiche une valeur 6,40 MPa, en flexion la résistance optimale affiche une valeur de 9,5 MPa en utilisant le sable mixte S3.

Les résultats d'investigation indiquent que les propriétés physico-mécaniques du mortier seraient mieux avec du sable mixte. Les bonnes résistances mécaniques affichées par le mortier à base de sable mixte incite à poursuivre l'investigation et encourage à substituer le sable (naturel) de dune.

CHAPITRE 5 : BETON ADJUVANTE A BASE DE SABLE MIXTE

5-1 Introduction :

Dans ce chapitre sont présentés les compositions des bétons utilisée dans cette recherche, Les essais effectués (fluidité, résistance à la compression et masse volumique) et enfin la discussion des résultats obtenus.

Les méthodes de formulation des mélanges hydrauliques sont nombreuses. Le principe de base de la plupart d'entre elles repose sur la recherche de la compacité granulaire maximale.

Pour cela, certaines méthodes recourent à la mesure de la compacité des constituants et des mélanges, d'autres à « une courbe granulaire de référence » supposée donner la compacité maximale avec les matériaux utilisés. Dans le même esprit (optimisation de la structure granulaire), à partir de la matrice cimentaire (gravier+sable+ciment+ eau) c'est-à-dire gravier + mortier, nous proposons alors cinq bétons B1, B2, B3, B4, B5 (cinq formulations) avec les sept sables mixtes étudiés dans la partie mortier, il s'agit bien de mettre au point un mélange optimisé de constituants qui non permet la réalisation d'un béton de qualité supérieure en améliorant ses principales caractéristiques rhéologiques à l'état frais (fluidité) et les caractéristiques mécaniques à l'états durcis (résistance). Pour cela les constituants sont déterminés à partir de la composition Russe dite méthodes des volumes absolus « méthode **B. scamtaiev**» puis la substitution d'une partie de gros granulats (gravier) avec différents pourcentages par du mortier en gardant le rapport C/S (sable sur ciment) constant, 35 mélanges de bétons sont réalisés avec les différents sable mixtes utilisés dans la partie mortier.

Tableau 5.1 : Dénomination du béton

Dénomination du béton	B1	B2	B3	B4	B5
Mortier (%)	30	40	50	60	70
Gravier (%)	70	60	50	40	30

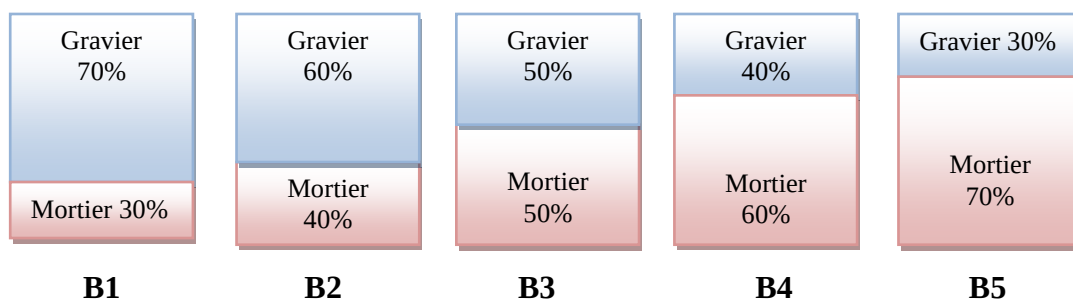


Figure 5.1 : compositions des bétons étudiés

5-2 Essais, Procédures et Résultats :

5-2-1 Détermination de la composition du béton.

On a utilisé la méthode " **Xkramtaev** " dite méthode des volumes absolue de l'ex URSS, cette méthode est choisie pour sa rationalité et son application très simple [20].

✓ Détermination du rapport (E/C) :

$$R_b = A.R_c (C/E - 0,5) \quad ; \quad \text{d'où} \quad :$$

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A.R_c} + 0,5$$

Avec :

$R_b = 400$ Bars (Classe du béton);

$A = 0,6$ béton de qualité ordinaire ;

$R_c = 425$ Bars (Activité du ciment).

Alors :

$$\frac{C}{E} = \frac{400}{0,6.425} + 0,5 = 2,068 \Rightarrow \frac{E}{C} = 0,483$$

✓ Détermination du volume d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton frais:

D'après le tableau 2.3 préétabli avec une fluidité égale à 6cm.

$$E = 200 + 20 = 220 \text{ l/m}^3.$$

✓ Détermination de la quantité de ciment nécessaire pour 1 m³ de béton frais:

$$C = E. C/E \quad ; \quad C = 220 \times 2,068 = 454,96 \text{ Kg/m}^3.$$

✓ Détermination de la proportion de gravier pour 1 m³ de béton frais :

$$G = \frac{1000}{P_g \frac{\alpha}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}}$$

où :

$\gamma_g = 2,54$ Kg/l masse spécifique du gravier ;

$P_g = 0,47$ Porosité du gravier ;

$\rho_g = 1,35$ Kg/l : Masse volumique apparente du gravier ;

$\alpha = 1,46$ Coefficient d'écartement.

Alors :

$$G = \frac{1000}{0,47 \frac{1,46}{1,35} + \frac{1}{2,54}} = 1108,65 \text{ Kg.}$$

✓ **Détermination de la quantité de sable pour 1m³ de béton frais :**

$$S = (1000 - (\frac{C}{\gamma_c} + \frac{E}{\gamma_e} + \frac{G}{\gamma_g})).\gamma_s$$

$$S = (1000 - (\frac{454,96}{3,1} + \frac{220}{1} + \frac{1108,65}{2,54})).\gamma_s = 196,762 .\gamma_s$$

où :

γ_s masse spécifique du sable.

Tableau 5.2 : quantités de sable mixte donné par la composition de 1m³ de béton

Sable mixte	S _d (kg)	S1(kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4(kg)	S5(kg)	Sc (kg)
Poids	513,55	515,52	515,52	521,42	519,45	521,42	525,35

Alors pour chaque béton (B1, B2, B3, B4, B5) on détermine sa composition selon l'hypothèse suivante :

Le béton est composé d'une matrice comprenant du gravier et du mortier, on calcule alors la masse du béton d'après ses composants en poids déterminé par la composition des volumes absolus « **Xkrantaev** » pour chaque sable mixte.

La Masse du béton = G + S + C + E + Adj = 1108,65 + S + 454,96 + 220 + 4,55.

- Sable de dune : $M_b = 1788,16 + 513,55 = 2301,71 \text{ kg}$
- Sable mixte (S1) : $M_b = 1788,16 + 515,52 = 2303,68 \text{ kg}$
- Sable mixte (S2) : $M_b = 1788,16 + 515,52 = 2303,68 \text{ kg}$
- Sable mixte (S3) : $M_b = 1788,16 + 521,42 = 2309,58 \text{ kg}$
- Sable mixte (S4) : $M_b = 1788,16 + 519,45 = 2307,61 \text{ kg}$
- Sable mixte (S5) : $M_b = 1788,16 + 521,42 = 2309,58 \text{ kg}$
- Sable concassé : $M_b = 1788,16 + 525,35 = 2313,51 \text{ kg}$

A titre d'exemple pour le béton B1 (70% de gravier et 30% de mortier) on détermine la composition en poids comme suite :

$$\text{Masse du gravier : } \text{Gravier} = \frac{M_b}{100} \times 70 = \frac{2301,71}{100} \times 70 = 1611,97 \text{ kg}$$

$$\text{Mortier} = \frac{M_b}{100} \times 30 = \frac{2301,71}{100} \times 30 = 690,51 \text{ kg}$$

Masse du mortier :

Mortier = sable + ciment + eau, donc sable + ciment = mortier – eau = 690,51 – 66 = 624,15 kg

C+S = 624,15 kg, C/S = 0,88 → C = S x 0,88 → S + 0,88 x S = 624,15 kg => 1,88 x S = 624,15 kg

S = (624,15)/1,88 = 332 kg => C = 624,15 – 332 = 292,15 kg

Gravier (8/16) = 1128,38 kg, Gravier (3/8) = 483,59 kg, S = 332 kg, C = 292,1 kg,

E = 220 l, Adjuvant = 2,92 kg.

La composition des bétons B1, B2, B3, B4, B5 est calculée comme précédemment est donnée pour chaque sable mixte dans les tableaux : 5. 3 à 5. 9

5-2-2 Détermination de la fluidité du béton frais :

La fluidité du mélange de béton frais est évaluée par sa capacité de couler sous l'action de son poids propre ou d'une vibration. Cette caractéristique est déterminée au moyen du cône d'Abrams.

Cet essai est assez simple il est le plus fréquemment utilisé. Il consiste à remplir un moule tronconique de diamètre $D=20$ cm pour la base inférieure et d'un diamètre $d=10$ cm pour la base supérieure et de hauteur $h=30$ cm, par du béton frais.

Le remplissage est réalisé en trois couches compactées avec une tige métallique de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche. Suite à cela, le moule est soulevé avec grande précaution pour mesurer ainsi l'affaissement.



Figure 5.2 : Mesure de l'affaissement du béton frais au cône d'Abrams

Les résultats sont regroupés aux tableaux 4-1 jusqu'à 4-4.

5-2-3 Détermination de la résistance à la compression des bétons durcis :

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du béton de résister à la destruction sous l'action des contraintes dues aux différentes charges de compression, de traction, de flexion et de cisaillement. Le béton résiste le mieux à la compression et cet indice sert de caractéristique principale des propriétés mécaniques des bétons.

Mode opératoire:

- Après détermination de différents dosages des composants du béton selon la méthode de l'ex URSS dite " des volumes absolus", ces derniers seront mélangés et gâchés puis on effectue les essais de mesure de fluidité jusqu'à obtention de la fluidité requise.
- On coule le béton frais dans des moules cubiques de dimensions $10 \times 10 \times 10$ cm³. Après avoir lubrifiés ces derniers, on leur fait subir des vibrations jusqu'à l'apparition d'une couche de laitance du ciment sur la surface libre.

- Pour avoir une surface lisse de la face supérieure de l'éprouvette, cette dernière est arasée à l'aide d'une règle biseautée. Le démoulage se fera 24 heures après la confection du béton. Avant de soumettre les éprouvettes aux essais, ces dernières seront conservées dans un endroit humide (immergées dans l'eau) tel qu'un bac galvanisé rempli d'eau.

-Avant les essais, les éprouvettes seront exposées à l'air libre pendant au moins 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité. Les éprouvettes seront centrées sur le plateau de la presse hydraulique et une charge continue sera appliquée sur l'éprouvette. A la rupture, on effectue la lecture de la charge P.

La résistance à la compression est donnée par la relation suivante.

$$R_c = P / S$$

où :

R_c : Résistance à la compression ;

P : Charge de rupture ;

S : Section de l'éprouvette.

Les essais de résistance à la compression se font à l'âge de 7, 14, 28 jours.

Les résultats sont regroupés aux tableaux 4-5 jusqu'à 4-12.

5-2-4 Détermination de la masse volumique :

On détermine la masse volumique après avoir retiré les éprouvettes des bacs et les laisser à l'air libre 20 minutes pour qu'elles aient une humidité normale. Juste avant l'écrasement aux différents âges on détermine la masse volumique en pesant l'éprouvette. La masse volumique est donnée par la relation suivante:

$$\gamma = M / V$$

où :

M : masse de l'éprouvette ;

V : volume de l'éprouvette .

Les résultats sont regroupés aux tableaux 4-13 jusqu'à 4-20 .



Figure 5.3 : Mode de Conservation des échantillons avant leur écrasement



Figure 5.4 : Sciage des éprouvettes 16 x 32 cm de béton

Tableau 5.3 : Composition (de 1m³) des bétons étudiés à base du sable de dune

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1611,97	332	292,15	2,92	141,76	35,57	0,485
B2	1381,69	442,92	389,77	3,90	142,45	35,25	0,365
B3	1150,85	553,64	487,21	4,87	158,14	28,12	0,325
B4	920,68	664,52	584,78	5,85	177,06	19,52	0,303
B5	690,51	775,11	682,10	6,82	186,098	15,41	0,273

Tableau 5.4 : Composition (de 1m³) des bétons étudiés à base du sable mixte S1

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1612,58	332,5	292,6	2,92	148,5	32,50	0,507
B2	1382,21	443,14	390,14	3,90	157,63	28,35	0,404
B3	1151,84	554,17	487,67	4,88	167,53	23,85	0,344
B4	921,47	665,00	585,20	5,85	175,08	20,42	0,299
B5	691,10	775,83	682,73	6,83	184,12	16,31	0,292

Tableau 5.5 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S2

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1612,58	332,5	292,6	2,92	157,89	28,23	0,539
B2	1382,21	443,14	390,14	3,90	169,11	23,13	0,433
B3	1151,84	554,17	487,67	4,88	177,30	19,41	0,364
B4	921,47	665,00	585,20	5,85	186,29	15,32	0,318
B5	691,10	775,83	682,73	6,83	189,11	14,07	0,277

Tableau 5.6 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S3

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1616,71	333,44	293,43	2,93	156,62	28,81	0,534
B2	1385,75	444,59	391,24	3,91	172,13	21,76	0,440
B3	1154,79	555,73	489,05	4,89	177,83	19,17	0,364
B4	923,83	666,88	586,86	5,87	187,84	14,62	0,320
B5	692,87	778,03	684,67	6,85	191,33	13,03	0,279

Tableau 5.7 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S4

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1615,54	333,17	293,19	2,93	159,02	27,72	0,542
B2	1364,75	444,23	390,92	3,9	182,75	16,93	0,467
B3	1153,96	555,28	488,65	4,9	184,76	16,02	0,378
B4	923,17	666,34	586,38	5,86	189,72	13,74	0,324
B5	692,37	777,40	684,11	6,84	193,56	12,02	0,283

Tableau 5.8 : Composition (de 1m^3) des bétons étudiés à base du sable mixte S5

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1616,70	333,44	293,42	2,93	159,46	27,52	0,543
B2	1385,74	444,59	391,23	3,91	184,95	15,93	0,473
B3	1154,79	555,73	489,03	4,89	186,93	15,03	0,382
B4	923,83	666,88	586,84	5,87	192,19	12,64	0,337
B5	692,87	776,03	684,65	6,85	197,29	10,32	0,288

Tableau 5.9 : Composition (de 1m³) des bétons étudiés à base du sable concassé

Type de béton	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (l)	Réduction d'eau (%)	E/C
B1	1619,46	334,07	293,98	2,94	188,69	14,23	0,642
B2	1388,11	445,43	391,97	3,92	190,01	13,63	0,521
B3	1156,76	556,78	489,97	4,90	192,57	12,47	0,393
B4	925,41	668,14	587,96	5,88	195,93	10,94	0,333
B5	694,05	779,50	685,95	6,70	199,17	9,47	0,290

Tableau 5.10 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable de dune

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,230	2,251	2,264	2,266
B2	0,87	2,444	2,472	2,489	2,490
B3	0,87	2,377	2,398	2,400	2,420
B4	0,87	2,369	2,396	2,400	2,405
B5	0,87	2,368	2,378	2,383	2,390

Tableau 5.11 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S1

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,160	2,189	2,192	2,202
B2	0,87	2,422	2,421	2,425	2,422
B3	0,87	2,401	2,405	2,409	2,413
B4	0,87	2,323	2,345	2,348	2,349
B5	0,87	2,313	2,316	2,320	2,338

Tableau 5.12 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S2

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,215	2,220	2,228	2,230
B2	0,87	2,412	2,417	2,410	2,415
B3	0,87	2,407	2,406	2,409	2,410
B4	0,87	2,342	2,345	2,346	2,348
B5	0,87	2,327	2,327	2,330	2,332

Tableau 5.13 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S3

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,159	2,215	2,224	2,241
B2	0,87	2,409	2,420	2,434	2,435
B3	0,87	2,404	2,445	2,450	2,452
B4	0,87	2,327	2,340	2,349	2,352
B5	0,87	2,349	2,364	2,366	2,369

Tableau 5.14 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S4

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,335	2,345	2,349	2,354
B2	0,87	2,412	2,428	2,431	2,436
B3	0,88	2,431	2,448	2,450	2,451
B4	0,88	2,363	2,400	2,402	2,405
B5	0,87	2,369	2,391	2,396	2,410

Tableau 5.15 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable mixte S5

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,033	2,035	2,121	2,122
B2	0,87	2,410	2,432	2,456	2,456
B3	0,88	2,397	2,414	2,428	2,430
B4	0,87	2,336	2,358	2,364	2,371
B5	0,87	2,376	2,393	2,400	2,400

Tableau 5.16 : Masse volumique des bétons étudiés à base de sable concassé

Type de béton	Rapport C/S	Masse volumique du béton ρ (kg/l)			
		1 jour	7 jours	14 jours	28 jours
B1	0,87	2,307	2,353	2,354	2,356
B2	0,87	2,391	2,416	2,420	2,421
B3	0,86	2,403	2,421	2,435	2,438
B4	0,86	2,379	2,396	2,408	2,409
B5	0,86	2,379	2,403	2,404	2,407

Tableau 5.17 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable de dune

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	24,05	30,13	36,52
B2	51,23	56,38	64,75
B3	52,00	58,25	62,53
B4	42,12	52,72	60,12
B5	42,08	48,33	51,09

Tableau 5.18 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S1

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	25,54	34,08	38,41
B2	41,42	56,34	68,29
B3	45,22	50,11	58,43
B4	39,76	47,23	56,12
B5	39,54	43,78	51,66

Tableau 5.19 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S2

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	33,65	39,55	52,45
B2	51,78	68,32	84,15
B3	45,31	63,13	73,50
B4	41,48	61,20	67,43
B5	39,56	49,32	63,33

Tableau 5.20 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S3

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	34,18	36,13	48,32
B2	62,05	66,75	81,12
B3	56,5	62,52	73,25
B4	48,18	51,16	62,83
B5	43,25	47	52,25

Tableau 5.21 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S4

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	34,5	40,32	46,25
B2	42,13	60,3	77,75
B3	52,67	62,25	63
B4	43,12	50,75	56,19
B5	40,25	48,02	54,17

Tableau 5.22 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable mixte S5

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	28,2	33,12	39,15
B2	51,12	63,5	73,25
B3	48,15	55,38	65,23
B4	35,00	42,37	57,12
B5	31,75	40,3	53,15

Tableau 5.23 : Resistance à la compression des bétons étudiés à base de sable concassé

Type de béton	Resistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
B1	31,25	35,5	36,25
B2	57,5	59	68,25
B3	55,5	62	62,25
B4	41,15	45,2	53,75
B5	35,5	38,25	39

5-3 Discussion et analyse des résultats:

L'analyse du comportement rhéologique, physique et mécanique des bétons étudiés en fonction du type de sable mixte utilisé et du pourcentage de mortier composant la matrice du béton a donné les résultats représentés aux tableaux ci-dessus, l'analyse des paramètres essentielles du béton à l'état frais (fluidité) et à l'état durci (masse volumique, résistance) est effectuée en fonction de la composition (% de mortier), du sable mixte utilisé ainsi que sa porosité.

5-3-1 Fluidité:

La fluidité ou l'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, l'enrobage des aciers et l'obtention d'un parement brut acceptable qu'il soit dans le plan vertical ou horizontal. [153].

pour un affaissement au cône d'Abrams $f \approx 5$ à 7 cm (fluidité plus au moins constante), l'analyse de la réduction d'eau de gâchage en fonction du pourcentage du mortier dans le béton et le traitement du sable de dune par le sable concassé (sable mixte) ainsi que la porosité du sable mixte s'avère importante.

5-3-1-1 Réduction d'eau de gâchage :

La quantité d'eau dans le béton, sert pour sa moitié à peut près à l'hydratation du ciment. tandis que l'autre moitié, sous forme d'eau de mouillage et interstitielle confère au béton ses qualités de plasticité et d'ouvrabilité, une partie d'eau pouvant être absorbée par les granulats en fonction de leur plus au moins grande porosité.[153]

a) Réduction d'eau de gâchage en fonction du pourcentage de mortier entrant dans composition du béton :

On analysant les résultats groupés dans les tableaux 5-3 à 5-9, on remarque que la réduction d'eau de gâchage diminue en augmentant le pourcentage de mortier dans la matrice béton (B1, B2, B3, B4, B5) pour tous les sables mixte, cela est du essentiellement au faite que la quantité de ciment devient plus importante dans le béton par la suite plus d'eau pour l'hydratation de cette dernière. La plus grande réduction affiche plus de 35 % pour le béton B1 à base de sable de dune cela s'explique par l'absence des fines (qui absorbent beaucoup d'eau) et la forme sphérique des particules du sable de dune qui diminuent la friction (jouent le rôle de billes), on note que cette réduction varie de 35,47% à 9,47%.

Enfin on peut conclure que l'augmentation de la quantité de mortier aide à vaincre les forces de cohésion entre les grains de gravier et l'adjuvant lubrifie les grains de ciment, ceux-ci sont défloculés et individualisés, cette dispersion facilite le mouillage et améliore le mode de serrage [31].

b) Réduction d'eau de gâchage en fonction du pourcentage de sable concassé entrant dans composition du béton :

on observant les tableaux 5-3 à 5-9 on constate que le sable concassé par sa nature géométrique (grains anguleux) et son besoin en eau(présence de fines) important baisse la réduction d'eau de gâchage car la cohésion entre les grains augmente et la fluidité diminue et le réarrangement des grains dans la matrice cimentaire devient difficile, à titre d'exemple on note une réduction de plus de 35% pour le béton B1 à base de sable de dune et de 14,23% pour le même béton à base de sable concassé alors plus d'eau pour vaincre la cohésion entre les grains et la présence de fines.

c) Réduction d'eau de gâchage en fonction de la porosité du sable mixte entrant dans composition du béton :

L'analysant, des résultats groupés aux tableaux 5-3 à 5-9, montrent que la réduction d'eau de gâchage n'est pas significative et presque constante et tourne au tour de 27,5% pour le béton B1 (70% de gravier, 30% de mortier) avec n'importe quel sable mixte utilisé, alors l'eau de gâchage utilisée sert plutôt à vaincre la cohésion entre les grains car la quantité de ciment présente dans la composition du béton est faible (donc une faible quantité d'eau suffit pour son hydratation complète), pour les bétons B2, B3, B4 et B5 cette réduction est plutôt significative en augmentant la porosité du sable mixte utilisé, à titre d'exemple pour le béton B2 confectionné avec le sable mixte (S2 de porosité 39%) la réduction d'eau est égale à 23,13% cette réduction passe à 15,93% avec le sable mixte S5 (de porosité égale à 44%) pour le même béton B2 donc les pores entre les grains sont remplis d'eau (la réduction diminue alors).

5-3-1-2 Rapport E/C :***a) Effet du mortier sur le rapport E/C :***

L'analyse des résultats figurants aux tableaux 5-3 à 5-9, illustrés à la figure 5-5 nous permet de constater la diminution du rapport E/C pour tous les bétons (B1, B2, B3, B4, B5) confectionnés avec n'importe quel sable mixte cela est dû d'une part à l'effet du MEDAFLOW30 qui sert à lubrifier tous les grains et défloculer les particules de ciment, le mortier à son tour contribue à remplir le vide entre grains, à diminuer et vaincre les forces de cohésion entre les gros grains. On remarque que pour 30% de mortier dans la matrice du béton, on a besoin d'une quantité d'eau de gâchage importante ($E/C = 0,64$) pour vaincre la force de cohésion entre les gros grains (discontinuité du squelette granulaire) afin d'atteindre la fluidité fixée ($f \approx 5$ à 7cm) voir. A 40% de mortier, la cohésion est réduite et la quantité d'eau de gâchage diminue pour tous les sables ; la baisse de E/C se poursuit jusqu'à 60% de mortier dans la matrice de béton (la cohésion est réduite d'avantage) ; alors la continuité du squelette granulaire s'améliore et l'incorporation du MEDAFLOW30 facilite le réarrangement des petits grains entre gros grains, la porosité du mélange (de la matrice béton) est réduite et ainsi la fluidité s'améliore ($E/C \approx 0,30$) ; au-delà de 60% de mortier, le rapport E/C est presque constant (voir figure 5-5). A titre d'exemple on note une diminution du rapport E/C de 0,485 pour le béton B1 à 0,273 pour le béton B5 confectionnés avec le sable de dune, le rapport E/C passe de 0,642 pour le béton B1 à 0,290 pour le béton B5 confectionnés avec le sable concassé.

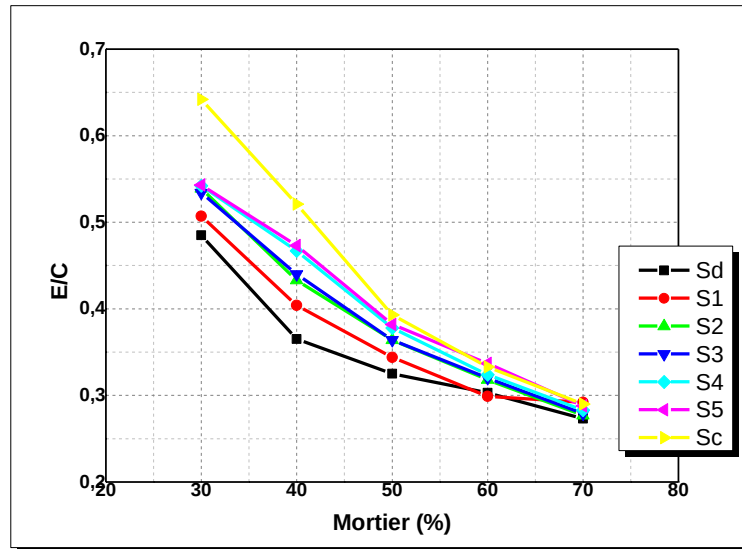


Figure 5.5 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de mortier

b) Effet du sable concassé sur le rapport E/C :

A partir des résultats groupés aux tableaux 5-3 à 5-9 et de la figure 5-6, on constate que l'ajout du sable concassé au sable de dune est généralement engendré par une hausse du rapport E/C pour presque tous les bétons, cela s'explique par le besoin en eau du sable concassé et par la nature anguleuse de ses grains alors l'eau de gâchage augmente et le rapport E/C augmente. A titre d'exemple le rapport E/C passe de 0,642 pour le béton B1 confectionné à base du sable concassé (100% concassé) à 0,485 pour le béton B1 à base de sable de dune (0% sable concassé).

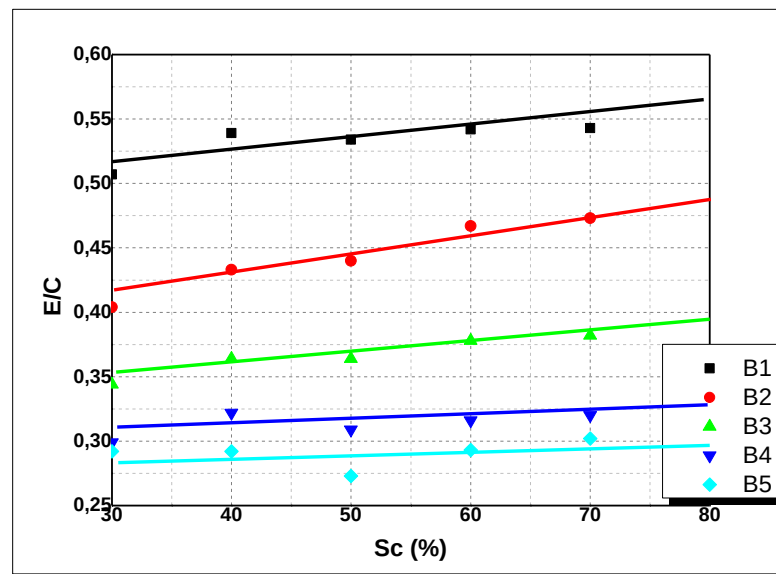


Figure 5.6 : Rapport E/C en fonction du pourcentage de sable concassé

c) Effet de la porosité du sable mixte sur le rapport E/C :

La figure 5.7 montre que la hausse de la porosité du sable mixte est suivie par une augmentation du rapport E/C pour tous les bétons, les bétons B1 et B2 possèdent une pente plus importante car la porosité de la matrice béton (% de gravier élevé) prime sur la porosité du sable mixte, plus d'eau de gâchage pour vaincre la cohésion entre les gros grains voir photos 1, 2, 3, 4, 5.

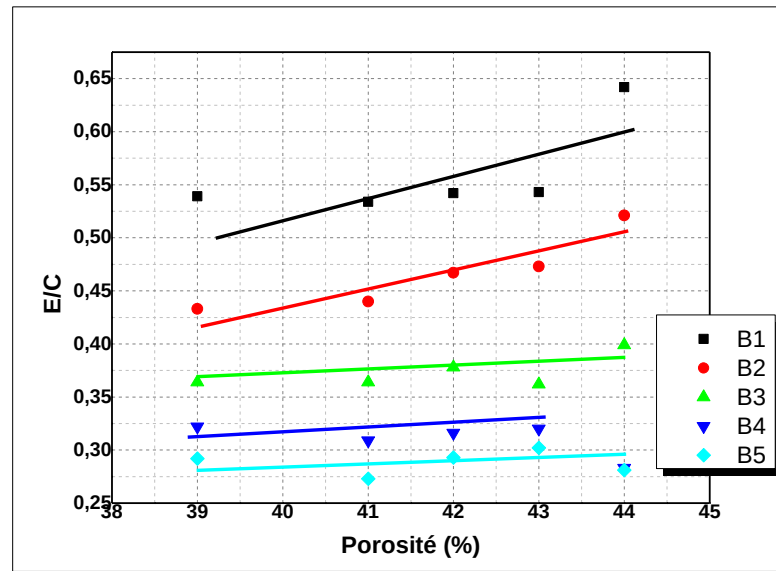


Figure 5.7 : Rapport E/C en fonction de la porosité du sable mixte

5-3-2 Résistance mécanique :

Le béton résiste le mieux à la compression et cet indice sert de caractéristique principale des propriétés mécanique des bétons. Pour cette raison on ne s'intéresse qu'à l'étude du comportement du béton à la compression.

Dans cette analyse on a jugé nécessaire de constater et de commenter les résultats obtenus en cinq parties :

- Effet du mortier sur la résistance du béton à la compression (R_c).
- Effet du sable mixte sur la résistance du béton à la compression (R_c).
- Effet de la porosité du sable mixte sur la résistance du béton à la compression (R_c).
- Evolution de la résistance du béton à la compression (R_c) dans le temps .

a) Effet du mortier sur la résistance du béton à la compression (R_c):

D'après la figure 5-8, on remarque qu'à 30% de mortier dans la matrice de béton (béton maigre), la résistance affiche sa plus faible valeur pour tous les bétons avec n'importe quel

sable mixte utilisé. La résistance maximale à 30% de mortier est obtenue pour le béton à base de sable mixte S4 ($R_c = 46,25\text{Mpa}$). A 40% de mortier dans la matrice béton, la résistance est optimale pour les bétons B2 pour n'importe quel sable mixte utilisé ; à titre d'exemple, la résistance maximale ($R_c = 84,15\text{Mpa}$) est obtenue en utilisant le sable mixte S2. Au-delà de 40% de mortier tous les bétons affichent une perte graduelle de résistance. Pour 70% de mortier, dans la matrice du béton (béton gras), on remarque que tous les bétons avec n'importe quel sable mixte affichent une baisse de résistance qui atteint presque 35%, cette baisse est due essentiellement à la quantité d'eau de gâchage pour l'hydratation du ciment, donc un rapport E/C important et au manque de gros granulats (faiblesse du squelette granulaire) qui engendrent une baisse de résistance du béton.

Remarque : La quantité de mortier composant la matrice du béton influe sur la compacité de cette dernière qui est l'un des facteurs essentiels qui détermine la résistance du béton, ce qui est bien illustré sur les photos 1, 2, 3,4.

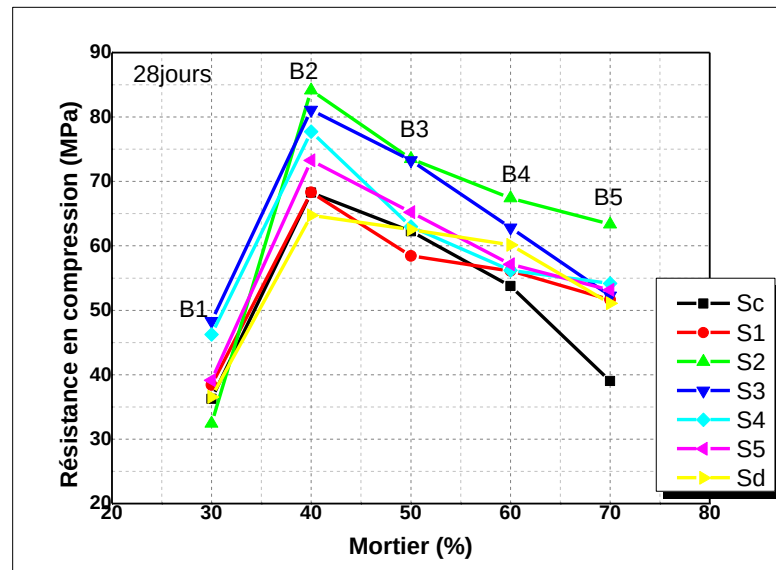


Figure 5.8 : R_c en fonction du mortier à 28j

b) Effet du sable mixte sur la résistance du béton (R_c):

D'après les résultats groupés aux tableaux 5.17 à 5.23 représentés sur la figure 5-9, on constate que 40% d'ajout de sable concassé permet d'obtenir la résistance optimale pour les bétons **B2, B3, B4 et B5** ; au delà de 50% d'ajout, la résistance des bétons **B2, B3, B4 et B5** affiche une baisse qui atteint 27,84%, 13,88%, 16,7 et 14,46% respectivement à un ajout de 60% de sable concassé, cela est du essentiellement à la présence de fine et à la force de cohésion des grains (géométrie et état de surface des grains). Par contre, le béton maigre **B1** (30% de mortier) affiche une résistance optimale de 48,32 Mpa à 50% d'ajout de sable concassé au-delà de 50% d'ajout on note une baisse de résistance sa résistance; en

augmentant le pourcentage de sable concassé à 70%, le béton **B1** perd plus de 18% de sa résistance.

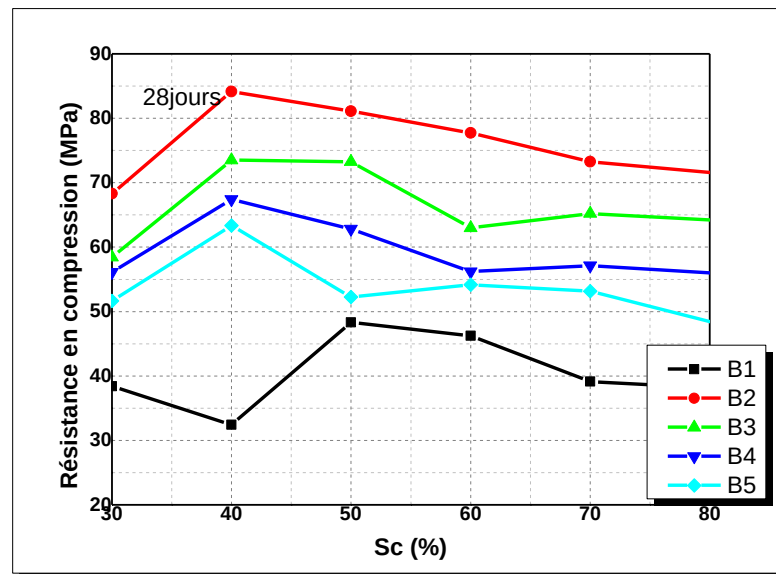


Figure 5.9 :Rc en fonction du sable mixte à 28j

c) Effet de la porosité du sable mixte sur la résistance (Rc) du béton :

La figure 5-10, montre que pour une porosité du sable mixte de 39 %, les bétons **B1, B2, B3, B4 et B5** affichent leurs meilleures performances, on constate que la hausse de la porosité du sable mixte influe significativement sur la baisse de la résistance des bétons (**B1, B2, B3, B4, et B5**) , à titre d'exemple la résistance accuse une baisse de plus de 38% ,du béton B5 à l'âge de 28 jours en passant d'une porosité de 39% à 44% , on remarque que la baisse de la résistance en compression des bétons (**B1, B2, B3, B4 et B5**) est presque identique en regardant les pentes des droites représentant cette baisse pour tous les bétons cela est dû principalement à la géométrie et l'état de surface des grains qui engendrent une cohésion entre les grains et la présence de fines dans le sable mixte.

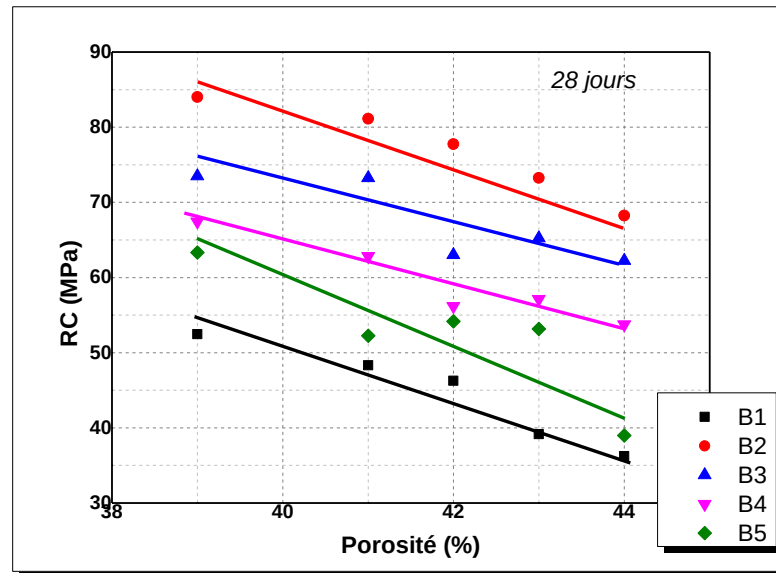


Figure 5.10 :Rc en fonction de la porosité à 28j

d) Evolution de la résistance du béton à la compression (Rc) dans le temps .

Pour l'analyse de l'accroissement de la résistance à la compression dans le temps, on a tracer les courbes représentant la résistance des bétons (B1, B2, B3, B4, B5) pour différents sables mixtes en fonction du temps vu la similitudes des courbes on represnte la variation de rc dans le temps avec des bétons à base du sable mixte S2 les autres figures sont exposée dans l'annexe. Ces figures montrent clairement que l'accroissement de Rc dans le temps a une forme hyperbolique. Cet accroissement est nettement plus rapide dans l'intervalle (0 - 7 jours) que dans l'intervalle (7 - 28 jours). [64]

D'après les courbes donnant la variation de la résistance à la compression dans le temps, on constate que Rc augmente au cours du temps quelque soit le type de sable mixte et la composition du béton utilisé dans cette recherche.

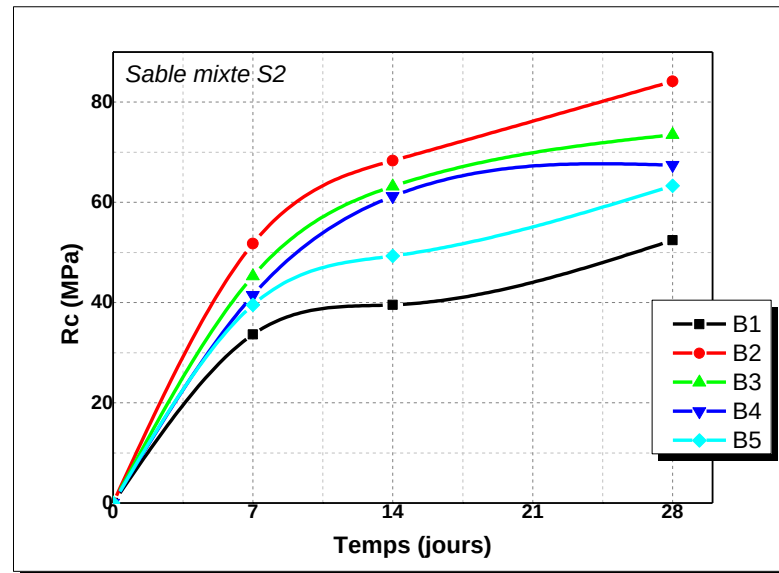


Figure 5.11 : Rc dans le temps avec sable mixte S2,

5-3-3 Masse volumique :

L'analyse des résultats exposés aux tableaux 5-10 jusqu'à 5-16 est effectuée comme suite :

- Effet du mortier (composition) ;
- Effet du sable mixte ;
- Effet de la porosité du sable mixte ;
- Evolution de la masse volumique dans le temps.

a) Effet du mortier (composition) sur la masse volumique :

En examinant avec attention les résultats exposés aux tableaux 5-10 à 5-16 et illustrés à la figure 5.12, on remarque qu'à 30% de mortier entrant dans la composition du béton la masse volumique affiche sa plus faible valeur pour tous les bétons (B1, B2, B3, B4, B5) à différents âges 1j, 7j, 14j, et 28 jours, à 40% de mortier la masse volumique affiche sa valeur optimale pour tous les bétons, au-delà de 40% de mortier la masse volumique affiche une baisse graduelle jusqu'à 70% de mortier. On note que la valeur optimale est obtenue avec la composition de 40% de mortier et 60% de gravier cela s'explique par le remplissage de presque tous les vides (porosité minimale de la matrice cimentaire avec les constituants utilisés).

En conclusion, 40% de mortier dans la matrice du béton conduit au remplissage des vides entre gros grains (gravier) et la masse volumique atteint sa valeur maximale de $2,49 \text{ g/cm}^3$.

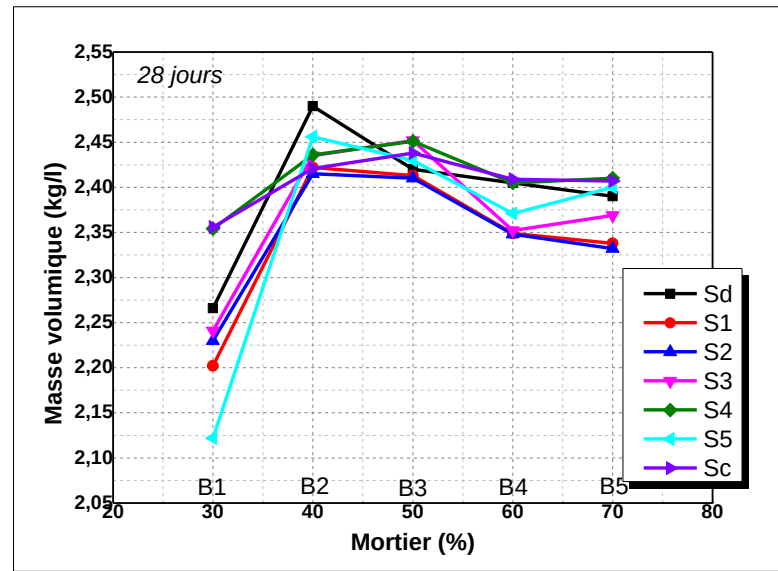


Figure 5.12 : Masse volumique à 28Jours en fonction pourcentage de mortier

b) Effet du sable mixte sur la masse volumique :

D'après les résultats trouvés et exposés aux tableaux 5-10 à 5-16 et représentés sur la figure 5.13, on constate une légère hausse de la masse volumique quand on augmente le pourcentage du sable concassé dans le sable mixte, cette hausse n'est pas très grande, elle est expliquée par l'amélioration de la compacité du sable mixte qui conduit à l'amélioration de la compacité des bétons (B1, B2, B3, B5) et par la suite l'amélioration de leurs masse volumique, on conclut alors que le traitement du sable de dune par sable concassé a contribué à l'amélioration des masses volumiques des bétons étudiés.

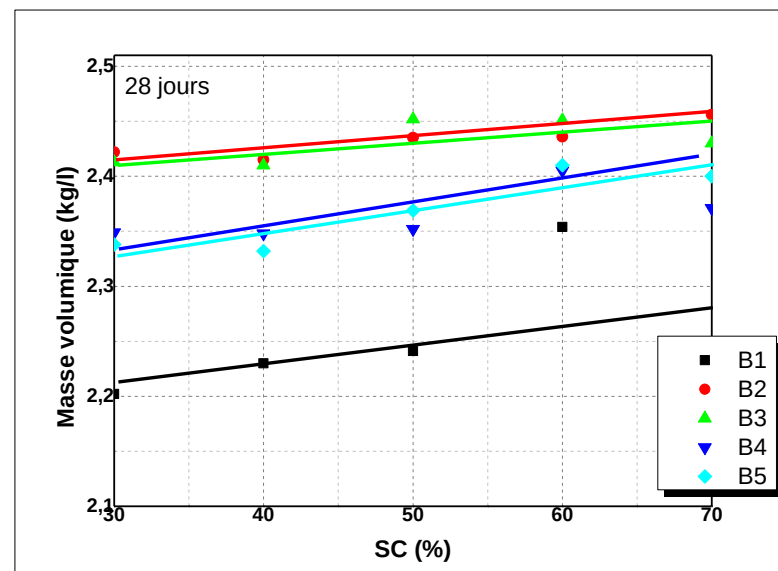


Figure 5.13 : Masse volumique à 28 Jours en fonction du sable mixte

c) Effet de la porosité du sable mixte sur la masse volumique :

En examinant, la figure 5.14, on remarque que l'utilisation du sable mixte de porosité plus grande apporte une amélioration de la masse volumique des bétons (B2, B3, B4, B5), cette amélioration est plus significative pour les bétons (B2 et B3) que pour les bétons (B4 et B5), cela est expliqué par l'arrangement des fines (apporter par le sable concassé) et des grains de ciment dans les pores entre les grains de sable mixte, ce qui conduit à une meilleure compacité du béton.

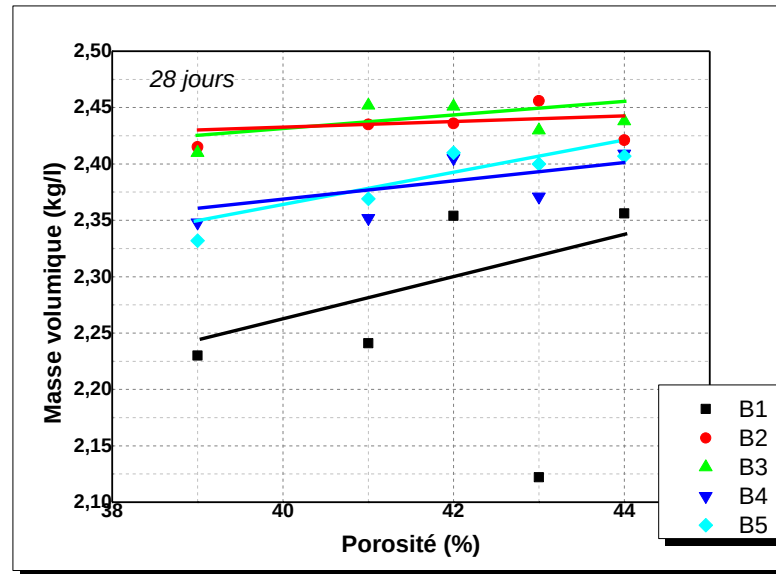


Figure 5.14 : Masse volumique à 28Jours en fonction de la porosité du sable mixte

d) Evolution de la masse volumique dans le temps :

On remarque que la masse volumique augmente légèrement pour tous les bétons étudiés (B1, B2, B3, B4, B5) avec n'importe quel sable mixte utilisé au cours du temps et aussi en augmentant le pourcentage du mortier dans la composition du béton et cela est dû essentiellement à l'hydratation et à l'absorption. Cette augmentation, malgré qu'elle soit faible, elle reste toujours significative.

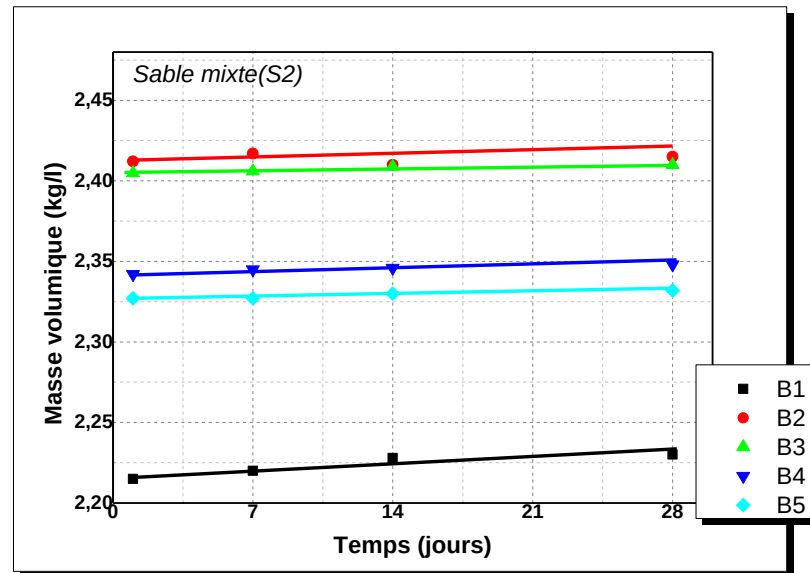


Figure 5.15 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S2

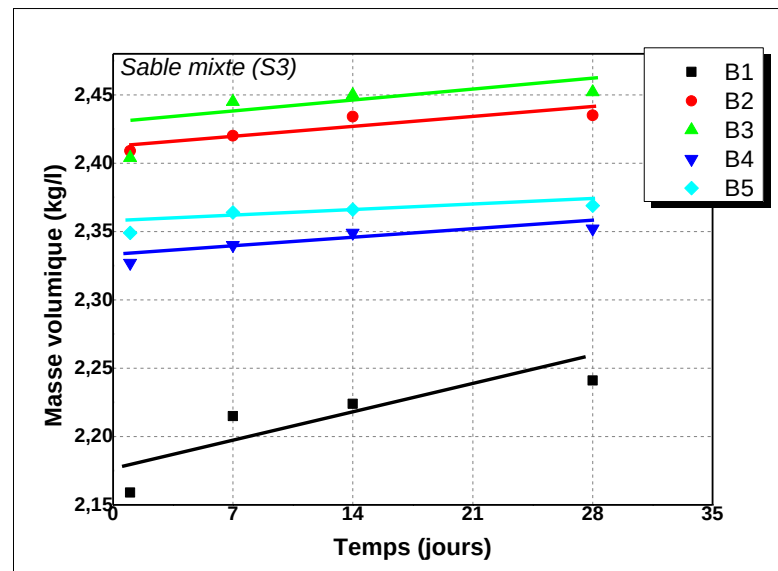


Figure 5.16 : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S3

Coupe par sciage des éprouvettes cylindriques donnant la distribution des constituants du béton

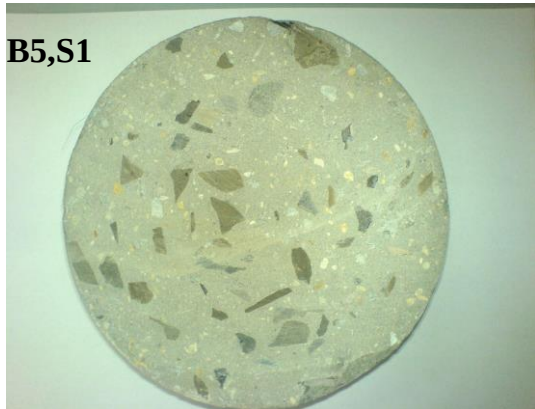


Photo1:(70%mortier,30%gravier)



Poto2:(60% mortier,40%gravier)

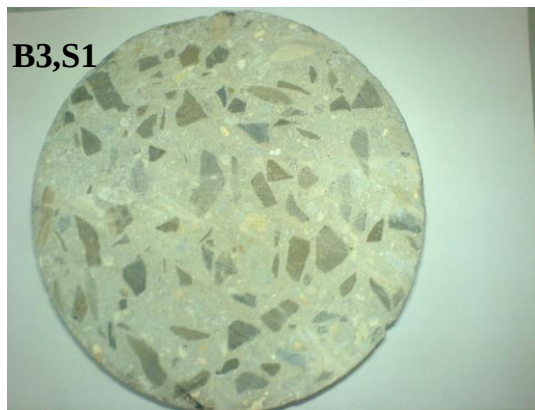
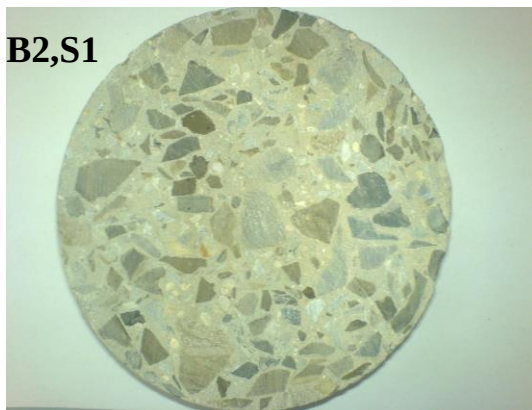


Photo3:(50%mortier,50%gravier)



Poto4:(40% mortier,60%gravier)



Poto5:(30% mortier,70%gravier)

5-4 Conclusion :

L'utilisation du sable concassé (déchets en grandes quantités issus du concassage de pierres) permet de dégager et de diminuer les aires de stockage dans les centrales de concassages, à la lutte contre la pollution de l'environnement et à la valorisation de ces déchets.

L'étude expérimentale du comportement physico-mécanique du béton à base de sable mixte (sable dunaire + sable calcaire de concassage) montre que l'ajout du sable concassé au sable de dune pour la fabrication des bétons est vivement recommandé surtout s'ils sont associés à des adjuvants ; tout cela nous permet d'avancer certaines conclusions:

- ✓ La masse volumique du béton accuse une légère baisse en augmentant le pourcentage de sable concassé.
- ✓ La masse volumique atteint une valeur maximale en utilisant 40% de mortier dans la matrice béton.
- ✓ Une légère baisse de la masse volumique est enregistrée quand la porosité du sable mixte augmente.
- ✓ L'augmentation du pourcentage de sable concassé engendre une augmentation de la quantité d'eau de gâchage.
- ✓ L'augmentation du pourcentage de mortier dans la matrice béton est accompagnée d'une réduction de l'eau de gâchage.
- ✓ L'utilisation du sable de carrière (sable concassé) améliore la résistance en compression du béton.
- ✓ L'utilisation de 50% de sable concassé dans la composition du sable mixte permet d'obtenir une amélioration appréciable de la résistance en compression du béton atteignant une valeur de 70 à 80 Mpa pour les bétons B3 et B4.
- ✓ L'utilisation de 50% à 70% de mortier dans la matrice de béton permet de réaliser des bétons de qualité.
- ✓ L'utilisation d'un adjuvant super plastifiant permet une réduction importante de l'eau de gâchage qui conduit à une baisse de la porosité de la matrice béton, permettant ainsi de réaliser des bétons performants.

CONCLUSIONS GENERALES

ET PERSPECTIVES

De nombreuses études se sont intéressées à la recherche de voies alternatives à l'utilisation des ressources alluvionnaires en voie d'épuisement, notamment les sables alluvionnaires, pour la fabrication des bétons hydrauliques. Parmi les solutions proposées, l'emploi des sables calcaires de concassage est souvent recommandé. Cependant, dans les pays de Maghreb, en Algérie notamment, leur utilisation est jusqu'à présent écartée quasi systématiquement de tout usage dans le bâtiment et les ouvrages d'art, malgré les avantages économiques et environnementaux que cette solution peut présenter. Notons que les spécifications normatives autorisent leur utilisation.

Cette situation résulte essentiellement de l'absence de références scientifiques fiables à l'échelle du pays, et d'un manque d'exemples de réalisation d'ouvrages de références pouvant convaincre les maîtres d'ouvrages et les entreprises.

Dans ce contexte, on a entamer une recherche dans le but de solutionner le problème (qui se posera dans les prochaines années) de la pénurie des sables alluvionnaires pour la réalisation des mortiers et bétons, par l'utilisation des sables calcaires de concassage et d'encourager les entrepreneurs et les maîtres d'ouvrages à utiliser ces ressources, et contribuer à lutter contre la pollution issue de ces déchets de carrières et préserver la nature et encourager d'autres chercheurs à travailler dans cette axe qui aboutira à la réalisation d'un manuel technique dédié à la généralisation de l'emploi des sables calcaires dans les différents domaines de la construction.

Les travaux de cette thèse concourent à ces objectifs. Ils s'intéressent plus particulièrement à la faisabilité de mortiers et bétons ordinaires ou superplastifiés, fabriqués rationnellement à partir de gravillons et une mixture de sable de dune et de sable de concassage calcaires. Sept sables mixtes sont élaborés à partir du sable concassé de la carrière d'El-Uche et du sable de dune de Boussaâda qui ont permis de corriger la granulométrie, améliorer les caractéristiques physiques du sable de dune et du sable de concassage afin de réaliser sept mortiers équivalents au béton avec adjuvant et sans adjuvant qui permettent de prédire de nombreuses propriétés des bétons. La formulation des différents bétons avec différentes compositions avec les différents sables mixtes a été réalisée, afin d'améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques de ce dernier.

Les mélanges ainsi réalisés ont servi à étudier en vraie grandeur, sur des mortiers et sur des bétons, l'influence de la porosité, du taux de sables concassés composant le sable mixte et la composition (taux de mortier composant la matrice cimentaire) sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles des mortiers et des bétons. Ils ont confirmé la parfaite faisabilité des bétons et des mortiers ordinaires et

superplastifiés. Les résultats obtenus montrent que les fines calcaires apportés par le sable concassé sont bénéfiques à l'amélioration des propriétés à l'état frais et durci des mortiers et des bétons. Par exemple, par la substitution de 40% à 50% de sable de dune par sable concassé permet l'amélioration des performances du mortier avec ou sans superplastifiant, les résistances optimales ont atteint 72,5MPa et 60MPa respectivement, au-delà de 50% de substitution on note une légère baisse des résistances. Pour les bétons adjuvantés, une composition de 40% de mortier (avec la substitution de 40% de sable de dune par sable concassé) et 60% de gravier donne la meilleure performance. La résistance en compression optimale R_c atteint une valeur de 84,5MPa. Au-delà de 40% de mortier composant la matrice du béton on note une baisse concomitante de la compacité qui se répercute sur la résistance du béton.

Compte tenu des quantités de sables généralement utilisées dans les bétons et mortiers courants ou superplastifiés, toutes les catégories normatives des sables de concassage peuvent alors être utilisées a priori, sous réserve toutefois de satisfaire aux autres exigences de qualité/propreté/durabilité.

Les sable mixtes ont donnés des résultats satisfaisant, les sables mixte S2, S3 sont les plus intéressantes et permettent d'optimiser les propriétés des mortiers et des bétons. Ce résultat constitue une voie nouvelle et économique pour le développement de ces nouveaux bétons et mortiers, en valorisant des sables concassés (déchets) souvent déclassés afin de se préparer à une future pénurie de sable de dune.

Par ailleurs, les présents travaux ont montré que les propriétés mécaniques des bétons à base de sables mixte avec superplastifiant ne sont pas réellement affectées par la présence d'une quantité de filler. Ce résultat est attribué au rapprochement du comportement mécanique du sable mixte et de la pâte chargée en fillers, qui rend ainsi le composite plus homogène mécaniquement. La liaison pâte-granulat, qui est souvent une zone de faiblesse, est alors améliorée. L'effet néfaste du surcroît d'eau est corrigé par l'incorporation de superplastifiant MEDADLOW 30.

Les présents travaux ont montrer le grand intérêt de l'utilisation des déchets issus de la fabrication des granulats calcaire à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sable mixte et des caractéristiques rhéologiques et mécaniques du mortier et du béton avec ou sans superplastifiant..

Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives. La plus importante concerne sans doute l'élaboration des matériaux concassés. Cette voie s'inscrit pleinement dans le concept développement durable et de protection de l'environnement, car elle constitue une réelle solution alternative à la surexploitation et à l'épuisement de ressources alluvionnaires surexploités.

Enfin, d'autres futurs travaux de recherche menés dans l'esprit de la présente démarche apporteraient des résultats complémentaires à ceux obtenus ici. L'ensemble de ces éléments serviraient alors à encouragé et substituer le sable de dune et préserver l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Çelik T., Marar T., 1996, Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, Cement and Concrete Research, Vol 26, N°7, 1996, 1121-1130.
- [2]: Mahzuz HMA, Ahmed AAM, Yusuf MA, 2011. Use of stone powder in concrete and mortar as an alternative of sand, African Journal of Environmental Science and Technology, 5, 381-8.
- [3]: Kim JK, 1997. The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete, Journal of Cement and Concrete Research, () 1719-29.
- [4]: Bederina M, Makhloufi Z, Bounoua A, Bouziani T, Queneudec M, 2013. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, Construction and Building Materials, 47 146-58.
- [5]: Menadi B, Kenai S, Khatib J, Aït-Mokhtar A, 2009. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, Construction and Building Materials, 625-633.
- [6]: Rajput SPS, Chauhan MS, 2014. Suitability of Crushed Stone Dust as Fine Aggregate in Mortars, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 87-94.
- [7]: Haque M, Ray S, Mahzuz HMA, 2012. Use of Stone Powder with Sand in Concrete and Mortar: A Waste Utilization Approach, ARPN Journal of Science and Technology, 613-618.
- [8]: Narasimha C, Atil BT, Sanni SH, 1999. Performance of concrete with quarry dust as fine aggregate - An experimental study, Civil Engineering and Construction Review, 12, 19-24.
- [9]: Dordi CM, Tendulkar MT, 1996. Aggregate for mortar and concrete, The Indian Concrete Journal, 269-76.
- [10]: Safiuddin M, Raman SN, Zain MFN, 2007. Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures, Journal of Applied Sciences Research, 3, 202-8.
- [11]: Praveen KK, Krishna R, 2015. Strength and workability of cement mortar with manufactured sand, International Journal of Research in Engineering and Technology, 186-9.
- [12]: Vijayaraghavan N, Wayal AS, 2013. Effect of manufactured sand on durability properties of concrete, American journal of engineering Research, 2, 437-440.
- [13]: Cabrera OA, Traversa LP, Ortega NF, 2011. Effect of crushed sand on mortar and concrete rheology, Materiales de Construcción, 61, 401-416.

- [14]: **Cortes DD, Kim HK, Palomino AM, Santamarina JC, 2008.** Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands, *Cement and Concrete Research*, 38, 1142-7.
- [15] : **F. Gorisse.** Essai et contrôle des bétons, Paris, 1985.
- [16] : **Georges Dreux.** Nouveau guide du béton , Eyrolles , Paris 1979
- [17]: **Abo-El-Enein SA, El-Sayed HA, Ali AH, Mohammed YT, Khater HM, Ouda AS., 2014.** Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume, *HBRC Journal*, 10, 43-8.
- [18]: **Omar OM, Abdelhameed GD, Sherif MA, Mohamadien HA, 2012.** Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties, *HBRC Journal*, 8, 193-203.
- [19]: **Jadhav PA, Kulkarni DK, 2013.** Effect of replacement of natural sand by manufactured sand on the properties of cement mortar, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3, 621-8.
- [20] : **A. Kômar.** Matériaux et éléments de construction, Moscow, 1978.
- [21] : **V.S. Kolokolnikov.** Technologie des éléments en béton et béton armé, Moscow, 1970.
- [22] : **V. Savary.** Technologie de maçonnerie, paris, 1976.
- [23] : **R. La croix, A. Fuents, H. Thosier.** Traité du béton armé, Eyrolles , Paris 1982.
- [24] : **C.E. Wuerpel,1944.** Aggregates for concrete (Washington, national Sand and Gravel Assoc.,).
- [25] : **ASTM standard,** C 33-78.
- [26] : **Techniques de l'ingénieur.** Traité de construction, C 902-1.
- [27] : **M. Xigherovich.** Matériaux de construction, Moscow, 1970.
- [28] : **B. Xkramtaev.** Détermination de la composition des bétons de différentes sortes, Moscow, 1970.
- [29] : **J. Berar, R. Roux.** Le rôle de granulats, revue canadienne du genie-civil, Vol 13, N°01, Quebec, 1986.
- [30] : **W.C. Hanna.** Additionnal information on inhibiting alkali-aggregate expansion. *J. Amer. concrete inst.*, 48 , 1952.
- [31] : **M. Venuat.** La pratique des ciments et des bétons, Eyrolles, Paris, 1976.
- [32] : **Bernard Debuissou.** Encyclopédie pratique de la construction, Tome II, Paris, 1968.
- [33] : **Vu Han.** Matériaux de construction, Chine, 1963.

- [34] : **Kedjour Nasr-Eddine**. Propriétés et pathologie du béton O.P.U , Alger, 1993.
- [35] : **N.T. Tuyen**. Matériaux de construction, Hanoï, 1965.
- [36] : **G. Gortchakov,1976**. Composition, structure et propriétés des bétons à ciment, Moscow,
- [38] : **Granitex**. Fiche technique des adjuvants, Alger.
- [40] : **D.L. Bloem**. Preliminary tests of sugar on strenght of mortar, Nat. Ready-mixed concr. Assoc.Public. (Washington D.C, August 1959).
- [41] : **M.E. Prior and A.B. Adams**. ntroduction to producer's papers on water reducing admixtures and set-retarding admixtures for concrete, ASTM, sp. tech.Public N°266, 1960.
- [42] : **C.A. Vollick**. Effect of water reducing admixtures and setoretarding admixtures on the properties of concrete .
- [43] : **D.W. Quinion**. Superplasticizers in concrete - a review of international experience of long-term reliability, CIRIA report 62, London , 1976.
- [44] : **Concrete society**. Admixtures for concrete, technical report, London, 1967.
- [45] : **ACI committie 212**. Guide for use of admixtures in concrete, J.Amer. concr. inst, 68, N° 9, 1971.
- [46] : **V.M. Malhatra**. Superplasticizers in concrete, CANMET report MRP/MSL 77-213, Ottawa, Canada, 1977.
- [47] : **M.V. Ranga Rao**. Investigation of admixtures for high errly strength in concrete, Indian concrete, J. 50 , N°9, 1976.
- [48] : **V.M. Malhatra, 1979**. Mechanical properties and durability of superplasticized semi-light weight concrete, CANMET mineral sciences laboratory Report MPR/MSL 79-131, Ottawa, Canada,.
- [49] : **M. Xigherovich**. Adjuvants pour les bétons et mortiers, Moscow, 1971.
- [50] : **Presse de l'école national des ponts et chaussées LCPC** : «béton de sable ; caractéristiques et pratique» P237, 1994.
- [51] : **CHAUVIN.J.J.;** «Les sables, guide pratique d'utilisation routière» ; Laboratoire régional de Bordeaux, centre d'étude technique de l'équipement du sud-ouest P(7-14), 1970.
- [52] : **R.S. Warshney**. Concrete technology, New Delhi, 1980.
- [53] : **de Larrard F., 2000**, Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.

- [54] : **V.P. Sizov**. Le projet de la composition du béton, Moscow, 1968.
- [55] : **L.I. Dvopkin,1981..** Optimisation de la détermination de la composition du béton, Moscow,
- [56] : **Iy.M. Bajenov, 1975.** Le principe de la détermination de la composition du béton de différentes sortes, Moscow.
- [57] : **A.V. Satalkin,1962..** Détermination de la composition du béton d'après la résistance à la flexion, Moscow,
- [58] : **N.T.Tuyen,1983.** Essais des matériaux de construction (Manuel didactique) Tome I, Hanoi,.
- [59] : **N.T. Tuyen,1994.** Cours des matériaux de construction C.U Med Boudiaf M'Sila,.
- [60] : **H. Renaud,1978.** Technologie du bâtiment gros oeuvre travaux de maçonnerie et finition, Foucher, Paris.
- [61] : **NF EN 206-1 (avril 2004)** : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité + Amendement A1 (avril 2005) + Amendement A2 (octobre 2005) (Indice de classement : P18-325-1).
- [62] : **M. Khigerovich.** Matériaux de construction, Moscow, 1970.
- [63] : **Taylor H.F.W.** « Cement chemistry ». Academic press, 1997, 475 p;
- [64] : **Baron J., Olivier J.P. et Weiss J.C.** « Les ciments courants ». In : Les bétons. Bases et données pour leur formulation. Editions Eyrolles, 1997;
- [65] : **Bertrand R., Coquillat G., 1992,** Les calcaires dans les bétons hydrauliques, CEBTP, pp. 6-13.
- [66] : **Buil M., Paillere A., 1984,** Utilisation des fillers fins dans les bétons, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur, N°30, Paris, pp 193-196.
- [67] : **Cimilli T., 1984,** Influence de la teneur en éléments fins sur les propriétés des bétons, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur, N°30, Paris, pp 199-201.
- [68]:**Bachiorrini A., Murat M., 1987,** Evolution microstructurale des composites du système ciment alumineux-granulat calcaire. II. Influence sur la porosité et les résistances mécaniques, Cement and Concrete Research, Vol 17, pp.397-403.
- [69]:**Detwiler R.J., Tennis P., 1996),** The use of Limestone in Portland Cement : A state of the Art Review, Portland Cement Association, RP 118, 39 p., Skokie, IL.
- [70]:**Çelik T., Marar T., 1996,** Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, Cement and Concrete Research, Vol 26, N°7, 1996, 1121-1130.

- [71] :**Sadhouari F., Goufi N., Guezzouli A., 2009**, Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons, 1st International Conference SBEIDCO, ENSET Oran, 247-254.
- [72]: **Guemmadi Z., Resheidat M., Houari H., Toumi B., 2008**, A better use of limestone filler in concrete, International Conference on Construction and Building Technology, ICCBT, 307-318.
- [73]: **N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis, S. Tsivilis, 2005**, Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cement,. Cement and Concrete.Composites, 27, pp.191–196.
- [74] : **Courard L., Michel F., Martin M., 2008**, Valorisation des fillers calcaires dans la construction et le génie civil, Reflexions, le site de vulgarisation de l'Université de Liège.
- [75]: **Dale P. Bentz, Edgardo F. Irassar, Brooks Bucher, W. Jason Weiss, 2009**, Limestone Fillers to Conserve Cement in Low w/cm Concretes: An Analysis Based on Powers' Model, Concrete International, 31 (11) and (12), 41-46 and 35-39.
- [76]: **Bentz, D.P., and Peltz, M.A., 2008**, Reducing Thermal and Autogenous Shrinkage Contributions to Early-Age Cracking, ACI Materials Journal, 105 (4), 414-420.
- [77]: **Bucher, B., 2009**, Shrinkage and Cracking and its Relation to Cement Composition, MSCE Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
- [78]: **Bosiljkov V.B., 2003**, SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, Cement and Concrete Research, 33, 1279–1286.
- [79]: **Felekoglu B., 2006**, A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 1-9.
- [80]: **Felekoglu B., 2007**, Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources, Conservation and Recycling, 1-22.
- [81]: **Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus, Yoon-moon Chun, Fethullah Canpolat, Bruce W. Ramme, 2005**, Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete, Three-Day International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, October 5-7, Toronto, CANADA.
- [82]: **El Hilali A., 2009**, Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants BAP : influence des fines calcaires et des fibres végétales, thèse de l'Université Cergy-Pontoise, 200p.
- [83]: **Donza H., Cabrera O., Irassar E.F., 2002**, High-strength concrete with different fine aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 755-761.
- [84]: **Added M., Bedday A., 2003**, Propriétés géotechniques des sables calcaires de concassage en Tunisie, Annales de l'Equipement, volume XIII-N°2, pp 7-31.
- [85]: **Bedday A., 2000**, Etude du sable calcaire de concassage et son utilisation dans le béton hydraulique, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 205p.

- [86]: **Added M., 2005**, Impact de la qualité des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 175 p.
- [87]: **Akrout K., Mounaga P., Ltifi M., Ben Jemaa N., 2010**, Rheological mechanical and structural performances of crushed limestone sand concrete, International Journal of Concrete structures and materials, Vol.4, N°2, 97-104.
- [88]: **Achour T., 2007**, Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens, thèse ENIT Tunis / UHP Nancy, 208 p.
- [89]: **Achour T., Lecomte A., Ben Ouezdou M., Mensi R., Joudi I., 2008**, Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat. Exemples tunisiens, Materials and structures, 41, 815-830.
- [90]: **Rmili A., 2010**, Étude de formulation et de comportement des bétons autoplacants : Incorporation du sable de concassage et du sable de désert, Thèse ENIT, 226 p.
- [91] : **Folliot A.,1982**, « Le ciment ». In : Le béton hydraulique. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées.
- [92] : **Houst Y.F.,1992**, « Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie ». Thèse de Doctorat, Université de Lausanne
- [93]: **Teoreanu I., Filot G., Hritcu C.,1979**, « Interaction Mechanism of $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ and $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ with water at various »;
- [94]: **Colleparidi M., Monosi S., Moricani A and Corradi M, 1979**. « Tetracalcium aluminoferrite hydration in the presence of lime and gypsum ». cem, concr, Res; 9, 431-437;
- [95]: **Baroghel V-B. , 1994**, « Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées;
- [96]: **Ollivier J-P., Vichot A., (sous la direction de), Décembre 2008** « La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement »;
- [97]: **Damidot D., Glasser F.P.** « Investigation of the $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system at 25 °C by thermodynamic calculations ». Cement and Concrete Research, vol. 25 n° 1, 1995, p. 22-28;
- [98]: **Gauffinet S., Finot E., Lesniewska E., Nonat A.** « Observation directe de la croissance d'hydrosilicate de calcium sur des surfaces d'alite et de silice microscopie à force atomique ». C.R. de l'Académie des Sciences, vol. 327, n° 4, 1998, p. 231-236;
- [99] : **Plassais A.** 2003, « Nanoporosité, Texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments » Thèse de doctorat en physique et chimie des matériaux de l'Université de Paris 6.

- [100]: **Diamond S. 1986**, «The microstructure of cement paste in concrete» In: Proceedings of the 8th International Congress on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, 1986, sous-thème 2.2: Microstructure of hardened cement paste and its effect on behaviour. Finep, Rio de Janeiro, vol.1, pp122-147;
- [101]: **Kantro D.L., Brunauer S., 1961**, Weise C.H. « Development of surface in the hydration of calcium silicates”. Advances in chemistry series, p. 199-219;
- [102]: **Greenberg J.A., Chang T.N., Anderson E. 1960**, « Investigation of colloidal hydrated calcium silicates”, I) Solubility products. Journal of American, Chemical Society, vol. 61, p. 1151-1157;
- [103] : **Regourd M., Hornain H.** « Applications de la microscopie électronique à balayage ». Revue des matériaux de construction, n° 693, 1975, p. 73-87;
- [104]: **Damidot D., Glasser F.P. 1995**, «Investigation of the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system at 25 °C by thermodynamic calculations ». Cement and Concrete Research, vol. 25 n° 1, p. 22-28;
- [105] : **Brunetaud X. 2005**, « Etude de l’influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l’amplitude de la réaction sulfatique interne au béton ». Thèse de doctorat en Physique-chimie des Matériaux, Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris.
- [106]: **Dodson V.H,1990**, “Concrete admixtures cart”. Van Nostrand Reinhold, New York,;
- [107]: **Robert J., Nicos S. and Lennart Bergström ,Juin-Juillet 2004**. “La Rhéologie des Matériaux Cimentaires (The Rheology of Cementitious Materials ». In : Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, N° 867, pp. 48-55.
- [108]: **Mielenz R. (1984)** « History of chemical admixtures for concrete” Conc. Int, vol.6 n°4 pp: 40-53;
- [109]: **Comparet C. Octobre 2004**, «Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d’un ciment Portland et des superplastifiants du béton». Thèse de Doctorat en Chimie – Physique, Université de Bourgogne - UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot.
- [110]: **Dakhmouche F-Z ,Juin 2000**. « Etude de l’effet des superplastifiants sur les propriétés des bétons frais et durcis et leur interaction avec les ciments algériens ». Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine.
- [111]: **Meyer A. May 1978**,«Experiences in the use of superplasticizers in Germany. Superplasticizers in concrete ». Proceedings of an International Symposium, Ottawa, Canada, 29-31,;
- [112]: **Cours GCI 712 chapitre 8, 2008** ,« Les adjuvants » Université Sherbrooke,;
- [113]: **Journée d’Information (Ciments- Bétons – Adjuvants), Alger, 2004** «Les adjuvants, définitions et opportunités d’utilisation», ERCE – CTC- Est - Granitex,;

- [114]: **Venuat M. 1984**, « Adjuvants et traitements techniques modernes d'amélioration des ouvrages en béton, ed. ED. l'auteur, Chatillon-sous-bagneux.306.
- [115]: **Young J.F. 1984**,« A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement paste containing organic admixtures», Cement and Concrete Research, 14, 439.
- [116]: **Popova A. 2000**, « Etude des interactions entre les hydrosilicates de calcium et les adjuvants superplastifiants ». Thèse de doctorat en chimie, Ecole Polytechnique.
- [117]: **Kim B.J et al. 2000**,« The absorption behaviour of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste .Cement and Concrete Research,. 30p. 887-893.
- [118]: **Hanechera S. and al. 1999**, “Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture and paste rheology”. Cement and Concrete Research,; p.1159-1165;
- [119]: **Ramachandran V.S et Feldman R.F, 1972**,“Effet du lignosulfonate de calcium sur l'aluminate tricalcique et ces produits d'hydratation. Matériaux et Construction,5 (26):p.67-76
- [120]: **Rossington E. (1968)**. « Adsorption of admixtures on Portland cement hydration products”. JACS, vol.51, n°1, pp:46-50;
- [121]: **Ushikawa S. et al. (1997)** “The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture”. Cement and Concrete Research, vol.27, n°1, pp: 37-50, Japan;
- [122]: **Darwin D., Gartner W., Russel W. (1994)**. «The mechanisms of superplasticizer action: theory and experiment”, 68th American society colloid and surface science symposium, Standford University, PaloAlto;
- [123] : **Prospectus sur le Glenium. , 2000**; « Les performances d'un pionner du béton ». Master Builders Technologies
- [124] : **Vichot A. (1990)**. “Les polyméthylènenaphtyl-sulfonates: modificateurs de la rhéologie”. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI;
- [125] : **Piotte M. (1993)**. “Caractérisation du poly(naphtalènesulfonate) – Influence de son contre-ion et de sa masse molaire sur son interaction avec le ciment”. Thèse de doctorat (Ph.D) de l'Université de Sherbrooke;
- [126] : **Collepardi M., Corradi M., Valente M. (1981)**. “Influence of Polymerization of Sulfonated Naphtalene Condensate and its Interaction with Cement”. Proceedings of the Second International Conference on Development in the Use of Superplasticizers, Malhotra V.M. ed., ACI SP 68-27, pp: 485-498;
- [127] : **Basile F., Biagini S., Ferrari G., Collepardi M., (1986)**. “Effect of Condensation Degree of Polymers Based on Naphtalene on Fluidities of Cement Pastes”. Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, vol. VI, pp: 260-263;

- [128] : **F., Biagini S., Ferrari G., Collepari M., (1986).** "Properties of Cement Mixes Containing Naphtalene Sulfonated Polymers of Different Molecular Weight". Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, vol. VI, pp: 264-268;
- [129]: **Simard M.A., Nkinamubanzi P.C., Jolicoeur C., Perraton D., Aitcin P.C., (1993).** "Calorimetry, Rheology and Compressive Strength of Superplasticized cement pastes". Cement and Concrete Research, vol. 23, pp: 939-950;
- [130] : **Fernon V. 29 Septembre 1994;** « Caractérisation de produits d'interaction adjuvants/hydrates du ciment », 3^{ème} Journée Technique Adjuvants, Technodes SA, Guerville,
- [131]: **Anderson P.J., Roy D.M., Gaidis M. 1988,**« The effect of superplasticizers molecular weight on its adsorption and dispersion of cement » Cement and Concrete Research 18, 980.
- [132]: **Ferrari G., Basile A., Bo Dal A., Mantonio A. 1986,**« The influence of the molecular weight of beta-naphthalenesulfonate based polymers on the rheological properties of cement mixes », Il cemento, 83, 445,;
- [133] : **Paillère A.M., Serrano J.J., Grimaldi G. (1990).** « Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumées de silice ». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées, 170, nov-déc., pp : 37-45;
- [134]: **Massaza F., Costa U. 1980,**« Effect of Superplasticizers on the C3A Hydration » Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. IV, pp: 529-534;
- [135]: **Ramachandran V.S. (1987).** « Use of Superplasticizers in Concrete », Il Cemento, vol. 84, pp : 608-611;
- [136] : **Paillère A.M., Alegre M., Ranc R., Buil M. (1985).** « Interaction entre les réducteurs d'eau-plastifiants et les ciments ». Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 136, Mars-Avril, pp: 105-108;
- [137] : **Vernet C., Noworyta G. (1992).** « Interaction des adjuvants avec l'hydratation du C3A : point de vue chimique et rhéologique », Journée technique : les couples ciment/adjuvant, Technodes S.A., Guerville;
- [138] : **Fontaine C. (1994).** « Le couple ciment/adjuvant : comment résoudre certaines incompatibilités », 3^{ème} Journée technique Adjuvants, Technodes SA, Guerville, 29 sept;
- [139]: **Collepari M., Corradi M., Baldini G., Pauri M. 1980,**« Influence of Sulfonated Naphtalene on the Fluidity of Cement Pastes » Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. III, , pp : 20-25;
- [140] : **Paillère A.M., Briquet Ph. 1980 ,**« Influence des résines de synthèse fluidifiantes sur la rhéologie de la déformation des pâtes de ciment avant et en cours de prise ». Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol. III, , pp : 186-191;

- [141]: **Chiocchio G., Paolini A.E. 1985**,« Optimum Time of Adding Superplasticizers to Portland Cement Pastes», Cement and Concrete Research, vol. 15, , pp: 901-908;
- [142] : **Dupain R., Lanchon R.,Saint-Arroman J.C. 2000** ;Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.
- [143] :**Cimbeton (2006)**; Les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre, Paris.
- [144] :**Ouchi M. (1999)** ; State-of-the-art report on self-compactability evaluation, Concrete Engineering Series, N° 30, Japan, pp. 111-120.
- [145] :**Chanvillard G., d'Aloila L. (1994)** ; Prévion de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., 1994, 193, 39-51.
- [146] :**Nguyen T.L.H. (2007)** ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de Doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 139 p.
- [147] :**Tattersall G.H., Banfill P.G.F. (1983)** ; The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, London.
- [148] :**AFNOR. (2002)** ; Béton et constituants du béton. Tome 1 : Spécifications du béton et de ces constituants, 5^e édition, Paris, 431 p.
- [149] :**EL Barrak M., Mourret M., Bascoul A. (2008)** ; Selft-compacting concrete paste constituents : Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste, Cement & Concrete Composites.
- [150] : **[Aitcin P.C. (2001)]**; Bétons haute performance, Editions Eyrolles, France, 683 p.
- [151] :**Lapointe R. (mai 1997)** ; Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada,.
- [152] :**AFNOR. (2002)** ; Béton et constituants du béton. Tome 2 : Méthodes d'essai du béton, 5e édition, Paris, 510 p.
- [153] :**Dreux G., FESTA J. (1998)** ; Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles ; Paris, 409 p.
- [154] :**De Larrard F. (2000)**; Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.
- [155] :**Hu C. (1995)** ; Rhéologie des bétons fluides, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA16, Paris.
- [156] :**Neville A.M. (2000)** ; Propriétés des bétons, ed. CRIB., Paris, Eyrolles, 806 p.

- [157] : **Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P. (2000)** ; The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, *Cement and Concrete Research* 30, pp. 1543-1549.
- [158] : **Ngoc-Dong L. (2007)** ; Amélioration de la régularité du béton en production, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 248 p.
- [159] : **Cazacliu B., Guieysse B., Garcin O., Buisson F., Baudru Y., Chanut S., Lallemand- Gamboa I. (2007)** ; Laboratory evaluation of 9 mixers, rapport LCPC pour le projet européen Innocrete, 71 p.
- [160] : **Vandanjon J.O., De Larrard F., Dehousse B., Villaine G., Maillotr., Laplante P. (2000)** ; Homogénéisation des bétons en centrale de fabrication discontinue. Influence du temps de malaxage et du mode d'introduction des additions minérales, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol. 228.
- [161] : **Chopin D. (2003)** ; Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants. Optimisation du temps de fabrication, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 41
- [162] : **Baron J., Ollivier J.P. (1996)**; Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p.
- [163]: **Zivkovic S.D. (1992)** ; The effect of increased temperature on fresh and hardened concrete, in : *Concrete in hot climates*, Proceedings of the third international RILEM conference, Torquay, 21-25 september 1992, E. & F.N. Spon, Ed., London, 1992, 3-12.
- [164] : **Makhloufi Z., Bouhicha M. (2008)** ; Formulation du béton calcaire du turonien de Laghouat, Algérie Equipement, N° 44, mai, pp. 14-21.
- [165] : **Regourd M. (1982)** ; L'hydratation du ciment Portland, (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [166] : **Folliot A., Buil M. (1982)** ; La structuration progressive de la pierre de ciment, (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [167] : **Maso J.C. (1982)** ; La liaison pâte – granulats, (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [168] : **Rossi P., WU X. (1994)** ; Comportement en compression du béton : mécanismes physiques et modélisation, *Bulletin Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées*, 189 Janvier-Février, pp. 89-94.
- [169] : **Kakizaki M., Edahiro H., Tochigi T., Niki T. (1992)** ; Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete, *Katri Report N° 90*, 19 pp. (Kajima Corporation, Tokyo, 1992) (and also in ACI SP-132 (Detroit, Michigan, 1992).
- [170]: **Nielsen L.F. (1993)** ; Strength development in hardened cement paste : examination of some empirical equations, *Materials and Structures*, 26, N° 159, pp. 255-60.

- [171] :**Ollivier J.P., Buil M. (1992)** ; Conception des bétons : la structure poreuse, “La durabilité des bétons”, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Eds., Paris.
- [172] :**U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1975)** ; Concrete Manual, 8th EDN (Denver, Colorado).
- [173] :**Gonnerman H.F., Lerch W. (1951)** ; Changes in characteristics of portland cementas exhibited by laboratory tests over the period 1904 to 1950, ASTM Sp. Publ. N° 127.
- [174] :**Delmas L., Baillot T. (2006)** ; Influence de la mise en oeuvre sur la porosité des bétons, Projet de Recherches Technologiques, Institut National des Sciences Appliquées, Projet de Recherches Technologiques, 62 p.
- [175] :**Plassais A. (2003)** ; Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Mariez curie Paris 6, Physique et chimie des matériaux, janvier, 167 p.
- [176] :**Sahu S. et col. (2004)** ; Determination of water–cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy, Cement and Concrete Composites, 2004. 26(8): pp.987-992
- [177] :**Pigeon D. (1999)** ; Durabilité et réparation du béton, Cours de l’Université de Sherbrook, Canada.
- [178] :**Powers T.C. (1949)** ; The air-requirement of frost-resistant concrete. Proceedings of the Highway Research Board, 1949. 29: pp. 184-211.
- [179] :**Dutron P. (1985)** ; Introduction, in Le béton et l’eau, Saint-Rémy-lès-Chevreuse (France): Conseil International de la langue française. p. 1-211.
- [180] :**Bouasker M. et col. (2006)** ; Retrait chimique des mortiers au très jeune âge : influence des inclusions granulaires, in XXIVèmeRencontres Universitaires du Génie Civil, La Grande Motte, France, pp. 1-8.
- [181] :**Rosler M., Odler I. (1985)** ; Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes. I. Effect of porosity, Cement and Concrete Research, 15, N° 2, pp. 320-30.
- [182]:**Sersale R., Cioffi R., Frigione G., Zenone F. (1991)** ; Relationship between gypsum content, porosity, and strength of cement, Cement and Concrete Research, 21, N° 1, pp.120-6.
- [183] :**Popovics S. (1990)**; Analysis of concrete strength versus water-cement ratio relationship, ACI Materials Journal, 57, N° 5, pp. 517-29.
- [184] :**Stock A.F., Hannant D.J., Williams R.I.T. (1979)**; The effect of aggregateconcentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete, Mag. Concr. Res.,31, N° 109, pp. 225-34.
- [185] :**Kawakami H. (1972)**; Effect of gravel size on strength of concrete with particular reference to sand content, Proc. Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, vol. IV, Concrete and Cement Past Glass and Ceramics, pp. 96-103 (Society of Materials Science, Kyoto, Japan).

[186] :De Larrard F., Belloc A. (1999) ; L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N°219, Janvier Février, pp.41-52.

[187] :Alexander K.M. et col. (1961), Discussion of Walker S. and Bloem D.L. (1960), "Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete", ACI Journal, Vol. 32, N° 9, pp.1201-1258.

[188] :Cordon W.A., Gillepsie H.A. (1963), Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste Which Influence the Strength of Concrete, Journal of the American Concrete Institute, Août.

[189] : MEYER A. (1963); Über den Einfluss des Wasserzementwertes auf die Frühfestigkeit von Beton, Betonstein Zeitung, N° 8, pp. 391-4.

[190]: WOOD S.L. (1991); Evaluation of the long-term properties of concrete, ACI Materials Journal, 88, N°. 6, pp. 630-43.

[191]: WASHA G.W., WENDT K.F. (1975); Fifty year properties of concrete, J. Amer. Concr. Inst., 72, N° 1, pp. 20-8.

[192]: WALZ K. (1976); Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren, Beton, 26, N° 3, pp. 95-8.

[193]: KLIEGER P. (1958) ; Effect of mixing and curing temperature on concrete strength, J. Amer. Concr. Inst., 29, 12, 1063-1081.

Annexe - A

Tableau annexe :1A : Analyse granulométrique du sable

Sable	tamis	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.125	0.08	Fond
S _d	R.P (g)	0	54	78.75	60.75	609	664.5	20.25	5.25
	R.C %	0	3.6	8.85	12.9	53.5	97.8	99.15	99.5
	Tamisat %	100	96.4	91.15	87.10	46.50	2.2	0.85	0.10
S ₁	R.P (g)	0	240	320	69	472	263.7	9.33	39
	R.C %	0	16	37.33	41.93	73.40	90.98	97.20	99.80
	Tamisat %	100	84	62.67	58.07	26.60	9.02	2.80	0.2
S ₂	R.P (g)	0	220	386	106	370	193	48	174
	R.C %	0	14.67	40.40	47.47	72.13	85	88.20	99.80
	Tamisat %	100	85.33	59.60	52.53	27.87	15	11.8	0.2
S ₃	R.P (g)	3	216	450	109	317	270	65	68
	R.C %	0.2	14.6	44.6	51.87	73	91	95.33	99.87
	Tamisat %	99.8	85.4	55.4	48.13	27	9	4.67	0.13
S ₄	R.P (g)	6	223	491	157	256	24.3	247	92
	R.C %	0.4	17.93	48	58.47	75.53	90.98	93.67	99.8
	Tamisa %	99.6	82.07	52	41.53	24.47	9.02	6.33	0.2
S ₅	R.P (g)	0	237	573	175	225	85.25	14.75	189
	R.C %	0	15.8	54	65.67	80.67	86.35	87.33	99.93
	Tamisat %	100	84.2	46	34.33	19.33	13.65	12.67	0.07
S _c	R.P (g)	0	165.75	669.75	239.25	178.5	153.75	40.5	50.25
	R.C %	0	11.05	55.7	71.65	83.55	93.8	96.5	99.85
	Tamisat %	100	88.95	44.3	28.35	16.45	6.2	3.5	0.15

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

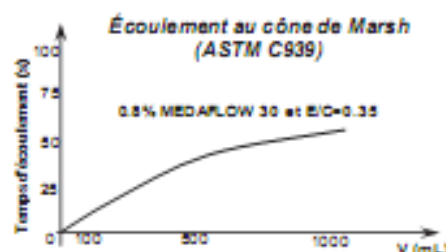
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	R _c (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 8 - 8,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.48 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation enant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposés aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation énant compte des conditions réelles de chantier.

**Granitex**

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



59

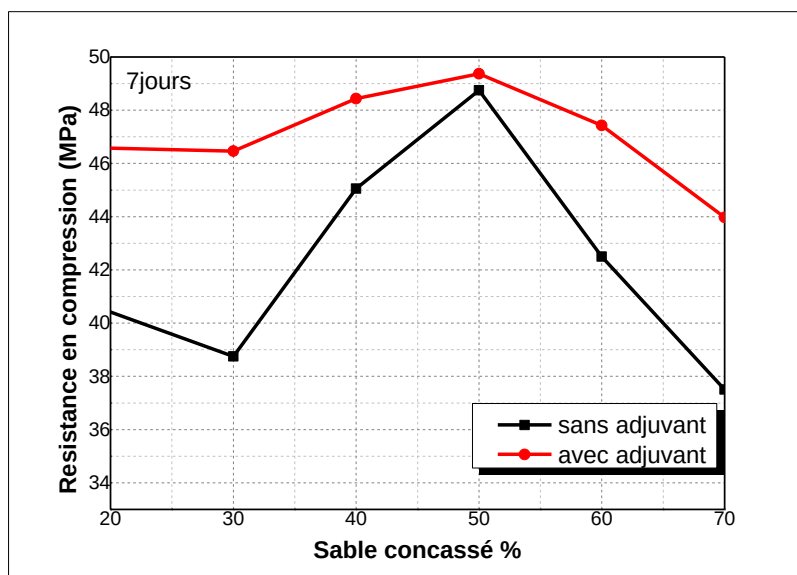
Annexe – B -

Figure 1B : Resistance en compression en fonction du sable concassé à 7 jours

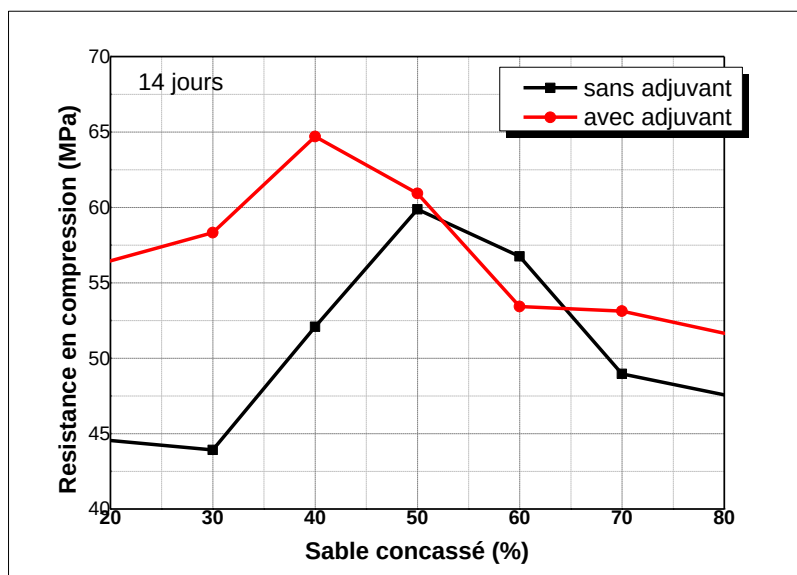


Figure 2 B : Resistance en compression en fonction du sable concassé à 14 jours

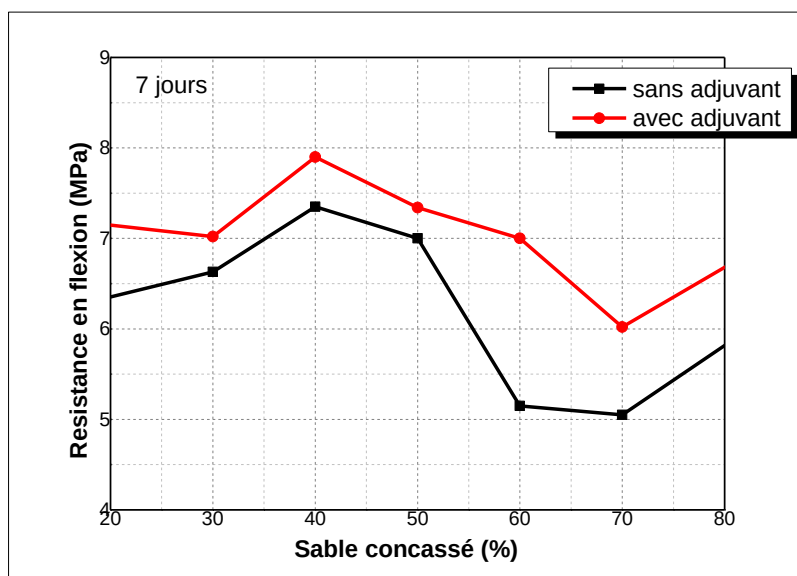


Figure 3 B : Resistance à la flexion en fonction du sable concassé à 7 jours

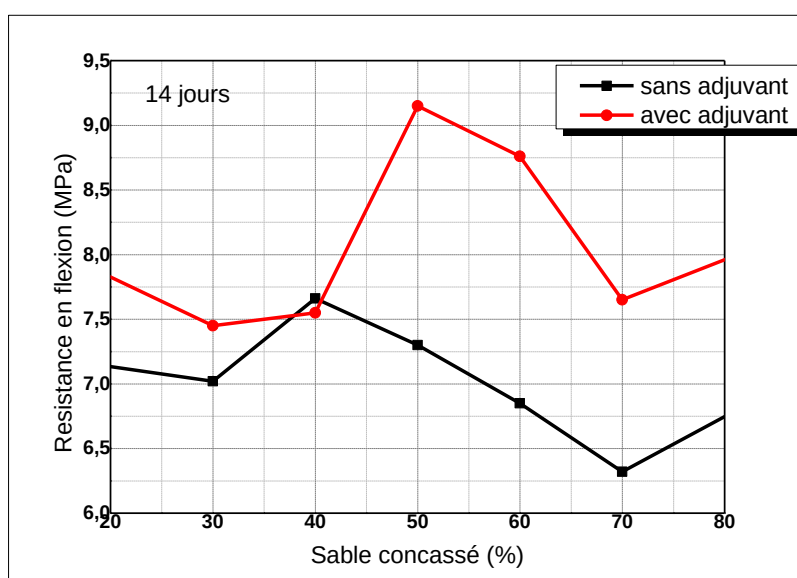


Figure 4 B : Resistance à la flexion en fonction du sable concassé à 14 jours

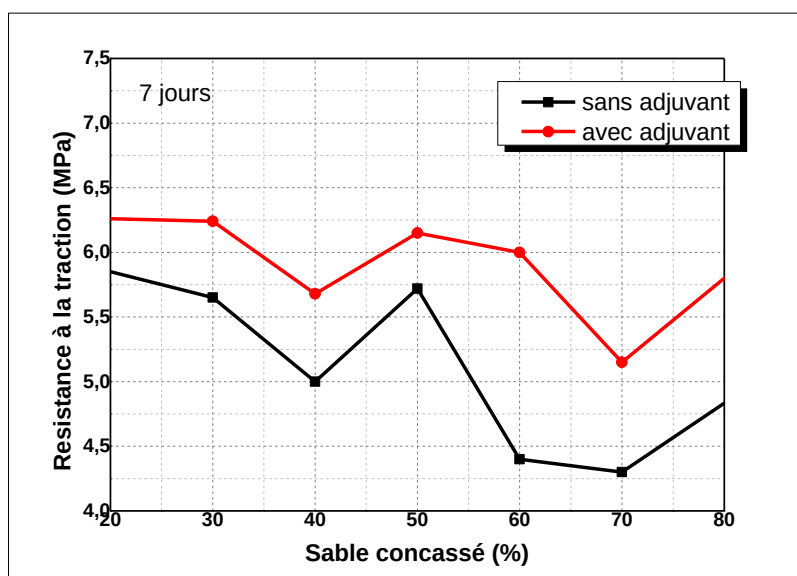


Figure 5 B : Resistance à la traction en fonction du sable concassé à 7journs

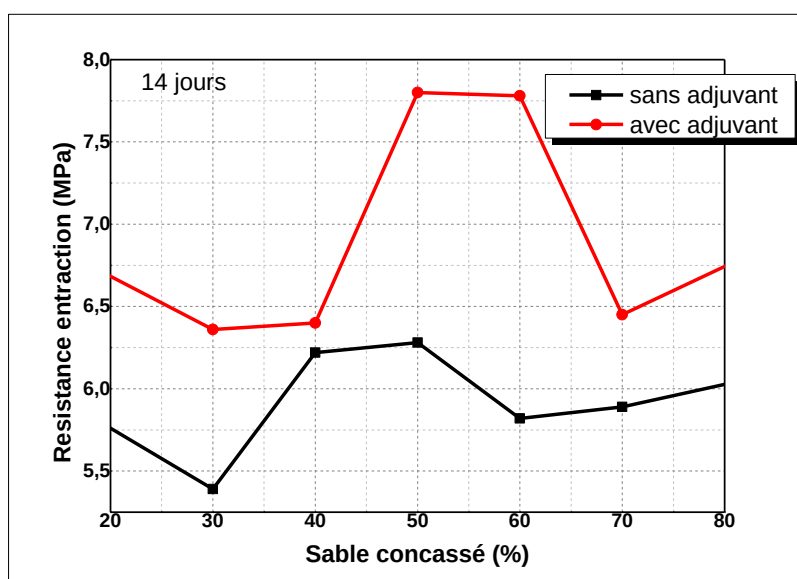


Figure 6 B : Resistance à la traction en fonction du sable concassé à 7journs

Annexe – C -

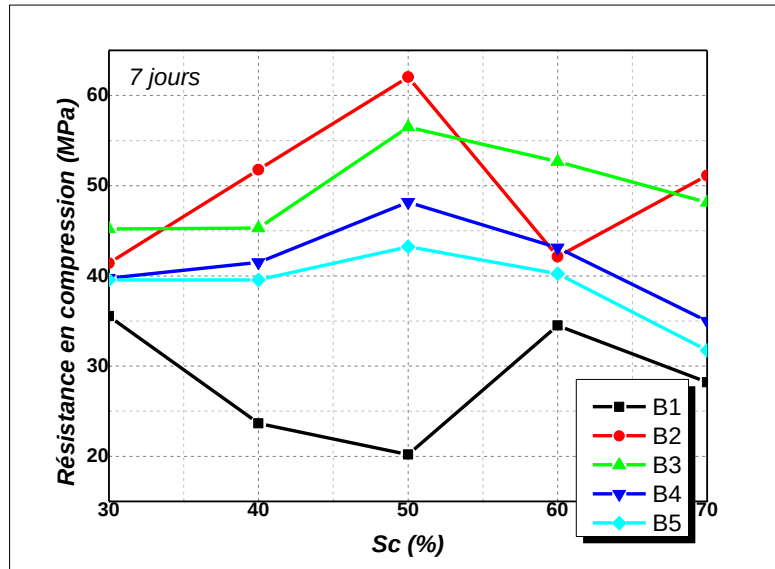


Figure : 1 C Résistance en compression en fonction du sable concassé à 7 jours

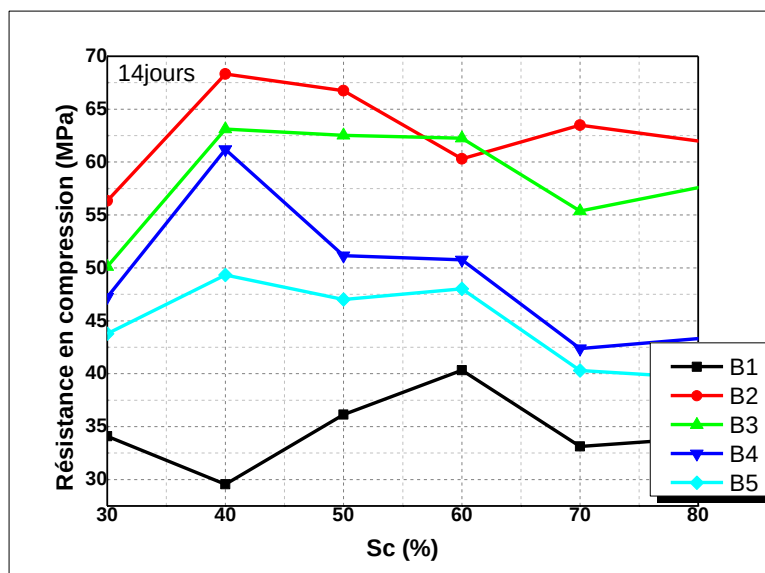


Figure : 2 C Résistance en compression en fonction du sable concassé à 14 jours

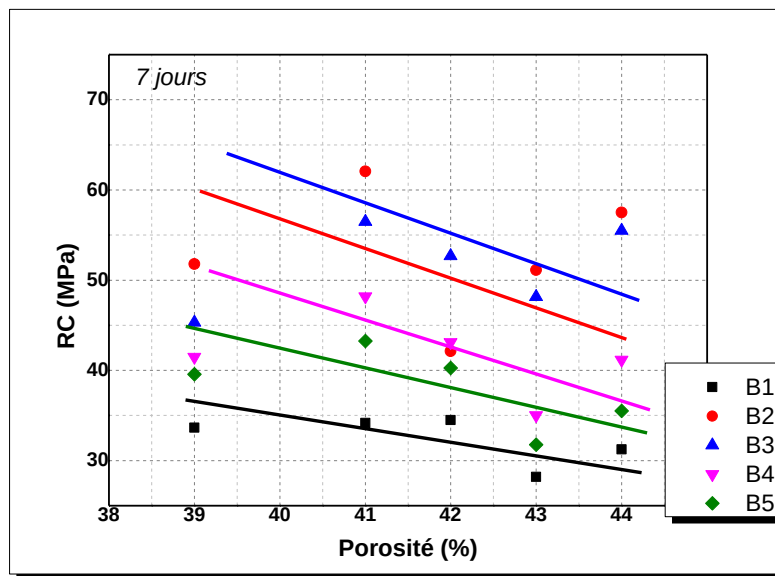


Figure : 3 C Résistance en compression en fonction de la porosité à 7 jours

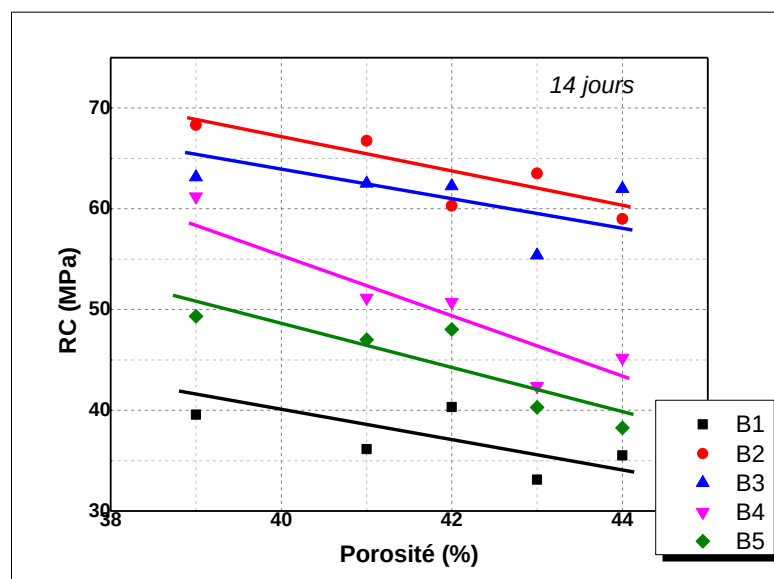


Figure : 4 C Résistance en compression en fonction de la porosité à 14 jours

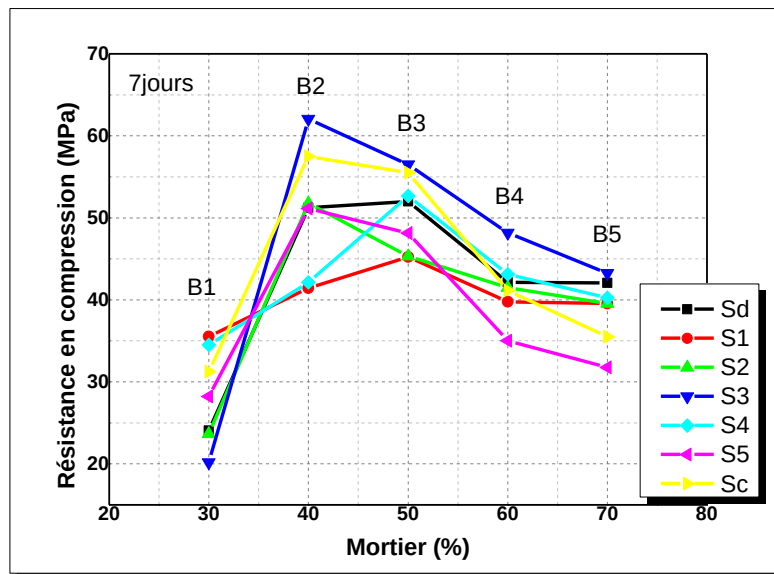


Figure : 5 C Résistance en compression en fonction du mortier à 7 jours

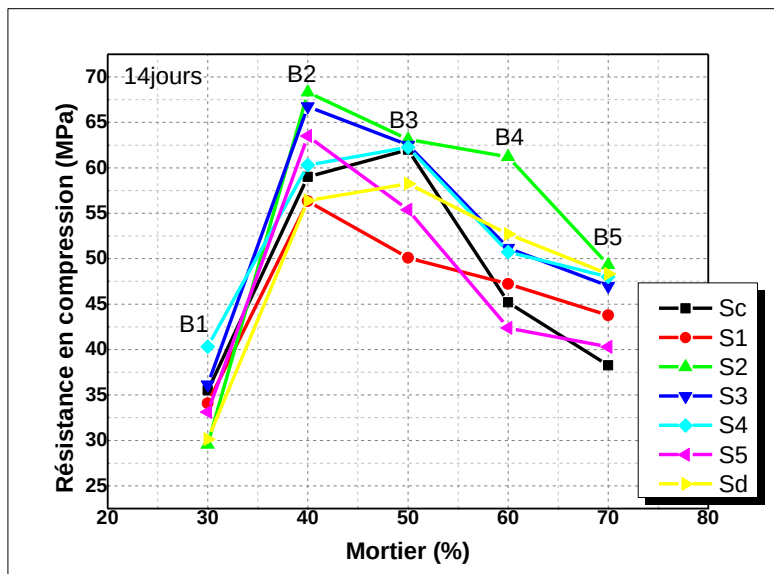


Figure : 6 C Résistance en compression en fonction du mortier à 14 jours

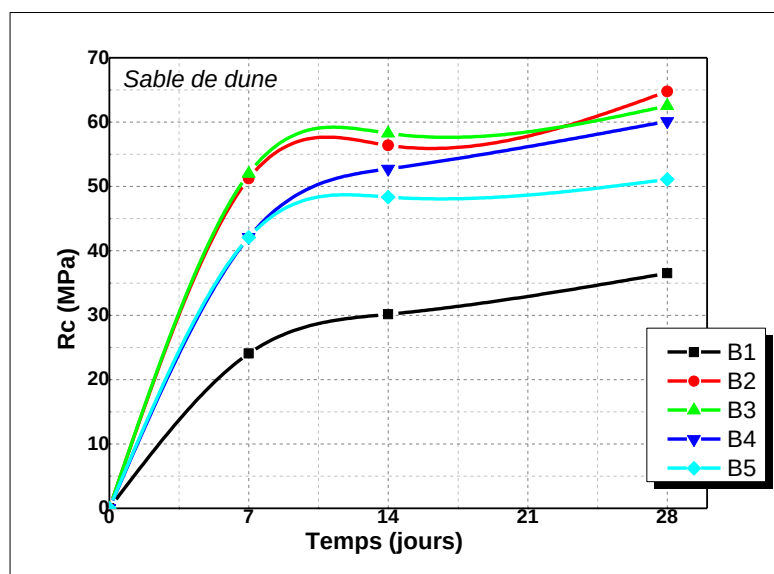


Figure 7 C : Résistance en compression dans le temps avec sable de dune

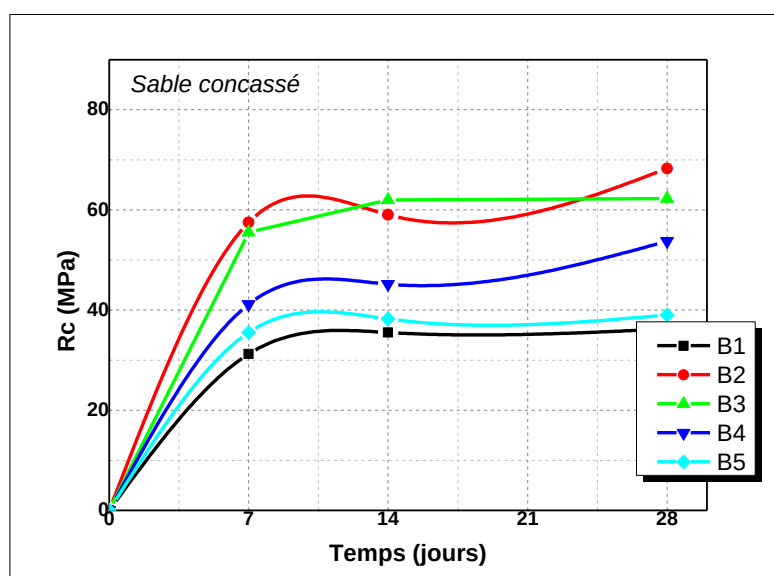


Figure 8 C : Résistance en compression dans le temps avec sable concassé

,

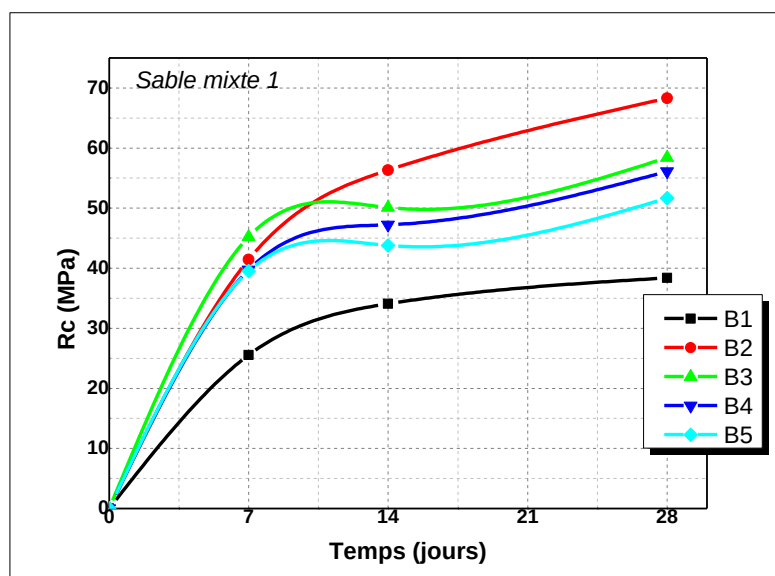


Figure 9 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S1

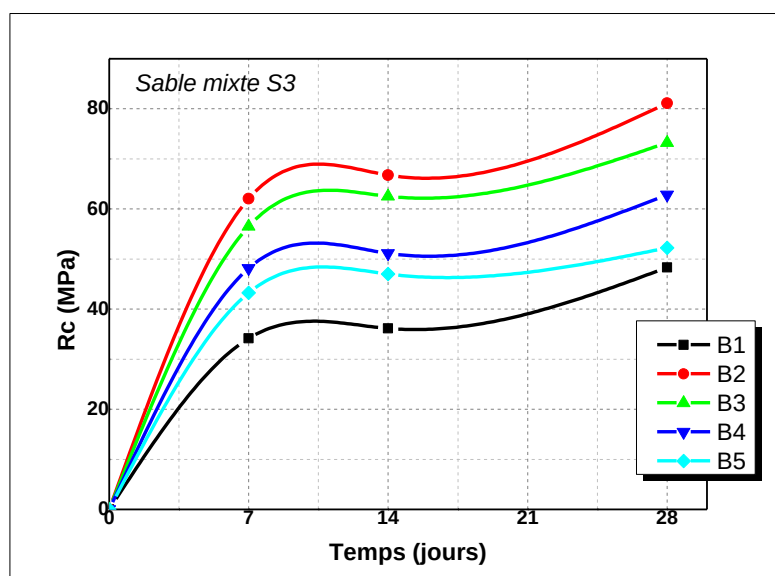


Figure 10 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S3

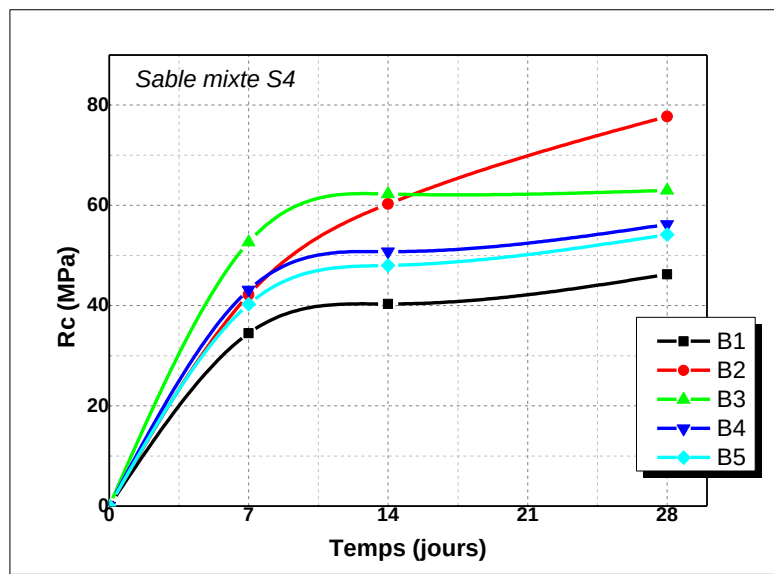


Figure 11 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S4

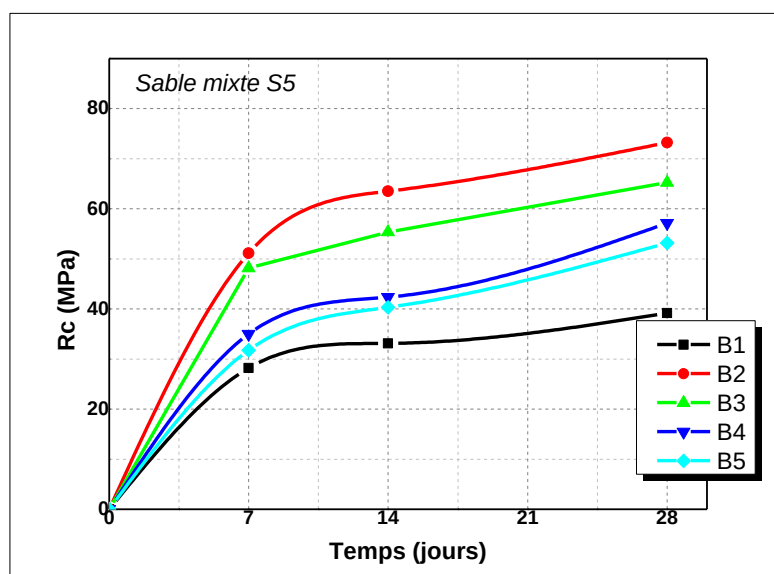


Figure 12 C : Résistance en compression dans le temps avec sable mixte S5

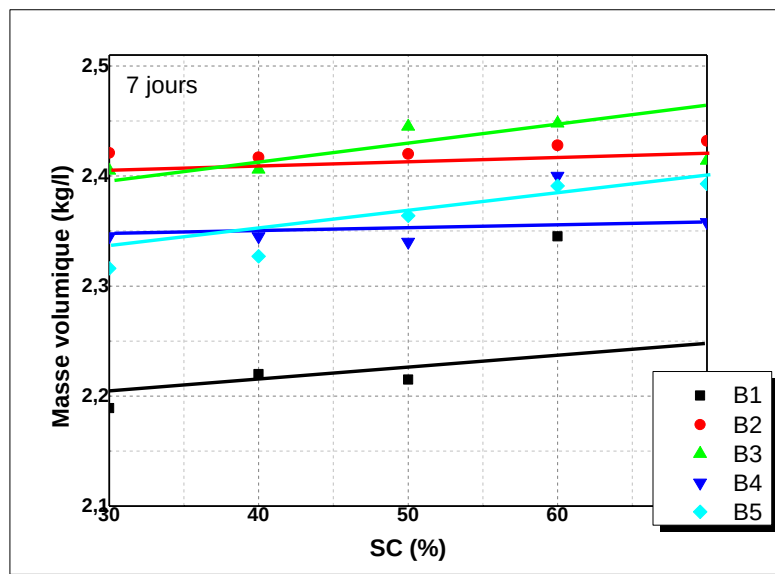


Figure 13 C : Masse volumique en fonction du sable concassé à 7 jours

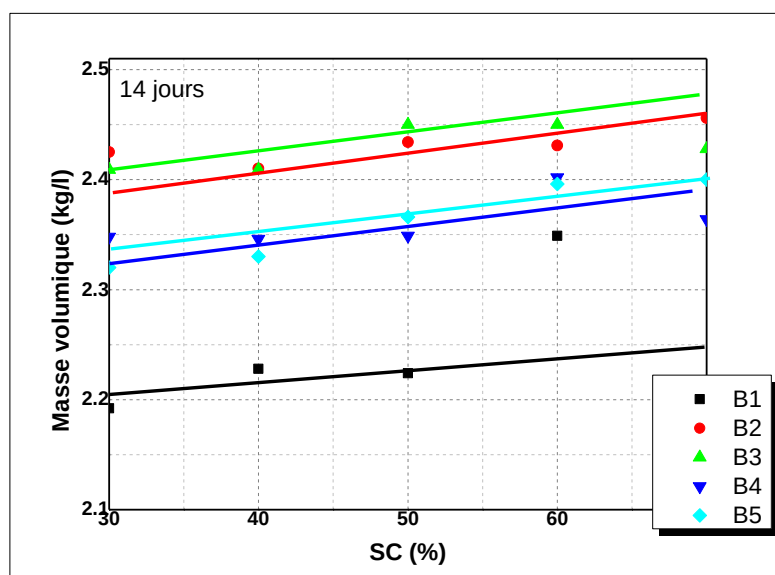


Figure 13 C : Masse volumique en fonction du sable concassé à 14 jours

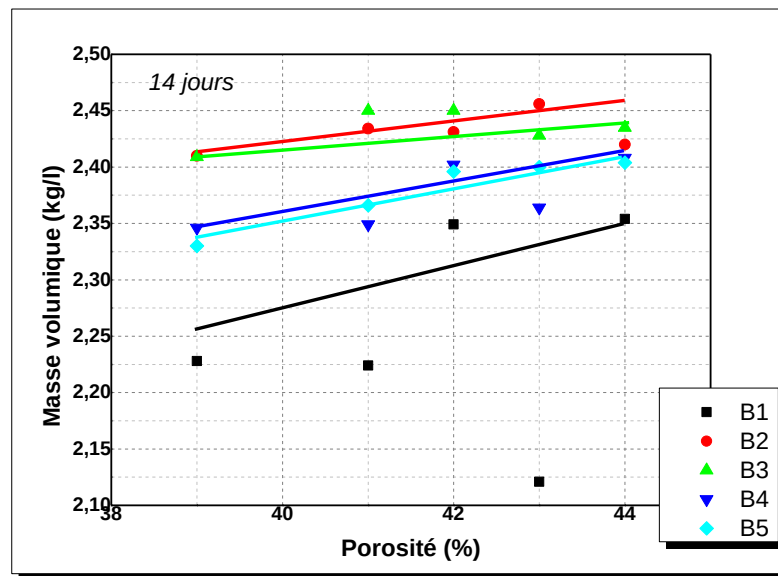


Figure 14 C : Masse volumique en fonction de la porosité à 14 jours

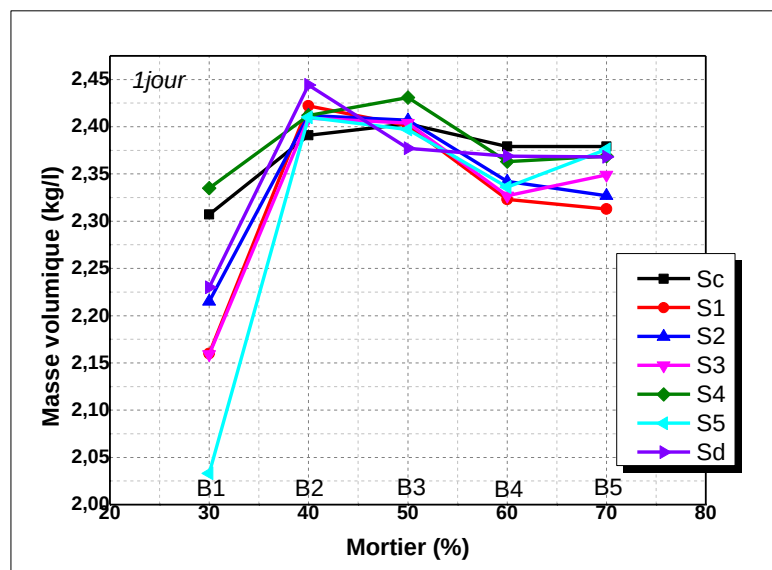


Figure 15 C : Masse volumique en fonction pourcentage de mortier à 1 jour

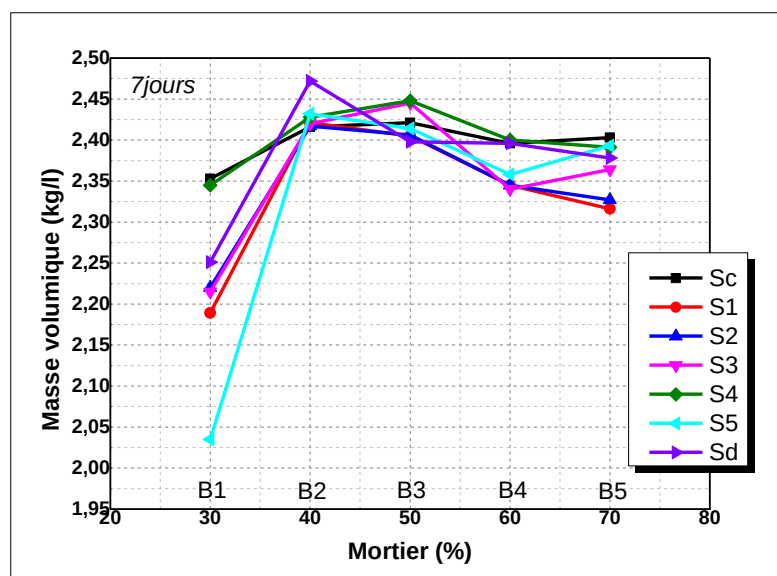


Figure 16 C : Masse volumique en fonction pourcentage de mortier à 7 Jours

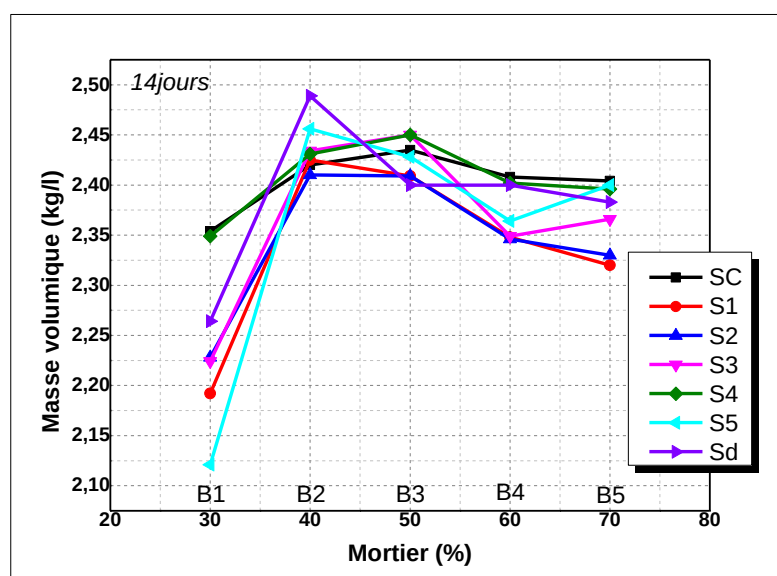


Figure 17 C : Masse volumique en fonction pourcentage de mortier à 14 jours

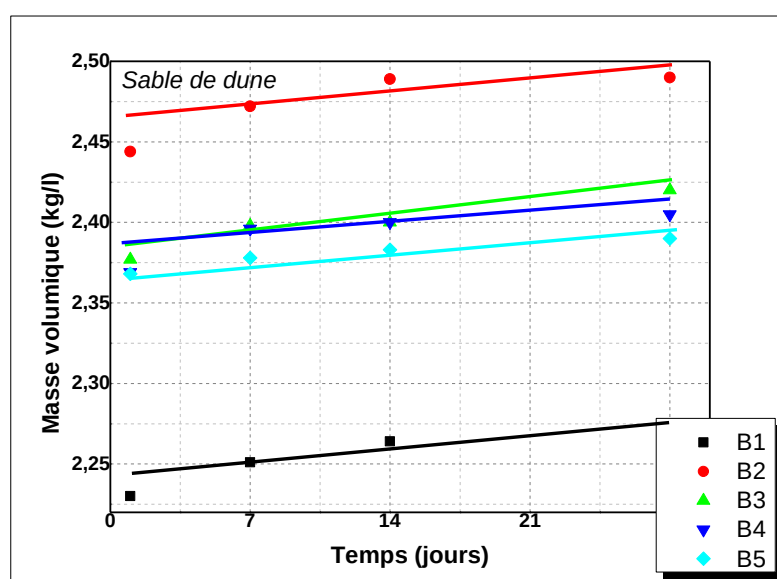


Figure 18 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable de dune

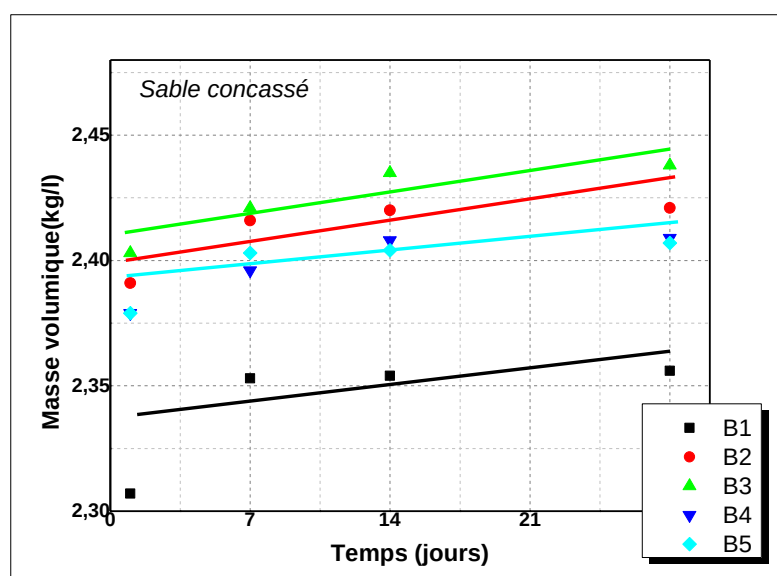


Figure 19 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable concassé

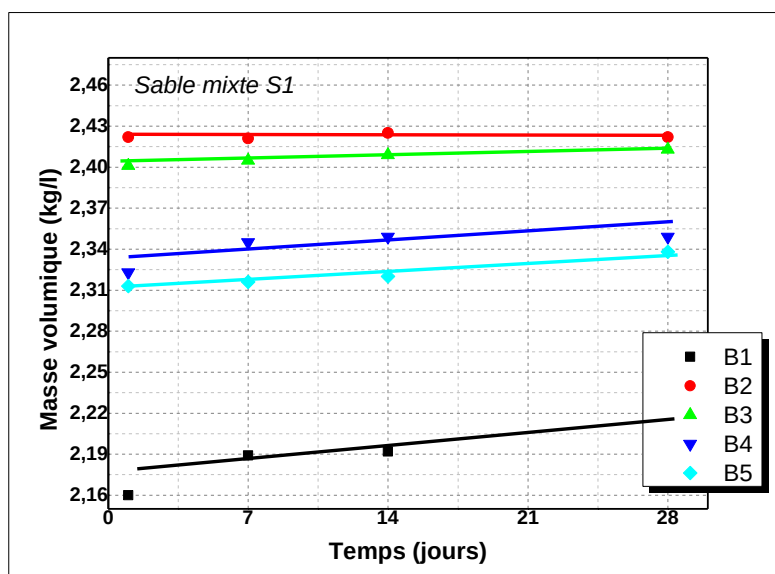


Figure 20 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S1

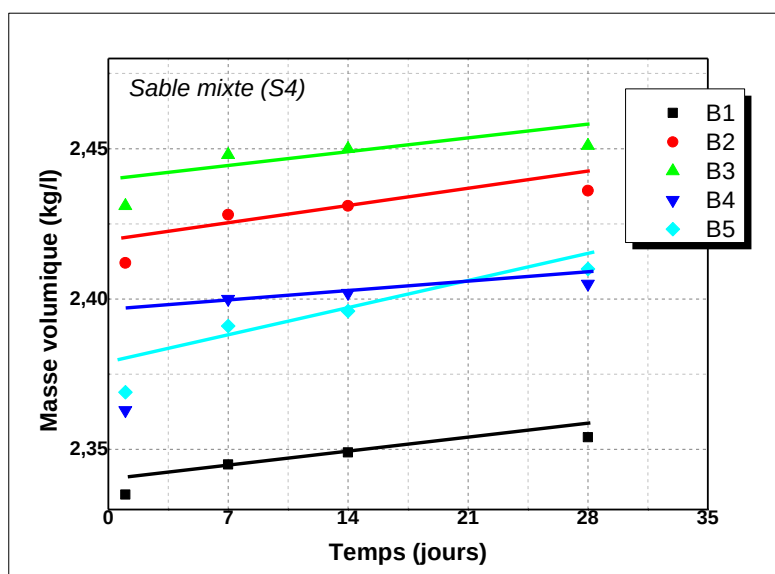


Figure 21 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S4

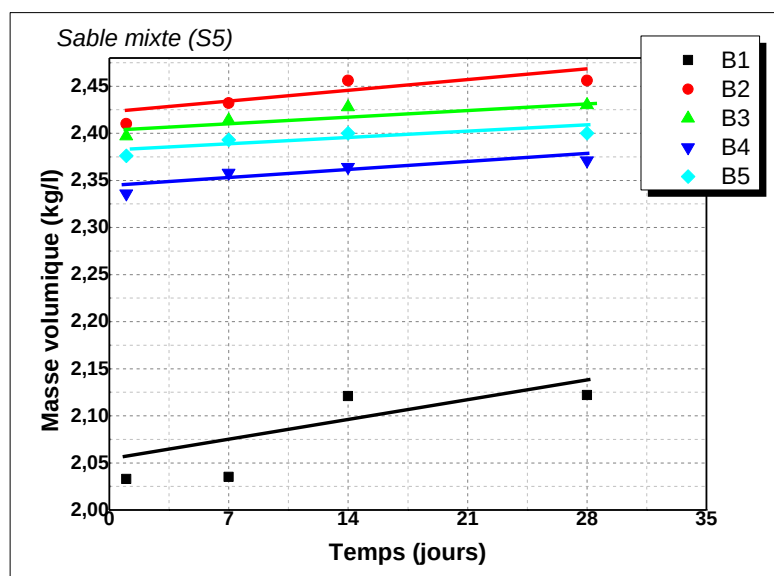
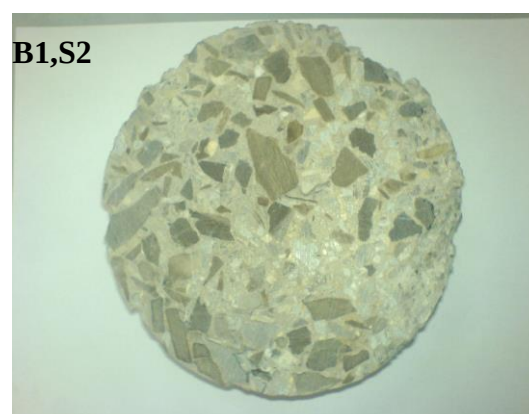
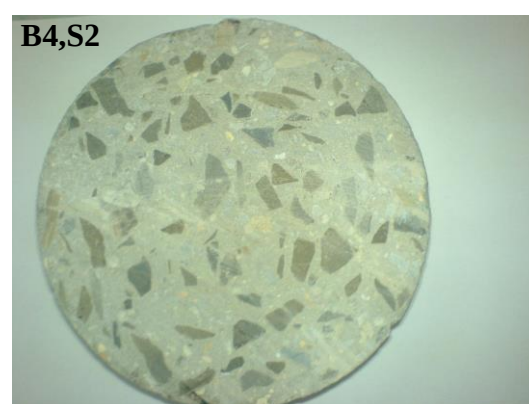
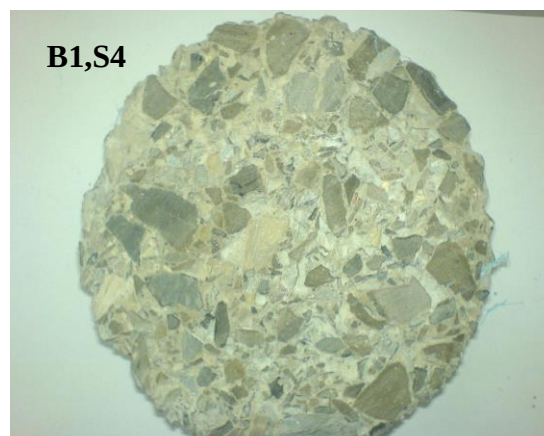
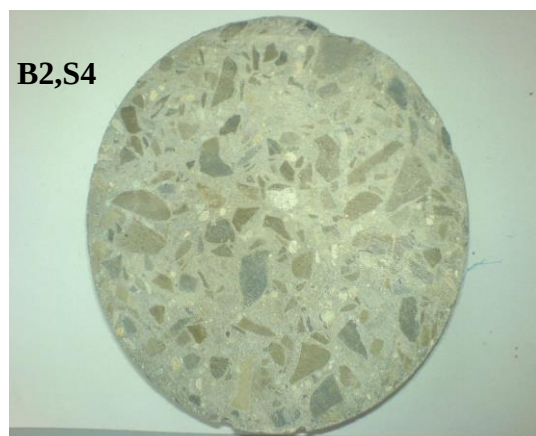
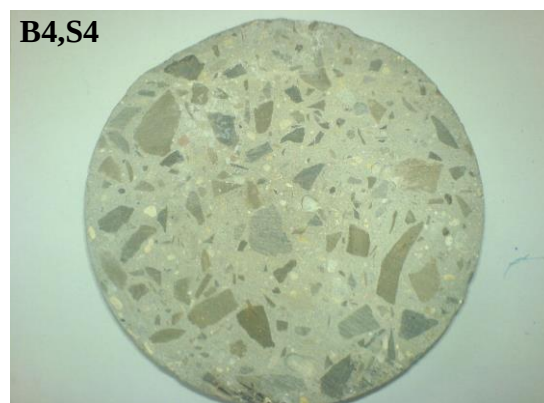
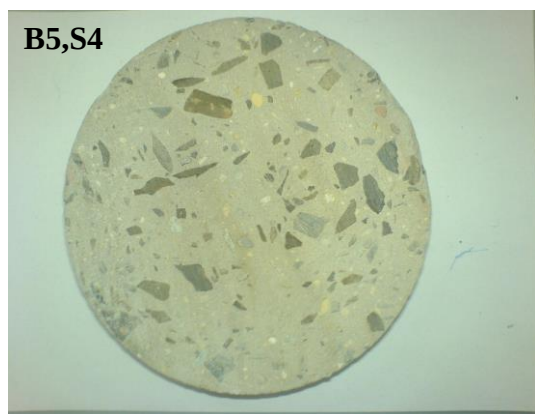
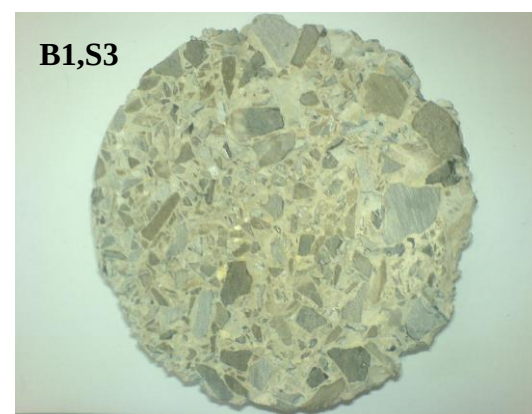
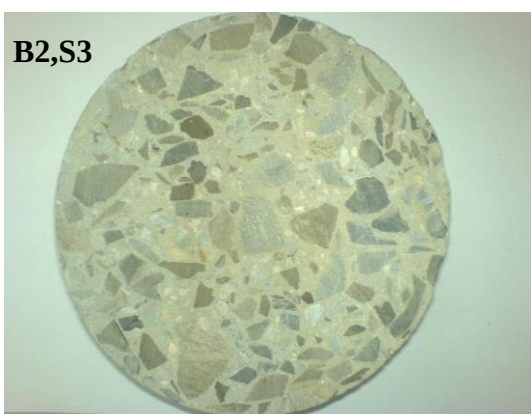
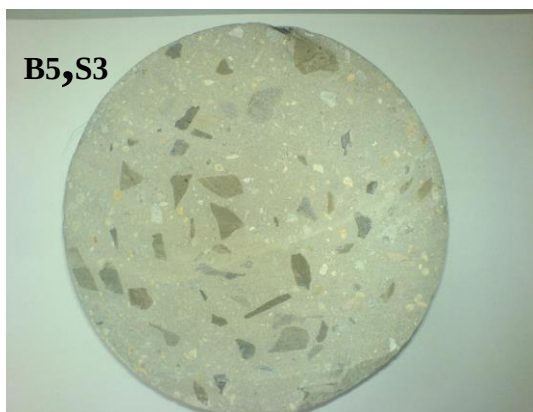
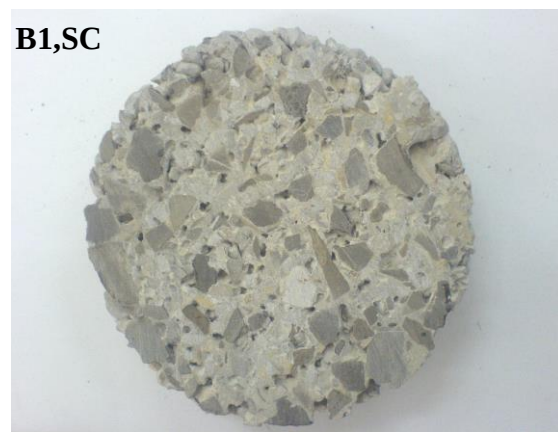
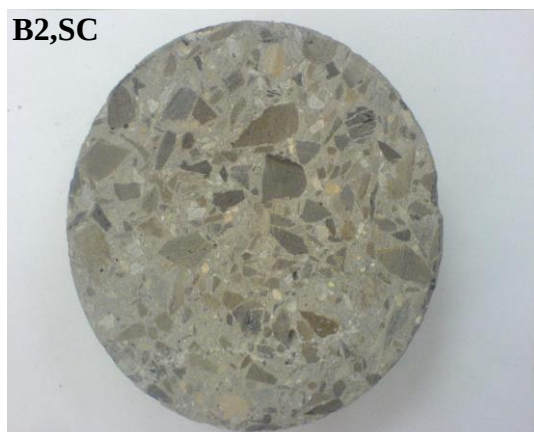
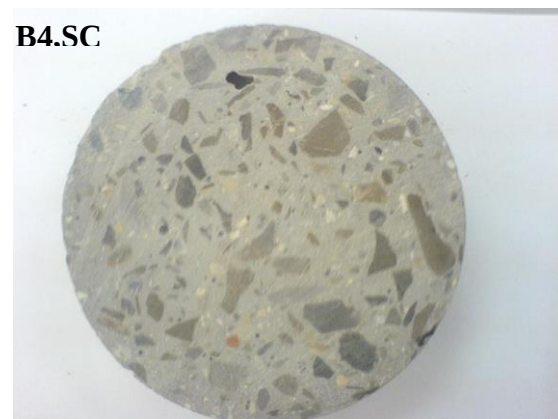
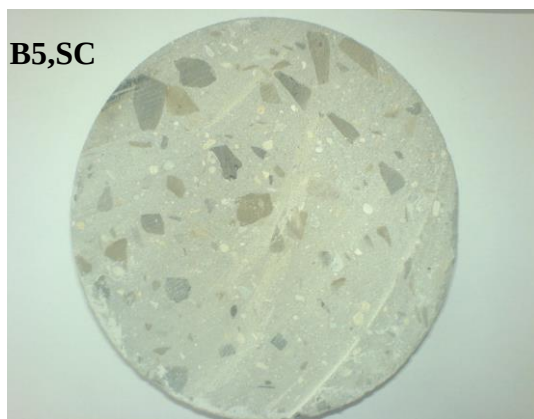
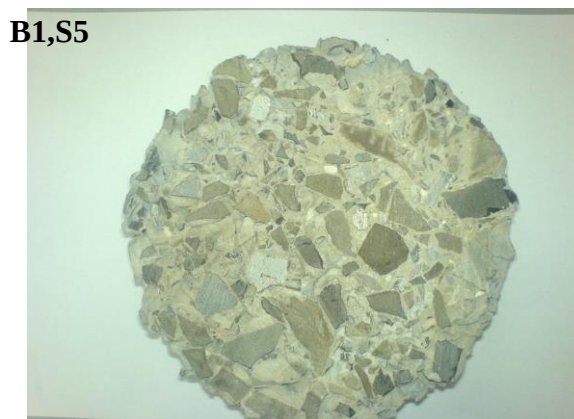
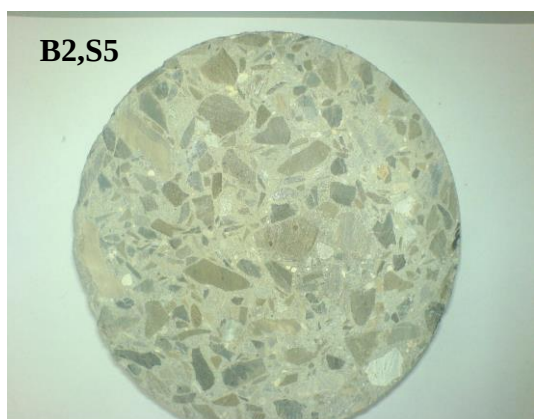
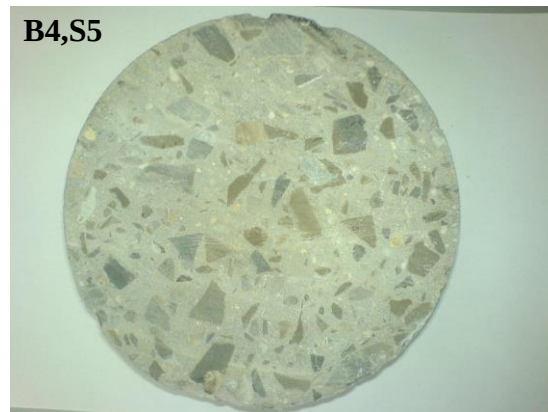
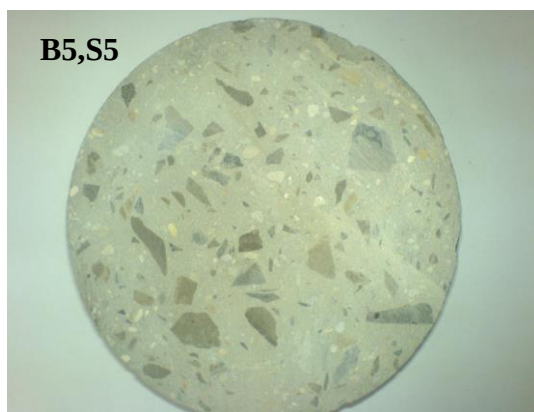


Figure 22 C : Masse volumique dans le temps des bétons avec sable mixte S5

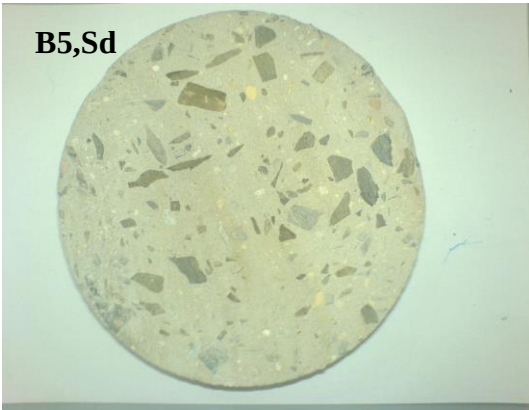
La distribution des grains dans les bétons



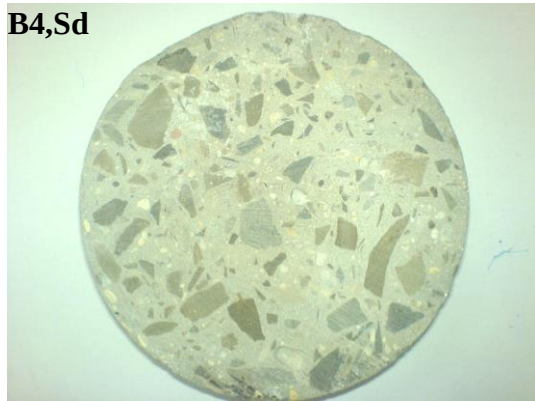




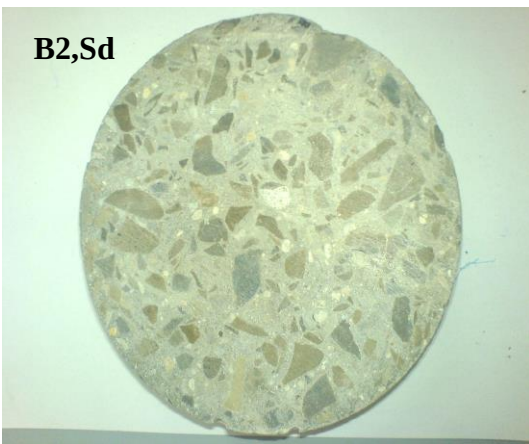
B5,Sd



B4,Sd



B2,Sd



B1,Sd

