REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÈRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÈ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie Civil et d'hydraulique

MÈMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Magistère

Spécialité : GENIE CIVIL

Option : GEOMATERIAUX

N° d'ordre : .....

N° de serie : .....

Par KADRI ABDELATEF

THEME :

Contribution à l'Amélioration de la durabilité du béton dans les zones enterrées de la wilaya de Ouargla par l'ajout des minéraux locaux.

Soutenu publiquement le 19/02/2014 devant le jury composé de :

BEBBA Ahmed	MC U. Ouargla	Président
KHENFER M. Mouldi	Prof. U. Laghouat	Examinateur
HACINI Messaoud	MC U. Ouargla	Examinateur
KRIKER Abdelouahed	Prof. U. Ouargla	Encadreur
ABIMOULOUD Youcef	MA A U. Ouargla	Co-Ecadreur

REMERCIMENT

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes du LTPS qui m'ont aidé et accueillie dans leur laboratoire.

Je remercie Monsieur KRIKER Abdel Ouahed, professeur à l'université de Ouargla, qui m'a encadré pour réaliser ce travail, et qui a apporté son soutien, son aide et ses conseils.

Je remercie Monsieur ABIMOULOUD Youcef Maitre Assistant, à l'université de Ouargla pour les discussions fructueuses, ses remarques précieuses et ses encouragements qui m'ont permis d'aboutir aux termes de ce travail.

Je remercie Monsieur BEBBA Ahmed Maitre de conférences à l'université de Ouargla, d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie Monsieur KHENFER M.Mouldi professeur à l'université de Laghouat, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur HACINI Messaoud Maitre de conférences à l'université de Ouargla, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

RESUMES

ملخص

إن البنايات بمنطقة ورقلة تتعرض لعدة مشاكل فيما يخص ديمومة الخرسانة خاصة تلك المغمورة، كالأساسات ،الأنابيب الخرسانية، أحواض الصرف.... و بالتالي العديد منها تستلزم الإصلاح وأحيانا إعادة البناء نتيجة وصولها إلى حالة متقدمة من الأضرار.

بالتوازي، رمل الكثبان التي يشكل 6 % من المساحة الإجمالية للجنوب الجزائري، و كما أن الأبحاث السابقة أثبتت أن إضافة بودرة السيليس إلى الخرسانة يؤدي إلى تحسين المقاومة و الديمومة، نضرا للنعومة الشديدة لهذه البودرة ، خاصية تمكنها من سد المسامات بالإضافة إلى أن لها قوة بوزولانية و بنية متشعبة قادرة على التفاعل، غير أن استعمال هذا النوع من الخرسانة يظل محدودا جدا نضرا لكلفته العالية لأن صناعة بودرة السيليس مقتصرة فقط على مصانع السيليسيوم. لذلك فإن استعمال رمل الكثبان الذي يحتوي على أكثر من 96% من السيليس يعتبر مقترح لتخفيض كلفة هذا النوع من الخرسانة و لتحسين ديمومة المنشات المغمورة.

و للوصول لهذا الهدف قمنا ببرنامج عملي متوافق مع العديد من الدراسات بهذا المجال

في البداية نقوم بتحديد خصائص المواد المستعملة، ثم نقوم بدراسة تأثير إضافة رمل الكثبان المسحوق و بودرة السيليس بنسب متفاوتة (0 % ، 2%، 4 % ، 8%) و تأثير نوع الإسمنت على الفعالية الميكانيكية للخرسانة و على مساميتها حسب وسط حفظ العينات، وسط نمودجي، وسط طبيعي تحت مستوى الماء، وسط سولفاتي خلال مختلف المراحل.

إن هذه المجموعة من التجارب سمحت لنا بتأكيد عدد من النتائج السابقة فيما يخص فعالية هذه الإضافات على تحسين الخرسانة و مقاومتها للسولفات و بالتالي تحسين ديمومتها بشكل خاص بمنطقة ورقلة.

كما أكدت هذه الدراسة أن الإسمنت من نوع CRS المقاوم للسولفات يؤدي دوره ، أي أن تضرر المنشات المغمورة المبنية بخرسانة ذات إسمنت CRS له أسباب أخرى غير السولفات.

كما خلصنا إلى أن إضافة 2 % من رمل الكثبان المسحوق تعتبر قيمة مثلى لتحسين مقاومة الخرسانة و ديمومتها.

إن توفر مادة رمل الكثبان بمنطقتنا يحتم علينا الأخذ بعين الاعتبار الأهمية البالغة لإضافة رمل الكثبان المسحوق في صناعة الخرسانة .

الكلمات المفتاح: رمل الكثبان، بودرة السيليس، المقاومة الميكانيكية، الديمومة.

Abstract

The low of Ouargla facing serious problems that affect durability of concrete of large number of structures, especially those buried lake foundations, paving, pipes etc.... and a several buildings need to be repaired or rebuilt because of their advanced state of deterioration.

the southern Algeria is adorned by sand dunes which occupies 6% of its surface, and the previous studies show that the addition of silica fume in concrete improves its strength and durability due to its amorphous structure and its high finesse that gives to it a very good filling capacity, and strong pouzzolanlité, but concrete is still little used because of their high costs because the production of silica fume is limited in industry silicon.

The use of sand dune that contains more than 96 % of silica as a proposal would be in reducing costs and improving the durability of underground structures.

To achieve our goal we made a similar experimental program with many studies in the same field of study.

First we characterize the materials used, after that we study the effect of additions by adding sand dune crushed of Ouargla, and silica fume with varied percentages (0 %, 2 %, 4%, 8%) and we study the effect of cement type on the mechanical properties and on porosity of the concrete in three environment of conservation; standard environment, groundwater environment and water sulphate environment at différent ages.

This group of tests confirmed a number of results found in the literature concerning the performance concrete with additions particularly silica fume and its resistivity against sulfate therefore their durability in Ouargla milieu.

It also confirms that the CRS is sulphate-resisting cement, so the causes of degradation of buried concrete structure built by CRS come from another source.

The addition of 2% crushed sand dune in concrete is an optimal value to improve its strength and durability.

Note that the abundance of sand dunes in our area hence the need to take into consideration global interest of the introduction of finely crushed sand dunes in the concrete industry.

Keywords: crushed sand dune, fumed silica, mechanical strength, durability

Résumé

La cuvette de Ouargla face à des sérieux problèmes de durabilité du béton qui affectent un très grand nombre de structures, particulièrement celles qui sont enterrées, fondations, pavés, tuyaux, regards etc.… et plusieurs ouvrages qui doivent être réparés ou reconstruis en raison de leur état avancé de détérioration.

En parallèle, le sable de dune occupe 6 % de la surface du sud de l'Algérie [8], ainsi que les études antérieurs montrent que l'ajout de la fumée de silice au béton améliore sa résistance et sa durabilité grâce à sa grande finesse qui lui donne une très bonne capacité de remplissage, et sa forte pouzzolanlité et sa structure amorphe, mais ce béton est encore peu employé à cause de leurs coûts élevés en raison que la capacité de production de fumée de silice est limitée dans l'industrie du silicium.

L'utilisation de sable de dune qui contient plus que 96% de silice serait donc comme une proposition dans la réduction des coûts et l'amélioration de la durabilité des ouvrages enterrés.

Pour atteindre notre objectif, on a fait un programme expérimental similaire avec les nombreuses études menées dans ce même domaine d'étude.

Premièrement on caractérise les matériaux utilisés, en suite on étudie l'effet des ajouts par l'addition de sable de dune broyé de Ouargla, et la fumée de silice avec des pourcentages varies (0%, 2%, 4%, 8%) et l'effet de type de ciment sur les performances mécaniques et sur la porosité du béton dans trois milieu de conservation ; milieux standard, milieu nappe et milieu sulfatique, à des déférents âges.

Ce groupe d'essais a permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la bibliographie concernant les performances des bétons avec additions, particulièrement la fumée de silice et leur résistivité au sulfate et par conséquence leur durabilité au milieu d'Ouargla.

On confirme aussi que le CRS est un ciment résistant au sulfate, donc les causes de dégradation des ouvrages enterrés construits par le béton à base de CRS viennent à d'autre source.

L'ajout de 2 % de sable de dune broyé au béton représente une valeur optimale pour améliorer sa résistance mécanique et sa durabilité.

On notera que l'abondance des sables de dunes dans notre région, d'où la nécessité de prendre en considération l'intérêt global de l'introduction des sables de dunes finement broyés dans l'industrie du béton.

Mots clés : sable de dune broyé, fumée de silice, résistance mécanique, durabilité

Sommaire

Page

Sommaire

Sommaire…… i

Liste des figures…….. xi

Liste des tableaux…… xv

Liste des photos……... xvii

Introduction générale

Introduction générale…….. 1

Chapitre 1 : Zone d'étude

I.1 Introduction…… 5

I.2 Sol et relief …… 5

I.2.1 Salinité des sols …….. 5

I.2.2 Relief et topographie……... 5

I.2.3 Description morphologique de sol…….. 5

I.2.4 Analyse de sol dans la cuvette de Ouargla…… 6

I.3 Climat…… 7

1.3.1 Pluviométrie…….. 7

1.3.2 Température……... 8

1.3.3 Gélées…….... 9

1-3-4 Humidité relative de l'air…….. 9

1-3-5 Vents ……. 9

1-3-6 Evaporation……... 10

I-4 Géologie……... 10

I-5 Ressources en eau…….. 11

a) – Nappes peu profondes (CT)……... 11

b) – Nappe du continental intercalaire (Albien)…… 11

1-6 L'analyse physico chimique des eaux souterraines de la région d'étude…….. 12

1-7 Classement d'environnement de milieu selon la norme EN 206…….. 13

1.8 Conclusion…… 15

Chapitre II : Sable et silice

II-1 Sable…… 17

II.1.1 Introduction…… 17

II.1.2 Propriétés et caractéristique des sables……... 17

II.1.3 Méthode de caractérisation physico-chimique de sable…….. 17

II-1-3-1 Analyse granulométrique…….. 17

II-1-3-2 Observation microscopique……... 20

II-1-3-3 Analyse élémentaire par diffractométrie des rayons x…….. 20

II-1-4 Cas particulier, sable de dune……... 20

II.2 Silice…….. 21

II-2-1 Introduction……. 21

II-2-2 Fumée de silice…… 21

II-2-2-1 Introduction…….… 21

II-2-2-2 Morphologie de la fumée de silice……..……... 23

II-2-2-3 Effet de la fumée de silice sur le béton…… 23

a- Réaction pouzzolanique de fumée de silice…… 23

b- Avantages d'ajout de la fumée de silice au béton……...…… 23

c- Désavantage d'ajout de la fumée de silice au béton…… 24

II-2-3 Sable broyé (le quartz broyé)……... 25

II-2-3-1 Introduction…… 25

II-2-3-2 Propriété physique de béton avec sable broyé……... 25

II-2-3-3 Propriété mécanique de béton avec sable broyé……..…. 25

II-2-3-4 Autre utilisation de sable broyé siliceux……... 30

II-3 Broyage……... 30

II-3-1 Définition…….. 30

II-3-2 Importance du broyage……. 30

II-3-3 Mode de broyage……. 31

II-3-3-1 Mode de broyage par percussion …….. 31

II-3-3-2 Mode de broyage par écrasement…….. 31

II-3-3-3 Mode de broyage par frottement……..….. 32

II-3-4 Système utilisé pour le broyage…….…….. 32

II.3.5 Relation entre la finesse et l'activité…….…… 34

II-4 Conclusion…….. 35

Chapitre III : Appuis sur les ciments

III.1 Définition…… 37

III.2 Fabrication du ciment portland……... 37

III.3 Constituants de base du ciment……... 39

III.4 Constitutions secondaires et ajouts minérales…… 39

III.4.1 Addition calcaires…….. 40

III.4.2 Filler siliceux……... 40

III.4.3 Quartz broyé…… 40

III.4.4 Laitier de haut fourneau…… 40

III.4.5 Fumées de silice……... 41

III.4.6 Cendres volantes…….. 41

a- Cendre volante calcaire……... 41

b- Cendre volante siliceuse……..…. 42

c- Effet de cendres volantes……..….. 42

III.4.7 Pouzzolane…….…….. 42

III.4.8 Sulfate de calcium (gypse : $CaSO_4.2H_2O$) …….…… 42

III.5 Classification de ciment courant……. 43

III.5.1 Classification selon la composition…….. 43

III.5.2 Classification selon la résistance…….. 44

III.6 Ciments adaptés à des usages spécifiques……... 44

III.6.1 Ciments résistant aux sulfates…….. 44

III.6.2 Ciments susceptibles d'être conforme aux exigences du CRS…… 45

III.6.3 Ciment pour travaux à la mer PM (NF P 15-301)……... 45

III.6.4 Ciment à teneur en sulfate limitée pour béton précontraint CP…….. 45

III.7 Ciments Spéciaux ……... 46

III.7.1 Ciment alumineux fondu…….. 46

III.7.2 Ciment prompt naturel……. 46

III.7.3 Ciments à maçonner……. 47

III.7.4 Chaux hydrauliques naturelles (XHN)……. 48

III.8 Conclusion……... 49

Chapitre IV : Durabilité

IV.1 Notion de durabilité des bétons…….. 51

IV.2 Paramètres de la durabilité chimique…….. 51

IV.2.1 Paramètres liés au matériau……. 51

IV.2.1.1 Composition chimique et minéralogique du ciment……. 51

a- Teneur potentielle en portlandite $Ca(OH)_2$ …….. 51

b- Teneurs en aluminate tricalcique C_3A et en silicate tricalcique C_3S ……..…….. 51

c- Teneurs en additions minérales…… 51

IV.2.1.2 Nature minéralogique des granulats…… 52

IV.2.3 Formulation et propriétés de transfert du béton……... 52

IV.2.2 Paramètres liés à l'environnement…….. 53

IV.2.3 Paramètres liés à la structure……... 54

IV.3 Revue des principaux milieux agressifs…….. 56

IV.3.1 Milieux acides…….. 56

- Acides minéraux……..……. 56

- Acides organique……..……. 57

- Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements acides…….…… 57

IV.3.2 Milieu sulfaté……... 58

- Sulfate de sodium……... 58

- Sulfate de magnésium……. 58

- Sulfate de calcium……... 60

- Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements sulfatiques…….…… 60

IV.3.3 Attaque d'origine biochimique…… 67

IV.3.3.1 Cas des eaux usées…… 67

IV.3.3.2 Cas d'effluents agricoles et agro-alimentaires……. 68

IV.3.4 Autre milieux considérés agressifs…….…….. 68

IV.4 Conclusion…… 69

IV.4.1 Conception des ouvrages…… 69

IV.4.2 Conception des bétons……... 69

IV.4.3 Fabrication et mise en œuvre……... 69

Chapitre V : Matériaux et méthodes

V.1 Matériaux utilisés……. 71

V.2 Programme expérimental……. 75

V.2.1 Introduction…… 75

V.2.2 Détermination de la finesse (méthode Blaine)…… 76

V.2.2.1 Principe…… 76

V.2.2.2 Appareils…… 76

V.2.2.3 Matériaux pour l'essai…….. 76

V.2.2.4 Conditions d'essai…… 76

V.2.2.5 Lit de ciment compacté…… 76

V.2.2.6 Base de l'essai…….. 77

V.2.2.7 Procédure de l'essai……. 77

V.2.3 Formulation des bétons…….. 79

V.2.4 Confection et conservation des éprouvettes……... 79

V.2.4.1 Séquence du malaxage……... 80

V.2.4.2 Confection des éprouvettes……... 80

V.2.4.3 Environnement de conservation……. 81

V.2.5 Essais mécaniques…….. 82

V.2.5.1 Essais de compression (NF P 18-406)……... 82

a- Objectif de l'essai……..... 82

b- Principe de l'essai…… 82

c- Equipements nécessaires…… 82

d- Conduite de l'essai de rupture……. 82

V.2.5.2 Résistance à la traction par flexion…… 83

a- Objectif de l'essai ……... 83

b- Principe de l'essai…… 83

c- Equipement nécessaire…… 84

d- Conduite de l'essai de rupture……. 84

V.2.6 Essai de porosité accessible……... 86

a- Objectif de l'essai……...……. 86

b- Conduite de l'essai…….. 86

c- Calcul de la porosité…… 86

Chapitre VI : Résultats et discussions

VI.1 Introduction…… 88

VI.2 Porosité accessible et Masse volumique……..… 89

VI.2.1 Porosité accessible en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice…… 89

VI.2.2 Porosité accessible en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé…….. 90

VI.2.3 Masse volumique en fonction du pourcentage de l'addition de la fumée de silice……..... 91

VI.2.4 Masse volumique en fonction du pourcentage de l'addition de sable de dune broyé…….. 92

VI.3 Résistances mécaniques……..……..... 93

VI.3.1 Résistances à la compression…… 93

VI.3.1.1 Influence du type de ciment sur l'évolution de la résistance à la compression dans les déférents milieux ……... 94

VI.3.1.2 Milieu standard ……..… 95

a- Influence d'addition de fumée de silice sur l'évolution de la résistance à la compression …… 95

b- Influence d'addition de sable de dune broyé sur l'évolution de la résistance à la compression …… 96

c- Influence d'addition sur l'évolution de la résistance à la compression…… 97

VI.3.1.3 Milieu nappe phréatique …… 98

a- Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice……. 98

b- Résistance à la compression en fonction du pourcentage de l'addition du sable de dune broyé ……..……..……..…… 100

c- Influence d'addition sur l'évolution de la résistance à la compression …… 101

VI.3.1.4 Milieu de sulfate ……. 103

a- Résistance à la compression en fonction du pourcentage de l'addition de la fumée de silice……. 103

b- Résistance à la compression en fonction du pourcentage de l'addition du sable de dune broyé…… 104

c- Influence de l'addition sur l'évolution de la résistance à la compression…… 105

VI.3.2 Résistances à la traction……..……... 107

VI.3.2.1 Influence du type de ciment sur l'évolution de la résistance à la traction dans les déférents milieux …… 108

VI.3.2.2 Milieu standard …… 109

a- Résistance à la traction en fonction du pourcentage de l'addition de la fumée de silice …… 109
b- Résistance à la traction en fonction du pourcentage de l'addition du sable de dune broyé... 110
c- Influence de l'addition sur l'évolution de la résistance à la traction…….…… 111

VI.3.2.3 Milieu nappe phréatique…….. 112

a- Résistance à la traction en fonction du pourcentage de l'addition de la fumée de silice…….. 112
b- Résistance à la traction en fonction du pourcentage de l'addition du sable de dune broyé…….. 113
c- Influence de l'addition sur l'évolution de la résistance à la traction…….…… 114

VI.3.2.4 Milieu de sulfate…….. 115

a- Résistance à la traction en fonction du pourcentage de l'addition de la fumée de silice …… 115
b- Résistance à la traction en fonction du pourcentage de l'addition du sable de dune broyé……... 117
c- Influence de l'addition sur l'évolution de la résistance à la traction……..… 118

Conclusion générale

Conclusion générale…….. 120

Bibliographie

Bibliographie……. 123

Annexe

Annexe…….. 128

LISTE DES FIGURES

Figure (I, 1) : Précipitation mensuelle à Ouargla (2009,2010)…….……8

Figure (I, 2): Température mensuelle à Ouargla (2010)……9

Figure (II, 1) : Matières premières entrant dans la fabrication de la fumée de silice [11].....22

Figure (II, 2) : Formation de la fumée de silice dans le four [11]. ……....22

Figure (II, 3) : Morphologie de la fumée de silice [11]……...23

Figure (II, 4) : Porosité en fonction du dosage en fumée de silice [21]……..24

Figure (II, 5) : Résistance à la compression en fonction du dosage en fumée de silice [21] 24

Figure (II, 6) : Perméabilité en fonction du dosage en fumée de silice [21]……...……25

Figure (II, 7) : Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction du temps et du pourcentage en sable de dune broyé avec e/c=0.3 [13]……28

Figure (II, 8): Influence de la teneur en silice finement broyée sur la résistance d'un béton mûri à la vapeur à haute pression (âge au début du mûrissement : 24 heures ; température de murissement : 177 °C) [38]……...28

Figure (II, 9) : Diagramme des phases des C-S-H de Verbeck et Copland [8]…..……29

Figure (II, 10): Modes de broyage [14]……..…….33

Figure (II, 11) : Systèmes utilisés dans le broyage [14]……..34

Figure (II, 12) : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Ghozlane [15]…….....34

Figure (II, 13) : Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Ghozlane [15]……...34

Figure (II, 14) : Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Ghozlane [15]……..…...35

Figure (III, 1) : Fabrication du ciment [16]….....37

Figure (III, 2) : Composants des ciments [16]……....38

Figure (IV, 1): Influence de la taille maximale des grains sur le coefficient de diffusion effectif [23]……..….53

Figure (IV, 2) : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [19]……55

Figure (IV, 3): Perte relative de masse de la pate du ciment (E/C= 0.27) en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'acide organique maintenue à pH= 4. [27]…….58

Figure (IV, 4) : Schéma représentant l'expansion autour des agrégats……...…60

Figure (IV, 5): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton, (éprouvettes de béton conservées pendant 16 ans dans une solution de concentration de 10 % environ) **[20]**……...……..61

Figure (IV, 6) : Relation entre le rapport E/C d'un mortier et l'expansion en milieu sulfatique, d'après Ouyong **[24]**……61

Figure (IV, 7) : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajout de laitier [20]..64

Figure (IV, 8) : Pénétration des chlorures dans des bétons en fonction de la teneur en laitier du ciment et du rapport E/C [20]……..64

Figure (IV, 9) : Coefficient de diffusion à 28 jours des ions chlorure en fonction de la teneur en cendres, de différentes classes de béton d'après Dhir et al [28]……...…65

Figure (IV, 10): Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction du temps dans des BHP contenant des dosages croissants en fumée de silice [29]…….66

Figure (IV, 11) : Dégradation de béton due à la formation de thaumasite. [47]……67

Figure (V, 1) : Courbes granulométriques du sable de dune broyé ……72

Figure (V, 2) : Courbes granulométriques du sable et du gravier……75

Figure (V, 3) : Appareil de perméabilité Blaine [30]……...……78

Figure (V, 4) : Formulation de béton par la méthode Dreux-Gorrisse……...…….79

Figure (V, 5) : Schéma présentant les positions d'appuis à l'appareil de traction…….84

Figure (VI, 1): Porosité accessible en fonction du pourcentage de l'adition de la fumée de silice……..89

Figure (VI, 2): Porosité accessible en fonction du pourcentage de l'adition de sable broyé...90

Figure (VI, 3) : Masse volumique en fonction du pourcentage de l'addition……..91

Figure (VI, 4) : Masse volumique en fonction du pourcentage de l'addition……..…92

Figure (VI, 5) : Evolution de la résistance à la compression de déférents types de ciment dans les déférents milieux….....94

Figure (VI, 6) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu standard……...95

Figure (VI, 7) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans le milieu standard……..96

Figure (VI, 8) : Résistance à la compression en fonction du temps des déférents pourcentages d'ajout (milieu standard)……..…...97

Figure (VI, 9) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans la nappe phréatique……...99

Figure (VI, 10) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans la nappe phréatique……..……100

Figure (VI, 11) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout dans la nappe phréatique….....102

Figure (VI, 12) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu sulfatique……..….103

Figure (VI, 13) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout de sable broyé dans le milieu sulfatique……..…...104

Figure (VI, 14) : Evolution de la résistance à la compression des déférents pourcentages d'ajout dans le milieu sulfatique….....106

Figure (V, 15) : Influence de type de ciment sur l'évolution de la résistance à la traction dans les déférents milieux….....108

Figure (VI, 16) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu standard…….……109

Figure (V, 17) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout de sable broyé dans le milieu standard…….…...110

Figure (VI, 18) : Evolution de la résistance à la traction pour des déférents pourcentages d'ajout dans le milieu standard……...111

Figure (VI, 19) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans la nappe phréatique……....112

Figure (VI, 20) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans la nappe phréatique……...113

Figure (VI, 21) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout dans la nappe phréatique…….114

Figure (VI, 22) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu sulfatique……....115

Figure (VI, 23) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans le milieu sulfatique……...…….117

Figure (VI, 24) : Evolution de la résistance à la traction des déférents pourcentages d'ajout dans le milieu sulfatique…….118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I, 1) : Description morphologique de sol de Ouargla….....6

Tableau (I, 2) : Résultats analytiques de sol dans la cuvette d'Ouargla [1]……6

Tableau (I, 3): Données pluviométriques annuels à Ouargla [2]……...7

Tableau (I, 4): Données pluviométriques mensuel à Ouargla à l'année 2009 [2]……...….7

Tableau (I, 5): Données pluviométriques mensuel à Ouargla à l'année 2010 [2]…….7

Tableau (I, 6): Températures mensuel minimum et maximum de l'année 2010 à Ouargla [2] 8

Tableau (I, 7): les températures mensuel minimum et maximum (1996-2008) à Ouargla [2]. 8

Tableau (I, 8): Jours des gélées à Ouargla J.Dubief (1926-1950) [3]…….……..9

Tableau (I, 9) : Vitesses de vent à Ouargla (O.N.M, 2006) [31]…….10

Tableau (I, 10) : Evaporation à Ouargla (O.N.M, 2006)[31]……..……..……..10

Tableau (I, 11) : Analyse physico chimique des eaux souterraines de la région d'étude [6]..12

Tableau (I, 12) : Caractéristiques physico-chimique des eaux de quelques régions (nappes de continental intercalaire et du complexe terminal), prélèvement 1998 [1]……13

Tableau (I, 13) : Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines [28]……...14

Tableau (II, 1): Classement normalisé des granulats **[9]**……..……..18

Tableau (II, 2): Classement d'un sédiment selon Intes et al, 1987 [8]……...…19

Tableau (II, 3): Classement d'un sédiment a partir l'indice d'asymétrie [Intes et al, 1987][8]…….19

Tableau (II, 4): Effet de sable de dune broyé de BOUSSAADA au béton sur leurs propriétés physiques……...26

Tableau (II, 5) : Influence de sable de dune broyé (SDB) sur les propriétés mécaniques des bétons (E/C=0.28) **[12]**…….27

Tableau (III, 1) : Constitution du clinker [9]……...…...39

Tableau (III, 2): Caractéristique générales du quartz broyé utilisés dans BUHP [39]…...…40

Tableau (III, 3): Composition chimique du laitier granulé [9]……..……41

Tableau (III, 4) : Composition des différents types du ciment [41]……..…….43

Tableau (III, 5) : Classification des ciments selon la résistance [40]…….44

Tableau (III, 6): Valeurs minimales garanties des résistances de CA [17]…….46

Tableau (III, 7): Valeurs minimales garanties de résistance à la compression du mortier **1/1** (Mpa) [17]…….47

Tableau (III, 8): Ciments à maçonner [17]…….47

Tableau (III, 9) : Chaux hydrauliques naturelles (XHN) [17]…….48

Tableau (IV, 1) : Processus généraux d'altération chimique des liants hydrauliques causes et conséquences [19]…….56

Tableau (IV, 2): Critères de composition de la norme NF P15-317 pour les ciments destinés à la mer et en milieux sulfatiques moyennement agressifs [25]……..62

Tableau (IV, 3): Critère de composition de la norme NF p15-319 pour les ciments destinés aux travaux en eaux à haute teneur en sulfates [26]……..63

Tableau (V, 1): Propriétés chimiques du sable de dune broyé (l'analyse est faite à la société SPA Adwan Chemicals company Mostaganem)……..…71

Tableau (V, 2): Granulométrie de sable de dune broyé……...71

Tableau (V, 3): Caractéristique physiques et chimiques de fumée de silice

(Fiche technique Granitex)……72

Tableau (V, 4): caractéristique de MEDAPLAST SP 40 (fiche technique granitex)…….…73

Tableau (V, 5): Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats……..…..73

Tableau (V, 6): Résultats de l'analyse granulométrique des granulats……74

Tableau (V, 7): Formulations de béton étudiées……..81

Tableau (VI, 1): Porosité accessible et la masse volumique de déférentes formulations…....89

Tableau (VI, 2) : l'effet de sulfate sur les résistances à la compression……107

Tableau (VI, 3): l'effet de sulfate sur les résistances à la traction…….……119

LISTE DES PHOTOS

Photo (I, 1) : Chotte à Hai Ennaser Ouargla (06/03/2012)……..11

Photo (I, 2) : Sabkha à Hai Ennaser Ouargla (06/03/2012)……11

Photo (II, 1): Dune sous forme de SIF [22]……...…….……21

Photo (V, 1) : Bétonnière à axe horizontal au laboratoire EVRENZA, université de Kasdi Merbah, Ouargla…….…..80

Photo (V, 2) : Éprouvette prismatique (7*7*28)……..81

Photo (V, 3) : Eprouvette cubique (7*7*7)…….....81

Photo (V, 4) : Appareil de compression utilisé (LTPS Ouargla)…….82

Photo (V, 5) : Positionnement des éprouvettes à l'appareil de traction (laboratoire EVERNZA université de Kasdi Merbah, Ouargla)……...……...84

Photo (V, 6) : Appareil de traction (laboratoire EVERNZA université de Kasdi Merbah, Ouargla)……...….85

Introduction générale

Introduction générale:

La conception d'un béton est liée à l'environnement dans lequel il va être exposé durant sa durée de vie

A l'heure actuel, les études dans le domaine durabilité du béton dans l'environnement agressif ont conduit à concevoir des bétons avec nouveaux matériaux tout on gardant l'aspect techno-économique et répondent à l'objectif de résistance dans ce milieu pour une durée d'exposition définie, c'est pourquoi l'ajout des matériaux locaux est certainement la voie la plus prometteuse, dans notre étude on choisi le sable de dune broyé comme ajout en raison que:

- Le sable de dune se trouve en abondance dans notre région
- ce type de sable est propre
- Le sable de dune contient plus de 96% de silice
- Les travaux antérieurs montrent que l'ajout de silice (SiO2) contribue positivement à l'amélioration de la durabilité de béton.
- L'ajout de la fumée de silice au béton donne une bonne performance et résistance aux agressions chimiques mais ce béton est encore peu employé à cause de leurs couts élevés

Le sable de dune sera donc une bonne alternative dans la réduction des coûts et dans l'amélioration de la durabilité des ouvrages enterrés de Ouargla

La première action menée dans cette recherche est de répertorier et de synthétiser les documents existants qui touchent de prés ou de loin à la durabilité, la résistance du béton vis-à-vis des agressions chimiques, les propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons avec ajouts.

Le premier chapitre présente, par conséquent, la zone d'étude, alors que le deuxième chapitre présente les caractéristiques morphologique et physico-chimique des sables et l'intérêt de l'incorporation de la silice dans la formulation des bétons.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les ciments et leur emploi.

Le quatrième chapitre présente les connaissances actuelles sur la durabilité. L'objectif de ce chapitre est de comprendre l'origine des dégradations des bétons et de faire une synthèse des caractéristiques et propriétés des bétons normalement durables dans notre zone.

Dans le cinquième chapitre on présente les matériaux utilisés, les méthodes de formulation des bétons, et les différentes méthodes expérimentales réalisées pour caractériser leur résistance ainsi que leur durabilité.

Le sixième et dernier chapitre décrit les résultats de résistance mécaniques et de durabilité acquis durant cette étude et leurs interprétations.

Finalement, ce mémoire s'achève par une conclusion générale des travaux réalisés et présente les perspectives de l'étude de ce béton fabriqué avec ajout de sable de dune broyé.

Chapitre I : Zone d'étude

I.1 Introduction :

La cuvette de Ouargla est située au nord de Sahara, à 800 km de la capitale algérienne. Couvre une superficie de 99000 Ha [1], la majorité de cette superficie est occupée par des grandes étendus des regs, des ergs et des chotts.

Le climat de cette région est de type saharien et se caractérise par des précipitations très faibles et aléatoires et de forte amplitude et de faibles humidités relatives de l'air.

Les fortes températures expliquent la forte teneur en sels en raison de l'évaporation et la remontée des eaux de la nappe phréatique.

Cette situation a créé de graves problèmes à la construction.

I.2 Sol et relief :

I-2-1 Salinité des sols : les sols de la cuvette de Ouargla se caractérisent par la salinité très forte et l'excès d'eau du fait que la nappe phréatique est très proche de la surface du sol.

La salinité à la surface peut atteindre 50 mmhos/cm dont le chlorure et le sodium sont les plus dominants [1]. Le pH des sols de la cuvette est souvent alcalin résultant d'une importante teneur en gypse.

I-2-2 Relief et topographie : la cuvette de Ouargla est très plane (sans exutoire naturel) avec micro dune de sable

I-2-3 Description morphologique du sol [1]**:** le tableau (I, 1) donne une description morphologique du sol de la région de Ouargla.

Tableau (I, 1) : Description morphologique du sol de Ouargla.

Profondeur (cm)	Description
0 - 30	Sec, de couleur jaunâtre de texture sableuse, de structure particulaire avec des efflorescences blanchâtre de sels, consistance et cohésion faibles, poreux, effervescence à Hcl faible.
30 - 50	Humide de couleur jaune-rougeâtre de texture sableuse, de structure particulaire à fondue, consistance et cohésion faibles, effervescence à Hcl faible.
50 - 90	Idem que le précédent ; mais plus humide.
90 - 120	Mouillé, de couleur gris clair de texture sableuse et effervescence à Hcl faible.
Sup à 120	Nappe.

Donc les sols de la cuvette de Ouargla sont caractérisés par l'excés d'eau et des sels lié à la présence d'une nappe phréatique proche de la surface du sol (120 cm).

I-2-4 Analyse du sol dans la cuvette de Ouargla : le tableau (I, 2) présente les résultats de l'analyse du sol dans la cuvette de Ouargla

Tableau (I, 2) : Résultats analytiques du sol dans la cuvette d'Ouargla [1]**:**

Profondeur (cm)	0-30	30-50	50-90	90-120
Argile %	**2**	**0**	**0**	**0**
Limon fin %	**2**	**8**	**15**	**19**
Limon grossier %	**2**	**1**	**1**	**2**
Sable fin %	**68**	**55**	**61**	**34**
Sable grossier %	**26**	**11**	**15**	**11**
Matière organiques %	**0.15**	**0.36**	**0.34**	**0.22**
Azote ‰	**0.04**	**0.09**	**0.1**	**0.04**
Phosphore T ‰	**0.47**	**0.47**	**0.39**	**-**
Phosphore ASS ‰	**51.0**	**93.0**	**112.0**	**-**
Potasse T‰	**0.48**	**0.85**	**0.42**	**-**
Potasse ASS ‰	**35.0**	**35.0**	**12.0**	**-**
(pH)	**7.74**	**8.3**	**8.94**	**7.76**

Ce tableau montre que le sol de Ouargla est de texture sableuse, approche d'être 'un base (pH > 7).

I.3 Climat

I-3-1 Pluviométrie :

La pluviométrie dans la région d'Ouargla est très faible et irrégulière et présente des écarts inter mensuel et inter annuels importants.

Tableau (I, 3): Données pluviométriques annuelles à Ouargla [2]

Mois	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
P en mm	10.6	62.3	47.6	5.9	13.9	32.3	117.8	23.7	203	13.1	46.4	75.9	23.6

Tableau (I, 4) : Données pluviométriques mensuelles à Ouargla à l'année 2009 [2]

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P en (mm)	54.1	1.5	10.6	00.8	NT	2.5	NT	NT	6.3	00.1	NT	NT

Tableau (I, 5): Données pluviométriques mensuelles à Ouargla à l'année 2010 [2]

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P en mm	4.4	TRC	TRC	00.7	1.7	03.0	02.2	TRC	7.7	3.9	NT	NT

NT : néant

Trc : trace

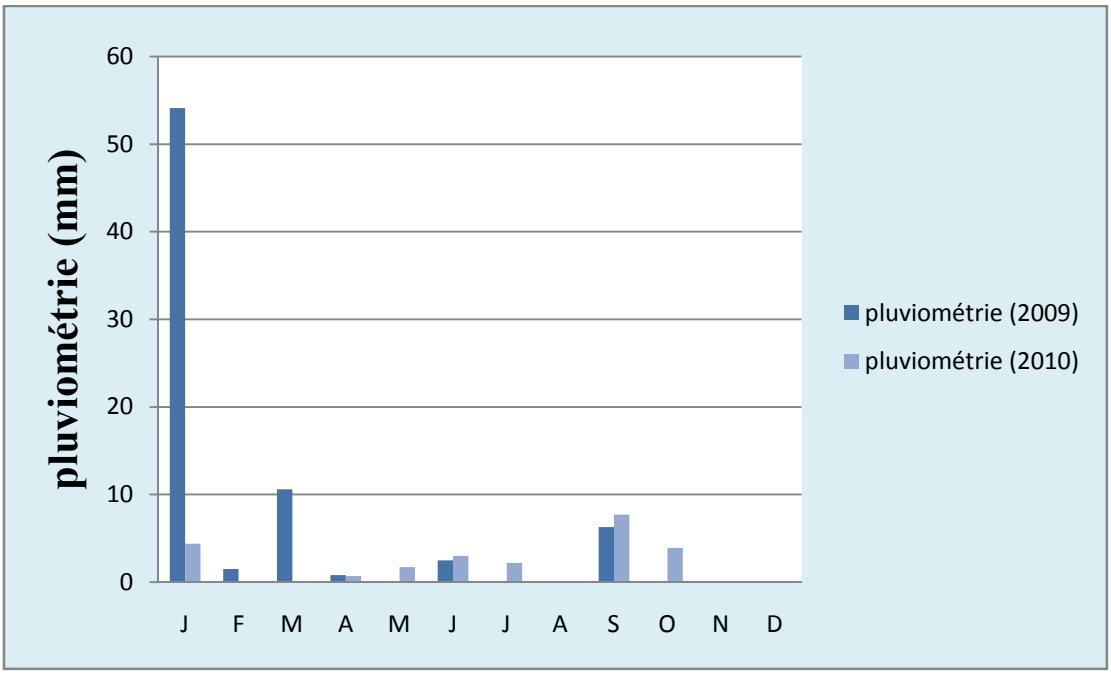


Figure (I, 1) : précipitation mensuel à Ouargla (2009,2010)

I-3-2 Température :

la température dans cette région est très élevée et les amplitudes thermiques entre le minimum et le maximum sont importantes, le tableau (I, 6) et le tableau (I, 7) montrent ceci clairement :

Tableau (I, 6): les températures mensuel minimum et maximum de l'année 2010 à Ouargla [2]

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
MIN (°c)	4	7	9	14	18	23	26	25	22	16	10	6
MAX(°c)	17	20	23	29	33	39	43	42	37	31	23	18

Tableau (I, 7): les températures mensuel minimum et maximum (1996-2008) à Ouargla [2]

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
MIN (°c)	5.40	7.14	10.98	16.27	21.60	26.87	30.03	29.65	25.66	19.10	10.95	6.44
MAX(°c)	20.25	22.5	25.01	32.55	37.75	42.33	43.53	46.55	34.60	34.27	25.74	19.12

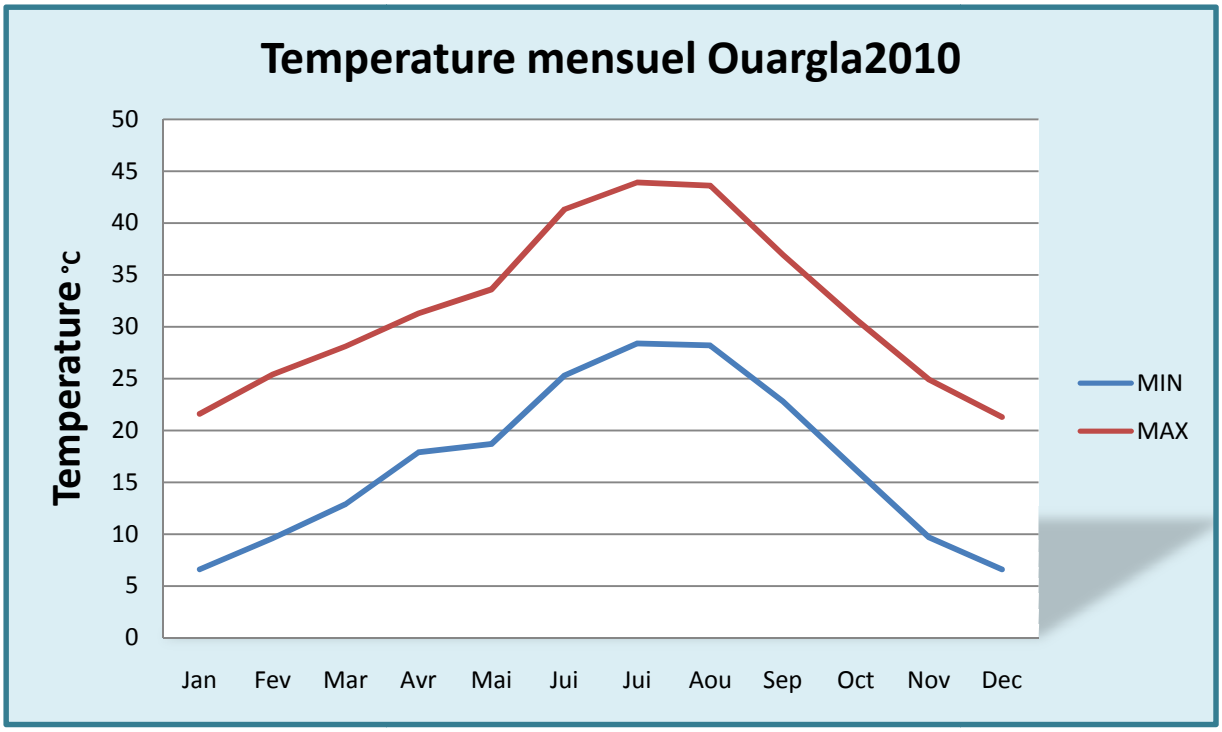


Figure (I, 2): Température mensuel à Ouargla (2010)

I-3-3 Gelées : le tableau suivant présente les gélées à Ouargla d'après Dubief

Tableau (I, 8): Jours des gélées à Ouargla J.Dubief (1926-1950) [3]

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	j/an
jours	2.5	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	5.3

(-) : Néant

Dans la région de Ouargla, la gelée est rare et elle est enregistrée généralement à la fin de novembre jusqu'à mi-février.

I-3-4 Humidité relative de l'air: A Ouargla l'humidité relative de l'air (Hr) est faible et elle varie sensiblement en fonction des saisons de l'année. En effet elle diminue jusqu'à 25.06 % au mois de juillet sous l'action d'une forte évaporation et des vents chauds et elle s'élève en hiver et atteint une moyenne maximale de 64.04 % au mois de décembre (O.N.M, 2006) [31].

I-3-5 Vents : le vent à Ouargla souffle presque pendant toute l'année avec des vitesses variables, importantes de mars à fin de juin, ce qui provoque des vents de sable, alors que le siroco souffle fréquentement à partir de mois de juin.

Tableau (I, 9) : Vitesses de vent à Ouargla (O.N.M, 2006) [31]

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy. annuelle
V.V. (m/s)	3.03	3.46	3.99	4.73	4.88	5.01	4.32	3.98	3.81	3.6	2.90	2.99	3.89

I-3-6 Evaporation : le tableau suivant présente l'évaporation à Ouargla :

Tableau (I, 10): Evaporation à Ouargla (O.N.M, 2006) [31]

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	cumul annuelle
Evap (mm)	85.68	11.08	144.94	201.25	236.38	278.09	307.22	314.36	237.28	174.75	102.73	85.70	2279.46

D'après ce tableau on résume que l'évaporation croit dans les mois d'été et elle atteinte les pointes aux mois de juillet et aout.

I.4 Géologie :

La région d'Ouargla est constituée géologiquement par les formations sédimentaires :

- **Dunes récentes :** ce sont des dépôts sableux
- **Poudigues calcaires :** ce sont des formations importantes reposent sur des schistes**.**
- **Alluvions actuels (**lacs et chotts**)** voir photos (I, 1) et (I, 2)
- **Alluvions regs :** ce sont des formations caillouteuses occupent la partie nord ouest et sud ouest de Ouargla.

Photo (I, 1) : Chotte à Hai Ennaser Ouargla (06/03/2012)

Photo (I, 2): Sabkha à Hai Ennaser Ouargla (06/03/2012)

I.5 Ressources en eau :

Les ressources en eau sont essentiellement constituées par les eaux souterraines ; les nappes phréatiques et du complexe terminal peuvent être alimentées par les eaux de pluie ; la nappe du continental intercalaire (albien).

a) – Nappes peu profondes (CT) :

- Les nappes dans la vallée de Oued Righ divisent en deux ; nappe de sable est artésienne (jaillissantes). Sa profondeur varie de 30 m à 200 m [5], fortement salées (4 à 7g) ; la deuxième dite nappe des calcaires, se trouve à une profondeur comprise entre 200 et 500 m [5]
- La nappe phréatique, de faible profondeur et son exploitation est aisée.
- La nappe de Oued M'Zab (nappe d'inférolux), alimentée artificiellement par des petites ouvrages sur le lit de Oued M'Zab ; pour être canaliser vers des puits d'alimentation.

b) – Nappe du continental intercalaire (albien) :

Elle constitue un réservoir aquifère d'une épaisseur pouvant dépasser plusieurs centaines de mètre. La profondeur de cette nappe passe progressivement de 800 m à Ouargla, 1300 m à Touggourt et 2600 à Biskra.

Les eaux d'albien contiennent généralement moins de 02 g de résidu sec par litre, plus chargé dans la région de Ouargla atteint 6 g à Hassi Messaoud [5].

I.6 L'analyse physico chimique des eaux souterraines de la région d'étude :

Les tableaux suivants présentent l'analyse des eaux souterraines de la région orientale du Sahara Algérien

Tableau (I, 11) : Analyse physico chimique des eaux souterraines de la région d'étude [6]

localité	nappe	désignation	Conductivité mS/cm	pH	Ca^{+2}(mg/l)	Mg^{+2}(mg/l)	Na^{+}(mg/l)	K^{+}(mg/l)	$Hco3^{-}$(mg/l)	Cl^{-}(mg/l)	SO_4^{-2}(mg/l)	F (mg/l)
Ouargla	Phréatique	P128 P121	6.71 4.46	7.73 8.20	707 363	264 235	2472 591	100 21	196 198	2249 1874	2556 2302	0.51 1.07
	Miopliocéne	D1F146 D1F141	3.63 3.10	7.06 9 8.40	364 280	109 145	438 516	22 21	90 74	830 790	650 650	1.72 1.47
	Sénonien	D1F142 D1F128	2.54 1.90	8.33 7.58	285 245	62 99	233 233	14 14	122 124	382 360	650 620	1.37 1.68
	Albien	HADEB K-ERRIH	2.50 2.83	8.06 7.80	196 230	131 127	178 -	22 -	165 63	400 -	580 -	0.63 0.56
Touggourt	Miopliocéne	D38F36 D26F9	5.09 7.78	8.24 8.30	796 768	166 373	455 775	30 35	146 155	1744 3224	900 2310	2.70 3.01
	Albien	Temacine Megarine	2.16 2.81	8.31 8.11	320 380	97 152	145 215	33 34	159 134	699 924	760 800	0.70 0.70

Tableau (I, 12) : Caractéristiques physico-chimique des eaux de quelques régions (nappes de continental intercalaire et du complexe terminal), prélèvement 1998 [1]

Eléments	A Beni Thoure (mg/l)	A Khchem Rih (mg/L)
Ca++	93	132
Mg	227	168
Na	480	375
K	29	26
Cl	895	800
SO4-	725	700
HCO3-	102	159
CO3-	00	00
NO3-	14	0
Somme de cations	45.18 méq/l	37.35 méq/l
Somme des anions	42.22méq/l	39.72 méq/l
Somme des ions	2565	2360
Résidu sec à 110°C	2916	2546
Minéralisation	3241	2694
Conductivité	4.27ms/cm	3.5ms/cm
pH	8.23	7.08

D'après ces tableaux on peut dire que l'eau souterraine de la région de Ouargla est salé et la quantité de sulfate est très élevée.

I.7 Classement d'environnement de milieu selon EN 206 :

La norme EN 206 classes l'environnement de milieu en trois ;

XA1 : environnement à faible agressivité chimique.

XA2 : environnement d'agressivité chimique modérée.

XA3 : environnement à forte agressivité chimique

Le choix de la classe se fait par rapport à la caractéristique chimique conduisant à l'agression la plus élevée.

Lorsqu'au moins deux caractéristiques agressives conduisant à une même classe, l'environnement doit être classé dans la classe immédiatement supérieure, sauf si une étude spécifique démontre que ce n'est pas nécessaire.

Tableau (I, 13) : Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines [28]

Caractéristique chimique	Méthode d'essai de référence	XA1	XA2	XA3
Eaux de surfaces et souterraines				
SO_4^{-2},en mg/l	EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6.5 et ≥5.5	< 5.5 et ≥ 4.5	< 4.5 et ≥ 4,0
CO_2 agressif, en mg/l	Pr EN 13577 ; 1999	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH_4^+,en mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg^{+2}, en mg/l	ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 3000	> 3000 jusqu'à saturation
SOl				
SO_4^{-2} mg/kg [a)] total	EN 196-2 [b)]	≥ 2000 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 12000	> 12000 et ≤ 24000
Acidité ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	N'est pas rencontré dans la pratique	

a) Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10^{-5} m/s peuvent être classés dans une classe inférieure.

b) La méthode d'essai prescrit l'extraction du SO_4^{-2} à l'acide chlorhydrique ; alternativement il est possible de procéder à cette extraction à l'eau si c'est l'usage sur le lieu d'utilisation du béton.

c) La limite doit être ramenée de 3000 mg/kg à 2000 mg/kg, en cas de risque d'accumulation d'ions sulfate dans le béton due à l'alternance de périodes sèches et de périodes humides, ou par remontée capillaire.

I.8 Conclusion:

Le climat de Ouargla est de type saharien et se caractérise par des précipitations très faibles, aléatoire et de forte amplitude et de faibles humidités relatives de l'air

La température dans cette région est très élevée, les amplitudes thermiques entre le minimum et le maximum sont importantes donc le bétonnage à cette région pose aux utilisateurs les problèmes suivants :

- évaporation d'une partie de l'eau de gâchage, ce qui à pour conséquence une aggravation du retrait.
- Chute des résistances finales.

Afin de réduire ces effets nuisibles (plus particulièrement en été), il y a lieu :

- D'utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation
- De traiter par des cures le béton (arrosage du béton, projection sur la surface du béton frais d'un film protecteur)

la norme EN 206 classe la zone de Ouargla en XA2 environnement d'agressivité modérée, en raison que la teneur en sulfate des eaux souterraines est comprise entre 2302 mg/l et 2556 mg/l , d'après tableau (I, 11) et la teneur en sulfate de la nappe est 725 mg/l A Beni Thore et 700 mg/l à Khechem Rih comme l'indique le tableau (I, 12).

Chapitre II : Sable et silice

II.1 Le sable:

II.1.1 Introduction :

Le sable est une roche sédimentaire constitue de petites particules provenant de la déségrégation d'autre roches dont la dimension est comprise entre 0.064 et 5 mm [NA 452], en peut identifier le sable par la granulométrie, comme en peut le diviser en deux type

- Sable naturel obtenu par altération atmosphérique, de formes sphériques plus rondes
- Sable artificiel obtenu par broyage mécanique des roches, composé de grains aux aspérités marquées

II.1.2 Propriétés et caractéristique des sables:

- La capacité à s'écouler, plus les grains sont ronde plus le sable s'écoule.
- Les grains de sable sont assez légers pour être transportés par le vent et l'eau, puis s'accumulent pour former des plages et des dunes.
- La densité massique du sable sec varie selon sa granulométrie et sa composition de 1.7 à 1.9 kg par litre [8].
- Le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature.
- Le sable est composé de déférents minéraux tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles.

II.1.3 Méthode de caractérisation physico-chimique de sable:

Les méthodes utilisées pour caractériser le sable sont :

- L'analyse granulométrique.
- L'observation microscopique optique ou électronique à balayage.
- Une analyse chimique par spectromètre de rayon x.

II-1-3-1 Analyse granulométrique:

C'est une simple opération de division de granulats en fraction chacune contenant de même taille, en pratique chaque fraction contient des grains compris entre deux limites spécifiques correspondant à l'ouverture des mailles des tamis normalisés (d/D).La norme algérienne NA 452 classe les granulats en trois catégories selon leurs dimensions, qui vont de 0.08mm à 80 mm. Le tableau (II, 1) indique le classement normalisé des granulats en fonction de leur taille.

Tableau (II, 1) : Classement normalisée des granulats [9]

Granulat		Ecartement des mailles des tamis	Diamètre des trous des passoires (mm)
Fines		< 0.08	
Sables	Fins	0.08 ÷ 0.315	
	Moyens	0.315 ÷ 1.25	
	gros	1.25 ÷ 5	
Graviers	Fins		6.3 ÷10
	Moyens		10 ÷ 16
	gros		16 ÷ 25
cailloux	petits		25 ÷ 40
	Moyens		40 ÷63
	gros		63 ÷ 80
Moellons			➢ 80

Il existe différents indices qui permettent de caractériser de manière chiffrée les résultats d'une analyse granulométrique [8].

- Le quartile 1 (Q1) est la valeur de diamètre à 25% de la courbe.
- La médiane (Q2) est la valeur de diamètre à 50% de la courbe.
- Le quartile 3 (Q3) est la valeur de diamètre a 75 % de la courbe.
- Indice de classement S0 qui permet d'apprécier le degré de classement d'un sédiment par rapport à la taille des grains, tel que $S0 = \sqrt{(\frac{Q3}{Q1})}$.

A partir de cet indice, les sédiments peuvent être classés comme indiqués dans le tableau (II, 2).

Tableau (II, 2): Classement d'un sédiment selon Intes et al, 1987 [8].

S0	Degré de classement
S0 < 0.5	Extrêmement bien classé
05 < S0 < 1	Très bien classé
1 < S0 < 2.5	Bien classé
2.5 < S0 < 3	Normalement classé
3 < S0 <4	Faiblement classé
4 < S0	Très mal classé

- L'indice d'asymétrie se calcule par la formule $S_k = \frac{Q1XQ3}{(Q2)^2}$

Selon la valeur de S_k on définit trois classes comme le montre le tableau (II, 3):

Tableau (II, 3) : Classement d'un sédiment à partir de l'indice d'asymétrie [8].

Valeur de l'indice Sk	Degré de classement
$S_k < 1$	Le classement est maximum vers les fines
$S_k = 1$	La symétrie est parfaite
$S_k > 1$	Le classement est maximum vers les grossiers.

- **Module de finesse**: Ce paramètre est calculé à partir de l'analyse granulométrique, c'est le centième de la somme des refus (exprimés en pourcentage de poids) aux tamis 0.16 - 0.315 – 0.63- 1.25 - 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 - 80 (NA 2607) [9]. Par la relation suivante

$$Mf = \frac{\sum Rc}{100}$$

Avec Rc : refus cumulé

1 < Mf <1.5 : sable très fin.

1.5 < Mf < 2 : sable fin.

2 < Mf < 2.5 : sable moyen.

Mf > 2.5 : gros sable.

II-1-3-2 Observation microscopique : elle a pour but de déterminer, à l'aide d'un microscope optique ou électronique, les compositions chimique des sables et leurs caractéristiques géométriques.

II-1-3-3 Analyse élémentaire par diffractométrie des rayons x : la diffractométrie par rayon x est une méthode d'analyse d'éléments dont le nombre atomique varie de Z=11 jusqu'à Z=92 dans la gamme de concentration 3 ppm à 100%(10^6ppm). Elle étudie les processus diffusion, d'absorption et d'émission des rayons X.

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

- Broyage de l'échantillon
- Préparation des 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 indépendant de son état chimique, cette méthode fournit des spectres particulièrement simples, mais qui ne nous renseignent que sur la composition élémentaire [8].

II.1.4 Cas particulier, sable de dune: le sable de dune est un sable naturel transporté par le vent et il s'accumule dans les vastes cuvettes, occupe 6% de sa surface, le sable est considéré comme un sédiment détritique meuble composé dont la taille est comprise entre 64µm et 2 mm selon [Pettijohn, 1987], et entre 20µm et 2mm selon [Folk et al, 1957][8]

Les dunes se trouvent en trois formes

- La barkhane est une dune en forme de croissant à convexité au vent. Elle nait là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels voir photo (II, 2).
- La dune parabolique est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation. Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane.
- Siouf des dunes sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité voir photo (II, 1).

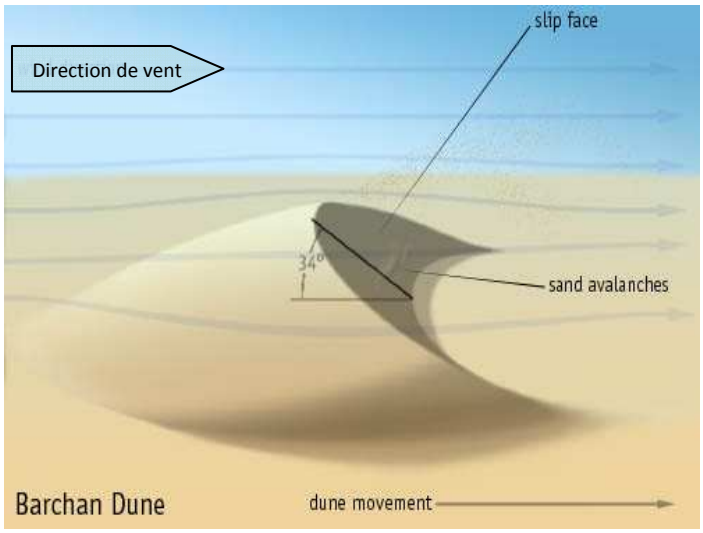


Photo (II, 1): Schéma de barkhane de sable [22]

Le sable de dune est composé de différents minéraux, tel que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles.

II.2 SILICE

II-2-1 Introduction

La silice est le nom d'une famille de silicates minéraux composés de silicium et d'oxygène (SiO2), qui sont les deux éléments les plus abondants de la croute terrestre et elle se rencontre sous plusieurs formes, cristallines ou amorphes suite à leur genèse par précipitation ou fossilisation.

II-2-2 Fumée de silice :

II-2-2-1 Introduction :

La fumée de silice est un sous produit des usines de fabrication d'alliages de silicium (Si) et de ferrosilicium, obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon. Le SiO entrainé par le gaz depuis la zone de combustion des fours s'oxyde et se condense sous forme de particules de silice amorphe (SiO_2) sphériques extrêmement fines voir figure (II, 1) et figure (II, 2), cette finesse accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors d'hydratation du ciment portland, la plus petite particule peuvent combler le vide entre les grains de ciment. Lorsque le four comprend un système de récupération de chaleur, la majeure partie du carbone est brulés et on va obtenir une fumée de silice sans carbone et de couleur clair. Autrement on va obtenir une fumée de silice de couleur foncée (grise).

La densité de fumée de silice est d'environ 2.2, le diamètre de ses particules est compris entre 0.03 et 0.3 µm, sa surface spécifique est d'environ 20000 m2/kg donnée par la méthode d'adsorption d'azote [36].

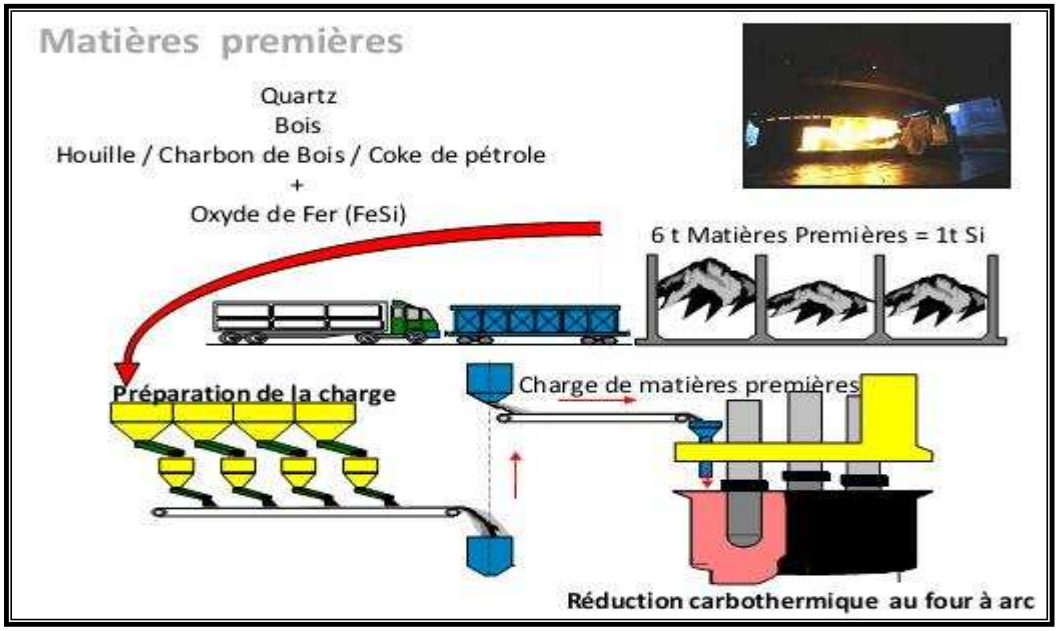


Figure (II, 1) : Matières premières entrent dans la fabrication de fumée de silice [11]

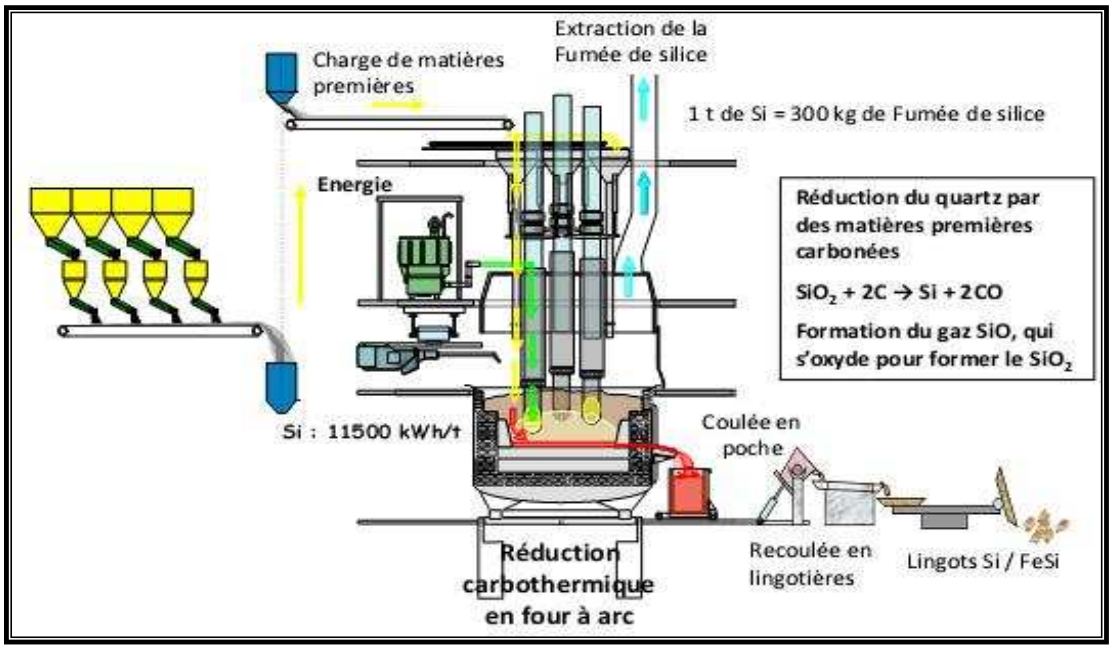


Figure (II, 2) : Formation de la fumée de silice dans le four [11]

II-2-2-2 Morphologie de la fumée de silice : selon la densité de la fumée de silice en distingue trois types, non densifiée, densifiée mécanique, densifiée pneumatique et chacune a son propre caractère, voir figure (II, 3)

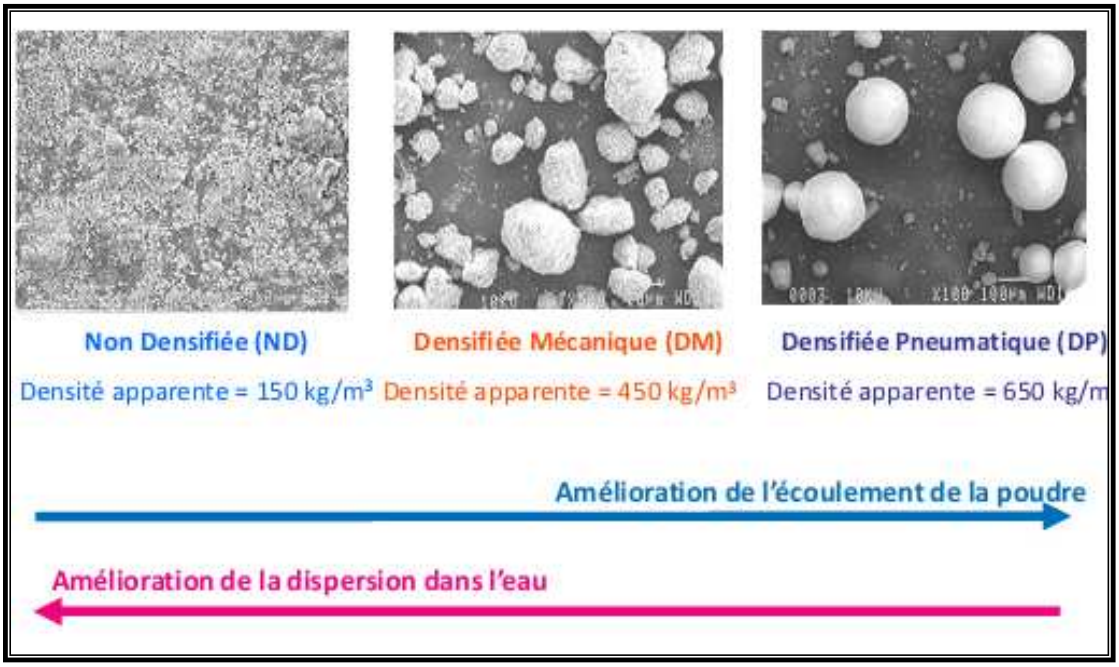


Figure (II, 3) : Morphologie de la fumée de silice [11]

II-2-2-3 Effet de la fumée de silice sur le béton :

a- Réaction pouzzolanique de la fumée de silice :

La silice contenue dans la fumée de silice réagit avec la portlandite formée pendant l'hydratation des C3S et C2S

$$1.1CH + S + 2.8\ H \rightarrow C_{1.1}SH_{3.9} \quad \text{II.1 [53]}$$

***b-* Avantages d'ajout de la fumée de silice au béton**

- *Réduction du ressuage et de la ségrégation.*
- Forte réduction de la porosité voir figure (II, 4).
- Augmentation de la résistance voir figure (II, 5).
- Diminution de la perméabilité voir figure (II, 6).
- Amélioration de la liaison entre pate et granulat.
- Utilisé dans la plupart des bétons de haute performance.

c- **Désavantage d'ajout de la fumée de silice au béton:**

- Diminution de l'ouvrabilité, implique la demande d'utilisation des superplastifiants.
- Il faut bien malaxer pour casser les agglomérats.
- Cher par rapport au ciment.

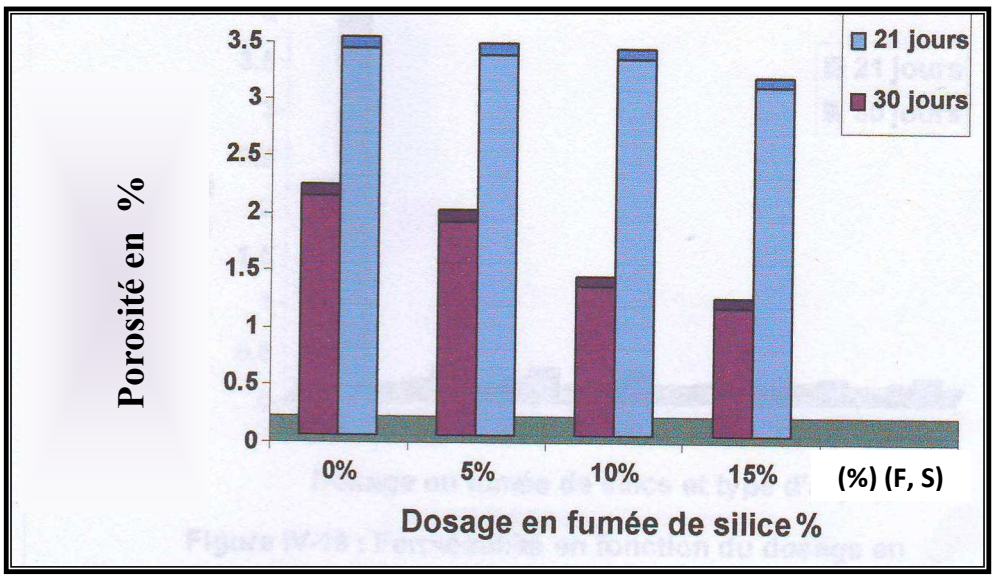


Figure (II, 4) : Porosité en fonction du dosage en fumée de silice [21]

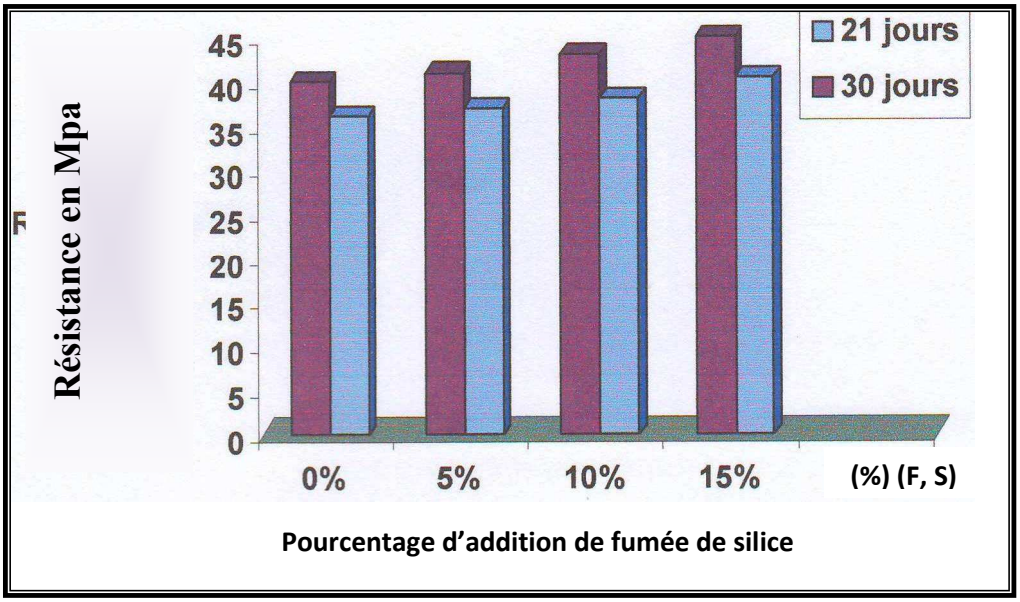


Figure (II, 5) : résistance à la compression en fonction du dosage en fumée de silice [21]

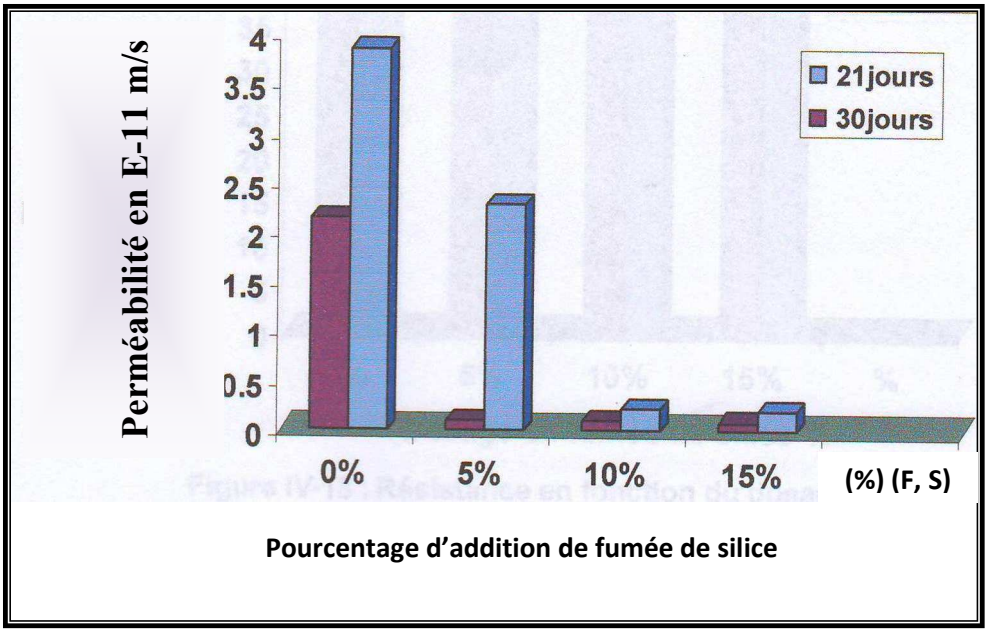


Figure (II, 6) : perméabilité en fonction du dosage en fumée de silice [21]

II-2-3 Sable broyé (le quartz broyé) :

II-2-3-1 Introduction : le sable broyé est une poudre, de diamètre moyen entre 10 et 15 µm, issue de broyage d'un sable très riche en silice (SiO_2 > 98 %) généralement utilisé dans la verrerie.

La méthode la plus connue de production de poudre de silice est le broyage à sec dans des broyeurs à galet ou boulet d'alumine

Il est employé principalement dans la formulation des BUHP (Béton ultra haute performance) traité à une température supérieure à 90 ° C comme complément chimique [8].

Les gisements de sable de silice sont normalement exploités en carrière et le matériau extrait subit parfois un important traitement avant sa commercialisation. Ce traitement à pour objectifs de réduire les impuretés, et d'augmenter la teneur en silice et permet aussi d'obtenir la granulométrie optimale requise pour l'utilisation finale.

II-2-3-2 Propriété physique de béton avec sable broyé :

Pour obtenu un mélange de caractère optimal il y lieu de veiller à ce que :

- La finesse de silice devrait être au moins égale à celle du ciment, une finesse de 600m^2/kg, permet d'augmenter la résistance de 7 à 17 % par comparaison à une silice ayant une finesse de 200 m^2/kg [37].
- Le ciment et la silice doivent être bien mélangés avant d'être introduit dans le malaxeur

➢ **A.bouchouika et M N. Oudjit [12]** trouvent que la présence de sable de dune broyé de BOUSSAADA de finesse 5000 cm^2/g au béton améliore la maniabilité à l'état frais (au Cône d'Abram), et Les masses volumiques à l'état frais et durci sont améliorées en présence de 10% de sable broyé. Par contre l'incorporation de 15 % de sable broyé conduit à un effet inverse. L'absorption capillaire des bétons avec ajout de 10% de sable broyé est inferieure à celle du témoin et du béton à base de 15 % de sable broyé, voir tableau (II, 4)

Tableau (II, 4) : Effet de sable broyé de BOUSSAADA (SDB) au béton sur leurs propriétés physiques [12]

Composition	unité	B1 (Témoin)	B2 (10% de SDB)	B2 (15% de SDB)
Ciment	kg	450	405	382.5
Rapport E/L		0.28	0.28	0.28
1.8 % fumée de silice	kg	8.1	8.1	8.1
Sable de dune broyé SDB	Kg	0	45	67.5
Masse volumique à l'état frais	t/m^3	2.43	2.45	2.42
Masse volumique à l'état durci	t/m^3	2.42	2.44	2.41
L'absorption capillaire	g/cm^3	3	2.8	4
Affaissement	cm	4	9	7

II-2-3-3 Propriétés mécaniques de béton avec sable broyé :

➢ **A bouchouika et M N. Oudjit [12]** ont prévalu que la substitution au ciment de 10 % de sable de dune broyé donne des résistances comparables à celles du témoin à 7 jours d'âge.

A 28 jours les résistances sont supérieures traduisant, outre le rôle de remplissage, la réactivité pouzzolanique des sables de dunes broyés.

Pour une substitution de 15 % de sable de dune broyé, les résistances mécaniques diminuent légèrement en raison de la forte proportion d'inertes contenus initialement au ciment, voir tableau (II, 5)

Tableau (II, 5) : Influence de sable de dune broyé (SDB) sur les propriétés mécaniques des bétons (E/C=0.28) **[12]**

Composition	Résistance à la traction [MPa]		Résistance à la compression [MPa]	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
B1 témoin	4.5	4.9	47.8	56.2
B2 10% SDB	4.0	5.1	46.7	59.0
B3 15 % SDB	3.8	4.5	39.7	55.2

- L'étude de l'influence de l'addition de sable broyé de dune de Biskra sur les béton faite par S.Chabi, B.Mezghiche, L.Zeghich [13] a montré que l'addition de sable de dune broyé influe sur la résistance à la compression du béton comme indiqué à la figure (II, 7) et la figure (II, 8)

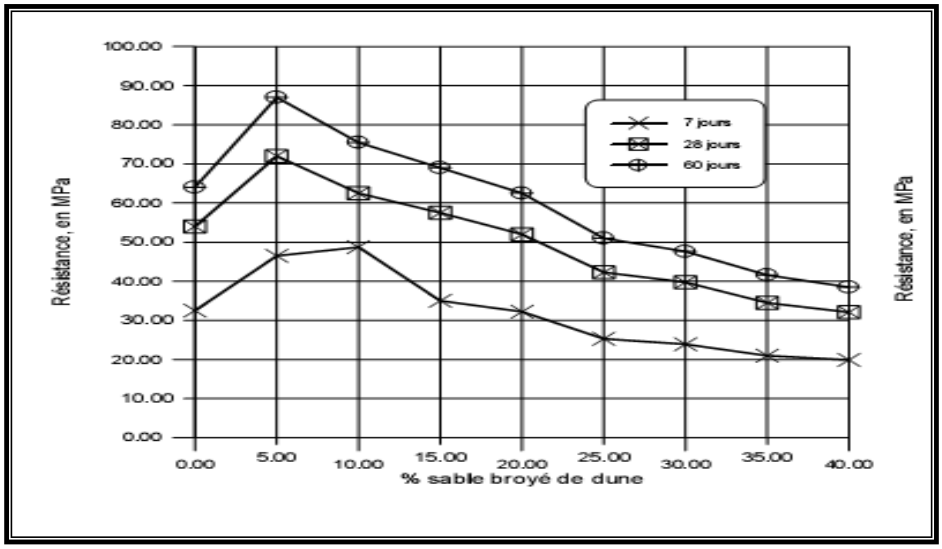


Figure (II, 7) : Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction du temps et du pourcentage en sable de dune broyé avec E/C=0.3 [13].

- **Influence de silice broyée lors de mûrissement à haute pression :** lorsque la silice finement broyée est ajoutée au ciment, le murissement à la vapeur à haute pression est très efficace à cause des réactions chimiques entre la silice et le Ca(OH) libéré par l'hydratation du C3S (figure (II, 9)), les ciments riches en C3S ont une plus grande capacité à développer une résistance élevée lorsqu'il murit à haute pression que ceux à teneur élevée en C2S. [38]

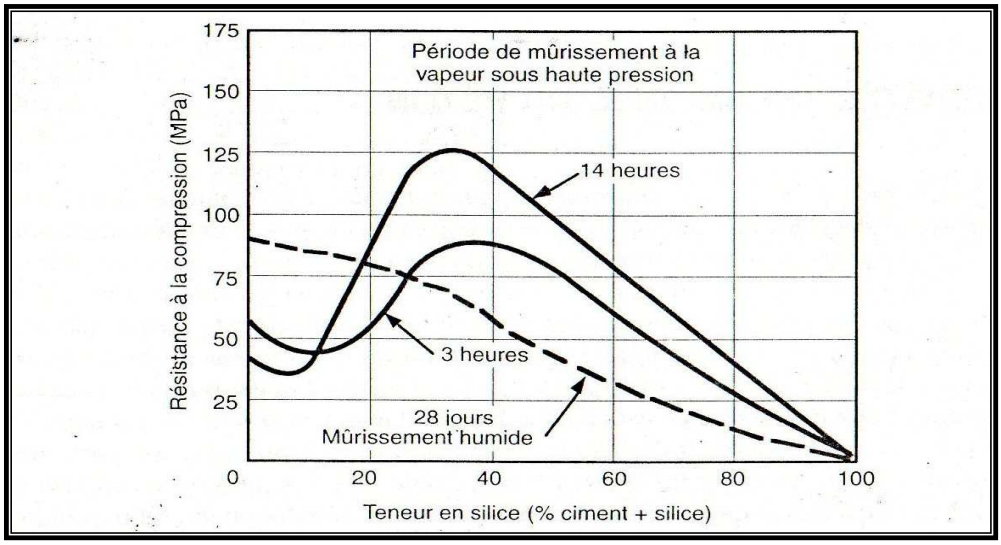


Figure (II, 8): Influence de la teneur en silice finement broyée sur la résistance d'un béton mûri à la vapeur à haute pression (âge au début du mûrissement : 24 heures ; température de murissement : 177 °C) [38]

➢ **Tafraoui Ahmed [08]** a expliqué le comportement mécanique particulier des BUHP et BUHP traités thermiquement à partir de la nature cristalline des phases des hydrates ; le diagramme de Verbeck et Copeland montre les déférentes phases de C-S-H formées sous un traitement thermique en fonction du rapport molaire CaO/SiO_2 noté C/S, voir figure (II, 10)

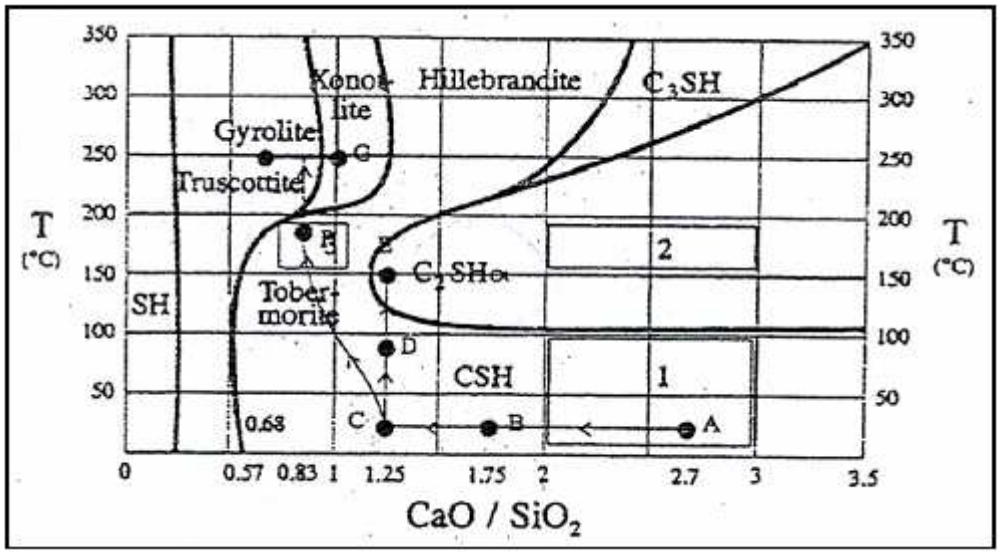


Figure (II, 9) : Diagramme de phase des C-S-H de Verbeck et Copland [8]

A 20 ° C, le rapport C/s du ciment anhydre correspond à une valeur de 2.7 (point A) qui diminue à 1.75 (point B) durant l'hydratation et la formation des C-S-H. si l'on ajoute de la fumée de silice, et grâce à la réaction pouzzolanique, on passe d'un rapport C/S de 1.75 à 1.25 (point C).

Si on chauffe ce composée (point C) au-delà de 100° C, on forme une phase cristalline $C_2SH\alpha$ (point E) dont les propriétés sont très médiocres.

Pour atteindre les points F et G qui correspondant à la formation de tobermorite et de xonotlite (hydrates présentant de très bonnes propriétés mécaniques), on ajoute du quartz broyé en quantité qui va réagir lors du chauffage au delà de 150°C (ver les 180°C), pour atteindre des hydrates de rapport C/S de 0.83. [8]

II-2-3-4 Autres utilisations de sable broyé siliceux :

- **Silice cristalline :** sous forme de quartz et de cristobalite, est utilisée à l'état le plus finement divisé comme charge de renforcement dans les produits; peinture, plastiques, caoutchouc, mastics et colles. La poudre de silice apporte une résistance à l'abrasion et à l'attaque chimique.
- **Céramique :** les céramiques à haute technologie contiennent de la poudre de silice finement broyée
- **Verre:** la silice est le composant principal de presque tous les types de verres.
- **Pièces de fonderie :** la silice cristalline possède un point de fusion supérieur à celui du fer, du cuivre et de l'aluminium qui permet de réaliser des pièces moulées par coulage de métal en fusion dans des moules constitués de sable de silice et d'un liant.
- **Produits de construction :** parmi les nombreuses applications de sable et poudres de silice on peut citer la fabrication du ciment, les enduits, les produits de ragréage, les blocs de silice et de béton cellulaire, les colles pour les revêtements de toiture et de sol.
- **Secteur chimique** : le sable de cristobalite et le quartz de pureté élevée sont utilisés pour fabriquer des produits chimiques à base de silicium, comme le silicate de sodium, le gel de silice, les silicones, le tétrachlorure de silicium, et le silicium pur.
- **Industrie métallurgique :** le quartz est utilisé comme matière première dans la production de silicium métal et de ferrosilicium. Le silicium métal sert à fabriquer des alliages à base d'aluminium, de cuivre et de nickel. Le ferrosilicium est l'un des composants des alliages de fer et d'acier.

II.3 Broyage :

II.3.1 Définition : le broyage est un procédé pour réduire les dimensions des grains et les rendre poudre, la matière sera plus réactive sachant que plus que la surface spécifique est élevée plus que la réactivité est importante.

II.3.2 Importance du broyage :

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker et les additions doivent être broyés très finement, cette finesse est caractérisée par la surface spécifique, exprimée en (cm^2/g) puisque :

- l'hydratation démarre à la surface des grains.
- la vitesse d'hydratation dépend de la finesse du ciment.

- pour un développement rapide de résistance, une finesse élevée est nécessaire.
- l'augmentation de la finesse améliore légèrement la maniabilité du béton.

Par ailleurs :

- plus le ciment est fin, plus il se détériore rapidement lorsqu'il est exposé à l'air ambiant.
- une augmentation de finesse accroit la quantité de gypse nécessaire pour contrôler la prise puisque dans un ciment fin il y'a plus de C3A disponible pour l'hydratation initiale.
- la teneur en eau d'une pate de ciment de consistance normale est d'autant plus grande que le ciment est plus fin.
- La finesse est une propriété fondamentale du ciment qui doit être contrôlée avec précaution pour garantir qu'il ne contient pas un excès de grain grossiers qui, en raison de leur surface relativement faible par unité de masse, jouent un rôle négligeable dans le processus d'hydratation et de développement de résistance.
- les grains de dimension inférieure à 4µm sont particulièrement riches en SO_3 et en alcalis.
- Les grains de dimension supérieure à 30 µm contiennent une grande proportion de C2S.
- Les grains de dimension compris entre 4 et 30µm sont riches en C3S. AITCIN et COLL [8]

II.3.3 Modes de broyage :

II.3.3.1 Le mode de broyage par percussion : ce mode de broyage permet de produire une distribution granulométrique monomodale

II.3.3.2 Le mode de broyage par écrasement : les grains sont soumis à des forces normales.

II.3.3.3 Le mode de broyage par frottement : dans ce mode la force appliquée est majoritairement tangentielle à la surface de la particule, cela mène à la production de beaucoup de fine particule due à l'érosion progressive de la surface des grains, dans ce cas la poudre obtenue par ce mode présente une distribution de grains bimodale, car elle contient des grains dont la taille est proche des grains initiaux, ainsi des grains très fins.

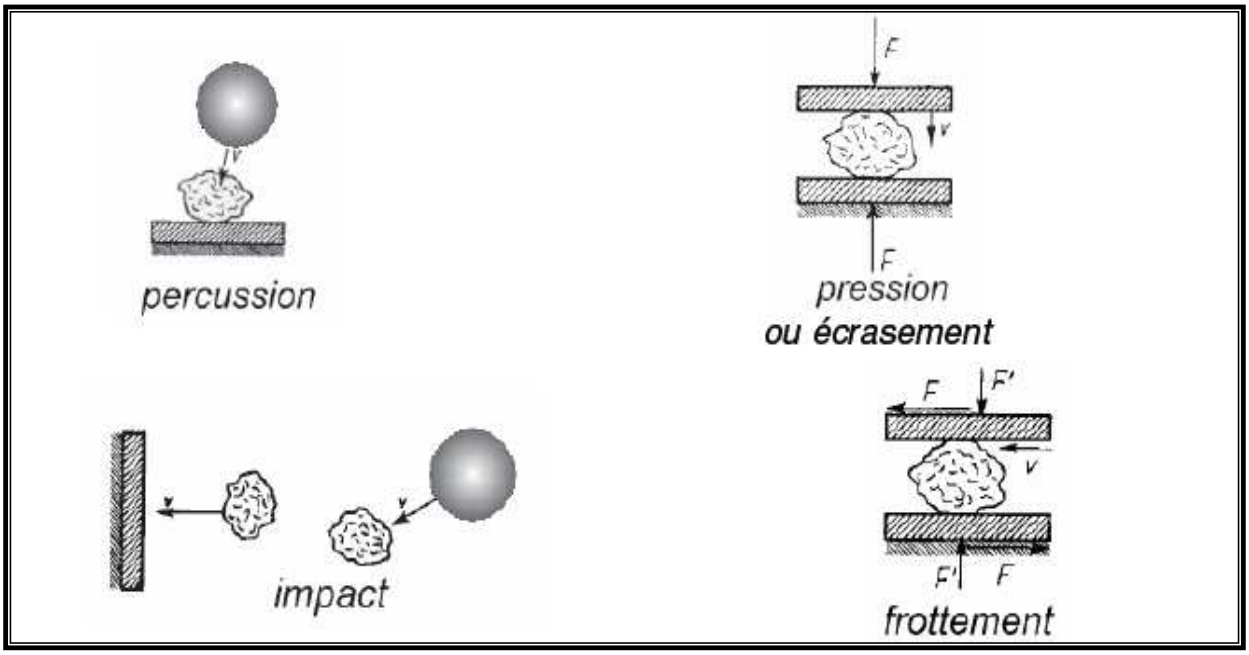
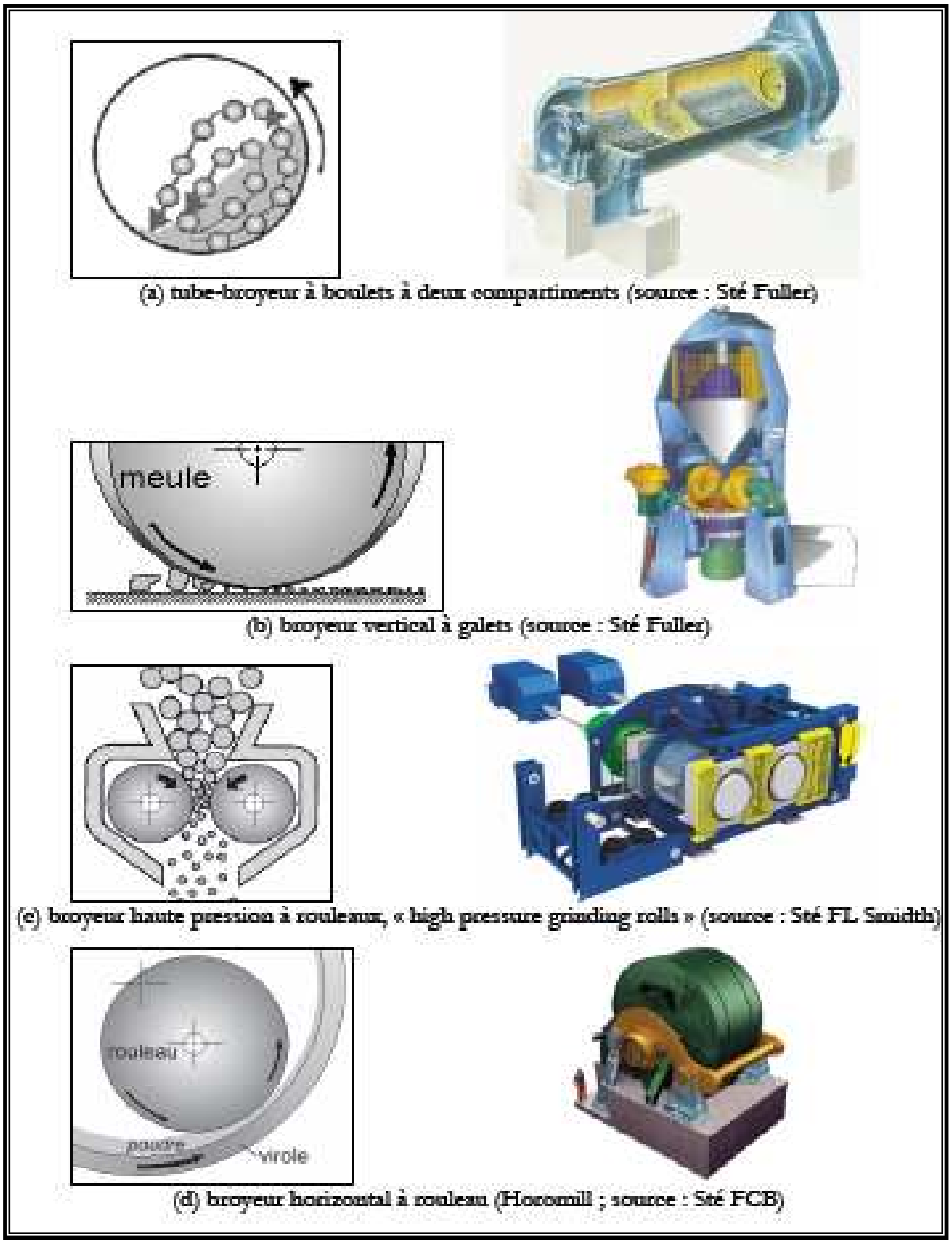


Figure (II, 10): Les modes de broyage [14]

II.3.4 Systèmes utilisés pour le broyage: la connaissance de broyabilité des matériaux, facilite le choix des appareils de broyage et les conditions de broyage, pour assurer le broyage des grains en poudre. Plusieurs types de broyeurs sont employés :

Le tube-broyeur à boulets (utilise les modes d'impact, de percussion, et de frottement), le broyeur vertical à galets (mode de pression et le frottement), le broyeur à haute pression à rouleaux et le broyeur horizontal à rouleau (utilise la pression et le frottement).



(a) tube-broyeur à boulets à deux compartiments (source : Sté Fuller)

(b) broyeur vertical à galets (source : Sté Fuller)

(c) broyeur haute pression à rouleaux, « high pressure grinding rolls » (source : Sté FL Smidth)

(d) broyeur horizontal à rouleau (Horomill ; source : Sté FCB)

Figure (II, 11) : Systèmes utilisés dans le broyage [14]

II.3.5 La relation entre la finesse et l'activité :

L'étude faite par BENIA MOUNIR [15] montre qu'il y'a une relation entre la finesse de mouture et l'activité représenté par la résistance (figure (II, 13), (figure II, 14), figure (II, 15))

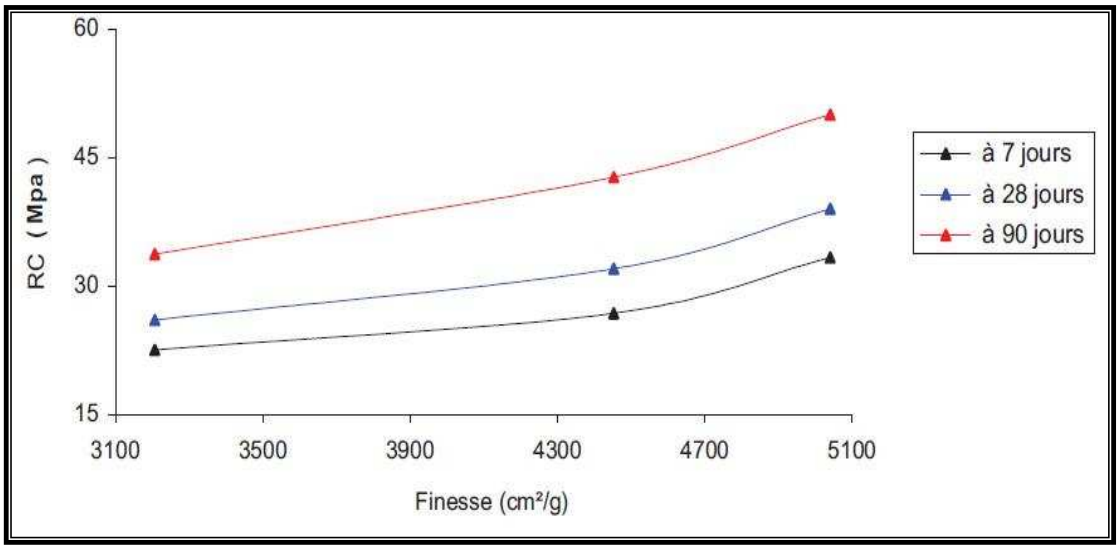


Figure (II, 12) : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Ghozlane [15]

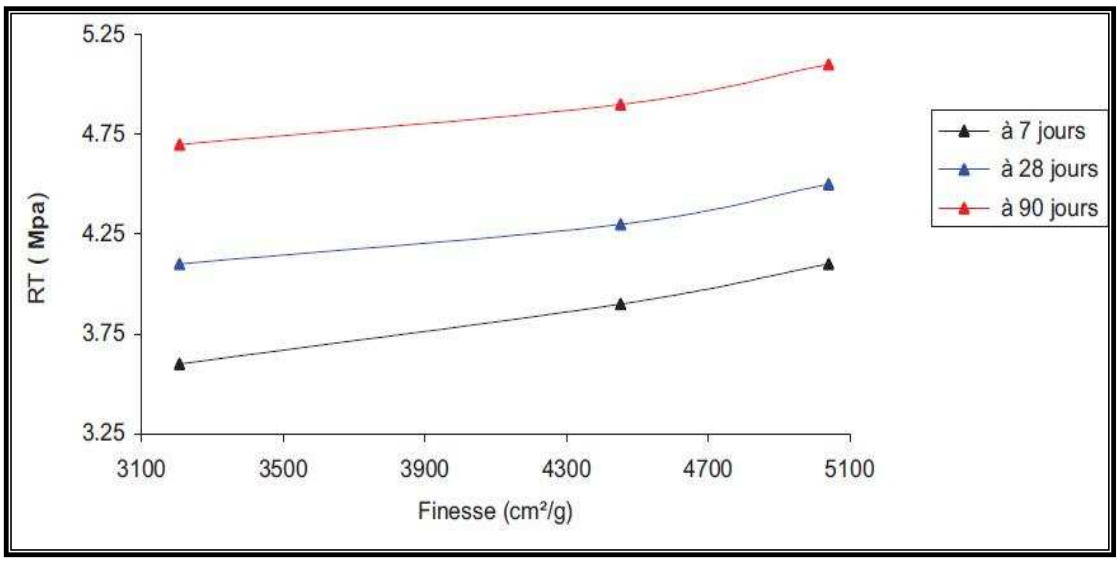


Figure (II, 13) : Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de sour-ghozlane [15]

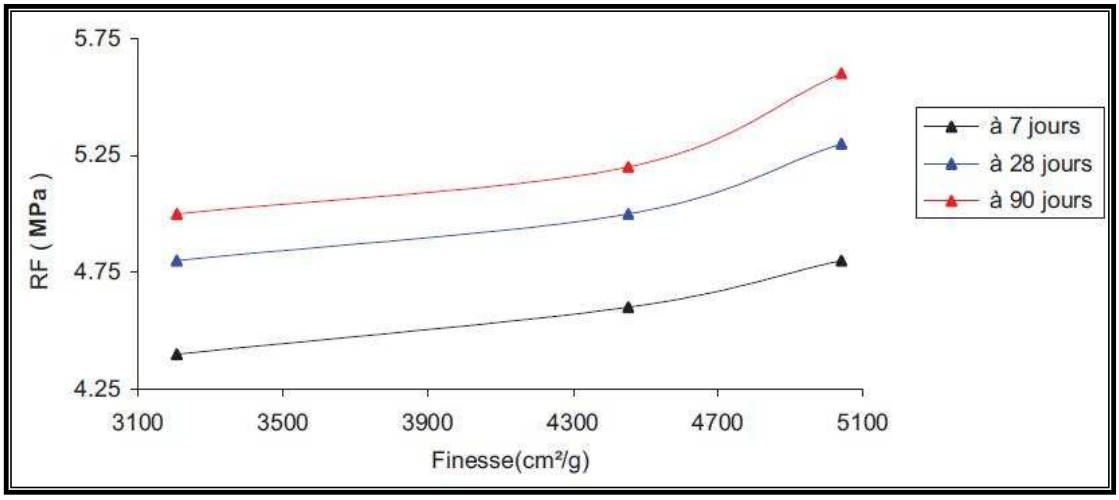


Figure (II, 14) : Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de sour-ghozlane [15]

Conclusion :

- L'ajout de la fumée de silice au béton contribue positivement sur sa performance mécanique.
- la finesse de mouture influe positivement sur la résistance de béton
- les travaux antérieurs cités au dessus ont montré que l'ajout de sable de dune broyé au béton améliore sa performance.

Etant donné que le sable de dune est en abondance dans notre région et que les travaux antérieurs montrent l'efficacité de silice l'élément essentiel dans le sable, on peut utiliser ce type de sable comme ajout dans le béton et faire la comparaison avec celui obtenu par ajout de la fumée de silice.

Chapitre III : Appuis sur les ciments

III.1 Définition : Les ciments sont des liants hydraulique en forme des poudres fine chimiques constituées de silicates et d'aluminates de chaux qui s'hydratent en présence d'eau pour donner naissance à un matériau solide qui conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [9]

III.2 Fabrication du ciment portland:

Le ciment portland est fabriqué essentiellement à partir de matière calcaires, comme le calcaire ou la craie (environ 80 %) [9] et a partir d'alumine et silice présentent dans l'argile et schistes argileux (environ 20%). [9]

Le procédé de fabrication du ciment consiste essentiellement à broyer des matières premières, à les mélanger dans certains proportions puis à les cuire dans un four rotatif à une température atteignant environ 1450 °C [9] à la quelle le matériau fond partiellement jusqu'à former le clinker.

Le clinker est refroidi puis broyé en poudre fine, opération au cours de la quelle on ajoute le gypse (indispensable pour différer la prise) et des additions minérales éventuelles (pour certains ciments composés), le produit ainsi obtenu constitue le ciment portland universellement utilisé dans le monde.

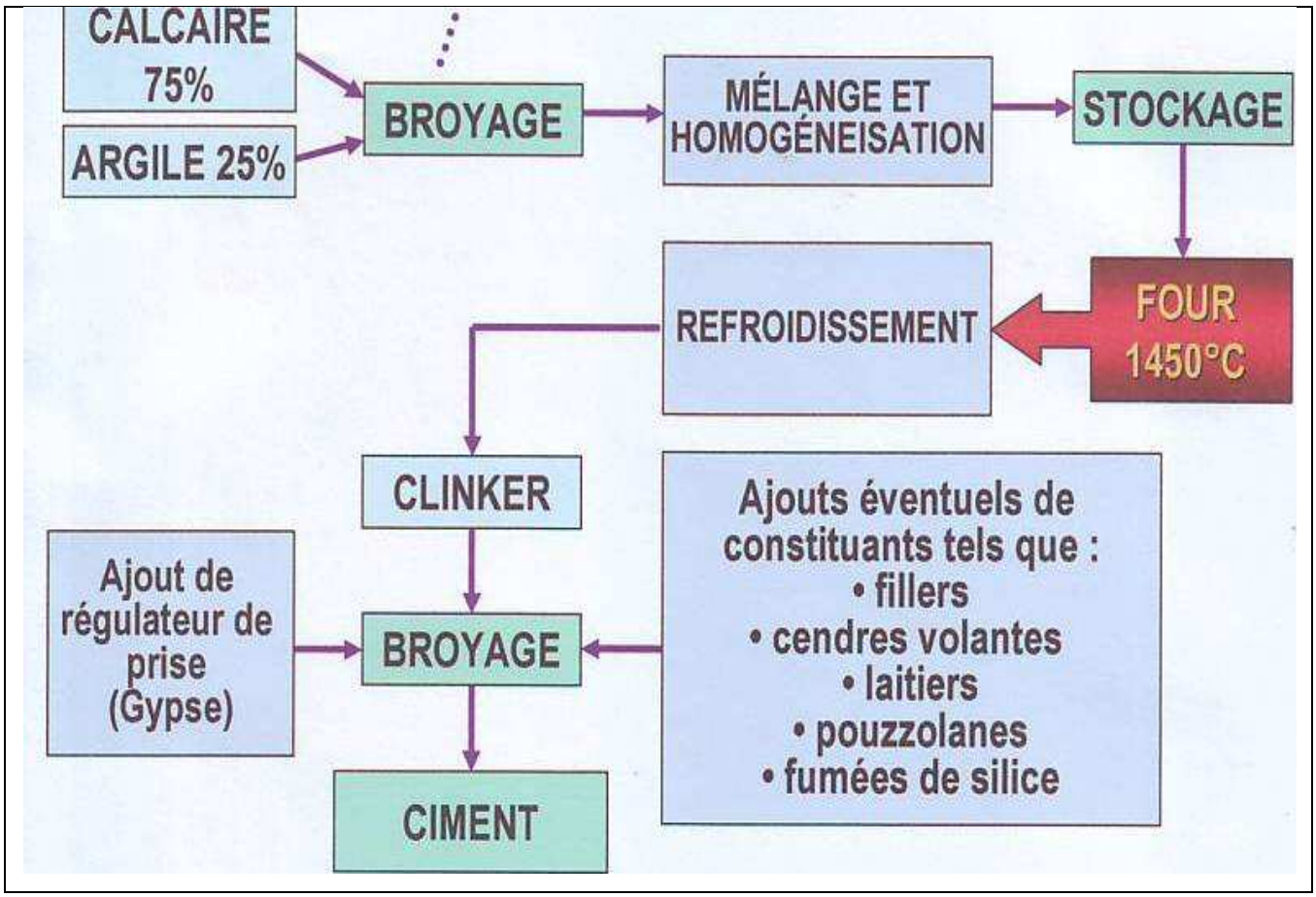


Figure (III, 1) : Fabrication du ciment [16]

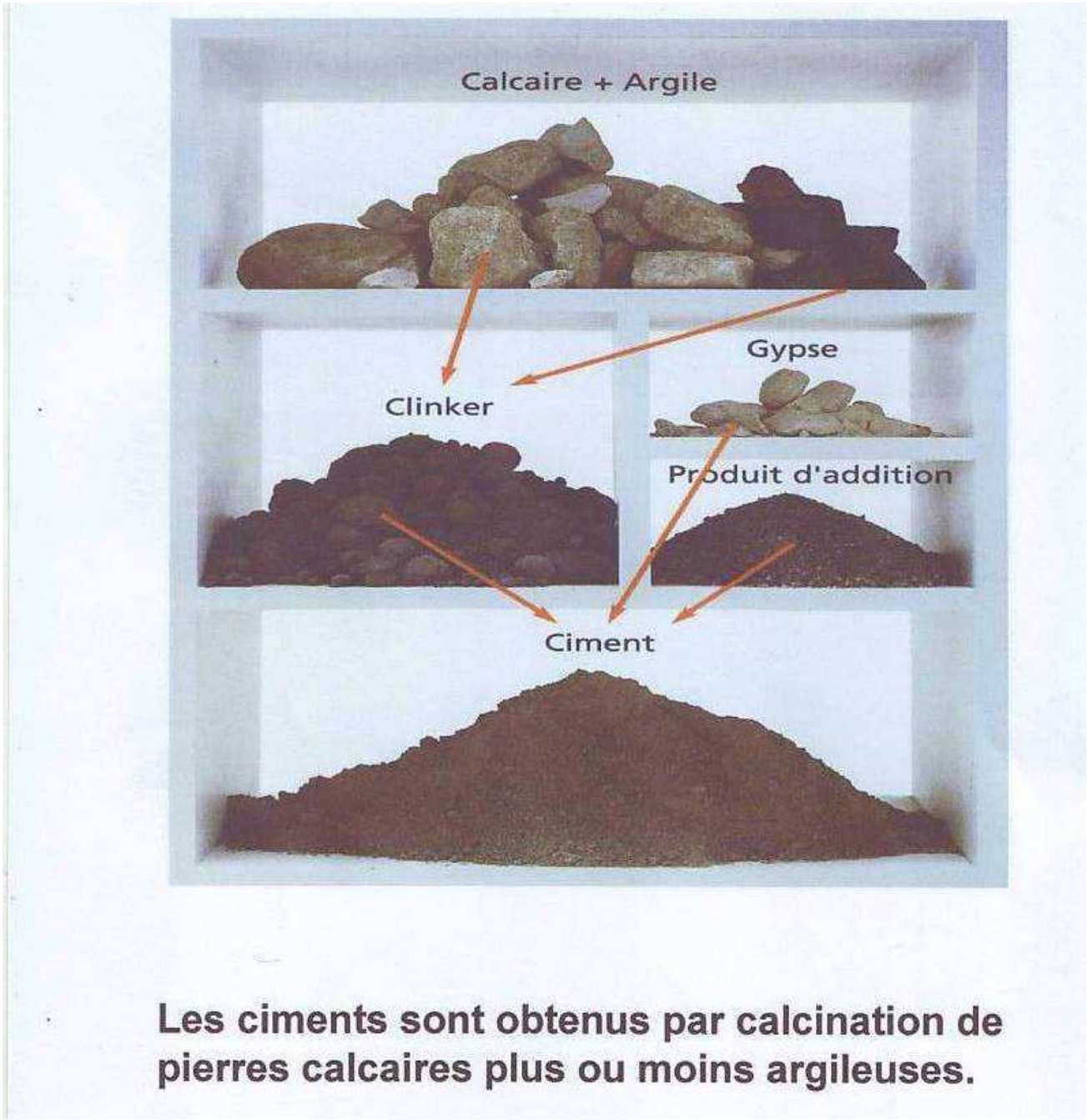


Figure (III, 2) : Les composants des ciments [16]

III.3 Constituants de base du ciment:

Le clinker: obtenu par cuisson d'un mélange de 80 % de calcaire et 20 % d'argile.

A l'issu de la cuisson les éléments simples CaO, SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3 se combinent pour donner les constituants minéraux ci-après dans la zone de clinkèrisation (quatre phases cristallines)

- $3CaOSiO_2$ (C3S), c'est le silicate tricalcique (Alite).
- $2CaOSiO_2$ (C2S), c'est le silicate bicalcique (Bélite).
- $3CaOAl_2O_3$ (C3A), c'est l'aluminate tricalcique (Celite).
- $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$ (C4AF), c'est l'Aluminate – ferrite tétra calcique.

Tableau (III, 1) : Constitutions du clinker [9]

	Alite	Bélite	Célite	
			C3A	Félite
Etendue	50 – 75	7 – 30	0 – 18	4 – 20
Moyenne	55	23	10	12

III.4 Constitutions secondaires et ajouts minérales:

Toutes les additions de finesse supérieure à celle des ciments peuvent être utilisées en substitution de ciment afin d'améliorer certaine propriété ou pour conférer des propriétés particulières du béton.

Le type d'addition peut jouer plusieurs rôles en tant que:

- Complément de la granulométrie, augmentation de la compacité, amélioration de la cohésion.
- Activant améliorant des propriétés physiques et chimiques de la pate liante.

III.4.1 Additions calcaires : les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage ou sélection provenant de gisements de roches.

Les fillers sont en général chimiquement inerte mais ils présentent certaines propriétés hydrauliques, le calcaire présente une réaction avec certain composés développés au cours d'hydratation, comme le $CaCO_3$ qui réagit avec le **C3A** et le **C4AF** pour former le $3CaO.Al_2O_3.11H_2O$ et joue un rôle de site de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker qu'il accélère.

III.4.2 Filler siliceux : peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique et leur couleur est généralement claire le rend favorable à l'obtention des parements architectoniques.

III.4.3 Quartz broyé :

Dans le BUHP généralement, on utilise le quartz broyé dont les caractéristiques générales sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (III, 2): Caractéristique générales du quartz broyé utilisés dans BUHP [39]

Masse volumique (kg/m^3)	2650
Surface spécifique (cm^2/g)	Entre 1000 et 2000
% SiO_2	> 98
Dimension des grains (µm)	Entre 5 et 25

III.4.4 Laitier de haut fourneau: le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adapté provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau sous forme de grain (0/5 mm) [NF EN 197-1] dont la composition chimique est reproduite au niveau du tableau (III, 3).

Tableau (III, 3): Composition chimique du laitier granulé [9].

Eléments	Pourcentage
CaO	40 ÷ 50
SiO_2	26 ÷ 32
Al_2O_3	12 ÷ 20
MgO	02 ÷ 06

La composition du laitier granulé doit être constituée d'au moins deux tiers en masse de la somme (CaO, MgO, SiO_2).

Le rapport en masse de $\frac{CaO+MgO}{SiO_2}$ doit dépassé un (1) [10].

La prise de laitier est lente et nécessite un activant, c'est pourquoi il n'est jamais employé pur, on l'utilise en combinaison avec du ciment portland qui assure l'activation chimique mais une fois l'hydratation de laitier démarre, contribue aux qualités du béton durci; La pate de ciment au laitier durcie présente une moindre quantité de chaux (portlandite), par rapport au ciment ordinaire, les ciments au laitier sont conseillés pour le béton soumis à des ambiances agressives.

III.4.5 Fumées de silice: elles sont utilisées comme ajout au ciment, (pour plus d'explication voir chapitre II.2 pp 22- 26).

III.4.6 Cendres volantes: les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé et peuvent être de nature silicieuse ou calcique.

a- Cendre volante calcaire: la cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolanique, elle est constituée essentiellement d'oxyde de calcium (CaO) réactif, de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3), le reste contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

b- Cendre volante siliceuse: la cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée de particules principalement sphériques ayant des propriétés pouzzoulaniques; elle est constituée essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine, le reste contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

c- Effet de cendres volantes : les cendres volantes contribuent à la

- Réduction de la chaleur d'hydratation.
- Diminution de ressuage.
- Réduction les risques de ségrégation.
- Diminution de la perméabilité de gaz et liquide.
- Amélioration de la durabilité aux milieux agressifs.

III.4.7 Pouzzolane: les matériaux pouzzoulaniques sont des substances naturelles silicieuses ou silicio-alumineuses ou une combinaison de celles-ci.

Les matériaux pouzzolaniques ne durcissant pas par eux mêmes lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau mais lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)) dissous.
Les pouzzolanes sont composées essentiellement de SiO_2 réactif et d'Al_2O_3, la partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres d'oxydes. Les matériaux pouzolaniques doivent être convenablement préparés c'est-a-dire sélectionnés, homogénéisés, séchés traités thermiquement et réduits en poudre en fonction de leur production [18]

III.4.8 Sulfate de calicium (gypse : $CaSO_4.2H_2O$) : permet de régulariser la prise il est ajouté avec une proportion de 3 à 5% et avec SO3 < 3.5 % dans le ciment, le pourcentage optimal de gypse est calculé par la formule suivante

$$SO_3opt = 0.093\ C3A + 1.71\ Na_2O + 0.94\ K_2O + 1.23.$$ [10]..... (III, 1)

III.3 Classification de ciment courant :

II.5.1 Classification selon la composition : les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux indiqués dans le tableau (III, 4)

Tableau (III, 4) : Composition des différents types de ciment **en (%)** [41]

Désignation	notation	clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	pouzzolanes	Cendres volantes		Schiste calcinés	calcaires	Constitutions secondaires
						siliceuses	Calcique			
Ciment portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Ciment portland Composé	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35							
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
Ciment pouzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10-35			-	-	-	0-5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-65			-	-	-	0-5
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30		18-30		-	-	-	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0-5

II.5.2 Classification selon la résistance :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; et trois sous classes associées « R » pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées voir Tableau (III, 5).

Tableau (III, 5) : Classification des ciments selon la résistance [40]

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	Au jeune âge		A 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	Mini	Maxi	(µm/m)	(min)	(min)
32.5		(17.5)	/32.5 (30)	≤ 52.5	≤ 800	/90	≤ 10
32.5R	/13.5 (12)	/ ≤	/32.5 (30)	≤ 52.5	≤ 1000	/90	≤ 10
42.5	/12.5 (10)		/42.5 (40)	≤ 62.5	≤ 1000	/60	≤ 10
42.5R	/20 (18)		/42.5 (40)	≤ 62.5	≤ 1000	/60	≤ 10
52.5	/20 (18)		/52.5 (50)			/60	≤ 10
52.5R	/30 (28)		/52.5 (50)			/60	≤ 10

III.6 Ciments adaptés à des usages spécifiques :

III.6.1 Ciments résistant aux sulfates : ce ciment ayant un faible pourcentage de C3A,

- La norme britannique BS 4027 :1991 stipule que le pourcentage maximal de C3A doit être de 3.5% et celui de SO_3 limité à 2.5%

- La norme NF P 15-301 limite la teneur de SO_3 pour les CPA-CEM I à 3.5% si le taux de C3A est inférieur à 3%, et à 2.5% si le taux de C3A entre 3 et 5%.

- Aux états unis ce ciment est connu comme ciment de V ; il est définit dans la norme ASTM C150-94, qui limite le pourcentage de C3A à 5% ainsi que la somme des pourcentages (C4AF+2(C3A)) à 25 % et le pourcentage de magnésie est limité à 6%.

- La norme NF P 15-301 limite le C3A à 5% et la somme (C4AF+2(C3A)) à 20 % et à 4 % pour la magnésie.

- Plus le rapport AL_2O_3/Fe_2O_3 est faible, plus que l'action de sulfate de calcium sur le ciment hydraté est faible.

- Il est possible de réduire la quantité de AL_2O_3 dans les matières premières, peut être par l'ajout du Fe_2O_3 au mélange pour augmenter la quantité de C4AF aux dépens du C3A comme le ciment Ferrari ayant un rapport AL_2O_3/Fe_2O_3 très faible, les producteurs de ce ciment remplacent l'oxyde de fer par l'argile.

- Les faibles proportions de C3A et de C4AF signifient une quantité élevée de silicates dans le mélange, ce qui donne au béton une résistance à la compression élevée à moyen et à long termes, mais une faible résistance initiale due à la grande proportion de C2S qui forme la majeure partie des silicates [10].

III.6.2 Ciments susceptibles d'être conforme aux exigences du CRS :

- La plupart de CHF-CEM III/A et B, CLK-CEM III/C, et CLC-CEM V/A et B ;
- Certains CPA-CEM I, CPJ-CEM I et B qui satisfaisant certains exigence notamment leur teneur en aluminate tricalcique.

III.6.3 Ciment pour travaux à la mer PM (NF P 15-301) : les bétons exposés à l'eau de mer doivent avoir un rapport E/C suffisamment faible, et on utilise les ciments courants suivants :

- La plupart de CHF-CEM II/A et B, CLK-CEM III/C ET CLC-CEM V/A et B.
- Certains CPA-CEM I, CPA-CEM-II/A et B ont des teneurs en aluminate tricalcique faibles.

III.6.4 Ciment à teneur en sulfate limitée pour béton précontraint CP : la teneur en ions sulfures S^{2-} limités conformément à la norme (NF EN 196-2), 0.7 pour CP1 et 0.2 pour CP2, cette limitation se réfère à un risque de réaction entre les ions S^{2-} et le fer.

III.7 Ciments Spéciaux :

III.7.1 Ciment alumineux fondu : est un liant hydraulique riche en alumine dont le principal constituant est l'aluminate monocalcique et présente les caractéristiques suivantes :

- le temps de prise compris entre 2 h et 3 h 30 [17], sa résistance à la compression augmente très rapidement.
- son hydratation ne donne pas lieu à la formation d'hydroxyde de calcium, ce qui donne un béton résiste aux eaux pures, aux milieux sulfatés, et à l'eau de la mer.

Tableau (III, 6) : Valeurs minimales garanties des résistances de CA [17]

Valeurs minimales garanties de résistance à la compression et à la flexion du ciment (MPa)					
	6 h	**24 h**	**28 j**	Evolution probable des résistance (MPa) à la compression et à la flexion (MPa) d'un béton, obtenus lors d'essais sous cycle thermique simulant un échauffement, lié a une hydratation de masse.	
Compression	**30**	**50**	**60**		
Flexion	**4.0**	**5.5**	**6.5**		
	6 h	**1 j**	**7 j**	**28 j**	Résultats obtenus sur un microbéton de granulats silico-calcaires 0-8 mm dosé à 465 kg/m^3-E/C=0.4.
Compression	**37**	**42**	**43**	**44**	
Flexion	**4.5**	**5.0**	**5.5**	**6**	

III.7.2 Ciment prompt naturel : résulte de cuisson à température modérée d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivi d'un broyage très fin.
Le ciment prompt est utilisé dans les réparations rapides, le colmatage de fuites d'eau, la confection d'enduit de scellement, béton projeté et tous les travaux qui nécessitent la rapidité.

Tableau (III, 7) : Valeurs minimales garanties de résistance à la compression du mortier 1/1 (MPa) [17]

Valeurs minimales garanties de résistance à la compression du mortier 1/1 (MPa)							
Résistance à la compression	15 min	1 h	3 h	24 h	7 j	28 j	Au-delà de 28 jours la résistance continue à croitre
	4	6	8	10	14	19	

Evolution probable des résistances à la compression du mortier selon le dosage en ciment (MPa)			
	Mortier 1/1	Mortier 1/3	Béton 650 (kg/m3)
28 jours	19	14	28
6 mois	40	25	42
1 an	45	32	48
5 an	48	42	50

III.7.3 Ciments à maçonner : ce sont des ciments qui contiennent les mêmes composants que le ciment portland artificiel, mais avec des proportions déférentes et présentent des résistances mécaniques plus faibles voir tableau (III, 8)

Tableau (III, 8): les ciments à maçonner [17].

TYPE	Classe de résistance	Agent entraineur d'air
MC5	**5**	**Exigé**
MC12.5	**12.5**	**Exigé**
MC12.5 X		**Non autorisé**
MC 22.5 X	**22.5**	**Non autorisé**

III.7.4 Chaux hydrauliques naturelles (XHN): elles sont des liants et non des ciments, nous les mentionnons ici parce qu'elles ont, comme le ciment des propriétés d'hydraulicité, elles sont obtenues par calcination de calcaire plus ou moins argileux ou siliceux, avec réduction en poudre par extinction, complétée si nécessaire par le broyage.

Tableau (III, 9) : les chaux hydrauliques naturelles (XHN) [17].

Type	Classe de résistance (MPa)	Désignation	
		Chaux sans additions	Chaux avec additions
Chaux hydraulique naturelle	2	NHL 2	NHL-Z 2
	3.5	NHL 3.5	NHL-Z 3.5
	5	NHL 5	NHL-Z 5

III.8 Conclusion :

Les informations qui précédent dans ce chapitre peuvent mener aux suivant :

- Le ciment portland est fabriqué essentiellement d'environ 80% de calcaire et 20 % d'argile.
- Toute les additions de finesse supérieure à celle du ciment peuvent être utilisées en substitution de ciment afin d'améliorer certains propriétés ou confère des propriétés particulières du béton.
- Les additions au ciment peuvent être inertes comme les additions calcaires et le quartz broyé ou actifs comme le laitier et la fumée de silice.
- La classification du ciment courant se fait selon la composition (CPA-CEM I, CPJ-CEM I, CPJ-CEM II, CHF-CEM III/A, CHF-CEM III/B, CHF-CEM III/C, CPZ-CEM IV/A, CPZ-CEM IV/B, CLC-CEM V/A, CLC-CEM V/B), et selon la résistance (32.5, 32.5R, 42.5, 42.5R, 52.5, 52.5R).
- Autres ciments sont adaptés à usage spécifique tel que :
  - Ciment pour travaux de mer.
  - Ciment à teneur en sulfate limitée pour béton précontraint.
  - Ciment résistant aux sulfates.
- La teneur en C3A influe négativement à la résistance aux agressions chimiques qui doit être limitée.

- Plusieurs types de ciment susceptibles d'être conforme aux exigences du CRS tel que le CHF-CEM III/A et B, CLK-CEM III/C, CLC-CEM V/A et B ; CPA-CEM I, CPJ-CEM I et B.

  Tellement le milieu de Ouargla est considéré comme agressif prenant en compte la teneur élevée en sulfate de la nappe et du sol, il est indispensable de construire par le CRS ou autres ciments satisfaisant les exigences citées ci-dessus.

Chapitre IV : Durabilité

IV.1 Notion de durabilité des bétons :

Un ouvrage durable indique que cet ouvrage doit résister au cours de temps aux divers agressions ou sollicitations, c'est à dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur le milieu ambiant.

L'ouvrage doit conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement, Sécurité, confort d'usagers), avec des frais de maintenance et d'entretien réduits que possible.

IV.2 Paramètres de la durabilité chimique :

IV.2.1 Paramètres liés au matériau :

IV.2.1.1 Composition chimique et minéralogique du ciment :

a- Teneur potentielle en portlandite $Ca(OH)_2$: vis-à-vis des attaques chimiques (eaux pures, acides, sulfate..), ***la portlandite*** est la plus facilement solublisable.

C'est pour quoi dans les milieux agressifs, des bétons élaborés avec des ciments composés ou contenant des additions consommatrices de chaux comme le laitier, cendres volantes, fumées de silice….etc. la teneur potentielle en hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ est considéré Comme un indicateur majeur de durabilité, plus la teneur en chaux est faible, plus la résistance chimique est bonne. [20]

b- Teneurs en aluminate tricalcique C3A et en silicate tricalcique C_3S : au contact de l'eau de mer et dans les milieux fortement chargés en sulfates, le C3A anhydre résiduel qui n'a pas réagi avec le gypse régulateur de prise peut se transformer en éttringite expansive, dans ces cas, sa teneur doit être limitée, la même chose pour le C_3S. [20]

c- Teneurs en additions minérales : les laitiers, les cendres volantes, les pouzzolanes, les fumées de silice sont généralement favorables à la résistance chimique du béton, d'une part parce qu'ils réduisent la basicité globale du matériau en consommant la chaux libérée par l'hydratation des silicates C3S et C2S, d'autre part, par leur effet positif sur la microstructure du béton. [20]

IV.2.1.2 Nature minéralogique des granulats :

- **Alcali-réaction :** il est admet que les alcali-réactions se présentent sous trois types : réaction alcali-silice, réaction alcali-silicate, réaction alcali-carbonate
- **Réaction alcali-silice (RAS) :** certains granulats siliceux, lorsqu'ils sont constitués de silice amorphe, mal cristallisée ou microcristalline sont attaqués par la solution interstitielle qui occupe les pores du béton. La silice libérée réagit ensuite avec les alcalins Na^+, K^+ de cette solution interstitielle qui occupe les pores du béton et l'on observe finalement, l'apparition de gels silico-alcalin qualifié de gonflant, ce phénomène de gonflement provoque des désordres au béton. [20]
- **Réaction alcali-silicate :** la seule déférence avec l'alcali-silice est que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllo-silicates, tecto-silicate, sains ou altérés). [20]
- **Réaction alcali-carbonate :** la réaction manifestée par des calcaires dolomitiques qui renferment des impuretés phylliteuses, les expansions causées par cette réaction sont moins importantes que celles dues aux réactions alcali-silice et alcali-silicate sauf le béton est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses. **[20]**

La dédolomitisation correspond à la réaction suivante :

$$\underbrace{(Ca,\ Mg)(CO_3)_2}_{\text{Dolomite}} + 2\ NaOH\ (aq.) \longrightarrow \underbrace{Mg(OH)_2}_{\text{Brucite}} + \underbrace{CaCO_3}_{\text{Calcite}} + Na_2CO_3\ (aq.) \quad \ldots IV.1$$

La solution alcaline est régénérée en permanence :

$$Na_2CO_3\ (aq.) + \underbrace{Ca(OH)_2}_{\text{Portlandite}} \longrightarrow 2\ NaOH + \underbrace{CaCO_3}_{\text{Calcite}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots IV.2$$

IV.2.1.3 Formulation et propriétés de transfert du béton

Les propriétés de transfert dont dépend la capacité du béton à résister à la pénétration des agents agressifs liquides ou gazeux, sont déterminantes pour la durabilité. Elles sont représentées essentiellement par les deux indicateurs majeurs de durabilité qui sont la diffusivité et la perméabilité. Toutes deux en relation avec la compacité. La compacité elle

même assurée par une formulation optimisée du squelette granulaire de béton. Dans le cas des bétons à haute performances, la compacité maximale est obtenue par une large étendue granulaire associée à l'utilisation des fines (calcaire, laitier, cendres volantes, fumée de silice) venant en complément ou en substitution du ciment.

La dimension maximale des grains a peu d'influence sur la durabilité, la figure (IV, 1) illustre l'influence de la dimension maximale des grains dans le domaine de béton

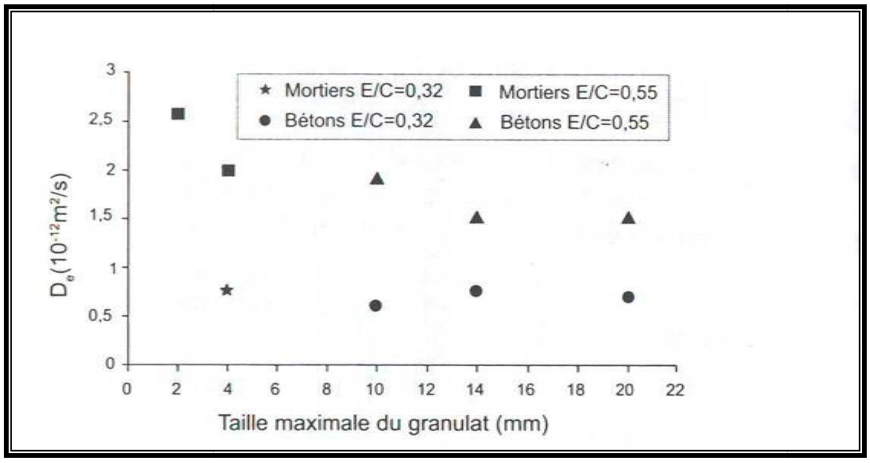


Figure (IV, 1): Influence de la taille maximale des grains sur le coefficient de diffusion effectif [23]

IV.2.2 Paramètres liés à l'environnement :

Les principaux paramètres à prendre en compte

- La nature physique de l'agent : qui peut être liquide, gazeux ou solide.

Les milieux liquides sont essentiellement les eaux pures plus ou moins chargées et des solutions d'acides, de bases et de sels d'origine naturelle ou artificielle.

Les milieux gazeux sont d'origine naturelle, industrielle ou domestique, par exemple CO, SO_2, NO_x, H_2S dans les ouvrages d'assainissement, le Chlore dégagé lors d'incendies.

- La nature chimique de l'agent agressif ; sa concentration, son mode d'action (dissolution, hydrolyse, lixiviation, dissolution /précipitation de composé néoformés expansifs ou non).
- Les conditions climatiques naturelles ou artificielles, générales et locales, exposition atmosphérique, immersion totale, semi immersion, zone de marnage ou encore enfouissement.
- L'humidité relative < 65 % suivant le fascicule de documentation FD P18-01 étant peu favorable au développement de réaction. [52]

- La température qui est généralement un facteur d'accélération des réactions.
- Les cycles climatiques, les cycles humidification séchage accélérant considérablement les dégradations du béton.
- La mobilité du milieu agressif qui accélère les échanges chimiques et qui peut éventuellement induire en effet mécanique supplémentaire (érosion, chocs), est un facteur aggravant.

IV.2.3 Paramètres liés à la structure :

Il est prit en compte, les effets des contraintes mécaniques au fonctionnement de l'ouvrage ; chargement, fatigue, dilatation et retraits différentiels. Les contraintes peuvent engendrer des fissurations sont susceptibles d'accélérer et d'aggraver d'éventuelles attaques chimiques qui sont susceptibles elles mêmes d'affaiblir la structure.

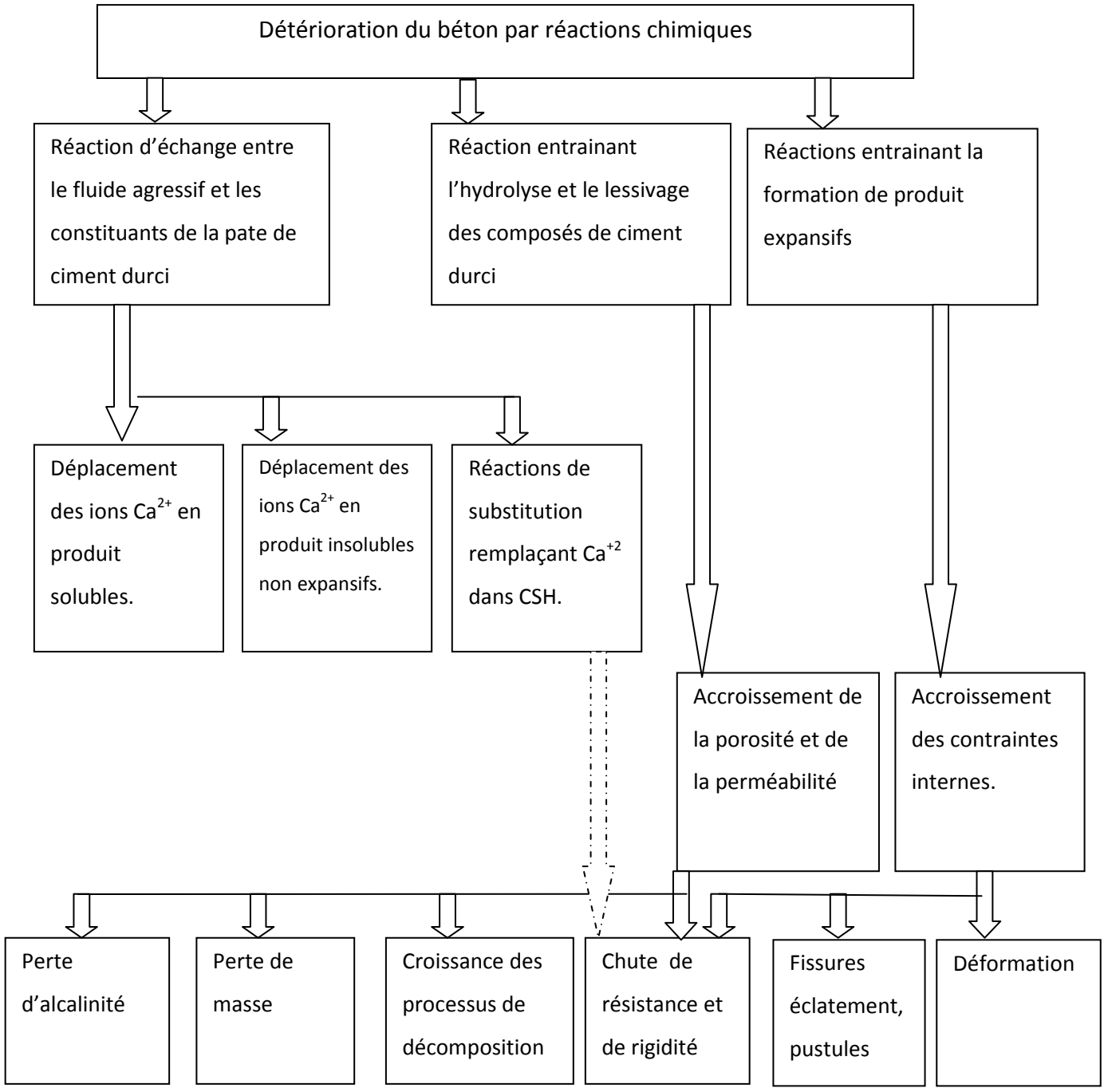


Figure (IV, 2) : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [19]

Tableau (IV, 1) : Processus généraux d'altération chimique des liants hydrauliques causes et conséquences [19]

Processus d'altération chimiques	Facteurs	A courts et moyens termes	A long terme
Hydrolyse Dissolution Lixiviation des composants de la pate de ciment	➢ pH des solutions au contact. ➢ Dioxyde de carbone	➢ Chute de pH du milieu interstitiel ➢ Décalcification ➢ accroissement de la porosité et de la perméabilité.	➢ Perte de cohésion de résistance mécanique.
Réactions solide/solution, entre le fluide et la pate de ciment.	➢ Réaction avec des anions formant des sels de calcium. ➢ Réactions formant des produits insolubles expansifs (sulfate, réaction alcali silice, corrosion de fer).	➢ Formation des composés solubles. ➢ Décalcification ➢ accroissement de la porosité et de la perméabilité. ➢ Formation des composés insolubles. ➢ Augmentation des contraintes mécaniques internes.	➢ Perte de cohésion de résistance mécanique. ➢ Colmatage. ➢ Fissuration ➢ Fracturation ➢ éclatement

IV.3 Revue des principaux milieux agressifs :

IV.3.1 Milieux acides : le béton est un matériau basique très sensible aux milieux acides avec lesquels il réagit suivant la réaction bien connue :

Base + Acide ⟶ Sel +eau ……..IV.3

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution qui peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base +acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant.

➢ **Acides minéraux :** les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{-2} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'ettringite [20].

L'acide phosphorique H_3PO_4, qui entraine la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif.

- **Acides organiques :** les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certains eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissocies, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes.

➢ **Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements acides :**

a- Protection supplémentaire par la mise en œuvre du résine, bitume et autre revêtement.

b- Bien identifier les risques : nature de(s) sel(s), concentrations, mode d'action (mobilité, renouvellement, température ….)

c- Utiliser des ciments à faible teneur en chaux, en particulier des ciments avec ajout minéraux consommateurs de chaux comme le laitier, cendres volantes, silico-alumineuse, pouzzolane réactives, fumée de silice.

d- La mise en œuvre de béton de haute compacité, susceptible de ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton.

Les expériences de Bertron et al [24] faites sur trois types des pates de ciment ;ciment au laitier de type CEMIII/B, ciment sans ajout CEM I et ciment sans ajout de type CEM I PM/ES immergés au solution acide, montrent que le ciment au laitier de type CEM III/B est celui qui présente la plus faible perte relative de masse alors que les deux sans ajouts de type CEM I conduisent à des plus fortes pertes de masse, indépendamment à leur teneur en C3A(faible teneur pour le CEM I PM/ES(3.4%), teneur élevée pour le CEM I (10.5%) voir figure (IV, 3). [24]

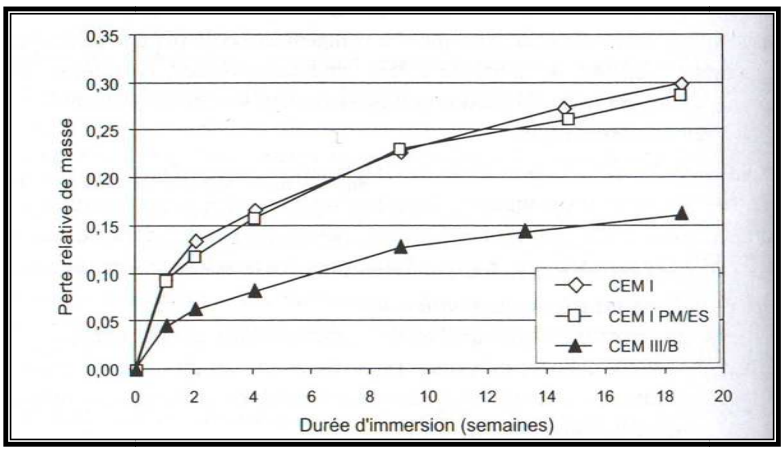


Figure (IV, 3): Perte relative de masse de pates de ciment (E/C= 0.27) en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'acide organique maintenue à pH= 4. [27]

IV.3.2 Milieu sulfaté : les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques ou industrielles.

Les réactions sulfatiques constituent une source importante de désordres pour les ouvrages. Ces réactions mettent en jeu les ions sulfates présents dans la solution interstitielle et les aluminates du ciment (anhydres ou hydratés). Elles conduisent à la formation dans le béton durci d'*ettringite* secondaire potentiellement expansive ($3\ CaO,Al_2O_3,3CaSO_4,32H_2O$) la formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive., et sous certains conditions, les CSH peuvent réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasite ($CaCO_3,CaSiO_3,CaSO_4,15H_2O$) entrainant des phénomènes expansifs et désagrégation de l'ensemble du liant. Les sulfates peuvent être internes ou externes.[46]

Les réactions chimiques des différents sulfates avec la pate de ciment durci sont les suivantes :

Le sulfate de sodium : très soluble, entraine des dégradations par formation de gypse et d'ettringite expansive [20].

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH$$ (étape1 formation de gypse)…IV.4

Portlandite **sulfate de sodium** **gypse secondaire**

La réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant l'ettringite :

a- soit par le C_3A anhydre :

$$\underbrace{C3A}_{\text{Aluminate trécalcique}} + \underbrace{3CaSO_4 2H_2O}_{\text{gypse secondaire}}+24\text{-}26H_2O \rightarrow \underbrace{C3A.3CaSO_4.H_{30-32}}_{\text{l'ettringite}} \quad \text{....IV.5}$$

b- soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C4AH13 où de monosulfoaluminate de calcium $C3A.CaSO_4.H_{12}$.

- **<u>le sulfate de magnésium [20]</u>** : attaque le béton par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec Ca^{+2} et l'anion SO_4^{-2}

$$Ca(OH)_2+MgSO_4 \rightarrow CaSO_4+ \underbrace{Mg(OH)_2}_{\text{brucite}} \quad \text{..IV.6}$$

$$C3A + 3CaSO_4 2H_2O+24\text{-}26H_2O \rightarrow \underbrace{C3A.3CaSO_4.H_{30-32}}_{\text{l'ettringite}} \quad \text{............IV.7}$$

$$C\text{-}S\text{-}H + MgSO_4 \rightarrow CaSO_4.2H_2O + \underbrace{(C,M)\text{-}S\text{-}H}_{\text{Silicate de magnésium hydraté}} \text{..........................IV.8}$$

Le silicate de magnésium hydraté M-S-H n'a pas des propriétés liantes en plus la cristallisation d'ettringite est instable en présence de sulfate de magnésium.

- **Le sulfate de calcium :** se trouve dans le sol sous forme de gypse et d'anhydrite, et dans les eaux souterraines séléniteuses. Son attaque produit des dégradations au béton qui est due à la formation d'ettringite expansive.

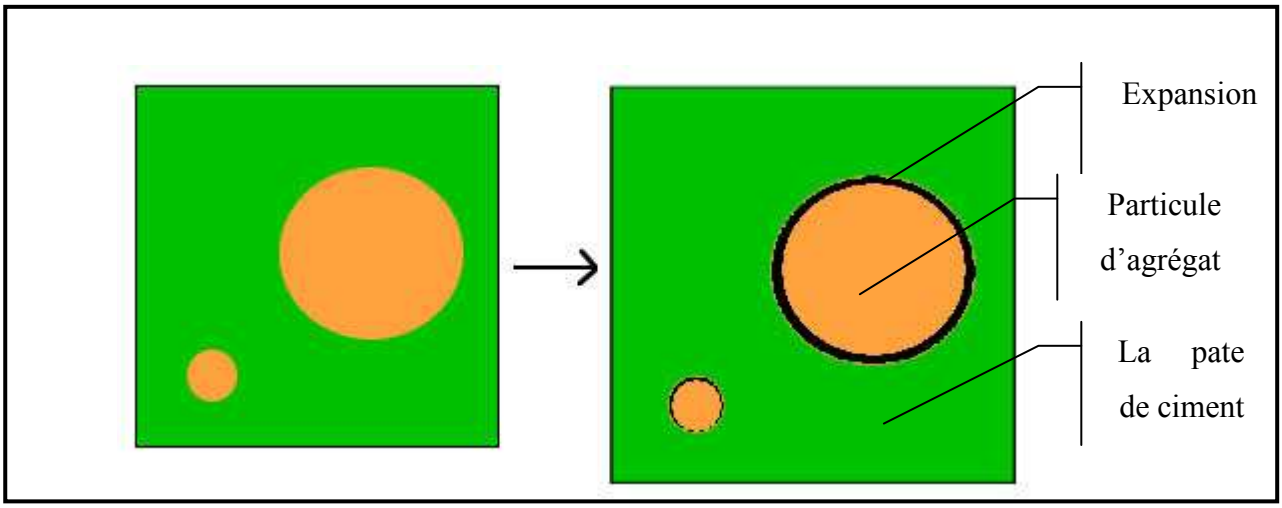


Figure (IV, 4) : schéma représente l'expansion auteur les agrégats.

- **Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements sulfatiques**

a- Une analyse approfondie sur les conditions environnementales générales et locales est indispensable afin de définir la classe d'exposition de la structure ou des élément de la structure qui permet de s'adapter au mieux la formulation du béton.

b- Le dosage de ciment : la résistance chimique du béton croit avec le dosage en ciment voir figure (IV, 5).

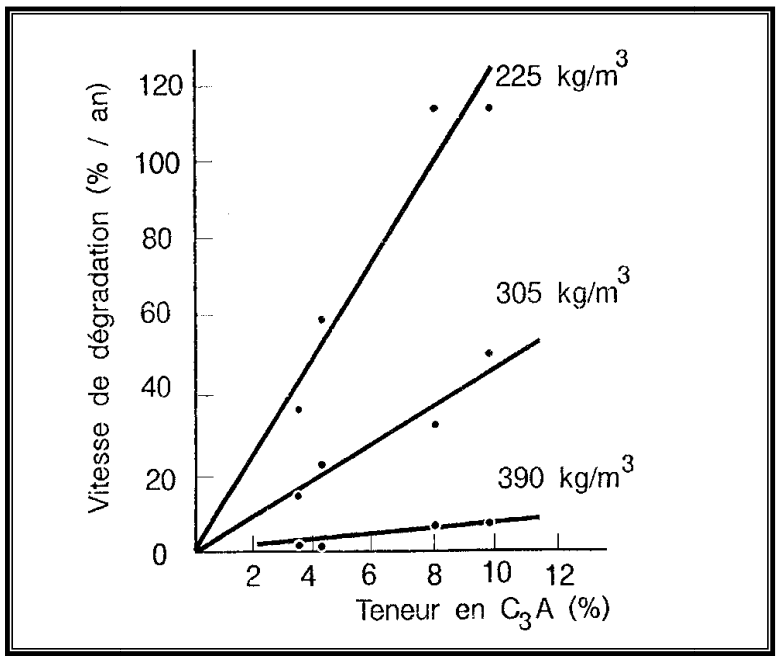


Figure (IV, 5): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton, éprouvettes de béton conservées pendant 16 ans dans une solution de concentration de 10 % environ [20]

c- **La Compacité :** la compacité détermine les capacités de transfert du béton vis-à-vis de l'eau et des ions agressifs, la compacité dépend du dosage en ciment, du rapport E/C, et l'étendue granulaire en relation avec un dosage optimal en fines (fig (IV, 6))

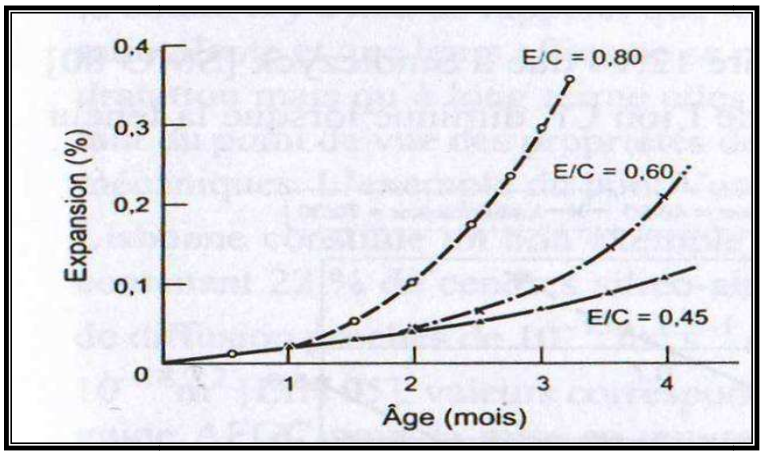


Figure (IV, 6) : Relation entre le rapport E/C d'un mortier et l'expansion en milieu sulfatique, d'après Ouyong [24]

d- Teneur en C3A : la vitesse de dégradation du béton est proportionnelle au pourcentage en C3A du ciment portland, non seulement le C3A mais surtout du rapport $C3A/SO_3$.

e- Pour limiter la vulnérabilité des constituants riches en chaux $Ca(OH)_2$ et C-S-H la NF P15-317 limite la teneur en C3S des ciments de type CEM I et CEM II/A sous forme d'indice dit « indice de Sarden », cet indice est égal au % C3A + 0.27 % C3S.

L'ensemble des prescriptions de la norme NF P15-317 est résumé dans le tableau (IV, 2).

Les prescriptions de la norme NF P15-319 pour les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates sont résumées au tableau (IV, 3)

Tableau (IV, 2): Critères de composition de la norme NF P15-317 pour les ciments destinés à la mer et en milieux sulfatiques moyennement agressifs [25]

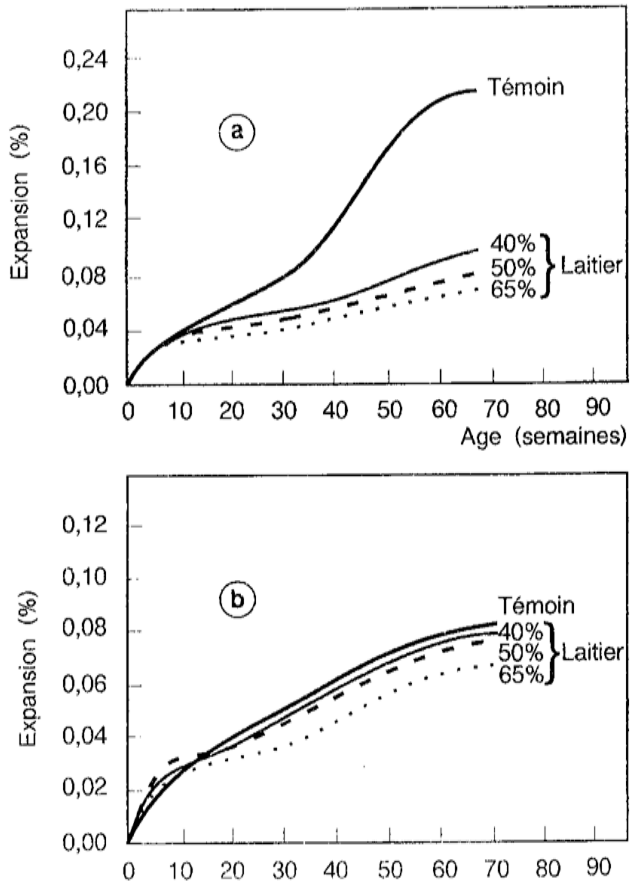
Ciment	Ajout	C3A	SO_3	% C3A+0.27%C3S
CEM I		≤ 10 %	≤3% si C3A ≤ 8% ≤2.5% si 8% ≤ C3A ≤ 10 %	23.5 % ciment
CEM II/A-S[(a)] CEM II/A-V	≤ 13 %	≤ 11.5 % clinker	≤ 3 % / ciment	-
CEM II/A-D	≤ 13 %	≤ 10 % / ciment		
CEM II/A-P	≤ 20 %	≤ 10 % clinker	≤ 3 % / ciment	≤ 26 %/clinker si p≥ 10 % ≤ 23.5 %/clinker si p ≤ 10 %
CEM II/A-L	≤ 20 %	≤ 10 % clinker	≤ 3 % si $C3A_{clinker}$≤ 8 % 2.5 ≤ % si 8 %≤$C3A_{clinker}$ ≤ 10%	≤ 23.5 %/ ciment
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Limitation des ions sulfure S^{2-} ≤ 2 % / ciment			
CEM V/A CEM V/B	Limitation des ions sulfure S^{2-} ≤ 2 % / ciment CaO ≤50 % / ciment			

Tableau (IV, 3) : Critère de composition de la norme NF P15-319 pour les ciments destinés aux travaux en eaux à haute teneur en sulfates [26].

Ciment	C3A	C3A+2C4AF	SO_3
CEM I	≤ 5 %	≤ 20 %	≤ 3 % si C3A ≤ 3 % ≤ 2.5 % si 3 %≤ C3A ≤ 5%
CEM II/A et B	≤ 5%	≤ 20 %	≤ 4 %
CEM III/A CEM III/B et C	La teneur en laitier du CEM III/A doit être ≥ 60 % Pas de spécifications chimiques particulières		
CEM V/A et B	CaO ≤ 50 % / ciment		

f- Effet des additions sur la résistance aux sulfates : les additions minérales de laitier, de cendre volantes silico alumineuse, de pouzzolane naturelle et de fumée de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates, l'amélioration est due à la dilution des aluminates et à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, au moins pour les bétons âgés **[20].**

- **Ajout de laitiers :** l'ajout de laitier influent positivement sur la résistance du béton. Ce comportement est dû aux effets de dilution, de réduction de la teneur en chaux et de la modification de la microstructure de la pate du ciment dont la densification très importante au cours du temps, réduit notablement la capacité de transfert des ions agressifs dans le béton. figures ((IV, 7), (IV, 8)).



a) Le témoin est un ciment portland (type ASTM II) avec 6.4 % de C3A.

b) Le témoin est un ciment portland (type ASTM V) avec 3.7 % de C3A.

Figure (IV, 7) : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajout de laitier [20].

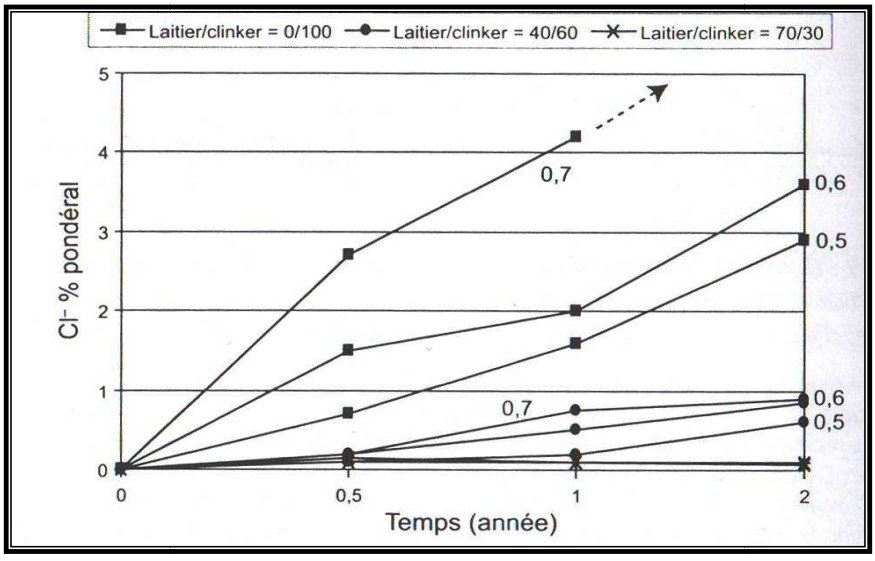


Figure (IV, 8) : Pénétration des chlorures dans des bétons en fonction de la teneur en laitier du ciment et du rapport E/C [20].

Cendres volantes : Elles ont des effets bénéfiques sur la tenue des bétons aux sulfates. Cet effet est dû à la consommation partielle par les cendres de la portlandite libérée lors d'hydratation des silicates du ciment portland et réduction du rapport CaO/SiO_2 des C-S-H, due aussi aux modifications de microstructure par la réduction des rayons des pores. La figure (IV, 9) montre l'influence bénéfique des cendres sur le coefficient de diffusion.

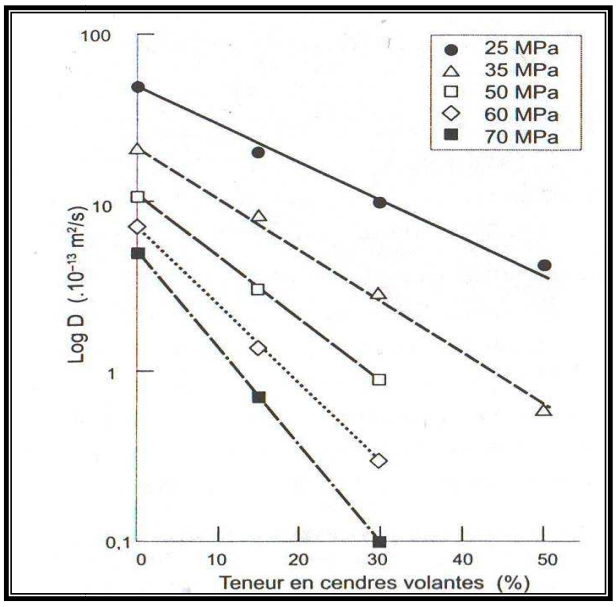


Figure (IV, 9) : Coefficient de diffusion à 28 jours des ions chlorure en fonction de la teneur en cendres, de différentes classes de béton d'après Dhir et al [28]

Fumées de silice : Elles ont des effets très bénéfiques sur la résistance des bétons aux sulfates dus à leur forte consommation en portlandite et de la structure compacte des C-H-S qu'elles forment, la figure (IV, 10) montre une diminution importante du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de la teneur en fumée de silice.

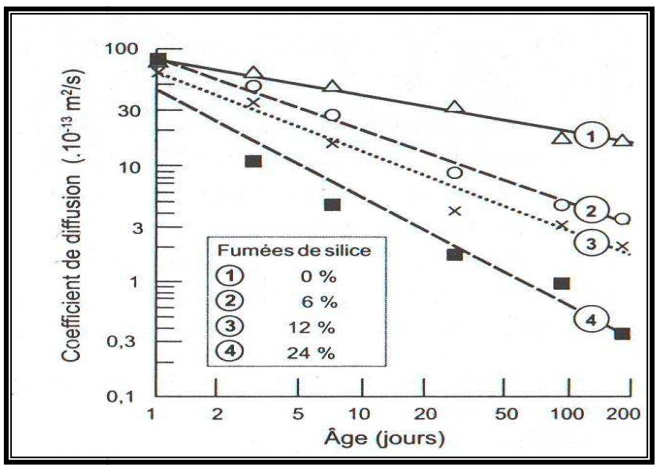


Figure (IV, 10): Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction du temps dans des BHP contenant des dosages croissants en fumée de silice [29]

- **Les pouzzolanes :** Leurs effets sont voisins de ceux décrits pour les autres additions, consommation de la chaux et de production de C-S-H moins basiques et accroissement de compacité.
- **Les calcaires :** Ils réagissent très peu avec les hydrates du ciment, l'effet peut être essentiellement un effet filler, c'est-à-dire un accroissement de compacité, comme il y'a la possibilité de formation de thaumasite (une forme d'attaque sulfatique).

Cas particulière d'attaque sulfatique, la formation de thaumasite : la thaumasite est un sulfo-silico-carbonate de calicium de formule général $CaSiO_3.CaSO_4.CaCO_3.15H_2O$

Elle peut provoquer la dégradation des bétons dans les conditions suivantes :

- Une source d'ions calcium : portlandite ou silicates de calcium (C-S-H) ;
- Une source d'ions sulfate : sulfate d'origine interne ou externe ;
- Une source de silice : C-S-H ou autre forme de silice réactive ;
- Une source d'ions carbonate : CaCO3 (calcite), CO_2 atmosphérique, CO_2 dissout ;
- De l'eau en quantité suffisante pour assurer le transport des espèces réactives ;
- Une température inférieure à 15°C.

Le mécanisme de dégradation est essentiellement une destruction des C-S-H entrainant leur transformation en un produit sans cohésion ayant la consistance d'une boue.

Les principales mesures préventives vis-à-vis de ce type d'attaque sont la formulation d'un béton compact, le choix d'une formule de béton évitant autant que possible la présence de fines calcaires, l'utilisation de ciments à forte teneur en laitier de haut-fourneau et une protection de l'ouvrage contre les venues d'eau.

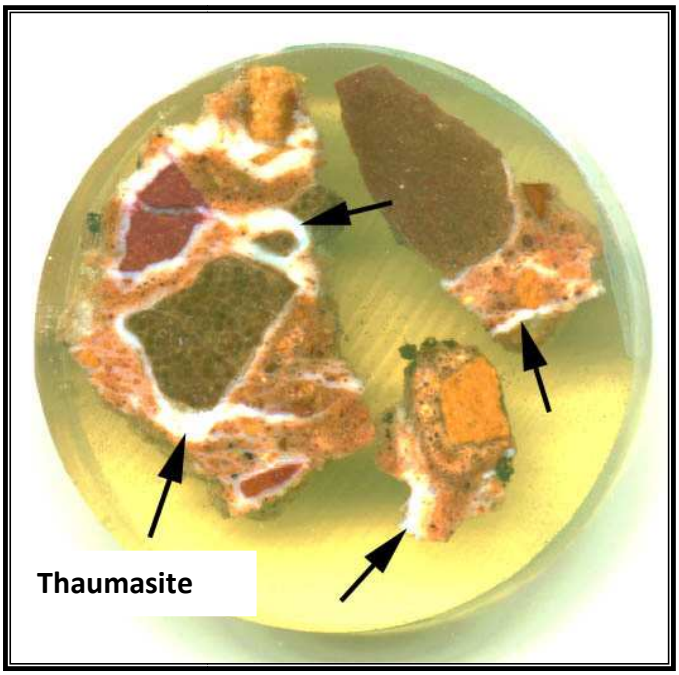


Figure (IV, 11) : Dégradation de béton due à la formation de thaumasite (la formation de thaumasite se fait autour les agrégats rugueuses et les endroits fissurés). [47]

IV.3.3 Attaque d'origine biochimique :

IV.3.3.1 Cas des eaux usées : dans les réseaux d'assainissement la présence d'hydrogène sulfuré H_2S, susceptible de s'oxyder en acide sulfurique H_2SO_4, peut être à l'origine des dégradations du béton. Le processus d'attaque du béton interviennent principalement des sulfato-bactéries de type « thiobacillus thiooxydans » dont la particularité est d'utiliser l'hydrogène dans leur métabolisme et de rejeter sous forme d'acide sulfurique H_2SO_4, très agressif vis-à-vis du béton suivant un double mécanisme d'attaque acide et d'attaque sulfatique suivant ces réactions :

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow CaSO_4 + 2H_2O \quad \ldots\ldots \quad \text{IV.4}$$

Et

$$3CaO.Al_2O_3 + CaSO_4 + 32H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \ldots\ldots \quad \text{IV.5}$$

L'attaque acide conduit à la dissolution de la chaux de l'hydrolyse de calcium et C-S-H. l'attaque sulfatique conduit à la formation d'ettringite pouvant être expansive. En outre, la présence d'acide peut provoquer la dépassivation des aciers d'armatures et leur corrosion [20]

IV.3.3.2 Cas d'effluents agricoles et agro-alimentaires : les effluents agricoles et agroalimentaires sont des produits constitués initialement de matières organiques complexes, qui sous l'action de bactéries identifiées, aérobies ou anaérobies, sont transformés en acides organiques.

Dans ce milieu, la portlandite étant le premier hydrate attaqué, il convient de limiter la teneur en privilégiant les ciments à forte teneur en C2S et les additions comme le laitier et le cendre volante et la fumée de silice, aussi il convient de fabriquer des bétons compacts peu perméables, de diffusivité faible, incorporant des granulats résistants aux acides [20].

IV.3.4 Autres milieux considérés agressifs : les nitrates, les sels d'ammonium, le chlore d'ammonium $ClNH_4$, le sulfate d'ammonium, les chlorures, les phosphates, les oxalates, les hydroxydes alcalin.

IV.4 Conclusion : on termine ce chapitre par des recommandations relevés de la norme NF EN 206-1 qui concerne la spécification, la performance, la production et la conformité du béton.

On subdivise ces recommandations en trois :

IV.4.1 Conception des ouvrages :

- Pour la conception des ouvrage situés dans des milieux chimiquement agressifs, il y a lieut de définir clairement les attaques environnementales liées à l'agressivité des ambiances et à la présence d'eau puis définir la classe d'exposition.
- Il convient d'éviter autant que possible les zones singulières dans lesquelles les pénétrations plus faciles des solutions agressives, ainsi, les formes simples, évitant la stagnation des agents liquides agressifs.
- Les déférents joints constructifs doivent être particulièrement étudiés.

IV.4.2 Conception des bétons :

- Il faux concevoir un béton compact, peu perméable par l'optimisation de la squelette granulaire, l'introduction des fines et ultrafines et l'utilisation des superplastifiant.
- Il convient d'adapter le choix des matériaux aux agents agressifs.

IV.4.3 Fabrication et mise en œuvre : La qualité des matériaux, la compatibilité entre matériaux et méthode de construction, la qualité de l'exécution, les niveaux de contrôle et d'assurance qualité sont des paramètres fondamentaux vis-à-vis de la durabilité des ouvrages dans, tous les cas, et en particulier en ambiance chimique agressive.

Chapitre V : Matériaux et méthodes

V.1 Matériaux utilisés :

V.1.1 Introduction : les matériaux utilisés dans cette étude sont basés sur les matériaux locaux disponibles, de qualité et des caractéristiques adéquates à l'environnement de notre région et qui ont la capacité d'améliorer la durabilité si possible.

- **Le ciment :** pour la réalisation de cette étude on a utilisé deux types de ciment le CPJ-CEM II B 42.5 de la société LAFARGE de la cimenterie de HAMMAME EDDAlAA à M'SILA et le Ciment CRS produit à la SCIMAT de AIN TOUTA BATNA CPA-CEM I 42,5 ES.
- **La poudre de silice (sable broyé) de Ouargla :** c'est un sable de dune finement divisés, obtenus par broyage et de provenance de Hassi Ben Abdallah wilaya de Ouargla de masse volumique réelle 2.6 t/m^3 et sa surface spécifique de Blaine est de 3600 cm^2/g, la masse volumique apparente est de 0.915 g/cm^3**,** la composition chimique est présentée au tableau (V, 1).

Tableau (V, 1) : Propriétés chimiques du sable de dune broyé (Analyse faite à la société SPA Adwan Chemicals company Mostaghanem)

Composition chimique								
Elément	**SiO_2**	**Fe_2O_3**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**TiO_2**	**CuO**	**(P.a.F)**
%	96.3	0.063	0.281	0.055	0.016	0.07	0.003	0.18

Tableau (V, 2) : Granulométrie du sable de dune broyé

D tamis en (micron)	Tamisat en (%)
75	**100**
63	**99.10**
45	**94.50**
32	**89.95**

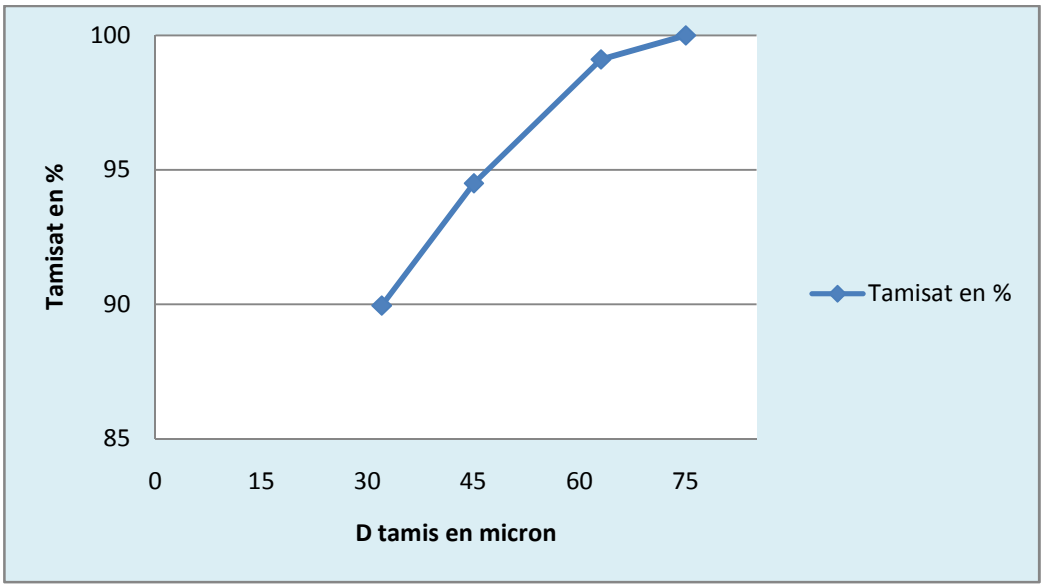


Figure (V, 1) : Courbes granulométriques du sable de dune broyé

➢ **Fumée de silice :** La fumée de silice utilisée dans ce travail est la silice grise riche en carbone, commercialisée sous le nom MEDAPLAST HP (Société GRANITEX Oued Smar Alger), ses caractéristiques chimiques et physiques sont regroupées dans le tableau (V, 3) ci après:

Tableau (V, 3) : Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice

(Fiche technique granitex)

Aspect	Poudre
Densité	0.5
Surface spécifique	15 m^2/g
Humidité par étuve à 105° C	< (1%)
Taille des particules	< 0.1 (microns)
Composants :	
SiO_2	> 85%
SO_3	< 2.5 %
Cl^-	< 0.2 %

➢ **Le superplastifiant :** Pour réaliser l'objectif de cette étude, nous avons utilisé un adjuvant SP haut réducteur d'eau MEDAPLAST SP40, produit par GRANITEX (Oued Smar Algérie), commercialisé sous le nom MEDAPLAST SP40, permettant d'obtenir des bétons de très haute qualité. En plus il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton, ses caractéristiques sont citées dans le tableau (V, 4).

Tableau (V, 4) : caractéristiques de MEDAPLAST SP 40 (fiche technique granitex)

Aspect	Couleur	PH	Densité	Teneur en Chlore	Extrait sec
liquide	**marron**	**8.2**	**1.2±0.01**	**< 1g/L**	**40 %**

➢ **Le sable :** Le sable utilisé provenant de la carrière de HASSI-ESSAYAH (Ouargla) dont les caractéristiques sont citées dans les tableaux (V, 1) et (V, 6).

➢ **Le gravier :** Le gravier utilisé dans cette étude est de la classe 8/15 provenant de la carrière de HAOUD EL-HAMRA (Ouargla) dont les caractéristiques sont citées dans les tableaux (V, 5) et (V, 6).

Tableau (V, 5) : Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

	Sable	Gravier
Module de finesse	**2.25**	/
Equivalent de sable brute	**50**	/
Equivalent de sable après lavage.	**90**	/
Densité absolue	**2.6**	**2.65**
Densité apparente	**1.7**	**1.4**
Indice de classement S_0	**2.28**	/
Indice d'asymétrie	**1.12**	/

Tableau (V, 6) : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats.

D tamis en (mm)	sable	Gravier
	Tamisat (%)	Tamisat (%)
20		98.9
16		89.3
12.5		67
10		46.8
8.0		30
6.3		18.1
5.0	99.59	12.2
4.0	99.48	8.1
3.15	98.77	5.3
2.5	97.95	4.2
1.25	90.57	
0.63	65.16	
0.315	17.62	
0.16	3.69	
0.08	0.82	

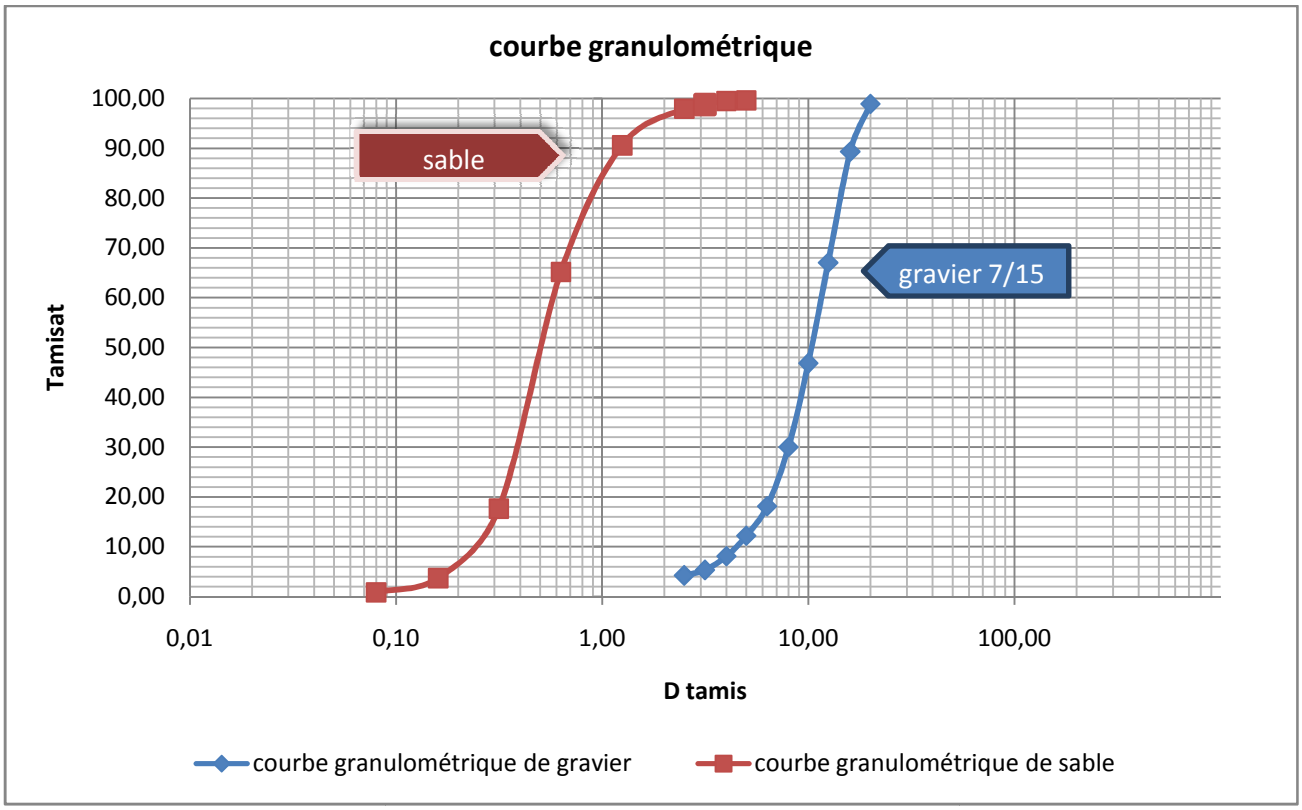


Figure (V, 2) : Courbes granulométriques du sable et du gravier

➢ **L'eau de gâchage :** L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est l'eau potable qui provient du robinet.

V.2 Programme expérimental :

V.2.1 Introduction :

Le programme expérimental est basé sur l'objectif de cette étude par analogie avec les nombreuses études menées dans ce même domaine d'étude.

On étudie l'effet des ajouts par l'additions de sable de dune broyé de Ouargla, et la fumée de silice et l'effet de type de ciment sur les performances mécaniques du béton dans déférents milieux de conservation.

Les paramètres d'analyse retenus sont :

➢ Influence de type d'addition : deux types des additions ont été utilisés le sable de dune broyé et la fumée de silice.

➢ Influence du pourcentage d'additions substitué au béton (en poids) : quatre pourcentages ont été retenus à savoir : 0%, 2%, 4%, 8%.

➢ Influence du mode de conservation : trois modes de conservation en été envisagés l'eau, la nappe, et le milieu sulfaté.

V.2.2 Détermination de la finesse (méthode Blaine):

V.2.2.1 Principe : la finesse est mesurée sous forme de surface spécifique en observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à des dimensions et une porosité spécifiées.

Dans des conditions normalisées, la surface du ciment est proportionnelle à $\sqrt{t}$ où t est le temps nécessaire à une quantité d'air donnée pour traverser un lit de ciment compacté. Le nombre et la distribution des dimensions des pores individuels du lit spécifié sont fixés par les dimensions des particules de ciment qui déterminent aussi le temps de passage de l'air.

Cette méthode est plus comparative qu'absolue et c'est pourquoi un échantillon de référence de surface spécifique est nécessaire pour calibrer l'appareil.

V.2.2.2 Appareil : l'appareil est constituée d'une Cellule de perméabilité, disque perforé, piston plongeur, manomètre, liquide manométrique, chronomètre, balance(s), pycnomètre.

V.2.2.3 Matériaux pour l'essai : Mercure, ciment de référence, disques circulaire de papier filtre, graisse légère.

V.2.2.4 Conditions d'essai : le laboratoire dans lequel l'essai de perméabilité à l'air est exécuté est maintenu à une température de 20°C± 2° C et une humidité relative n'excédant pas 65 %.

V.2.2.5 Lit de ciment compacté :

- **Formation du lit :** peser une quantité de ciment (m1) pour obtenir un lit de ciment de porosité e=0.500

M1 = $0.500\rho V(g)$ dans laquelle :

ρ = masse volumique du ciment en grammes par centimètre cube (g/cm3)

V = Volume de lit de ciment en centimètres cubes (cm3)

Déposer le disque métallique perforé sur l'épaulement au fond de la cellule et placer sur ce disque de papier filtre vierge

Placer la quantité pesée de ciment M1, dans la cellule en prenant soin d'éviter toute perte de matière. Tapoter la cellule pour niveler le ciment.

Placer un deuxième disque de papier filtre vierge sur le ciment nivelé. Insérer le piston plongeur jusqu'au contact avec le papier filtre.

Exercer une pression délicate mais ferme sur le plongeur jusqu'au moment où la face inférieure de son épaulement entre en contact avec la cellule. Retirer lentement le plongeur d'environ 5 mm, le tourner de 90°C et exercer une nouvelle pression délicate mais ferme sur le lit jusqu'à ce que l'épaulement du plongeur vienne en contact avec la cellule. Le lit est alors compacté et prêt pour l'essai, retirer lentement le plongeur.

V.2.2.6 Base de l'essai :

La surface spécifique S est exprimée par :

$$S = \frac{K}{P} \times \frac{\sqrt{e3}}{1-e} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1\eta}} (cm^2/g) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots V.1$$

Dans laquelle :

K = constant de l'appareil,

e = porosité du lit,

t = temps mesuré en secondes (s),

ρ = masse volumique du ciment en grammes par centimètres cubes (g/cm3)

η = Viscosité de l'air à la température d'essai de 20 ° C± 2° C.

Avec la porosité e = 0.500 et la température d'essai de 20 ° C ± 2° C.

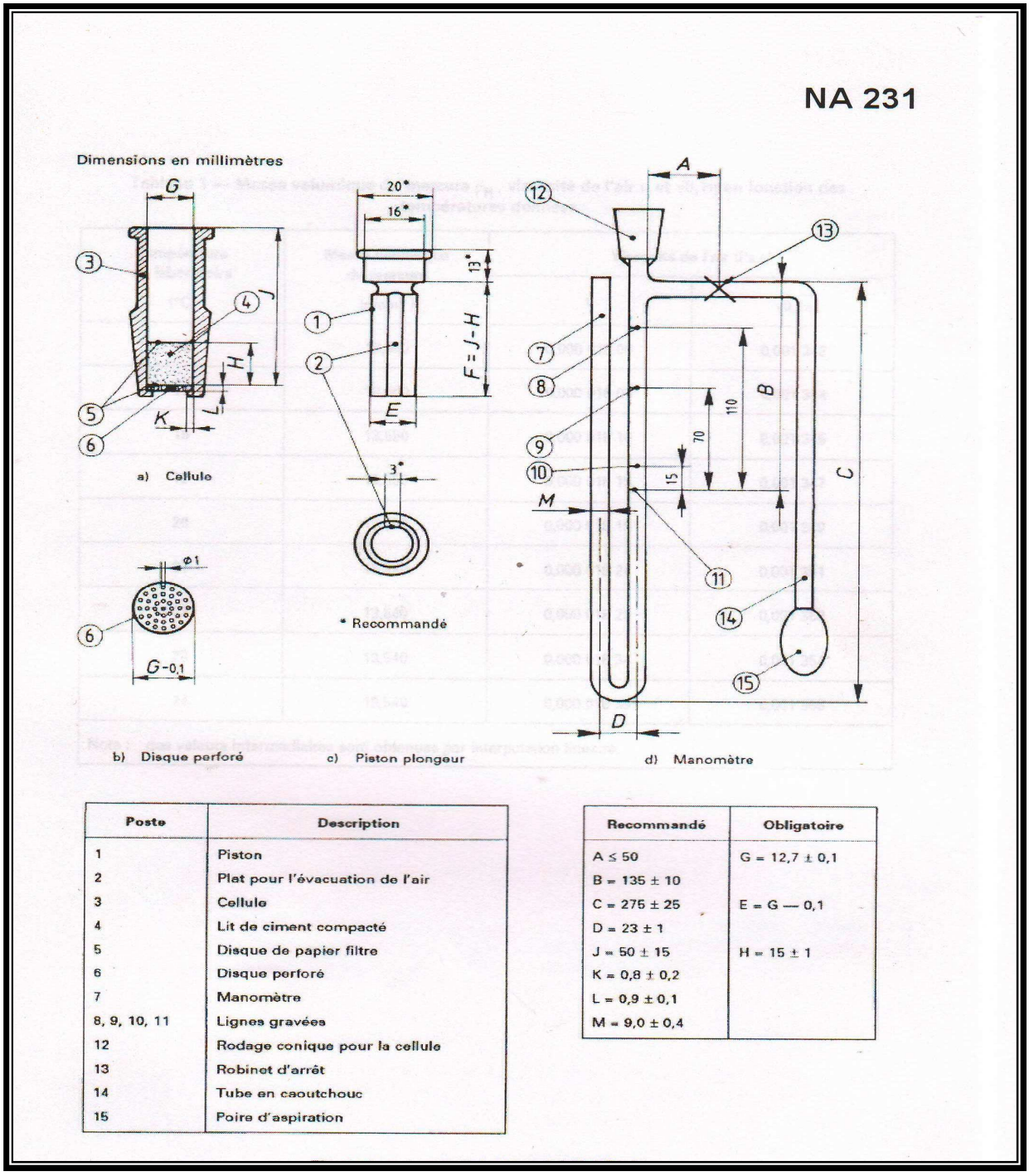
$$s = \frac{524.2 \times K \times \sqrt{t}}{\rho} (cm^2/g) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots V.2$$

V.2.2.7 Procédure d'essai :

Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre en utilisant si nécessaire un peu de graisse légère

Obturer le dessus du cylindre avec un bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt et amener par une aspiration modérée le niveau de liquide manométrique jusqu'à la ligne la plus haute (8 de la figure (V, 2)). Fermer le robinet d'arrêt et observer que le niveau de liquide manométrique reste constant. Si ce n'est pas le cas vérifie les joints et l'étanchéité de l'appareil. Enlever le bouchon du sommet du cylindre. Le fluide manométrique va commencer à couler. Démarrer le chronomètre lorsque le liquide atteint le deuxième ligne (9 de la figure (V, 2)) et l'arrêter lorsque le liquide atteint la troisième ligne (10 de la figure (V,

2)). Relever le temps t à 0.2 s prés et la température à 1°C prés. Répéter l'essai sur un deuxième lit, en relevant les valeurs du temps et de la température comme précédemment.



Poste	Description
1	Piston
2	Plat pour l'évacuation de l'air
3	Cellule
4	Lit de ciment compacté
5	Disque de papier filtre
6	Disque perforé
7	Manomètre
8, 9, 10, 11	Lignes gravées
12	Rodage conique pour la cellule
13	Robinet d'arrêt
14	Tube en caoutchouc
15	Poire d'aspiration

Recommandé	Obligatoire
A ≤ 50	G = 12,7 ± 0,1
B = 135 ± 10	
C = 275 ± 25	E = G — 0,1
D = 23 ± 1	
J = 50 ± 15	H = 15 ± 1
K = 0,8 ± 0,2	
L = 0,9 ± 0,1	
M = 9,0 ± 0,4	

Figure (V, 3) : Appareil de perméabilité Blaine [30]

V.2.3 Formulation des bétons : Le béton témoin, confectionné selon la méthode de DREUX-GORISSE.

Les bétons avec additions sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique de granulats par l'addition minérale.

En fixant la quantité d'eau, l'effet réducteur d'eau de certaines additions n'est pas mis à profit mais cette approche permet de réduire le nombre de paramètres variant simultanément. C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé à quantité d'eau constante et non pas à maniabilité constante.

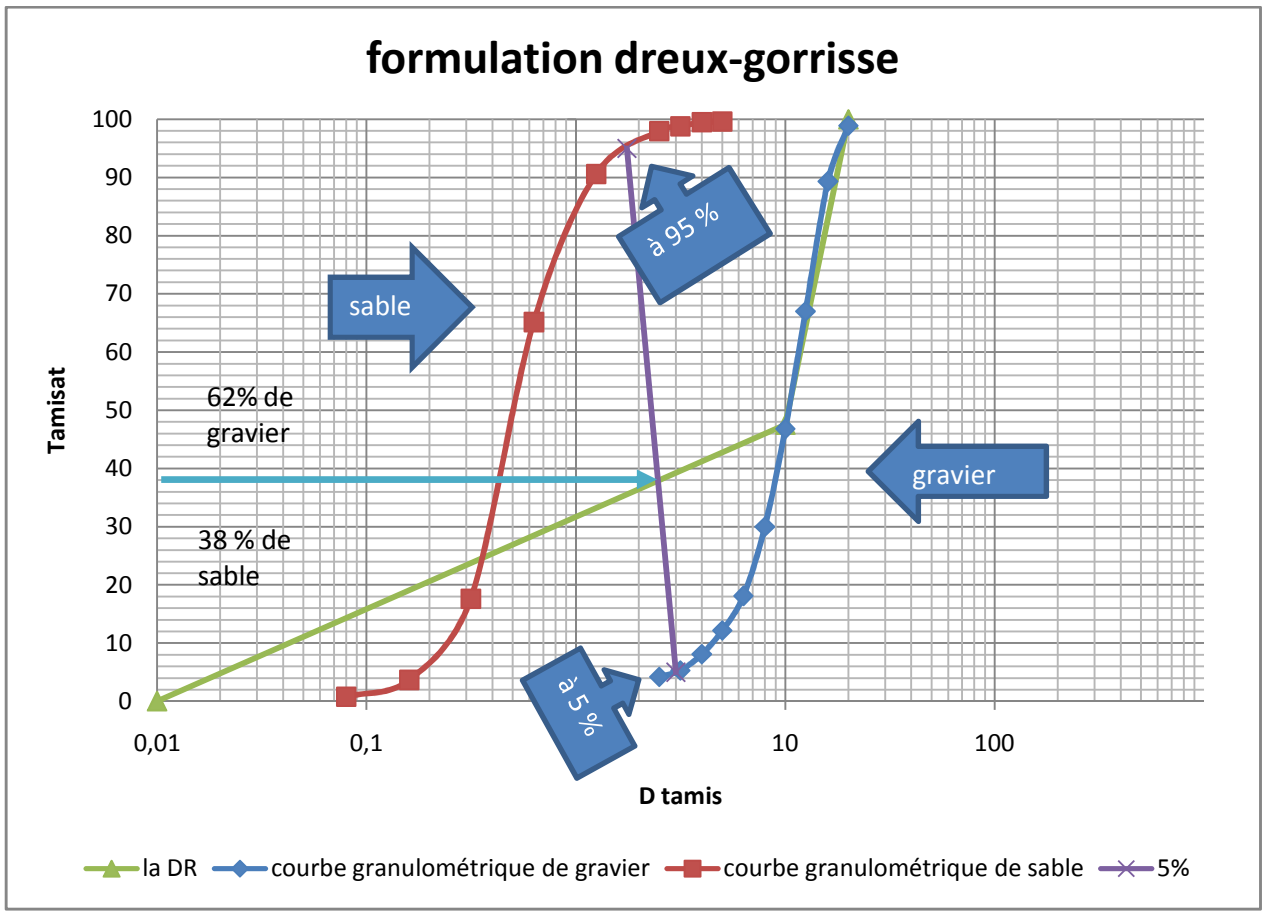


Figure (V, 4) : Formulation du béton par la méthode Dreux-Gorrisse

V.2.4 Confection et conservation des éprouvettes : Toutes les formulations étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques et dans des conditions similaires.

V.2.4.1 Séquence de malaxage : tous nos bétons sont mélangés dans une bétonnière a axe vertical voir photo (V, 1), pour l'homogénéisation des mélanges.

La séquence de malaxage est la suivante :

- Introduction du gravier, du ciment de l'addition et des sables dans la bétonnière.
- Malaxage du mélange à sec durant 2 min.
- Introduction de l'eau et la moitié du superplastifiant et malaxage durant trois minutes.
- Introduction de la seconde partie du superplastifiant, et malaxage jusqu'à fluidification (durée variable).

Photo (V, 1) : Bétonnière à axe horizontale laboratoire EVRENZA.

V.2.4.2 Confection des éprouvettes : on a utilisé des éprouvettes prismatiques (7×7×28) pour les essais des tractions par flexion et compression et éprouvettes cubiques (7*7*7) pour les essais de perméabilité et de densité ont été préparés avec les quantités cité dans le tableau (V, 7).

Photo (V, 2) : Éprouvettes prismatiques (7*7*28) cm^3.

Photo (V, 3) : Éprouvettes cubiques (7*7*7) cm^3.

Tableau (V, 7) : Formulations du béton étudiées

Type de ciment	P ciment	P gravier	P sable	Type ajout	Super plastifiant	P ajout	P eau
CPJ	375	1150	691	-	5.25	-	187.5
CRS	375	1150	691	-	5.25	-	187.5
CPJ	375	1127	677,18	FS (2%)	5.25	36,82	187.5
CPJ	375	1127	677,18	SB (2%)	5.25	36,82	187.5
CPJ	375	1104	663,36	FS (4%)	5.25	73,64	187.5
CPJ	375	1104	663,36	SB (4%)	5.25	73,64	187.5
CPJ	375	1058	635,72	FS (8%)	5.25	147,28	187.5
CPJ	375	1058	635,72	SB (8%)	5.25	147,28	187.5

V.2.4.3 Environnement de conservation :

Environnement A (Milieu standard) : les éprouvettes sont immergées dans l'eau à température de 20° C± 1°C

Environnement B (Nappe phréatique) : les éprouvettes sont mises dans la nappe phréatique, (nous avons choisis le chott de Hai Ennaser, Ouargla.

Environnement C (Milieu sulfaté) : éprouvettes sont dans un milieu hypothétique contenant 2 % de H_2SO_4 g pour cette raison on mit 29.6 g /litre d'eau, qui libre 20 g de SO_4^{-2} dans un litre d'eau.

V.2.5 Essais mécaniques

V.2.5.1 Essais de compression (NF P 18-406)

a- Objectif de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton.

b- Principe de l'essai

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

c- Equipements nécessaires

Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412.

Photo (V, 4) : Appareil de compression utilisé (LTPS Ouargla)

d- Conduite de l'essai de rupture

- **Préparation et positionnement des éprouvettes**
  - Positionner les éprouvettes cubiques de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.

- Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec un précision ± 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou de diamètre pour les éprouvettes cylindriques.

➢ **Mise en charge :**

Sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage 0.2 MPa/s à 1.0 MPa/s.

Appliquer la charge sans choc et l'accroitre de façon continue à la vitesse constante sélectionnée ± 10 % jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La charge maximale obtenue doit être enregistrée.

➢ **Expression des résultats :**

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

$$F_c = \frac{F}{A} \quad \text{.....V.3}$$

Où :

F_c : est la résistance à la compression, exprimée en MégaPascals (N/mm) ;

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons ;

A : est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, exprimée en millimètres carrés.

V.2.5.2 Résistance à la traction par flexion : Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques 7*7*28 cm^3 conformément à la norme N F P 18-407, les éprouvettes sont chargées progressivement à vitesse constante de 0.3 KN/S jusqu'à la rupture.

a- Objectif de l'essai : L'essai a pour but de connaître la résistance à la traction du béton.

b- Principe de l'essai : Il s'effectue en général sur des éprouvettes prismatiques, reposant sur deux appuis, soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée notre cas (moment maximal constant entre les deux charges) ou sous une charge concentrée appliquée au milieu.

c- Equipement nécessaire : appareil de traction par flexion figure (V, 4) et figure (V, 5)

- **Appareil de chargement :**

Au moment de l'essai, les appuis doit être parallèles entre eux, et leur positionnement est effectué par rapport à l'axe de la machine avec une tolérance de ± 1 % de leur écartement.

Les appuis, constitués par des rouleaux ou des fractions de fractions de rouleaux en acier, ont un rayon de 20 mm au voisinage de la ligne de contact avec l'éprouvette.

Photo (V, 5) : Positionnement des éprouvettes à l'appareil de traction par flexion (laboratoire EVERNZA Université d'Ouargla)

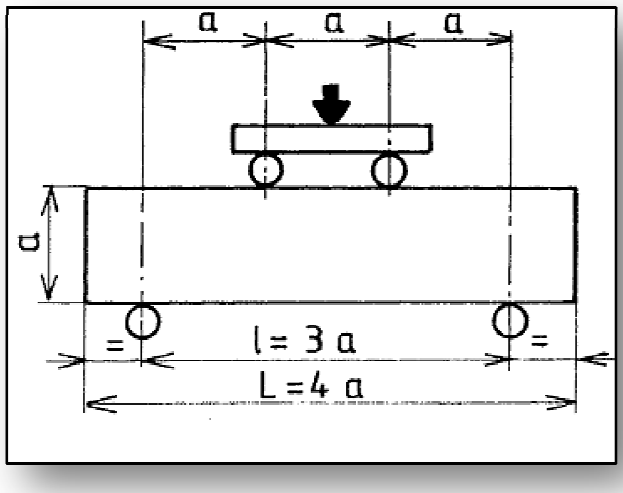


Figure (V, 5) : schéma représentant les positions d'appuis à l'appareil de traction par flexion

d- Conduite de l'essai de rupture :

- **Mise en place et centrage de l'éprouvette**

Placer l'éprouvette dans l'appareil de chargement en prenant comme faces de chargement ses faces de moulage et en plaçant son axe longitudinal dans le plan de flexion de l'appareil à 1 mm prés. [N F P 18-407].

Photo (V, 6) : Appareil de traction par flexion

(laboratoire EVERNZA Université de Ouargla)

➢ **Mise en charge**

Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs. La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 0.05 MPa par seconde, avec une tolérance de $\pm$ 0.01 MPa par seconde. [N F P 18-407]

➢ **Expression des résultats :**

Retenir pour la charge de rupture la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et calculer, à 0.1 MPa prés, la résistance correspondante T_f en MégaPascals, par le quotient suivant :

$$F= \frac{30\,f}{a^2} \quad \text{.....V.4}$$

Ou f est la charge maximale (en kilonewtons) et (a) l'arête de la base (en centimètre) à condition que l = 3 a. (déduite a la formule $6M/bh^2$, avec M= FL/6, b=h=a, et l=3a).

V.2.6 Essai de porosité accessible : La méthode utilisée correspond aux normes ASTM désignation C 642.

a- L'objectif de l'essai : L'essai a pour but de connaître la porosité du béton.

b- Conduite de l'essai : pour l'évaluation de la porosité d'un échantillon on adopte la démarche suivante :

- Sécher les éprouvettes dans une étuve à 103°C pendant au moins 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante, cette masse est notée « A »
- Immersion des éprouvettes dans une casserole d'eau
- Chauffer jusqu'à ébullition pendant 05 heures
- On retire les éprouvettes et on prise le poids de chaque éprouvette, soit une masse « B »

c- Calcul de la porosité :

La porosité est déterminée par la relation suivante :

$$P(\%) = ((B-A)/B) \times 100 \quad \text{V.5}$$

Avec :

P : porosité accessible à l'eau en %

A : poids de l'échantillon après étuvage (g)

B : poids à l'air après immersion et ébullition (g)

Chapitre VI : Résultats et discussions

VI.1 Introduction : Nous présentons dans ce chapitre les résultats et l'analyse des essais physiques et mécaniques (la porosité accessible, la masse volumique, la résistance à la compression, et la résistance à la traction effectués sur des bétons conservés aux différents milieux.

Notation :

- CRSSP : béton avec type de ciment CRS, avec ajout de super plastifiant SP 40.
- CPJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40.
- 2 SBJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40 et 2% de Sable de dune broyé.
- 4 SBJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40 et 4% de Sable de dune broyé.
- 8 SBJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40 et 8% de Sable de dune broyé.
- 2 FSJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40 et 2% de fumée de silice.
- 4FSJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40 et 4% de fumée de silice.
- 8 FSJSP : béton avec type de ciment CPJ, avec ajout de super plastifiant SP 40 et 8% de fumée de silice.

VI.2 Porosité accessible et la masse volumique : On utilise des éprouvettes de 7 x 7 x 7 cm^3 préparées selon les différentes formulations citées ci-dessus et elles étaient conservés dans un milieu standard les résultats obtenu à l'âge de 28 jours sont mentionnés dans le tableau (VI, 1).

Tableau (VI, 1) : Porosité accessible et la masse volumique des différentes formulations.

formule	Porosité (%)	La masse volumique ($kg/m^{3)}$
CRS	7.28	2340
CPJ	7.36	2343
2 SBJSP	7.03	2361
4 SBJSP	7.29	2356
8 SBJSP	7.82	2335
2 FSJSP	6.95	2365
4 FSJSP	6.91	2374
8 FSJSP	6.63	2390

VI.2.1 Porosité accessible en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice:

La figure (VI, 1) illustre les porosités obtenues des bétons avec différents pourcentages de fumées de silice :

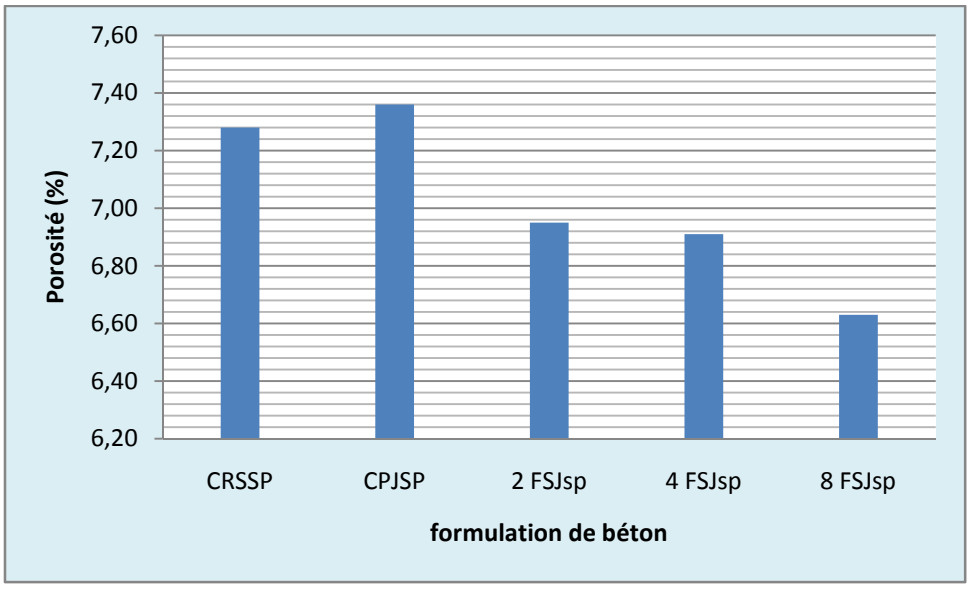


Figure (VI, 1): Porosité accessible en fonction du pourcentage d'adition de la fumée de silice.

La courbe de la figure (VI, 1) montre que :

- D'autant le pourcentage de fumée de silice ajouté est élève plus que la porosité est faible, et par conséquence le béton est plus durable.
- La plus faible porosité est obtenue au béton à 8% d'ajout de fumée de silice.
- La plus grande porosité est obtenue au béton à base de CPJ soit sans ajout.

On conclu :

- L'ajout de la fumée de silice au béton réduit la porosité accessible de ce béton.
- Lorsque le pourcentage de fumée de silice ajouté au béton augmente, la porosité de ce dernier diminue.
- Tant que la durabilité est associée à la porosité qui autorise la pénétration des agents agressifs extérieurs dans le béton donc l'ajout de fumée de silice au béton contribue à l'amélioration de la durabilité de béton.

VI.2.2 Porosité accessible en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé:

La figure (VI, 2) illustre les porosités obtenues des bétons avec différents pourcentages de sable de dune broyé :

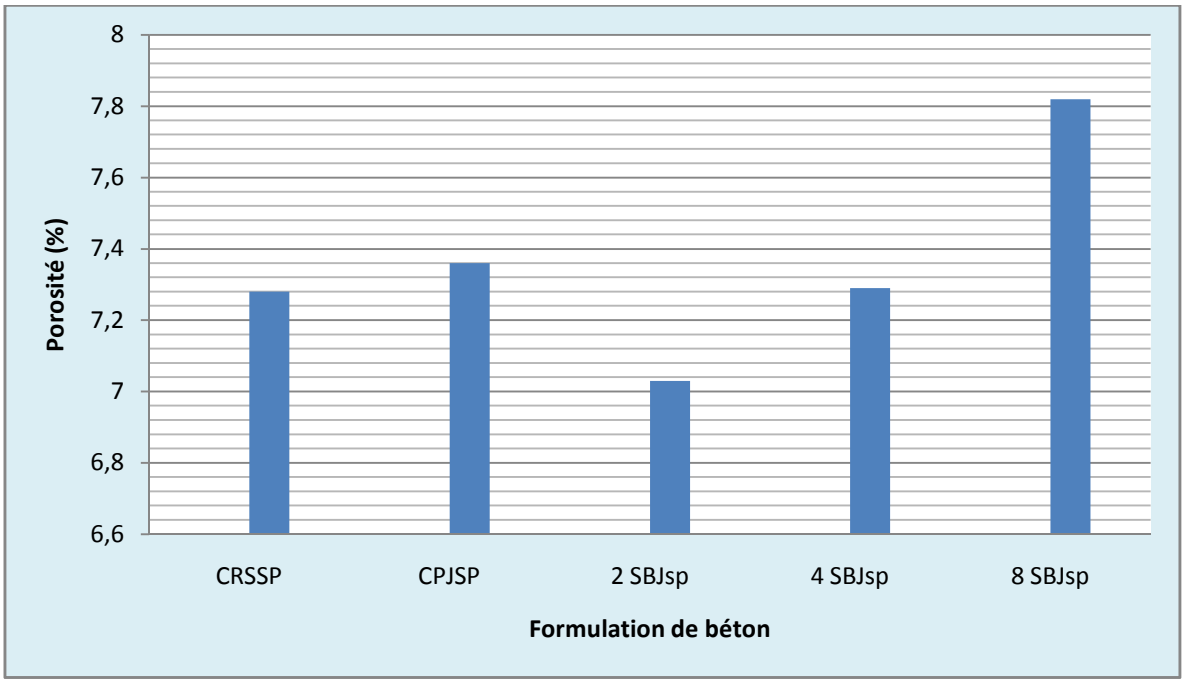


Figure (VI, 2): Porosité accessible en fonction du pourcentage d'adition de sable de dune broyé.

La courbe de la figure (VI, 2) montre que :

- L'addition se 2 % de sable de dune broyé réduit la porosité du béton compartivement à béton CRSSP et CPJSP, mais au delà de ce pourcentage la porosité augmente proportionnellement avec le pourcentage d'addition.
- Le 2SBJSP et 4SBJP présentent une porosité moins que celle de CPJSP.
- Le 4SBJSP présente une porosité très proche à celle de CRSSP.
- La plus faible porosité obtenue et celle de 2SBJSP.
- La plus grande porosité obtenue et celle de 8SBJSP.

On conclue que

- L'ajout d'un pourcentage 2% de sable de dune broyé au béton réduit la porosité du béton, une diminution de 4.48 % a été enregistrée.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton peur être considéré comme valeur optimale.
- De ce qui précède l'ajout d'une quantité optimale de sable de dune broyé au béton contribue à sa durabilité.

VI.2.3 Masse volumique en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice :

La figure (VI, 3) illustre les masses volumiques obtenues à des bétons avec différents pourcentages de fumée de silice :

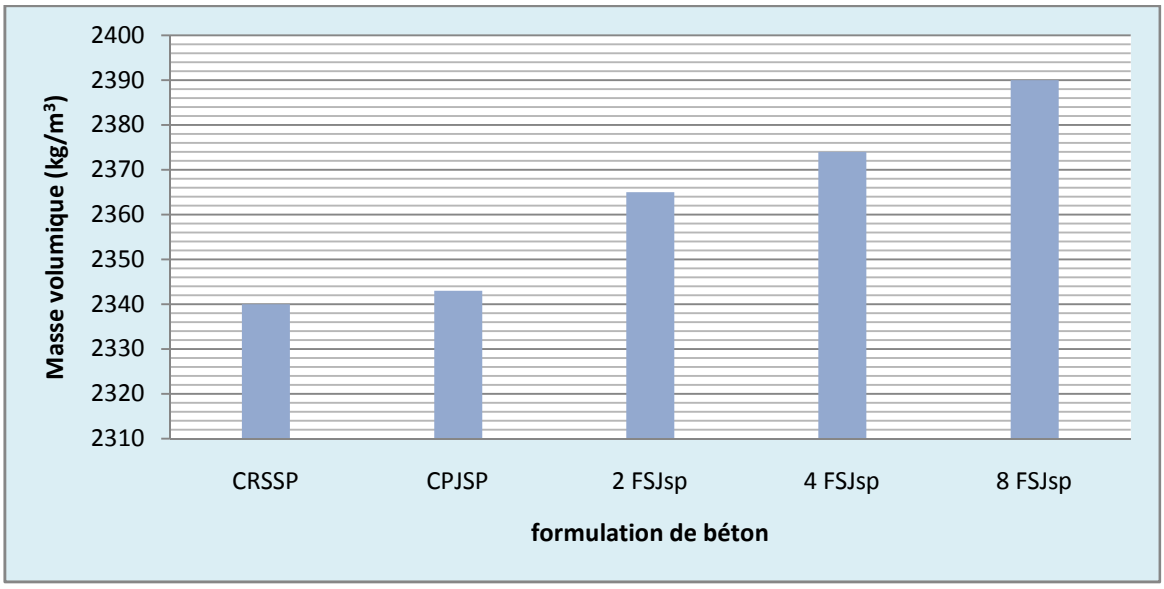


Figure (VI, 3) : Masse volumique en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice.

La courbe de la figure (VI, 3) montre que :

- Plus que le pourcentage de la fumée de silice ajouté au béton est élève plus que sa masse volumique est élevée.
- La plus grande masse volumique obtenue est celle du 8FSJSP qui est de 2390kg/m^3.
- L'ajout de la fumée de silice au béton conduit à l'augmentation de sa masse volumique.

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice au béton augmente sa masse volumique.
- La fumée de silice contribue à l'amélioration de durabilité du béton par ce que la forte compacité est toujours une condition nécessaire pour une bonne durabilité [10]

VI.2.4 Masse volumique en fonction du pourcentage d'addition de sable de dune broyé :

La figure (VI, 4) illustre les masses volumiques obtenues des bétons avec différents pourcentages de sable de dune broyé :

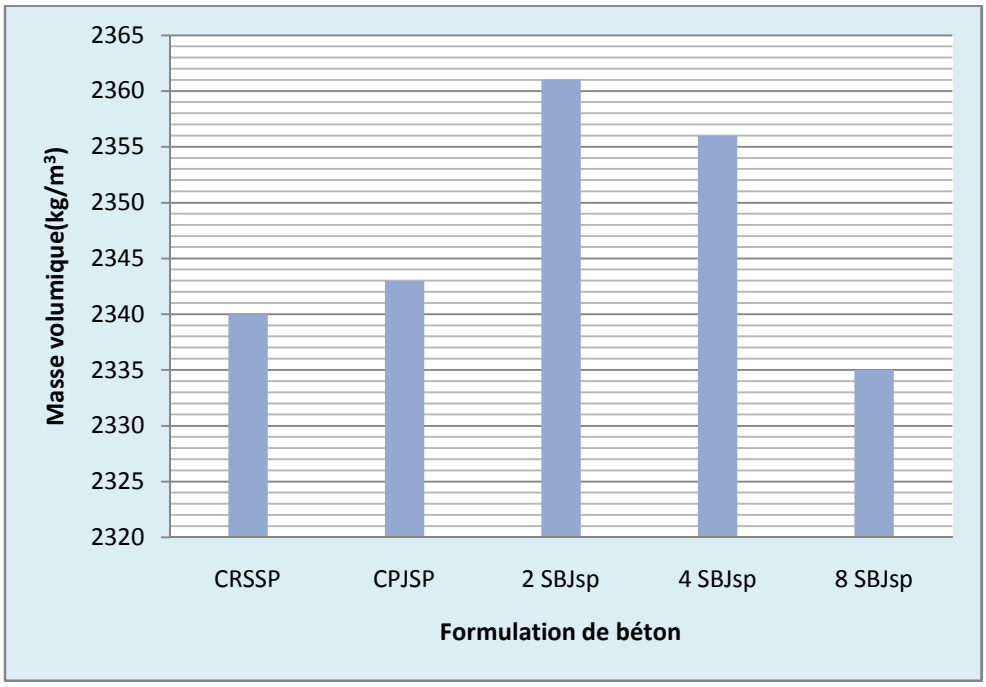


Figure (VI, 4) : Masse volumique en fonction du pourcentage d'addition de sable de dune broyé.

La courbe de la figure (VI, 4) montre que :

- L'ajout de 2% de sable de dune broyé augmente la masse volumique du béton comparativement à un béton sans ajout mais au-delà de ce pourcentage cette masse volumique diminue.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton à base de CPJ augmente sa masse volumique à 0.76%.
- L'ajout de 4% de sable de dune broyé au béton à base de CPJ augmente sa masse volumique à 0.55%.
- L'ajout de 8% de sable de dune broyé au béton à base de CPJ diminue sa masse volumique à 0.34%.

On conclue que :

- L'ajout de 2% de sable de dune broyé donne la plus grande masse volumique qui est 2361kg/m3.
- De ce qui précède, l'ajout d'une quantité optimale de sable de dune broyé au béton contribue à sa durabilité.

VI.3 Résistances mécaniques :

VI.3.1 Résistances à la compression : les figures suivantes présentent les résultats de la résistance à la compression dans les différents milieux de conservation à des différents âges tenant en compte :

- Avec addition ou non
- La quantité d'addition ajoutée
- Type de ciment utilisé.

VI.3.1.1 Influence du type de ciment sur l'évolution de la résistance à la compression des différents milieux :

La figure (VI, 5) Illustre l'évolution de la résistance obtenue en fonction du type de ciment.

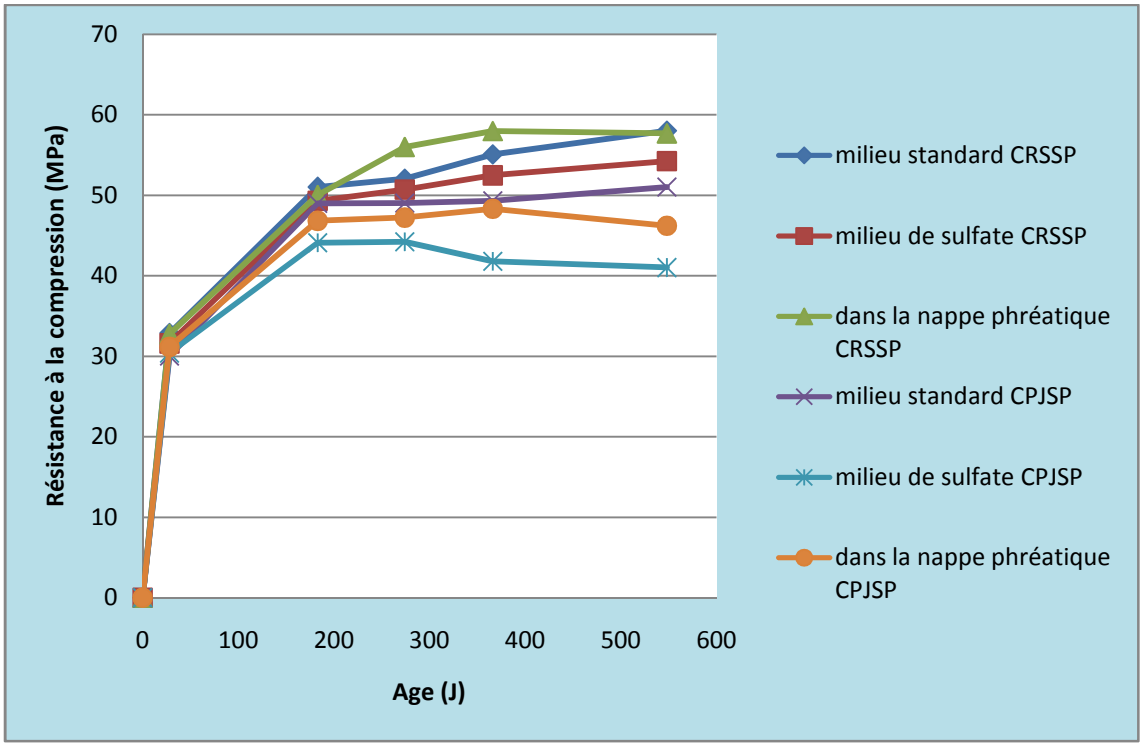


Figure (VI, 5) : Evolution de la résistance à la compression des différents types de ciment dans les différents milieux.

L'examen de cette figure montre que :

- Le béton à base de CRS a développé les plus hautes résistances à la compression par rapport au béton à base de CPJ quel que soit le milieu de conservation.
- Le béton à base de CPJ conservé dans le milieu de sulfate présente les plus faibles résistances à la compression à tout les temps par rapport aux autres.
- Un accroissement des résistances continue dans le temps pour le béton à base de CRS quel que soit le milieu de conservation, on enregistre la plus grande valeur de résistance, après 18 mois d'âge pour ce béton conservé dans milieu standard (58 MPa).
- Un accroissement des résistances dans le temps pour le béton à base de CPJ conservé au milieu standard a été constaté.

- Le béton à base de CPJ conservé dans la nappe phréatique a développé une augmentation de résistance jusqu'à 48.3 MPa obtenue après une année, au delà de la quelle la résistance a diminué.
- Le béton à base de CPJ conservé dans un milieu sulfatique a développé une augmentation de résistance jusqu'à 44.1 MPa obtenue à l'âge de 06 mois, au delà du laquelle la résistance a diminue, présente à 18 mois 41.02 MPa.

On conclue :

- Le béton à base de CRS à développé les plus hautes résistances par rapport au béton à base de CPJ quel que soit le milieu de conservation.
- Le béton à base de CRS résiste aux agressions chimiques mieux que le béton à base de CPJ (par projection des Rc).

VI.3.1.2 Milieu standard :

a- Influence d'addition de la fumée de silice sur l'évolution de la résistance à la compression :

La figure (VI, 6) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue, des bétons conservés au milieu standard avec additions de la fumée de silice ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

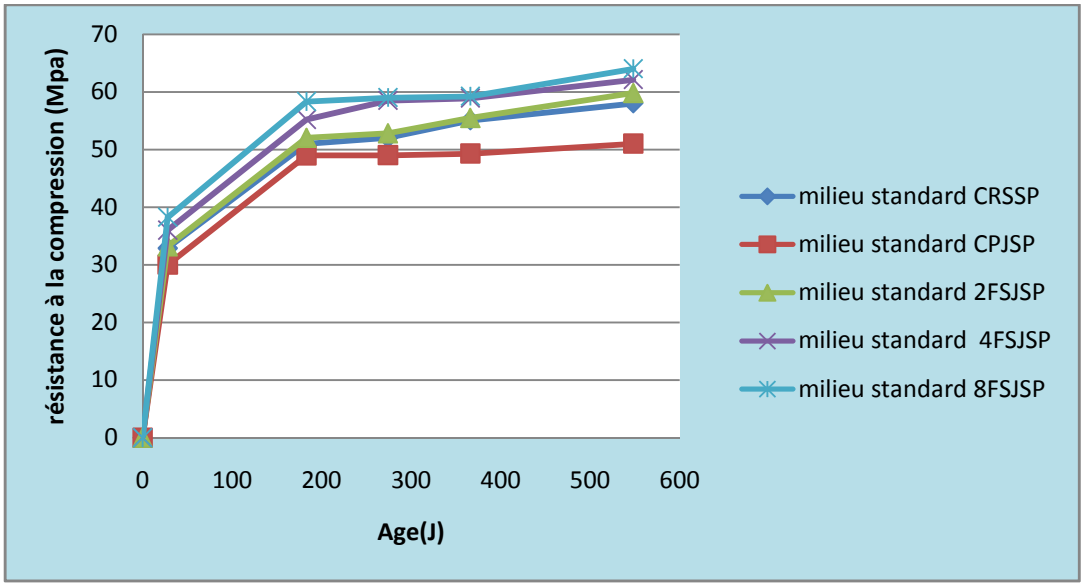


Figure (VI, 6) : Evolution de la résistance à la compression pour des différents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu standard.

L'examen de cette figure montre que :

- La résistance à la compression augmente proportionnellement avec le pourcentage de la fumée de silice ajouté.
- Le béton à base de CRS et le béton à base CPJ (sans addition) ont développé une résistance moins que celle développé par le béton à base CPJ avec addition de fumée de silice (plus de 2 %).
- Le béton à base de 8 % de fumée de silice a développé la plus grande résistance après 18 mois qui est égale à 64 MPa.
- Le classement des mélanges selon la résistance est comme suit : 8FSJSP, 4FSJSP, 2FSJSP, CRSSP, CPJSP
- L'allure de ces courbes montre un accroissement continu des résistances dans le temps et sans changement dans l'ordre de classement.

On conclue que :

- La fumée de silice améliore la résistance à la compression qui est due à :
  - La très grande réactivité de la fumée de silice [10]
  - L'intégration de la fumée de silice améliore la compacité par optimisation du squelette granulaire.

b- Influence d'addition de sable de dune broyé sur l'évolution de la résistance à la compression :

La figure (VI, 7) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue, des bétons conservés au milieu standard avec additions de sable de dune broyé ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

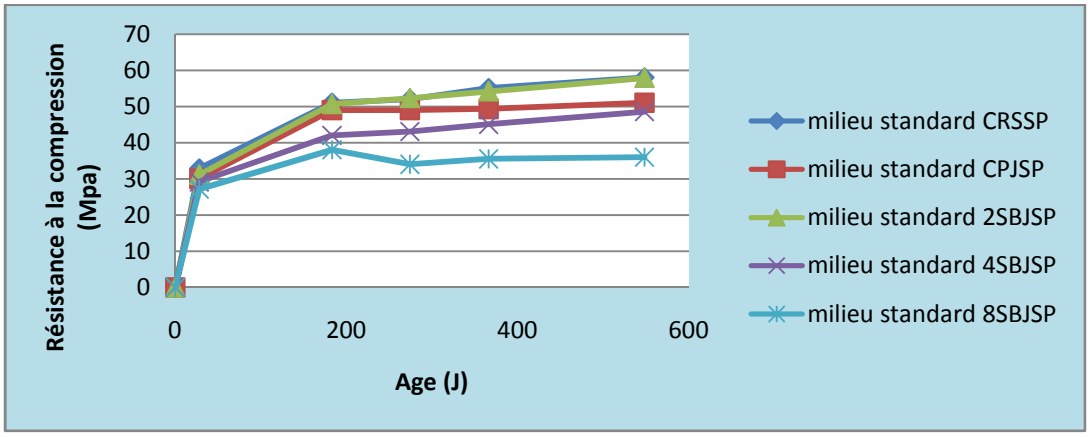


Figure (VI, 7) : Evolution de la résistance à la compression pour des différents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans le milieu standard.

L'examen de cette figure montre que :

- Le béton à base de CRS sans addition a développé une résistance assez proche de celle à base de CPJ avec ajout de 2 % de sable de dune broyé (2SBJSP).
- Une diminution de résistance à toutes les échéances au delà 2% d'ajout de sable de dune broyé
- Le béton à base de (CPJ + 2%) de sable de dune broyé a développé une résistance mieux que celle à base de CPJ sans addition à toutes les échéances testées.
- Le béton à base de 8 % a développé la plus faible résistance à toutes les échéances testées.

On conclue que :

- L'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton a base de CPJ améliore sa résistance jusqu'au 13.49%, on explique ça par l'intégration de sable de dune broyé qui fait l'amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire cette approche il est démontré aussi par l'analyse de la figure (VI, 4) qui montre que l'ajout 2 % de sable au béton augmente sa mase volumique.

c- Influence d'addition sur l'évolution de la résistance à la compression :

La figure (VI, 8) rassemble les courbes des résistances à la compression illustrées précédemment obtenues sur des bétons avec additions de fumée de silice et de sable de dune broyé ayant des pourcentages variés conservés au milieu standard

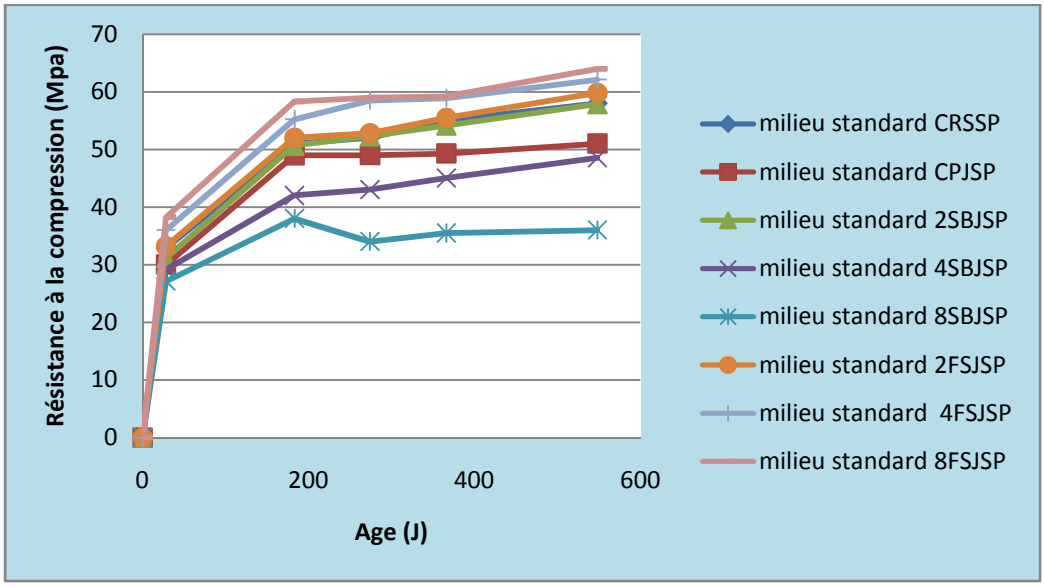


Figure (VI, 8) : Résistance à la compression en fonction du temps à des différents pourcentages d'ajout (milieu standard)

L'analyse de la figure (VI, 8) montre que :

- le béton à base de 8 % de fumée de silice a développé la meilleure résistance dans ce milieu à toutes les échéances testées.
- le béton à base de 8 % de sable de dune broyé a développé la plus faible résistance dans ce milieu à toutes les échéances testées.
- l'ajout de 2% de sable de dune broyé améliore la résistance à la compression mais au delà de 2 % l'effet d'addition devient inverse.
- une augmentation de la résistance avec le temps dans tous les mélanges est illustrée sauf le béton à base de 8% de sable de dune broyé dont la résistance est perturbée.

On conclue que :

- Au même pourcentage d'ajout, dans le milieu standard les résistances à la compression a été développées par le béton à base d'ajout de fumée de silice sont plus que celles a été développées par le béton à base d'ajout de sable de dune broyé**.**

VI.3.1.3 Milieu nappe phréatique :

a- Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice

La figure (VI, 9) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue des bétons conservés dans la nappe phréatique avec additions de fumée de silice ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

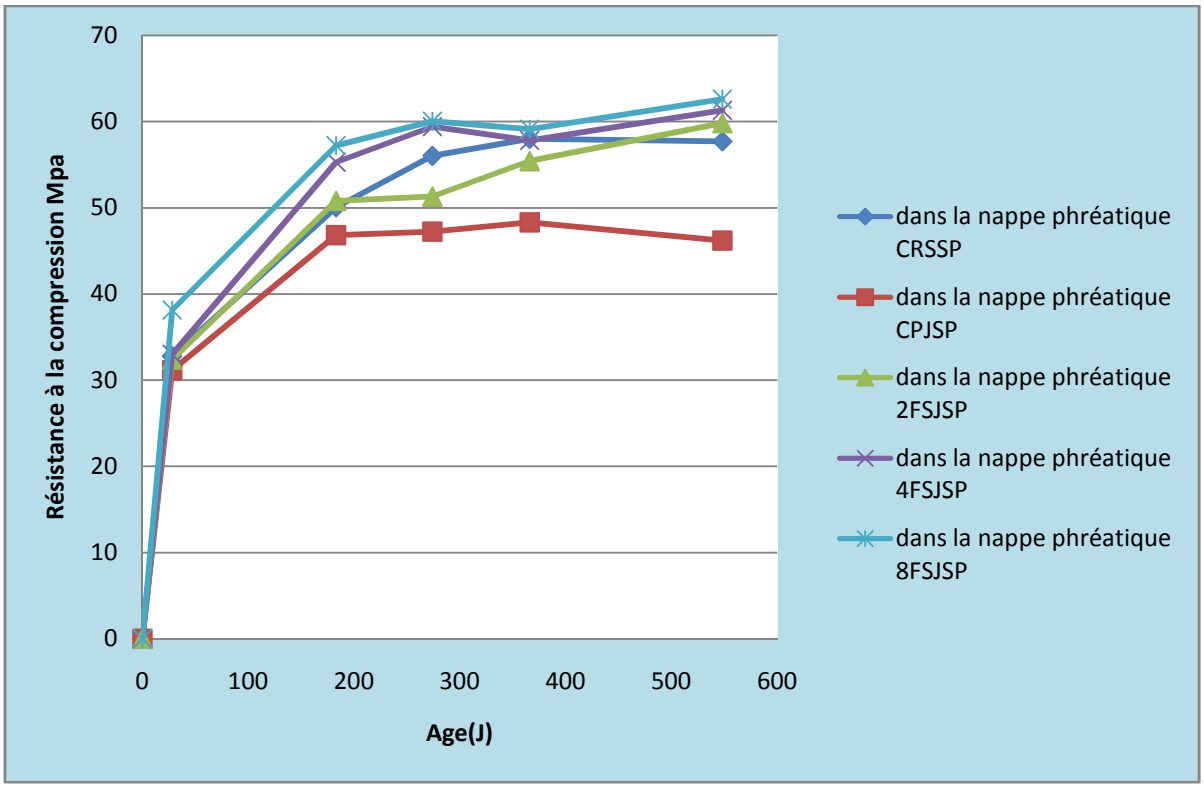


Figure (VI, 9) : Evolution de la résistance à la compression des différents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans la nappe phréatique.

L'examen de cette figure montre que :

- Le béton à base de 8% de fumée de silice a développé la plus grande valeur de résistance à la compression.
- A l'âge de 18 mois le classement des mélanges selon la résistance à l'ordre décroissant est : 8FSJSP, 4FSJSP, 2 FSJSP, CRSSP, CPJSP
- Il y'a un changement dans l'ordre de classement entre le 2FSJSP et le CRSSP au cours du temps.

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice au béton augmente sa résistance à la compression de façon proportionnelle.
- Le béton avec fumée de silice résiste mieux aux agressions chimique de la nappe phréatique par rapport au béton sans ajout soit à base CRS ou à base de CPJ par ce que la silice amorphe est très réactive et que la petitesse des particules ($15m^2/g$) accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors de l'hydratation du ciment portland en outre, les très petites particules de la fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides.

b- Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé :

La figure (VI, 10) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue des bétons conservés dans la nappe phréatique avec additions de sable de dune broyé ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%) à toutes les échéances testées.

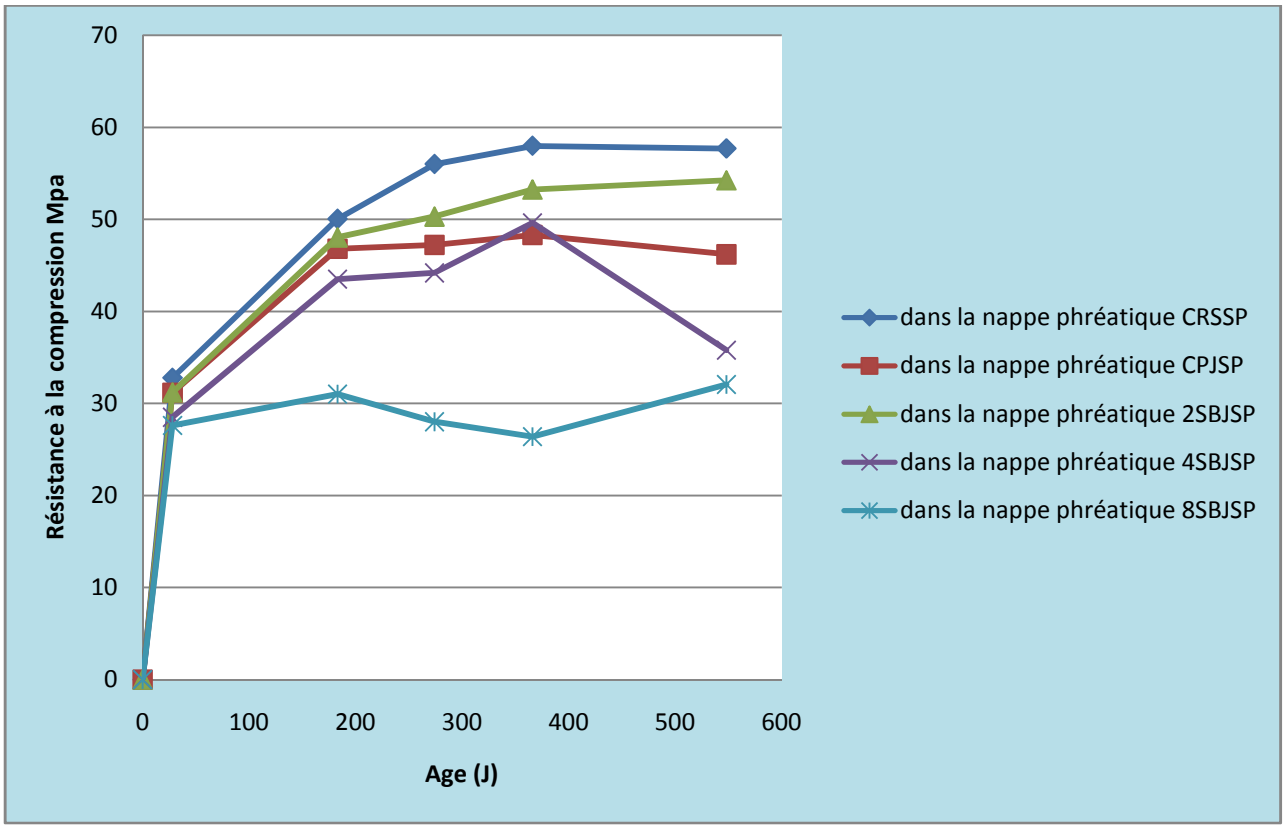


Figure (VI, 10) : Evolution de la résistance à la compression pour les différents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans la nappe phréatique.

L'examen de cette figure montre que :

- Le béton à base de CRS a développé la meilleure résistance à toutes les échéances testées.
- L'ajout de 2 % de sable de dune broyé au béton à base de CPJ améliore sa résistance à la compression jusqu'à 29 % enregistré à l'âge de 18 mois comparativement à celui sans ajout.

- L'ajout de plus que 4% de sable de dune broyé au béton à base CPJ diminue la résistance à la compression jusqu'à 22.55 % à l'âge de 18 mois (par rapport au CPJSP au même milieu).
- L'ajout de plus que 8% de sable de dune broyé au béton à base CPJ diminue la résistance à la compression jusqu'à 30.64 % à l'âge de 18 mois (par rapport au CPJSP au même milieu).
- après une année on a remarqué que le béton à base de 4% de sable de dune broyé a développé une résistance plus que la résistance développé par le béton a base de CPJ sans addition (due au colmatage des pores par les sels).
- 4SBJSP ET 8SBJSP ont développé des résistances vallonnés au cours du temps.

On conclue que :

- L'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton améliore la résistance à la compression jusqu'à 17.4 % obtenu à l'âge de 18 mois, au delà de 2% l'effet est inverse. on explique ça par la même approche précédente, qu'il s'agit de l'amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire confirmée aussi par la figure (VI, 4) lors de l'analyse de variation de la mase volumique.

c- Influence d'addition sur l'évolution de la résistance à la compression :

La figure (VI, 11) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue à des bétons conservés dans la nappe phréatique avec additions ayant des pourcentages variés.

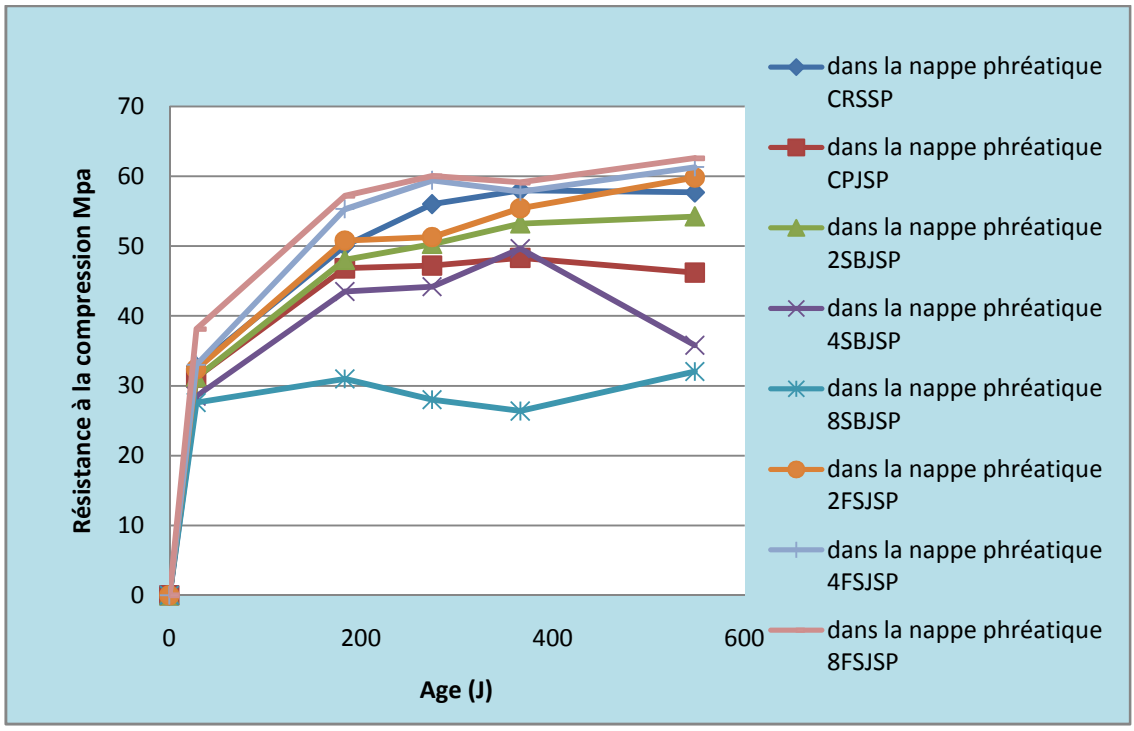


Figure (VI, 11) : Evolution de la résistance à la compression pour des différents pourcentages d'ajout dans la nappe phréatique.

L'examen de la figure (VI, 11) montre que :

- Le béton à base de 8% de fumée de silice a développé la meilleure résistance à toutes les échéances testées.
- Le béton à base de 8 % de sable de dune broyé a développé la plus faible résistance à toutes les échéances testées.
- La résistance à la compression augmente proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de la fumée de silice ajoutée.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé améliore la résistance à la compression de béton à base du CPJ.

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice au béton améliore la résistance à la compression et présente des résistances à la compression mieux que celles du CPJSP et du CRSSP.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé améliore la résistance à la compression et présente des résistances à la compression mieux que celles du CPJSP.

- Aussi dans ce milieu et au même pourcentage d'ajout, les résistances à la compression développées par le béton à base d'ajout de la fumée de silice sont plus que celles développées par le béton à base d'ajout de sable de dune broyé.

VI.3.1.4 Milieu de sulfate :

a- Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice :

La figure (VI, 12) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue du béton conservé dans le milieu sulfatique avec additions de fumée de silice à savoir les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

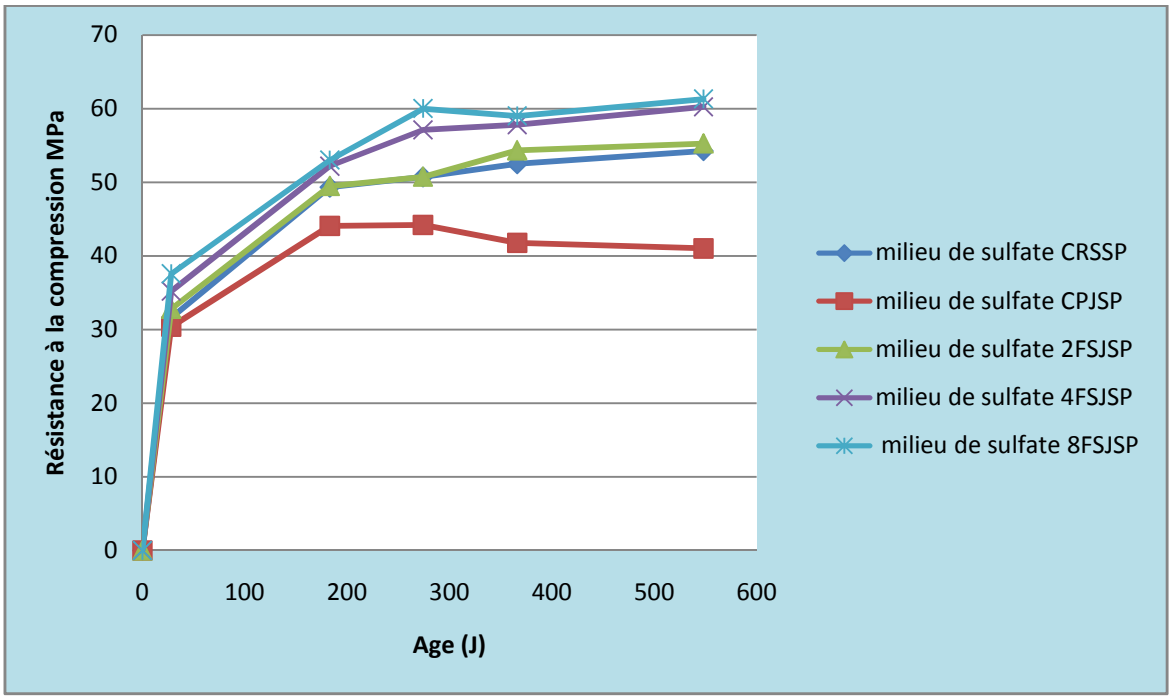


Figure (VI, 12) : Evolution de la résistance à la compression pour les différents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu sulfatique.

L'examen de cette figure montre que :

- La résistance à la compression augmente proportionnellement avec le pourcentage de la fumée de silice ajoutée.
- La résistance à la compression du béton à base de 2% de fumée de silice est proche de celle du béton à base de CRS sans addition.

- Le béton à base de 8% d'ajout de fumée de silice a développé la plus grande valeur de résistance qui est de 61.23 MPa atteinte à l'âge de 18 mois.

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice au béton améliore la résistance à la compression dans ce milieu à des pourcentages relativement élevés (A l'âge de 18 mois on constate un gain de résistance égal à 34.71%, 46.83%, 49.43% respectivement à 2FSJSP 4FSJSP 8FSJSP, comparativement à ce lui sans ajout).
- Le béton à base de fumée de silice présente des résistances meilleures que celles du CRSSP dans milieu de sulfate.
- Ces résultats de béton à base de fumée de silice confirment les résultats trouvés dans les travaux antérieurs sur le rôle avantageux d'ajout de la fumée de silice sur la résistance du béton à l'agression chimique particulièrement celle du sulfate.

b- Résistance à la compression en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé :

La figure (VI, 13) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue du béton conservé dans le milieu sulfate avec additions de sable de dune broyé selon les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

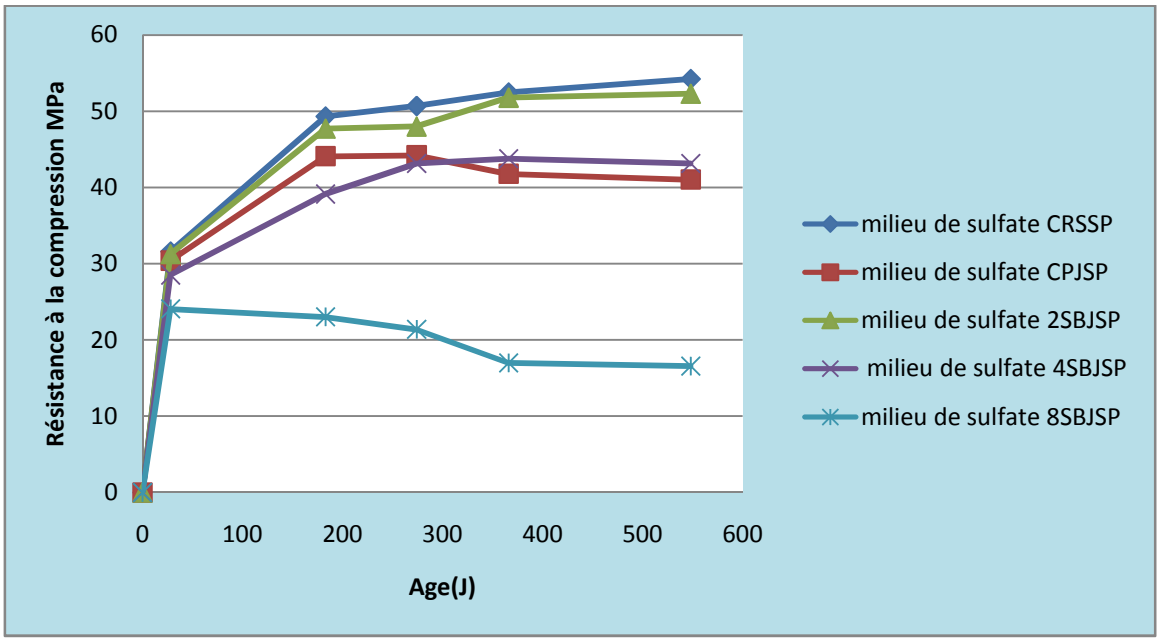


Figure (VI, 13) : Evolution de la résistance à la compression des différents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans le milieu sulfatique.

L'examen de cette figure montre que :

- Le béton à base de CRS a développé des résistances meilleures que les autres mélanges à toutes les échéances testées.
- Le béton à base de 2% de sable donne des résistances aux compressions meilleures que celles du CPJSP, du 4 SBJSP et du 8SBJSP à toutes les échéances testées.
- Le béton à base de 4% de sable de dune broyé a développé des résistances moins du celles du CPJ à l'âge de 28 jour au 09 mois, mais au delà de 09 mois le 4SBJSP continue à évaluer légèrement mais le CPJSP présente une réduction de résistance.
- Le béton à base de 8% de sable de dune broyé a développé la plus faible résistance à toutes les échéances testées et a enregistré une dégradation de résistance dans ce milieu.

On conclue que :

- L'ajout de 2 % de sable de dune broyé améliore la résistance à la compression dans ce milieu agressif jusqu'au 27.49 % à l'âge de 18 mois (par rapport au CPJSP au même milieu).
- Evolution de la résistance du 2SBJSP et très proche de celle du CRSSP.
- L'effet bénéfique d'ajout de sable de dune broyé est expliqué par l'amélioration de la compacité et par réduction de la porosité, qui empêche la pénétration des agents agressifs extérieurs dans le béton.

c- Influence d'addition sur l'évolution de la résistance à la compression :

La figure (VI, 14) illustre l'évolution de la résistance à la compression obtenue des bétons conservés au milieu de sulfate avec additions ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%) à toutes les échéances testées.

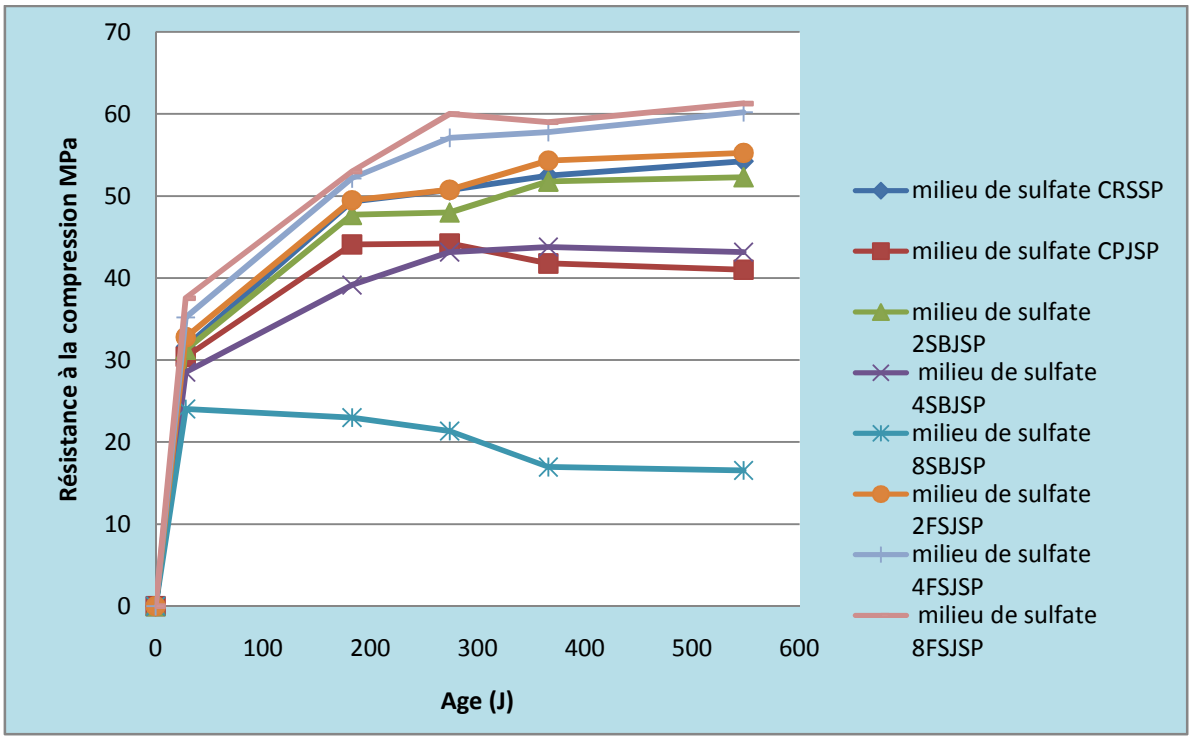


Figure (VI, 14) : Evolution de la résistance à la compression pour les différents pourcentages d'ajout dans le milieu sulfatique.

L'examen de la figure (VI, 14) montre que :

- l'ajout de la fumée de silice améliore la résistance à la compression.
- la résistance à la compression augmente proportionnellement avec le pourcentage ajouté de la fumée de silice.
- l'ajout de 2 % de sable de dune broyé au béton améliore sa résistance à la compression à toutes les échéances testées.
- l'ajout de 4 % de sable de dune broyé améliore la résistance à la compression à long terme.
- l'effet négatif du sulfate est très remarquable au béton à base de 8% de sable de dune broyé qui fais la diminution de sa résistance à la compression, un écart de 19.44 MPa a été enregistré dans ce milieu en comparaison avec le milieu standard (16.56MPa, 36MPa).

On conclue que :

- L'ajout de fumée de silice au béton améliore sa résistance à la compression.
- L'ajout d'une quantité optimale de sable de dune broyé au béton améliore sa résistance à la compression.

- Dans ce milieu et au même pourcentage d'ajout, les résistances à la compression développées par le béton à base d'ajout de fumée de silice sont plus que celles a été développées par le béton à base d'ajout de sable de dune broyé.
- L'effet agressif du sulfate sur la résistance de compression est démontré par ces courbe qui présentent soit des écarts trouvés dans la résistance entre les bétons conservés dans ce milieu et celles qui sont conservés dans le milieu standard, voir tableau (VI, 2).

Tableau (VI, 2) : Effet du sulfate sur les résistances à la compression.

mélange	R_{C1} milieu standard (MPa)	R_{C2} milieu de sulfate (MPa	Ecart R_{C1}-R_{C2} (MPa)
CRSSP	58	54,24	3,76
CPJSP	51	41,02	9,98
2SBJSP	57,88	52,3	5,58
4SBJSP	48,52	43,15	5,37
8SBJSP	36	16,56	19,44
2FSJSP	59,78	55,26	4,52
4FSJSP	62,11	60,23	1,88
8FSJSP	64	61,3	2,7

VI.3.2 Résistances à la traction : Les figures suivantes présentent les résultats des résistances à la traction dans les différents milieux de conservation aux différents âges tenant en compte :

- Avec addition ou non
- La quantité d'addition ajoutée
- Type de ciment utilisé.

VI.3.2.1 Influence du type de ciment sur l'évolution de la résistance à la traction dans des différents milieux :

La figure (VI, 15) illustre l'évolution de la résistance obtenue en fonction de type de ciment, à toutes les échéances testées.

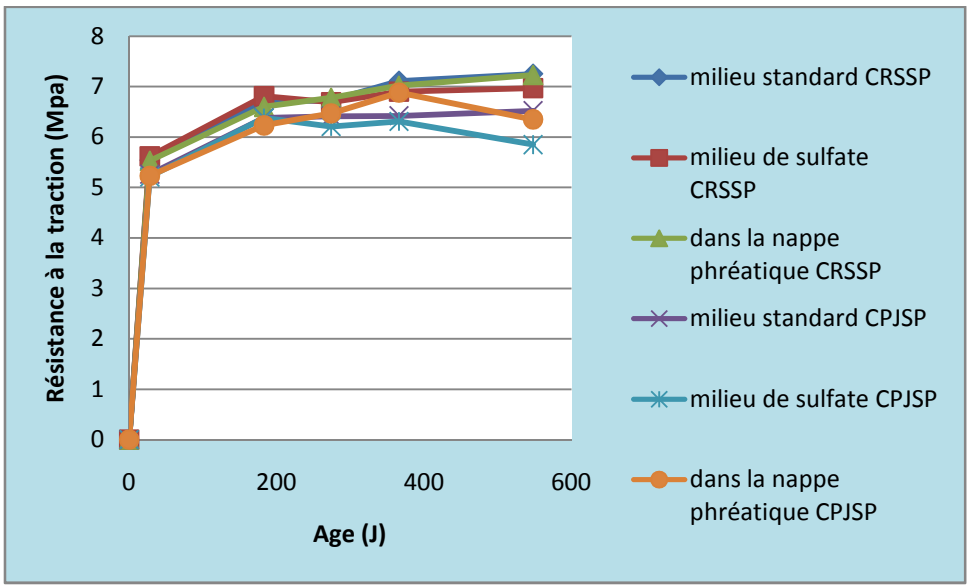


Figure (VI, 15) : Influence du type de ciment sur l'évolution de la résistance à la traction dans les différents milieux.

L'analyse de cette figure montre :

- Le béton à base de CRS conservé dans le milieu standard a développé la plus forte résistance à la traction à l'âge de 18 mois.
- Le béton à base de CPJ conservé dans le milieu sulfatique à développé la plus faible résistance à la traction à l'âge de 18 mois.
- Le béton à base de CRS a développé des résistances meilleurs que celles développées par le béton à base de CPJ quelque soit le milieu.
- L'effet agressif du sulfate est démontré par la diminution de la résistance à la traction du CPJSP conservé dans le milieu sulfatique, un écart de (0.67MPa) a été enregistré voir tableau (VI, 3).

On conclue que :

- le béton à base de CRS résiste mieux que le béton à base de CPJ aux agressions chimiques conformément aux résultats antérieurs présentés par les recherches.

VI.3.2.2 Milieu standard :

a- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice :

La figure (VI, 16) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés dans le milieu standard avec additions de fumée de silice selon les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

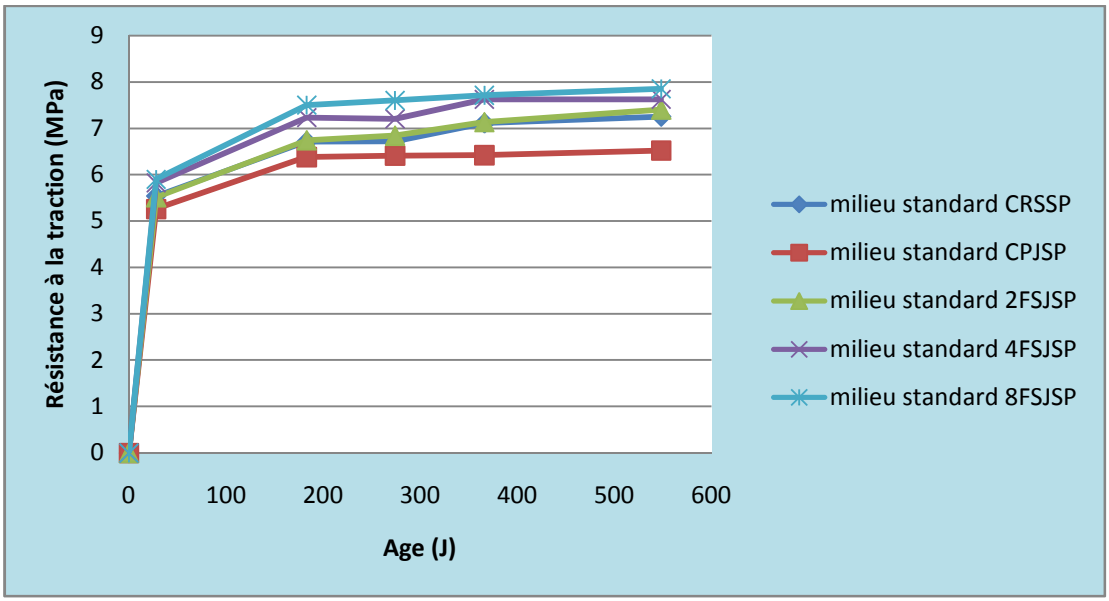


Figure (VI, 16) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu standard.

L'examen de ces courbes montre que :

- L'addition de la fumée de silice contribue positivement à l'évolution de la résistance à la traction.
- La résistance à la traction augmente proportionnellement avec le pourcentage de fumée de silice ajouté.
- Le béton à base de 8 % de fumée de silice donne la plus forte résistance à la traction à toutes les échéances testées et atteint 7.85 MPa à l'âge de 18 mois.
- Les résistances à la traction développées par le béton à base de 2% d'ajout de fumée de silice sont très proches de celles développées par le béton à base de CRS.
- La résistance à la traction augmente de manière continue dans le temps

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice améliore la résistance à la traction conformément aux résultats obtenus par les travaux antérieurs.

b- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé :

La figure (VI, 17) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue par les bétons conservés dans le milieu standard de sable de dune broyé ayant les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

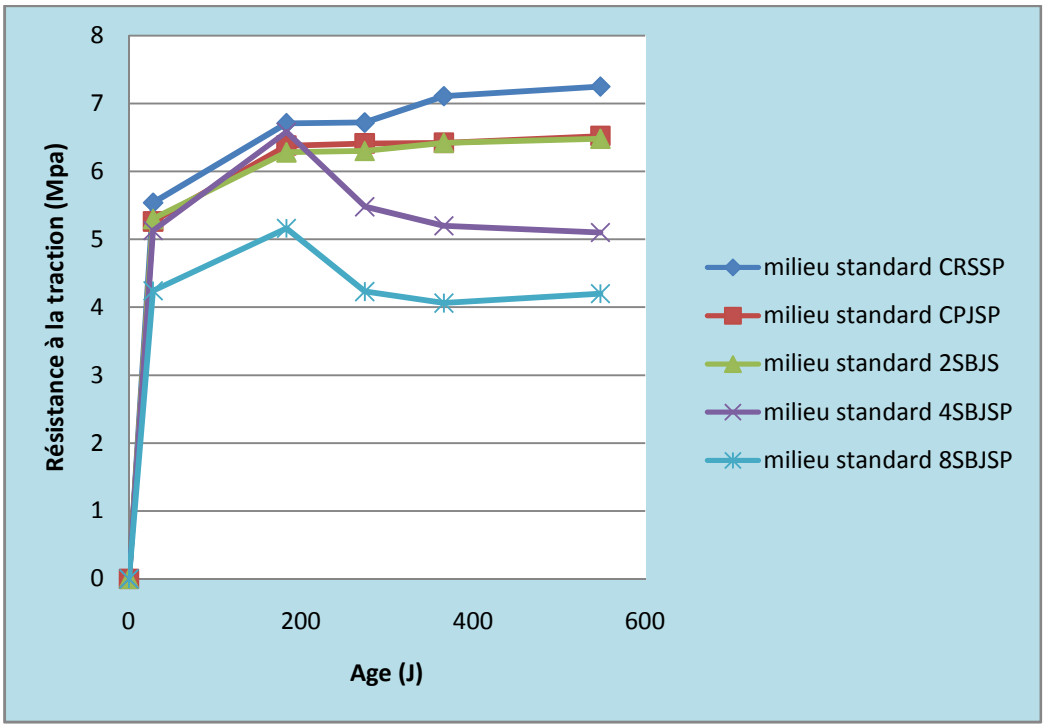


Figure (VI, 17) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans le milieu standard.

L'examen de ces courbes montre que :

- Le béton à base de CRS a développé la plus forte résistance à la traction à toutes les échéances testées et elle atteint 7.25 MPa à l'âge de 18 mois.
- L'ajout de plus de 2% de sable de dune broyé influe négativement sur la résistance à la traction au delà de 6 mois.

On conclue que :

- L'effet d'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton est considéré négligeable comparativement à celui sans ajout.
- L'ajout de plus que 2% de sable de dune broyé au béton diminue sa résistance à la traction.

c- **Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition :**

La figure (VI, 18) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue à des bétons conservés dans le milieu standard avec et sans additions.

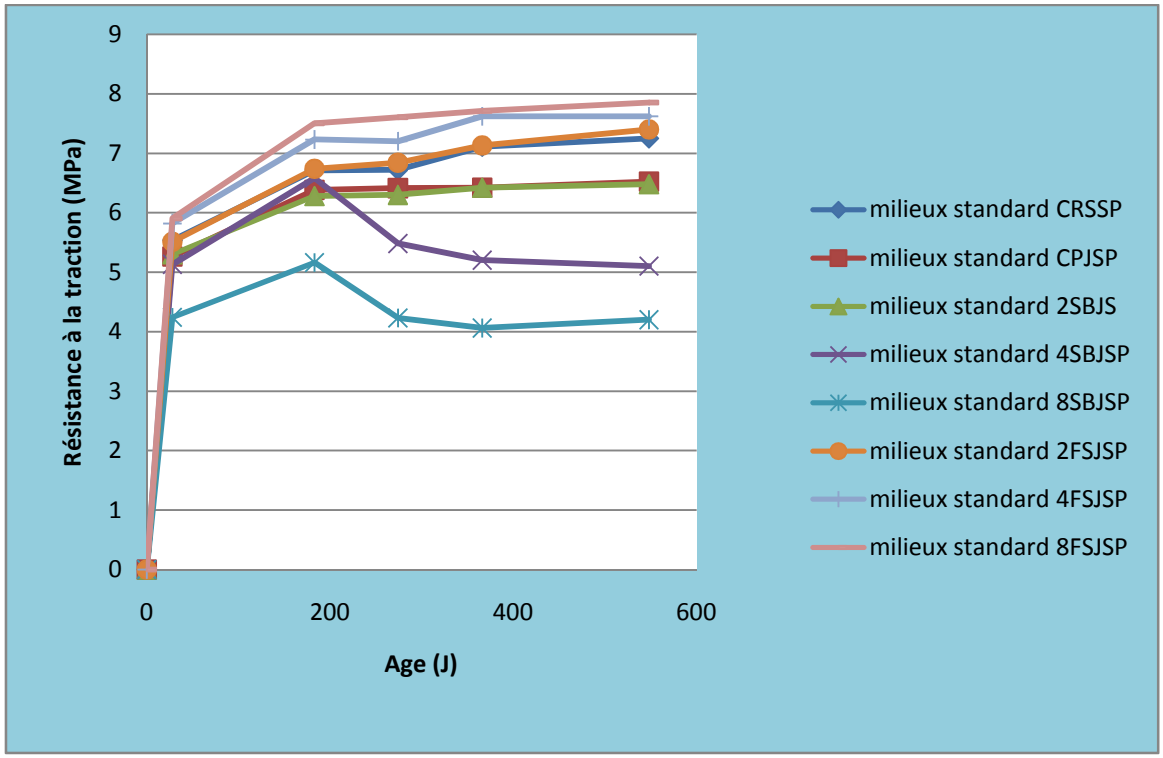


Figure (VI, 18) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout dans le milieu standard.

- Le béton à base de 8% de fumée de silice a développé la plus grande résistance à la traction à toutes les échéances testées.
- Le béton à base de 8% de sable de dune broyé a développé la plus faible résistance à la traction à toutes les échéances testées.
- L'ajout de la fumée de silice améliore la résistance à la traction du béton.
- L'effet d'ajout de plus de 2% de sable de dune broyé au béton est négatif sur la résistance à la traction.
- La résistance développée par le 2SBJSP est très proches de celle du CPJSP.

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice au béton améliore la résistance à la traction selon les pourcentages ajoutés testés.
- L'effet de l'ajout du sable de dune broyé dans ce milieu n'est pas bénéfique.

VI.3.2.3 Milieu nappe phréatique :

a- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice

La figure (VI, 19) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés dans la nappe avec additions de fumée de silice selon les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

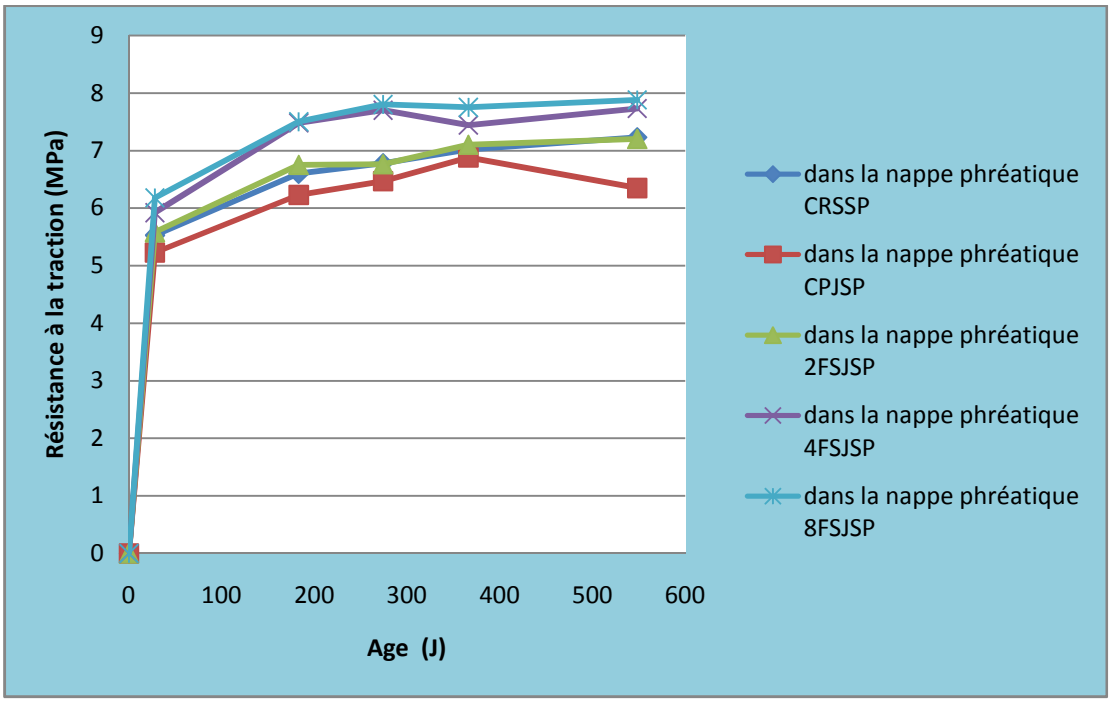


Figure (VI, 19) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans la nappe phréatique.

L'examen de ces courbes montre que :

- La résistance à la traction développée par le béton à base de CRS est très proche de celle développée par le béton à base de CPJ+2% de fumée de silice.
- Le béton à base de 8% de fumée de silice a développé la plus grande résistance à la traction qui atteint 7.88 MPa à l'âge de 18 mois.

- La résistance développée par le béton à base de CPJ augmente dans le temps jusqu'à 6.88 MPa enregistrée à l'âge d'une année au-delà de laquelle, la résistance présente une diminution.

On conclue que :

- Dans ce milieu l'ajout de la fumée de silice au béton améliore sa résistance à la traction, ainsi que sa résistance aux agressions chimiques de la nappe due à la finesse et la réactivité élevée de la fumée de silice.

b- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé :

La figure (VI, 20) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés dans la nappe avec additions de sable de dune broyé ayant les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%).

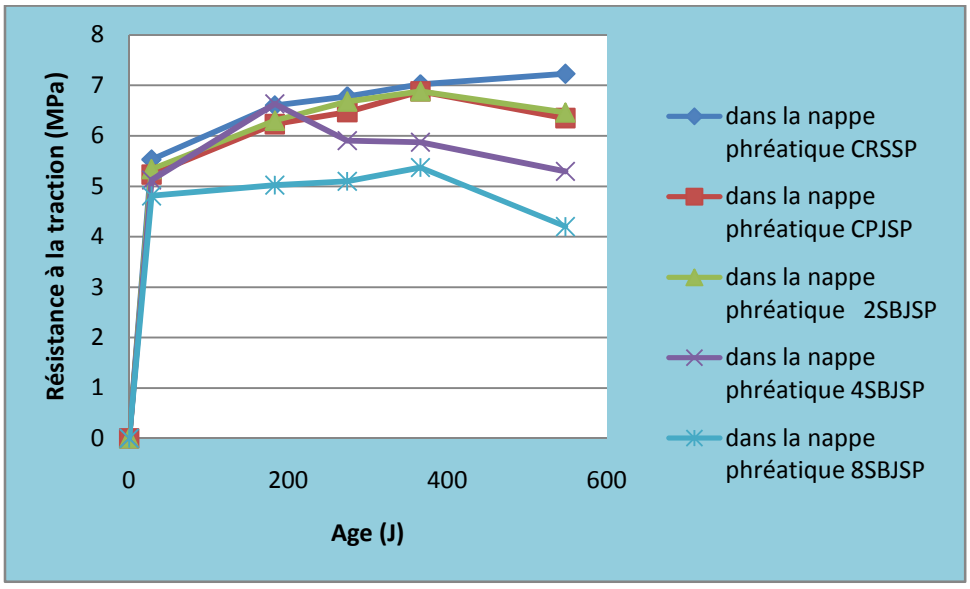


Figure (VI, 20) : Evolution de la résistance à la traction pour des différents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans la nappe phréatique.

L'examen de ces courbes montre que :

- Le béton à base de CRS à développé la plus grande résistance à la traction à toutes les échéances testées.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton améliore sa résistance à la traction jusqu'à 1.73 % enregistré à l'âge de 18 mois.

- Le béton a base de 8% de sable de dune broyé a développé la plus faible résistance à la traction à toutes les échéances testées.
- L'ajout de plus de 4% et plus de sable de dune broyé influe négativement sur la résistance à la traction. Des perturbations dans les valeurs des résistances à la traction avec le temps a ce milieu.

On conclue que :

- L'ajout d'une quantité optimal de sable de dune broyé au béton améliore sa résistance à la traction ainsi que sa résistance aux agressions chimiques de la nappe, ces propriétés démontrées par la même approche citée ci-avant concernant l'amélioration de la compacité.

c- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition :

La figure (VI, 21) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés au milieu nappe phréatique avec des additions ayant les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%)

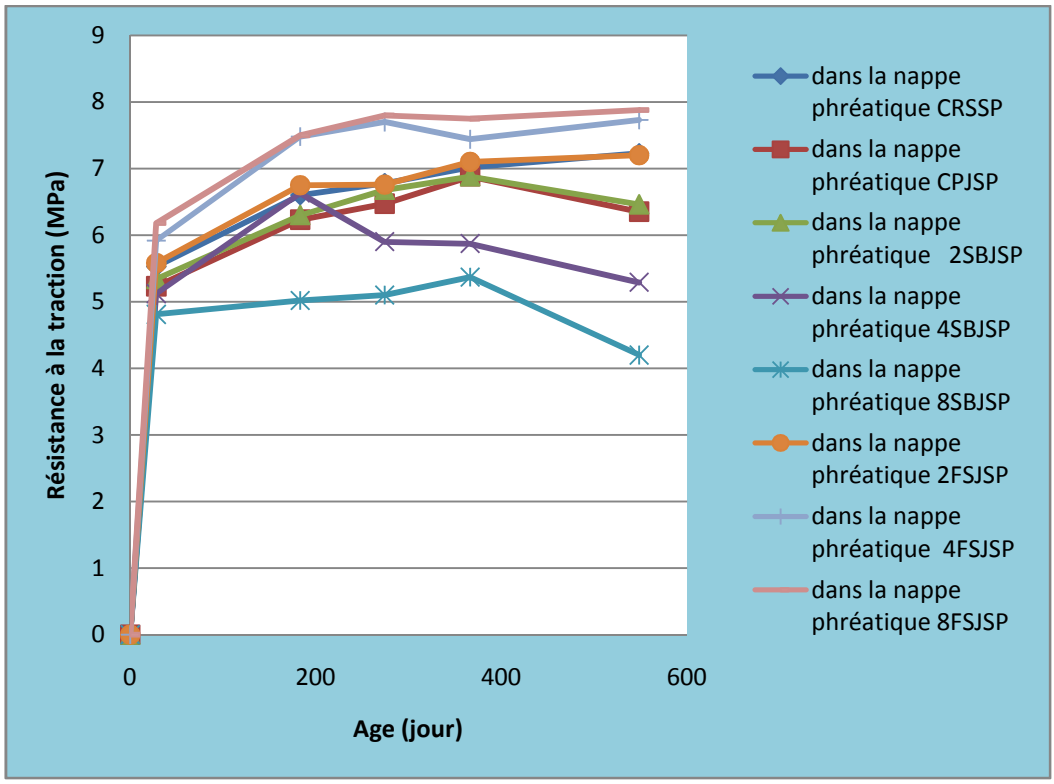


Figure (VI, 21) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout dans la nappe phréatique. Déposer

L'examen de ces courbes montre que :

- Le béton à base de 8% de fumée de silice a développé la plus grande résistance à toutes les échéances testées.
- L'addition de la fumée de silice contribue à l'amélioration de résistance à la traction.
- Le béton avec addition de fumée de silice a développé des résistances à la traction meilleurs que celles qui a été développées par le béton à base du CPJ sans ajout.
- L'influence du sable de dune broyé sur la résistance à la traction est négative au delà de 2% d'ajout.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé améliore la résistance à la traction.

On conclue que :

- L'effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction dans le milieu de la nappe est très bénéfique.
- L'effet de sable de dune broyé est dans le milieu nappe est dépend de la quantité ajouté.

VI.3.2.4 Milieu du sulfate :

a- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition de la fumée de silice :

La figure (VI, 22) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés dans le milieu de sulfate avec addition de fumée de silice ayant les pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%)

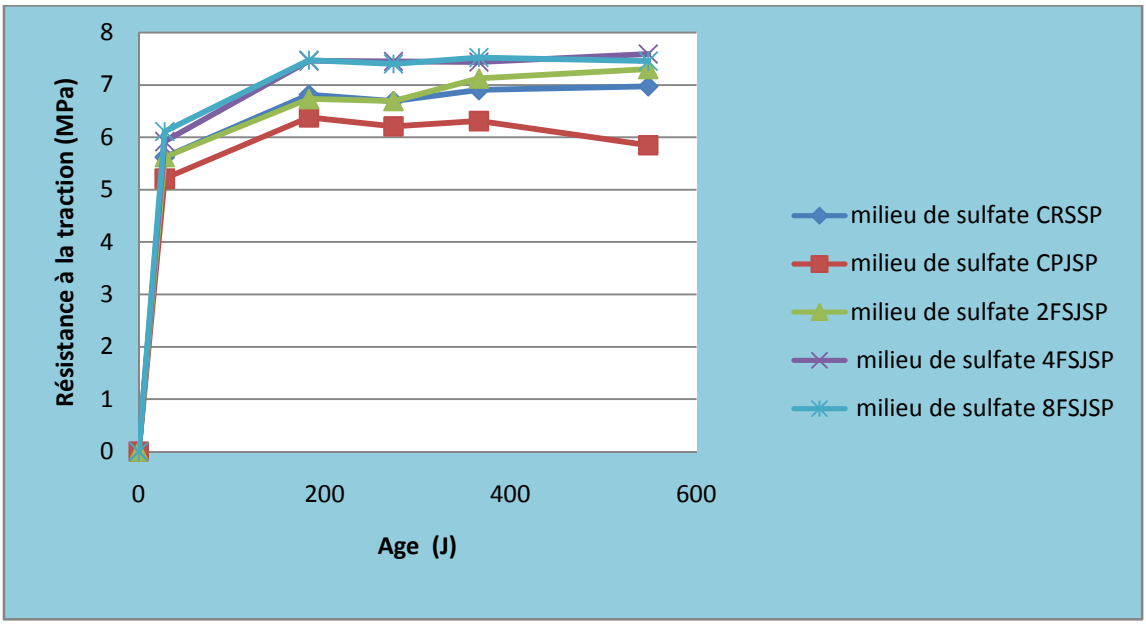


Figure (VI, 22) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout de fumée de silice dans le milieu sulfatique.

L'examen de ces courbes montre que :

- Le béton à base de 4 % et 8% de fumée de silice ont développé les plus grandes valeurs de résistance à la traction à l'âge de 18 mois.
- Un Changement de classement du niveau de résistance au cours de temps entre le béton à base de 8% et 4% de fumée de silice a été remarqué.
- Le béton avec ajout de fumée de silice a développé des résistances aux tractions meilleures que celles développées par des bétons sans addition (CRS, CPJ).
- Le béton à base de CPJ a développé la plus faible résistance à la traction à toutes les échéances testées.

On conclue que :

- L'ajout de la fumée de silice au béton améliore sa résistance à la traction dans le milieu du sulfate et par projection à sa résistance chimique au sulfate.
- La quantité optimale d'ajout de fumée de silice est de 4%.
- Cette résistance à la traction du béton à base de fumée de silice confirme les résultats trouvés dans les travaux antérieurs sur le rôle avantageux d'ajout de la fumée de silice sur la résistance du béton à l'agression chimique particulièrement celle du sulfate.

b- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition du sable de dune broyé :

La figure (VI, 23) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés dans le milieu sulfate avec additions de sable de dune broyé ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%)

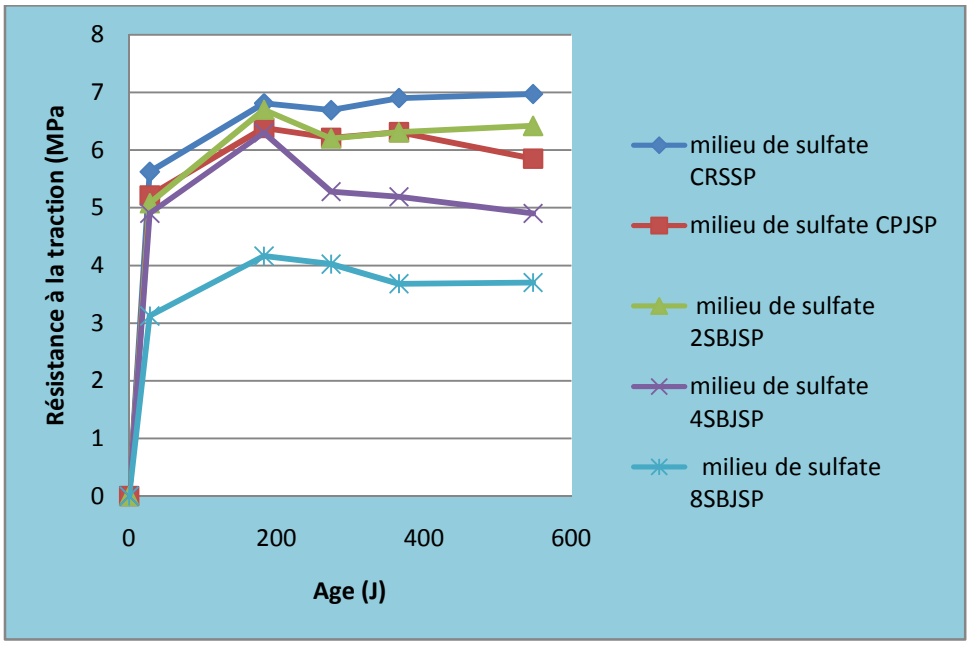


Figure (VI, 23) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout de sable de dune broyé dans le milieu sulfatique.

L'examen de ces courbes montre que :

- Le béton à base de 8% de sable de dune broyé a développé la plus faible résistance à toutes les échéances testées.
- Le béton à base de CRS a développé la plus forte résistance à la traction qui est égale à 6.97 MPa enregistrée à l'âge de 18 mois.
- La résistance développée par le béton à base de 4% de sable de dune broyé augmente avec le temps jusqu'à 6.3 MPa enregistrée à l'âge de 6 mois au-delà du laquelle la résistance a marqué une diminution.
- La résistance développée par le béton à base de 8% de sable de dune broyé augmente avec le temps jusqu'à 4.16 MPa enregistrée à l'âge de 6 mois au-delà de laquelle la résistance a enregistré une diminution.

- Le béton à base de 2% de sable de dune broyé a développé des résistances à la traction plus élevées que celles développées par du béton à base de CPJ sans addition.

On conclue que :

- L'ajout de 2% de sable de dune broyé au béton améliore sa résistance à la traction dans le milieu sulfatique et par conséquence sa résistance chimique au sulfate.

c- Résistance à la traction en fonction du pourcentage d'addition

La figure (VI, 24) illustre l'évolution de la résistance à la traction obtenue des bétons conservés dans le milieu du sulfate avec additions ayant des pourcentages variés (0, 2%, 4%, 8%) :

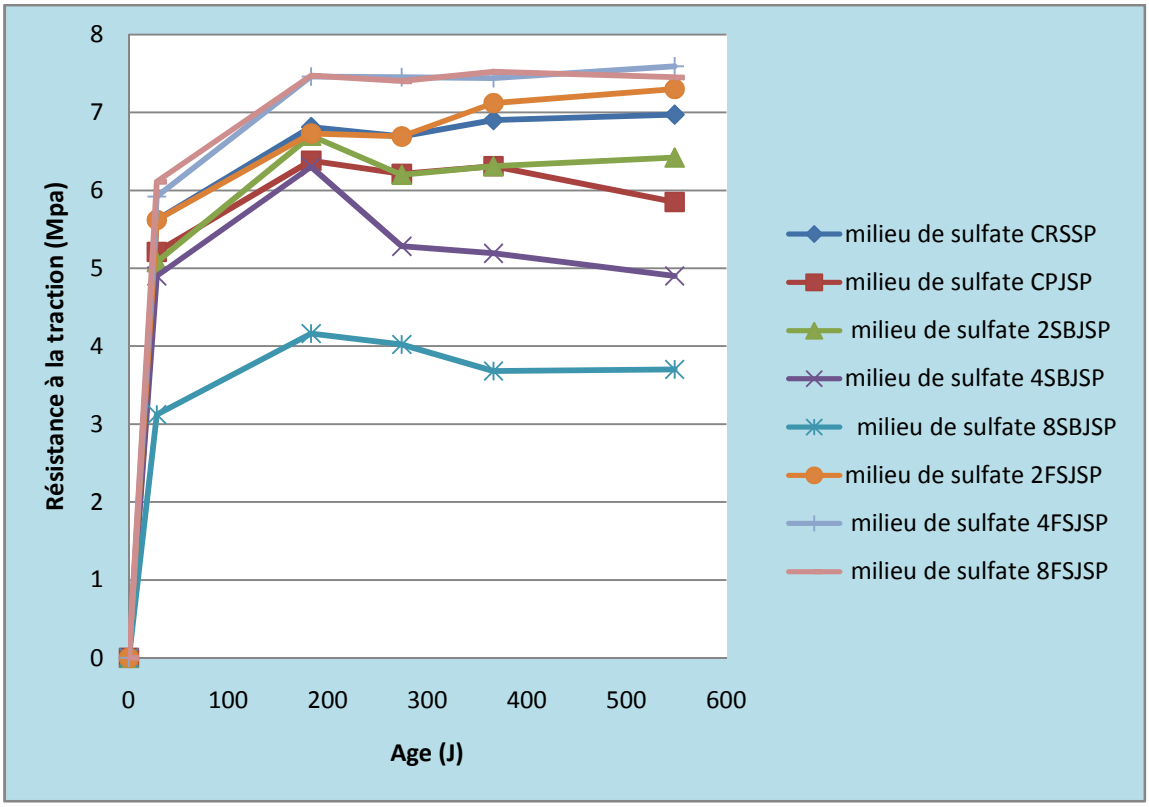


Figure (VI, 24) : Evolution de la résistance à la traction pour les différents pourcentages d'ajout dans le milieu sulfatique.

L'examen de la figure (VI, 24) montre que :

- L'ajout de la fumée de silice améliore la résistance à la traction.
- L'ajout de 2% de sable de dune broyé améliore la résistance à la traction.

- L'effet d'ajout de plus de 2% de sable de dune broyé au béton est négatif sur la résistance à la traction.

On conclue que :

- L'effet agressif du sulfate sur la résistance à la traction est démontré par ces courbes qui présentent des points d'inflexion après l'augmentation habituelle de résistance et des écarts trouvés dans la résistance entre les bétons conservés dans ce milieu et ceux conservés dans le milieu standard, voir tableau (VI, 3).
- L'ajout de la fumée de silice ou le sable de dune broyé à une quantité optimale au béton, améliore sa résistance à la traction ainsi que sa résistance chimique.

Tableau (VI, 3): Effet du sulfate sur les résistances à la traction.

Mélange	R_{t1} milieu standard (MPa)	R_{t2} milieu de sulfate (MPa)	Ecart R_{t1}-R_{t2} (MPa)
CRSSP	7.25	6.97	0.28
CPJSP	6.52	5.85	0.67
2SBJSP	6.48	6.42	0.06
4SBJSP	5.1	4.9	0.2
8SBJSP	4.2	3.7	0.5
2FSJSP	7.4	7.3	0.1
4FSJSP	7.62	7.59	0.03
8FSJSP	7.85	7.45	0.4

Conclusion générale

Conclusion générale : l'influence de deux additions (sable de dune broyé et fumée de silice) a été étudiée et discutée à partir des nombreux essais sur le béton. Pour chacune d'elles, la performance mécanique à différentes échéances pour différents taux de substitution est analysée. Compte tenu du grand nombre de paramètres retenus, seulement un Superplastifiant étudié et les bétons confectionnés avec un rapport E/C constant.

Ce groupe d'essais a permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la bibliographie concernant les performances des bétons avec additions particulièrement la fumée de silice et leur résistivité au sulfate et par conséquence leur durabilité dans le milieu d'Ouargla

On confirme aussi que le CRS est un ciment résistant au sulfate, donc les causes de dégradation des ouvrages enterrés construit par le béton à base de CRS viennent à d'autres sources.

On conclue aussi que :

L'ajout de 2 % de sable de dune broyé au béton contribue à l'amélioration de sa performance mécanique et par conséquence à sa durabilité.

La surface spécifique lors du broyage de sable de dune n'atteindra jamais celle des fumées de silice qui est de l'ordre de 20 m^2/g

On notera que l'abondance des sables de dunes dans notre région, d'où la nécessité de prendre en considération l'intérêt global de l'introduction des sables de dunes finement broyés dans l'industrie du béton. Il est nécessaire aussi de penser à développer un moyen de broyage permettant d'atteindre des surfaces spécifiques proche de celle de la fumée de silice pour le rendre réactif.

Recommandations : afin de compléter cette étude et de cerner de prés les lois qui réagissent le comportement du béton au sable broyé, nous recommandons pour un travail futur, d'aborder les points suivants :

1- Prolonger la durée des tests plus que 18 mois pour pouvoir signifier l'effet des déférents milieux sur la durabilité de béton.

2- Voir l'effet de la finesse du sable broyé sur les déférentes propriétés

3- Etudier la combinaison des différentes additions.

4- Quantification des efficacités du rôle des additions.

5- Effet de sable broyé au béton sous un traitement thermique.

6- Etudier la porosité et la perméabilité du béton par d'autres essais (porosité par mercure, perméabilité à l'oxygène, etc.)

7- Comment l'hydratation évolue-t-elle en présence d'addition, le microscope à balayage constitue peut quantifier le degré d'hydratation et préciser la structuration des phases.

Plusieurs questions sont restées en suspens au cours de ce travail comme la réactivité de sable de dune broyé avec ou sans traitement thermique et la broyabilité nécessaire pour rendre actif.

bibliographie

[1] A.Khadraoui, "eaux et sols en Algérie, Gestion et impact sur l'environnement", recueil de communication révisé en 2005,Dépôt légal :479/2006, ISBN.

[2] Document de la direction régionale Sud-Est Ouargla de météologie O.N.M, 2011.

[3] A.Khadraoui, "eau et impact Environnemental dans le Sahara Algérien", dépôt légal :2164/2010 ,Edition 2.02.5133, I.S.B.N :978.9961.0.1372.4 .OPU 05.2011.

[4] Norme française N F EN 12390-3 indice de classement p 18-455, février 2003.

[5] CIHEAM (Centre International de Hautes Etude Agronomiques Méditerranéennes) Option Méditerranéennes, "les systèmes agricoles oasiens", sér.A/n°11, 1990.

[6] N.Tabouche, S.Achour, "Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional Algérien", Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n° 03, Juin 2004 pp99-113.

[7] A Khadroui & S.Taleb, "Qualité des eaux dans le sud algérien", Editions Khyam : Constantine, Dépôt légal : 4836-2008, ISBN :978-9961-9730-1-1.

[8] A.TFRAOUI, "Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie) " Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.

[9] Y.CHERAIT, Z.NAFA, "Elément de matériaux de construction et essais", dépôt légal 1704-2006, I.S.B.N 9548-7-4.

[10] ADAM M.NEVILLE, "Propriétés des bétons ", édition Eyrolles, code éditeur GO1320, ISBN : 2-212-013205, septembre 2000.

[11] A.FAY, "La fumée de silice l'adition incontournable pour des bétons durables", FERROPEM newsletter, Chambéry,27 Juin 2012.

[12] **A bouchouika et M N. Oudjit**, "International conférence on sustainable Built Environnement Infrastructures in Développing Countries", ENSET Oran (Alegria)- octobre 12-14 2009.

[13] S.CHABI, B.MEZGHICHE, L.ZEGHICH, "Etude de l'influence de l'adition du sable broyé d'oued et de dune de la région de Biskra sur les bétons", colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 décembre 2005.

[14] ELODIE ROMILLAT, "Etude des modes d'action des agents de mouture sur le broyage du clinker", thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne, Soutenue à Saint-Etienne le 20 janvier 2006.

[15] BENIA Mounir, " Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux", mémoire de magistère, Université de Mohammed Boudiaf de M'sila 2007.

[16] BASF document de « The Chemical Company of France », "la technologie du béton" 2009.

[**17] ATHIL** Association Technique de l'industrie des Liants Hydrauliques, "guide pratique pour l'emploi des ciments", Edition Eyrolles, ISBN :2-212-07217-1, janvier 1998.

[18] N F 197-1, indice de classement p15-101-1, ISSN 0335-3931, février 2001.

[19] BOUALLEG SAIDA, "Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires", mémoire de magistère, Université de Mohammed Boudiaf de M'sila, soutenu le 28/09/2004.

[20] Jean-Pierre OLIVIER, Angélique VICHOT, "La durabilité des bétons", presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-8(2e édition), avril 2008.

[21] BELOUADAH MESSAOUDA, "Evaluation des effets secondaires liés à l'incorporation des adjuvants sur les propriétés de durabilité du béton à base de matériaux locaux", mémoire de magistère, Université de Mohammed Boudiaf de M'sila, soutenu le 28/09/2004.

[22] Photo de Barchan, site internet http://en.wikipedia.org/wiki/Barchan, 3/2013 ,14 h.

[23] LOBET A, "Influence des paramètres de composition des matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert " Thèse doctorat INSA toulouse, 2003.

[24] OUYONG C , NANNI A, CHANG W, "Internal and external sulfate sources of sulfate ions in portland mortar : two types of chemical attack" CCR, vol 18 n° 5, 1988, p. 699-709.

[25] Norme NF p15-317, "Liant hydraulique. Ciment pour travaux à la mer", septembre 1995.

[26] Norme NF p15-319, " Liants hydraulique, ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfate", septembre 1995.

[27] BERTRON A , ESCADEILLAS G ,DUCHESNE J. "Cement pastes alteration by liquid manure organic acids : chemical and mineragical characterization" CCR., vol.34, n°10, 2004,pp 1823-1835.

[28] TANG L, NILSSON L .O Chloride, "Diffusivity in high strength concrete at different ages", Nord Constr. Res. Vol. 11, n° 1, 1992 p.162-171.

[29] NF EN 206-1-, partie 1, "Spécification, performances, production et conformité du béton" février 2001.

[30] NA 231 (NORME ALGERIENNNE), méthodes d'essais des ciments détermination de la finesse, N° édition : 2 Date : 2006 ICS : 91.100.10.

[31] Document de O.N.M (Office nationale de météologie **), 2006.**

[32] NA 452, "granulats- éléments pour identification des granulats " 1992.

[33] PETTIJOHN F, Sand and sand stone. Springer –verlag New York, INC, paper back, june 1987.

[34] FOLK R.L., Ward W.C., "A study of significant of grain size parmeters", J.sediment.brazos River bar, Petrol.27, 1957, p. 3-26.

[35] NA 2607, "granulat-analyse granulométrique par tamisage" 1992.

[36]AITCIN C, Ed, "Condensed silica fume in concrete", Faculté de sciences appliqués, Université de Sherbrook, 52 pp (Sherbrook Canada, 1983).

[37]G.p. TOGNON, G.COPPETTI, " Concréte fast curing by two-stage low and high pressure steam cycle", proceedings international congress of the Precast concrete Industry, Stresa, 15pp

[38] GONNERMAN.H.F, "Annotated Bibliography on high-pressure Steam Curing of Concrète and Related Subjects" (National Concrète Masonry Assoc, Chicago, 1954).

[39] BONNEAU.O, "Etude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à ultra hautes performances", Thèse de doctorat, département de génie civil, Université de Scherbrook, Québec, Canada, 1997.

[40] EN 196-1" Méthodes d'essais des ciments, partie 1-détermination des résistances " Avril 2006.

[41] Journal officiel de la république algérienne N° 40 le 02/07/2003

[42] La norme britannique BS 4027 :1991

[43] NF P 15-301, "Ciments courant, composition, spécification et critères de conformité", juin 1994.

[44] la norme ASTM C150-94, "Standard Specification for Portland Cement"

[45] la norme NF EN 196-2 " Méthodes d'essais des ciments, partie 2- analyse chimique des ciments"

[46]Francois de LARRARD, "Construire en béton", presses de l'école nationale des ponts et chaussées ISBN 2-85978-366-0, 2002.

[47]Site internet www.understanding-cement.com le 11/05/2013 à 15 h.

[48] Norme française N F p 18-407 " Essai de flexion" décembre 1981.

[49] NF P 18-406 "essai de compression"

[50] NF P 18-411, "Caractéristique communes des machines hydraulique pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs", Décembre 1981.

[51] NF P 18-412, "caractéristique particulière des machines hydraulique pours pour essais de compression (presse pour matériaux durs) ", Décembre 1981.

[52] FD P 18-011, "Fascicule de documentation "définition et classification des environnements chimiquement agressifs".

[53]François de larrard, "construire en béton", presses de l'école nationale des ponts et chaussées ISBN 2-85978-366-0, 2002.

Annexe

NOTICE TECHNIQUE

2 1 3 3

MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST HP** permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la cohésion
- Éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
- Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- Augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un superplastifiant est recommandé (**MEDAPLAST SP, SP40**) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Poudre
- Densité 0,5
- Densité absolu..... 2.3 ± 0.1
- Composants :
  - SiO_2..... > 85(%)
  - SO_3 ..... < 2,5 (%)
  - Cl^- ..... < 0,2 (%)
- Surface spécifique..... > 15 (m^2/gr)
- Humidité par étuve à 105°C ..... < 1 (%)
- Taille des particules ..... < 0,1 (microns)

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST HP** est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.
Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (**MEDACURE**) surtout par temps chaud ou en présence de vents.

DOSAGE

Le dosage du **MEDAPLAST HP** varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST HP** est conditionné en sacs de 2 kg et 25 kg . Disponible aussi en Bigbag.
Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

PRÉCAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : **www.granitex-dz.com**

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 tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
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
SGS

92

Granitex فرانيتكس

L'ESPRIT BÂTISSEUR

فرانيتكس مواد جديدة

Granitex nouveaux produits

SPA AU CAPITAL DE 384.445.800,00 DA - Reg.Com. Alger 99 B 0008760
Art. d'imp. 16151565011 - Imm.Fisc. 098416150069524

ABD EL ATEF
KADRI

BON DE SORTIE
~~FACTURE~~ N° :

Oued-Smar le, 26.01.2012

DESIGNATION ET CONDITIONNEMENT	U	QUANTITE	P.U.	MONTANT
fumée de silice		02KG		

Par M : ABDEL ATEF KADRI

PROMOTEUR : Abdelouahed Kriker

UNIVERSITE D'OUERGLA

THEME : durabilité de beton par ajout des materiaux locaux

0777676726

(Tél: 021.51.66.51/82 Fax: 021.51.64.22 R.C N°: 99 B 0008760 — Granitex nouveaux produits)

MONTANT H.T.	MONTANT T.V.A.	MONTANT T.T.C.

MODE DE PAIEMENT :

ENLEVEMENT :

Granitex nouveaux produits
Zone industrielle Oued Smar (ALGERIE) B.P.N° 35
Tel. : + 213 (0) 21.51.66.81 & 82
Fax : + 213 (0) 21.51.64.22 & (0) 21.51.66.23

NOTICE TECHNIQUE

2 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1 , 3.1 et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

ROPRIÉTÉS

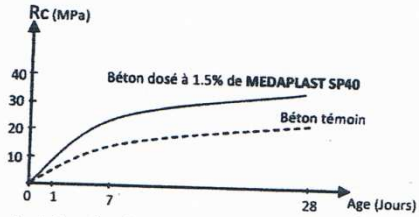
Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :
- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur .....Marron
- pH 8,2
- Densité .....1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore .....< 1g/L
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** 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 été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L 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

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubiténaire de 1200 kg.
Délai de conservation :
Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

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 Janvier 2007.

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 tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
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

93