

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

N° DE SERIE :

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

N° D'ORDRE :

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE



THESE

PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

DOCTORAT ES SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Option : Géo/Matériaux

Présentée par :

Mr : ABIMOULOUD Youcef

THEME :

Contribution à l'étude de l'effet de la remontée des eaux de la nappe phréatique de Ouargla sur le béton à base de matériaux locaux.

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

- | | | | |
|--------------------------|-------|------------|-------------------------|
| - Mr. HACINI Messaoud | Prof. | U. Ouargla | Président. |
| - Mr. BOUAZIZ Ahmed | Prof. | U. Biskra | Examineur. |
| - Mr. TAALAH Bachir | M.C.A | U. Biskra | Examineur. |
| - Mr. KRIKER Abdelouahed | Prof. | U. Ouargla | Rapporteur / Encadreur. |
| - Mr. KENAI Said | Prof. | U. Blida | Co-Encadreur. |

Année universitaire : 2016/2017.

Remercîments

- *Ce travail a été initié par Mr. KRIKER Abdelouahed, Professeur à l'université KASDI MERBAH - Ouargla, et président du laboratoire EVRNZA, Je lui exprime toute ma profonde gratitude pour la confiance qui ma offert, pour ses judicieux conseils et ses encouragements qui m'ont permit de mener à bien ce travail. Je tiens à remercier également Mr. KENAI Saïd Professeur à l'université de Blida, qui a tracé les premières lignes de cette étude à qui je dois beaucoup.*

- *Je remercie Mr HASSINI Messaoud Professeur à l'université KASDI MERBAH - Ouargla pour l'honneur qui m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse.*

- *J'exprime également ma grande reconnaissance à Mr. BOUAZIZ Ahmed et à Mr. TAALLAH Bachir, respectivement Professeur et Maîtres de conférences à l'université Med Khaidar de Biskra d'avoir participer à ce jury.*

- *J'adresse ma profonde gratitude à tous mes instituteurs et enseignants durant toute ma vie estudiantine, sans pour autant oublier les chefs et membres du personnel des organismes ci-après :*
 - ✓ *laboratoire d'exploitation et valorisation de ressources naturelles en zone arides (EVRNZA).*
 - ✓ *Laboratoire des travaux publics sud (LTPS) Ghardaïa et l'unité de Ouargla.*
 - ✓ *Laboratoire de l'ANRH Ouargla.*

Mr. ABIMOULOU Youcef.

Remercîments

- *Ce travail a été initié par Mr. KRIKER Abdelouahed, Professeur à l'université KASDI MERBAH - Ouargla, et président du laboratoire EVRNZA, Je lui exprime toute ma profonde gratitude pour la confiance qui ma offert, pour ses judicieux conseils et ses encouragements qui m'ont permit de mener à bien ce travail. Je tiens à remercier également Mr. KENAI Saïd Professeur à l'université de Blida, qui a tracé les premières lignes de cette étude à qui je dois beaucoup.*

- *Je remercie Mr HASSINI Messaoud Professeur à l'université KASDI MERBAH - Ouargla pour l'honneur qui m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse.*

- *J'exprime également ma grande reconnaissance à Mr. BOUAZIZ Ahmed et à Mr. TAALLAH Bachir, respectivement Professeur et Maîtres de conférences à l'université Med Khaidar de Biskra d'avoir participer à ce jury.*

- *J'adresse ma profonde gratitude à tous mes instituteurs et enseignants durant toute ma vie estudiantine, sans pour autant oublier les chefs et membres du personnel des organismes ci-après :*
 - ✓ *laboratoire d'exploitation et valorisation de ressources naturelles en zone arides (EVRNZA).*
 - ✓ *Laboratoire des travaux publics sud (LTPS) Ghardaïa et l'unité de Ouargla.*
 - ✓ *Laboratoire de l'ANRH Ouargla.*

Mr. ABIMOULOU Youcef.

الملخص :

نلاحظ الكثير من الأضرار على المنشآت الخرسانية المغمورة تحت الأرض جراء تلامسها مع المياه الجوفية الصاعدة للطبقة المائية الحرة في منطقة ورقلة، ومما زاد الأمر سوء نوعية الخرسانة المنجزة ونوعية الأنابيب المستعملة، إذ غالباً ما تكون غير قادرة على الصمود تحت تأثير العوامل الكيميائية العدوانية وهذا ما يؤثر على ديمومتها، ونعني بمصطلح الديمومة هنا، قدرة العنصر أثناء الخدمة على مقاومة مختلف العوامل المناخية أو غيرها (التغيرات في درجة الحرارة و الرطوبة ، تأثير مختلف الغازات في الهواء و الأملاح الذائبة في الماء ... الخ). كما أن استخدام المواد المحلية مثل رمل الكثبان المسحوق كمضاف للاسمنت يعد بديلاً يجب تجربته على أرض الواقع.

الهدف من هذا البحث هو دراسة ديمومة الخرسانة في منطقة ورقلة تحت تأثير العوامل العدوانية الناجمة من تصاعد المياه الجوفية و محاولة تحسين نوعيتها من خلال إضافة رمل الكثبان المسحوق كمادة محلية بديلة.

للقيام بذلك ، نضع عينات من الخرسانة من أجل دراسة ديمومتها في وسط حقيقي و مقارنة النتائج المتحصل عليها بنتائج عينات (شواهد) في وسط معياري. كما أجريت على عينات أخرى تجارب داخل المخبر لمعاينة الأثر تأخر وتكرار الغمر في المياه الجوفية لمحاكات العناصر الخرسانية مسبقة الصنع و أثر تغير مستوى الطبقة المائية الحرة عليها.

ووفقاً لهذه الدراسة، تبين أن الخرسانة تمتاز بديمومة ضعيفة إذا كانت مصنوعة من الاسمنت المركب *CPJ (CEM II/A-M)* في حين أظهرت الخرسانة من الاسمنت المقاوم للكبريتات نتائج أفضل، استعمال رمل الكثبان المسحوق يمثل بديلاً جيداً لتحسين نوعية الخرسانة تحت تأثير صعود المياه الجوفية. تأخير الغمر للعناصر الخرسانية من الاسمنت المقاوم للكبريتات *CRS (CEM I/A-D)* لم تبدي أي عامل مقاومة إضافي. في حين، تكرار الغمر كان له أثراً سلبياً خاصة كلما كان التواتر كبيراً.

كلمات مفتاحية:

الخرسانة، الديمومة، مسحوق رمل الكثبان، صعود المياه الجوفية، تكرار العدوانية، السبخة.

Résumé :

La remontée des eaux de la nappe phréatique de Ouargla cause plusieurs dégradations qui ont été constatées sur les parties enterrées des structures en béton réalisées dans cette région telles que les fondations, les longrines et les réseaux d'assainissements (conduites et regards), à cause de la qualité du béton produit et le type des conduites utilisées, qui n'arrivent pas à résister aux agents chimiques agressifs du milieu où sont-ils implantés; ce qui touche directement à leur durabilité, terme qui signifie le pouvoir de l'élément en service de résister aux actions communes des facteurs atmosphériques et autres (variation de température et d'humidité, l'action des différentes gaz contenus dans l'air et des sels solubles dans l'eau...etc.).

En outre, l'utilisation des matériaux locaux comme le sable de dune broyé, en substitution au ciment ordinaire, constitue une alternative qui reste à prouver sur le terrain.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la durabilité des bétons dans la région de Ouargla sous l'effet de la remontée des eaux de la nappe phréatique qui permet l'attaque des agents agressifs qui y sont dissouts et l'incorporation de sable de dune broyé entant que matériau local afin d'améliorer la qualité du béton produit.

Pour ce faire, des éprouvettes en béton ont fait l'objet d'essais de durabilité dans le milieu réel et dont les résultats ont été comparés à ceux des éprouvettes témoins, d'autres ont été laissées au laboratoire pour simuler, d'une part, l'effet cyclique du phénomène de la remontée des eaux de la nappe et l'effet du retard de l'exposition au milieu agressif d'autre part.

D'après l'étude, nous concluons que le béton est de faible durabilité dans le milieu agressif de la nappe phréatique de Ouargla s'il est à base de ciment portland composé CPJ (CEM II/A-M), le ciment résistant aux sulfates CRS (CEM I/A-D) montre des résultats meilleurs, l'utilisation du sable de dune finement broyé présente une bonne alternative afin d'améliorer la qualité du béton sous l'effet de la remontée des eaux de la dite nappe. Le retard de l'exposition du béton en CRS (CEM I/A-D) au milieu agressif ne présente aucun effet défensif alors que l'immersion cyclique dans les eaux de la nappe de Ouargla a montré un effet dégradant notamment avec l'augmentation de la fréquence du cycle.

Mots clés :

Béton, durabilité, sable de dune broyé, remontée des eaux, agression cyclique, sebkha.

Abstract:

Rising water level of underground water table in the region of Ouargla city causes more damage which was observed on concrete of underground parts of structures implanted in this area as building foundations and the remediation network (pipes and manholes), because of the quality of the concrete produced and the kind of pipe used, which are unable to withstand aggressive chemical agent's environments where are located which directly affects their sustainability. Sustainability means the power of the element in service withstand joint action of air and other factors (Changes in temperature and humidity, the action of the various gases in the air and water soluble salts...etc.).

In addition, the use of crashed dune sand as an added element in cement replacing cement commonly used can be an alternative that remains to be proven in the field.

The objective of this research is to study the sustainability of concrete in the region Ouargla as a result of rising water level phenomena which allow aggressive agents to attack concrete and the use of crashed dune sand as local material to improve quality of concrete casted in this region.

To do this study some tests specimens go to the durability test object in the real environment and the result will be compeering to the references specimens. Somme orders are kept in laboratory to simulate cyclic phenomena of tablecloth water rising.

According to the study, we conclude that the concrete is of low durability in the aggressive environment of Ouargla water table if it is based on (CEM II/ A-M) cement. However, (CEM I /A-D) shows better results. The use of sand dune finely ground presents a good alternative to improve the quality of the concrete under the effect of underground water table. The exposure delay of concrete with (CEM I /A-D) in to the aggressive medium has no defensive effect, whereas the cyclic immersion in the waters of the Ouargla aquifer has shown a degrading effect in particular with the increase of the cycle frequency.

Keywords:

Concrete, durability, crashed dune sand, underground level water rising, sebkha.

SOMMAIRE

TITRE	Page
REMERCIEMENTS	I
RESUME (EN ARABE)	II
RESUME (EN FRANÇAIS)	III
RESUME (EN ANGLAIS)	IV
SOMMAIRE	V
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XV
INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I: GENERALITES SUR DE LA REGION D'ETUDE	04
PARTIE A : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE	04
I.1 INTRODUCTION	04
I.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE	04
I.3 RELIEFS	06
I.4 CONTEXTE GEOLOGIQUE	06
I.5 CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	07
I.6 CLIMAT DE LA ZONE D'ETUDE	09
I.6.1 Température	09
I.6.2 Précipitations	10
I.6.3 Humidité relative	10
I.6.4 Le vent	11
I.6.5 Durée d'insolation	12
I.6.6 Evaporation	12
I.7 HYDROLOGIE	13
I.8 HYDROGEOLOGIE	14
I.8.1 Nappe phréatique	15
I.8.2 Nappes du complexe terminal (C.T)	15
I.8.3 Nappe du méo-pliocène	16
I.8.4 Nappe du sénonien	16
I.8.5 Nappe Continentale Intercalaire (C.I) ou l'Albien	17
I.9 CONCLUSION DE LA PARTIE A	17
PARTIE B : PHENOMENE DE REMONTEE DE LA NAPPE PHREATIQUE	18
I.10 INTRODUCTION	18
I.11 CARTOGRAPHIE DU SUBSTRATUM DE LA NAPPE PHREATIQUE	18

I.12 CARTOGRAPHIE DU TOIT DE LA NAPPE PHREATIQUE	19
I.13 CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE	21
I.14 CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE PHREATIQUE	23
I.14.1 Transmissivité et perméabilité	23
I.14.2 Porosité	24
I.15 BILAN HYDRIQUE	24
I.16 MENACES DE LA NAPPE PHREATIQUE SUR LES CONSTRUCTIONS	25
I.16.1 Fluctuation du niveau de la nappe phréatique	26
I.16.2 Agression Chimique de la nappe phréatique	27
I.16.2.1 Concentration des ions dans la cuvette de Ouargla	27
I.16.2.2 Taux de risque du pH sur le béton	30
I.16.2.3 Taux de risque du Chlorure sur le béton	30
I.16.2.4 Taux de risque du Dioxyde de Carbone sur le béton	30
I.16.2.5 Taux de risque du Sulfate sur le béton	30
I.16.2.5 Taux de risque du Magnésium sur le béton	31
I.17 CONCLUSION DE LA PARTIE B	31
PARTIE C : GENERALITES SUR LE SABLE DE DUNE EN TANT QUE MATERIAU LOCAL	32
I.18 INTRODUCTION	32
I.19 PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES SABLES	33
I.19.1 Méthode de caractérisation physico-chimique de sable	33
I.19.2 Analyse granulométrique	33
I.19.3 Observation microscopique	36
I.19.4 Analyse élémentaire par diffractométrie des rayons X	36
I.20 SABLE DE DUNE	36
I.21 SILICE	37
I.21.1 Introduction	37
I.21.2 Fumée de silice	37
I.21.2.1 Introduction	37
I.21.2.2 Morphologie de la fumée de silice	39
I.21.2.3 Effet de la fumée de silice sur le béton	40
I.22 SABLE DE DUNE BROYE	42

I.22.1 Introduction	42
I.22.2 Broyage	43
I.22.2.1 Définition	43
I.22.2.2 Importance du broyage	43
I.22.2.3 Modes de broyage	44
I.22.2.4 Systèmes utilisés pour le broyage	45
I.22.3 Propriétés physiques et mécaniques du béton avec sable broyé	46
I.22.3.1 Propriétés physiques du béton avec sable broyé	46
I.22.3.2 Propriétés mécaniques du béton avec sable broyé	47
I.22.4 Relation entre la finesse et l'activité	48
I.23 Conclusion de la partie C du chapitre I	49
CHAPITRE II: DURABILITE DU BETON DANS LES MILIEUX CHIMIQUEMENT AGRESSIFS	51
II.1 INTRODUCTION	51
II.2 NOTION DE DURABILITE	51
II.3 MORPHOLOGIE DE LA MICROSTRUCTURE DU BETON	51
II.3.1 Hydratation du ciment	51
II.3.2 Nature de l'eau dans le béton	53
II.3.3 Structure poreuse	54
II.4 MECANISME DE DEGRADATION DU BETON	55
II.4.1 Divers agents agressifs	55
II.4.2 Modes d'action des agents agressifs	56
II.5 CRITERES GENERAUX DE LA DURABILITE DU BETON	57
II.5.1 Rapport eau/ciment (E/C)	57
II.5.2 Nature et dosage de ciment	58
II.5.3 Ajouts minéraux	58
II.5.4 Zone d'interface (pate de ciment – granulat)	58
II.5.5 Durée de murissement	59
II.5.6. Effet de température sur le béton	60
II.6 MECANISMES D'ATTAQUE DES SULFATES SUR LE BETON	60
II.6.1 Processus d'attaques par les sulfates seuls	61
II.6.2 Attaque par le sulfate de magnésium, de calcium et de sodium	62

II.6.4 Facteurs influents sur la résistance du béton aux sulfates	63
II.7 DURABILITE DU BETON FACE A L'ALCALI-REACTION	65
II.8 DURABILITE DU BETON SOUS L'EFFET DES CYCLES SECHAGE-MOULLAGE	66
II.9 DURABILITE DU BETON SOUS L'EFFET COUPLE CYCLES SECHAGE-MOULLAGE) & GEL-DEGEL.	67
II.10 CONCLUSION	67
CHAPITRE III : MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS REALISES	69
III. 1 INTRODUCTION	69
III.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	69
III.2.1 Ciment	69
III.2.1.1 Analyses chimique du ciment CRS et CPJ	70
III.2.1.2 Propriétés physiques du ciment CRS et CPJ	71
III.2.2 Granulats	72
III.2.2.1 Préparation des échantillons	73
III.2.2.2 Essai de détermination de la masse volumique absolue et apparente	74
III.2.2.3 Essai d'analyse granulométrique par tamisage des granulats (NF P 18 - 560)	74
III.2.2.4 Essai de propreté des granulats (NF P 18 - 591)	74
III.2.2.5 Essai de friabilité du sable (NF P 18 - 576)	74
III.2.2.7 Essai Los- Angeles (NF P 18 - 573)	77
III.2.2.7 Analyses chimiques	77
III.2.2.7.1 Essai de détermination des corps insolubles (NF P 15-461)	77
III.2.2.7.2 Essai de détermination des carbonates (NF P 15-461)	78
III.2.2.7.3. Essai de détermination des sulfates (BS 1377/V1975)	79
III.2.2.7.4. Essai de détermination des chlorures (BS BOWLY/ V1979)	80
III.2.3. Eau de gâchage	82
III.3. FORMULATION DU BETON PAR LA METHODE DE DREUX GORISSE	82

III.3.1. Principe de la méthode	82
III.3.2. Détermination de la quantité d'eau	84
III.3.3. Détermination du volume absolu des agrégats secs	84
III.3.4. Détermination du pourcentage de ciment	84
III.3.5. Détermination des pourcentages massiques des constituants	85
III.4 AJOUTS MINÉRAUX NECESSAIRES AU PROGRAMME D'ESSAI	86
III.4.1 Sable de dune broyé	86
III.4.2 Fumée de silice	87
III.4.3 Super-plastifiant	87
III.5 CONFECTION DU BETON	88
III.5.1 Séquence de malaxage	88
III.5.2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451)	89
III.5.3 Confection des éprouvettes	90
III.6 MODES DE CONSERVATION DES EPROUVETTES EN BETON	91
III.7 ESSAIS MÉCANIQUES RÉALISÉS	93
III.7.1 Essais de compression (NF P 18-406)	93
III.7.2 Résistance à la traction par flexion	93
III.8 ESSAIS PHYSIQUES	95
III.8.1 Essai de porosité accessible	95
III.8.2 Essai d'Absorption d'eau par capillarité	95
III.8.3 Mesure d'auscultation sonore	97
III.9 CONCLUSION	98
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	99
IV.1 INTRODUCTION	99
IV.2 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS A L'EFFET DE LA NAPPE PHREATIQUE	99
IV.2.1 Essai de résistance à la compression (R_c)	99
IV.2.2 Essai de résistance à la traction par flexion (R_t)	100
IV.2.3 Essai d'auscultation dynamique	111
IV.2.4 Essai D'absorption Capillaire	102
IV.2.5 Analyses chimiques	103

IV.2.5.1 Analyse chimique des cristaux prélevés des éprouvettes conservées dans la nappe phréatique	103
IV.2.5.2 Analyses chimiques du béton prélevé des éprouvettes conservées dans la nappe phréatique	103
IV.2.6 Interprétation des résultats de l'effet de nappe	104
IV.3 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS A L'EFFET DE L'AJOUT DU SDB ET DE LA FS	104
IV.3.1 Résistances à la compression du béton sous les conditions standards	105
IV.3.2 Résistances à la compression du béton dans la nappe phréatique	106
IV.3.3 Résistances à la traction du béton sous les conditions standards	107
IV.3.4 Résistances à la traction du béton dans la nappe phréatique	108
IV.3.5 Porosité accessible du béton dans la nappe phréatique	109
IV.3.6 Interprétation des résultats de l'effet d'ajouts minéraux au béton dans la nappe phréatique	110
IV.4 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS AU RETARD DE L'EXPOSITION DU BETON DANS LA NAPPE PHREATIQUE	111
IV.4.1 Résultats de l'essai de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours	111
IV.4.2 Résultats de l'essai de la résistance à la compression à l'âge de 60 jours	112
IV.4.3 Résultats de l'essai de la résistance à traction par flexion	113
IV.4.4 Essai d'auscultation dynamique	114
IV.4.5 Essai d'absorption capillaire	115
IV.4.6 Interprétation des résultats	115
IV.5 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS A L'EXPOSITION CYCLIQUE DU BETON DANS LA NAPPE PHREATIQUE	116
IV.5.1 Résultats de l'essai de la résistance à la compression (R_c)	116
IV.5.2 Résultats de l'essai de la résistance à la traction par flexion (R_t)	117
IV.5.3 Résultats de l'essai d'absorption capillaire	118
IV.5.4 Interprétation des résultats	118
IV.6 CONCLUSION	119
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	120
BIBLIOGRAPHIE	123

Liste des figures

N°	Figure	Page
1	Figure (I.1) Carte de situation géographique [8]	04
2	Figure (I.02): Cadre physique de la zone d'étude [9]	05
3	Figure (I.03) : Coupe géologique du Sahara algérien [10]	07
4	Figure (I.04): Relief géologique de la région de Ouargla [10]	08
5	Figure (I.05): Températures moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]	09
6	Figure (I.06): Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]	10
7	Figure (I.07): Humidité relative moyenne annuelle dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]	10
8	Figure (I.08): Vitesse moyenne annuelle du vent dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]	11
9	Figure (I.09): Bassins hydrographiques dans la région de Ouargla [10]	14
10	Figure (I.10): Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972) [12]	15
11	Figure (I.11): Coupe hydrogéologique transversale du complexe terminal (C.T) d'après UNESCO 1972 [12]	16
12	Figure (I.12) : Carte en 3D du substratum de la nappe phréatique de Ouargla	18
13	Figure (I.13) : Carte en 2D du substratum de la nappe phréatique de Ouargla	19
14	Figure (I.14) : Carte en 2D du toit de la nappe phréatique de Ouargla[14]	20
15	Figure (I.15) : Carte en 3D du toit de la nappe phréatique de Ouargla[14]	21
16	Figure (I.16) : Carte piézométrique la nappe phréatique de Ouargla[10]	22
17	Figure (I.17) : Fluctuation du niveau de la nappe phréatique	26
18	Figure (I.18): Schéma de dune de sable en barkhan [22]	37
19	Figure (I.19) : Procédé et Matières premières entrant dans la fabrication de fumée de silice [24]	38
20	Figure (I.20) : Formation de la fumée de silice dans le four [24]	39
21	Figure (I.21) : Morphologie de la fumée de silice [24]	39
22	Figure (I.22) : Porosité en fonction du dosage en fumée de silice [26]	41
23	Figure (I.23) : Résistance à la compression en fonction du dosage en fumée de silice [26]	41

24	Figure (I.24) : Perméabilité en fonction du dosage en fumée de silice [26]	42
25	Figure (I.25): Modes de broyage [27]	44
26	Figure (I.26) : Systèmes utilisés dans le broyage [27]	45
27	Figure (I.27) : 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 [30]	48
28	Figure (I.28) : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Elghozlane [31]	48
29	Figure (I.29) : Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Elghozlane [31]	49
30	Figure (I.30) : Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Elghozlane [31]	49
31	Figure (II.01): Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [Pigeon 1981] [35]	53
32	Figure (II.02): Modèle de Feldman et Sereda, revue par Sierra 1982 [33]	54
33	Figure (II.03): Représentation schématique d'un solide poreux [33]	55
34	Figure (II.04): Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C [35]	57
35	Figure (II.05): Corrélation approximative entre la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment et leur résistance mécanique [33]	58
36	Figure (II.06): Influence de E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons. [8 ^{ème} Edition, U.S. Bureau of Reclamation, 1975] [33]	59
37	Figure (II.07): Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment [33]	60
38	Figure (II.21): Ettringite massive mal cristallisée expansive formée topo chimiquement [32]	62
39	Figure (II.22): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C ₃ A sur la vitesse de dégradation du béton [32]	64
40	Figure (II.23): Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier [35]	65
41	Figure (III.01): Préparation des échantillons de gravier 8/15 au labo LTPS Ouargla	73
42	Figure (III.02) : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)	84
43	Figure (III.03) : Courbes des analyses granulométriques & pourcentages des constituants secs par la méthode de Dreux Gorisse	85
44	Figure (III.04): broyeur à boulets à axe de rotation Vertical	86

45	Figure (III.05) : Bétonnière à axe horizontale laboratoire EVRENZA	89
46	Figure (III.06): Mesure de l'affaissement du béton au labo LTPS	90
47	Figure (III.07) : Confection des éprouvettes en béton au labo LTPS	91
48	Figure (III.8): Mode de conservation des éprouvettes	93
49	Figure (III.09) : Appareil de compression utilisé (LTPS Ouargla)	94
50	Figure (III.10) : Appareil de traction par flexion	94
51	Figure (III.11) : Positions d'appuis à l'appareil de traction par flexion	94
52	Figure (III.12) : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité	96
53	Figure (III.13): Appareil de mesure d'auscultation sonore	97
54	Figure (IV.01): Evolution de la résistance à la compression	99
55	Figure (IV.02): Evolution de la résistance à la traction	100
56	Figure (IV.03): Vitesse du son dans le béton des différents milieux	101
57	Figure (IV.04): Absorption capillaire des éprouvettes dans différents milieux (temoin et nappe phréatique)	102
58	Figure (IV.05) : Evolution de la résistance à la compression du béton conservé sous les conditions standards	105
59	Figure (IV.06) : Evolution de la résistance à la compression du béton conservé dans l'eau de la nappe phréatique	106
60	Figure (IV.07) : Evolution de la résistance à la traction du béton conservé sous les conditions standards	107
61	Figure (IV.08) : Evolution de la résistance à la traction du béton conservé dans l'eau de la nappe phréatique	108
62	Figure (IV.09) : Porosité accessible du béton conservé dans l'eau de la nappe phréatique	110
63	Figure (IV.10) : Résistance à la compression des éprouvettes à 28 jours d'âge après différentes durées de retards avant l'immersion dans l'eau de la nappe phréatique	111
64	Figure (IV.11) : Résistance à la compression des éprouvettes à 60 jours d'âge à différentes durées de retard avant l'immersion dans la nappe phréatique	112
65	Figure (IV.12) : Evolution de la résistance à la traction par flexion des éprouvettes à différentes durées de retard d'immersion dans la nappe	113

	phréatique	
66	Figure (IV.13): Vitesse du son dans les éprouvettes à différentes durées de retard avant l'immersion dans la nappe phréatique	114
67	Figure (IV-14) : Absorption capillaire des éprouvettes à différentes durées de retard avant l'immersion dans la nappe phréatique	115
68	Figure (IV.15): Résistance à la compression des éprouvettes immergées cycliquement dans la nappe phréatique de Ouargla pour différents durée de cycles d'immersion	116
69	Figure (IV.16): Résistance à la traction par flexion des éprouvettes immergées cycliquement dans la nappe phréatique de Ouargla pour différents durée de cycles d'immersion	117
70	Figure (IV - 17): Résultat de l'essai d'absorption capillaire	118

Liste des tableaux

N°	Tableau	Page
01	Tableau (I.01): Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures dans la région de Ouargla pour une décennale de 2007 à 2016 [11]	12
02	Tableau (I.02): Evaporation moyenne mensuelle dans la région de Ouargla pour une décennale de 2007 à 2016 [11]	13
03	Tableau (I.03) Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique de Ouargla	23
04	Tableau (I.04) : Données des éléments du bilan hydrique	25
05	Tableau (I.05) : Variation des Concentrations des ions dans la cuvette de Ouargla[16]	28
06	Tableau (I.06) : Analyse physicochimique des eaux de la nappe phréatique en 2007 (BELOUAEUR A)[8]	29
07	Tableau (I.07) : Analyse physicochimique des eaux de la nappe phréatique en 2007 Suite (BELOUAEUR A)[8]	29
08	Tableau (I.08) : Classement normalisé des granulats [21]	34
09	Tableau (I.09): Classement d'un sédiment selon Intes et al., rapporté par A.TAFRAOUI 1987 [18]	35
10	Tableau (I.10) : Classement d'un sédiment à partir de l'indice d'asymétrie [18]	35
11	Tableau (I.11) : Effet de sable broyé de BOUSSAADA sur les propriétés physiques du béton [29]	46
12	Tableau (I.12) : Influence de sable de dune broyé (SDB) sur les propriétés mécaniques des bétons (E/C=0.28) [29]	47
13	Tableau (III.01): Normes des essais sur le ciment	70
14	Tableau (III.02): Résultats des analyses chimiques du ciment CRS [43]	70
15	Tableau (III.03): Résultats des analyses chimiques du ciment CPJ	71
16	Tableau (III.04): Caractéristiques physiques du ciment CRS [43]	71

17	Tableau (III.05): Caractéristiques physiques du ciment CPJ	72
18	Tableau (III.06): Normes des essais d'identification du sable	72
19	Tableau (III.07): Normes des essais d'identification sur le gravier	73
20	Tableau (III.08): Masse volumique absolue et apparente des granulats utilisés	75
21	Tableau (III.09): Résultats de l'analyse granulométrique du sable	75
22	Tableau (III.10): Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8	76
23	Tableau (III.11): Résultats de l'essai granulométrique de gravier 8/15	76
24	Tableau (III.12): Résultats des analyses chimiques du sable et du gravier	81
25	Tableau (III.13): Coefficient de correction K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de Vibration et de l'angularité des granulats [34]	83
26	Tableau (III.14): Pourcentages massiques des constituants	85
27	Tableau (III.15) : Propriétés chimiques du sable de dune broyé (Sidi-Khouiled)	87
28	Tableau (III.16) : Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice (Fiche technique Granitex)	87
29	Tableau (III.17) : Caractéristiques de MEDAPLAST SP 40 (Fiche technique Granitex)	88
30	Tableau (III.7) : Formulations du béton dédié aux essais d'ajouts minéraux	88
31	Tableau (IV.01): Résultats d'analyses chimiques des cristaux	103
32	Tableau (IV-2): Résultats d'analyse chimique de béton dans la nappe phréatique	103

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La remontée de la nappe phréatique en certaines zones du monde est un phénomène qui a causé d'énormes problèmes écologiques, structurels et économiques. Pour ce qui est d'ordre écologique, nous enregistrons le changement de l'écosystème résidentiel, création d'endroits marécages, l'asphyxions des arbres (palmeraies). Pour ce qui est d'ordre structurel, nous enregistrons la dégradation des fondations de certaines structures de bâtiments, ponts et routes, l'effondrement des sols, et la détérioration des réseaux d'assainissement. Pour ce qui est d'ordre économique, nous enregistrons le financement des projets de lutte contre les impacts négatifs de cette remontée et la rénovation et la réhabilitation de ces structures et réseaux dégradés [1,2].

Plusieurs ouvrages en béton dans le monde sont soumis à des conditions pareilles et dont la durabilité est menacée sous l'effet de ces conditions de conservation [3]. Encore, le rapport de l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) en 1989 [4], mentionne que 40% des ponts routiers en béton armé aux Etats Unis sont en état déficient et que l'enquête menée sur 800 miles ponts de par le monde montre que la corrosion des armatures dans le béton armé apparaît comme le défaut rencontré le plus fréquent. Alors que ce dernier est supposé protégé par le béton d'enrobage.

Le béton, ce matériau qui est l'objet de la plus grande partie des structures en génie civil n'est en fait que la suite de l'hydratation du ciment portland, ce dernier réagit avec l'eau pour former une pâte de ciment durci jouant le rôle de colle, ainsi les granulats se solidarisent entre eux pour former ce matériau rigide. La qualité du béton dépend de plusieurs facteurs tels que : la nature et le dosage des composants utilisés (ciment, granulats, eau), les ajouts minéraux et les adjuvants, le malaxage, le transport, la vibration, la cure....etc.

La durabilité des ouvrages en béton armé est un facteur très important dans le domaine de génie civil pour les constructions civiles ou industrielles, par ce que les altérations du béton sont variées; elles atteignent soit la matrice cimentaire soient les armatures, et par fois les deux. Leurs origines sont très nombreuses à savoir entre autres : la mise en œuvre, la résistance mécanique du béton à 28 jours, les fissures formées sous l'effet des contraintes qui s'appliquent à l'ouvrage et les agents agressifs du milieu extérieur [5].

Notre zone d'étude (Ouargla), compte parmi les sites touchés par le problème de la remontée des eaux de la première nappe dite phréatique, qui se manifeste en plusieurs aspects qui peuvent être résumés en ce qui suit :

- ✓ Dégradations des fondations des constructions à usage d'habitations ou autres.
- ✓ Effondrements et affaissements sous la structure des chaussées des routes.
- ✓ Dégradations des réseaux hydrauliques soient ceux de l'assainissement ou de l'alimentation en eau potable (AEP) et les ouvrages en béton y afférents.
- ✓ Asphyxions de la palmeraie existante.

Les principales altérations des ouvrages sont dues à ce qui suit :

- ✓ Haute salinité des eaux de la remontée de la nappe phréatique.
- ✓ Haute teneur en éléments chimiques agressifs contenus dans les sols de Ouargla influent négativement sur les structures surtout en béton.
- ✓ Les fuites d'eau des réseaux hydrauliques provoquent des effondrements et des affaissements dans les chaussées des réseaux routiers.

Pour contribuer à la résolution de ces problèmes rencontrés à la ville de Ouargla, l'état algérien a consacré des montants très importants pour la réhabilitation et la rénovation des réseaux d'assainissement et de drainage dont le but d'abaisser le niveau de la nappe phréatique ainsi que le risque de l'altération des ouvrages réalisés existant et leur assurer la durabilité escomptée.

La direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Ouargla a dépensé entre 2002 et 2008 la somme de 291.769.936,00 DA contre la rénovation de 39,381 km du réseau d'assainissement tout diamètre confondu uniquement au niveau la ville de Ouargla et les communes limitrophes (Ain-Elbaieda, Sidi-Khouiled et N'goussa) [6].

Alors qu'au niveau de la ville de Ouargla, entre les années 1983 et 2008, on enregistre la rénovation du réseau d'assainissement réalisé initialement soit en acier (AC) ou en conduite centrifuge armée ordinaire (CAO) ou bien en Conduite centrifuge armée précontrainte (CAP) à des nouvelles conduites en (CAO) ou en (CAP) qui ont été substituées finalement par des conduites en Polyester renforcées en fibre de verre (PRV) ou en Polychlorure de vinyle (PVC) [7].

Les conduites d'assainissement à Ouargla que ce soient en (CAO) ou en (CAP) ont montré une faible durabilité car elles doivent être changées avant l'expiration de leurs durées de vie théorique évaluée à 30 ans. La dernière rénovation de ces conduites a marqué la substitution du CAO et du CAP par des tuyaux en PVC et en PRV, ces derniers sont caractérisés généralement par une faible porosité et une bonne résistance chimique dans le milieu agressif.

L'utilisation des matériaux locaux dans la construction est une notion qui reflète encore l'objectif de la durabilité étant donné que chaque roche est considérée favorable dans son milieu d'origine puisqu'elle a pu résister dans les conditions climatiques dont elle existe. Les sables de dune, dans notre zone d'étude, sont d'une abondance pratiquement intarissable et dont la composante principale est la silice, leur incorporation dans le béton en plusieurs formes est une question assez ambitieuse et qui nécessite d'être prise au sérieux, étant donné que les ciments de haute teneur en silice présente une très grande aptitude à résister aux agents agressifs qui menacent la durabilité du béton.

Afin de cerner le problème de durabilité des ouvrages en béton sous l'effet de l'agression des éléments chimiques néfastes dissouts dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla, du fait de la remontée de cette nappe, et de proposer les solutions possibles par l'incorporation de sable de dune en plusieurs formes, un programme de travail a été réalisé dans le cadre de cette thèse de doctorat au sein d'une unité de recherche appartenant au laboratoire E.V.R.N.Z.A (Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zone Arides), du département de génie civil et d'hydraulique à l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

La présente étude suit la démarche de recherche ci-après :

Après l'introduction générale, un chapitre premier ayant trait aux généralités sur la région d'étude, regroupant trois parties dont la première (A) présente la zone d'étude, suivie par une deuxième partie (B) traitant le phénomène de la remontée de la nappe phréatique, alors que la troisième partie (C) de ce chapitre fera l'objet de généralités sur le sable de dunes en tant que matériau local. Le deuxième chapitre est réservé à la durabilité des bétons dans les milieux chimiquement agressifs. Les matériaux utilisés et les essais réalisés sont insérés au troisième chapitre. Les résultats obtenus et les éventuelles interprétations feront l'objet du quatrième chapitre. Et en fin nous terminerons cette étude par une conclusion générale affiliée par des recommandations.

CHAPITRE I

Généralités sur la région d'étude

Partie A:

Présentation de la région d'étude

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA REGION D'ETUDE

PARTIE A : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

I.1 INTRODUCTION

Etant donné que cette étude est liée à un effet environnemental, la présente partie de ce chapitre bibliographique sera réservée à la présentation de la zone d'étude qui est limitée au chef lieu de la wilaya de Ouargla connue par la capitale du Sahara du Sud-est algérien, approximativement à 750 Km de la capitale Alger. La wilaya de Ouargla couvre une superficie de 163.230 Km². Ci-après un contexte global de la région d'étude qui touchera sommairement les points ci-après : la situation géographique, le relief, la géologie, la géomorphologie, la climatologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et enfin une conclusion.

I.2 SITUATION GEOGRAPHIQUE

La wilaya de Ouargla est située entre les lignes 3° et 9,5° Est et les latitudes 28,6° et 34° Nord. Elle est limitée par la Tunisie à l'Est, la Wilaya de Ghardaïa à l'Ouest, les wilayas d'Illizi et Tamanrasset au Sud, et au Nord par les wilayas d'El-Oued et Djelfa, comme le montre la figure (I.1) [8].

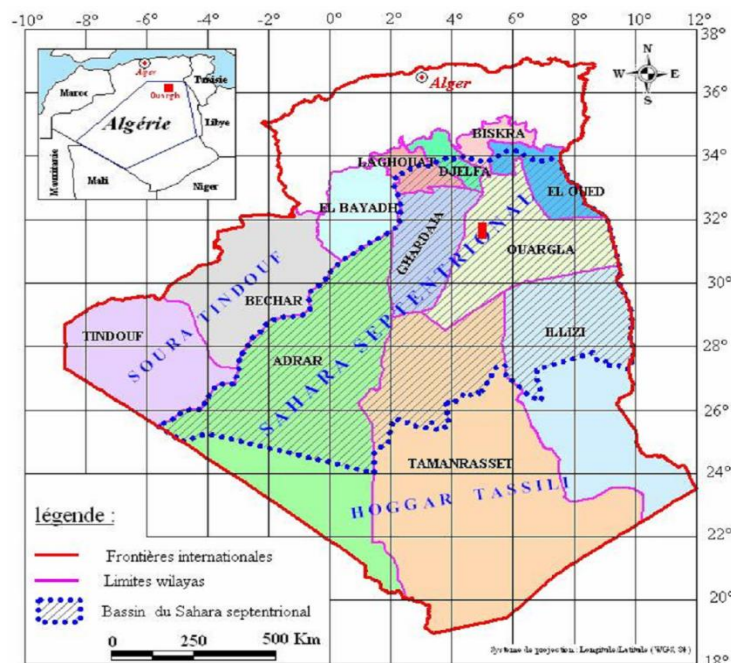


Figure (I.1) Carte de situation géographique [8]

La ville de Ouargla regroupe les communes de Ouargla, N'Goussa, Rouissat, Ain-Beida, Sidi-Khouiled et Hassi-Ben-Abdellah. La zone d'étude « cuvette de Ouargla » se trouve encaissée au fond d'une cuvette très large de la basse vallée de Oued M'ya comme montré sur la figure (I.02), elle est située au Sud de la wilaya de Ouargla et caractérisée par une dépression naturelle importante circonscrit dans un rectangle 70x20 km soit une superficie d'environ 140.000 hectares.

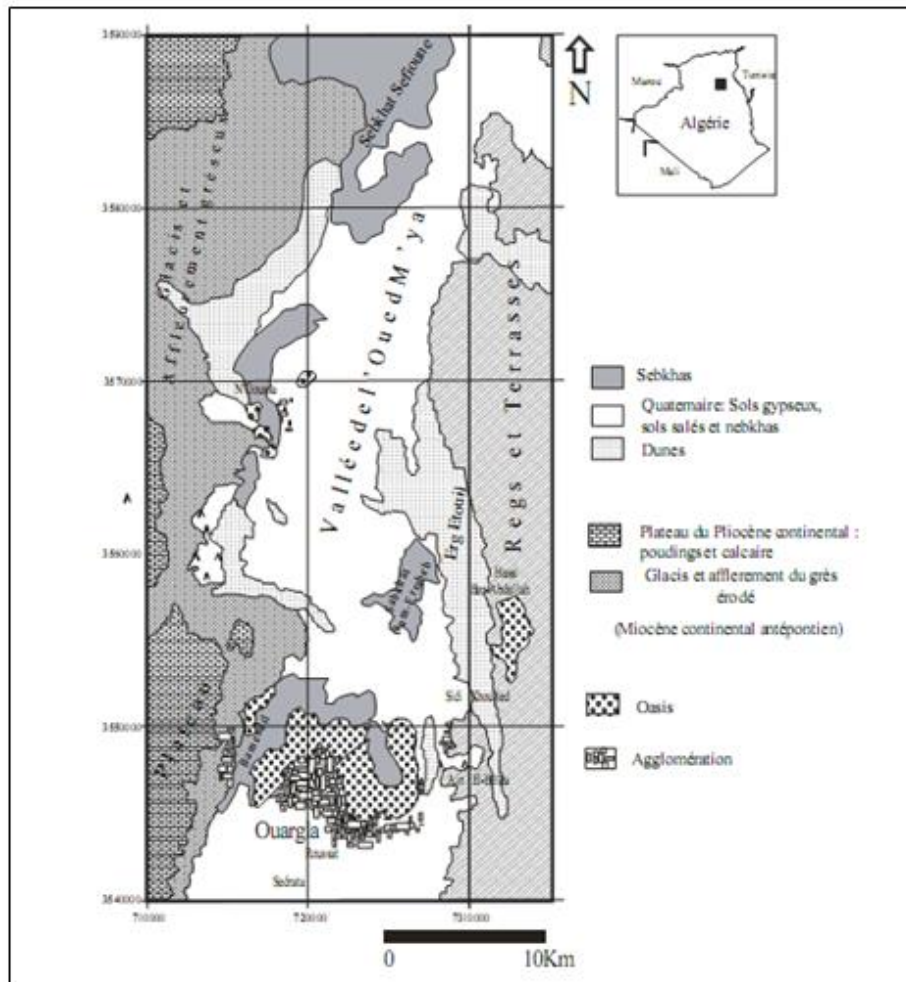


Figure (I.02): Cadre physique de la zone d'étude [9]

La morphologie de la zone d'étude peut être présentée comme suit :

- ✓ Au Nord Sebkhet Safioune avec une pente assez faible (environ de 0.1%) comptée à partir de la ville de Ouargla, qui est une formation à l'origine d'un chapelet de sebkhas (Bamendil, Oum-Raneb, Safioune, N'Goussa), avec l'existence d'accumulations de sable dunaire.

- ✓ A l'Est un plateau de dunes dont l'altitude peut atteindre 160 m de hauteur avec des limites qui ne sont pas assez nettes, il s'agit des sables de Erg Touil, Erg Boukhezana et Erg Arifdji).
- ✓ Au Sud un massif dunaire contenant les quaternaires de Sedrata et où l'altitude dépasse 155 m.
- ✓ A l'Ouest un plateau calcaire surplombe la cuvette de Ouargla d'environ 230 m d'altitude dans la confluence de Oued M'zab et Oued N'ssa.

L'envergure de la cuvette de Ouargla du Sud au Nord est de 70 Km, alors que celle de l'Est à l'Ouest est de 20 Km.

I.3 RELIEFS

La topographie de la région de Ouargla est pratiquement plate ayant des altitudes qui peuvent atteindre 147 m, comme elles descendent jusqu'à 102 m au niveau de la Sebket Safioune rejet des eaux usées et de drainage évacuées de la ville de Ouargla, alors qu'au niveau des agglomérations, les altitudes sont de 135,08 m en centre ville, alors qu'elles sont de l'ordre de 127,95 m aux niveaux des chotts et des sebkhas [10].

I.4 CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'après la carte géologique présentée par le bureau d'étude suisse "BONARD et GARDEL" (BG), les couches géologiques sous quelques mètres du niveau du terrain naturel, sont généralement formées de sable dunaire, d'origine de roches sédimentaires et alluvions, bien que les couches en profondeur, comme présenté sur la figure (I.3), se présentent comme suit [10]:

- ✓ Une couche constituée par des calcaires marneux, de sable argileux et des argiles sableuses à la base de grés du continental terminal vers 30 à 45 m de profondeur.
- ✓ De sable fins et gros se terminent par des argiles sableuse vers 55 m à 80 m de profondeur.
- ✓ Une couche de calcaire du sénonien jusqu'à 250 m de profondeur.
- ✓ Un épais horizon d'argiles d'évaporites (vers 650 à 700 m).

- ✓ Quelques mètres d'évaporites massives.
- ✓ Des dépôts d'argiles d'évaporite plastique jusqu'à 1100 m de profondeur.
- ✓ Des couches de sables et de grès d'albien se trouvant entre 1050 m et 1100 m et entre 1350 - 1400 m de profondeur.

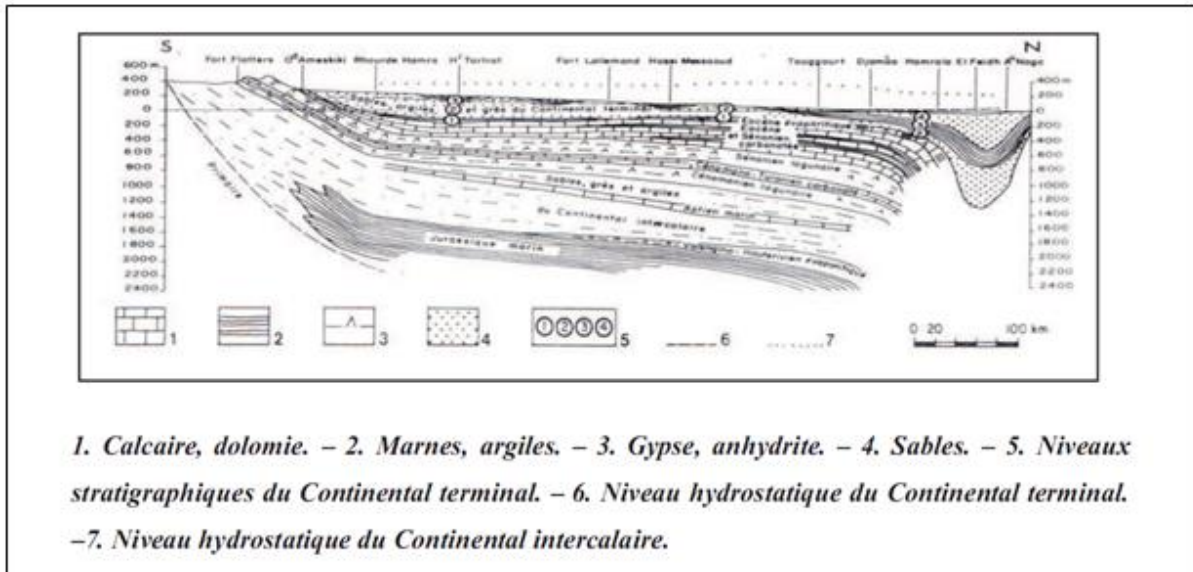


Figure (I.03) : Coupe géologique du Sahara algérien [10]

I.5 CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

La cuvette de Ouargla, tel que figuré sur la carte géomorphologique (I.4), se caractérise par les formations géomorphologiques suivantes :

- a. Hamada :** elle est limitée par la vallée de Ouargla à l'Ouest, dont l'altitude moyenne est de 250 m et qui date du méo-pliocène ou pléo-quaternaire.
- b. Glacis:** Le bassin versant de la cuvette de Ouargla présente quatre niveaux de glacis, qui s'étagent de l'Ouest en vers l'Est et du plus ancien au plus récent, ces niveaux varient entre 200 m et 140 m.
- c. Erg:** Les grands ergs limitent la région de Ouargla à l'Est et au Sud, alors que les ergs mineurs et les formations éoliennes récents en petits cordons dunaires, dont l'altitude est d'environ 150 m, se situent à l'Est et au Nord-est de Ouargla.

- d. Chott :** le chott représente la frontière de la sebkha, il est constitué par des formations de sables siliceux et/ou gypseux. Au niveau de la ville de Ouargla, nous pouvons citer : Chott Ain Beida qui couvre une superficie de 1000 hectares, il renferme les eaux de la nappe phréatique et l'exutoire des eaux de oued M'ya. Chott Oum-Er-Raneb couvre une superficie variant entre 900 à 1400 hectares en fonction du niveau d'eau de la nappe phréatique [10].
- e. Sebkhhas :** Elles sont constituées par des formations qui date du quaternaire occupant les niveaux les plus bas des sédiments, dont le centre est une dépression fermée et salée, et dont le bas fond se caractérise par la présence d'une nappe phréatique permanente peu profonde (1 à 5) m dans le chott. La zone de Ouargla regroupe : la sabkhas de Safioune qui couvre une superficie d'environ 8000 hectares, et qui renferme les eaux des crues des oueds N'sa et M'Zab, et la sebkha de Bamendil qui s'étale sur une superficie totale de 1838 hectares, caractérisée par la présence d'une nappe phréatique de faible profondeur [10].

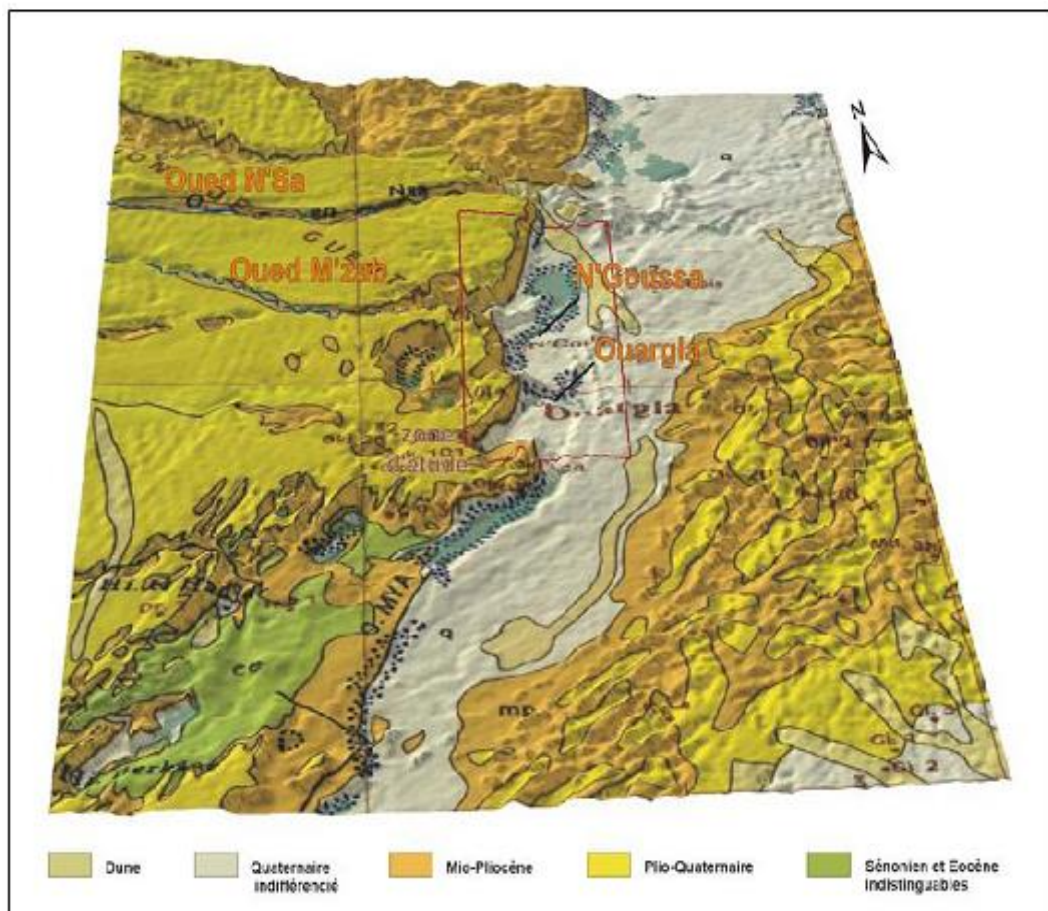


Figure (I.04): Relief géologique de la région de Ouargla [10]

I.6 CLIMAT DE LA ZONE D'ETUDE

Le climat de la région de Ouargla est saharien, chaud et sec en été et froid en hiver, la région se caractérise par des précipitations rares et irrégulières, par des températures et évaporations très élevées, avec un faible taux d'humidité relative de l'air.

I.6.1 Température

La région de Ouargla se caractérise par un climat très froid en Hiver, et trop chaud en Eté, selon la figure (I.05) le mois le plus chaud est celui de Juillet, dont la valeur moyenne des maximales de température annuelle est de 44.1 C° pour les années (2007-2016), alors que la valeur moyenne des températures minimales dans la même période est de 4.7 C° au mois de janvier . Les températures extrêmes sont $T_{Max}= 47,91\text{ C}^\circ$ au mois d'Aout et $T_{Min}= 0,42\text{ C}^\circ$ en Janvier.

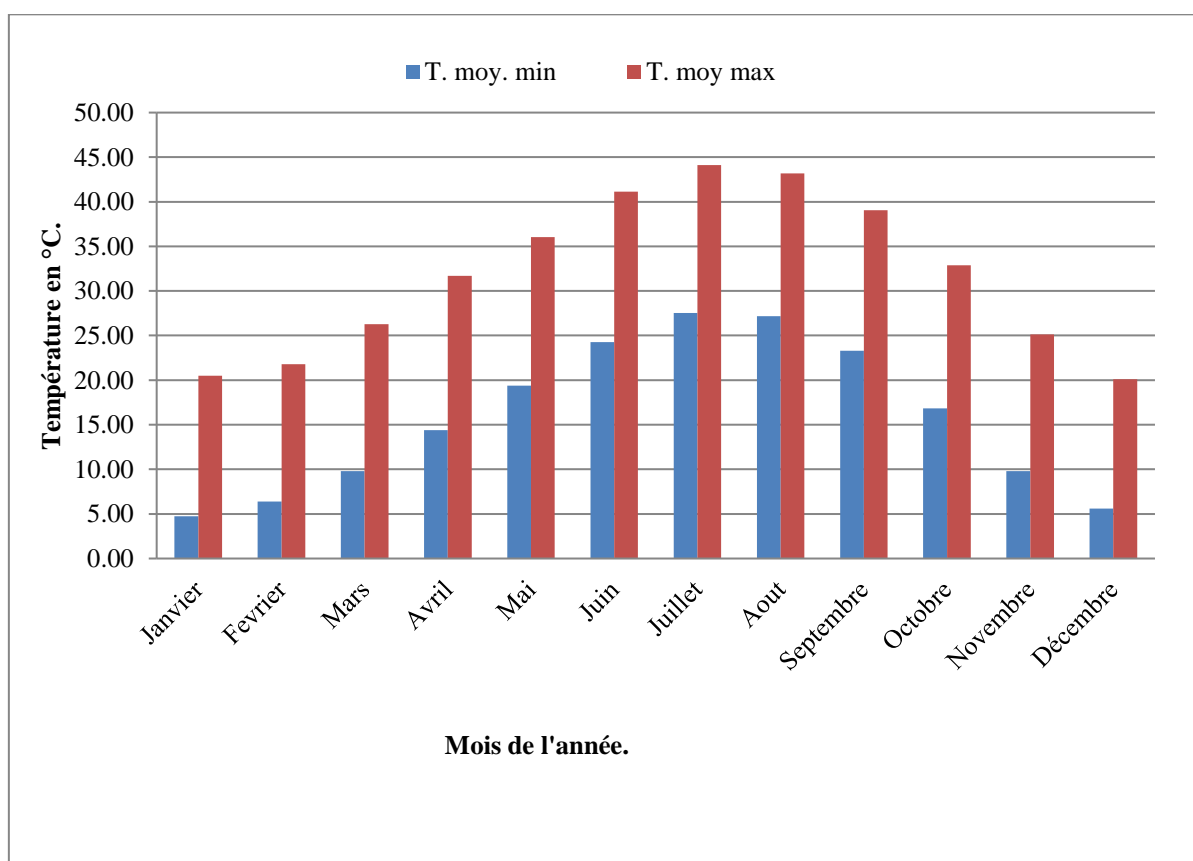


Figure (I.05): Températures moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]

I.6.2 Précipitations

La région de Ouargla se caractérise par un climat sec dont la pluviométrie est très rare et elle ne dépasse guère un nombre de 25 jours pendant l'année, d'après la figure (I.06), la valeur maximale des précipitations moyennes annuelles est de 8,5 mm au mois de Janvier comme étant le mois le plus pluvieux, et elle est de l'ordre de 0,4 mm au mois de Juillet comme étant le mois le plus sec.

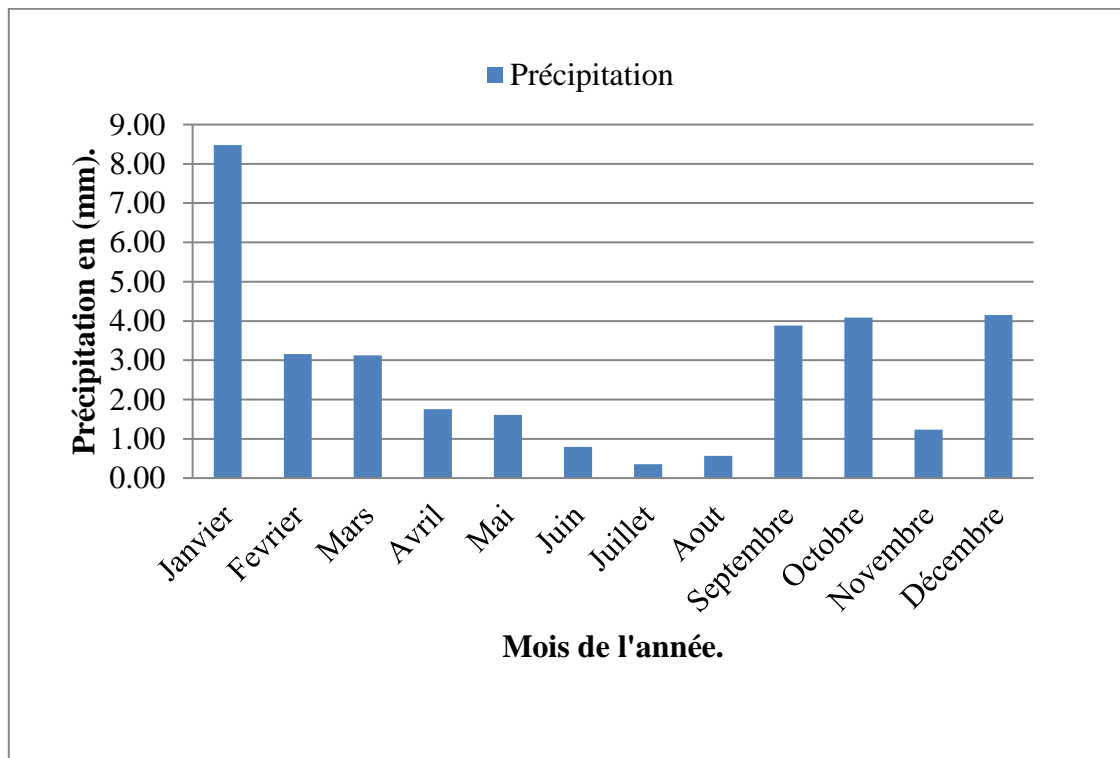


Figure (I.06): Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]

I.6.3 Humidité relative

La figure (I.07) présente les valeurs d'humidité relative moyenne annuelle enregistrée au niveau de la station de Ouargla, l'humidité relative moyenne des valeurs mensuelles maximales sur une décennale commençant de 2007, est de l'ordre de 83 % au mois de Décembre comme étant le mois le plus humide, alors que celle minimale est enregistrée au mois de Juillet comme étant le mois le plus sec, elle est de l'ordre de 13% pour la même période [11].

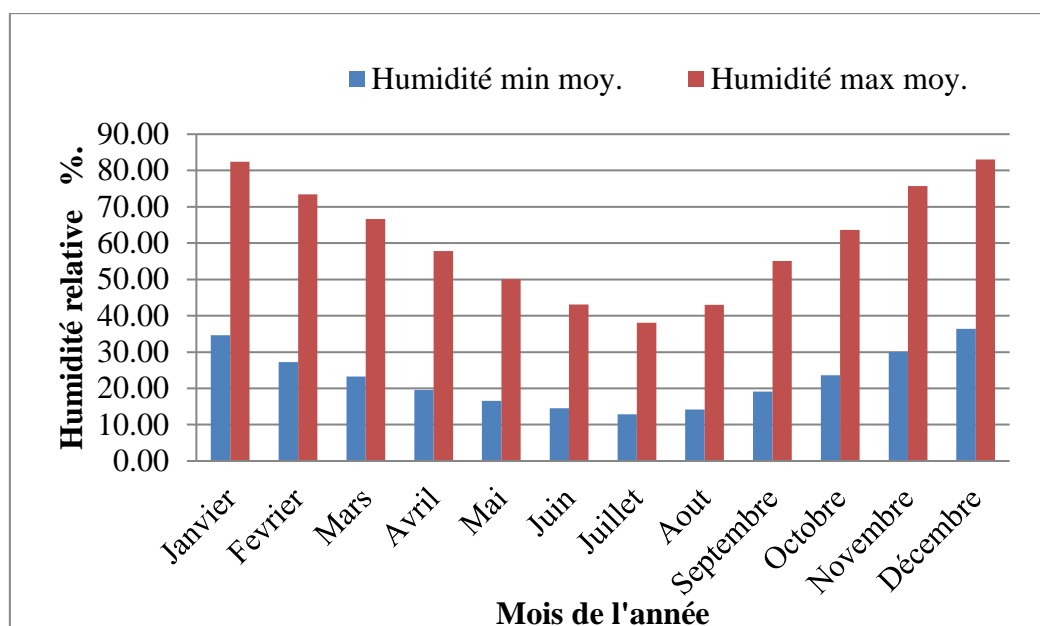


Figure (I.07): Humidité relative moyenne annuelle dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]

I.6.4 Le vent

Dans la région de Ouargla, les vents soufflent suivant différentes directions, nous enregistrons d'après la figure (I, 07) que la valeur moyenne mensuelle des maximales de la vitesse du vent est de l'ordre de 18,31 m/s au mois d'Avril, et que la moyenne des vents moins violent est de l'ordre de 11,62 m/s au mois de Décembre.

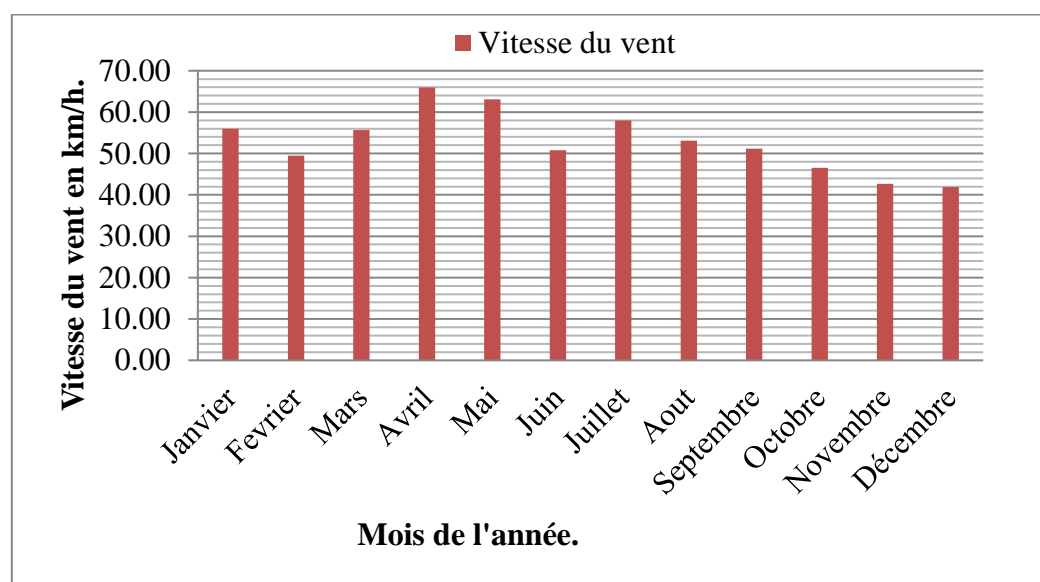


Figure (I.08): Vitesse moyenne annuelle du vent dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2007 [11]

I.6.5 Durée d'insolation

D'après le tableau (I.01), la région de Ouargla reçoit en générale une intensité lumineuse très importante, notamment les mois les plus chauds soient les mois de Juillet et Août, la durée d'insolation maximale mensuelle sur les dix ans (2007-2016) est de l'ordre de 335,19 heures, relative au mois d'Août, et la durée minimale correspond au mois de Décembre avec une durée mensuelle de 229,56 heures au cours de la même période, soit une différence de 105.63 heures d'insolation entre ces deux mois.

Tableau (I.01): Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures dans la région de Ouargla pour une décennale de 2007 à 2016 [11]

Mois\Année	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Moy.
Janvier	260,90	254,30	196,10	248,80	261,20	249,00	246,60	246,70	259,00	259,80	248,24
Février	217,30	248,90	253,80	197,80	257,10	273,00	267,50	244,40	218,90	249,00	242,77
Mars	287,00	263,20	267,40	219,30	265,50	252,80	277,30	252,50	299,40	302,00	268,64
Avril	198,50	300,60	321,10	262,80	306,20	293,40	268,20	309,50	272,10	285,60	281,80
Mai	224,70	243,60	338,10	311,40	332,80	328,10	330,70	316,90	347,50	259,80	303,36
Juin	270,10	292,00	270,50	218,60	244,50	231,50	226,10	225,30	239,00	190,70	240,83
Juillet	366,40	306,90	336,50	313,10	319,70	320,80	315,90	298,50	339,00	322,10	323,89
Aout	316,70	308,10	343,60	352,10	357,70	349,20	340,80	320,80	310,80	352,10	335,19
Septembre	268,60	243,10	256,80	273,70	270,10	285,50	279,40	259,50	226,20	282,00	264,49
Octobre	267,90	209,90	312,90	259,20	265,10	258,90	268,50	288,30	259,00	251,00	264,07
Novembre	275,00	261,00	275,10	257,40	259,10	236,20	245,90	224,20	270,80	228,80	253,35
Décembre	211,90	192,00	254,90	247,60	229,80	239,70	205,00	249,80	253,90	211,00	229,56

I.6.6 Evaporation

L'évaporation est le mécanisme principal de perte des eaux au Sahara, ou dans les bassins arides fermés, L'évaporation dans la vallée de Ouargla est très élevée, nous constatons d'après le tableau (I.02) que la valeur maximale d'évaporation est de 429,75 mm au mois de Juillet, et la valeur minimale est de l'ordre de 86,26 mm au mois de Décembre.

Tableau (I.02): Evaporation moyenne mensuelle dans la région de Ouargla pour une décennale de 2007 à 2016 [11]

Mois\Année	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Moy.
Janvier	93,00	75,50	80,90	109,00	81,00	61,60	100,90	87,00	93,00	135,80	91,77
Février	163,70	136,60	115,30	131,40	80,00	80,80	112,90	138,40	91,00	187,00	123,71
Mars	256,20	210,40	151,80	186,60	159,60	132,40	166,90	157,80	158,90	259,40	184,00
Avril	283,40	291,80	172,60	211,00	215,20	209,10	191,80	223,30	256,50	288,60	234,33
Mai	418,40	323,40	152,70	279,40	262,50	312,30	227,80	329,10	334,10	388,30	302,80
Juin	499,80	286,40	333,00	410,40	347,70	353,60	317,30	337,90	365,40	479,60	373,11
Juillet	469,30	428,10	417,30	425,90	438,50	382,30	414,40	488,90	346,70	486,10	429,75
Aout	517,50	322,70	384,40	388,30	386,40	367,60	319,10	397,10	366,60	473,10	392,28
Septembre	395,80	312,60	222,00	221,30	245,20	332,90	287,10	287,60	233,80	301,90	284,02
Octobre	276,90	174,80	166,50	176,60	125,90	278,30	276,70	213,20	158,50	278,90	212,63
Novembre	130,50	113,80	110,20	117,10	105,80	146,80	147,50	88,80	98,20	157,70	121,64
Décembre	108,70	78,10	111,10	109,40	62,40	90,60	55,90	85,90	75,20	85,30	86,26

I.7 HYDROLOGIE

Le bassin hydrographique dans la région de Ouargla est composé de différents bassins versant des oueds tels que mentionnés sur la figure (I.09), Ces oueds sont saisonniers et alimentent la sebkha de Safioune et la cuvette de Ouargla, contribuant ainsi au problème de la remontée des eaux superficielles dans la zone d'étude, parmi ces oueds, on note :

- ✓ **Oued M'ya** : qui draine le bassin versant Nord-est du plateau de Tademaït, il couvre une superficie de 19.800 Km², dont les écoulements les plus fréquents sont aux mois de Novembre, Octobre, Mai et Juin.
- ✓ **Oued M'Zab** : qui couvre une superficie de 5000 Km², débutant de l'Ouest vers l'Est sur une distance d'environ 320 Km de la région de Boutma Rouila à 750 m d'altitude pour arriver à la sebkha de Safioune, les crues sont exceptionnelles ayant un débit enregistré en 1994 de l'ordre de 13,5 m³/seconde.

- ✓ **Oued N'sa** : qui couvre une superficie de 7800 Km², dont la longueur est de 175 Km, il reçoit plusieurs affluents tels que le « Ballouh » et le « Soudou » qui irriguent l'oasis de Beraine [10].

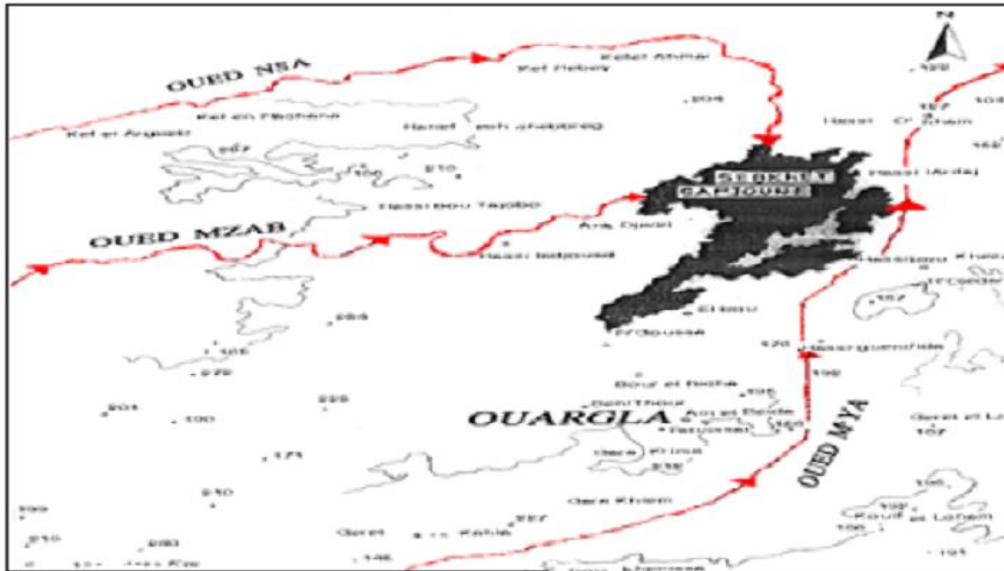


Figure (I.09): Bassins hydrographiques dans la région de Ouargla [10]

I.8 HYDROGEOLOGIE

D'après la figure (I.10) [12], la structure hydrogéologique de la cuvette de Ouargla est constituée de plusieurs couches superposées perméables permettant un écoulement souterrain des eaux, elle couvre encore des couches imperméables assurant l'existence de la nappe phréatique au niveau plus proche de la surface, comme elle renferme des nappes profondes, soient la nappe du complexe terminal (C.T) et la nappe continentale intercalaire (C.I).

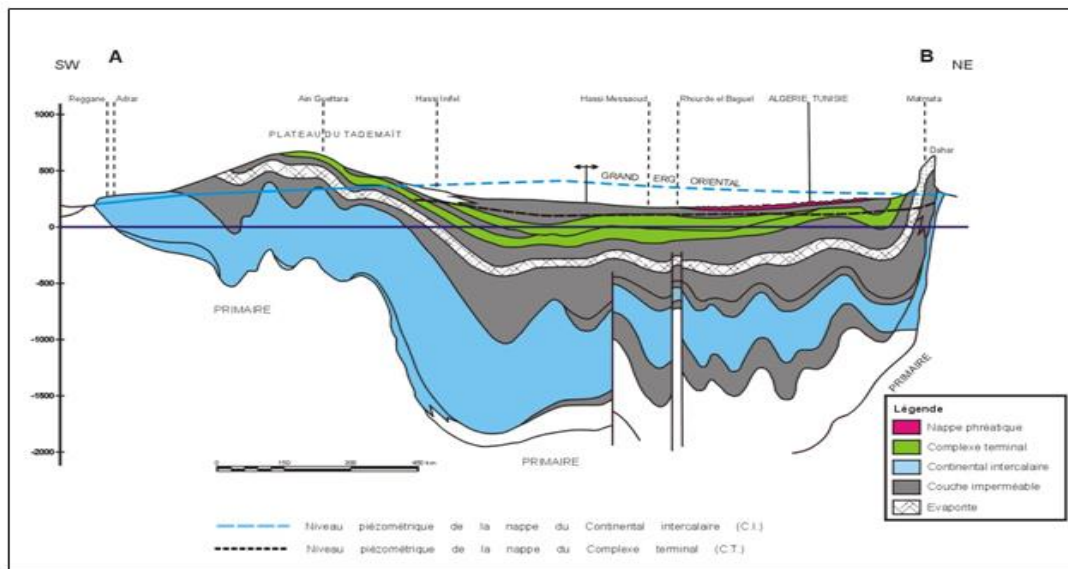


Figure (I.10): Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972) [12]

I.8.1 Nappe phréatique

La nappe phréatique dite encore nappe libre, existe sur une faible profondeur entre 1 et 2 m, et parfois elle se trouve à une profondeur de 50 cm sous la surface du sol de la ville de Ouargla, comme elle peut affleurée dans certains endroits (sebkhas) surtout aux saisons d'Automne et d'Hiver [2]. Elle repose sur un substrat étanche imperméable de plus de 20 mètres d'épaisseur qui empêche tout communication entre la nappe phréatique et la nappe méo-pliocène sous jacente [13]. Cette nappe sera revue avec plus de détail dans la partie B de ce présent chapitre.

I.8.2 Nappes du complexe terminal (C.T)

La formation du complexe terminal est très hétérogène, elle englobe trois aquifères différents séparés entre eux par des horizons semi-perméables ou imperméables, dans la cuvette de Ouargla, suivant la figure (I.11), seules les nappes du méo-pliocène et du sénonien qui sont exploitées.

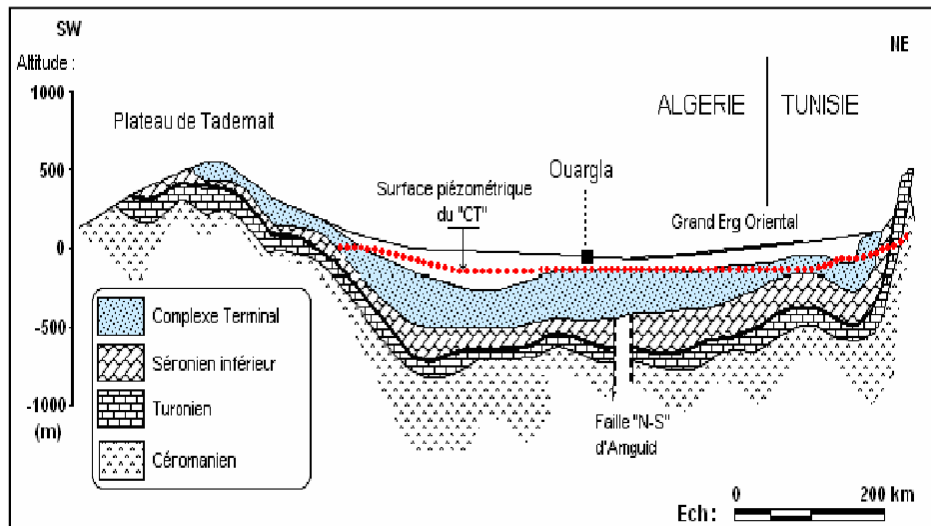


Figure (I.11): Coupe hydrogéologique transversale du complexe terminal (C.T) d'après UNESCO 1972 [12]

I.8.3 Nappe du méo-pliocène

Elle est composée de couches perméables de grès, de sable et de sable grossier dont la profondeur varie entre 30 à 60 mètre, les eaux de cette nappe se caractérisent par une faible salinité qui varie entre 1,8 à 4 g/l, et parfois atteint 7g/l avec une température de 23 à 25 °C. Ces eaux sont exploitées par des forages des puits avec une capacité de pompage de 15 à 40 l/s, pour l'irrigation des palmeraies et l'alimentation de l'eau potable de certains points de la ville de Ouargla [2,8].

I.8.4 Nappe du séronien

Elle est formée de couches perméables de calcaires et de dolomite, dont la profondeur d'exploitation varie entre 140 et 200 m, cette nappe est exploitée par le forage de Hassi Khefif au Nord-est de la Sebkhah de Safioune à 400 m de profondeur [8]. Les eaux de cette nappe sont caractérisées par une faible salinité qui varie entre 2,5 et 3,6 g/l, ces eaux sont utilisées pour l'alimentation domestique et agricole.

I.8.5 Nappe Continentale Intercalaire (C.I) ou l'Albien

La nappe continentale intercalaire est continue du Nord au Sud depuis l'Atlas saharienne jusqu'au Tassili et le Hoggar, elle couvre une surface d'environ 600.000 Km², de l'Ouest à l'Est, depuis la vallée de la Saoura jusqu'au désert libyen, elle est caractérisée par une profondeur variable augmente du Sud au Nord de moins de 1000 m au bas du Sahara, à plus de 2000 m sous les chotts, la profondeur d'exploitation au niveau de la ville de Ouargla varie entre 1150 et 1350 mètres.

Cette nappe est contenue dans les dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du crétacé inférieure. Sa lithologie est formée de 10% de grés, de 10% à 50% de grés argileux et 50% d'argile.

Selon l'ANRH en Janvier 2005, cette nappe est un réservoir de l'eau douce de faible teneur en sel (2 g/l) et de température qui dépasse parfois 60 °C, elle est exploitée par la ville de Ouargla en deux forages avec un débit de 7 Hm³ par mois [13].

I.9 CONCLUSION DE LA PARTIE A DU CHAPITRE I

En guise de conclusion de cette partie de ce chapitre, la zone d'étude Ouargla est caractérisée par un climat saharien chaud et sec, ayant de hautes températures en Eté atteignant plus de 48°C et froid en Hiver avec de faibles à rares précipitations et une forte insolation qui peut atteindre les 358 heures. La région renferme plusieurs nappes entre autres la nappe libre (phréatique) qui est en contact avec les constructions voir leurs fondations. La partie B qui suit se ce chapitre sera consacrée à la caractérisation de cette nappe phréatique de point de vue physique, chimique et mécanique.

PARTIE B : PHENOMENE DE REMONTEE DE LA NAPPE PHREATIQUE

I.10 INTRODUCTION

Le phénomène de remontée des eaux de la nappe phréatique de Ouargla reflète l'existence d'un substratum imperméable qui n'est en fait pas nécessairement uniforme. L'alimentation de cette nappe phréatique libre provient de la pluviométrie bien que rare et des nappes sous-jacentes exploitées par la population pour des fins divers et où les eaux usées et celles d'irrigation y seront réinjectées. La présente partie de ce premier chapitre se focalise sur le phénomène de la remontée qui sera exposé et caractérisé.

I.11 CARTOGRAPHIE DU SUBSTRATUM DE LA NAPPE PHREATIQUE

L'établissement d'une carte du substratum relative à la nappe phréatique de Ouargla est une tâche assez difficile et ne peut être qu'approximative du fait que l'information repose uniquement sur les forages réalisés dans la région elle-même, soient ceux de reconnaissance ou ceux d'exploitation.

Le travail fait en 2008 par BELKHIRA C. [14] sur 48 logs de forages réalisés dans le Complexe Terminale et en utilisant le logiciel SURFER 3D a abouti aux résultats des figures (I.12) et (I.13) ci-après :

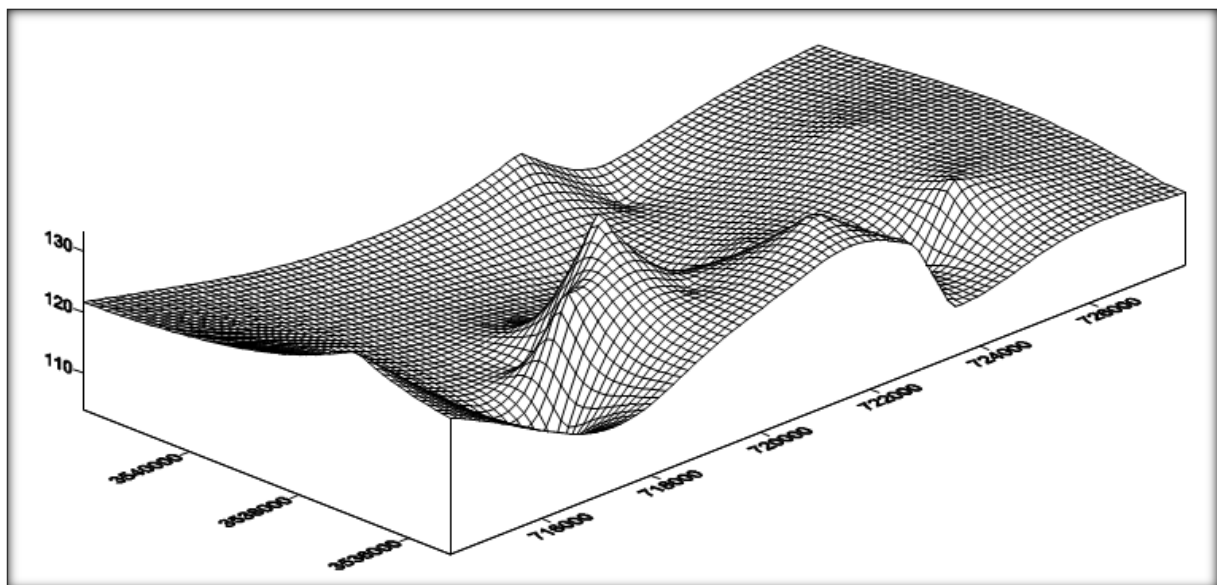


Figure (I.12) : Carte en 3D du substratum de la nappe phréatique de Ouargla[14]

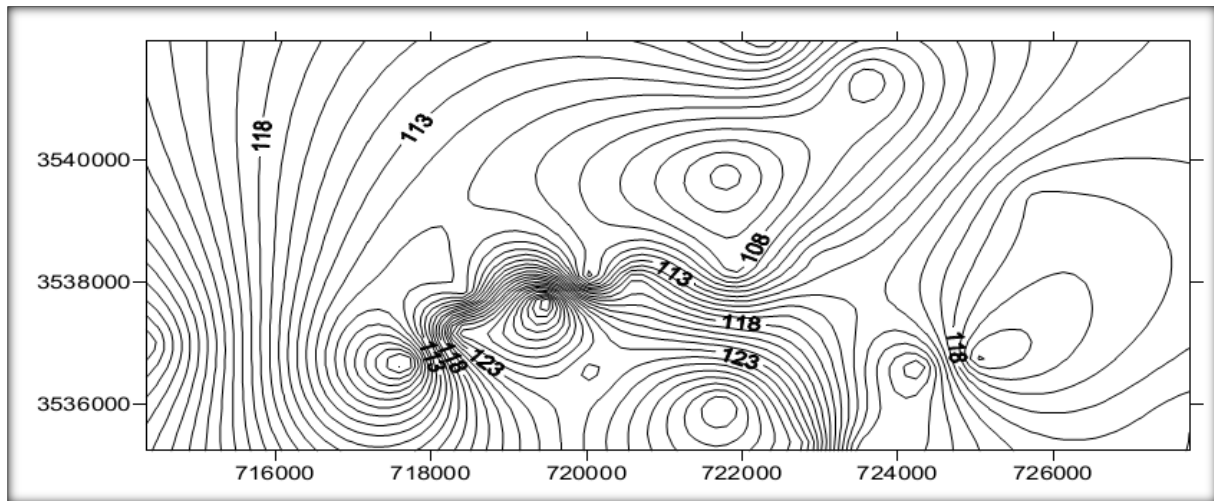


Figure (I.13) : Carte en 2D du substratum de la nappe phréatique de Ouargla[14]

D'après les deux figures sus-présentées, la surface du substratum n'est pas nécessairement uniforme comme elle ne comporte pas nécessairement qu'une seule cuvette comme le niveau du fond n'est pas nécessairement identique et que l'eau débordante d'une cuvette peut être déversée dans l'autre. Ceci n'est pas en contradiction avec le principe du sens général d'écoulement globale des eaux du bassin de Ouargla.

I.12 CARTOGRAPHIE DU TOIT DE LA NAPPE PHREATIQUE

Le toit de la nappe phréatique de Ouargla n'est que la représentation de la topographie du terrain naturel qui est représenté par les cartes des figures (I.14) et (I.15) établis en se basant sur les piézomètres et forages réalisés ainsi que les instruments d'urbanisme existant de la zone de Ouargla.

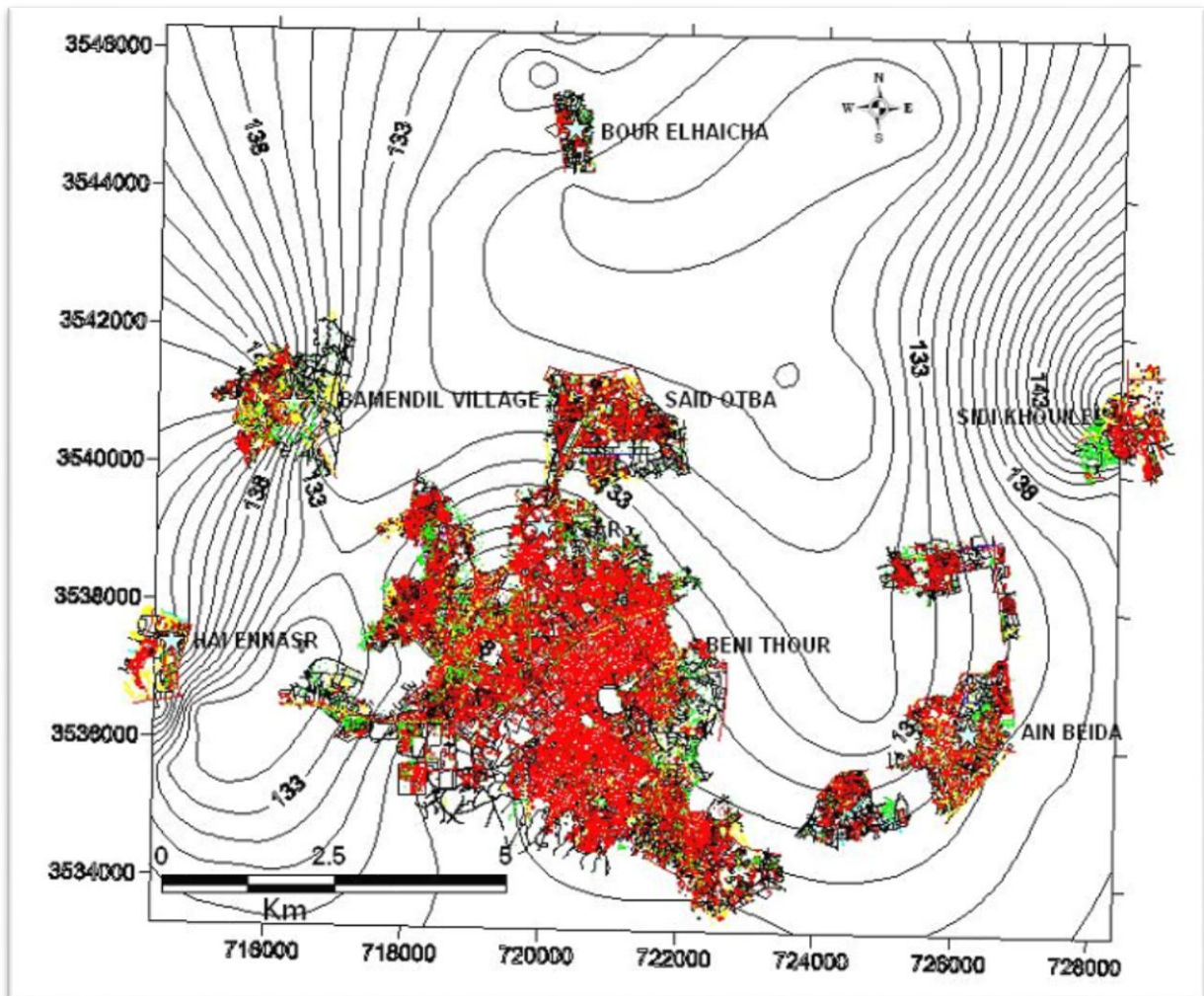


Figure (I.14) : Carte en 2D du toit de la nappe phréatique de Ouargla[14]

D'après la figure ci-dessus, l'affleurement de la nappe phréatique peut être attendu aux endroits les plus profonds topographiquement en suivant la ligne ayant la cote 133 sur la figure et qui touche les zone entre Ouargla centre et Hai-Ennasr, Beni-Thour et Ain-Beida, et entre Bamendil et Said-Otba.

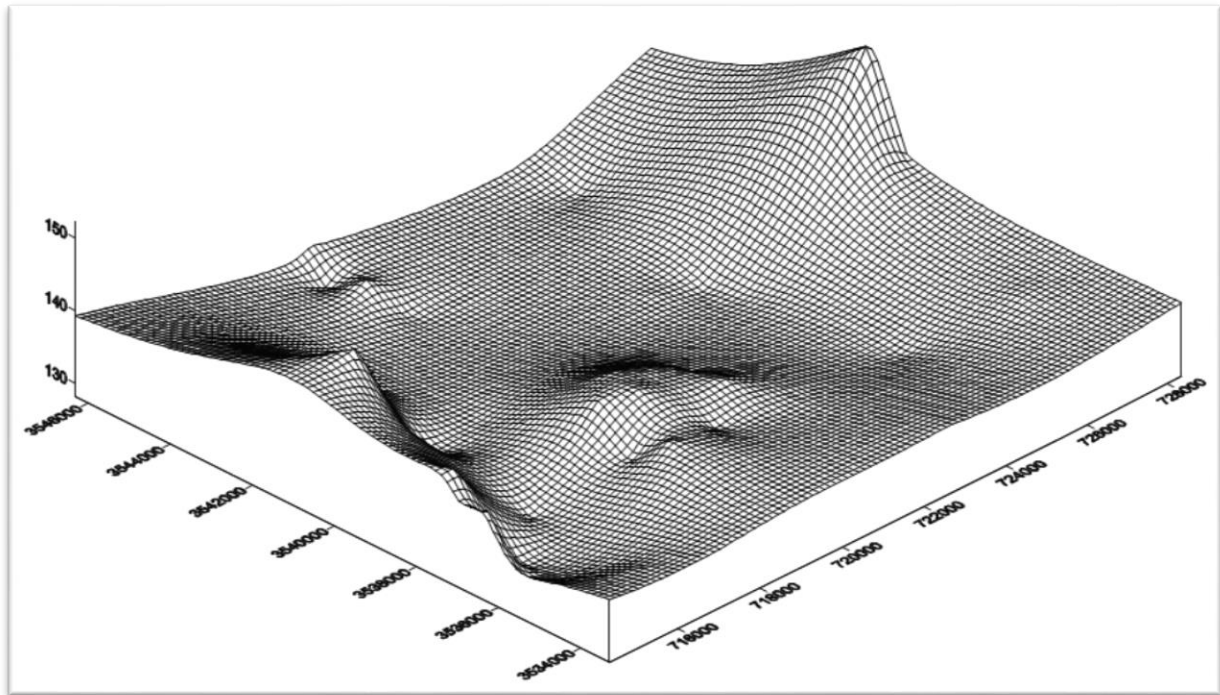


Figure (I.15) : Carte en 3D du toit de la nappe phréatique de Ouargla[14]

La figure ci-dessus, peut mettre en évidence les lieux où l'affleurement de nappe peut être visualisé sur l'étendue de la zone d'étude.

I.13 CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

La pièze étant une unité de pression, et encore chez les hydrogéologues, une colonne réalisée au biais d'un forage à une profondeur donnée en vue de contrôler le niveau (piézométrique) de l'eau de l'aquifère considéré en cet endroit.

L'établissement d'une carte piézométrique pour une période donnée repose sur la campagne de relevés piézométriques sur les pièzes existantes, bien que la répartition des piézomètres n'est pas assez dense et ne couvre pas la totalité de la région d'étude, la figure (I.16) représente approximativement la carte piézométrique de la région de Ouargla en 2004.

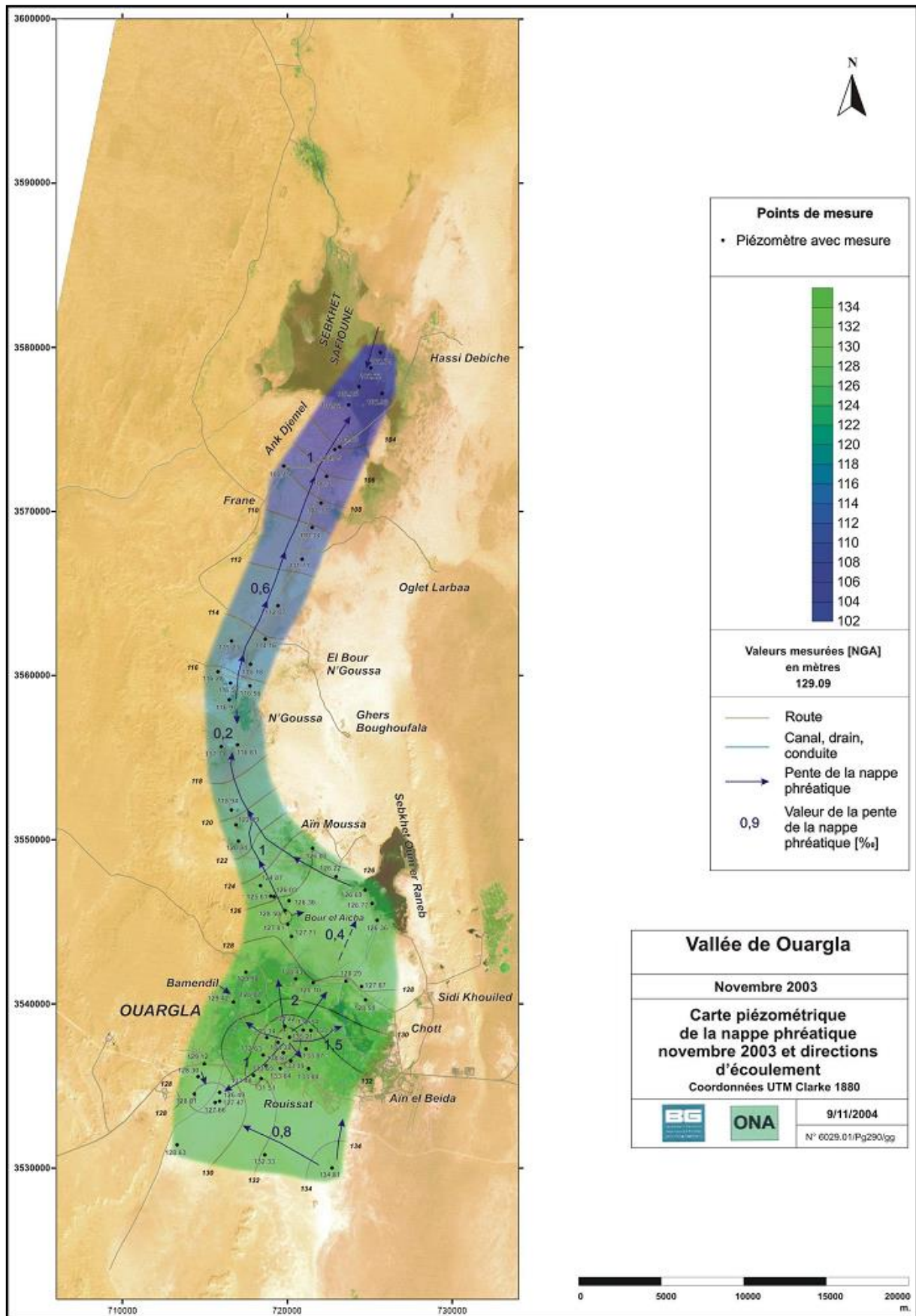


Figure (I.16) : Carte piézométrique la nappe phréatique de Ouargla[10]

I.14 CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE PHREATIQUE

Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique de Ouargla découle encore des données disponibles jugées rares. En ce qui suit, quelques caractéristiques qui seront exposées.

I.14.1 Transmissivité et perméabilité

Sur la base des essais de pompage réalisés sur les piézomètres existants, le bureau d'étude BG a pu faire ressortir les résultats représentés sur le tableau (I.03) ci-après[06] :

Tableau (I.03) Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique de Ouargla[06]

Lieu X(UTMWGS84) Y(UTMWGS84)	Transmissivité (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement %	Epaisseur mouillée (m)	Perméabilité (m/s)
Bour-Elhaicha X=719954 m Y=3545181 m	5.85x10 ⁻⁴	-	-	-
Bamendil X=716546 m Y=3540169 m	1.86x10 ⁻⁴	5.89	15	1.24x10 ⁻³
Ouargla X= (non fourni) Y= (non fourni)	9.9x10 ⁻⁴	-	17	5.34x10 ⁻⁵
Ouargla X=719474 m Y=3538552 m	1.46x10 ⁻⁴	11	20.5	7.12x10 ⁻⁶
Ouargla X=719624 m Y=3537984 m	2.63x10 ⁻⁴	-	19	1.38x10 ⁻⁵

Il est clair que - dans la cuvette de Ouargla - la perméabilité et la transmissibilité sont variables en allant du centre ville aux alentours de la ville.

I.14.2 Porosité

La porosité de la zone d'étude (Ouargla) est simplement déduite par l'utilisation de la formule (I.01) de BRETJINSKI.

$$\omega = 0.117.(K)^{1/7} \dots\dots\dots (I.01) \quad [14]$$

avec ω : Porosité totale donnée en % ; K : perméabilité en (m/j).

A ce propos, les valeurs de la porosité déduites des valeurs de la perméabilité avancées au tableau (I.03), seront comme suit : 23% du côté de Bamendil, 13% au niveau du centre ville et 11% au niveau de la zone de la palmeraie et chotts. Ces porosités peuvent être traduites par les porosités cinématiques dites efficaces soit une réduction de 70% des porosités totales soient les valeurs respectives de 16.1%, 9.1% et 7.7%.

I.15 BILAN HYDRIQUE

Pour l'établissement d'un bilan hydrique il y lieu de définir tout d'abord l'année hydrologique, l'équilibre du bilan, les éléments du bilan, l'expression générale du bilan d'eau, l'infiltration efficace et la relation avec les couches aquifères profondes et adjacentes.

L'expression générale d'un bilan hydrique (I.02) est la suivante :

$$\text{Entrées (apports)} = \text{Sorties (pertes)} \pm dW \text{ (variations des réserves en eaux)} \dots\dots (I.02)$$

Dans notre cas cette formule peut être réduite à la formule (I.03) ci-après :

$$I_{ef} + I_{rd} + I_{ri} + D_{if}^e = E_t + Q_h + D_{if}^s \pm dW \dots\dots\dots (I.03)$$

Où – I_{ef} : Infiltration efficace des précipitations.

- I_{rd} : Restitution des eaux domestiques..
- I_{ri} : Eaux de restitution d'irrigation.
- D_{if}^e : Apport des eaux souterraines adjacentes ou profondes.
- E_t : Evaporation et évapotranspiration.
- Q_h : eaux pompées hors de la nappe étudiée.
- D_{if}^s : Déversement dans les couches aquifères adjacentes.
- dW : Variation des réserves en eau de la nappe.

En tenant compte des données de la région d'étude et l'application des relations précédentes, le bilan hydrique peut être présenté sur le tableau (I.04) ci-après : [14]

Tableau (I.04) : Données des éléments du bilan hydrique [14]

Année	1998-1999		2003-2004	
	Entrées (m ³ /an)	Sorties (m ³ /an)	Entrées (m ³ /an)	Sorties (m ³ /an)
Ief	1820000		3710000	
Ird	14610515		18993669	
Iri	34815760		35181539	
Dif ^e	315360		505976	
Qh		7245980		9661550
Dif ^s		1608336		2365200
Et		43191540		44073000
dW	837650			2177890
Total (m ³ /an)	52399285	52045856	58390184	58277640

D'après les chiffres présentés, l'alimentation principale de la nappe phréatique de Ouargla provient des eaux de restitution de l'irrigation alors que les pertes d'eau sont dues essentiellement à l'évaporation et l'évapotranspiration.

I.16 MENACES DE LA NAPPE PHREATIQUE SUR LES CONSTRUCTIONS

Le fait que la ville de Ouargla repose sur une vaste cuvette qui est objet d'une nappe phréatique proche de la surface, la plus part des constructions sont sujets de l'altération des eaux souterraines de cette nappe phréatique et plus précisément par les éléments chimiques qui y sont dissouts.

I.16.1 Fluctuation du niveau de la nappe phréatique

L'affleurement du niveau de la nappe phréatique de Ouargla observé au cours de la période hivernale et qui disparaît lors de la période estivale témoigne de la variation du niveau de la nappe. Du fait de la variation diurne et nocturne des températures, l'évaporation, l'évapotranspiration avec l'existence du vent violent, le niveau piézométrique de la nappe phréatique subit des variations quotidiennes, mensuelles, et annuelles qui peuvent être schématisées par la figure (I.17) ci-après :

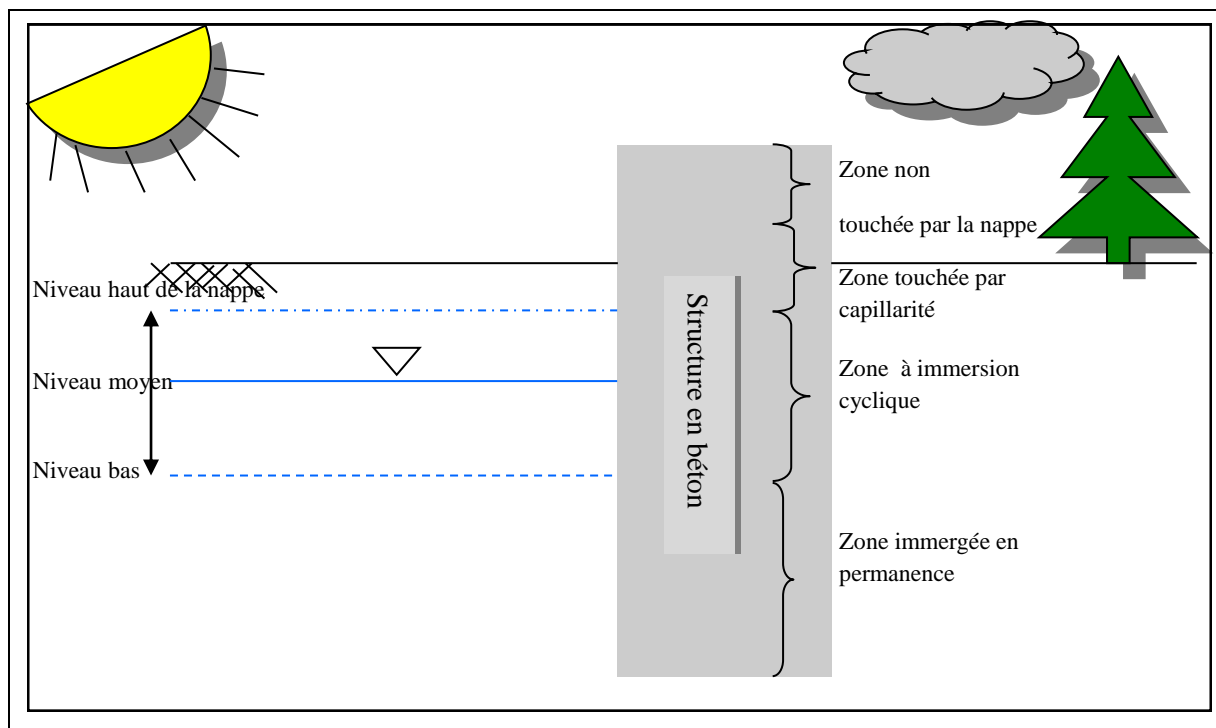


Figure (I.17) : Fluctuation du niveau de la nappe phréatique

La figure (I.17) montre une fondation en béton divisée altimétriquement, de haut en bas, en quatre zones : zone soumise au milieu atmosphérique (non touchée par la nappe), zone touchée par la nappe par capillarité, zone touchée par la nappe d'une manière cyclique (fluctuation du niveau statique de la nappe), et zone complètement immergée en permanence dans la nappe.

Dans une étude qui a été effectuée à l'université de Ouargla en 2010 [15], s'agissant du suivi expérimental de l'évolution de l'évaporation de la nappe phréatique de la région de Ouargla par la méthode directe en utilisant des lysimètres, les résultats ci-après ont été enregistrés:

A partir du rapport E_n/E_s (évaporation de la nappe en profondeur / évaporation de surface), l'étude a montré que l'évaporation de la nappe phréatique diminue avec la baisse du niveau d'eau de la nappe phréatique.

Dans la couche située entre 0 et 0,9 m, le rapport de l'évaporation de la nappe phréatique et l'évaporation à la surface E_n/E_s^* est égale à 1, ceci montre une évaporation directe comme si la couche de terre n'existe pas. Ce rapport diminue au fur et à mesure que le niveau de la nappe baisse.

Pour une profondeur de 1.5 m, le rapport E_n/E_s^* est de 19 %, donc l'évaporation de la nappe décroît de 81 % par rapport à l'évaporation à la surface E_s^* .

A 1.92 m de profondeur, le rapport E_n/E_s^* est de 10 %.

Au-delà de 2.5 m, l'évaporation de la nappe phréatique devient négligeable.

I.16.2 Agression Chimique de la nappe phréatique

La nappe phréatique de la région de Ouargla renferme un nombre important d'éléments chimiques dissouts dans les eaux de cette dernière et qui proviennent du sol ou des eaux usées chargées et infiltrées. Certains éléments sont néfastes au béton armé.

I.16.2.1 Concentration des ions dans la cuvette de Ouargla

Les travaux menés par MECHERI [16] et BELOUAEUR [8] relatifs aux concentrations des éléments chimiques dans la nappe phréatique de Ouargla, respectivement dans les tableaux (I.05), (I.06) et (I.07) montrent l'ordre de grandeur de ces concentrations

Tableau (I.05) : Variation des Concentrations des ions dans la cuvette de Ouargla[16]

Commune	Quartier	pH	Concentrations des ions en (mg/l)								
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻²	Zn ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Fe ⁺⁺
Ain-Beida	Ain-Beida	7.91	842	53.47	70.4	8.8	422	0	540	58	14
	Adjadja	7.5	601	658.2	85.6	7.2	3606	0	20560	114	15
Ouargla	Sidi-Aabderrahmane 1	8.51	1082	58.33	386.2	102.8	457	0	540	345	17
	Sidi-Abderrahmane 2	7.59	691	213.88	131.6	15.2	869	0	1140	403	15
	Université (pôle 1)	7.89	1202	89.92	103.2	74	673	0	2700	704	14
	Said-Othba 1	7.18	1242	349.99	62.8	6	367	0.2	340	58	12
	Said-Othba 2	7.31	1162	651.37	90.4	9.6	1251	0	6320	230	12
	Bouamer	7.86	1002	24.31	38	8.4	3385	0	42520	288	12
	Hai-Ennasr 1	7	481	289.22	126	17.6	3439	0	59620	411	16
	Hai-Ennasr 2	6.37	561	1589.54	145.6	124.8	714	5.2	1500	288	11
Rouissat	Sokra	7.37	1042	77.77	158.4	12.4	470	0	660	460	13
	Rouissat	7.98	641	77.77	32.8	3.4	745	0.2	940	0	11
N'Goussa	N'Goussa 1	7.42	681	133.67	49.6	7.8	396	0	520	352	14
	N'Goussa 2	7.21	842	594.29	180.8	22.8	2286	0	14677.5	587	13
	N'Goussa 3	7.6	882	170.13	23	4.4	1204	3.52	17440	921	5

Sur ce tableau des valeurs semblent très élevées que les valeurs pratiquées et usuelles, notamment celles relatives au taux de chlorure et dont la justification de cet excès est encore méconnue. Ces valeurs sont rapportées par plusieurs chercheurs qui ont travaillé sur les caractéristiques de la nappe phréatique de Ouargla, et dont la seule source d'information est l'ANRH Ouargla, l'efficacité des produits chimiques utilisés pour la détermination de ce taux peuvent être la cause principale des ces résultats d'analyses chimiques.

**Tableau (I.06) : Analyse physicochimique des eaux de la nappe phréatique en 2007
(BELOUAEUR A)[8]**

Paramètre	Ba-Mendil (Ouargla)	Saïd 1 (Ouargla)	Rouissat	Adjadja (Aïn Baïda)
PH	7,8	7,3	7,9	7,5
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	20 000	40 000	5 000	6 000
Température in situ $^{\circ}\text{C}$	18	18	18	23
Minéralisation totale mg/l	5 700	10 000	2 800	26 100
Calcium mg/l	1 202	1 162,3	641,28	601,2
Magnésium mg/l	89,9	651,37	77,7	658,2
Sodium + Potassium mg/l	177,2	100	36,2	92,8
Chlorures mg/l	2 700	6 320	940	20 560
Sulfates mg/l	673,4	1 250,5	744,7	3 606,3
Bicarbonates mg/l	703,84	230,2	0	114,4
TAC $^{\circ}\text{F}$	57,6	18,8	0	91,3
Fer mg/l	14,4	12,4	11,4	15,2
Zinc mg/l	TRC	TRC	0,2	TRC

**Tableau (I.07) : Analyse physicochimique des eaux de la nappe phréatique en 2007 Suite
(BELOUAEUR A)[8]**

Paramètre	N'Goussa 1	N'Goussa 2	N'Goussa 3
PH	7,4	7,6	7,2
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	6 700	8 400	6 700
Température in situ $^{\circ}\text{C}$	24	18	18
Minéralisation totale mg/l	2 300	20 800	19 300
Calcium mg/l	681,3	881,7	841,6
Magnésium mg/l	133,6	170,1	594,3
Sodium + Potassium mg/l	57,4	27,4	203,6
Chlorures mg/l	520	17 440	14 677,5
Sulfates mg/l	395,6	1 203,9	2 286,1
Bicarbonates mg/l	351,9	920,7	586,5
TAC $^{\circ}\text{F}$	28,8	75,4	48
Fer mg/l	14,2	4,8	12,6
Zinc mg/l	TRC	3,5	TRC

I.16.2.2 Taux de risque du pH sur le béton

Le potentiel d'hydrogène (pH) est un indice qui permet de mesurer l'activité de l'ion hydrogène dans une solution. Pour une solution donnée, le pH est neutre s'il est égale à 7, c'est un indicateur d'acidité s'il est inférieur à 7, ou d'alcalinité s'il est supérieur à 7.

Les valeurs du pH qui sont présentées sur les tableaux (I.05), (I.06) et (I.07) montrent que la variation du potentiel d'hydrogène (pH) dans la cuvette de Ouargla, comparativement aux normes pratiquées par le CTC, ne présente aucun danger si celle-ci est supérieure à 6.5, et étant donné que les valeurs du pH dans l'ensemble des endroits est supérieure à cette limite aucun danger n'est à craindre.

I.16.2.3 Taux de risque du Chlorure sur le béton

Les ions de chlore dans les eaux de la cuvette présentent des concentrations assez élevées celles-ci ne doivent pas dépasser 2.5% du poids du ciment soit une concentration de 8750 mg/l [17], cette limite est largement dépassée en plusieurs endroits de la nappe de Ouargla d'après les valeurs présentées sur les tableaux (I.05), (I.06) et (I.07). L'attaque des ions de chlorure est à craindre même dans les endroits où la concentration est inférieure à la dite limite car la concentration peut s'élever dans le temps.

I.16.2.4 Taux de risque du Dioxyde de Carbone sur le béton

Conformément à la norme française P18-011, le dioxyde de carbone dans la nappe de Ouargla d'après les concentrations présentées sur les tableaux (I.05), (I.06) et (I.07), présente un fort risque sur le béton implanté dans cette zone étant donné que les concentrations dépassent le seuil de 100 mg/l limité par le CTC à l'exception de la zone de Rouissat qui ne présente que des traces.

I.16.2.5 Taux de risque du Sulfate sur le béton

Conformément à la norme française P18-011, la concentration en sulfate dans la nappe de Ouargla d'après les valeurs présentées sur les tableaux (I.05), (I.06) et (I.07), montre que la

cuvette présente des degrés de menaces variables, des zones à agressivités fortes (Adjadja, Bouameur et Haie Ennasr I) et des endroits à agressivité modérée exemple de Said-Othba I, Haie Ennasr I, Université pôle 1, Rouissat et N'Goussa, alors que les autres lieux sont d'une agressivité faible. Sachant que les limites des sulfates par la norme française P18-011 stipule que pour une concentration variant de 250 à 600 mg/l soit le degré s'agressivité A1 qui ne présente aucun risque et ne nécessite aucune protection au préalable quant aux sulfates, alors que pour une concentration variant de 600 à 1500 mg/l soit le degré s'agressivité A2 qui présente menace moyennement agressive, et pour une concentration variant de 1500 à 6000 mg/l soit le degré s'agressivité A3 qui présente un risque fortement agressif et nécessite une protection particulière alors qu'au-delà de cette concentration > 6000 mg/l soit le degré d'agressivité A4 qui nécessite des mesures de protection d'ordre 3 selon la norme, entre autres, la peinture ou l'imprégnation du béton.

I.16.2.5 Taux de risque du Magnésium sur le béton

Conformément à la norme française P18-011, la concentration en magnésium dans la nappe de Ouargla d'après les concentrations présentées sur les tableaux (I.05), (I.06) et (I.07), montre un seul endroit où l'agressivité est forte s'agissant du quartier Haie Ennasr I, les quartiers de moyenne agressivité sont : Adjadja, Said-Othba I, et N'Goussa I, les quartiers d'agressivité faible sont : Sidi-Abderrahmane I, Haie Ennasr I et N'Goussa I, alors que le reste des endroits ne présentent pratiquement aucun risque.

I.17 Conclusion de la Partie B DU CHAPITRE I

La nappe phréatique de Ouargla est caractérisée par un régime d'écoulement globale du Sud-ouest au Nord-est, le sol et le relief de l'aquifère ne permettent pas un drainage rapide des eaux de la nappe, la qualité du sol et de l'eau de celle-ci sont assez variables agressives sur les constructions en béton notamment en les comparants aux exigences et normes pratiquées par les services technique du CTC surtout en certains endroits de la ville.

La remontée de la nappe est due essentiellement à l'excès d'eaux venant des eaux usées et celles de l'irrigation alors que le rabattement est dû à l'évaporation accentuée par la présence des vents et de la température élevée.

La fluctuation du niveau de la nappe montre que les fondations des constructions soient les ouvrages enterrés en générale sont menacés par la présence de la nappe en trois formes : régime permanent, régime cyclique et par capillarité.

PARTIE C DU CHAPITRE I : SABLE DE DUNE EN TANT QUE MATERIAU LOCAL DANS LE BETON

I.18 INTRODUCTION

La région de Ouargla est connue par ses dunes de sable ce dernier se trouve en abondance et d'une quantité pratiquement intarissable, son utilisation tant qu'ajout au béton dans ces dernières années a fait l'intérêt de plusieurs chercheurs pour le valoriser tant qu'ajout minéral en plusieurs formes (brute, broyé ou finement broyé) [18].

Le sable provient de la destruction de roches préexistantes, il est transporté par les eaux ou le vent pour finir par se déposer, c'est une roche détritique sédimentaire constituée de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0.064 et 5 mm (NA 452), Le sable peut être identifié par la granulométrie, comme il peut être classifié en deux types :

a- Sable naturel obtenu par altération atmosphérique [19], de formes sphériques plus rondes. Les sables naturels proviennent de différentes origines à savoir :

- Sables de l'oued ou fluviale, où les eaux qui circulent à la surface du sol arrachent des débris de roches, de plus elles séparent les gros blocs, les isolent. Ces blocs vont être fragmentés en galets, puis en graviers et enfin en sables. Dès que la vitesse de l'eau entrant diminue, les éléments se déposent s'abord le plus lourds et ensuite le plus fins.
- Sable marin, où les grains entraînés jusqu'à la mer par les oueds se mélangent avec ceux provenant de la destruction des falaises et qui seront projetés sur les rivages par les vagues pour former le sable de plage ou se déposer en couches sur les fonds marins à ce propos les sables marins sont arrondis et luisants car ils sont transportés par les fleuves et les courants hydriques.
- Sable éolien ou saharien, où les grains de sables proviennent de la désagrégation des roches riches en quartz et qui affleurent dans le désert. Les débris en quartz qui s'entrechoquent lors de leur transport par le vent sont mats et ronds et finissent par la formation de dunes de sable lorsque le vent se calme.

b- Sable concassé obtenu par broyage mécanique des roches, composé de grains aux aspérités marquées.

I.19 PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES SABLES

Généralement les sables ont les caractéristiques ci-après :

- La densité massique du sable sec varie selon sa granulométrie et sa composition de 1.7 à 1.9 kg par litre.
- La capacité à s'écouler, plus les grains sont ronds 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.
- Le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de la nature de la roche mère.
- Le sable est composé de différents minéraux tels que la silice, les silicates, les carbonates et autres [18].

I.19.1 Méthode de caractérisation physico-chimique de sable

Pour la caractérisation du sable, on utilise généralement l'analyse granulométrique, l'observation microscopique optique ou électronique à balayage et l'analyse chimique par spectromètre de rayon X [20].

I.19.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une simple opération de répartition de granulats en fractions ayant la 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 0.08 mm à 80 mm. Le tableau (I.08) indique le classement normalisé des granulats en fonction de leur taille [21].

Tableau (I.08) : Classement normalisé des granulats [21]

Granulats		Ecartement des mailles des tamis	Diamètre des trous des passoires (mm)
Fines		< 0.08	
Sables	Fins	0.08 à 0.315	
	Moyens	0.315 à 1.25	
	Gros	1.25 à 5	
Graviers	Fins		6.3 à 10
	Moyens		10 à 16
	Gros		16 à 25
Cailloux	Petits		25 à 40
	Moyens		40 à 63
	Gros		63 à 80
Moellons			> 80

En pratique, il existe différents indices qui permettent de décrire et commenter les résultats d'une analyse granulométrique [18] :

- Le quartile 1 (Q1) qui est la valeur du diamètre à 25% de la courbe.
- La médiane (Q2) qui est la valeur du diamètre à 50% de la courbe.
- Le quartile 3 (Q3) qui est la valeur du diamètre à 75 % de la courbe.
- Indice de classement S_0 donné par la formule (I.4) qui permet d'apprécier le degré de classement d'un sédiment par rapport à la taille des grains, tel que :

$$S_0 = \sqrt{\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)}. \dots\dots\dots (I.4)$$

A partir de cet indice, les sédiments peuvent être classés comme indiqués dans le tableau (I.09) ci-après :

Tableau (I.09): Classement d'un sédiment selon Intes et al., rapporté par A.TAFRAOUI 1987 [18]

S_0	Degré de classement
$S_0 < 0.5$	Extrêmement bien classé
$0.5 < S_0 < 1$	Très bien classé
$1 < S_0 < 2.5$	Bien classé
$2.5 < S_0 < 3$	Normalement classé
$3 < S_0 < 4$	Faiblement classé
$4 < S_0$	Très mal classé

- L'indice d'asymétrie S_k se calcule par la formule (I.5) :

$$S_k = \frac{Q1XQ3}{(Q2)^2} \dots\dots\dots (I.5)$$

Selon la valeur de S_k , on définit trois classes comme le montre le tableau (I.10) ci-après:

Tableau (I.10) : Classement d'un sédiment à partir de l'indice d'asymétrie [18]

Valeur de l'indice S_k	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:** Le module de finesse est un paramètre calculé à partir de l'analyse granulométrique, comme étant 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 (NA 2607) [21]. Soit par la relation (I.6) suivante :

$$M_f = \frac{\sum R_c}{100} \dots\dots\dots (I.6)$$

Avec R_c : refus cumulé, les résultats obtenus de M_f peuvent être interprétés comme suit :

$$1 \leq M_f < 1.5 \quad : \quad \text{sable très fin.}$$

$1.5 \leq M_f < 2$: sable fin.

$2 \leq M_f < 2.5$: sable moyen.

$M_f \geq 2.5$: gros sable.

I.19.3 Observation microscopique

L'observation microscopique permet de déterminer à l'aide d'un microscope optique ou électronique, et leurs caractéristiques géométriques.

I.19.4 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 est de 3 ppm à 100 % (10^6 ppm). Elle étudie les processus de 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.

Une fois préparé, l'échantillon à analyser est irradié par un faisceau de rayons X primaires. L'analyse des rayons X secondaires 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 [20].

I.20 SABLE DE DUNE

Le sable de dunes – plus fin que le sable de construction - est considéré comme un sédiment détritique meuble, transporté par le vent, il s'accumule dans les vastes cuvettes, dont la taille est comprise entre $64\mu\text{m}$ et 2 mm selon [Pettijohn, 1987], et entre $20\mu\text{m}$ et 2mm selon [Folk et al, 1957] [18].

Les dunes se présentent en trois formes :

- La barkhane qui est une dune en forme de croissant à convexité au vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels comme montré sur la figure (I.18) ci-après :

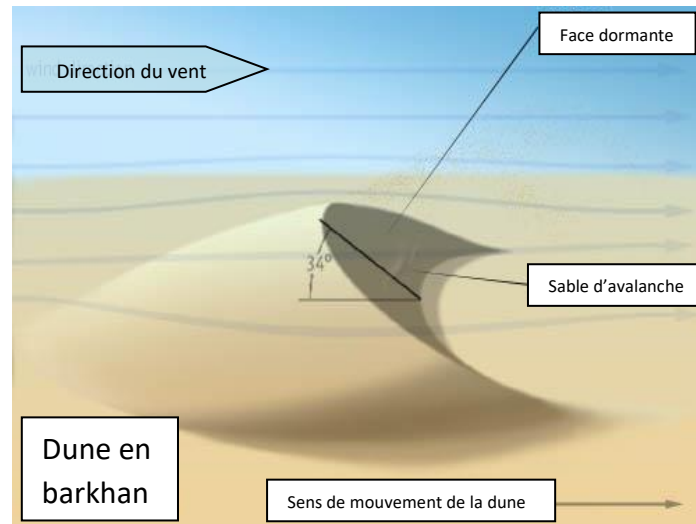


Figure (I.18): Schéma de dune de sable en barkhan [22]

- La dune parabolique qui 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 qui sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité.
- Le sable de dune est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et autres ...etc. [19].

I.21 SILICE

I.21.1 Introduction

La silice représente la plus grande partie du sable de dune de la région. La silice est le nom d'une famille de silicates minéraux composés de silicium et d'oxygène (SiO_2), qui sont les deux éléments les plus abondants de la croûte terrestre, la silice se trouve en deux formes, cristallines ou amorphes suite à sa genèse par précipitation ou par fossilisation [19].

I.21.2 Fumée de silice

I.21.2.1 Introduction

La fumée de silice est un sous produit des usines de fabrication d'alliages de silicium (Si) et de ferro-silicium, obtenu du four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon. Le SiO entraîné 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 (I.19) et figure (I.20), 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 brûlés 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 m^2/kg donnée par la méthode d'adsorption d'azote [23].

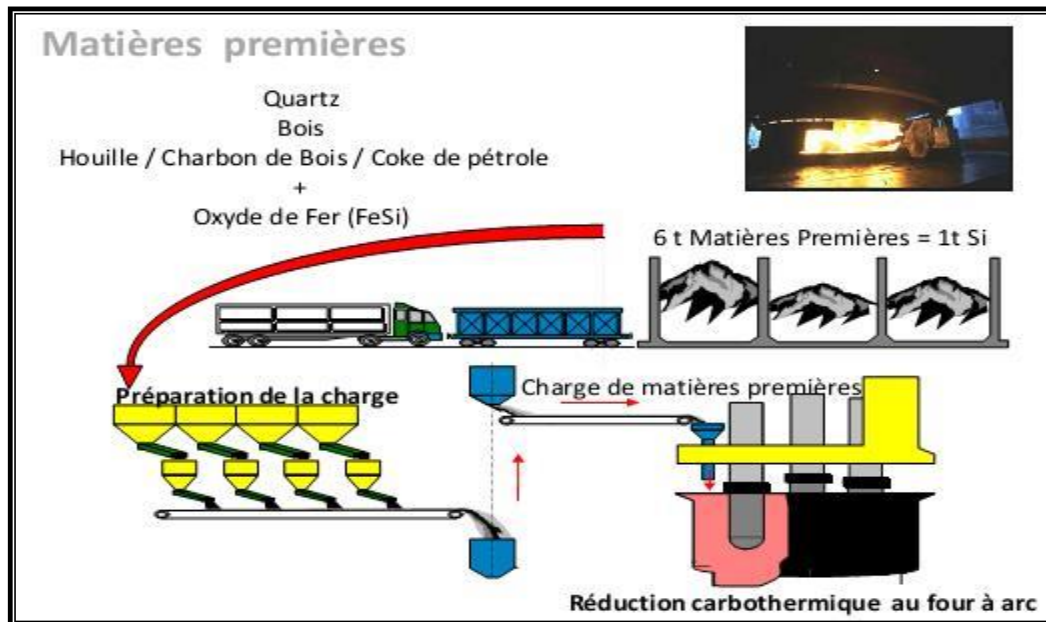


Figure (I.19) : Processus et matières premières entrant dans la fabrication de la fumée de silice [24]

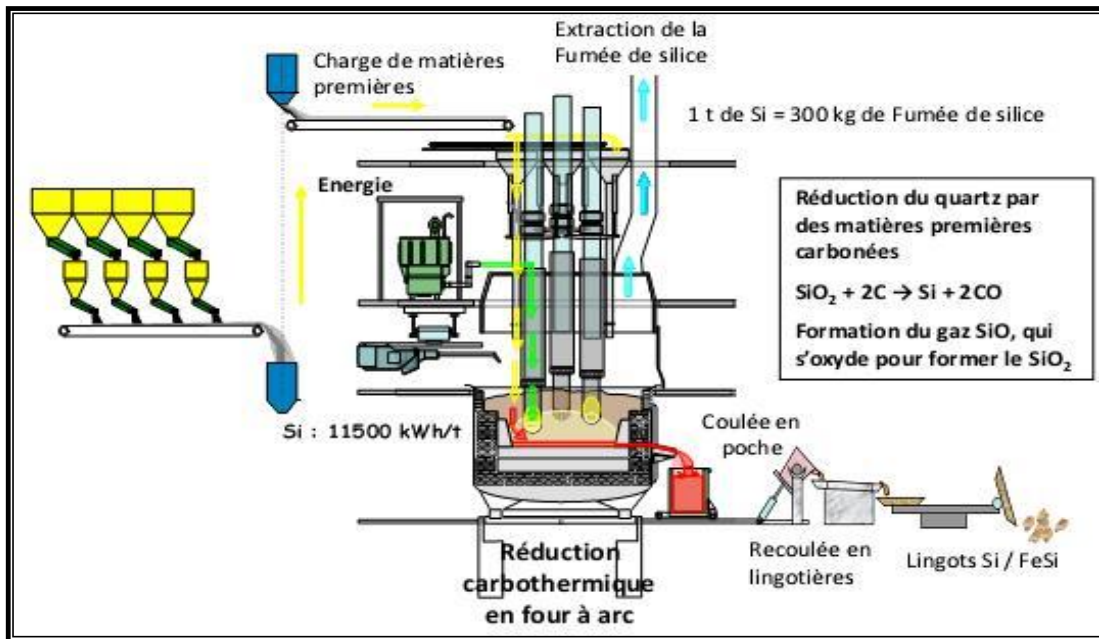


Figure (I.20) : Formation de la fumée de silice dans le four [24]

I.21.2.2 Morphologie de la fumée de silice

La fumée de silice se présente en trois types, non densifiée, densifiée mécanique, densifiée pneumatique et chacune a son propre caractère, voir figure (I.21) ;

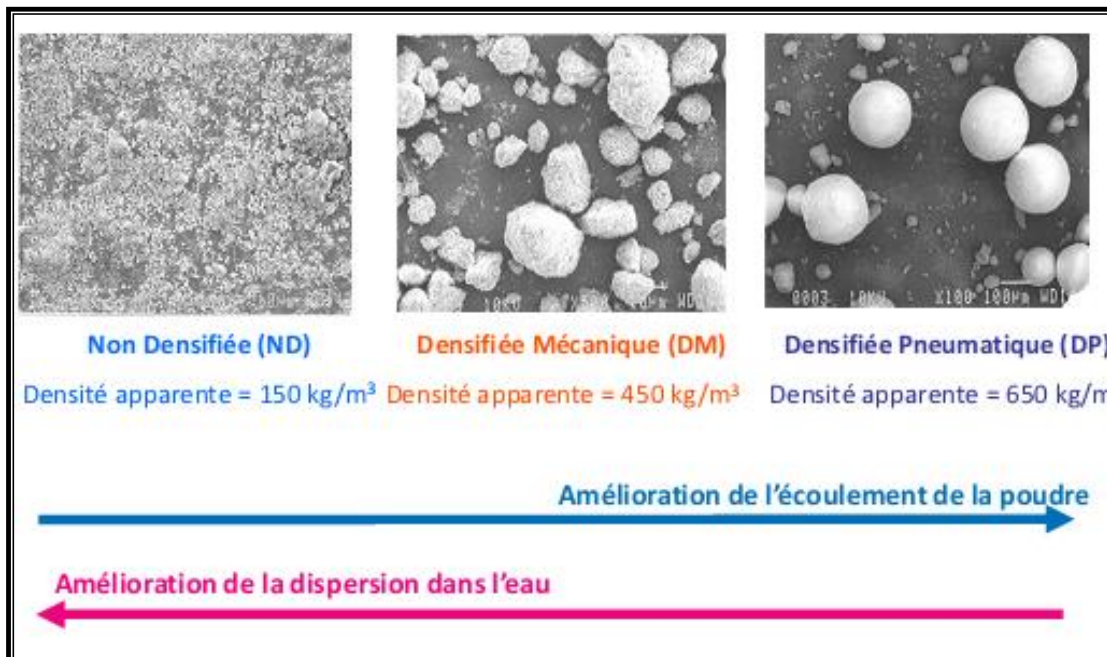


Figure (I.21) : Morphologie de la fumée de silice [24]

I.21.2.3 Effet de la fumée de silice sur le béton

- Effet de l'ajout de la fumée de silice sur le béton frais

L'ajout de fumée de silice au-delà de 5% de poids du ciment augmente la quantité d'eau nécessaire à l'ouvrabilité exigée, de cette raison, le béton à base de fumée de silice nécessite un réducteur d'eau comme adjuvant. La fumée de silice réduit le temps de prise et augmente le taux de retrait plastique. A ce propos le béton à base de ciment ayant la fumée de silice comme ajout nécessite une attention particulière quant à la cure à jeune âge [25].

- Effet de l'ajout de la fumée de silice sur le béton durci

L'ajout de la fumée de silice permet au béton une texture microscopique plus homogène par la réduction des pores, la perméabilité et la porosité capillaire sont assez réduites par l'ajout de la fumée de silice.

Le module d'élasticité du béton n'est pas affecté par l'ajout de la fumée de silice au ciment, également le comportement vis-à-vis de la contrainte-déformation. Pour ce qui est du fluage, le béton à base de fumée de silice montre un fluage moins élevé que celui d'un béton à base de ciment portland sans fumée de silice ayant le même ordre de résistance mécanique.

L'ajout de la fumée de silice améliore la résistance à la compression du béton d'une façon claire de 3 à 28 jours d'âge alors qu'au-delà de cet âge elle devient minime.

En termes de durabilité, l'ajout de la fumée de silice au ciment de béton augmente sa résistance aux agressions chimiques. L'addition de la fumée de silice jusqu'à 20% en poids de ciment réduit considérablement le taux de diffusion des ions chlorides dans le béton comparativement à un béton au ciment portland ayant le même rapport E/C [25].

Les travaux menés par BELOUADAH M. [26], montrent l'effet de l'ajout de la fumée de silice quant à la réduction de la porosité par la figure (I.22), l'augmentation de la résistance à la compression par la figure (I.23) et la diminution de la perméabilité par la figure (I.24).

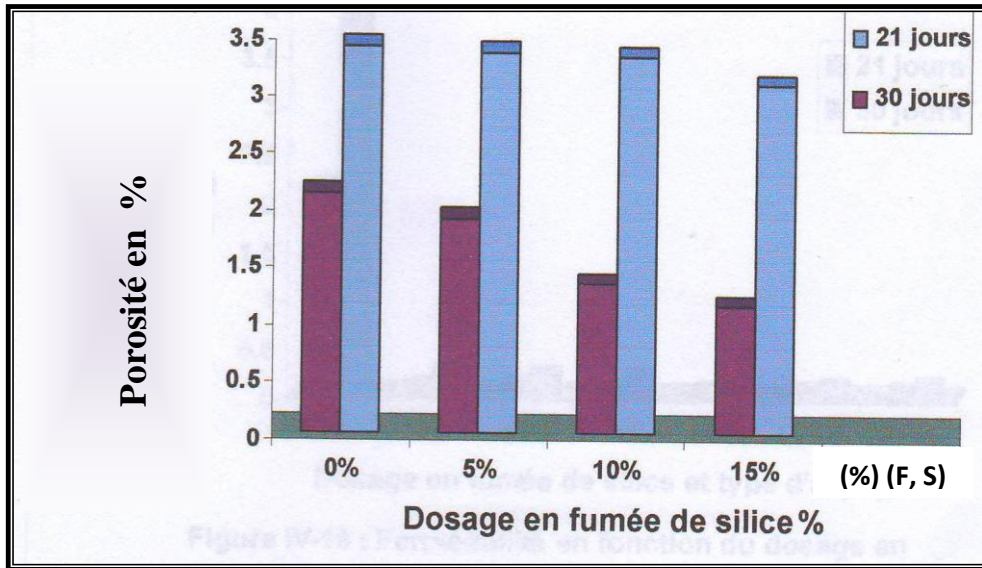


Figure (I.22) : Porosité en fonction du dosage en fumée de silice [26]

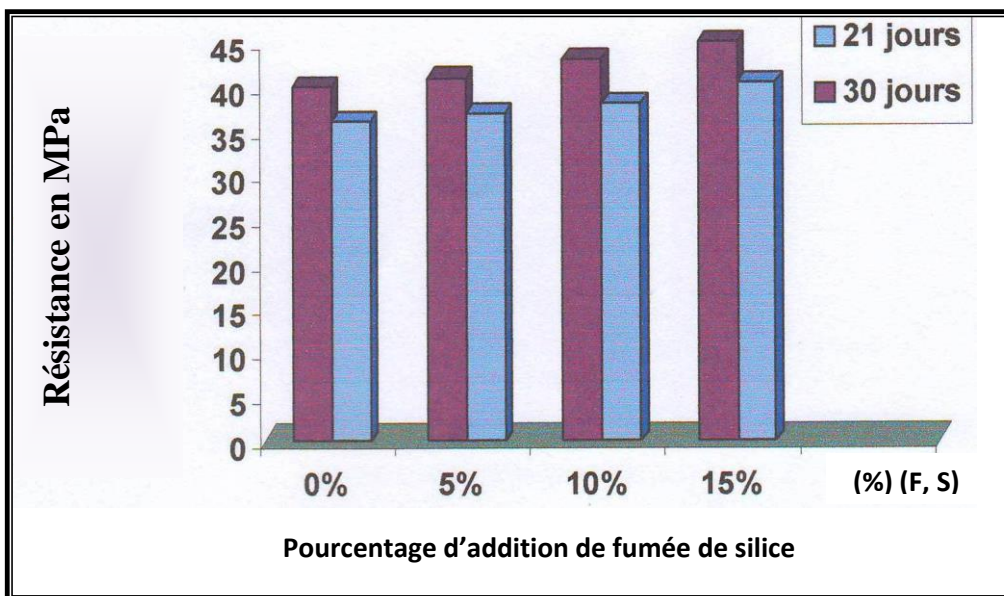


Figure (I.23) : Résistance à la compression en fonction du dosage en fumée de silice [26]

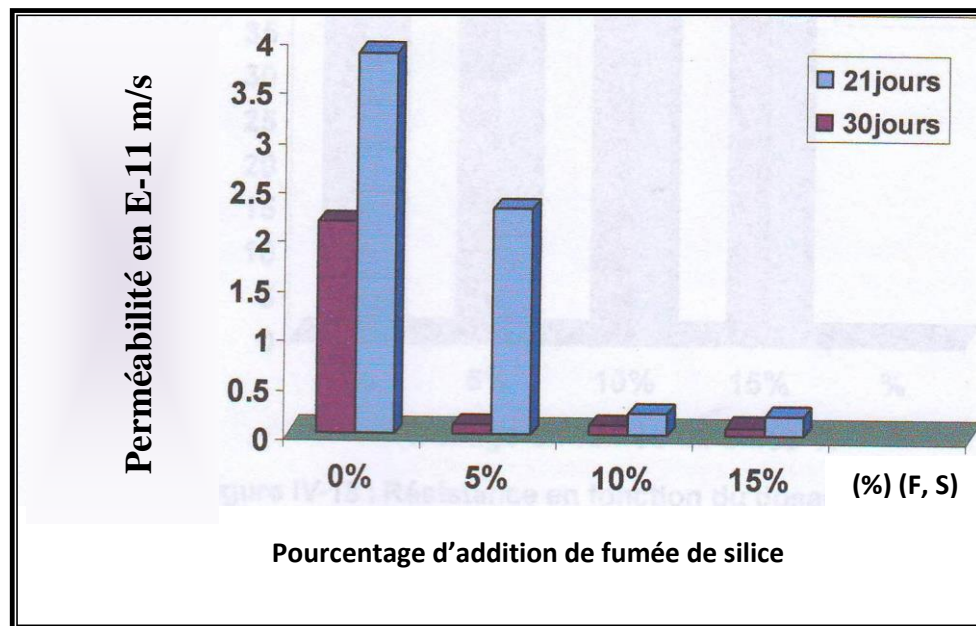


Figure (I.24) : Perméabilité en fonction du dosage en fumée de silice [26]

I.22 SABLE DE DUNE BROYE

I.22.1 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 ($\text{SiO}_2 > 98\%$) 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 [18].

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 a 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.

I.22.2 Broyage

I.22.2.1 Définition

Le broyage est un procédé ayant pour but de réduire les dimensions des grains et de les rendre en poudre, la matière sera plus réactive d'autant la surface spécifique est élevée.

I.22.2.2 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 initialement à la surface des grains et que la vitesse d'hydratation dépend de la finesse du ciment. Plus la finesse du ciment est élevée plus le développement de résistance est rapide, et la maniabilité du béton frais est légèrement augmentée.

Par ailleurs :

- Plus le ciment est fin, plus il se détériore rapidement lorsqu'il est exposé à l'air ambiant.
- L'augmentation de finesse accroît 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 $4\mu\text{m}$ 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 30 μm sont riches en C3S. AITCIN et COLL [18].

I.22.2.3 Modes de broyage

Il existe plusieurs modes de broyage comme montré sur la figure (I.25) à savoir :

- **Le mode de broyage par percussion** : ce mode de broyage permet de produire une distribution granulométrique monomodale.
- **Le mode de broyage par écrasement** : les grains sont soumis à des forces normales.
- **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 particules fines due à l'érosion progressive de la surface des grains, dans ce cas la poudre obtenue par ce mode présente une distribution de grains bimodales, car elle contient des grains dont la taille est proche de celle des grains initiaux, ainsi que des grains très fins.

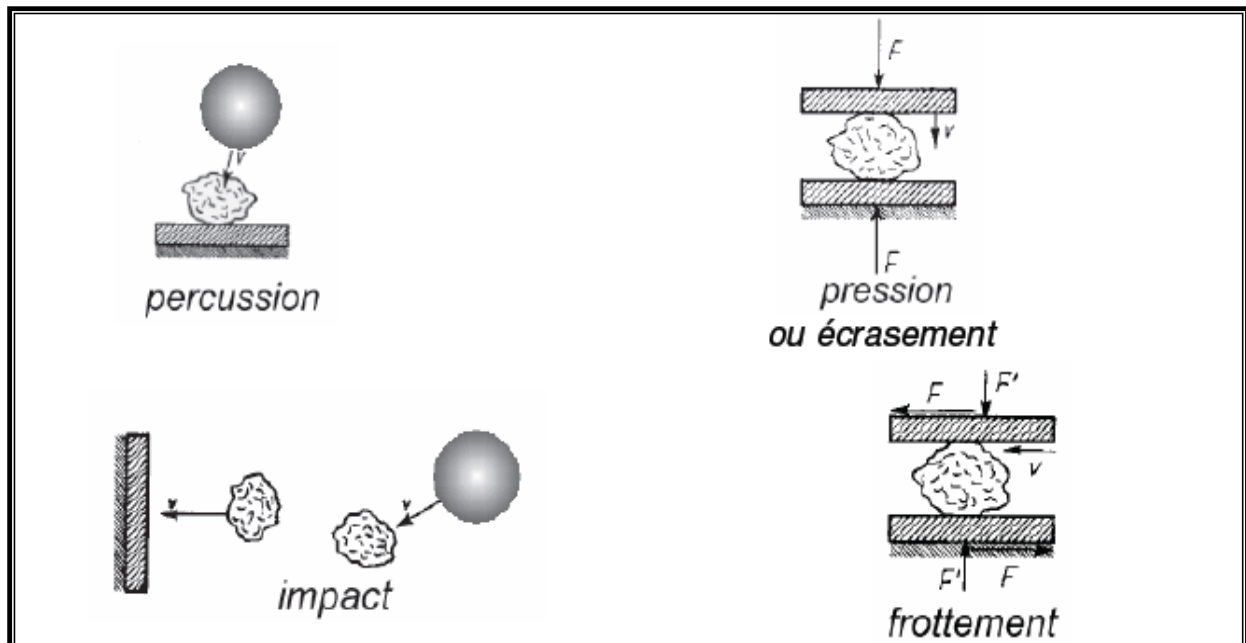


Figure (I.25): Modes de broyage [27]

I.22.2.4 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 comme présenté sur la figure (I.26) :

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).

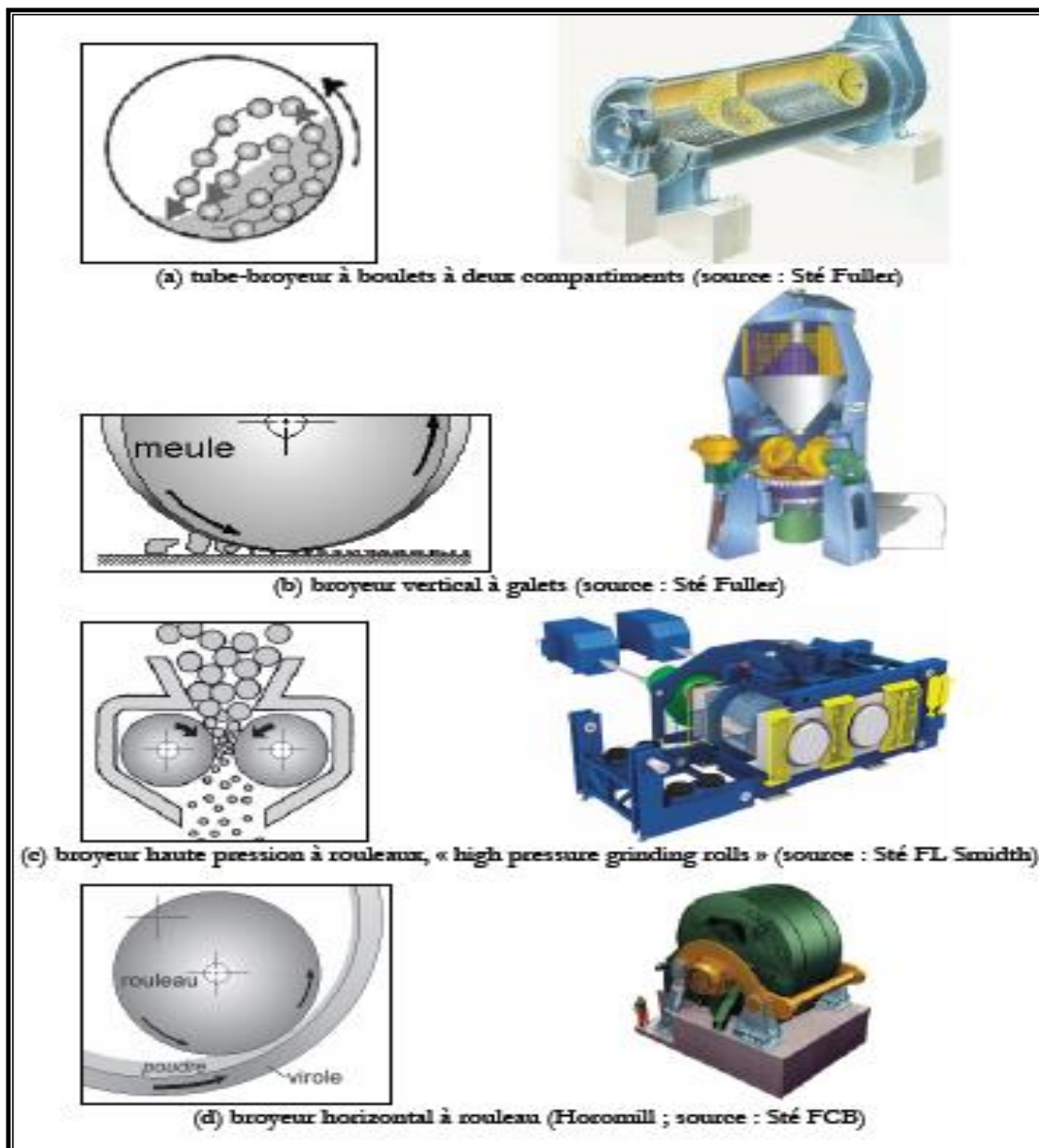


Figure (I.26) : Systèmes utilisés dans le broyage [27]

I.22.3 Propriétés physiques et mécaniques du béton avec sable broyé

I.22.3.1 Propriétés physiques du béton avec sable broyé

Pour obtenir 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 600m²/kg, permet d'augmenter la résistance de 7 à 17 % par comparaison à une silice ayant une finesse de 200 m²/kg [28].
- Le ciment et la silice doivent être bien mélangés avant d'être introduit dans le malaxeur
- A. Bouchouika et M. N. Oudjit [29] trouvent que la présence de sable de dune broyé de BOUSSAADA de finesse 5000 cm²/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 inférieure à celle du témoin et du béton à base de 15 % de sable broyé, voir tableau (I.11)

Tableau (I.11) : Effet de sable broyé de BOUSSAADA sur les propriétés physiques du béton [29]

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

I.22.3.2 Propriétés mécaniques du béton avec sable broyé

Les travaux menés par A. Bouchouika et M. N. Oudjit [29] ont montré que la substitution au ciment de 10 % de sable de dune broyé donne des résistances comparables à celles du témoin (sans ajout) à 7 jours d'âge, et qu'à 28 jours les résistances sont supérieures traduisant, outre le rôle de remplissage, la réactivité pouzzolanique des sables de dune 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 (I.12).

Tableau (I.12) : Influence de sable de dunes broyé (SDB) sur les propriétés mécaniques des bétons (E/C=0.28) [29]

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

Encore, l'étude de l'influence de l'addition de sable broyé de dunes de Biskra sur les bétons faite par S.Chabi, B.Mezghiche, L.Zeghich [30] a montré que l'addition de sable de dunes broyé influe sur la résistance à la compression du béton comme indiqué à la figure (I.27).

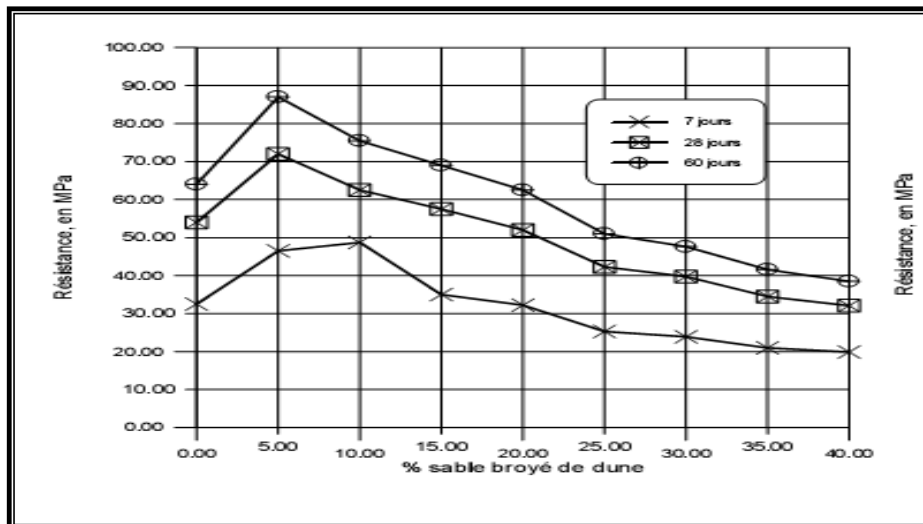


Figure (I.27) : Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction du temps et du pourcentage en sable de dunes broyé avec E/C=0.3 [30]

I.22.4 Relation entre la finesse et l'activité

L'étude faite par BENIA MOUNIR [31] montre qu'il y a une relation entre la finesse de mouture et la résistance mécanique du mortier soit l'activité représentée par les figures (I.28), figure (I.29) et figure (I.30).

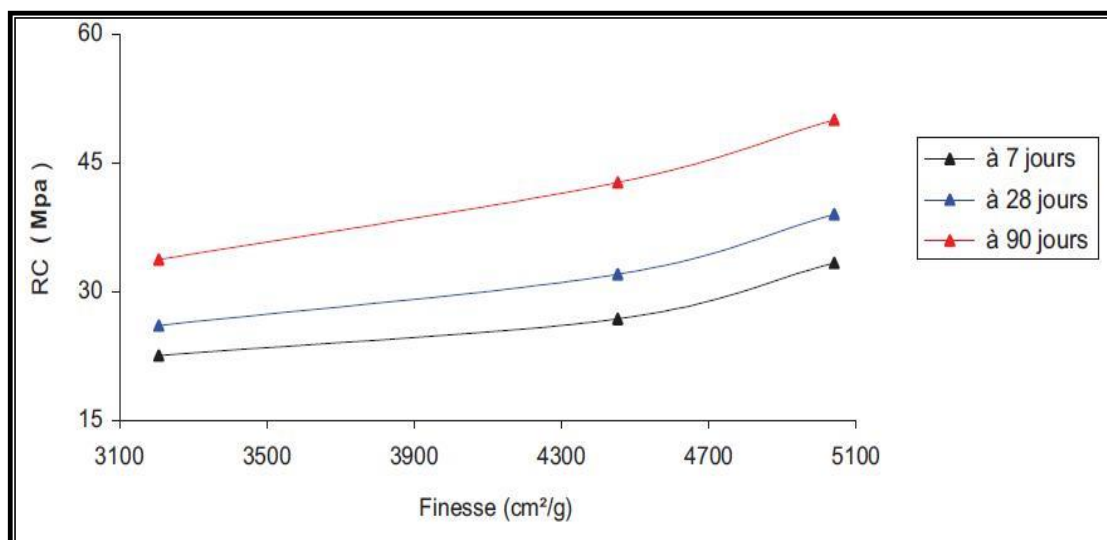


Figure (I.28) : Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Elghozlane [31]

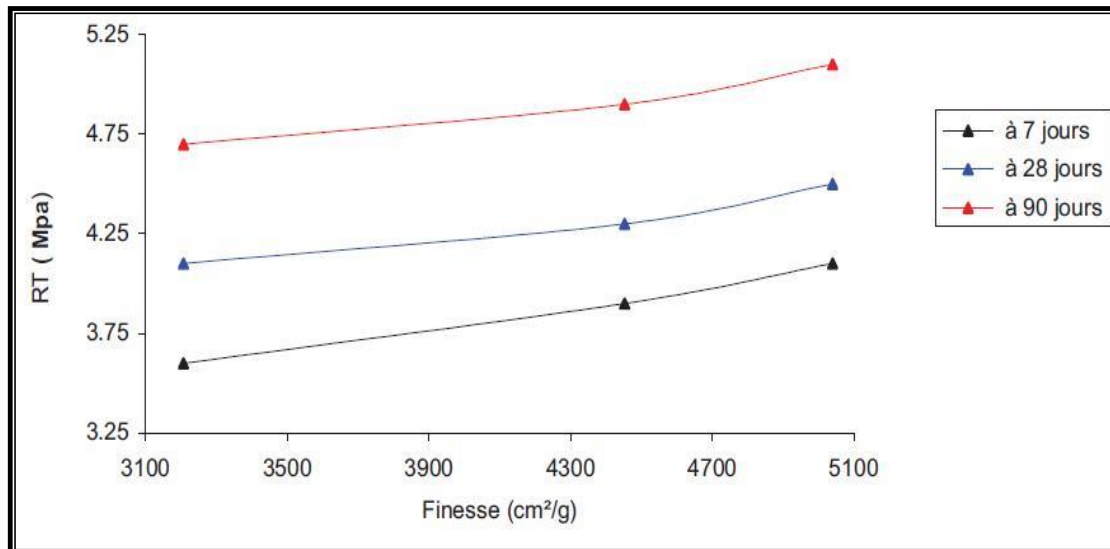


Figure (I.29) : Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Elghozlane [31]

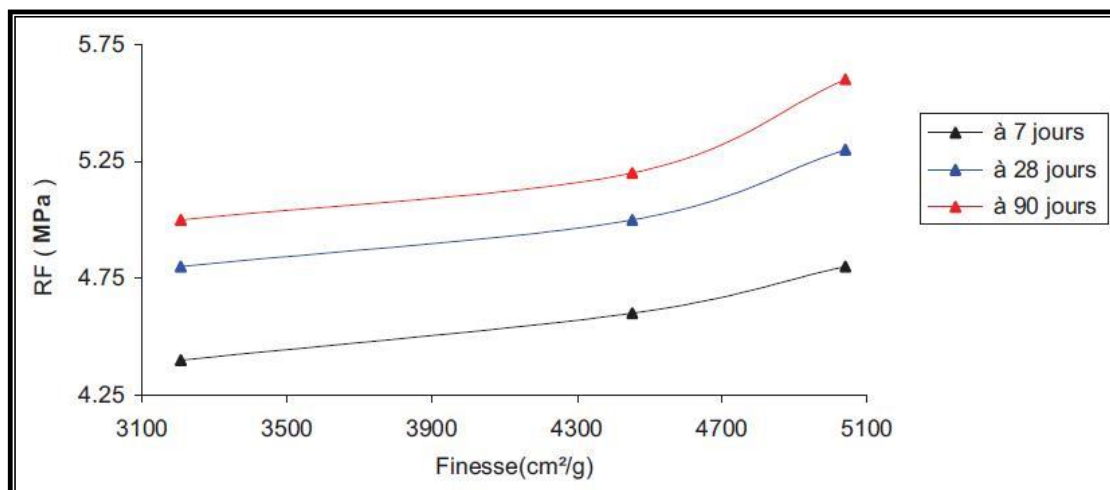


Figure (I.30) : Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ de Sour-Elghozlane [31]

I.23 CONCLUSION DE LA PARTIE C DU CHAPITRE I

Le sable de dunes ce matériau local qui se trouve en abondance dans la région de Ouargla et qui contient une bonne partie de silice peut être valorisé dans le mortier ou le béton comme ajout que ce soit à l'état broyé ou finement broyé.

Etant donné que la fumée de silice est à la base de plusieurs ciments résistant aux sulfates contribue positivement sur les performances du béton, le sable de dune qui est à la base de silice peut jouer un rôle essentiel en tant qu'ajout au ciment s'il est bien moulu et employé.

La finesse de mouture est un facteur très important qui influe positivement sur les performances du béton à base de sable de dune broyé. Les méthodes et moyens de broyage, à ce propos, doivent être pris en considération et améliorés afin de pousser la finesse de mouture à ses valeurs ultimes.

Les travaux antérieurs cités au dessus notamment ceux réalisés sur le béton et mortier à base de matériaux locaux en Algérie, ont montré que l'ajout de sable de dune broyé au béton améliore ses performances.

CHAPITRE II

**DURABILITE DU BETON DANS LES
MILIEUX CHIMIQUEMENT AGRESSIFS**

CHAPITRE II: DURABILITE DU BETON DANS LES MILIEUX CHIMIQUEMENT AGRESSIFS

II.1 INTRODUCTION

Le comportement du béton exposé aux environnements agressifs, dépend de plusieurs facteurs à savoir : les propriétés des constituants du béton (eau, ciment, sable, gravier), la technique de mise en œuvre, les conditions climatiques et la nature des agents agressifs minérale soit-elle ou biologique.

II.2 NOTION DE DURABILITE

La durabilité du béton des ouvrages en génie civil est définie comme étant la capacité du béton de remplir les conditions dont il a été conçu et de résister pour une longue durée de vie sous l'effet des agents extérieurs soient des charges d'exploitations, dynamiques et autres; ou sous l'effet des milieux plus ou moins agressifs, tels que les eaux agressives (eaux de la nappe, eaux de mer, eaux usées...etc.) [32].

On peut admettre que le béton est d'autant plus durable que la pénétration des agents agressifs dans les réseaux poreux du béton est assez difficile, sa durabilité dépend de deux grandeurs physiques à savoir : la perméabilité et la diffusivité.

La perméabilité décrit un écoulement qui se produit sous gradient de pression, mais la diffusion c'est un transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration, donc la perméabilité dans les matériaux poreux dépend par la taille des pores, alors que la diffusivité, elle ne dépend que de l'interconnexion des réseaux poreux [33].

II.3 MORPHOLOGIE DE LA MICROSTRUCTURE DU BETON

II.3.1 Hydratation du ciment

Le ciment, en tant que liant hydraulique, n'est que le résultat du broyage du clinker après refroidissement et de l'ajout d'une quantité de gypse d'environ 5% comme régulateur de prise. Le produit de départ est le mélange des carbonates de calcium ou le calcaire (80%) et

l'argile (20%), cuit au four rotatif et sous l'effet de haute température (jusqu'à 1450 °C) où le clinker est obtenu.

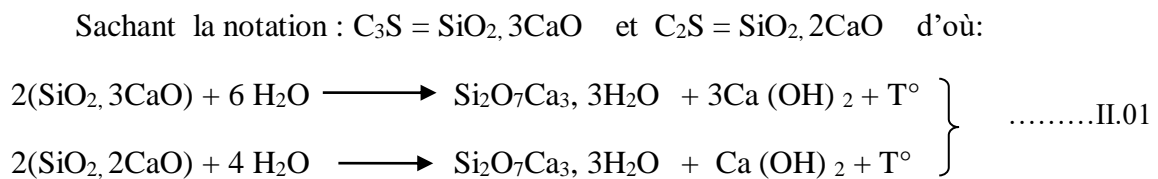
Les constituants principaux du clinker, qui représente à lui seul plus de 90% du ciment portland, sont les suivants [34]:

- ✓ Silicate tricalcique C₃S ou (3CaO, SiO₂).
- ✓ Silicate bicalcique C₂S ou (2CaO, SiO₂).
- ✓ Aluminate tricalcique C₃A ou (3CaO, Al₂O₃)
- ✓ Alumino-ferrite tétra-calcique C₄AF ou (4CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃).
- ✓ Autres tels que les laitiers, les cendres, les pouzzolanes et les fillers qui sont ajoutés au ciment de clinker en tant qu'ajout pour lui offrir d'autres caractéristiques.

La pate de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment, c'est un processus complexe où les principaux composés du ciment réagissent pour former des nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps comme montré sur la figure (II.01).

La cinétique d'hydratation du C₂S est beaucoup plus lente que celle du C₃S, ces derniers sont totalement hydratés pour augmenter la résistance mécanique du béton à court terme, l'hydratation plus lente du C₂S conduit après 28 jours à l'amélioration de la résistance à long terme [34].

L'hydratation du C₃S et du C₂S se fait selon l'équation chimique (II.01) suivante :



L'hydratation des aluminates tricalcique C₃A est très rapide, et les produits finaux de cette réaction sont les suflo-aluminates dont la forme la plus connue est l'ettringite (3CaO. Al₂O₃. CaSO₄. 31H₂O), la prise est d'autant très courte que le ciment est riche en C₃A.

La réaction de l'Alumino-ferrite tétra-calcique C₄AF dégage peu de chaleur, et participe peu au développement de la résistance [35].

Les produits finaux d'hydratation sont :

- ✓ Les silicates de calcium hydraté (C-S-H) qui jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide, ils représentent de 25% à 40% du volume du béton.
- ✓ La portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] et les sulfo-aluminates ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$).
- ✓ Des grains de ciment non-hydratés.
- ✓ Des espaces capillaires.

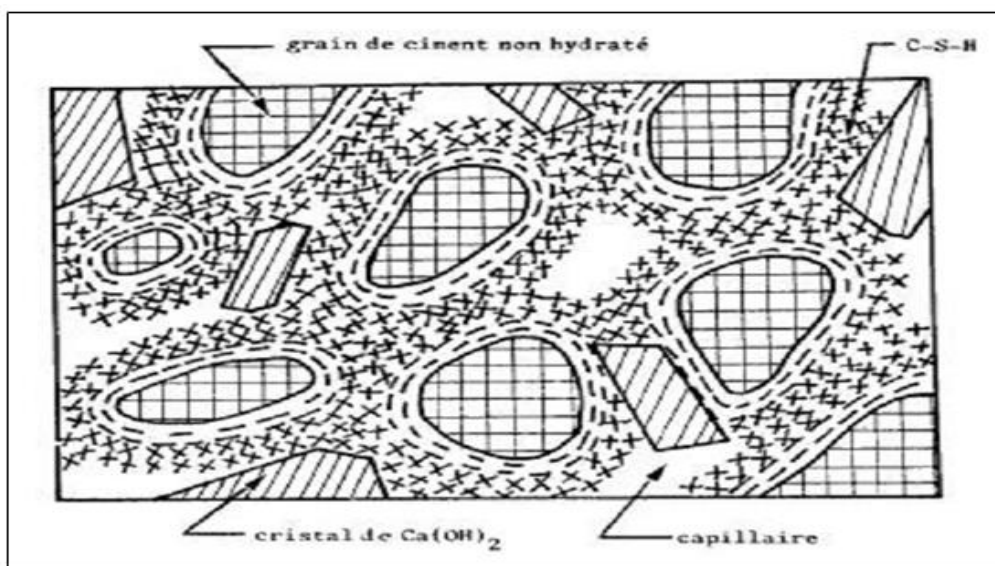


Figure (II.01): Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [Pigeon 1981]
[35]

II.3.2 Nature de l'eau dans le béton

L'existence de l'eau dans le béton n'est pas une phase singulière et homogène, mais elle se présente sous plusieurs états dans la matrice cimentaire hydratée, la méthode de classification de Sierra (1982) [35], à titre d'exemple, consiste à diviser l'eau en deux parties : l'eau évaporable et l'eau non évaporable (Harmathy, 1965) [35], comme montré sur la figure (II.02).

L'eau non évaporable comprend :

- ✓ **L'eau adsorbée la plus liée:** qui correspond à l'eau fixée entre les feuillets des particules de gel C-S-H.
- ✓ **L'eau chimiquement liée :** qui est consommée au cours des réactions d'hydratation du ciment, et aussi elle est combinée avec d'autres composants à l'intérieure des hydrates.

Alors que l'eau évaporable elle comprend donc :

- ✓ **L'eau adsorbée la moins liée:** qui correspond à l'eau adsorbée sur la surface externe des particules.
- ✓ **L'eau capillaire:** qui est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques.
- ✓ **L'eau libre:** qui correspond à l'eau formée de la phase condensée et qui n'est plus dans le champ d'influence des forces superficielles.

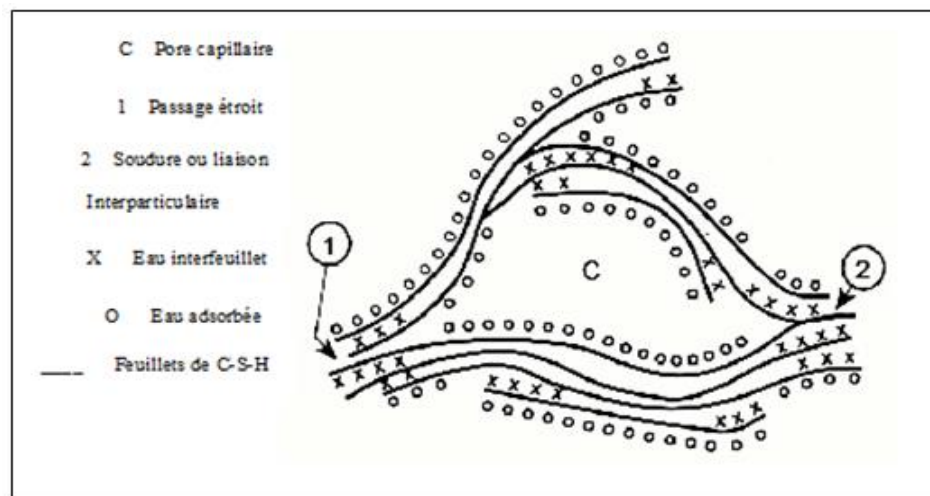


Figure (II.02): Modèle de Feldman et Sereda, revue par Sierra 1982 [35]

II.3.3 Structure poreuse

La structure du béton est caractérisée par l'existence de trois groupes des pores comme montré sur la figure (II.03) [33] à savoir :

- ✓ **Les pores isolés :** qui se trouvent à l'intérieure, et ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.
- ✓ **Les pores interconnectés:** sont formées de l'espace continue dans le milieu poreux, et dont le rôle est de transporter des matières à travers le matériau, soit par la diffusion ou par la perméabilité.
- ✓ **Les pores aveugles ou bras mort :** qui sont interconnectés d'un seul cotés, ils peuvent être accessibles des fluides extérieures, mais ils ne participent pas au transport des matières à travers le matériau.

Généralement, La porosité d'un béton courant est supérieure à 10%.

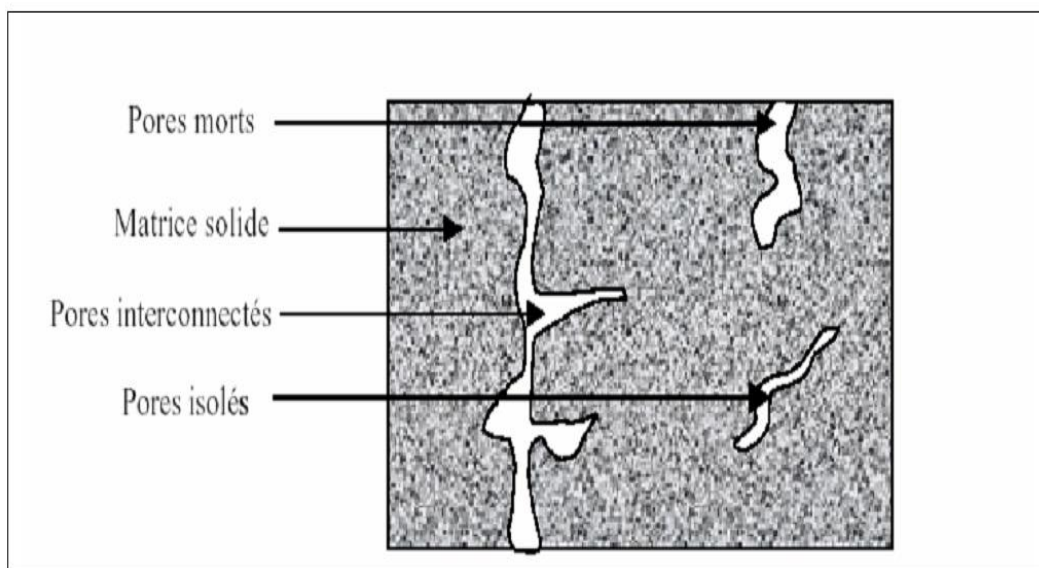


Figure (II.03): Représentation schématique d'un solide poreux [33]

II.4 MECANISME DE DEGRADATION DU BETON

II.4.1 Divers agents agressifs

Les agents chimiques agressifs peuvent être classés en quatre catégories [36] :

- ✓ **Les gaz:** qui sont d'origine naturelle, ou par production de pollutions atmosphériques et de fermentation, soient : des dioxydes de carbone, de soufre, d'azote, l'hydrogène sulfuré, les vapeurs chlorées ou l'ammoniac.

- ✓ **Les liquides organiques ou inorganiques:** qui influent par leurs effets purement physiques en agissant par leurs caractères acides ou basiques, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.
- ✓ **Les solides:** qui sont des sols agressifs ou de déchets d'origines diverses.
- ✓ **Les milieux biologiques:** qui présentent des attaques chimiques sous l'effet des bactéries aérobies ou anaérobies.

II.4.2 Modes d'action des agents agressifs

- ✓ **Mode d'action des gaz :** Le transfert de gaz dans le béton se fait par diffusion, il dépend du pourcentage de l'humidité relative à l'intérieur des pores du béton. Pour cela, la quantité de gaz transférée dans le béton saturé est plus petite ou négligeable, alors qu'elle devient assez importante avec la réduction d'humidité.

Les gaz ne sont pas agressifs mais du fait de leurs solubilités, ils peuvent former avec l'eau des solutions agressives [36].

- ✓ **Mode d'action des liquides :** ils peuvent se transférer dans le béton soit par un mouvement sous gradient hydraulique ou par capillarité, soit par diffusion ionique ou moléculaire.
- ✓ **Mode d'action des solides :** généralement les solides ne se transfèrent pas directement vers le béton que par leurs dissolutions dans l'eau.
- ✓ **Mode d'action des agents biologiques :** Les réactions biologiques peuvent conduire à la production des acides ou des gaz surtout l'hydrogène sulfuré (H_2S), ils entrent dans le béton par diffusion.

Les agressions chimiques entraînent presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment. Alors que l'attaque des silicates et des aluminates de chaux hydratés, engendre des produits de réaction soient solubles ou insolubles non négligeables. Si les produits sont solubles, il en résulte l'augmentation de la porosité ou la perméabilité dans la matrice cimentaire hydraté. Mais dans le cas des produits insolubles, les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, les pores du béton seront comblées, soit la diminution de la perméabilité du béton, alors que dans le cas où les nouveaux produits sont expansifs, ils induisent ainsi des dégradations de la résistance mécanique [37].

II.5 CRITERES GENERAUX DE LA DURABILITE DU BETON

II.5.1 Rapport eau/ciment (E/C)

Le rapport E/C est un critère très important de la durabilité du béton, plus le rapport E/C est faible, plus la porosité diminue et plus la résistance à la compression est plus élevée.

La réduction de rapport E/C permet aussi de réduire le diamètre des pores, ainsi que la production d'un réseau de pores plus fin et discontinu [35].

La figure (II.04) montre la relation entre le rapport E/C et la perméabilité de la pate du ciment durci.

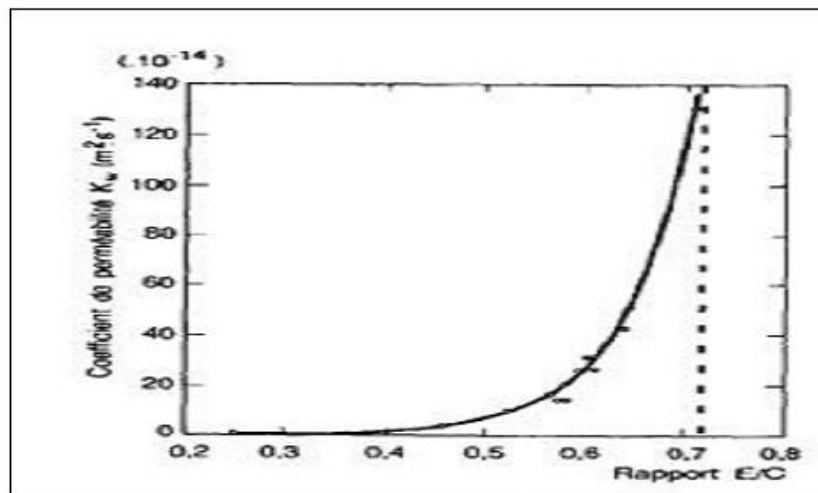


Figure (II.04): Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C [35]

II.5.2 Nature et dosage de ciment

Généralement la nature de l'agressivité du milieu extérieur indique le type de ciment à choisir ainsi que le dosage approprié afin d'obtenir une meilleure performance en présence d'agents agressifs, comme l'utilisation d'un ciment de faible teneur en C_3A en milieu sulfatique ou marin, ou l'utilisation d'un ciment libérant peu ou pas de portlandite dans un milieu acide [32].

Le dosage élevé en ciment entraîne généralement sous l'action d'hydratation continue de la pate de ciment, une porosité plus faible et une résistance à la compression plus élevée [34].

II.5.3 Ajouts minéraux

Pour améliorer la durabilité du béton dans les milieux agressifs, on peut modifier le comportement du ciment pendant l'hydratation par des additions minérales (laitier, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, fumée de silice...), l'objet est d'augmenter la résistance mécanique et minimiser la perméabilité du béton [32].

La figure (II.05) montre les travaux de LAWRENCE C.D, rapportés par M.Buil et J.-P. Olivier [33]. Où il est clair que le béton avec ajouts de laitier est de perméabilité plus faible et de meilleure résistance à la compression.

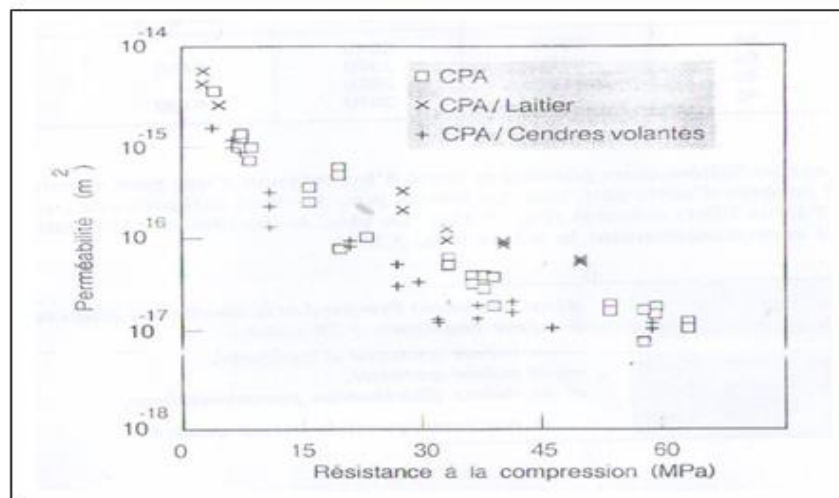


Figure (II.05): Corrélation approximative entre la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment et leur résistance mécanique [33]

II.5.4 Zone d'interface (pâte de ciment – granulat)

Généralement, la zone d'interface pâte-granulat présente une plus grande densité de microfissures, et l'existence de pores de grand diamètre, qui deviennent un réseau de cheminement privilégié pour le transport de gaz et de liquides. D'après la figure (II.06) et pour un même rapport E/C, la perméabilité du béton est d'autant plus élevée que le diamètre (d max) du granulat augmente [33].

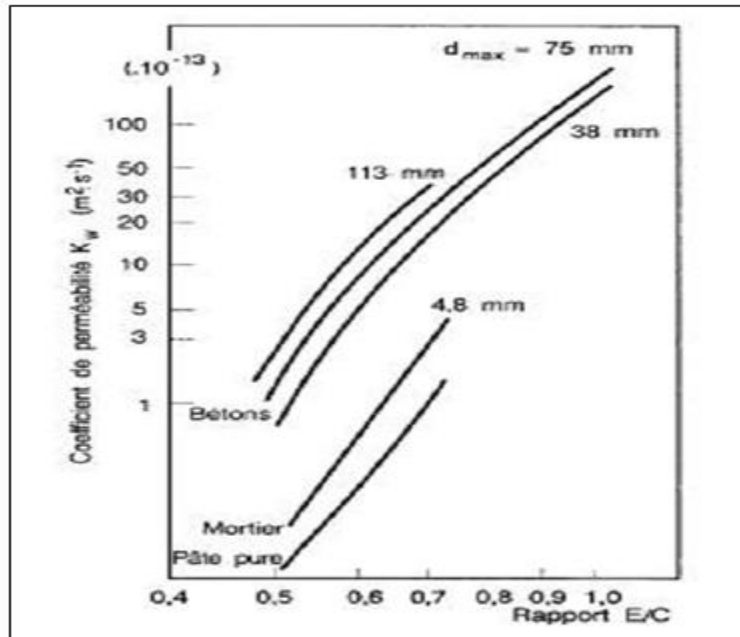


Figure (II.06): Influence de E/C et de la taille maximale des granulats sur le coefficient de perméabilité à l'eau des bétons. [8^{ème} Edition, U.S. Bureau of Reclamation, 1975] [33]

II.5.5 Durée de murissement

La durée de cure humide est très importante sur la perméabilité du béton, l'augmentation de la durée de cure minimise la perméabilité du béton comme montré sur la figure (II.07) de POM EROY J.P, rapportée par M.Buil et J.-P. Olivier [33].

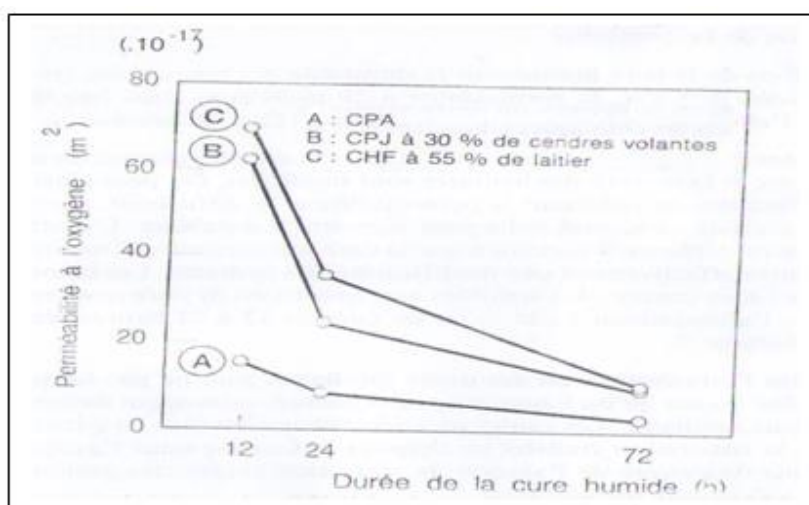


Figure (II.07): Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité des bétons réalisés avec diverses catégories de ciment [33]

II.5.6. Effet de température sur le béton

Le bétonnage par temps chaud sous l'effet de température extérieure qui dépasse 35°C, accélère la prise du ciment et diminue rapidement la plasticité du béton, accroît la porosité intérieure et favorise la fissuration du béton sous l'effet de l'évaporation d'une quantité d'eau de gâchage après la mise en œuvre. De même, la température élevée augmente la vitesse d'hydratation du ciment et crée des écarts de températures entre le cœur des pièces coulées et leur surface, ce qui augmente la fissuration ou le retrait lors du refroidissement [38].

La vitesse du vent accélère l'évaporation de l'eau, plus la vitesse du vent est élevée, plus l'évaporation de l'eau de gâchage est importante [38].

Généralement, la température élevée induit une réduction de résistance à la compression enregistrée à 28 jours, à 38°C et pour un jour de retard de cure du béton conduit à une réduction d'environ 10%, alors qu'à 38°C et 3 jours de retard de cure on enregistre une réduction de 22%. De même, on rapporte que les deux chercheurs Goto et Roy, ont trouvé que le murissement du béton à 60°C entraîne la formation d'un volume de pores dépassant 150 nm de diamètre beaucoup plus élevé que lors d'un murissement à 27 °C [36].

II.6 MECANISMES D'ATTAQUE DES SULFATES SUR LE BETON

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de la pollution domestique et industrielle, on peut les retrouver sous les formes suivantes [32] :

- ✓ Sous formes des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) ou de sulfates alcalins (K_2SO_4 - Na_2SO_4), et des concentrations plus élevées dans les eaux souterraines.
- ✓ Sous formes des sulfates d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$ dans les sols et les eaux en milieu agricoles (produits fertilisants ou insecticides contenant ce type de sulfate).
- ✓ Sous forme de gaz H_2S sous l'effet de décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage.

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans une durée assez courte de 10 à 15 ans.

II.6.1 Processus d'attaques par les sulfates seuls

L'attaque du béton par les sulfates se fait par la formation d'ettringite secondaire expansive, qui se distingue de la formation de l'ettringite primaire, montrée sur la figure (II.21), qui résulte des réactions d'hydratation des ciments portland avec le gypse, cette ettringite primaire est considérée comme étant non expansive [32].

L'ettringite expansive est formée en deux étapes :

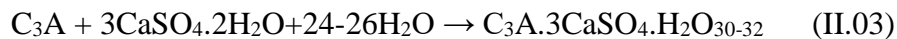
- (a) Formation de gypse secondaire qui se fait par la réaction entre la portlandite et le sulfate, l'équation (II.02) montre le cas des sulfates de sodium :



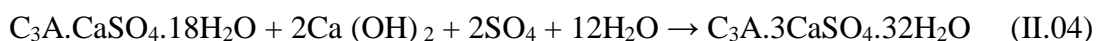
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: ce produit est formé dans les espaces internes des pores du ciment hydraté, dans la majorité des cas, pas ou peu expansif.

Si la teneur en sulfate est élevée (supérieure à 1000 mg/l) et la concentration locale en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} , dans la phase liquide interstitielle du béton excède le produit de solubilité du gypse, ce dernier précipite. Le volume du solide précipité représente un peu plus du double de celui des produits de départ et une expansion peut se manifester [32].

- (b) La formation de l'ettringite secondaire est le résultat de la réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium anhydres, selon l'équation (II.03) :



L'obtention de l'ettringite expansive peut se faire par la réaction entre les aluminates et le monosulfo-aluminate de calcium ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$) ou l'aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}), selon l'équation (II.04) :



La cristallisation de l'ettringite est qualifiée d'expansive ou non, suivant la teneur en chaux dans la phase liquide, et la précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins, dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures (suivant qu'il s'agit du C_3A ou du C_4AH_{13}) au volume du solide initial ce qui développe des contraintes très élevées

dues aux pressions qui accompagnent sa formation. Ce pendant, dans les ciments qui libèrent moins de portlandite tels que le CHF, le CLK et les ciments sur sulfatés, la cristallisation de l'ettringite en aiguilles bien formées dans l'espace interstitiel du béton n'est pas expansive [32].

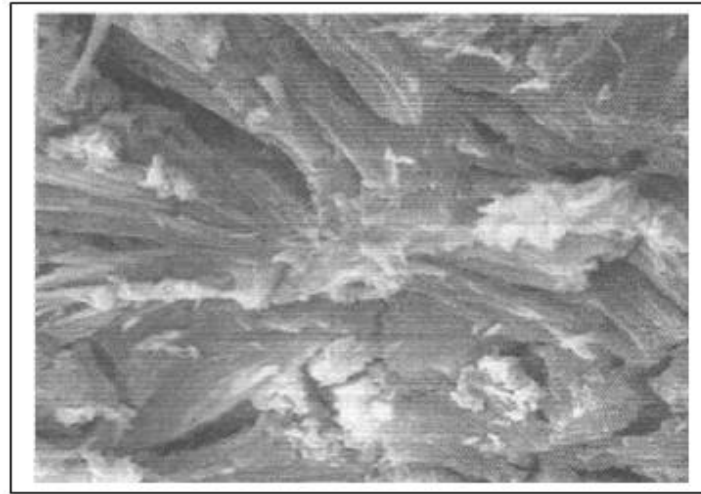
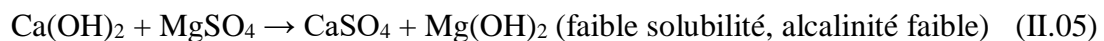


Figure (II.21): Ettringite massive mal cristallisée expansive formée topochimiquement [32]

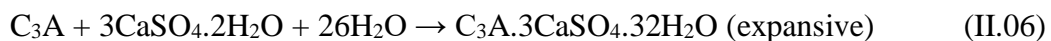
II.6.2 Attaque par le sulfate de magnésium, de calcium et de sodium

Les sulfates les plus agressifs vis-à-vis du béton sont les sulfates de magnésium, d'ammonium et de sodium.

- Le sulfate de magnésium est très agressif et de double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} , suivant les réactions (II.05-07):



La formation d'ettringite expansif selon l'équation (II.06):



Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H selon l'équation (II.07) :



Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduit à la formation de burcite $Mg(OH)_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation sans propriétés liantes. Encore, la cristallisation d'ettringite, instable en présence de sulfate de magnésium, intensifie la réaction de formation de gypse.

- Les sulfates de calcium présents dans les sols ou dans les eaux souterraines séléniteuses sous forme de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou $CaSO_4$), généralement, sont très agressifs sur le béton, et caractérisés par une solubilité faible et lente que les sulfates d'ammonium ou de magnésium [32], l'ettringite expansif est le résultat de la réaction entre ces sulfates et les aluminates anhydres, et le nombre des molécules d'eau peut être de 32 ou de 31 selon la pression de vapeur ambiante [33].

- Les sulfates de sodium sous forme de (Na_2SO_4) sont très solubles, ils sont très agressifs sur le béton par la formation de gypse et l'ettringite expansive [35]. Couramment, le gypse précipite est en fonction de concentration de SO_4^- au-delà de 1000 mg/l et de la teneur des aluminates anhydres.

Les C-S-H moins sensible que la portlandite ne sont pas affectées directement par les sulfates de sodium, mais sont néanmoins susceptible de se décomposées dans un deuxième temps par lixiviation partielle de leur chaux et formation de gypse [32].

II.6.4 Facteurs influents sur la résistance du béton aux sulfates

Parmi les facteurs qui influent sur la résistance du béton ; on note : le dosage en ciment et les ajouts minéraux.

a. Dosage en ciment et la teneur en C_3A

Pour assurer une bonne durabilité du béton dans le milieu en présence de sulfate, il y a lieu de :

Augmenter la résistance mécanique par la fabrication du béton plus compact de dosage en ciment élevé, et de faible rapport E/C pendant le gâchage du béton. [35]

Utiliser un ciment de faible teneur en C_3A , parce que la vitesse de dégradation est proportionnelle à la quantité de C_3A du ciment jusqu'à des teneurs de 10% environ.

La figure (II.22) montre l'influence du dosage en ciment et de teneur de C_3A , sur la vitesse de dégradation des éprouvettes en béton conservée pendant 16 ans dans une solution de concentration en Na_2SO_4 de 10% environ.

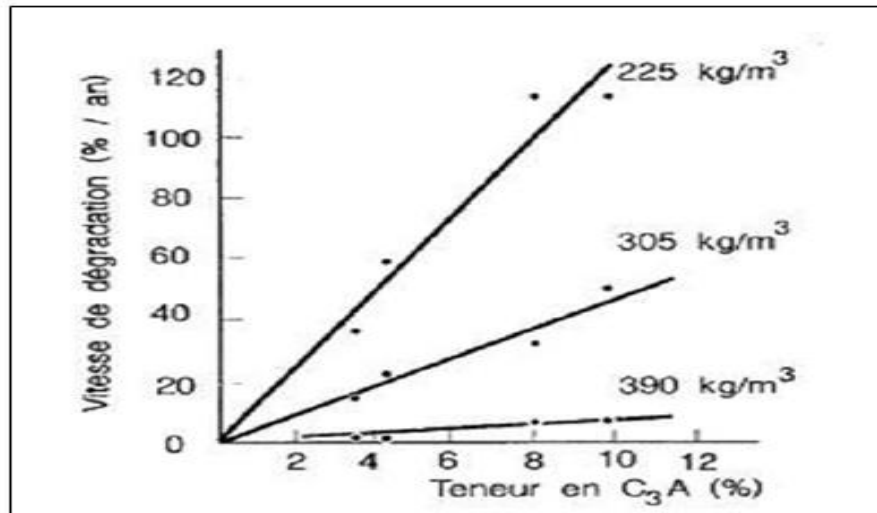


Figure (II.22): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C_3A sur la vitesse de dégradation du béton [32]

b. Additions minérales

Les ciments avec ajout de laitier donnent au béton un bon comportement dans les eaux sulfatés, soit par: [32]

- ✓ Réduction de la teneur en chaux et de C_3A du mélange.
- ✓ Accroissement de la compacité des hydrates, en relation avec une diminution du volume poreux pouvant atteindre 25%, et aussi entraîne la réduction de la perméabilité et du coefficient de diffusion.
- ✓ Cristallisation de l'ettringite formée par précipitation à partir de la phase liquide et non expansive.

La figure (II.23) montre l'augmentation de la résistance aux sulfates des échantillons de mortier en CPA avec ajouts de laitier.

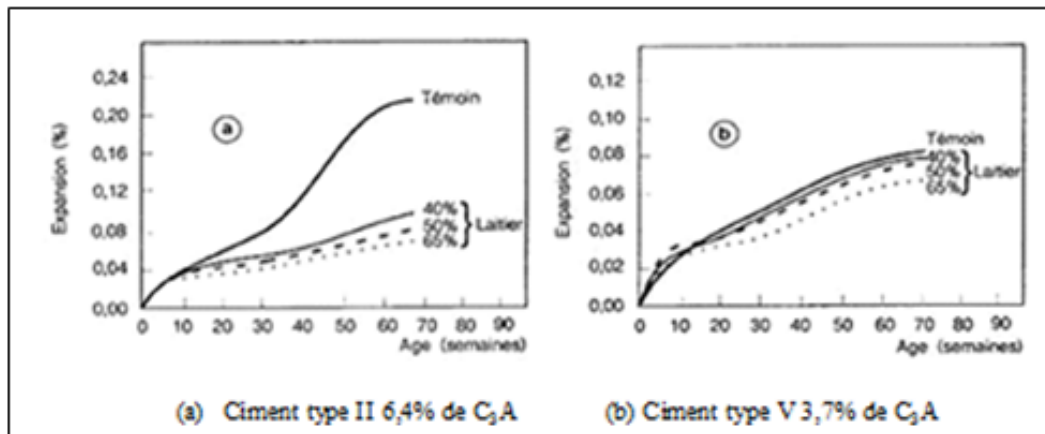


Figure (II.23): Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier [35]

Les ciments contenant de 20% à 30% de cendres volantes silico-alumineuse ont un effet bénéfique sur la durabilité du béton dans un milieu sulfurique, cet effet est dû à la consommation partielle de la portlandite libérée pendant l'hydratation du ciment par les cendres, et qui modifie la microstructure du béton, puis minimise la perméabilité et augmente la résistance du béton aux sulfates, mais les cendres ayant une teneur en chaux supérieure à 20% ne devraient pas être utilisées.

Les fumées de silice offrent également une bonne protection du béton sous l'effet des sulfates, du fait de leur forte consommation en portlandite et de la structure compacte des C-S-H qu'elles forment. Donc, la teneur de la fumée de silice est entre (7%-10%) améliorer très significativement la résistance aux sulfates [35].

II.7 DURABILITE DU BETON FACE A L'ALCALI-REACTION

Le terme alcali réaction désigne un ensemble de réactions chimiques qui peuvent se produire entre, d'une part, la solution interstitielle du béton fortement basique et alcaline et, d'autre part, certaines phases minérales présentes dans les granulats. Trois conditions doivent être réunies simultanément afin que ces réactions puissent avoir lieu. Il faut que les granulats potentiellement réactifs, que l'humidité relative excède 80 à 85% et que la concentration en alcalins dépasse un seuil critique.

Les alcalins provient de tous les constituants du béton à savoir : le ciment, les granulats, les adjuvants, les additions minérales, l'eau de gâchage, ou bien encore de l'environnement ou le lieu d'exposition tel que eaux de mer, eaux salines et sels fondants.

La concentration en ions alcalins K^+ et Na^+ augmente rapidement lors des premiers jours après le gâchage. Les ions en OH^- sont libérés pour maintenir l'équilibre des charges de la solution et après quelques jours seulement, leur concentration devient voisine de celle des ions alcalins.

L'humidité et les cycles de séchage-mouillage jouent un rôle primordial quant aux alcali-réactions, l'expansion du béton et d'autant plus aggravée non pas à une humidité saturée mais à une humidité relativement autour de 80 à 85%. Et que les cycles séchage-mouillage sont les causes principales au développement de la fissuration superficielle du béton atteint d'alcali-réaction [40].

II.8 DURABILITE DU BETON SOUS L'EFFET DES CYCLES SECHAGE-MOUIILLAGE

Les travaux menés par Abdel-Hamid J. Al-Tyyib et Mesfer M. Al-Zahrani [41] quant à l'effet des cycles séchage-mouillage à l'eau de mer sur l'amélioration de la résistance à la détérioration du béton par l'utilisation des fibres de polypropylène, ont montré que sur 30 échantillons soumis à des cycles de séchage-mouillage à l'eau de mer ayant subi deux conditions de cure (laboratoire et in-situ) juste après 24 heures du bétonnage, et où 12 spécimens sont démoulés et immergés dans un bassin d'eau potable jusqu'à 60 jours alors que 18 autres sont soumis aux conditions climatiques similaires à celles du golf arabe et arrosés quotidiennement à l'eau potable pour une durée de 7 jours et puis laissés pendant 14 jours avant d'être soumis aux cycles séchage-mouillage à l'eau de mer (à raison de deux fois par jour). Un effet détériorant a été constaté dû aux cycles séchage-mouillage à l'eau de mer aux conditions climatiques du Golf arabe dès la 4^{ème} à la 13^{ème} semaine d'exposition alors que lors de l'utilisation de la fibre de polypropylène la détérioration de surfaces des spécimens n'apparaît qu'à partir de la 26^{ème} à la 40^{ème} semaine [41].

II.9 DURABILITE DU BETON SOUS L'EFFET COUPLE CYCLES SECHAGE-MOUILLAGES) & GEL-DEGEL.

Les travaux menés par Zhifu Yang [42] quant à l'effet couplé du cycle lent gel-dégel et le cycle séchage mouillage sur la durabilité du béton, ont montré qu'à priori le béton résiste mieux au cycle gel-dégel s'il est gardé en cure saturée comparativement à un béton laissé à l'aire libre. Le béton à base de 5% de fumée de silice montre une résistance plus élevée sous les conditions de cure mouillée alors que n'a pas montrée d'amélioration dans le cas des conditions de l'aire libre.

Le séchage-mouillage influe sur la durabilité du béton sous l'effet de gel-dégel et qui dépend de la durée du cycle séchage-mouillage, il apparaît que l'échantillon ayant subi une cure humide se détériore à un taux lent (moins) lors que ce dernier est exposé au gel-dégel avec une durée de cycle (séchage-mouillage) moins de 3 jours [42].

II.10 CONCLUSION

La pâte de ciment hydraté est constituée par : les silicates de calcium hydraté, la portlandite et les sulfo-aluminates, des grains de ciment non-hydraté, des espaces capillaires. Ces derniers sont distribués dans la structure du béton en plusieurs tailles et en différentes formes, Ils permettent la pénétration des agents agressifs à l'intérieures des pores, soient des liquides, des solides, des gaz ou des ions.

Pour obtenir une meilleure durabilité du béton exposé aux milieux agressifs, il doit au moins respecter quelques critères à savoir : le dosage et le type de ciment utilisé, le rapport E/C, le taux des additions minéraux, la cure du béton après le coulage pour éviter l'évaporation d'eau, et éviter le coulage aux temps chaud.

Les dégradations du béton provoquées sous l'effet des sulfates, soient internes ou externes, dont dues aux attaques des sulfates qui conduisent à la formation d'ettringite expansive, soit à la fissuration du béton qui devient de plus en plus moins durable dans le milieu agressif. Pour obtenir une meilleure durabilité en milieu de sulfate, le rapport E/C doit être minimisé, augmenter le dosage en ciment et utiliser un ciment de faible teneur en C₃A ou introduire des ajouts de laitier, de cendres volantes, ou de fumées de silice.

Les cycles séchage-mouillage sont les causes principales au développement de la fissuration superficielle du béton atteint d'alcali-réactions qui ne peut avoir lieu que lors que trois conditions sont réunies simultanément : les granulats potentiellement réactifs, l'humidité relative de 80 à 85% et que la concentration en alcalins dépasse un seuil critique.

Le cycle séchage mouillage du béton donne lieu à ce taux d'humidité (de 80% à 85%) qui est très fréquent dans le cas de la fluctuation du niveau de la nappe phréatique de Ouargla pour des raisons diverses entre autres le gradient thermique et la présence de vent fort.

De ce qui précède, la partie expérimentale qui suivra comportera un programme d'essai qui fait ressortir l'effet de la nappe en ses trois aspects d'agression soit l'action permanente (immersion continue dans le temps), l'agression cyclique (effet du mouillage séchage) et l'agression retardée (simulation des éléments préfabriqués en béton mis en place après une durée de leur réalisation).

La nature du ciment utilisé dans la région doit être testée sous l'effet de la nappe afin d'évaluer et comparer les taux de dégradation entre un béton à base de ciment ordinaire et un ciment résistant aux sulfates.

Etant donné que le sable de dunes broyé est une alternative imposée par les résultats encourageants des deniers travaux de recherche effectués quant à sa valorisation dans le béton, il y a lieu de maitre cette alternative à l'épreuve notamment en termes de niveau de broyage.

CHAPITRE III

**MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS
REALISES**

CHAPITRE III: MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS REALISES

III. 1 INTRODUCTION

La caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes de béton est une étape indispensable afin de pouvoir comparer, prédire ou interpréter les résultats constatés. Le présent chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés, protocole suivi et conditions de conservation pour la réalisation du programme d'essais dédié à cette recherche.

Le programme expérimental comprend les étapes suivantes :

- L'identification et la caractérisation des matériaux de base.
- Préparation et confection des éprouvettes.
- Observations et enregistrement de toutes les mesures et processus avant, au cours et après réalisation de l'essai.
- Notation de l'évolution des propriétés des différents types de béton soumis aux différents milieux de conservation.
- Caractérisation des changements des propriétés du béton.

III.2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

III.2.1 Ciment

Le sol de la région de Ouargla est généralement fortement sulfaté, pour cela la plus part des ouvrages enterrés sont fabriqués par le ciment de type CRS (CEM I/A-D) (ciment résistant aux sulfates). Donc la confection des éprouvettes en béton se fait par l'utilisation de ciment CPJ (CEM II/A 42, 5) de provenance de Ain-Touta, alors que le ciment CRS provient de l'usine de LAFARGE, il est constitué par 95% de clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle de ciment portland et de 5% des constituants secondaires [43].

Les normes des essais sur le ciment sont présentées au tableau (III.01) ci-après :

Tableau (III.01): Normes des essais sur le ciment

NF P 15-473	Détermination du temps de prise et de la stabilité
NF P 15-471	Détermination des résistances mécanique
NF P 15-476	Détermination de la finesse

III.2.1.1 Analyses chimique du ciment CRS et CPJ

Les analyses chimiques du ciment CRS sont présentées au tableau (III.02) ci-après :

Tableau (III.02): Composition chimiques et minéralogique du ciment CRS

Perte au feu (%)	< 3.00
Résidus insolubles (%)	0.44
Teneur en sulfates SO₃ (%)	1.90
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.24
Teneur en chlorures (%)	0.02
Silicate tricalcique C₃S (%)	57.00
Silicate bi-calcique C₂S (%)	19.50
Aluminate tricalciques C₃A (%)	2.30
Aluminoferrites tétracalcique C₄AF (%)	14.00

Les analyses chimiques du ciment CPJ sont présentées au tableau (III.03) ci-après :

Tableau (III.03): Résultats des analyses chimiques et minéralogique du ciment CPJ

Perte au feu (%)	< 1.5
Résidus insolubles (%)	<0.7
Teneur en sulfates SO₃ (%)	1.85
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.81
Teneur en chlorures (%)	0.016
Silicate tricalcique C₃S (%)	42.85
Silicate bi-calcique C₂S (%)	23.91
Aluminate tricalciques C₃A (%)	14.37
Aluminoferrites tétracalcique C₄AF (%)	3.54

III.2.1.2 Propriétés physiques du ciment CRS et CPJ

Les caractéristiques physiques du ciment CRS sont présentées au tableau (III.04) ci-après :

Tableau (III.04): Caractéristiques physiques du ciment CRS

Consistance normale dans la pate de ciment (%)	26,50	
Finesse suivant la méthode de Blaine	3453	
Retrait à 28 jours en µm/m	800	
Expansion en mm	0,31	
Temps de prise à 20°C	Début de prise (min)	185
	Fin de prise (min)	264

Les caractéristiques physiques du ciment CPJ sont présentées au tableau (III.05) ci-après :

Tableau (III.05): Caractéristiques physiques du ciment CPJ

Consistance normale dans la pate de ciment (%)		26,1
Finesse suivant la méthode de Blaine		3150
Retrait à 28 jours en $\mu\text{m}/\text{m}$		550
Expansion en mm		< 5
Temps de prise à 20°C	Début de prise (min)	120
Stabilité à chaud (mm)		< 7

III.2.2 Granulats

Les granulats locaux utilisés pour la réalisation de ce programme de recherche sont :

- Le sable de classe granulaire (0/5) de la carrière de Ben Brahim, Haoud-El-Hamra (Ouargla).
- Le gravier concassé de classe granulaire (3/8) et (8/15) de la carrière de Ben Brahim, Haoud-El-Hamra (Ouargla).

La caractérisation des granulats a été effectuée au laboratoire LTPS (Ouargla), et selon les normes européennes présentées au tableau (III.06) et au tableau (III.07).

Tableau (III.06): Normes des essais d'identification du sable

NF P 18-553	Préparation d'un échantillon pour essai
NF P 18-560	Analyse granulométrique par tamisage
XP P 18-540	Détermination du module de finesse
NF P 18-576	Essai de friabilité du sable
NF P 18-598	Essai de l'équivalent de sable
NF P 18-555	Masse volumique apparente et absolue
NF P 15-461	Analyse chimique - détermination du taux des carbonates et des insolubles
BS 1377/V1975	Analyse chimique - détermination de la teneur en sulfates
BS BOWLY/V1979	Analyse chimique - détermination de la teneur en chlorures

Tableau (III.07): Normes des essais d'identification du gravier

NF P 18-553	Préparation d'un échantillon pour essai
NF P 18-560	Analyse granulométrique par tamisage
NF P 18-573	Essai Los-Angeles
NF P 18-591	Propreté superficielle des granulats
NF P 18-554	Masse volumique apparente et absolue Porosité des gravillons
NF P 15-461	Analyse chimique - détermination du taux des carbonates et des insolubles
BS 1377/V1975	Analyse chimique – détermination de la teneur en sulfates
BS BOWLY/V 1979	Analyse chimique - détermination de la teneur en chlorures

III.2.2.1 Préparation des échantillons

Le prélèvement des échantillons de tel matériau dans un plateau en tôle pouvant entrer sous le plus grand des diviseurs montrée sur la figure (III.01) , et la quantité du matériau enlevée au moins deux fois plus grande que la masse nécessaire pour faire le ou les essais au laboratoire[44]. Pour l'homogénéisation des échantillons de tel matériau, une pelle manuelle est utilisée, la réduction d'un échantillon se fait par un diviseur ou par quartage, ainsi la quantité nécessaire pour l'essai est en fonction de la grande dimension des grains du matériau lui même.



Figure (III.01): Préparation des échantillons de gravier 8/15 au labo LTPS Ouargla

III.2.2.2 Essai de détermination de la masse volumique absolue et apparente

La détermination de la masse volumique apparente et absolue des granulats a pour but de fabriquer un béton compact de bonne résistance mécanique, à partir de la définition de la porosité et des autres propriétés des granulats normes (NF P 18-554) et (NF P 18-555).

La masse volumique absolue et apparente, du sable et du gravier 3/8, 8/15 sont représentées au tableau (III.08) ci-après :

Tableau (III.08): Masse volumique absolue et apparente des granulats utilisés

Matériaux utilisés	Mv apparente (g/cm ³)	Mv absolue (g/cm ³)
Sable 0/5	1.530	2.590
Gravier 3/8	1.244	2.600
Gravier 8/15	1.381	2.630

III.2.2.3 Résultats des analyses granulométriques des granulats (NF P 18-560)

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable utilisé ayant une masse initiale de 1500 g sont représentés au tableau (III.09) ci-après :

Tableau (III.09): Résultats de l'analyse granulométrique du sable

Tamis en mm	Refus partielles en (g)	Refus cumulées en (g)	Refus en %	Passant (tamisât) en %
6,3	0	0	0	100
5	10,33	10,33	0,69	99,31
4	24,1	34,43	2,30	97,70
3,15	16,38	50,81	3,39	96,61
2,5	34,61	85,42	5,69	94,30
2	32,57	117,99	7,87	92,13
1,6	43,12	161,11	10,74	89,26
1,25	68,87	229,98	15,33	84,67
1	87,41	317,39	21,16	78,84
0,63	330,24	647,63	43,18	56,82
0,5	153,63	801,26	53,42	46,58
0,4	251,56	1052,82	70,19	29,81
0,315	97,96	1150,78	76,72	23,28
0,25	127,97	1278,75	85,25	14,75
0,2	154,69	1433,44	95,56	4,44
0,16	0,21	1433,65	95,58	4,42
0,125	0,1	1433,75	95,58	4,42
0,08	9,1	1442,85	96,19	3,81

Pour ce qui est du gravier, les résultats de l'analyse granulométrique de la classe 3/8 ayant une masse initiale de 3000 g, sont représentés dans le tableau (III.10) ci-après :

Tableau (III.10): Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis en mm	Refus partiels en (g)	Refus cumulés en (g)	Refus en %	Passant (tamisât) en %
10	0	0	0	100
8	103,24	103,24	3,44	96,56
6,3	946,6	1049,84	35	65,00
5	831,72	1881,56	62,72	37,28
4	564,54	2446,1	81,54	18,46
3,15	330,47	2776,57	92,55	7,45
2,5	182,62	2959,19	98,64	1,36
2	16,14	2975,33	99,18	0,82
1,6	1,41	2976,74	99,22	0,78

Les résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15 ayant une masse initiale de 5000 g, sont représentés au tableau (III.11) ci-après :

Tableau (III.11): Résultats de l'essai granulométrique de gravier 8/15

Tamis en mm	Refus partiels en (g)	Refus cumulés en (g)	Refus en %	Passant (tamisât) en %
20	0	0	0	100
16	690,25	690,25	13,80	86,20
12,5	1911,68	2601,93	52,039	47,96
10	1174,55	3776,48	75,53	24,47
8	790,6	4567,08	91,34	8,66
6,3	304,6	4871,68	97,43	2,57
5	38,21	4909,89	98,20	1,80
4	4,8	4914,69	98,29	1,71

A partir des essais réalisés au labo, le résultat de l'équivalent de sable est égal à 73,20 %. A ce propos, le sable utilisé est considéré comme propre et de faible pourcentage de fines, à ce titre, il convient parfaitement au béton ordinaire.

III.2.2.4 Essai de propreté des granulats (NF P 18 - 591)

Cet essai a pour but de déterminer la propreté superficielle des granulats de diamètres supérieurs à 2 mm, ayant pour objet l'obtention d'une meilleure qualité du béton.

Résultat de l'essai :

La propreté de gravier de classe 3/8 est égale à 3,33%.

La propreté de gravier de classe 8/15 est égale à 3,74%.

Ces résultats sont acceptables et le gravier utilisé pour la confection des éprouvettes de béton est considéré propre.

III.2.2.5 Essai de friabilité du sable (NF P 18 - 576)

Cet essai a pour but de définir la résistance à la fragmentation du sable.

L'essai de friabilité a fait ressortir une valeur de 14,04 %, donc le sable utilisé est de bonne qualité et le résultat est acceptable pour un béton ordinaire.

III.2.2.6 Essai Los- Angeles (NF P 18 - 573)

Cet essai a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par choc des grains de l'échantillon de gravier.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine de Los Angeles [49].

L'essai effectué sur le gravier 8/15 a donné la valeur du coefficient de Los Angeles de 23,617%, ce gravier est de catégorie (B) acceptable pour la confection d'un béton ordinaire.

III.2.2.7 Analyses chimiques**III.2.2.7.1 Essai de détermination des corps insolubles (NF P 15-461)**

Cet essai a pour objet de déterminer le pourcentage des corps insolubles dans la matière, ces insolubles sont des silicates ou des corps insolubles dans l'acide chlorhydrique [50].

a. Principe de l'essai

L'essai consiste à bouillir l'échantillon avec l'acide chlorhydrique, puis filtrer le mélange sur un papier filtre pour déterminer les matières non solubles dans l'acide chlorhydrique.

b. Mode opératoire

Le mode opératoire de l'essai suit les étapes ci-après :

- Prendre 80 g d'échantillon humide, puis étuver à 105-110 °C.
- Tamiser l'échantillon au tamis de 0,2 mm, puis peser une masse (M_0) de 1g.
- Mettre dans un bécher à 250 ml, et ajouter 100 ml d'acide chlorhydrique (HCl) de concentration diluée à 10%.
- Bouillir doucement pour une durée de 4 à 5 minutes, jusqu' à l'obtention d'une couleur jaune claire du mélange.
- Refroidir le mélange pour une durée de 15 minutes dans un récipient contenant l'eau.
- Filtrer le mélange sur un papier filtre N° 541 sans cendres.
- Laver le bêcheur à l'aide de l'eau distillée jusqu'à disparition des ions chlorures (Cl⁻).
- Réserver le filtrat pour déterminer la teneur des ions de sulfate (SO₄²⁻).
- Peser le creuset Vide, soit de masse (M_1).
- Mettre le papier filtre contenant les insolubles dans un creuset, puis l'étuvage au four à 900°C de température pendant 15 minute, et peser le creuset, soit de masse (M_2).
- La teneur des insolubles est calculée par la relation (III.17) ci-après :

$$INS\% = \frac{M_2 - M_1}{M_0} 100 \quad (III.17)$$

III.2.2.7.2 Essai de détermination des carbonates (NF P 15-461)

Cet essai a pour but de définir le taux de carbonates dans la matière, ces carbonates sous forme de carbonate de calcium (CaCO₃), sont très agressifs sur le béton et les aciers du béton armé.

a. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la précipitation de carbonates dans la matière sous forme de carbonate de calcium (CaCO₃), lorsque tous les carbonates sont précipités en présence de la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), la couleur de la solution est transférée à la couleur Violet.

b. Mode opératoire

Les étapes de l'essai de détermination des carbonates sont résumées ci-après [51]:

- Tamiser l'échantillon séché au tamis de 0,2 mm, puis peser une masse (M_0) de 0,5 g.
- Ajouter à l'échantillon un Volume (V_b) de 10 ml d'acide chlorhydrique (HCl), avec une concentration diluée de 10%.
- Ajouter trois ou quatre gouttes de phénolphthaléine de concentration de 0,1% (détecteur).
- Bouillir doucement le mélange pour une durée de 30 secondes pour activer la réaction.
- Ajouter la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) en goutte à goutte, jusqu'à l'obtention d'une couleur Violet.
- Lire le Volume (V_a) du NaOH.

La teneur de calcium des carbonates est calculée par la relation (III.18) :

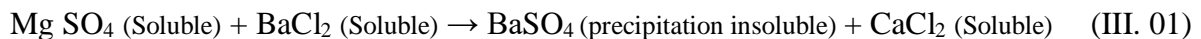
$$CaCO_3 \% = \frac{5(V_b - V_a)}{M_0} \quad (III.18)$$

III.2.2.7.3. Essai de détermination des sulfates (BS 1377/V1975)

Cet essai a pour objet de déterminer le pourcentage des sulfates dans la matière, ces sulfates se trouvent dans le matériau sous formes : des sulfates de sodium ($Na_2 SO_4$), des sulfates de magnésium ($Mg SO_4$) et des sulfates de calcium ($Ca SO_4$), ou sous forme de gypse de faible solubilité dans l'eau. Généralement, ces sulfates sont très nuisibles sur le béton [52].

a. Principe de l'essai

L'essai consiste à bouillir l'échantillon à l'aide de chlorure de baryum ($BaCl_2$), puis à filtrer la solution sur un papier filtre pour déterminer les précipitations des sulfates des baryums insolubles selon l'équation chimique (III.01):



b. Mode opératoire

Les étapes de l'essai de détermination des sulfates sont les suivantes:

- Prendre le filtrat des insolubles et ajuster jusqu'à 250 ml avec l'eau distillée, puis l'agitation du filtrat.

- Prendre 100 ml de filtrat dans un bêcher, et ajouter 10 ml de chlorure de baryum ($BaCl_2$) de concentration diluée à 5%.
- Bouillir doucement pour une durée de 4 à 5 minutes, jusqu' à l'obtention d'une couleur jaune claire du mélange.
- Refroidir la solution pour une durée de 15 minutes dans un récipient rempli d'eau.
- Filtrer la solution sur un papier filtre N° 541, puis laver le bêcher à l'aide de l'eau distillée.
- Peser le creuset Vide, soit de masse (M_1).
- Mettre le papier filtre contenant les sulfates précipités dans un creuset, puis l'étuvage au four à $900^\circ C$ de température pendant 24 heures, et peser le creuset, soit de masse (M_2).

La teneur en sulfates (SO_4^{-2}) est calculée par la relation (III.19) :

$$SO_3^{-2} \% = 34,3 \frac{M_2 - M_1}{M_0} \quad (III.19)$$

La teneur de gypse ($CaSO_4$) est calculée par la relation (III.20) :

$$CaSO_4 \% = 184,23 \frac{M_2 - M_1}{M_0} \quad (III.20)$$

III.2.2.7.4. Essai de détermination des chlorures (BS BOWLY/ V1979)

Cet essai a pour objet de déterminer le pourcentage des chlorures dans la matière, ces chlorures se trouvent dans le matériau sous formes : d'ions de chlorures (Cl^-), et des chlorures de sodium ($NaCl$), ces chlorures sont très agressifs sur les aciers du béton armé [53].

a. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la précipitation de chlore dans la matière sous forme d' $AgCl$, cette transformation se fait en présence des chromates de potassium (K_2CrO_4) et la solution du nitrate d'argent ($AgNO_3$), par le changement de couleur au rouge brique et la formation de CrO_4Ag_2 , pour obtenir un pH neutre qui fait précipiter les chlorures existant dans la matière.

b. Mode opératoire

Les étapes d'essai de détermination des chlorures sont les suivantes :

- Tamiser l'échantillon sec au tamis de 0,2 mm, puis peser une masse de 50g.
- Ajouter à l'échantillon 100 ml de l'eau distillée, et agiter le mélange pendant 24 heures.
- Mesurer le pH du mélange avant le filtrage, puis filtrer le mélange sur un papier filtre N° 541.
- Prendre 25 ml de filtrat dans un bécher et ajouter trois gouttes de l'acide nitrique (HNO₃).
- Ajouter trois gouttes de chromate de potassium (K₂CrO₄) de concentration diluée à 10%.
- Titrer à pH neutre et précipiter les chlorures par ajout de nitrates d'argent (AgNO₃) en goutte à goutte, jusqu'à l'obtention d'une couleur rouge brique.
- Lire le Volume (V) d'AgNO₃.

La teneur des ions chlorures (Cl⁻) est calculée par la relation (III.21) :

$$Cl^{-} \% = 0,005672(V - 0,2) \quad (III.21)$$

La teneur des chlorures de sodium (NaCl) est calculée par la relation (III.22) :

$$NaCl\% = 1,64Cl^{-} (\%) \quad (III.22)$$

Les résultats des essais des analyses chimiques sur le sable et le gravier sont résumés au tableau (III.12):

Tableau (III.12): Résultats des analyses chimiques du sable et du gravier

Constituants	Sable	Gravier
Insolubles en %	90,20	30,27
Sulfates (SO₃⁻²) en %	0,36	0,86
Gypse (CaSO₄.2H₂O) en %	1,87	4,58
Carbonates (CaCO₃) en %	1,4	76
Chlorures (Cl⁻) en %	0,0158	0,0227
Chlorures de sodium (NaCl) en %	0,0261	0,0364

D'après les résultats d'analyses chimiques du sable et du gravier, les points suivants peuvent être retenus:

- Le sable est d'origine siliceux et les éléments agressifs qui y sont contenus sont en quantité faible, ce qui permet de l'utiliser pour la confection du béton.

- Les graviers de classe 3/8 et 8/15 sont des matériaux d'origine calcaire, ainsi que les éléments nuisibles qui y sont contenus sont en quantité faible, ce qui permet de les utiliser pour la confection du béton.

III.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la préparation des gâchées des bétons et des mortiers permettant d'avoir une consistance Visée, selon les conditions et moyens de mise en œuvre.

L'eau employée est souvent l'eau potable propre de toutes impuretés solides ou solubles, qui ne doit pas influencer la stabilité des granulats, les conditions d'hydratation, le durcissement du béton, l'évolution de la résistance mécanique et la durabilité du béton, et permet la protection des armatures contre la corrosion indiquée par la norme française XP P 18-303 [54].

Généralement, l'eau potable est propre ne nécessitant aucun essai d'analyse, elle se caractérise par des propriétés physico-chimiques acceptable et mieux pour la confection du béton que les eaux usées ou les eaux de haute salinité.

III.3. Formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse

III.3.1. Principe de la méthode

Cette méthode est la plus utilisée pour la confection du béton, elle comprend les étapes ci-après: [34]

- Tracer les courbes granulométriques du sable (S), du gravier 3/8 (G3/8) et du gravier 8/15 (G8/15), dans un plan d'axes orthonormé (d, T%) d'échelle arithmétique.
- Tracer la courbe de référence de Dreux constituée d'une ligne brisée (O A B) ayant les abscisses suivantes: O (0,0) A (D/2, Y) B (D, 100%).
D étant le grand diamètre des granulats, pris égal à 20 mm.
Y est calculée par la relation (III.23) :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s \quad (\text{III.23})$$

K: facteur correctif qui dépend du dosage de ciment, l'énergie de serrage, et la nature et forme des granulats Voir tableau (III.13) ci-après:

Tableau (III.13): Coefficient de correction K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de Vibration et de l'angularité des granulats [34]

Vibration du béton		Faible		normale		puissant	
		roulée	concassée	roulée	concassée	roulée	concassée
Dosage de ciment en Kg/m ³	400 + fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	2	-2	0	-4	-2
	350	2	4	0	2	-2	0
	300	4	6	2	4	0	2
	250	6	8	4	6	2	4
	200	8	10	6	8	4	6

D'après le tableau (III.13), pour un dosage de 400 Kg/m³ de ciment, des granulats concassés et une Vibration normale; le coefficient de correction à adopté est égal à 0.

K_s : coefficient de correction supplémentaire, il est calculé en fonction du module de finesse M_f du sable par la relation (III.24) :

$$K_s = 6M_f - 15 \quad (III.24)$$

Le coefficient de correction supplémentaire, K_s = -0,78, d'où :

$$Y = 50 - \sqrt{20} + 0 - 0,78 \Rightarrow Y = 44,75\% \quad (III. 25)$$

Les points de référence de la courbe de Dreux sont : O (0, 0), A (10, 44,75), B (20, 100%).

- Tracer les lignes de partage joignant les points de 5% sur G3/8 et 95% sur S, de 5% sur G8/15 et 95% sur G3/8.
- Les points d'intersection de cette ligne avec la courbe de référence, et la verticale de Joisel permettant la lecture des pourcentages du constituants à savoir % S, % G3/8 et % G8/15 comme montré sur la figure (III.03);

$$S = 33\% \quad G3/8 = 9\% \quad G8/15 = 58\% \quad (III.26)$$

III.3.2. Détermination de la quantité d'eau

D'après la figure (III.02) pour un dosage de 400 Kg/m³ de ciment utilisé et un affaissement de béton de 7 cm, le rapport C/E est égal à 2.

$$C/E = 2 \Rightarrow E = 200l \quad (\text{III. 27})$$

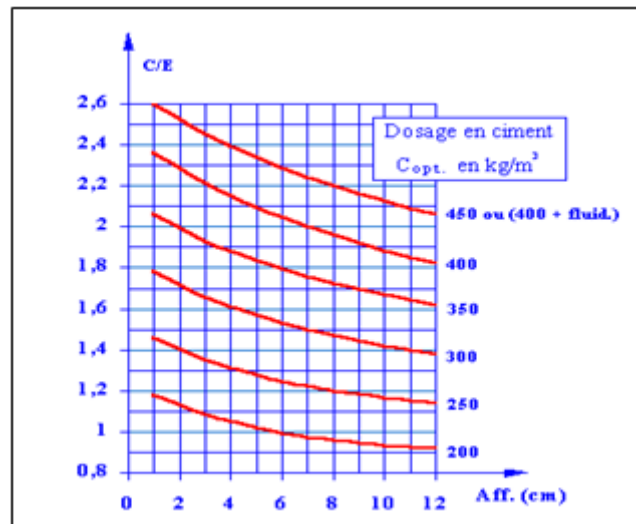


Figure (III.02) : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)[34]

Après avoir mesuré l'affaissement par l'essai de cône d'Abrams, la quantité d'eau est ajustée, d'où E est prise égale à : $E = 256l$

III.3.3. Détermination du volume absolu des agrégats secs

Le volume des granulats secs est calculé par la relation (III.28) :

$$V_{\text{sec}} = 1000 - V_{\text{eau}} \quad (\text{III.28})$$

$$\Rightarrow V_{\text{sec}} = 744l$$

III.3.4. Détermination du pourcentage de ciment

Pour un dosage de ciment de 400 Kg/m³, et de masse Volumique du ciment de 3.1 g/cm³.

$$\%C = V_C / V_{\text{Sec}} \quad (\text{III.29})$$

$$\Rightarrow \%C = 17,34\%$$

III.3.5. Détermination des pourcentages massiques des constituants

Le tableau (III.14) résume les pourcentages massiques des constituants du béton, après utilisation de la méthode graphique de Dreux Gouriss comme montré sur la figure (III.03).

Tableau (III.14): Pourcentages massiques des constituants

Ciment en %	Sable en %	Gravier 3/8 en %	Gravier 8/15 en %	Quantité d'eau en (L)	Affaissement au Cône d'Abrams (cm)	Rapport E/C
17,34	27,28	7,44	47,94	256	8	0,64

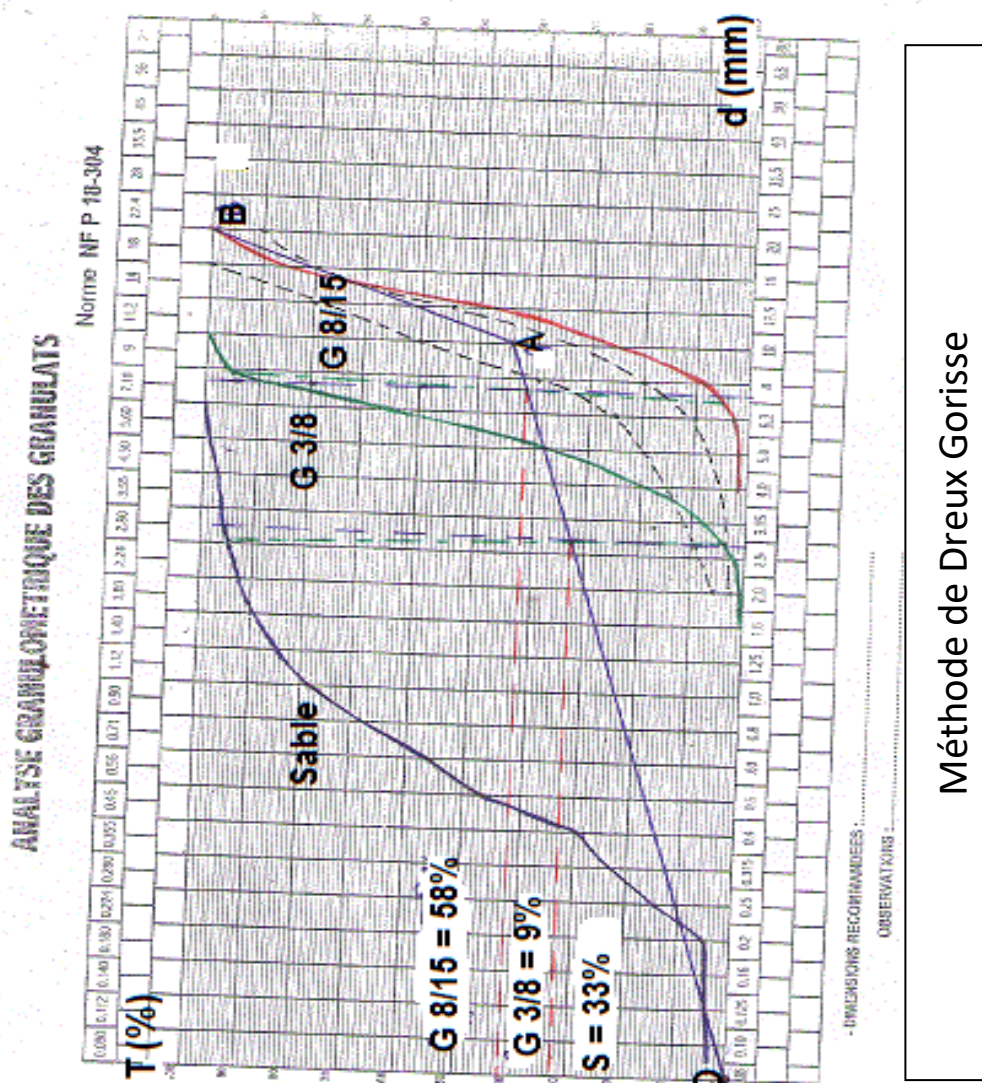


Figure (III.03) : Courbes des analyses granulométriques & pourcentages des constituants secs par la méthode de Dreux Gorisse

III.4 AJOUTS MINÉRAUX NECESSAIRES AU PROGRAMME D'ESSAI

Pour la réalisation d'un béton à base de matériaux locaux, le sable de dune broyé de la région de Ouargla a été utilisé ainsi que deux produits de provenance Granitex à savoir un super-plastifiant et une fumée de silice dont les détails sont comme suit :

III.4.1 Sable de dune broyé

Le sable de dune broyé utilisé est un sable de dune de provenance de Sidi-Khouiled Wilaya de Ouargla, finement divisé, obtenus par broyage à l'aide d'un broyeur conventionnel à boulets comme montré sur la Figure (III.04), (Vase en céramique et enclore des boulets céramique qui broient la matière en se heurtant et en se frottant dans un mouvement circulaire horizontal autour d'un axe imaginaire vertical), après on procède au tamisage au tamis 0.08 mm.

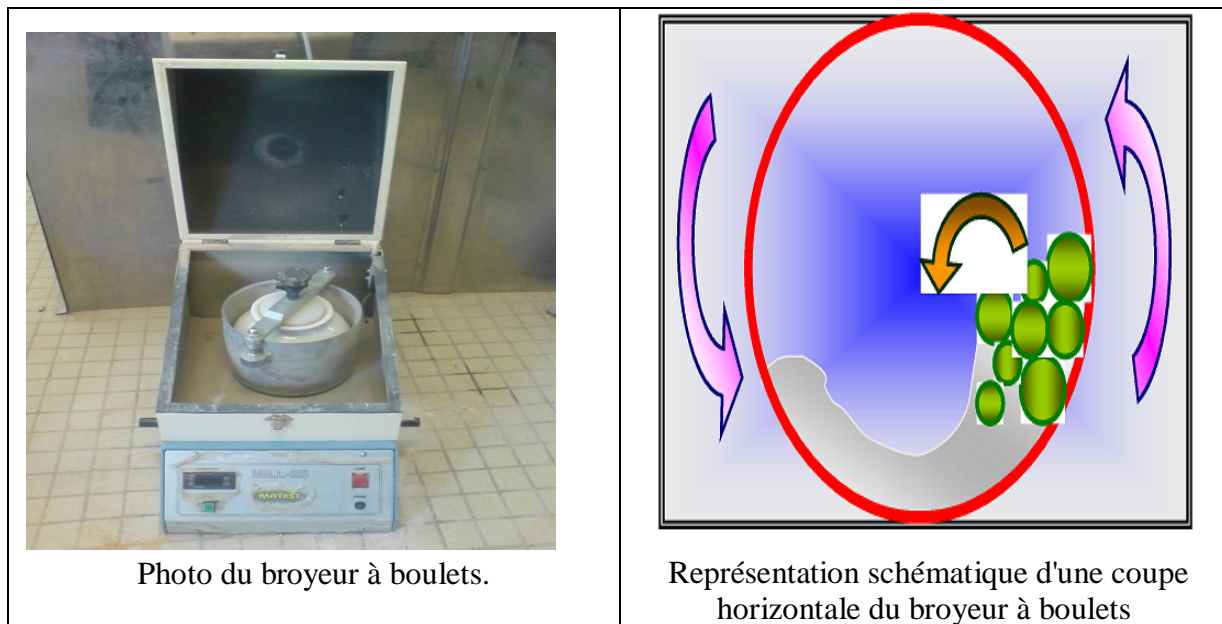


Figure (III.04): broyeur à boulets à axe de rotation Vertical

➤ **Propriété physique du sable de dune broyé :**

Masse Volumique apparente = 1.594 g/cm^3

Masse Volumique absolue = 2.566 g/cm^3

Surface spécifique Blaine (SSB) = $3202 \text{ cm}^2/\text{g}$.

➤ **Composition chimique du sable de dune broyé**

La composition chimique est résumée au tableau (III.15) ci-après :

Tableau (III.15) : Propriétés chimiques du sable de dune broyé (Sidi-Khouiled)

Composition chimique								
Elément	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O 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

III.4.2 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 (III.16) ci-après:

**Tableau (III.16) : Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice
(Fiche technique Granitex)**

Aspect	Poudre
Densité apparente	0.5
Surface spécifique	15 m ² /g
Humidité par étuve à 105° C	< (1%)
Taille des particules	< 0.1 (microns)
Composants :	
SiO₂	> 85%
SO₃	< 2.5 %
Cl	< 0.2 %

III.4.3 Super-plastifiant

Pour réaliser l'objectif de cette étude, un adjuvant super-plastifiant a été utilisé ; le SP haut réducteur d'eau MEDAPLAST SP40, produit par GRANITEX (Oued-Smar Alger), commercialisé sous le nom MEDAPLAST SP40, permettant d'obtenir des bétons de très haute qualité. En plus il permet de diminuer considérablement la demande en eau du béton, ses caractéristiques sont citées dans le tableau (III.17) ci-après :

Tableau (III.17) : 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 %

A ce propos, la formulation du béton retenu pour les essais d'effets d'ajout est résumée sur le tableau (III.18) ci-après :

Tableau (III.7) : Formulations du béton dédié aux essais d'ajouts minéraux

Type de ciment	P. ciment (kg)	P. gravier (kg)	P. sable (kg)	Type ajout en (%)*	Super plastifiant (%)**	P. ajout (kg)	P. eau (kg)
CPJ	400	1150	690	-	5.25	-	187.5
CRS	400	1150	690	-	5.25	-	187.5
CPJ	400	1150	672.25	FS (2.5%)	5.25	17.25	187.5
CPJ	400	1150	672.25	SB (2.5%)	5.25	17.25	187.5
CPJ	400	1150	654.5	FS (5%)	5.25	35.5	187.5
CPJ	400	1150	654.5	SB (5%)	5.25	35.5	187.5
CPJ	400	1150	620	FS (10%)	5.25	70	187.5
CPJ	400	1150	620	SB (10%)	5.25	70	187.5

- * par rapport au poids du sable - ** par rapport au poids du ciment.

III.5 CONFECTION DU BETON

III.5.1 Séquence de malaxage

Les bétons confectionnés sont mélangés dans une bétonnière à axe vertical, voir figure (III.05), 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 de la moitié du super-plastifiant et puis on procède au malaxage durant trois minutes.
- Introduction de la seconde partie du super-plastifiant, et malaxage jusqu'à fluidification (durée variable).



Figure (III.05) : Bétonnière à axe horizontale laboratoire EVRENZA

III.5.2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451)

Cet essai a pour but de déterminer la plasticité du béton par l'utilisation d'un moule tronconique en tôle de dimensions ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm).

Mode opératoire:

Préparation d'un gâché de béton suivant la formulation retenue, puis suivre les étapes indiquées à la norme française P 18-451 [55] ci-après:

- Humidifier la surface d'appui, et huiler légèrement la face intérieure du cône, puis placer l'entonnoir.
- A l'aide d'une pelle creuse, introduire le béton en 3 couches représentant $1/3$ de la hauteur du cône.

- Piquer chaque couche de 25 coups par une tige de piquage de $\varnothing 16$ mm. Ces coups doivent être répartis et pénétrant toutes les couches.
- A la dernière couche et au cours du piquage, ajouter le béton nécessaire pour que le cône soit juste rempli.
- Raser la surface du cône, et régler le niveau par une règle métallique.
- Démouler immédiatement en soulevant le cône avec précaution, lentement, à la verticale et sans secousses.
- Mesurer l'affaissement du béton par une règle, et utilisée le point le plus haut du cône comme un repère du béton affaissé Voir figure (III.06) ci-après :

Pour notre cas l'affaissement du béton est évalué à 8 cm soit un béton moyennement ferme pour les essais de comparaison entre le béton à base CPJ et CRS sans ajouts minéraux ni adjuvant, alors qu'il est de l'ordre de 12.5 pour le béton réalisé pour voir l'effet d'ajouts soit un béton de type plastique.

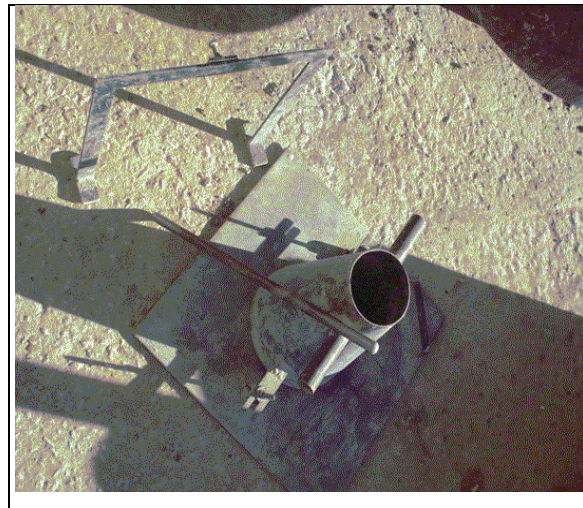


Figure (III.06): Mesure de l'affaissement du béton au labo LTPS

III.5.3 Confection des éprouvettes

Dans cette étude, des moules cylindriques $\varnothing 16$ H32 cm et autres prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³ sont utilisés, selon les normes européennes NF EN 12390 -1 et NF P 18-427, [56] [57] afin de réaliser les différents essais sur les éprouvettes en béton soit : l'absorption capillaires, l'essai à la traction par flexion et l'ultrason.

Après l'essai de traction par flexion, les chutes récupérés sont réglés sous formes d'éprouvettes cubiques (7X7X7) cm³ d'après la norme européenne NF EN 12390-1[56] pour faire l'essai de compression et l'essai au scléromètre.

La confection des éprouvettes, voir figure (III.07), est réalisée selon la formulation du béton étudié précédemment, et selon la norme française NF P18 – 404 [58], où les étapes suivantes ont été respectées:

- Préparer les constituants du mélange sec dans le malaxeur (Gravier, sable, ciment).
- Malaxer le mélange sec une durée de 1 minute.
- Ajouter l'eau de gâchage, puis malaxer le mélange frais une durée de 2 minutes.
- Vérifier la plasticité du béton par mesurer de l'affaissement par l'essai de cône d'Abrams.
- Huiler les moules prismatique, puis introduire le béton aux moules par deux couches.
- Raser et régler la surface du béton par une pelle, puis laisser pour le durcissement.

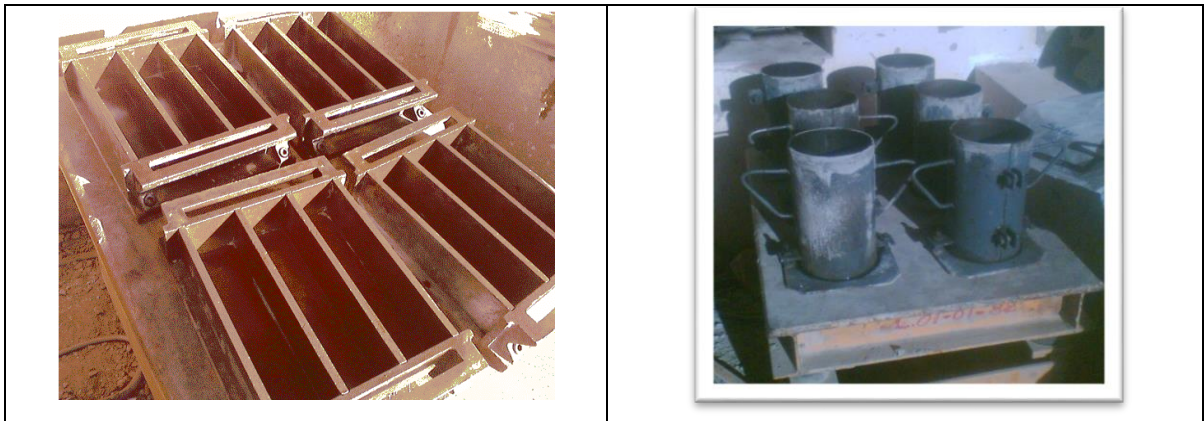


Figure (III.07) : Confection des éprouvettes en béton au labo LTPS

III.6 MODES DE CONSERVATION DES EPROUVETTES EN BETON

Pour la réalisation de ce programme d'étude plusieurs modes de conservation ont été pratiqués, voire figure (III.08), à savoir :

- **Environnement A (Milieu standard)** : les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une température de 20° C± 1°C
- **Environnement B (Nappe phréatique)** : les éprouvettes sont mises dans la nappe phréatique à Said-Othba (Ouargla).
- **Environnement C (Aire libre du laboratoire)** : les éprouvettes sont laissées au laboratoire à l'aire libre jusqu'une nouvelle immersion dans l'eau de la

nappe phréatique. Température ambiante variant entre 20°C-27°C et HR(40-55%)

- **Environnement D (Eau de nappe au laboratoire) :** les éprouvettes sont immergées à des périodes variées dans un bac rempli d'eau de la nappe (eau affleurée de la nappe phréatique de Hai-Ennasr, Ouargla) dont la température et l'humidité sont conformes à celles de l'environnement C.
- **Séchage-mouillage des éprouvettes :**

Pour le cycle mouillage-séchage, il n'existe pas une norme claire, dans la bibliographie concernant les éprouvette en béton, mais il existe une norme dans les standards Indien (Indian Standard IS : 4332 « Part IV »-1968) relative au mouillage et séchage, et gel et dégel concernant les sol-ciment compactés. Le principe de l'essai de la partie mouillage séchage est la détermination des pertes quant au sol-ciment, changements d'humidité, variations de volumes (gonflement et retrait) dus aux répétitions du mouillage et séchage des éprouvettes en sol-ciment durci avec un cycle de 48 heures dont 5 h est réservé au mouillage et 42 heures au séchage à l'étuve à 110°C [59].

Quant à Katherine Hong [60], elle présente dans son étude sur l'effet du cycle mouillage-séchage sur la propagation des chlorides dans le béton, des cycles d'une journée et des cycles de trois jours.

Alors que Nader Ghafoori et Hamidou Diawara [61] dans leur recherche concernant la résistance à l'usure du béton à base de fumée de silice, présentent des cycles mouillage-séchages d'une durée de 1 jour, 3 jours et 7 jours et des cycles mixte (3 jours mouillage et puis 7 jours séchage).

Dans notre étude les cycles ci-après ont été adoptés :

- Cycle d'une journée : soit 24 heures de mouillage suivies de 24 heures de séchage à l'aire libre et ainsi de suite jusqu'au jour d'essai.
- Cycle de 3 jours : soit 72 heures de mouillage suivies de 72 heures de séchage à l'aire libre et ainsi de suite jusqu'au jour d'essai.
- Cycle de 7 jours : soit 7 jours de mouillage continu suivies de 7 jours de séchage continu à l'aire libre et ainsi de suite jusqu'au jour d'essai.
- Cycle de 14 jours : soit 14 jours de mouillage continu suivies de 14 jours de séchage continu à l'aire libre et ainsi de suite jusqu'au jour d'essai.

- Cycle de 30 jours : soit 30 jours de mouillage continu suivies de 30 jours de séchage continu à l'aire libre et ainsi de suite jusqu'au jour d'essai.

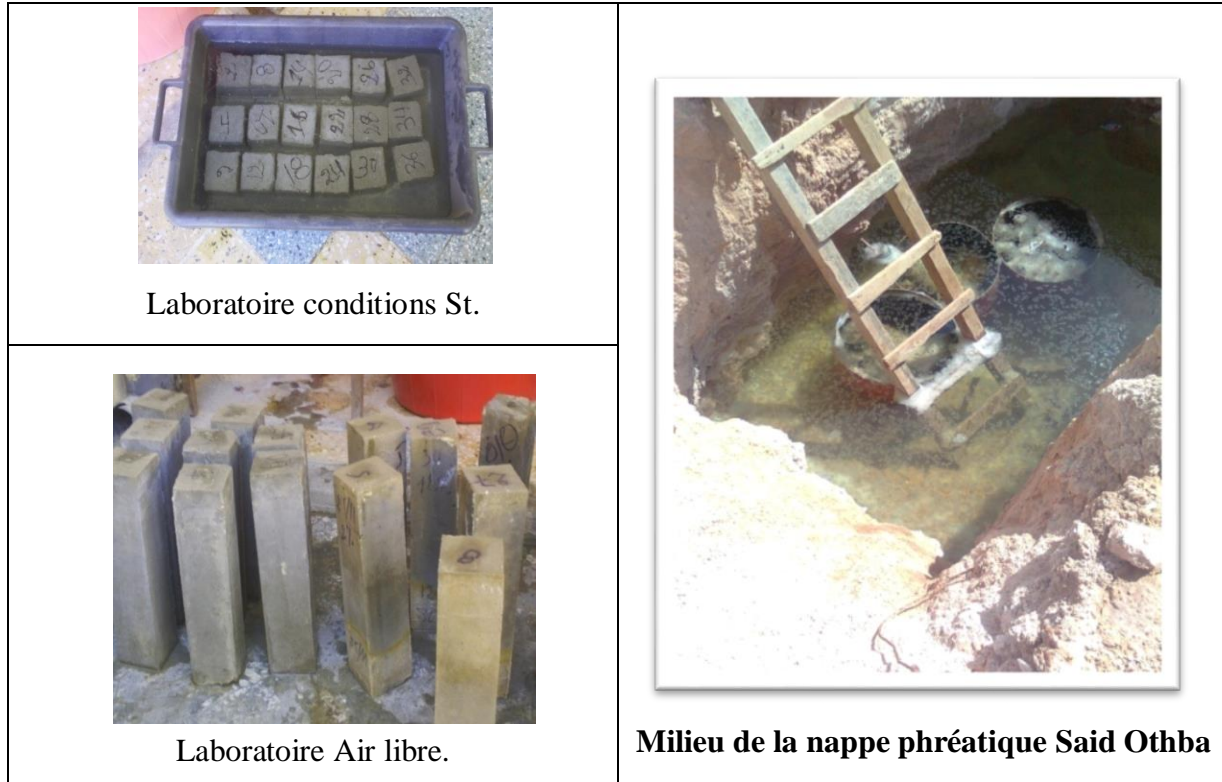


Figure (III.8): Mode de conservation des éprouvettes

III.7 ESSAIS MECANIKES REALISES

III.7.1 Essais de compression (NF P 18-406)

III.7.2 Résistance à la traction par flexion

Les essais de la résistance à la traction par flexion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm³ 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- appareil de traction par flexion (Voir figure (III.10) et figure (III.11)).

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 près (NF P 18-407) [64].



Figure (III.10) : Appareil de traction par flexion

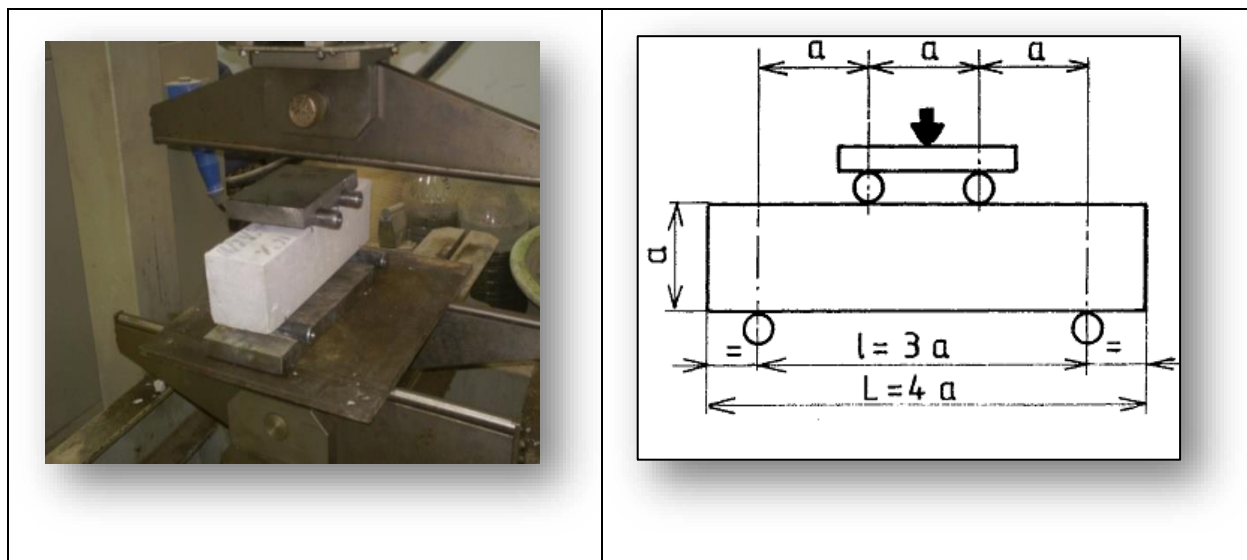


Figure (III.11) : Positions d'appuis à l'appareil de traction par flexion

➤ **Expression des résultats :**

Retenir pour la charge de rupture la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et calculer, à 0.1 MPa près, la résistance correspondante R_f en Méga-Pascals, par le quotient de la formule (III.31) suivante :

$$R_f = \frac{30 f}{a^2} \dots\dots\dots(III.31)$$

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

III.8 ESSAIS PHYSIQUES

Les essais physiques réalisés se résument à l'essai de la porosité accessible, l'absorption capillaire et la mesure de la vitesse de son.

III.8.1 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 :

- ▶ Mettre les éprouvettes dans une étuve à 103°C pendant au moins 24 heures jusqu'à obtenir 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 (III.32) suivante :

$$P(\%) = ((B-A)/B) \times 100 \dots \dots \dots (III.32)$$

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)

III.8.2 Essai d'Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du béton.

En effet, le béton est un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition (rapport E/L Equivalent, additions

minérales, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type de pore, des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur des capillaires. Le liquide monte d'autant plus haut que le diamètre du capillaire est petit.

- **Conduite de l'essai [65]**

Après démoulage les échantillons de forme prismatique (7 x 7 x 28) cm³ sont conservés jusqu'au jour (j). Déshydratée à l'étuve, l'éprouvette subit un sciage sur une face et un traitement imperméabilisant sur les autres faces (résine époxy ou paraffine). L'éprouvette est ensuite posée dans un bac contenant du sable saturé d'eau sur sa face sciée. Les éprouvettes sont ensuite immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 3 mm à l'aide de cales voir Figure (III.3)

On mesure ensuite en fonction du temps, l'accroissement du poids de l'éprouvette du à la montée capillaire de l'eau.

L'absorption d'eau est souvent représentée en poids par unité de surface absorbante (g/cm²) en fonction du temps (\sqrt{t} avec t en heures).

Quand il s'agit de mesures comparatives en fonction de certains paramètres elle est exprimée à 72h par la relation (III.34) suivante :

$$A. C = \frac{100 P}{S\sqrt{t}} \dots\dots\dots (III.34)$$

Où P : Poids de l'eau en (g).

S : surface de section inférieure de l'éprouvette en contact avec l'eau en (cm²).

T : temps en heurs.

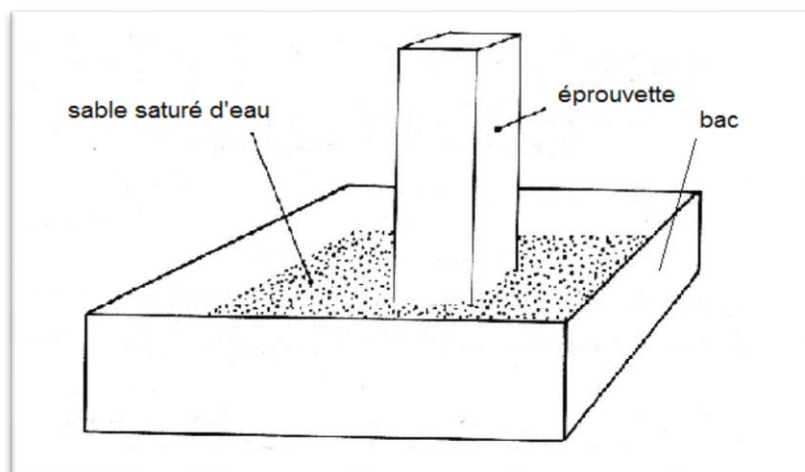


Figure (III.12) : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité

III.8.3 Mesure d'auscultation sonore

L'objectif de cet essai est d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons par les méthodes d'auscultation sonore telles que décrite dans la norme P 18-418 [66]. Cet essai est complété par des essais mécaniques classiques. Les paramètres mesurés sont la Vitesse et l'atténuation sonore des ondes de compression (ondes longitudinales) se propageant dans le béton. La figure (III.13) montre l'appareil de mesure d'auscultation sonore utilisé pour la réalisation de nos essais.



Figure (III.13): Appareil de mesure d'auscultation sonore

Ces méthodes sont applicables aux contrôles non destructifs par ultrasons. Elles permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques du milieu ausculté et d'apprécier l'homogénéité (en détectant des vides, délaminages et microfissurations).

La vitesse de propagation du son est calculée par la formule (III.35) suivante :

$$V = \frac{d}{t} \text{ (m/s)} \quad \text{(III.35)}$$

Avec :

V: Vitesse de propagation d'onde sonore, exprimé en m/s.

t : Temps de propagation d'onde sonore, exprimé en μ secondes.

d: Distance entre les transducteurs, exprimé en mètre.

III.9 CONCLUSION

Lors de ce programme d'étude un nombre d'essai a été effectué commençant par l'identification des matériaux utilisés (sable, gravier ciment, eau), ajouts minéraux, superplastifiant, la définition des essais mécaniques et physiques à réaliser ainsi que les modes de conservation des éprouvettes.

Un nombre de 3 à 4 éprouvettes par essai a été respecté pour chaque essai.

Il y a à noter que les modes de conservation ont simulé les pratiques réelles à savoir :

- La conservation sous les conditions standards afin de définir le béton témoins.
- La conservation permanente dans la nappe afin de définir l'ampleur de l'agression de la nappe phréatique de Ouargla.
- L'immersion tardive des éprouvettes en béton afin de voir le comportement des éléments préfabriqués en béton mise en place (dans la nappe) après un bon moment de leur fabrication.
- L'immersion cyclique dans les eaux de la nappe afin de voir le comportement du béton lors d'une agression cyclique des eaux de la nappe due à la fluctuation naturelle de celle-ci.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DICUSSIONS

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DICUSSIONS

IV.1 INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, les résultats des essais soient destructifs ou non destructifs vont être exposés. L'objectif est de déterminer les résultats de l'évolution des propriétés physiques, mécaniques et chimiques des éprouvettes de différents types et modes de conservation et qui seront comparés avec les résultats des éprouvettes témoins. Ces essais ont été réalisés au laboratoire EVRNZA de l'université de Ouargla, le LTPS à l'unité de Ouargla et à Ghardaïa, ainsi que le laboratoire de l'ANRH (Ouargla).

IV.2 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS A L'EFFET DE LA NAPPE PHREATIQUE

Les résultats des essais sont exposés et discutés ci-après :

IV.2.1 Essai de résistance à la compression (R_c)

Les essais de la compression ont été réalisés au laboratoire LTPS unité d'Ouargla sur des éprouvettes cylindriques ($\varnothing 16$ H32 cm).

Lors de ces essais de compression, l'aspect interne des éprouvettes écrasées a montré une bonne homogénéité. Ci-après sur la figure (IV.01), les résultats de la résistance à la compression sont exposés.

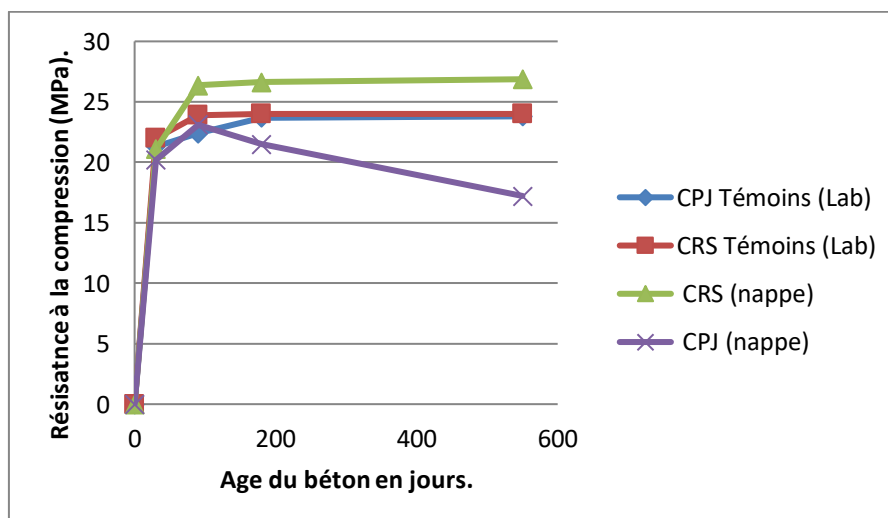


Figure (IV.01): Evolution de la résistance à la compression

Les courbes d'évolution de la résistance à la compression après 28 jours d'âge montrées sur la figure (IV.01) ont une forme ordinaire, courbe croissante pour l'ensemble des éprouvettes de béton sauf pour celles du béton à base de ciment CPJ au milieu de la nappe.

Ceci montre que le milieu de la nappe de Ouargla a un effet négatif pour l'évolution de la résistance à la compression du béton à base de ciment CPJ, alors qu'il est assez favorable pour l'évolution de cette résistance si le béton est à base de ciment CRS.

A ce propos, un gain de résistance à la compression de l'ordre de 12% a été enregistré à l'âge de 18 mois pour le béton à base de ciment CRS comparativement au béton témoin alors qu'une réduction de 28 % a été enregistrée pour le béton à base de ciment CPJ au même âge et aux mêmes conditions.

IV.2.2 Essai de résistance à la traction par flexion (R_t)

Les essais de la flexion ont été réalisés au laboratoire de l'institut de Génie-Civil à l'Université Kasdi Merbah.

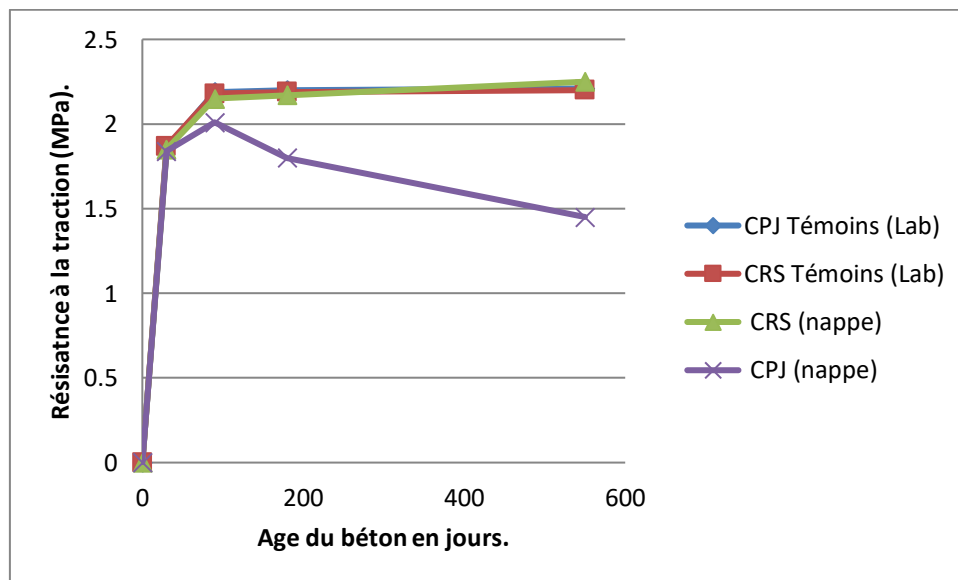


Figure (IV.02): Evolution de la résistance à la traction

La figure (IV.02) montre que les courbes d'évolution de la résistance à la traction au-delà de 28 jours d'âge ont une forme ordinaire, courbe croissante pour l'ensemble des éprouvettes de béton sauf pour celles du béton à base de ciment CPJ au milieu de la nappe.

Ceci montre aussi que le milieu de la nappe de Ouargla a un effet négatif pour l'évolution de la résistance à la traction du béton à base de ciment CPJ alors qu'il est assez favorable pour l'évolution de cette résistance si le béton est à base de ciment CRS.

A ce propos, un gain non significatif de résistance à la traction de l'ordre de 2.3 % a été enregistré à l'âge de 18 mois pour le béton à base de ciment CRS comparativement au béton

témoin alors qu'une réduction de 34.4 % a été enregistrée pour le béton à base de ciment CPJ dans les mêmes conditions et au même âge.

IV.2.3 Essai d'auscultation dynamique

Les résultats de mesure après application de l'essai d'auscultation dynamique, soit la vitesse de la propagation du son appliqué sur les éprouvettes avant écrasement, sont regroupés sur la figure (IV.03) ci-après :

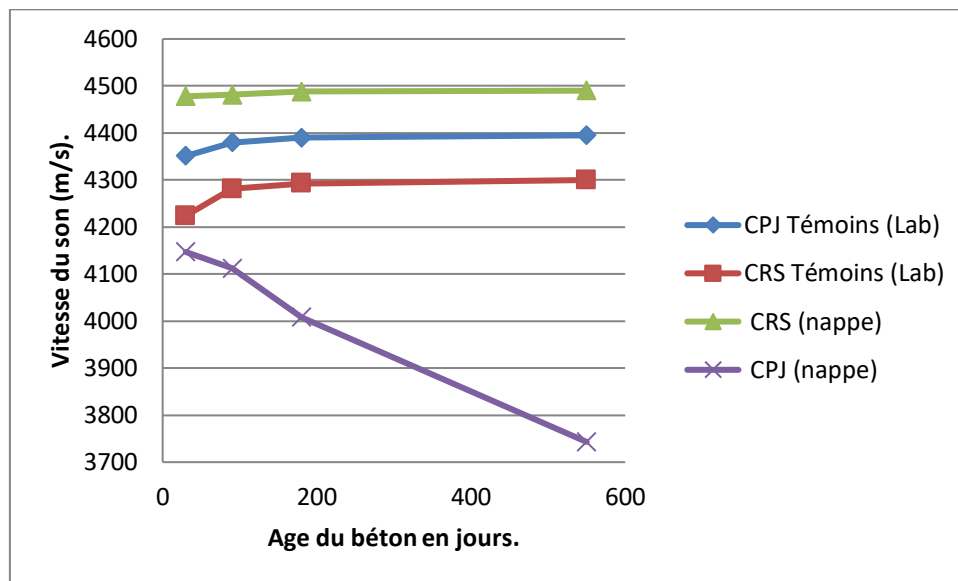


Figure (IV.03): Vitesse du son dans le béton des différents milieux

La figure (IV.03) montre la densité des bétons dans différents milieux, le béton à base de ciment CRS conservé dans la nappe phréatique est le plus dense et alors que celui à base de ciment CPJ est le moins dense, l'allure des courbes de propagation de son à travers les différentes éprouvettes confirme les résultats trouvés dans les tests destructifs de résistance mécanique.

IV.2.4 Essai D'absorption Capillaire

A 90 jours d'âge du béton, les résultats de l'essai d'absorption capillaire qui consiste à la mesure des absorptions d'eau à la pression atmosphérique, sont représentés sur la figure (IV.04) ci-après :

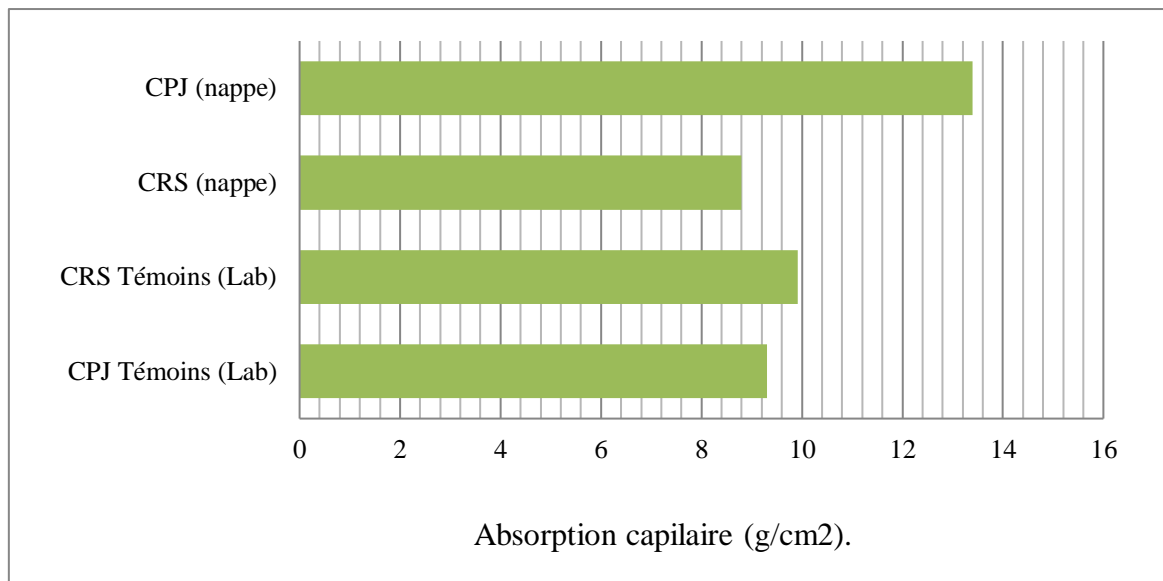


Figure (IV.04): Absorption capillaire des éprouvettes dans différents milieux (témoin et nappe phréatique)

D'après la figure (IV.04), les éprouvettes en béton à base de ciment CRS, conservées dans la nappe phréatique sont les moins absorbant avec 8.8 g/cm^2 . Alors que celles à base de ciment CPJ, conservées dans la nappe phréatique sont les plus absorbant avec 13.4 g/cm^2 . Comparativement aux éprouvettes témoins, le béton à base de ciment CRS présente dans la nappe phréatique une réduction de porosité de l'ordre de 11 %, alors que le ciment à base de ciment CPJ présente une augmentation de porosité de 44 %.

Ce résultat de l'absorption capillaire du béton à base de ciment CRS qui se trouve dans la nappe phréatique est lié à la cristallisation de sel à la surface des éprouvettes due elle-même au type de ciment qui réagit favorablement avec l'eau agressive de la nappe et crée une couche protectrice qui empêche les agents agressifs d'y pénétrer comparativement au béton à base de ciment CPJ qui est dépourvu de cette qualité et qui réagit défavorablement avec le milieu de la nappe en déclenchant un processus de dégradation dans le temps, du moment que les deux bétons sont préparés identiquement et exposés aux mêmes conditions.

IV.2.5 Analyses chimiques

IV.2.5.1 Analyse chimique des cristaux prélevés de la peau des éprouvettes conservées dans la nappe phréatique

Les résultats d'analyse chimique sont résumés dans le tableau (IV.01) suivant :

Tableau (IV.01): Résultats d'analyses chimiques des cristaux de la peau des éprouvettes

Élément Chimique	Teneur dans l'échantillon
Chlorure de sodium NaCl en %	52.51
Chlorures Cl ⁻ en %	28.84
Gypse Ca SO ₄ .2H ₂ O en %	22.35
Sulfates S O ₃ en %	5.37
Insoluble en %	9.73

D'après le tableau (IV.01), les cristaux trouvés à la surface des éprouvettes de béton sont à 52.51 % de chlore de sodium, ce qui justifie la morphologie, le gout et la couleur des cristaux. L'échantillon contient des éléments naturellement détectables dans le sol voir 9.73 % d'insolubles, 5.37 % de sulfates et 22.35 % de gypse.

IV.2.5.2 Analyses chimiques du béton prélevé des éprouvettes conservées dans la nappe phréatique

Les résultats d'analyse chimique des échantillons prélevés de la couche superficielle des éprouvettes de béton conservées dans la nappe phréatique sont regroupés sur le tableau (IV.2) ci-après :

Tableau (IV-2): Résultats d'analyse chimique de béton dans la nappe phréatique

Élément Chimique	Teneur dans l'échantillon CRS	Teneur dans l'échantillon CPJ
Insoluble en %	23.41	18.43
Sulfates SO ₃ en %	1.43	5.31
Gypse CaSO ₄ .2H ₂ O en %	7.70	9.07
Carbonate de calcium en %	41.00	38.00
Chlorures Cl ⁻ en %	0.418	0.215
Chlorure de sodium NaCl en %	2.325	4.353

IV.2.6 Interprétation des résultats de l'effet de nappe

Conformément aux indications données par Wieslaw Kurdowski [67] au sujet de l'attaque des sulfates dans son ouvrage (Ciment and Concrete Chemistry, chapitre 6) et concorde avec les conclusions de C.Vernet [68] à propos du mécanisme de défense qui se manifeste par une régulation des concentration de la solution des capillaires, faisant intervenir

les équilibres chimiques des hydrates, ainsi que la formation de barrières diffusionnelles, par lesquelles l'élément agresseur lui-même est utilisé pour construire les couches protectrices d'où la création de la couche de cristaux collés constatée à la surface des éprouvettes en ciment CRS. La nappe phréatique de Ouargla a obéi à cette règle de défense dans le béton à base de ciment CRS, elle augmente la qualité de ce béton, ce qui lui offre une durée de vie importante. Alors que pour le béton à base de ciment CPJ la nappe s'avère agressive, les réactions chimiques entre ce type de ciment et les éléments dissouts dans les eaux de la nappe, entre autres les sulfates, ont un effet dégradant dans le temps ce qui se répercute sur les résultats trouvés pour ce genre de béton.

IV.3 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS A L'EFFET DE L'AJOUT DU SDB ET DE LA FS

Pour l'analyse de l'effet de la nappe phréatique de Ouargla sur le béton à base de matériaux locaux à savoir le sable de dune broyé (SDB) et la fumée de silice (FS), à différent pourcentage d'ajout, le programme d'essai a pris en compte la notation ci-après :

- CRS : béton en ciment CRS.
- CPJ : béton en ciment CPJ.
- 2.5 SBCPJ : béton en ciment CPJ, avec ajout de 2.5% de Sable de dune broyé.
- 5 SBCPJ : béton en ciment CPJ, avec ajout de 5% de Sable de dune broyé.
- 10 SBCPJ : béton en ciment CPJ, avec ajout de 10% de Sable de dune broyé.
- 2.5 FSCPJ : béton en ciment CPJ, avec ajout de 2.5% de fumée de silice.
- 5FSCPJ : béton en ciment CPJ, avec ajout de 5% de fumée de silice.
- 10 FSCPJ : béton en ciment CPJ, avec ajout de 10% de fumée de silice.

IV.3.1 Résistances à la compression du béton sous les conditions standards

Les éprouvettes utilisées pour la réalisation de l'essai de la résistance à la compression, dans ce programme d'effet d'ajout, sont des éprouvettes cubiques (7x7x7) cm, issues de la réalisation de l'essai de la résistance à la traction.

L'évolution de la résistance à la compression des différents types de béton conservé dans les conditions standards, est présentée sur la figure (IV.5).

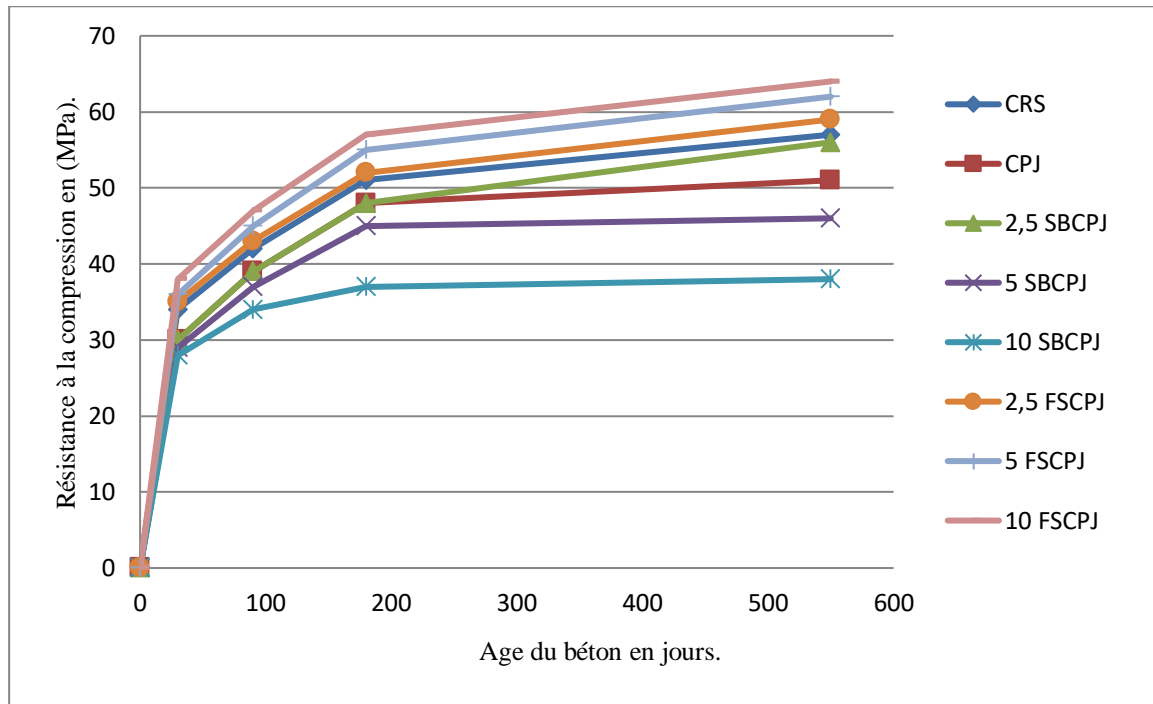


Figure (IV05) : Evolution de la résistance à la compression du béton conservé sous les conditions standards

La figure (IV.05) montre une évolution ordinaire de la résistance à la compression des différents types de béton bien qu'elles n'évoluent pas du même ordre de grandeur.

A l'âge de 18 mois, la résistance à la compression des éprouvettes testées peut être ordonnée de la plus élevée à la moins élevée comme suit : 10 FSCPJ, 5 FSCPJ, 2.5 FSCPJ, CRS, 2.5 SBCPJ, CPJ, 5 SBCPJ, et puis 10 SBCPJ, ayant les valeurs maximale et minimale respectives de 64 ± 0.04 MPa et 38 ± 0.06 MPa.

L'ajout de la fumée de silice au béton à base de ciment CPJ présente les meilleurs résultats de résistance mécanique sous les conditions standards, l'augmentation de l'ajout jusqu'à 10% permet une augmentation de 25.5% par rapport à celui sans ajout.

Par contre l'ajout du sable de dunes broyé au ciment CPJ 42.5 n'a pas montré le même effet. L'ajout de au-delà de 2.5% de sable de dunes broyé montre des régressions comparativement au béton à base de ciment CPJ 42.5 sans ajout où une réduction de 10% a été enregistrée pour un pourcentage d'ajout de 5% et une réduction de 25.5% pour le pourcentage 10%.

IV.3.2 Résistances à la compression du béton dans la nappe phréatique

L'évolution de la résistance à la compression des différents types de béton conservé dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla, est présentée sur la figure (IV.06).

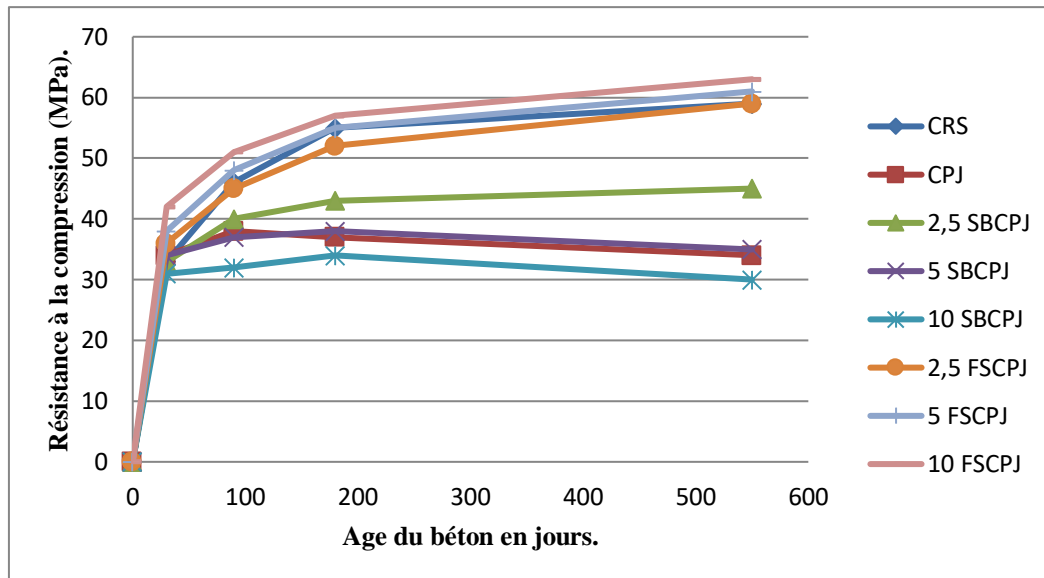


Figure (IV.06) : Evolution de la résistance à la compression du béton conservé dans l'eau de la nappe phréatique

La figure (IV.06) montre une évolution ordinaire de la résistance à la compression, dans les eaux de nappe phréatique de Ouargla, des bétons à base de ciment CRS, ou CPJ avec ajout de fumée de silice. Tandis que celle du béton à base de ciment CPJ ayant un ajout de 5% et 10% de sable de dunes broyé ont présenté une régression qui débute à l'âge de trois mois. Le béton à base de ciment CPJ42.5 ayant un ajout de 2.5% de sable de dune broyé a maintenu son évolution jusqu'à 18 mois d'âge.

A l'âge de 18 mois, la résistance à la compression des éprouvettes testées peut être ordonnée de la plus élevée à la moins élevée comme suit : 10 FSCPJ, 5 FSCPJ, 2.5 FSCPJ, CRS, 2.5 SBCPJ, 5 SBCPJ, CPJ et puis 10 SBCPJ, ayant les valeurs maximale et minimale respectives de 63 ± 0.05 MPa et 30 ± 0.07 MPa.

L'ajout de la fumée de silice au béton à base de ciment CPJ présente les meilleurs résultats de résistance mécanique dans les eaux de la nappe phréatique, l'augmentation de l'ajout jusqu'à 10% permet une augmentation de 85 % par rapport à celui sans ajout et une augmentation de l'ordre de 7% par rapport au béton à base de ciment CRS.

Par contre l'ajout du sable de dunes broyé au ciment CPJ n'a pas montré le même effet. L'ajout de 2.5% de sable de dunes au béton à base de ciment CPJ a maintenu l'évolution de la résistance à la compression jusqu'à l'âge de 18 mois où un gain de 32 % a été enregistré comparativement au béton CPJ sans ajout.

L'ajout de 5% de sable de dunes broyé au ciment CPJ présente un gain non significatif par rapport au béton sans ajout mais l'ajout de 10% de sable de dunes broyé présente une réduction de 12 % comparativement au béton à base de CPJ seul et une réduction de 50% par rapport au béton à base de ciment CRS. Ces résultats concordent encore avec ceux trouvés par A. Kadri [22].

IV.3.3 Résistances à la traction du béton sous les conditions standards

L'évolution de la résistance à la traction des différents types de béton conservé dans les conditions standards, est présentée sur la figure (IV.07) ci-après :

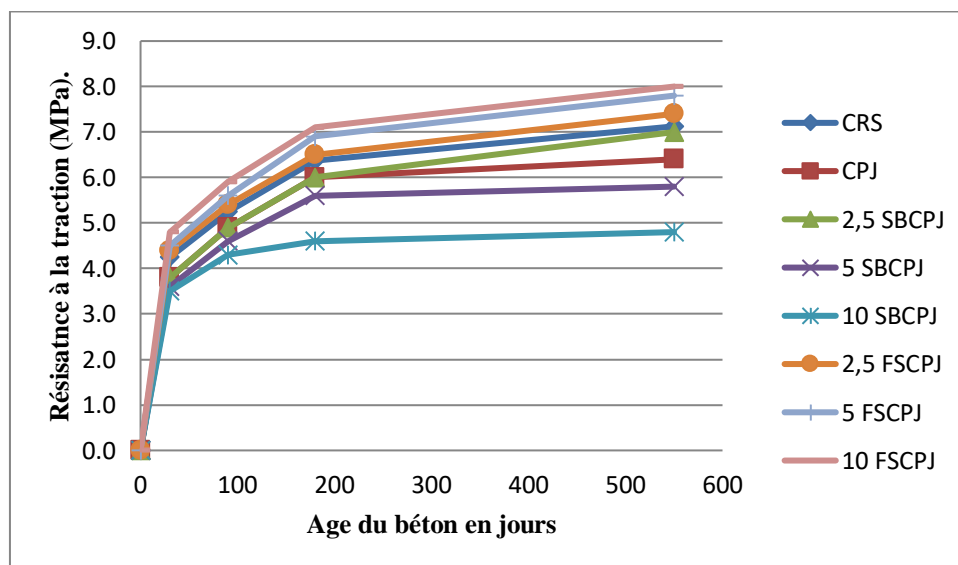


Figure (IV.07) : Evolution de la résistance à la traction du béton conservé sous les conditions standards

La figure (IV.07) montre aussi une évolution ordinaire ayant la même allure que celle de la résistance à la compression des différents types de béton bien qu'elles n'évoluent pas du même ordre de grandeur.

A l'âge de 18 mois, la résistance à la traction des éprouvettes testées peut être ordonnée de la plus élevée à la moins élevée comme suit : 10 FSCPJ, 5 FSCPJ, 2.5 FSCPJ,

CRS, 2.5 SBCPJ, CPJ, 5 SBCPJ, et puis 10 SBCPJ, ayant les valeurs maximale et minimale respectives de 8 ± 0.03 MPa et 4.8 ± 0.04 MPa.

L'ajout de la fumée de silice au béton à base de ciment CPJ présente les meilleurs résultats de résistance mécanique sous les conditions standards, l'augmentation de l'ajout jusqu'à 10% permet une augmentation de 25 % par rapport à celui sans ajout.

Par contre l'ajout du sable de dune broyé au ciment CPJ n'a pas montré le même comportement, l'ajout de sable de dune au-delà de 2.5% montre des régressions comparativement au béton à base de ciment CPJ sans ajout à savoir une réduction de 9 % pour un pourcentage d'ajout de 5% et une réduction de 25 % pour le pourcentage 10%.

IV.3.4 Résistances à la traction du béton dans la nappe phréatique

L'évolution de la résistance à la traction des différents types de béton conservé dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla, est présentée sur la figure (IV.08) ci-après :

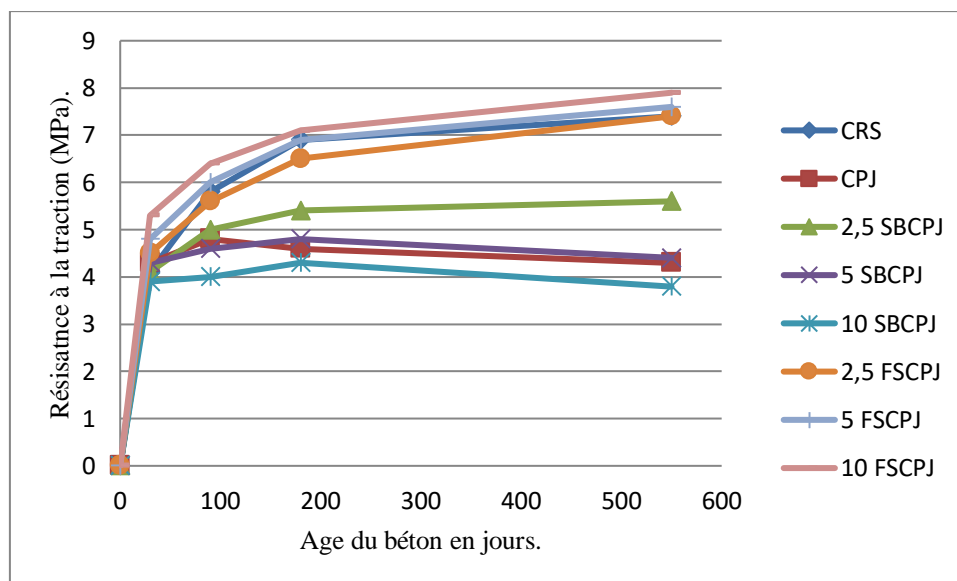


Figure (IV.08) : Evolution de la résistance à la traction du béton conservé dans l'eau de la nappe phréatique

La figure (IV.8) montre une évolution ordinaire de la résistance à la traction, dans les eaux de nappe phréatique de Ouargla, des bétons à base de ciment CRS, ou CPJ avec ajout de fumée de silice. Tandis que ceux à base de ciment CPJ ayant un ajout de 5% et 10% de sable de dune broyé ont présenté une régression qui débute à l'âge de trois mois. Le béton à base de ciment CPJ ayant un ajout de 2.5% de sable de dune broyée a maintenu son évolution jusqu'à 18 mois d'âge.

A l'âge de 18 mois, la résistance à la traction des éprouvettes testées peut être ordonnée de la plus élevée à la moins élevée comme suit : 10 FSCPJ, 5 FSCPJ, 2.5 FSCPJ, CRS, 2.5 SBPJP, 5 SBPJP, CPJ et puis 10 SBPJP, ayant les valeurs maximale et minimale respectives de 7.9 ± 0.04 MPa et 3.8 ± 0.08 MPa.

L'ajout de la fumée de silice au béton à base de ciment CPJ présente les meilleurs résultats de résistance mécanique dans les eaux de la nappe phréatique, l'augmentation de l'ajout jusqu'à 10% permet une augmentation de 83 % de résistance par rapport à celui sans ajout et une augmentation de l'ordre de 8% par rapport au béton à base de ciment CRS.

Par contre l'ajout du sable de dune broyé au ciment CPJ n'a pas montré le même comportement, l'ajout de 2.5% de sable de dune au béton à base de ciment CPJ à maintenu l'évolution de la résistance à la traction jusqu'à l'âge de 18 mois où un gain de 30 % a été enregistré comparativement au béton CPJ sans ajout.

L'ajout de 5% de sable de dune broyé au ciment CPJ présente un gain non significatif par rapport au béton sans ajout mais l'ajout de 10% de sable de dune broyé présente une réduction de 11 % comparativement au béton à base de CPJ et une réduction de 48% par rapport au béton à base de ciment CRS.

IV.3.5 Porosité accessible du béton dans la nappe phréatique

A 90 jours d'âge du béton, l'essai de porosité accessible est appliqué en utilisant des éprouvettes (7 x 7 x 7) cm³ préparées selon les différentes formulations afin de mesurer les porosités existantes au niveau des différents types de béton conservés dans l'eau de la nappe phréatique de Ouargla. Les résultats de mesure sont représentés sur la figure (IV.09) ci-après :

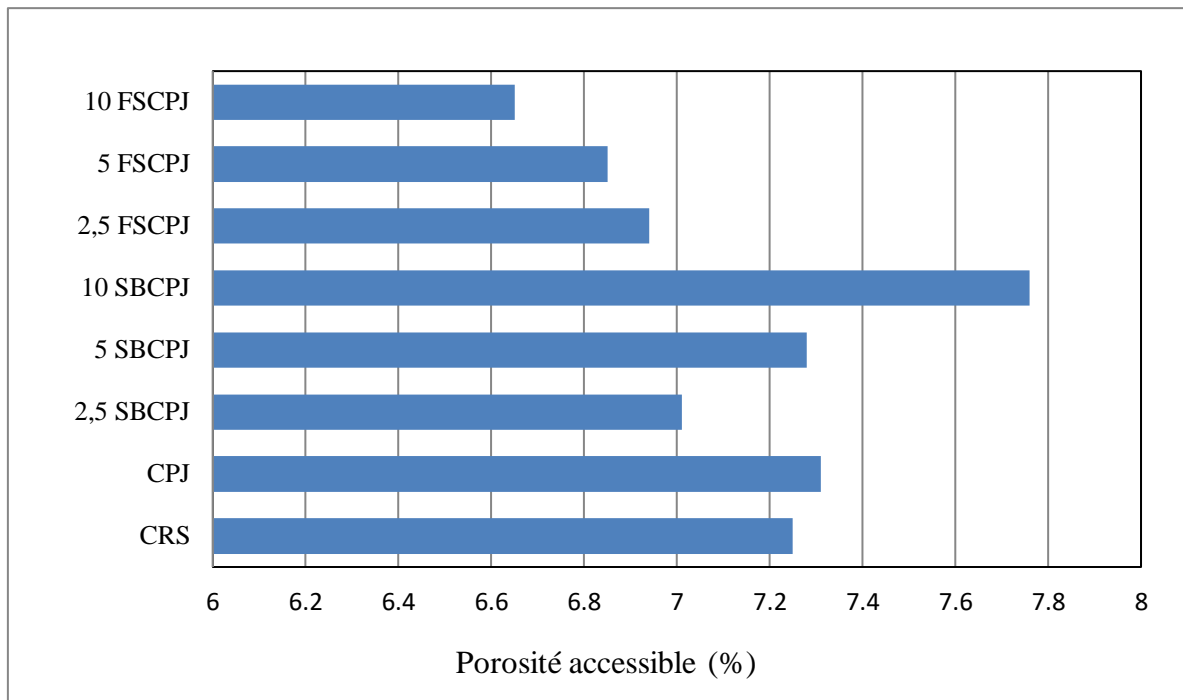


Figure (IV.09) : Porosité accessible du béton conservé dans l'eau de la nappe phréatique

La figure (IV.09) montre que le béton à base de ciment CPJ ayant un ajout de 10 % de fumée de silice est le moins poreux alors que celui à base de ciment CPJ ayant un ajout de 10% de sable de dune broyé présente le béton le plus poreux.

L'ajout de la fumée de silice au ciment CPJ diminue la porosité du béton et même pour l'ajout de sable de dune broyé de l'ordre de 2.5 ou 5 % qui diminue la porosité du béton à base de ciment CPJ comparativement à un béton sans ajout, alors qu'au-delà de cette valeur, un effet inverse est enregistré, soit l'augmentation de 6% de la porosité pour un ajout de 10% de sable de dune broyé comparativement à un béton à base de ciment CPJ sans ajout.

IV.3.6 Interprétation des résultats de l'effet d'ajouts minéraux au béton dans la nappe phréatique

L'ajout de la fumée de silice au ciment CPJ augmente la résistance mécanique et diminue la porosité du béton, et même pour l'ajout de sable de dune broyé, qui est lui aussi à base de silice, alors que ce dernier (sable broyé) diffère en terme de finesse, à ce propos les résultats obtenus pour l'ajout de la fumée de silice sont très satisfaisant comparativement à

ceux du l'ajout de sable de dune broyé, comme indiqué par M. Buil et J.-P. Olivier [33] quant l'ajout de la fumée de silice qui permet de réduire très significativement les pores et que la texture du béton à base se fumé se silice densifie l'auréole des transitions au voisinage des granulats.

IV.4 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS AU RETARD DE L'EXPOSITION DU BETON DANS LA NAPPE PHREATIQUE

Le retard de l'exposition du béton dans la nappe phréatique représente l'effet de celle-ci dans le cas où le béton est préfabriqué et puis mis en place après un certain moment, il s'agit par exemple des regards ou semelles préfabriqués en béton réalisés en usine ou dans les zones de préfabrication et ensuite remis sur les lieux où ils seront en contact avec les eaux de la nappe phréatique.

IV.4.1 Résultats de l'essai de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours

La figure (IV.10) présente les résultats de la résistance à la compression à 28 jours d'âge des éprouvettes en béton, à base de ciment CRS, retardées de 1 jour, 3 jours, 7 jours et 14 jours avant l'immersion dans l'eau de la nappe phréatique de Ouargla.

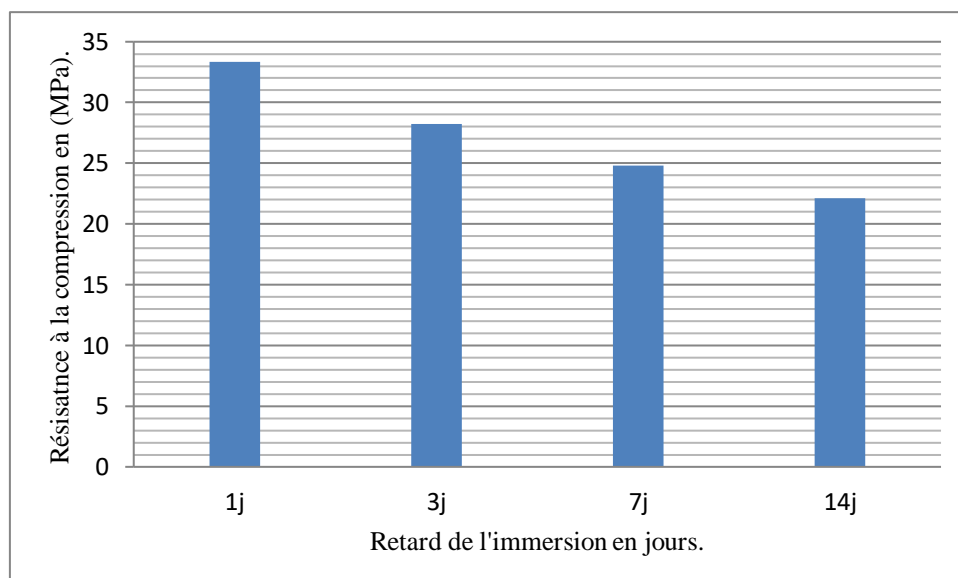


Figure (IV.10) : Résistance à la compression des éprouvettes à 28 jours d'âge après différents durées de retards avant l'immersion dans l'eau de la nappe phréatique

D'après la figure (IV.10), la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du retard de l'immersion. La résistance maximale enregistrée sur les différents délais de retard l'âge de 28 est de 33,33 MPa correspondant à un retard d'immersion d'une journée. Alors que la valeur minimale est de 22.1 MPa qui correspond à 14 jours de retard avant l'immersion dans l'eau de la nappe phréatique soit une réduction de 34 %.

IV.4.2 Résultats de l'essai de la résistance à la compression à l'âge de 60 jours

La figure (IV.11) présente les résultats de la résistance à la compression à 60 jours d'âge de maturation du béton ayant subi les durées de retard d'immersion de 1 jour, 3 jours, 7 jours, 14 jours et 28 jours avant d'être mis dans l'eau de la nappe phréatique.

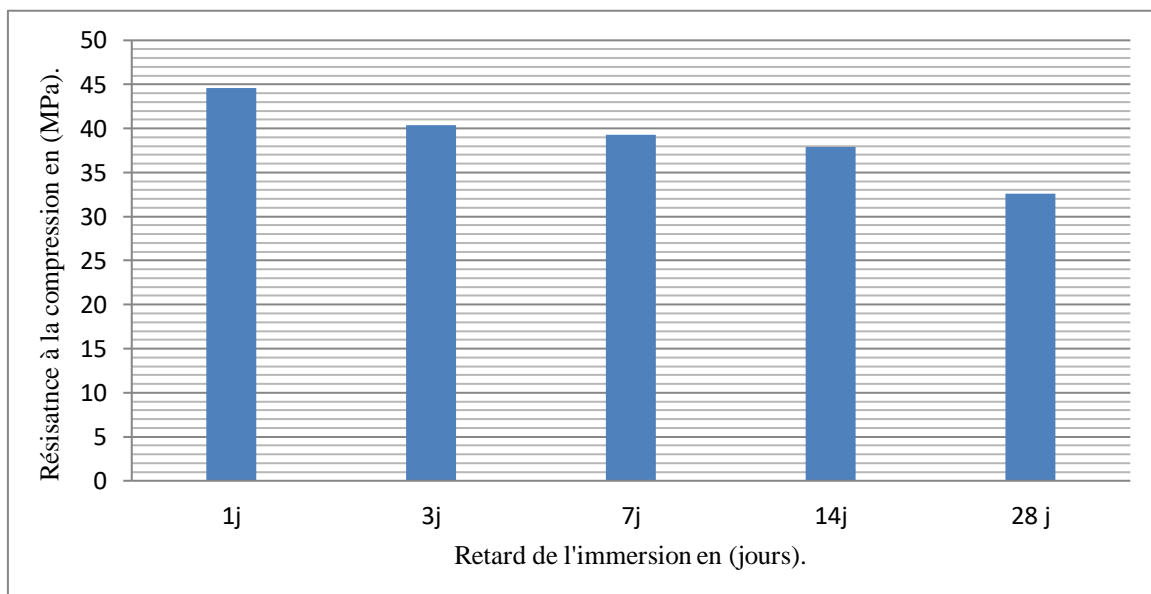


Figure (IV.11) : Résistance à la compression des éprouvettes à 60 jours d'âge à différentes durées de retard avant l'immersion dans la nappe phréatique

La Figure (IV.11) montre encore que plus le retard avant l'immersion des éprouvettes en béton dans les eaux de la nappe phréatique augmente plus la résistance diminue. La valeur maximale de résistance à la compression est obtenue pour une durée de retard avant l'immersion d'une journée alors que la valeur minimale est obtenue pour une durée de retard avant l'immersion de 28 jours. Une différence de 12.04 MPa qui est équivalente à une réduction de 27 %.

IV.4.3 Résultats de l'essai de la résistance à traction par flexion

La figure (IV.12) présente les résultats de la résistance à la traction jusqu'à 60 jours d'âge des éprouvettes en béton, à base de ciment CRS, retardées de 1 jour, 3 jours, 7 jours, 14 jours et 28 jours avant l'immersion dans l'eau de la nappe phréatique de Ouargla.

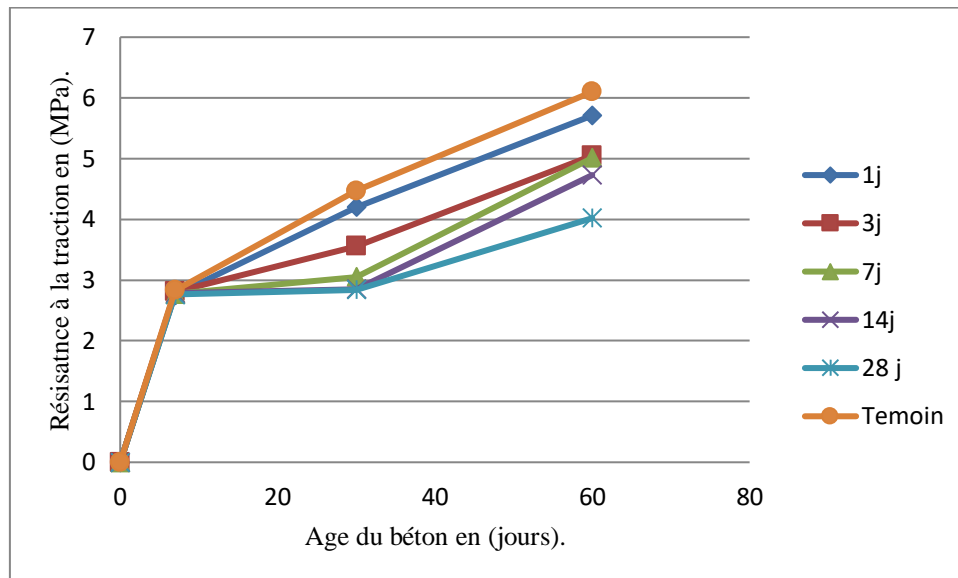


Figure (IV.12) : Evolution de la résistance à la traction par flexion des éprouvettes à différentes durées de retard d'immersion dans la nappe phréatique

La figure (IV.12) illustre l'évolution de la résistance à la traction par flexion des éprouvettes, qui prend une allure ordinaire notamment celle du béton témoin immergé immédiatement après démoulage dans l'eau de la nappe phréatique sans aucun retard. Le retard d'une journée avant l'immersion des éprouvettes en béton à base de ciment CRS présente les meilleures valeurs de résistance comparativement aux autres durées de retard avant l'exposition dans le milieu de la nappe phréatique. Chaque fois que la durée du retard avant l'immersion augmente la résistance à la traction diminue comparativement au béton qui n'a connu aucun retard.

A 60 jours d'âge, le retard avant l'immersion de 1, 3, 7, 14, et 28 jours, présente respectivement les régressions 6%, 17%, 18%, 22.5% et 34% comparativement au béton témoin.

IV.4.4 Essai d’auscultation dynamique

Les résultats de l’essai de la vitesse du son sont présentés sur la figure (IV.13) ci-après :

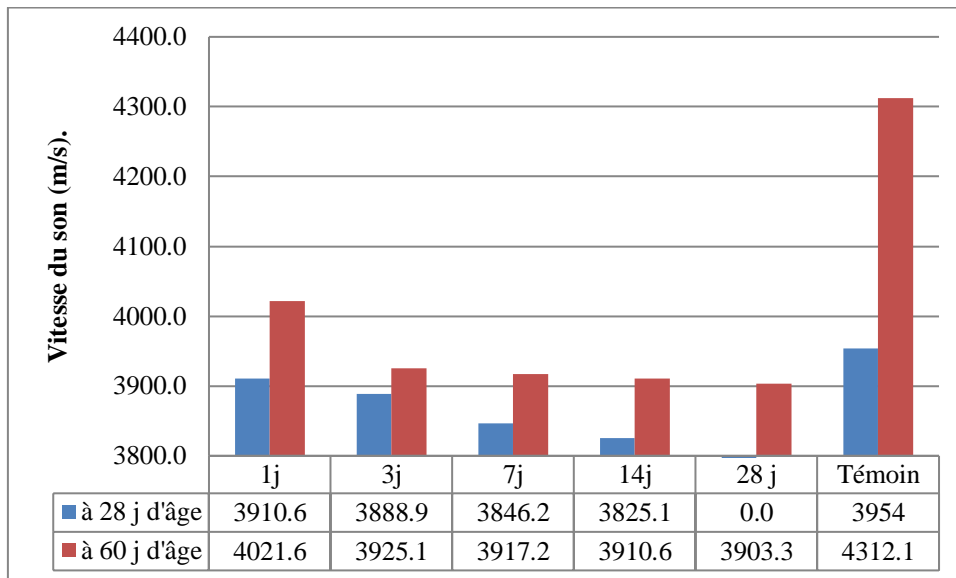


Figure (IV.13): Vitesse du son dans les éprouvettes à différentes durées de retard avant l’immersion dans la nappe phréatique

La figure (IV.13) montre que la vitesse du son diminue avec l’augmentation de la durée de retard d’immersion dans le milieu agressif (nappe phréatique de Ouargla) que se soit à l’âge de 28 jours qu’à 60 jours.

Les résultats de la vitesse du son confirment les résultats trouvés pour la résistance à la compression et ceux de la résistance à la traction.

IV.4.5 Essai d'absorption capillaire

Les résultats de l'essai de l'absorption capillaire sont présentés sur la figure (IV.14) ci-après :

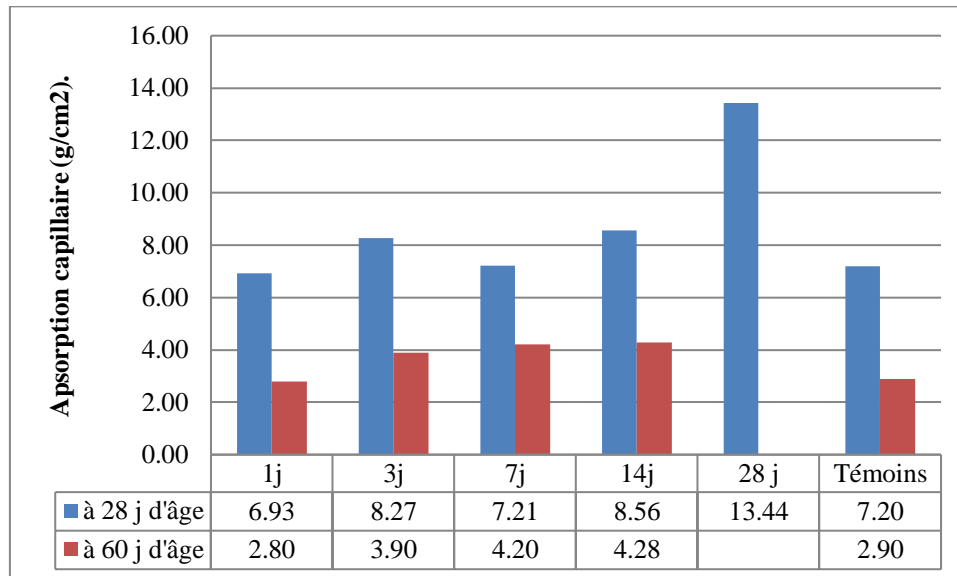


Figure (IV-14) : Absorption capillaire des éprouvettes à différentes durées de retard avant l'immersion dans la nappe phréatique

L'absorption capillaire, comme montré sur la figure (IV.14), augmente avec la durée de retard avant l'immersion dans les eaux de la nappe phréatique et diminue avec l'âge du béton.

IV.4.6 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que le retard de l'immersion dans le milieu supposé agressif de la nappe phréatique de Ouargla présente une perte de gain de résistance mécanique que ce soit la compression ou la traction, ceci est probablement dû à la réaction chimique entre les grains de ciment CRS qui est un ciment résistant aux sulfates, lors du contact entre l'eau de la nappe et ce type de ciment, des réactions chimiques se développent en présence du sulfate et qui contribuent à la formation des produits d'hydratation additionnels qui colmatent les vides et renforcent la résistance mécanique du béton. Le milieu de la nappe phréatique supposé initialement agressif en présence de sulfate devient par l'utilisation du ciment CRS un milieu favorable pour l'évolution de la résistance mécanique et la diminution de la porosité du béton.

IV.5 RESULTATS DES ESSAIS RELATIFS A L'EXPOSITION CYCLIQUE DU BETON DANS LA NAPPE PHREATIQUE

IV.5.1 Résultats de l'essai de la résistance à la compression (R_c)

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes (7x7x7) cm en béton à base de ciment CRS, issues de la réalisation de l'essai de traction des éprouvette (7x7x28) cm, ayant connues des immersions cycliques dans l'eau de la nappe phréatique sont présentés sur la figure (IV.15) ci-après :

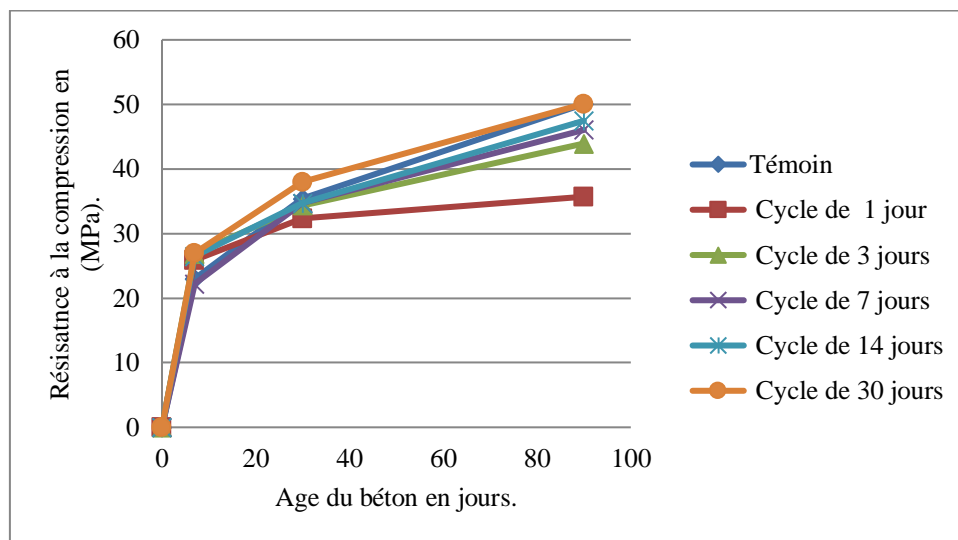


Figure (IV.15): Résistance à la compression des éprouvettes immergées cycliquement dans la nappe phréatique de Ouargla pour différents durées de cycles d'immersion

Les courbes d'évolution de la résistance à la compression ont une allure ordinaire. Les meilleures valeurs de résistance à l'âge de 90 jours reviennent au béton témoin et celui ayant connu une immersion cyclique d'une durée de 30 jours et la plus faible valeur de résistance à l'âge de 90 jours revient au béton ayant subi une immersion cyclique d'une durée de cycle d'une journée.

Il est clair par la figure (IV.15) que d'autant le cycle est plus court plus la réduction de résistance est plus élevée comparativement au béton témoins (immersion permanente).

Ces résultats concordent avec ceux trouvés par N. Ghafouri et H. Diawara [61] quant à la durée du cycle et son effet sur l'usure et la résistance du béton.

Donc les endroits du béton où la nappe est fluctuante présentent un grand risque quant à la résistance à la compression.

IV.5.2 Résultats de l'essai de la résistance à la traction par flexion (R_t)

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des éprouvettes en béton ayant subies des immersions cycliques sont présentés sur la figure (IV.16) ci-après :

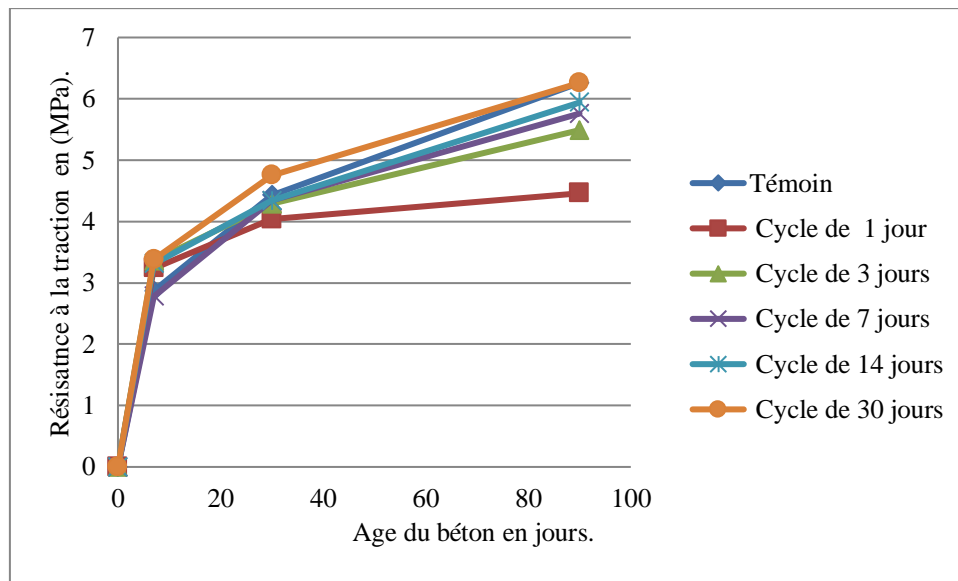


Figure (IV.16): Résistance à la traction par flexion des éprouvettes immergées cycliquement dans la nappe phréatique de Ouargla pour différentes durées de cycles d'immersion

Les courbes d'évolution de la résistance à la traction ont une allure ordinaire. Les meilleures valeurs de résistance à l'âge de 90 jours reviennent encore au béton témoin et le béton ayant connu une immersion cyclique d'une durée de 30 jours, alors que la plus faible valeur de résistance, au même âge, revient au béton ayant subi une immersion cyclique d'une durée de cycle d'un jour.

Il est clair par la figure (IV.16) qu'en outre, comme la résistance à la compression, pour la résistance à la traction, d'autant le cycle est plus court plus la réduction de résistance est plus élevée comparativement au béton témoins (immersion permanente).

Donc les endroits du béton où la nappe est fluctuante présentent un grand risque quant à la résistance à la traction.

IV.5.3 Résultats de l'essai d'absorption capillaire

Les résultats de l'essai d'absorption capillaires, des éprouvettes en béton CRS ayant connues des immersions cycliques pour des durées de cycle différentes, sont représentés sur la figure (IV.17) ci-après :

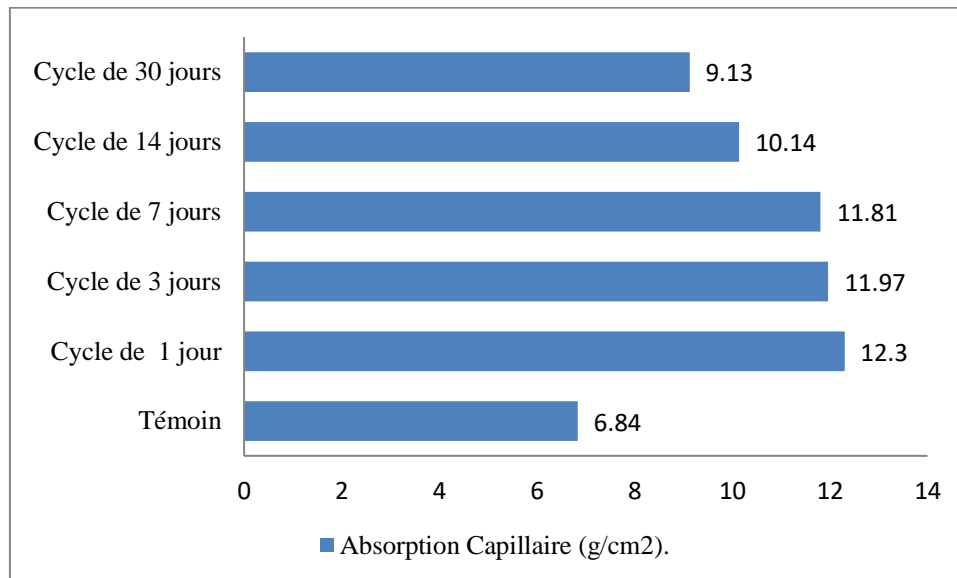


Figure (IV - 17): Résultat de l'essai d'absorption capillaire

Les résultats indiqués sur la figure (IV.17) montrent que le béton immergé d'une façon cyclique dans l'eau de la nappe phréatique est plus poreux que le béton témoin.

L'absorption est d'autant plus élevée que la durée du cycle d'immersion est plus petite. Ces résultats concordent avec ceux de la résistance mécanique.

IV.5.4 Interprétation des résultats

L'effet cyclique de l'agression des eaux de la nappe phréatique sur les propriétés mécaniques et physiques du béton est un phénomène complexe, les résultats ne concordent pas à ceux trouvés par K. Hong [60] qui voit que la pénétration des chlorures est d'autant plus élevée que la durée de séchage dans le cycle mouillage-séchage est plus élevée, il semble que l'effet de température joue un rôle important dans ce phénomène. Les conditions de température à Toronto (Canada) et Ouargla (Algérie) sont largement différentes, la durée de trois jours pour que le béton sèche à Toronto peut se faire au bout de 24 heures à Ouargla d'où la justification de l'effet de la durée du cycle le plus défavorable quant à la durabilité du béton.

IV.6 CONCLUSION

Les résultats de ce programme d'essais effectués, sur le béton à base de matériaux locaux de Ouargla sous l'effet de la remontée des eaux de la nappe phréatique de celle-ci, montrent que le béton réalisé localement est très influencé par les eaux de la nappe dans le temps et que sa durabilité est liée à la nature du ciment utilisé.

L'ajout de sable de dunes finement broyé au ciment à base de CPJ 42.5 a un effet bénéfique quant à l'amélioration de la résistance mécanique mais à des quantités d'ajout faibles. Au-delà d'un certain taux, un effet négatif a été enregistré.

L'ajout de la fumée de silice au ciment, à base de CPJ 42.5, a un effet bénéfique quant à l'amélioration de la résistance mécanique pour l'ensemble des pourcentages testés et cette amélioration augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

Le retard de l'immersion des éprouvettes en béton à base de ciment CRS montre un effet négatif sur la résistance mécanique contrairement à ce qu'on peut penser au préalable, le milieu de la nappe phréatique de Ouargla s'avère favorable à ce type de ciment.

L'immersion cyclique des éprouvettes en béton à base de ciment CRS montre un effet dégradant quant à la résistance mécanique notamment lorsque la fréquence est élevée.

Conclusion générale et recommandations

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusions

D'après l'étude de l'effet de la remontée des eaux de la nappe phréatique de Ouargla sur le béton à base de matériaux locaux soient l'ajout de sable de dune broyé, nous concluons ce qui suit :

1. La région de Ouargla est caractérisée par : un climat sec et chaud, dont des hautes températures sont enregistrées aux mois d'été à savoir Juillet et Aout, l'existence de la nappe phréatique proche à la surface et de haute salinité, et aussi les sols très riche de sels agressives surtout les sulfates. Certains ouvrages (fondations, longrines, dalles flottantes, regards d'assainissements, conduites...etc.) sont rénovés même avant l'expiration de leur durée de vie escomptée pour la quelle ils ont été conçus, voir des dépenses colossales qui sont consommées à cet égard.
2. La nappe phréatique de Ouargla est caractérisée d'une agressivité chimique variable selon l'endroit et dans le temps ayant un niveau piézométrique encore variable qui donne foi à deux aspect d'agression par immersion totale dans les eaux de la nappe d'une façon permanente, agression cyclique à des fréquences non régulières.
3. L'utilisation d'un ciment non résistant aux sulfates tel que le CPJ 42.5 comparativement au ciment CRS dans la nappe phréatique de Ouargla montre des dégradations à sa résistance mécanique assez fortes notamment au-delà de 90 jours d'âge. Cette dégradation peut atteindre jusqu'à 28% à l'âge de 18 mois d'un béton ordinaire ayant un rapport E/C= 0.64. La porosité du béton CPJ 42.5 à l'âge 90 jours est 44% plus élevée que celle d'un béton à base de ciment CRS.
4. L'ajout de sable de dune broyé entant qu'ajout minéral au ciment montre une amélioration de la résistance mécanique entre 2.5 % à 5 % d'ajout mais au-delà, le sable de dune montre un effet non signifiant quant à l'immersion du béton dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla. Mais en termes de porosité, le sable de dunes broyé a

montré la même tendance que la résistance mécanique. 10 % d'ajout de sable de dunes broyé au ciment CPJ 42.5 correspond au béton le plus poreux.

5. L'ajout de la fumée de silice, au ciment CPJ 42.5, a montré des résultats assez satisfaisants quant à l'amélioration de la résistance mécanique du béton immergé dans les eaux de la nappe phréatique cette amélioration augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Un ajout de 10 % de fumée de silice correspond à une amélioration de 7 % par rapport au béton à base de ciment CRS à l'âge de 18 mois. La porosité du béton à base de fumée de silice exposé aux eaux de la nappe phréatique de Ouargla montre que 10% d'ajout de fumée de silice au ciment CPJ 42.5 correspond au béton le moins poreux.
6. La notion de finesse du sable de dunes broyé, qui est en bonne partie de silice, incorporée comme ajout dans le ciment comparativement à l'ajout de la fumée de silice, montre que d'autant la mouture est fine plus l'ajout minéral est plus efficace dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla.
7. Le retard de l'exposition des éléments préfabriqués en béton à base de ciment CRS, ne présente aucun effet défensif quant aux agents agressifs dissouts dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla. Mais au contraire la mise en place immédiate présente des résistances meilleures. Le ciment CRS s'adapte mieux aux eaux de la nappe phréatique de Ouargla.
8. L'immersion cyclique du béton à base de ciment CRS dans les eaux de la nappe phréatique a montré que la fréquence de l'immersion est d'autant plus grande qu'elle est plus dangereuse. Les zones où la nappe est fluctuante sont les endroits les plus à craindre dans le béton. Ces derniers nécessitent un traitement particulier étant donné que la partie du béton en contact permanent avec les eaux de la nappe phréatique est protégée contre les agressions chimiques du fait du type de ciment choisi.

Recommandations

D'après l'étude de la durabilité du béton de la région de Ouargla sous l'effet de la remontée des eaux, les points ci-après peuvent être recommandés :

1. L'utilisation du ciment CRS est une solution assez efficace pour les ouvrages en béton dans les parties enterrées de la nappe phréatique de Ouargla. Néanmoins, la zone où la nappe oscille nécessite des mesures de protection particulières pour maintenir la qualité et la durabilité du béton sous une telle agression.
2. L'amélioration des techniques de broyage pour atteindre des finesses acceptable pour l'incorporation du sable de dune broyé en tant qu'ajout minéral dans le ciment ordinaire s'avère d'une importance cruciale.
3. La concrétisation du pouvoir de mouture du sable de dune entant que matériau local à l'échelle industriel peut donner naissance à une relance économique importante dans la région étant donné que la quantité de silice dans le sable de la région est assez importante (plus de 95%).
4. Utilisation du SIG (Système d'Information Géographique) quant à la dynamique de concentration des éléments néfastes au béton dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla dans l'espace et dans le temps afin de prédire l'évolution du risque chimique dans l'étendue de la zone et pouvoir estimer au mieux la durée de vie réelle de nos structures.

Bibliographie

- 01 Marc COTE, « Des oasis malades de trop d'eau ? », Sécheresse n°2 vol 9, pp.123-130, juin 1998.
- 02 Tahar Idder, « Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation actuelle et perspectives d'amélioration », Sécheresse n°3 vol 18, pp.161-167, Juillet-Aout-Septembre, 2007.
- 03 Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi, « Durability of reinforced concrete in aggressive Sabkha environment », ACI Materials Journal, pp.236-245, May-June, 1995.
- 04 Groupe d'experts scientifiques de l'OCDE, Durabilité des ponts routiers en béton armé », organisation de coopération et de développement économiques, Paris, 1989.
- 05 J. Baron, « Introduction à la durabilité des bétons », La durabilité des bétons, pp:23-38, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, ISBN 2-85978-184-6, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- 06 B.E.T.S. BG, « Études D'assainissement Des Eaux Résiduaires, Pluviales Et D'irrigation. Mesures Complémentaires De Lutte Contre La Remontée De La Nappe Phréatique de Ouargla », (mission II- Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau), Bureau d'études B.G. Suisse, juillet 2002.
- 07 Archive de la DHW de (Rapports d'activités de 1983 à 2007).
- 08 BELLAOUEUR Abd-El-Aziz , « Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives », MEMOIRE DE MAGISTER, Université El-Hadj Lakhdar – Batna, 2008.
- 09 NEZLI.I.E, ACHOUR.S, DJABRI.L, « Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'Oued m'ya (Ouargla) », Article publier au journal Larhyss, décembre 2007.
- 10 B.E.T.S. GB, « Etude d'assainissements des eaux résiduaires, pluviaux et d'irrigations, mesure complémentaire de lutte contre la remontée de la nappe phréatique », Rapport technique de BG (bureau d'étude techniques suisse), Mission IC, Avant projet détaillé - Tranche II, Octobre 2004.
- 11 Office National des la Météorologie Ouargla, rapports Météorologiques de 2007 à 2016.
- 12 O.N.U.E.S.C.O, « Etude des ressources en eau du Sahara septentrional plaquette 1 », France, 1972.
- 13 Agence nationale des ressources hydraulique (ANRH), « Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Ouargla », Ouargla, Algérie, Janvier 2005.

- 14 BELKHIRA Chachoa, « Contribution à l'étude de la remontée des eaux de la nappe phréatique dans la région de Oaargla, Modélisation hydro-dynamique de la remontée », Mémoire de Magister, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2008.
- 15 ELFERGOUGUI M. et al, « Relation entre l'évaporation de la nappe phréatique et le pouvoir évaporant de l'atmosphère en zones arides », Proceeding du 1^{er} Séminaire international sur les ressources en eau au Sahara, Evaluation, Economie et Protection. 19-20 Janvier, pp 43-47, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011.
- 16 MECHERI Bachir, « Influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydrauliques et Génie civil », Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.
- 17 GONZÁLES J.A. et al, «Some considerations on the effect of chloride ions on the corrosion of steel reinforcements embedded in concrete structures», Magazine of Concrete Research, Vol.50, N° 3, September, pp 189-199, 1998.
- 18 A.TAFRAOUI, « Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie) », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- 19 Lapparent Albert (1839-1908). « Traité de géologie », Deuxième édition revue et très augmentée, Paris 1885.
- 20 « Analyse physico-chimique des catalyseurs industriels », (manuel pratique de caractérisation), Edition Technip , ISBN 2-7108-07505, Paris, 2001.
- 21 Y.CHERAIT, Z.NAFA, « Elément de matériaux de construction et essais », dépôt légal 1704- I.S.B.N 9548-7-4, 2006.
- 22 KADRI ABDELATEF, « Contribution à l'Amélioration de la durabilité du béton dans les zones enterrées de la wilaya de Ouargla par l'ajout des minéraux locaux », Mémoire de Magister, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- 23 AITCIN C. Ed., « Condensed silica fume in concrete », Faculté de sciences appliqués, Université de Sherbrook, pp.52, Sherbrook, Canada, 1983.
- 24 A.FAY, « La fumée de silice l'addition incontournable pour des bétons durables », FERROPEM newsletter, Chambéry, 27 Juin 2012.
- 25 « Guide for the use of silca fume in concrete», ACI Materials journal, Title no. 92-M47, July-August, 1995.
- 26 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.
- 27 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 /01/2006.
- 28 G.P. TOGNON, G.COPPETTI, «Concrete fast curing by two-stage low and high pressure steam cycle», proceedings international congress of the Precast concrete Industry, Stresa, 15pp, 1994.
- 29 A. BOUCHOUIKA et M. N. OUDJIT, « Sustainable Built Environnement Infrastructures in Developing Countries », International conférence, ENSET Oran (Alegria)- Octobre 12-14, 2009.

- 30 S.CHABI, B.MEZGHICHE, L.ZEGHICH, « Etude de l'influence de l'addition du sable broyé d'oued et de dune de la région de Biskra sur les bétons », Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre, 2005.
- 31 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.
- 32 R. Duval et H. Hormain, « La durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives », La durabilité des bétons, pp:351-391, Collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, ISBN 2-85978-184-6, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- 33 M.BUIL, J.P.OLLIVIER, « Conception des bétons : la structure poreuse », La durabilité des bétons, PP57-99, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, ISBN 2-85978-184-6, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- 34 Georges Dreux, « Nouveau guide de béton », 4ème édition Eyrolles 61, boulevard saint -Germain, 75005 Paris, 1985.
- 35 GAGNE.R, « Durabilité et réparations du béton », Cours en ligne de la durabilité de béton, GCI-714, site internet (www.civil.Usherbooke.ca/cours/gci174), Université de Sherbrooke, 29 Aout 2012.
- 36 AMRIOU.A, «Détection par rayon x de la dégradation du béton sous l'effet des agressions chimiques (sulfates)», Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université de M'sila, Mars 2009.
- 37 BOUALLEG S., «Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires», Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université de M'sila, Septembre 2004.
- 38 ABIMOULOUD Y., « Contribution à l'analyse de l'effet de la durée de cure sur le béton en climat chaud », Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université de Hassiba Ben-Bouali, Chlef, Juin 2004.
- 39 C.VERNET, «Petit mémento de chimie des ciments», La durabilité des bétons, pp.100-106, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, ISBN 2-85978-184-6, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- 40 M,A, bérubé et A, Carles-Gibergues, «La durabilité des béton face à l'alcali-réaction», La durabilité des bétons, PP285-347, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, ISBN 2-85978-184-6, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.
- 41 Abdel-Hamid J. Al-Tyyib et Mesfer M. Al-Zahrani, « Use of polypropylene fibre to enhance deterioration resistance of concrete surface skin subjected to cycle wet/dry sea water exposure », ACI Materials journal pp. 363-370, Title n°87-M39, July-august, 1990.
- 42 Zhifu Yang, «Freezin-and-thawing durability of pervious concrete under simulate field condition », ACI Materials Journal, Titeln° 108-M21, March-April, 2011.

- 43 « MOKAOUEM, ciment pour béton en milieu agressifs », Fiche technique, de l'Usine de LAFARGE en Algérie, 2012.
- 44 Norme française P 18-553, «Granulats, Préparation d'un échantillon pour essai», Septembre 1990, Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris 1990.
- 45 Norme française XP P 18-540, «Granulats, Définitions, conformité, spécifications» , Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris Octobre 1997.
- 46 Norme française P 18-598, «Granulats, Équivalent de sable», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Octobre 1991.
- 47 Norme française P 18-591, « Granulats, détermination de la propreté superficielle», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Septembre 1990.
- 48 Norme française P 18-576, «Granulats, mesure du coefficient de friabilité de sable», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1990.
- 49 Norme française P 18-573, «Granulats, essai los Angeles», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1990.
- 50 Norme française P 15-461, «Essai chimique», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Mai 1964.
- 51 Hocine Gherroucha, « Technique pratique de l'analyse du sol », (version en arabe), OPU, 02-1995, pp.:67-73, Benaknoun, Alger, 1995.
- 52 Norme BS 1377/V1975, «Sol, essai de détermination des sulfates», Décembre 1975.
- 53 Norme BS BOWLY/V1979, «Sol, essai de détermination des chlorures», 1979.
- 54 Norme française XP P 18-303, «Eau de gâchage pour béton», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Août 1999.
- 55 Norme française P 18-451, «Béton, essai d'affaissement», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1981.
- 56 Norme européenne NF EN 12390-1, «Essai pour béton durci, Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Octobre 2001.
- 57 Norme française P 18-427, «Béton, détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1996.
- 58 Norme française P18 – 404, «Béton, essai d'étude, de convenance et de contrôle, confection et conservation des éprouvettes », Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1981.
- 59 Indian standards institution Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar marg New-delhi ,110002 GR 3rd July, 1968.

- 60 Katherine Hong, «Cyclic Wetting and Drying and its Effects on Chloride Ingress in Concrete», Thesis of Master of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1998.
- 61 Nader Ghafoori and Hamidou Diawara, «Strength and Wear Resistance of Sand-Replaced Silica Fume Concrete», ACI Materials Journal/March-April, 2007.
- 62 Norme française NF P 18-411, «caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression et traction des matériaux durs», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1981.
- 63 Norme française NF P 18-412, «caractéristiques particulières des machines hydrauliques pour essais de compression (presses pour matériaux durs)», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1981.
- 64 Norme française NF P 18-407, «Essai de flexion», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1981.
- 65 GORISSE.F, «Essais et contrôles des bétons», PP 102-103, Editions Eyrolles, Paris, 1978.
- 66 Norme française P 18-418, «Béton, auscultation sonore, mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton», Editée et diffusée par l'association française de normalisation (afnor), Paris, Décembre 1989.
- 67 Wieslaw Kurdowski, "Cement and Concrete Chemistry", ISBN 978-94-007-7945-7 (eBook), Labrery of Congress Control Numbre2014931241 Springer Science + Business Media B.V. 2014.
- 68 C.VERNET, «Stabilité chimique des hydrates - Mécanismes de défense du béton face aux agressions chimiques», La durabilité des bétons, pp.129-169, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques, ISBN 2-85978-184-6, Edition de l'école des ponts et chaussées, 49, Rue de l'université, 75007 Paris, 1992.