



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université KASDI Merbah de Ouargla



Faculté des Sciences et Technologie et Sciences de la Matière

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Filière: Génie Civil

Option: Géo matériaux

Thème:

**Durabilité des ouvrages en béton destinés à
l'évacuation des eaux usées dans la vallée de
OUARGLA**

Préparé par : Melle BENSEKRANE Kaoutar

Soutenue publiquement le: 12/04/2012

Devant le jury composé de:

| | | | |
|------------------------|------------|------------------------|--------------|
| Dr KHENFAR M.Mouldi | Professeur | Université de Laghouat | Président |
| Dr BOUTOUTAOU Djamel | MC"A" | Université de Ouargla | Examineur |
| Dr BEBBA A. Abdelhafid | MC"A" | Université de Ouargla | Examineur |
| Dr KRIKER Abdelouahed | Professeur | Université de Ouargla | Encadreur |
| Mr ABIMOULOUD Youcef | MA"A" | Université de Ouargla | Co-encadreur |

Année 2010/2011

ملخص

هذه الدراسة تساهم في توضيح سلوك الهياكل الخرسانية المدفونة والمخصصة لصرف المياه المتواجدة في حوض ورقلة حيث انه هذه الاخيرة وعلى غرار العديد من المدن الصحراوية الاخرى تتأثر بصعود المياه الجوفية بصورة خاصة حيث انه عمر الهياكل يتأثر بالعناصر الفيزيائية المحيطة به وكذا قدراتها على مقوماتها وفي هذه الدراسة قمنا بتحضير عينات خرسانية (16/32) سم² وذلك للقيام بتجارب الضغط وعينات بريسماثية (28/7/7) سم³ للقيام بتجارب الشد وذلك طبعاً بعد دراسة لتصميم المزيج الخرساني على مستوى مخبر الأشغال العمومية الصحراوية LTPS حيث قمنا بتحضير خرسانة حسب المعايير المخبرية المناسبة من الرطوبة والحرارة كما استعملنا اسمنت مقاوم للسيلفات CRS وبعدها قسمت العينات الى ثلاثة مجموعات:

الأولى مخبرية بمثابة عينة شاهدة
الثانية حفظت في المياه الصرفية
الثالثة حفظت في المياه الجوفية

نتائج الاختبارات الميكانيكية والديمومة كانت جد مرضية حيث اوضحت انه الخرسانة التي استعمل فيها الاسمنت المقاوم السيلفات لم تشهد تدهور في المقاومة والديمومة بل بالعكس شهدنا نوع من الحماية الذاتية وهذا راجع الى تشكل الى مركب كيميائي واقى حولها وفي مساماتها الذي منع توغل الايونات الضارة داخل الخرسانة.

لكن العينات التي وضعت في مياه الصرفية ابدت تدهور ملحوظ وذلك بعد تطبيق التجارب التخريبية وغير التخريبية عليهم وذلك راجع الى درجة الحموضة العالية وتركيز الكلورير المتواجد في وسط المياه الصرفية وذلك ننصح باستعمال مواد اضافية الى الخرسانة أو تغيير نوع الاسمنت.

RÉSUMÉ :

Cette étude contribue à éclaircir le comportement du béton des ouvrages d'assainissement enterrés dans la vallée de Ouargla , cette dernière, comme de nombreuses autres agglomérations du Sahara algérien, est affectée par une remontée des eaux de la nappe phréatique. La durée de vie de ces structures en béton est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux à se protéger contre ces attaques. Dans la présente étude, nous avons confectionné des éprouvettes de béton cylindriques (16/32)cm pour les essais de compression et des éprouvettes prismatiques (7x7x28)cm pour les essais de traction après avoir effectué une étude de la formulation du béton, au laboratoire des travaux publique sud (LTPS), le béton a été conçu dans les meilleures conditions de température et d'humidité avec du ciment résistant aux sulfates (CRS), une partie des éprouvettes à était conservée aux laboratoire pour servir de témoin et deux autres parties ont étaient exposée aux conditions de la nappe phréatique de Ouargla et aux eaux usées, cela pendant 28j, 90j,180j et 18 mois.

Les résultats des essais destructibles et non destructibles (mécaniques et de durabilité) sont très satisfaisants, le béton conçu avec du ciment CRS n'a pas eu de dégradation bien au contraire, une auto protection a été remarquée du à la formation d'un composé chimique au tour du béton, ce qui a empêché la pénétration des ions agressifs se trouvant dans les eaux de la nappe phréatique de la vallée de Ouargla.

Par contre les essais destructibles et non destructibles effectués sur les éprouvettes conservées dans les eaux usées ont montrés une dégradation, due à l'acidité et à la grande teneur en chlorure, même si c'est un béton à base de CRS,c'est pour cela qu'il faut penser à ajouter des adjuvants au béton ou remplacer le ciment CRS par un autre ciment.

ABSTRACT:

This study helps to clarify the behavior of concrete structures buried, in the ground water of the valley of Ouargla, the latter, like many other cities in the Algerian Sahara, is affected by an upwelling of the water surface. The lifetime of concrete structures depends on the response to physical and chemical environment, as well as the ability of materials to protect against these attacks, in the present study, we have crafted concrete samples cylindrical (16/32) cm for compression tests and prismatic specimens (7x7x28) cm for tensile tests after making a study of the mix design, in laboratory work public south (LTPS), the concrete was designed in the best conditions of temperature and humidity with sulphate-resisting cement (SRC), half of the test specimens were kept in the laboratory as a witness and the other half was exposed to conditions of the water table Ouargla for 28j, 90J, 180J,and 18months.

The test results destructible and non destructible (mechanical and durability) are very satisfactory, concrete designed with cement CRS had no degradation on the contrary, a self-protection was noted due to the formation of a compound chemical tower of concrete, which prevented the penetration of aggressive ions found in the waters of the groundwater in the valley of Ouargla.

Otherwise the test of destructible and non-destructible made in the tube test preserved in reuse of waste water, shows a damage due to acidity and high-grade of chloride,even with the concrete based with CRS it's for this reason we have to think to put an additive to the concrete or found cement as substitute of the cement CRS.

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Le Professeur KRIKER Abdelouahed qui a encadré cette thèse et Monsieur ABIMILOUDE Youcef qui a accepté de me co-encadrer. Ils m'ont soutenue tout au long de ce travail, leurs disponibilité et toutes nos discussions ont été fructueuses pour l'avancée de cette thèse et mener à bien ce travail de recherche. Je le remercie également pour les nombreuses heures passées à la lecture et aux corrections du manuscrit.

Je remercie monsieur MAKDISSI Michel, directeur de BUTEC société libanaise à Ouargla, qui a tenu particulièrement à m'épauler tout au long de cette étude avec son savoir et m'a permis de conserver mes éprouvettes au sein de son entreprise au niveau des regards et de la nappe phréatique

Je remercie Monsieur ZANKHARI, directeur de LTPS, de m'avoir autorisée à effectuer les essais de ma thèse au sein du laboratoire.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse
Je voudrais aussi exprimer tous mes remerciements aux collègues de BUTEC, ONA, LTPS et SAFEGE pour l'ambiance studieuse et amicale, qui ont été d'un grand réconfort et d'une aide précieuse.

Toute ma gratitude à toutes les personnes ayant relu, corrigé et commenté mon manuscrit et ayant ainsi participé à son amélioration.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres du laboratoire, techniciens, secrétaires qui ont participé indirectement ou directement au bon déroulement de ces travaux de recherche et à leur finalité.

Pour finir, je tiens à remercier mon Père ; ma Mere, ma Sœur et mon frère car si j'en suis arrivée là, c'est grâce à leur patience, à leur disponibilité, à leur aide précieuse et à leur soutien au quotidien.

Introduction générale

Après l'apparition du ciment Portland (1848), Le béton a été considéré comme un matériau de construction très durable, l'utilisation du béton dans toutes sortes de construction civiles ou industrielles a pris un grand développement, surtout sans doute parce qu'il est, simple d'emploi, économique et qu'il s'adapte en toute souplesse aux conditions les plus variées [1].

Le béton bien conçu et bien exécuté, même dans un milieu défavorable, peut se défendre contre les agressions chimiques. [1] De nombreuses dégradations ont été constatées, dues à plusieurs facteurs, tels que la nature et la qualité des constituants, la composition, les adjuvants, le malaxage, le transport, la mise en place (hauteur de chute), la vibration, la cure, et le milieu d'exposition [2]. Après ces constatations, l'idée de durabilité a été remise en question. [3].

Le milieu d'équilibre naturel du béton est une solution très alcaline de pH supérieur à 13, donc tous les milieux extérieurs sont vus par le béton comme des acides très corrosifs [1], Les ouvrages d'assainissement plantés dans les endroits (sols) agressifs, c'est-à-dire pH inférieur à 13 [4], le cas de notre zone d'étude " la vallée de Ouargla", ont montrés plusieurs problèmes, tels que:

- les effondrements et les affaissements des chaussées et des routes goudronnées, on peut citer comme exemple " l'affaissement de la route en face du siège de la Sonelgaz (travaux d'assainissement en (CAO) exécutés en 2008.

-L'état défectueux des infrastructures (ouvrages enterrés), notamment les conduits d'eaux, Ce phénomène a été remarqué dans plusieurs endroits, on cite comme exemple la conduite qui achemine les eaux résiduaires, de la station de pompage de CHOTTE vers sebkha UM RANEB (photo (A-D) annexe photo).

-Les dégradations des anciennes stations de pompages au niveau des structures en béton armé et au niveau des équipements métalliques (photo (E-H) annexe photo), même constatations sur les anciens regards (photo (I-J) annexe photo).

Les problèmes des ouvrages d'assainissement dans la vallée de ouargla sont dus essentiellement à:

1/ La remontée de la nappe phréatique causée par:

- les fuites dans les réseaux des eaux potables.
- les fuites dans les réseaux d'assainissement.
- Les eaux de drainage et d'irrigation.
- l'agressivité des eaux souterraines et la dissolution de sels et d'autres minéraux)

2/l'agressivité de la nature du sol.

3/l'agressivité des eaux véhiculées causée essentiellement par:

- les rejets industriels dans le réseau d'assainissement (huiles de voitures, acides des batteries...etc.).

De ce fait, la ville de Ouargla a connue un nombre important de réhabilitation et de rénovation des ouvrages d'assainissement coutant des montants exorbitants, Avant même la fin de leurs durée de vie probable, les tableaux (I:1-2) montrent, la longueur du réseau rénové et les montants qui leurs été réservés:

Tableau (I-1): Longueurs et montants réservées depuis 2002 jusqu'à 2008 pour la rénovation des réseaux d'assainissement à Ouargla [4]

| Commune | Réseau d'assainissement | |
|---------------|-------------------------|----------------|
| | Longueur (m) | Montant (DA) |
| Ouargla ville | 21124.0 | 214.156.672.00 |
| Ruissate | 3183.0 | 44.179.340.00 |
| Ain el baida | 9112.0 | 18.791.110.00 |
| Sidi Khwiled | 5212.0 | 8.382.444.00 |
| N'goussa | 750.0 | 6.260.370.00 |
| Total | 39381.0 | 291.769.936.92 |

Tableau (I-2): Présentation de quelques tronçons rénovés à Ouargla [4]

| Désignation | Année de rénovation ou de réalisation | Type de conduite | Diamètre en (mm) | Longueur en (m) |
|---|---------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Tronçon à coté de l'hôpital "MOHAMED BOUDIAF" | 1983 | CAO | Ø700 | 250.0 |
| | 1999 | CAO | | |
| | 2005 | CAP | | |
| | 2008 | PRV | | |
| Autour du Ksar | 1973 | AC | Ø 400 | 500.0 |
| | 1983 | CAO | | |
| | 1996 | CAO | | |
| | 2006 | PVC | | |
| La route de CHEGUIVARA | 1987 | CAO | Ø 400 | 600.0 |
| | 1999 | CAO | | |
| | 2003 | PVA | | |
| Route nationale N°49 | 1986 | CAO | Ø 1100 | 500.0 |
| | 1995 | CAP | | |
| | 2007 | PRV | | |

Le réseau d'assainissement construit à Ouargla avec les conduits en (CAO) et (AC) a montré son inefficacité traduite par leurs durée de vie réelle qui, par fois, ne dépasse pas les six mois, ceci peut être remarqué dans différents quartiers à Ouargla par:

- les travaux de réhabilitation continus dans la ville (des routes coupées, des engins et des excavations partout...etc.) ce qui:

- Dérangent les habitants et les visiteurs.
- Risquent de mettre en péril les autres réseaux divers, et les anciennes constructions.

- Coût très élevé comparativement à un nouveau projet, car dans la réhabilitation, nous avons déposé et posé.

Malgré toutes les interventions de rénovation que la ville d'OUARGLA a connues, le problème de dégradation persiste encore, alors une étude géante a été faite par BG (bureau d'études techniques suisse) pour la lutte contre la remontée de la nappe phréatique et pour évacuer les eaux résiduaires. Ce projet a été exécuté par six entreprises de renommée mondiale dont BUTEC, DYWIDAG, VINCI, EUSEBIOS, ONID et FREMHID, les conduits proposés étaient en béton armé, mais BUTEC et VINCI ont préféré de poser des conduits en PRV et PVC pour leur durée de vie et leur bon comportement aux milieux agressifs.

De ce fait, les ouvrages exposés aux agressions de la région et aux eaux usées, nécessitent une étude approfondie pour déceler les causes de ces dégradations et de proposer les solutions et les recommandations à suivre pour les nouveaux réseaux et les nouvelles structures d'assainissement à construire.

Le présent travail consiste à faire un recensement des différents agents agressifs, au niveau de la nappe phréatique et au niveau des eaux usées, et d'étudier théoriquement le comportement du béton armé face à ces agents agressifs, et cela sera appuyé par une étude pratique faite sur des éprouvettes en béton normal, exposées à l'eau de la nappe phréatique et aux eaux usées.

Notre mémoire est représenté par quatre chapitres:

Chapitre I: généralistes sur les propriétés climato-hydrologiques de la zone de Ouargla et sur la durabilité des bétons

Chapitre II: Analyse physico chimique des la nappe phréatique de Ouargla.

Chapitre III: Essais sur matériaux et béton.

Chapitre IV: Résultats et essais sur béton durci.

Dont l'objectif est de suivre la résistance mécanique du béton, à travers le temps, et aussi suivre le degré de dégradation du béton, enfin apporter des recommandations et des ajustements pour augmenter la durabilité des ouvrages d'assainissement.

Sommaire

| | |
|--|---|
| Introduction générale | 1 |
| Tableau (I-1): Longueurs et montants réservés depuis 2002 jusqu'à 2008 pour la rénovation des réseaux d'assainissement à Ouargla [4] | 2 |
| Tableau (I-2): Présentation de quelques tronçons rénovés à Ouargla [4] | 3 |

Chapitre I: Généralités Sur Les Propriétés Climato-Hydrologiques De La Zone De Ouargla Et Sur La Durabilité Du Béton

Partie I: Généralités Sur Les Propriétés Climato-Hydrologiques De La Zone De Ouargla

Dans le présent chapitre, les informations se porteront sur la description géographique, hydrologique et climatique de la vallée d'Ouargla, et la description physico-chimique des eaux de la nappe phréatique de cette dernière.

I.1 Situation Géographique

A 800 Km de la capitale, la wilaya de Ouargla est située au Sud Est du pays, Au fond d'une cuvette très large de la basse vallée de l'Oued Mya. Les limites administratives sont [5]:

- A l'Est, la Wilaya d'EL OUED et la frontière Algéro -Tunisienne
- Au Nord Ouest la Wilaya de DJELFA et Nord Est, la Wilaya d'EL OUED
- Au Sud Est, la Wilaya d' ILLIZI et au Sud Ouest, la wilaya de TAMANRASSET
- A l'Ouest, la Wilaya de GHARDAIA

La grande cuvette de Ouargla occupe le chef lieu, Elle est située au sud de la Wilaya de Ouargla. Sa superficie d'environ 90 000 hectares est marquée par une dépression naturelle importante. Située dans le prolongement du grand bassin versant du Sahara septentrional, elle est limitée par l'Atlas saharien, le Hoggar et l'Erg oriental. Aussi, elle comprend les communes suivantes : Ouargla, Rouissat, Ain Beida, Sidi Khouiled, Hassi Ben Abdellah et N'Goussa. Comprenant une superficie de plus de 3500 hectares de palmier dattier, cette dernière forme une ceinture de protection climatique pour l'ancienne ville Ouargla. Sur le plan Topographique ; La wilaya de Ouargla présente un terrain plus ou moins plat avec une dénivelée du sud vers le Nord avec une pente moyenne de l'ordre de 1/1000 de l'Ouest vers l'est.

I.2 Hydro-Climatologie

I.2.1 Température C'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région. L'analyse des températures sera faite à partir des données recueillies de l'ONM. Ouargla période (1988-2008) et l'annuaire.

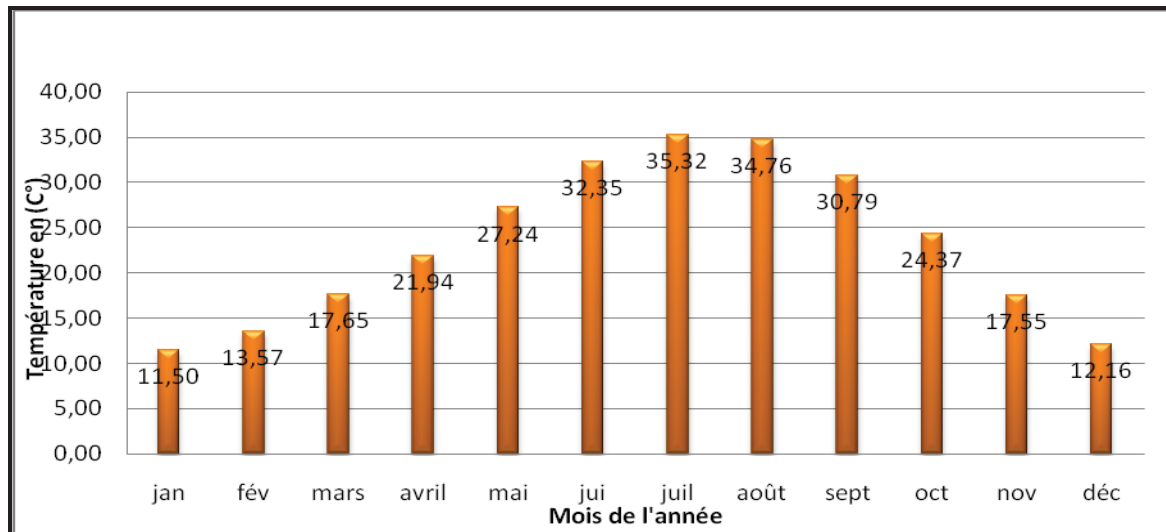


Figure (I-1): Températures moyennes mensuelles en (C°) entre 1988-2008. [6]

La figure (I-1) montre que la température est très élevée en été, Le mois de Juillet représente la période la plus chaude avec une moyenne mensuelle qui atteint 35.32C°; Et Janvier est le moi le plus froid, Sa moyenne atteint 11.50°C. Ce qui nous mène a dire que Ouargla est caractérisée par un climat hivernal doux et estival chaud. [6]

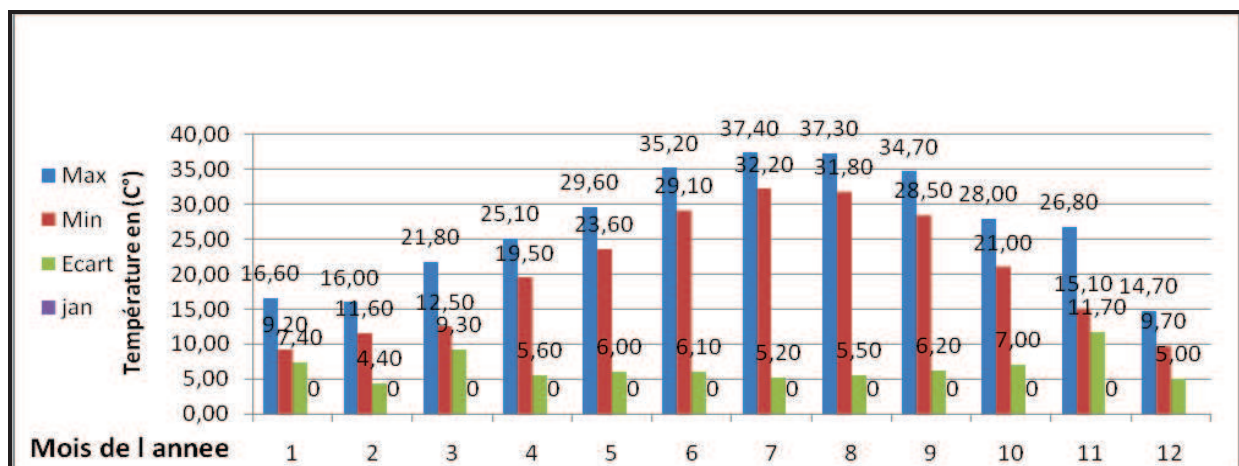


Figure (I-2): Températures Extrêmes Et Ecarts (1988-2008) en (C°)[6]

Nous remarquons dans la figure (I-2) que les températures moyennes extrêmes minimales sont enregistrées en mois de Janvier ($9.4C^{\circ}$) et Décembre ($9.7C^{\circ}$), Et des températures moyennes extrêmes maximales sont descendues en mois de Juillet et Août, ($37.40C^{\circ}$ et $37.30C^{\circ}$ respectivement).

- Les écarts de température varient généralement entre $5.5C^{\circ}$ et $7C^{\circ}$ à l'exception du mois de Novembre ou on enregistre un écart de $11.70C^{\circ}$, Et le mois de Février ou l'écart de température atteint la valeur de $4.40C^{\circ}$. Ces données ont été observées durant vingt ans de recensement.

I.2.3 Vent

D'après la figure (I-4), on remarque que le vent c'est le paramètre climatique le plus régulier dans la région de Ouargla. Il est déterminé par sa direction et sa vitesse. Les vents les plus forts se produisent à partir du mois d'Avril jusqu'à Juillet avec un maximum de 4.84 m/s en Juin. Généralement, les vents les plus fréquents sont ceux qui ont une direction S-N et SW-NE, tandis que les vents dirigés vers le Sud et le Sud-Ouest ne dominent qu'au mois de Janvier. On peut penser que l'orientation grossièrement N-S de la vallée joue un rôle dans la direction des vents. Les vents sont très fréquents et pouvant souffler durant 50 jours au printemps, provoquant ainsi des problèmes d'ensablement [5].

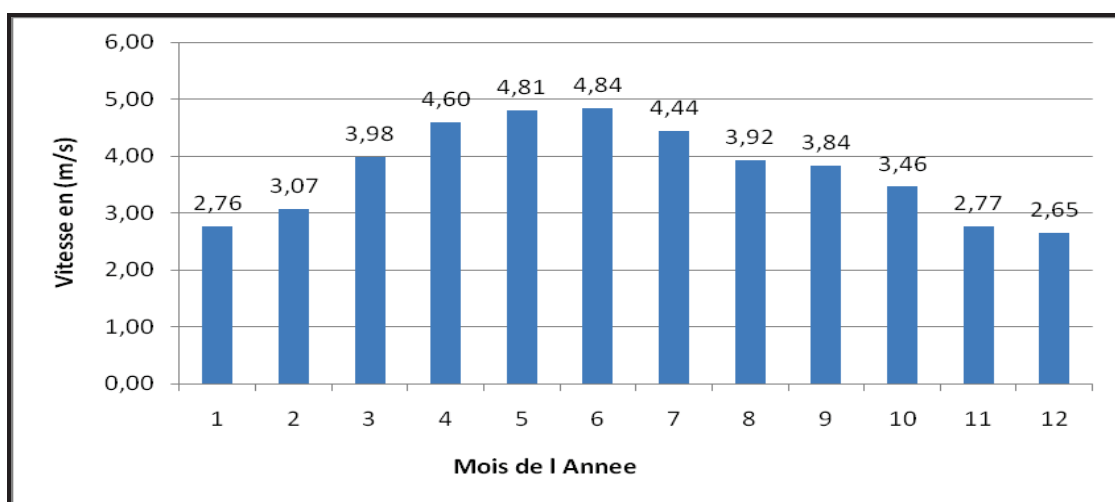


Figure (I-4): Vitesse moyenne mensuelle du vent en (m/s)
(Station météorologique de Ouargla, 1990-2008)

I.2.4 Pluviométrie

La rareté des précipitations est un caractère fondamental du climat saharien. Dans la figure (I-5) On remarque une grande irrégularité de la pluie, faible pendant l'Hiver et presque nulle en Eté. Leur provenance en Hiver est due aux dépressions accompagnants la migration vers le Sud des fronts polaires, en Eté elles sont dues aux dépressions de mousson, alors que au cour de la période intermédiaire, Ces précipitations sont dues aux dépressions soudano-Sahariennes du Sud vers le Nord [7]. En règle générale les pluies sont d'intensité plutôt faible dans la région.

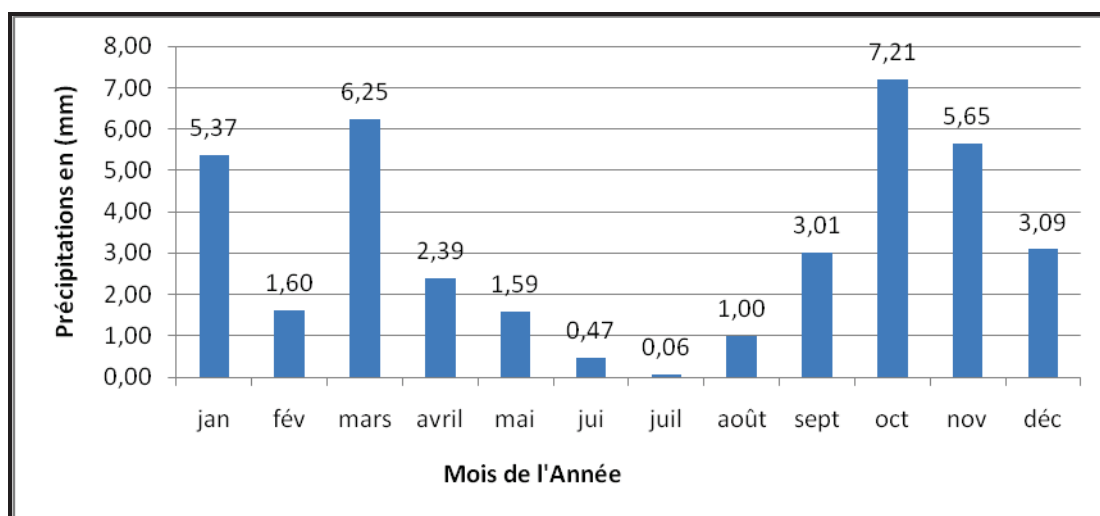


Figure (I-5): Hauteurs moyennes mensuelles de la précipitation (Station météorologique de Ouargla, 1985-2008)

La figure (I-5) montre que la précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 35 mm, Mars est le mois le plus pluvieux (6.25 mm) et Juillet le plus sec (<1 mm); L'évaporation est très élevée, elle est en moyenne de 114 mm au mois de Décembre et de 403 mm au mois de Juillet, soit de 2884 mm/an. La région de Ouargla est caractérisée par un climat de type saharien, à températures élevées, Faible pluviométrie et une forte évaporation.

I.3 Evaporation Et Evapotranspiration

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, etc.), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration.

I.3.1 Evapotranspiration

La transpiration est commandée par les conditions climatiques, liées au rayonnement et à la turbulence de l'air, qui concourent à la définition de ce que les bioclimatologistes appellent l'évapotranspiration potentielle (notée Etp).

Par définition l'Etp : c'est la quantité d'eau, généralement exprimée en (mm), qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

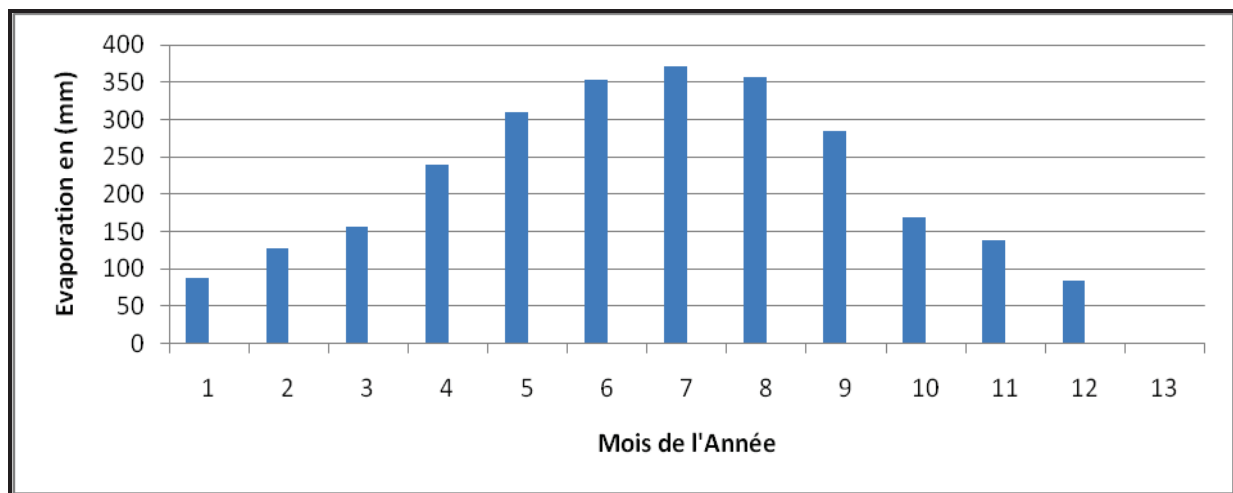


Figure (I-6): Evaporation Mensuelle Moyenne (1990-2006). [8]

La ville de Ouargla reçoit les radiations solaires d'une durée d'ensoleillement moyenne de l'ordre de 338,86 heures en Juillet et une moyenne minimale de 217,11 heures en Février. Ce qui conduit à une évaporation de l'eau de l'ordre de 2010 mm/an. [8]

I.4 Hydrologie

Malgré les faibles précipitations et le faible nombre de jours de pluie dans la région du sahara (12 jours en moyenne) [7]. Les écoulements sur les versants occidentaux peuvent alimenter les réseaux hydrographiques pendant quelques temps et parfois peuvent même causer des inondations très importantes.

Le réseau hydrographique traversant la région est composé des oueds suivants :

- Au nord ouest : *Oued N'sa* qui selon les fréquences peut présenter des crues considérables. Le bassin versant de oued N'sa couvre une superficie de 4100 Km² et une

longueur de 175 Km, il reçoit divers affluents dont les plus importants sont le "Ballouh "et le "Soudou" qui arrosent l'oasis de Beriane.

- Au sud : *Oued Mya* qui est une création d'une ligne de talweg de Hoggar, traversant en long la cuvette en passant par la vallée d'Oued Rhir à travers Chegga pour aboutir au chott Melghir D'après les études historiques cet oued n'arrive à la cuvette de Ouargla que pour des crues de période de retour assez importante (dépassant 100 ans).
- A l'ouest : *Oued M'Zab*, dont la superficie du bassin est d'environ 5000 km², prend la direction Ouest-Est sur une distance de 350 Km de la région de Botma Rouila à une altitude de 750 m jusqu'à Sebkhet Safioune d'une altitude de 104 m. Les crues peuvent arriver jusqu'à sebkhet Safioune.
- A l'ouest : *Oued Metlili* et *Oued El Menia*, dont le cheminement des eaux se fait par infiltration vers la cuvette durant les périodes de crues. Le bassin de Metlili, limite de l'Oasis du même nom ne dépasse pas 400 Km². D'une longueur totale de 210 Km, l'Oued Metlili est barré à 134 Km de son origine par le cordon dunaires de l'Erg Rhanem où plus en aval une grande partie des eaux de ruissellement est absorbée [9], [10].

Il est à signaler que les Oueds de la région sont des oueds saisonniers, est très souvent à sec.

I-4.1 Hydrologie Souterraine

I.4.1.1 Nappe Du Continental Intercalaire (Albien)

Cette nappe couvre le Sahara septentrional, contenue dans les argiles sableuses et les grès du continental intercalaire, elle constitue un très important réservoir. Sa lithologie est formée de 10% de grès, de 10 à 50 % de grès argileux et 50 % d'argiles. Cet aquifère est homogène avec une formation diversifiée en couches isolées les unes des autres. Sa hauteur dépasse 150 m et atteint 1000 m au Nord-Ouest et se trouve à environ 300 m de profondeur dans la ville de Ouargla. Son eau jaillit à la surface à une température de 57°C avec une faible teneur en sel (2g/l) [5], [10] et est captée entre 1120 et 1380 m de profondeur dans la région. Le sens d'écoulement se fait du sud vers le Nord. Un forage artésien peut donner un débit de 200 l/s avec une pression à la sortie de 20 bars et une conductivité hydraulique de $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

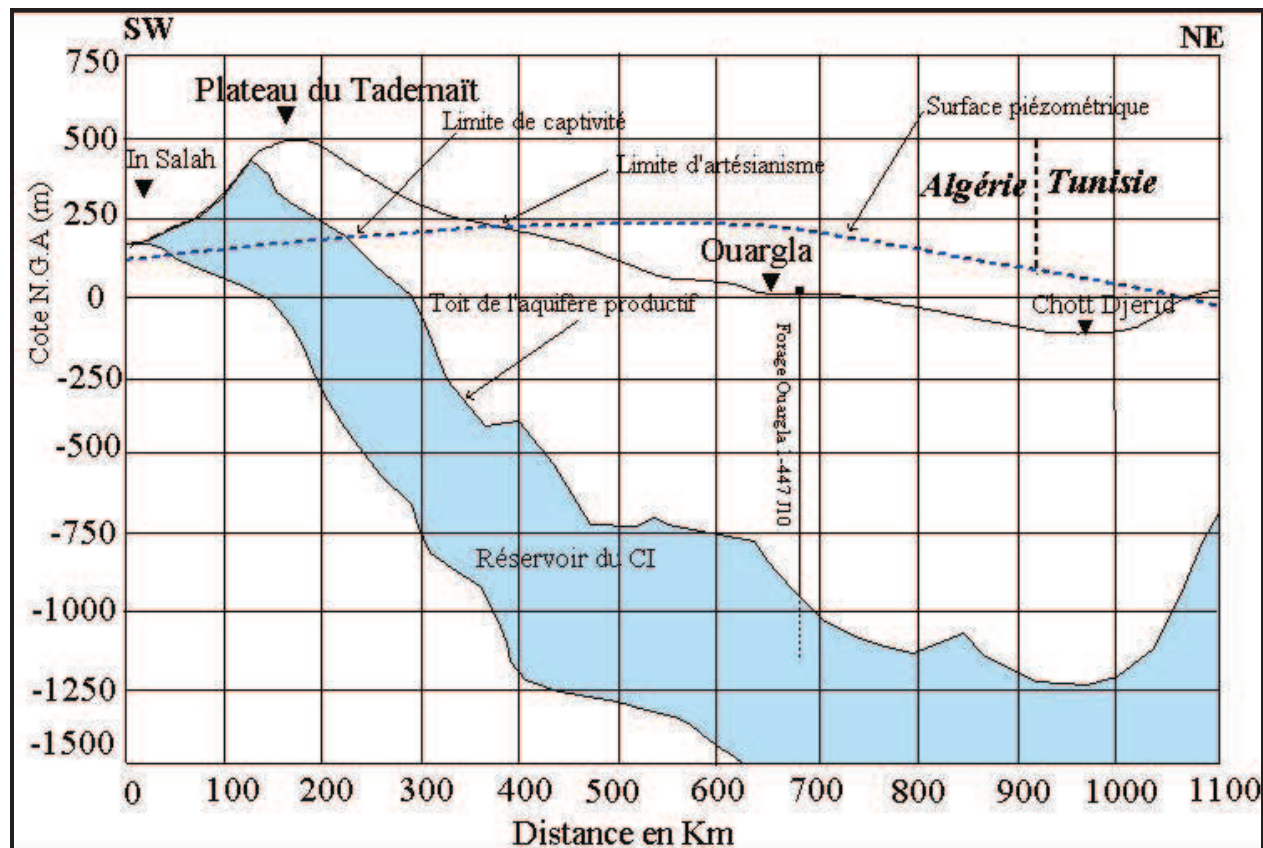


Figure (I-7) : Coupe hydrogéologique transversale du "CI" (UNESCO, 1972)

I.4.1.2 Nappe Du Complexe Terminal

-Nappe Miopliocène :

C'est la nappe la plus importante et la plus exploitée pour satisfaire les besoins en eaux des superficies agricoles et la consommation en eau potable. Elle s'écoule du Sud-Sud Ouest vers le Nord- Nord Est en direction du chott Melghir, avec une profondeur qui varie de 60 à 200 m [5]. La salinité de l'eau varie de 1,8 à 4 g/l (dans certains cas elle atteint les 7 g/l), avec une température de 23 à 25°C. Elle est exploitée par pompage avec une capacité de 15 à 40 l/s [11].

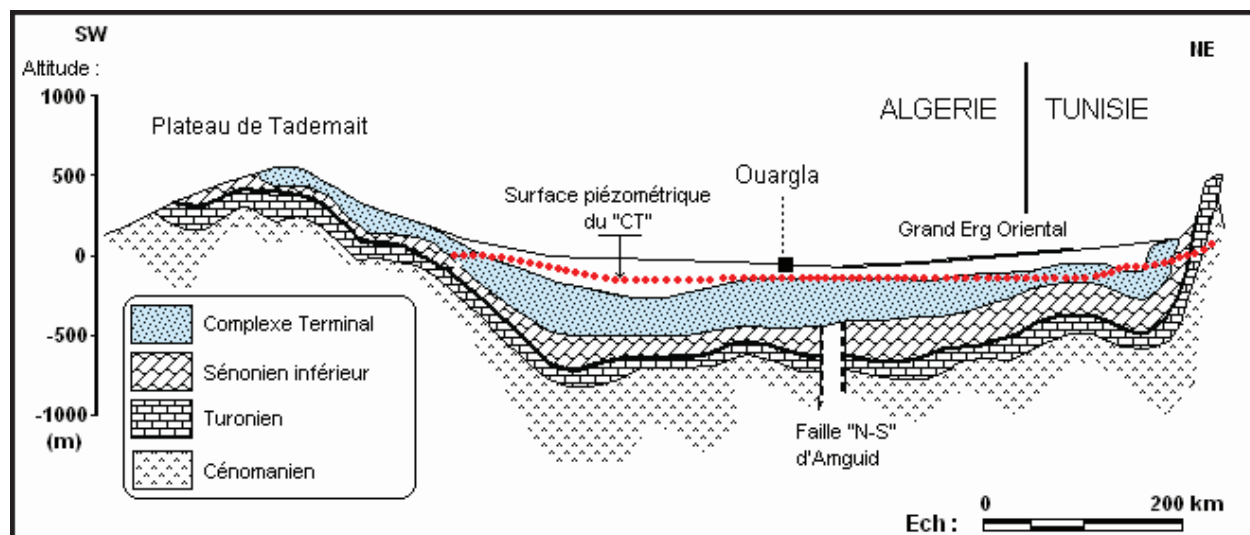


Figure (I-8): Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (UNESCO, 1972).

I.4.1.3 Nappe Quaternaire (Nappe Phréatique)

Elle est contenue dans des formations récentes qui sont les sols alluviaux de la vallée, avec un sens d'écoulement pas bien défini. Il semblerait qu'elle ait deux sens, du sud vers le nord suivant la pente de la vallée, et de l'ouest vers l'est pour les parties Bamendil Chott (ancienne ville Ouargla) [12]. La profondeur de la nappe peut se trouver juste à 50 cm de la surface et peut même affleurer le sol avec une qualité des eaux très salées. Cette nappe phréatique est exploitée dans certaines zones telle que : Bamendil, N'goussa, El Hadjira, et Taïbet ; où elle est aussi considérée comme une source hydrique des palmeraies bours. Les études effectuées par l'ANRH (1994) ont permis de donner un aperçu sur la qualité de ces eaux, leur minéralisation et aussi leur limite de concentration. En effet, cette étude montre que les fluctuations saisonnières des niveaux piézométriques sont irrégulières, tenant compte des apports saisonniers et des conditions climatiques, On peut distinguer deux états ; eaux basses au printemps et à l'été et eaux hautes en automne et en hiver [13].

I.5 Conclusion

Nous concluons que la ville de Ouargla est caractérisée par un climat chaud et sec et elle possède plusieurs nappes dont la nappe phréatique qui s'étend sur une superficie très large, ce qui influence sur la durabilité des ouvrages souterrains.

Partie II: Généralités Sur La Durabilité Du Béton

I Définition De La Durabilité

La durabilité d'un béton est de pouvoir conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation aux quels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques [14].

La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton, les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles. Il convient de noter avant toutes choses que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause: le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apprêteront. [15]

Dans notre cas d'étude, Le béton est soumis au pire des cas, ou les ouvrages sont exposés a deux milieux très agressifs, d'un coté l'eau de la nappe phréatique de Ouargla qui présente un cas rare d'agressivité et d'un autre coté les eaux usées, dont les substances chimiques sont ceux qui dégradent le plus les ouvrages en béton.

I Agents Chimiques

I.1 Processus De Dégradation

- La corrosion du ciment durci par des réactions chimiques et biochimiques.
- Processus physico-chimiques provoqués par l'absorption capillaire des différentes solutions. Ces solutions parviennent par ascension capillaire jusqu'aux surfaces libres de l'élément de béton, l'eau s'évapore et les substances dissoutes cristallisent dans les pores de la couches superficielle du béton et la détruisent soit par la pression de cristallisation, soit par des

réactions chimiques entre ces substances concentrées, à cause de l'évaporation de l'eau, et le ciment durci.

- Réactions chimiques et phénomènes physiques dus à l'incompatibilité entre le granulats et le ciment durci.

- Dans le cas du béton armé interviennent aussi les processus électrochimiques à la suite des réactions entre les agents corrosifs et l'acier de l'armature [16]

I.2 Types D'agents Chimiques

Les agents chimiques agressifs sont variés et sont classés en quatre catégories.

-Gaz: d'origines naturelles ou résultant de pollutions atmosphériques et de fermentation, dont les plus communément rencontrés sont les dioxydes de carbone de soufre et d'azote d'hydrogène sulfuré, iodées et l'ammoniac

- Liquides: inorganiques ou organiques qui indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.

- Solides: essentiellement des sols et des déchets d'origines diverses.

-Milieux Biologiques : fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies et champignons qui conduisent à la formation d'acide, attaques mécaniques et chimiques par certains organismes présents dans l'eau.

I.3 Modes D'action Des Agents Chimiques

-Gaz: le transfert des gaz dans le béton se fait généralement par diffusion et dépend très fortement de l'humidité relative des matériaux. Il est négligeable dans le béton saturé d'eau et augmente quand l'humidité relative diminue.

Les gaz en tant que tels, ne sont généralement pas agressifs mais du fait de leur solubilité partielle et de leur possibilité d'atteindre le point de rosée, ils peuvent former avec l'eau des

solutions agressives. Leur transfert dans le béton est alors régi par les lois d'écoulement de l'eau dans les milieux poreux (pression hydraulique, ascension capillaire) et par les lois de diffusion [16].

La vapeur d'eau a un comportement particulier dû à de très fortes interactions avec les hydrates du ciment, contrairement aux gaz habituels.

- Liquides: le transfert des liquides se fait suivant les deux processus principaux interdépendant, qui sont le mouvement du liquide sous gradient de pression hydraulique ou la capillarité d'une part et les diffusions ioniques ou moléculaires d'autre part [16].

- Solides: La nocivité des substances solides est directement liée à leur capacité d'extraction et de passage en solution dans l'eau avec lesquelles ils rentrent en contact. Leurs actions se réduisent à des phénomènes voisins de ceux observés dans le cas des agressions des liquides.

- Agents D'origine Biologique: Les réactions biologiques aérobies et anaérobies mettent en jeu certaines bactéries contenues dans les eaux usées et peuvent conduire à la production d'acide, en particulier les acides sulfuriques résultant de l'oxydation des hydrogènes sulfurés. L'eau sert de vecteur à la substance acide [16].

Mais tous se ramène à un seul scénario, c'est l'association de ces agents avec l'eau en phase liquide ou vapeur qui constitue la solution chimiquement agressive pour le béton.

I-4 Mécanismes D'interaction Entre Les Agents Agressifs Et Le Béton

- Dissolution : La dissolution d'un acide, d'une base ou d'un sel dans l'eau est une réaction de dissociation totale ou partielle. La dissociation d'un acide fort, d'une base forte, des sels d'un acide fort et d'une base forte est complète ou presque. ainsi les hydroxydes de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui est une base forte se dissocie en ions (Ca^{2+} et OH^-), Dans le cas d'un acide faible ou une base faible la dissociation n'est que partielle.

- Hydrolyse: l'hydrolyse est le nom particulier donné à la dissolution lorsque les ions proviennent de la dissociation d'un sel d'acide faible ou de base faible réagissant sur l'eau. Cette dernière se décompose avec production de protons (H^+) ou (H_3O^+) ou

hydroxyles (OH^-), suivant que l'on a affaire à un sel de base faible et d'acide fort ou un sel de base forte et d'acide faible. La solution résultante, ou le sel n'est que partiellement ionisé, présente donc un caractère acide ou basique.

L'hydrolyse conduit à un lessivage ou à une lixiviation plus au moins prononcée de la chaux des composés de la pâte du ciment durci provoquant un accroissement de la porosité et à une déstructuration progressive du liant.

I.5 Dégradation Du Béton

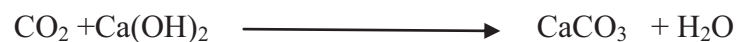
1 Attaque Par Dioxydes De Carbone

Introduction La réaction du dioxyde de carbone (CO_2) avec les substances alcalines du béton s'appelle la carbonatation, Cette dernière est un phénomène pouvant causer l'instabilité de l'ouvrage par l'action du CO_2 naturellement présent dans l'environnement, sous diverses formes, L'état gazeux, hydraté et dissous sous pression, sous forme d'acide carbonique H_2CO_3 selon la relation suivante: [4].

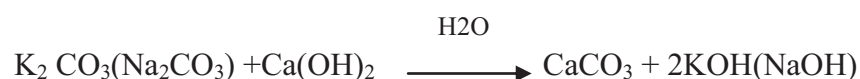


1.1 Mécanisme De Dégradation du béton

La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air, réduit le pH de la solution interstitielle à une valeur telle que la pellicule d'oxyde passive protégeant l'acier n'est plus stable. Le film passif se réduit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide [16]. Le dioxyde de carbone réagi sur les différents hydrates et surtout sur la portlandite pour donner du carbonate de calcium en produit final : [17].



La carbonatation des bases augmente alors la solubilité de la chaux qui peut réagir en quantités suffisantes:



C'est la portlandite qui se carbonate le plus rapidement, mais les autres composés hydratés, aluminates et silicates de calcium, sont aussi sensibles à l'attaque par les dioxydes de carbone et donnent également du carbonate de calcium.

L'effet « bouche-pores » causé par les dépôts de CaCO_3 ralentit la progression de la carbonatation. La pulvérisation de phénolphthaléine (indicateur coloré virant au rose vif lorsque le pH est supérieur à 9), permet de mettre en évidence le front de carbonatation du béton (toutes les zones qui restent incolores sont carbonatées)

1.2 Paramètres Influençant Sur La Carbonatation

1 L'humidité Relative Et La Saturation En Eau

Dans le processus de diffusion du dioxyde de carbone, L'humidité relative joue un rôle primordial, Car le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air est dix mille fois plus élevé que dans l'eau [18], En effet, lorsque les pores du béton sont saturés d'eau, la pénétration est extrêmement faible, de même pour la carbonatation, inversement par rapport aux milieux secs car la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le gaz carbonique [19], [20]

2 Influence Des Paramètres Relatifs Aux Béton

- Composition du béton: Vérifiable par une bonne résistance à la compression

- * un bon rapport E/C [21]
- * un bon dosage en ciment [22]

-Condition de fabrication: Un béton bien compacte résiste mieux à la carbonatation.

-Conditions de conservation permettant de réduire la porosité de la couche superficielle du béton , car la cure réduit la profondeur de Carbonatation.

3 Influence Des Additions Minérales

- Le laitier: La carbonatation s'accroît avec le pourcentage du laitier ajouté, en moyenne, elle est une fois et demie plus élevée pour un béton comportant 50% de laitier par rapport un béton de ciment portland.

- La cendre volante: L'accroissement de la carbonatation n'est sensible que si le pourcentage des cendres dépasse 30%.

Donc l'effet d'une cure humide prolongée est nécessaire lorsque le ciment contient un pourcentage dépassant 50% de laitier et 30% de cendres volantes [23-31].

- La fumée de silice: Fumée de silice modifie la vitesse de carbonatation, Car elle consomme la portlandite, Le béton contenant cet ajout est sensible vis-à-vis de la carbonatation. [32]

4 Influence Des Conditions D'exposition

- L'exposition au soleil et aux climats secs favorise le développement de la carbonatation [34],
- La concentration en dioxyde de carbone dans le milieu d'exposition favorise l'accroissement de la carbonatation [33],

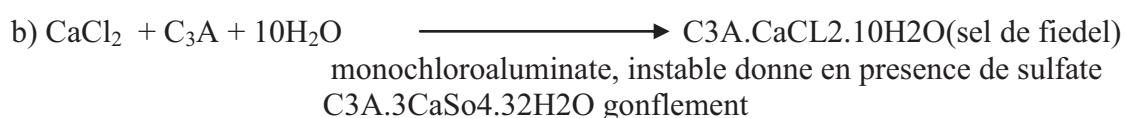
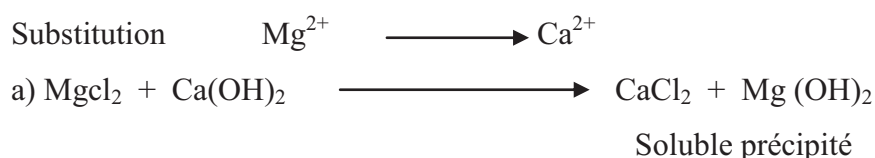
Résumé

La carbonatation due aux ions CO_3^{-2} de l'atmosphère est une réaction chimique qui fait d'abord intervenir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et en dernier lieu les composés calciques de la pate de ciment comme les C-S-H, A la précipitation des cristaux de calcite s'ajoute une diminution du pH de la solution interstitielle, Sur la zone superficielle carbonatée, Le pH peut être inférieur à 8 alors qu'il reste au dessus de 12 dans la zone non carbonaté, En fait, Les réactions de la carbonatation sont complexes et diverses, La carbonatation dépend du type de ciment , du rapport E/C , Du dosage en ciment, Résistance à la compression, Du temps de la cure , Du degrés d'humidité et la structure poreuse du béton de recouvrement. Si les ions CO_3^{-2} atteignent l'armature dans le béton arme il y a dépassivation puis corrosion. [33], [35]

Dans un béton de bonne qualité offrant un bon recouvrement aux armatures et n'ayant pas de fissures, la carbonatation est lente.

2 Attaque par les chlorures

1- Dégradation Par Echange Ionique



2- Dégradation Par Ecaillage

Ce phénomène de dégradation du béton est lié à l'alternance de cycles répétés de phase de gel et de dégel dans un milieu soumis à des concentrations élevées en sels de déglacage (NaCl, CaCl...). Cette dégradation occasionnée par le gel se présente de deux façons :

-Une microfissuration répartie dans la masse du béton provoquée par un mécanisme de gel interne. (Feuilletage parallèle aux parois).

-Un délitage de la zone superficielle appelée écaillage sous l'effet conjugué des cycles de gel – dégel et des sels de déverglaçage.

-Un gradient thermique important du voisinage de la surface générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

-Les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée présente dans les capillaires fins, qui sont considérées aujourd'hui comme la cause principale de dégradation. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte.

La répétition de ce phénomène engendre les dommages progressifs [37].

2.1 Le Mécanisme D'attaque Et Rôle Des Chlorures

- La vitesse de corrosion des armatures est plus grande en présence des chlorures, car plus la concentration en chlorure au niveau des armatures est grande, plus la vitesse de corrosion est élevée. Les chlorures ont deux rôles dans les mécanismes de corrosion.

* Ils diminuent la résistivité de l'électrolyte (le couvert de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.

* Ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. (Dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde).

-Aux endroits où la couche a été détruite, l'acier se dissous (zone anodique), alors que le reste de la surface encore passivée correspond à la zone cathodique, Les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique.

-Ces réactions engendrent une importante baisse du pH. (pH = 3 à 5). La dissolution du fer est alors accélérée. Les ions chlorures sont constamment recyclés. [38]

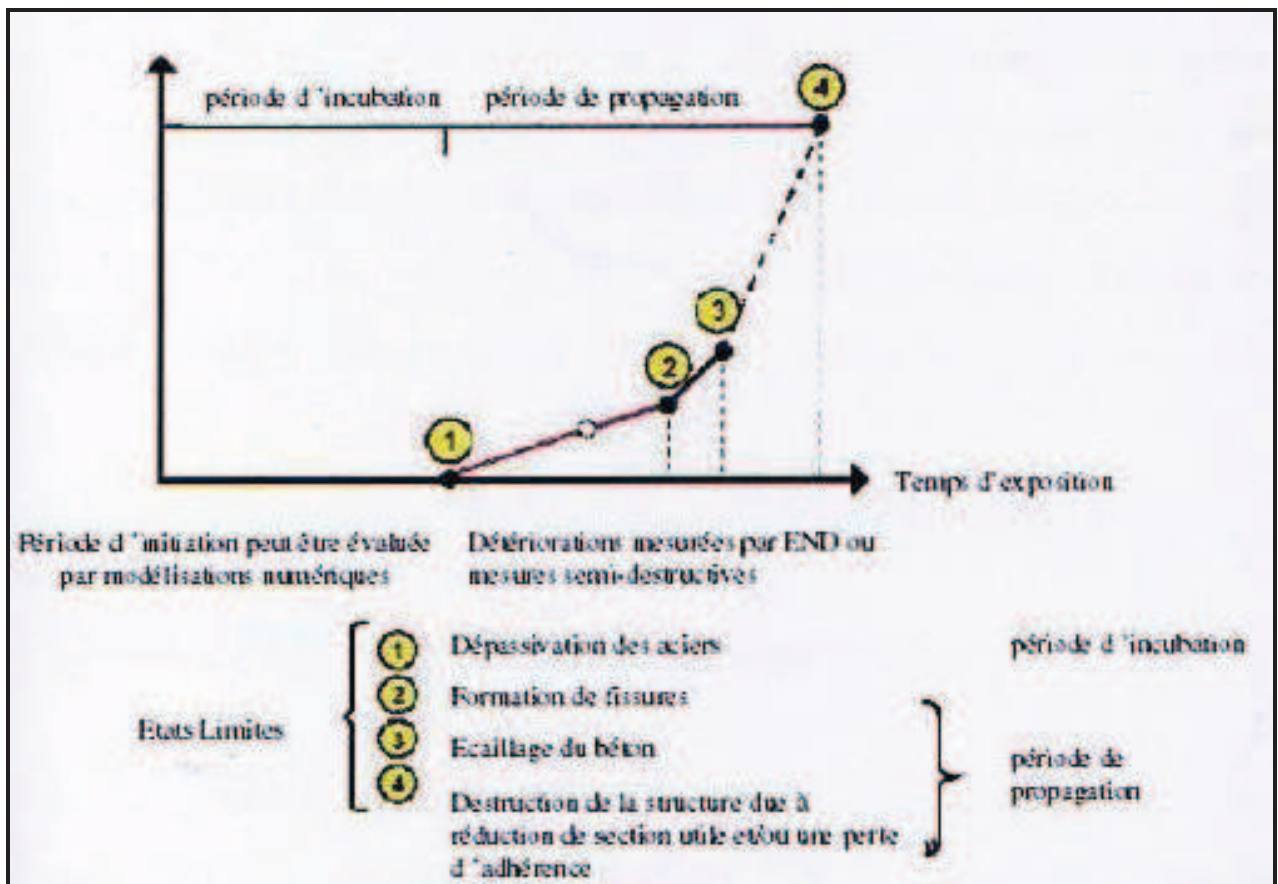
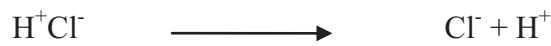


Figure (I -9): phases du processus de corrosion des armatures [37].

2.1.1 Seuil Critique

Le seuil critique correspond plus exactement au moment où le rapport $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$ devient supérieur à une valeur comprise entre 0,6 et 1,0. Ce seuil est atteint lorsque la concentration en chlorures solubles est approximativement 0,2 à 0,4% par rapport à la masse de ciment. Cependant on ne peut pas établir une seule concentration maximale en chlorure puisque cette

concentration critique dépend du pH. Une très faible modification du pH produit une très grande variation de la concentration en OH^- (et par conséquent de la concentration critique en chlorures).

Dans le béton carbonaté (pH faible < 9) même une faible concentration en chlorures peut initier la corrosion.

2.1.2 Transport Des Chlorures

Aux différents types de conditions d'environnement correspondent différents processus de transfert :

- pour la zone d'ouvrage toujours immergée le transport des chlorures se fera uniquement par diffusion

- pour la zone soumise à un cycle de séchage/ humidification, le transport des chlorures se fera par diffusion au sein de la phase liquide mais ils seront surtout véhiculés par la phase liquide en particulier au moment où le niveau des eaux est haut. (Cas de saturation du réseau d'assainissement ou remontée de la nappe ou encore la marrée)

- Dans la zone aérienne les chlorures peuvent pénétrer par des phénomènes d'adsorption capillaire.

La zone la plus « fragile » d'un ouvrage vis à vis de la corrosion est la zone qui subie la hausse et la baisse du niveau des eaux agressives, zone où coexistent deux modes de transport : la diffusion mais aussi la convection due au gradient de pression de la phase liquide.

2.1.2.1 Diffusion

Dans la partie totalement immergée, l'ouvrage est donc saturé en eau en permanence. Les ions chlorure vont se propager à travers le matériau seulement grâce au gradient de concentration en ions chlorure. C'est de la diffusion pure, ce déplacement unidirectionnel, en régime stationnaire et sans tenir compte des interactions avec la matrice solide, se traduit par la loi de Fick.

2.1.2.2 Pénétration Des Chlorures Par Imbibition

Pour la partie de l'ouvrage qui est exposée un cycle de séchage/ humidification, le phénomène de transfert des ions chlorure est plus complexe. Dans le cas de l'humidification le matériau partiellement sec subit une imbibition. Le mouvement des ions chlorure se décompose en deux phénomènes physiques:

- le mouvement dû au gradient de concentration en ions chlorure (diffusion liée à la loi de Fick).

-le mouvement dû au mouvement du liquide interstitiel dans le milieu poreux. Plusieurs auteurs dont Nielsen néglige la diffusion dans le transport des ions chlorures lors d'une imbibition. Cette hypothèse au vue des vitesses de propagation semble satisfaisante. [38]

Dans le cas du séchage, le problème est beaucoup plus complexe. En effet le sel se propage par diffusion ou par convection seulement si la phase liquide est continue.

Or dans le cas du séchage, le mouvement de l'eau se fait d'abord sous forme liquide puis à une certaine teneur en eau la phase liquide n'est plus continue et alors le transfert se fait sous forme vapeur. On peut constater une limite en teneur en humidité pour laquelle il n'y a plus de continuité de la phase liquide. Le mouvement des ions chlorures par convection et diffusion n'est alors plus possible. Cette limite en humidité relative est autour de 75-80% dans le cas de l'eau pure.

2.1.3 Facteurs Influençant La Corrosion

1 Influence du temps d'exposition

La figure (I-10) montre que la vitesse de pénétration des ions chlorure accroît avec le temps et s'approchent des armatures de renforcement après une durée d'exposition, ce qui implique la corrosion de ces derniers, même dans un béton de bonne qualité. [39]

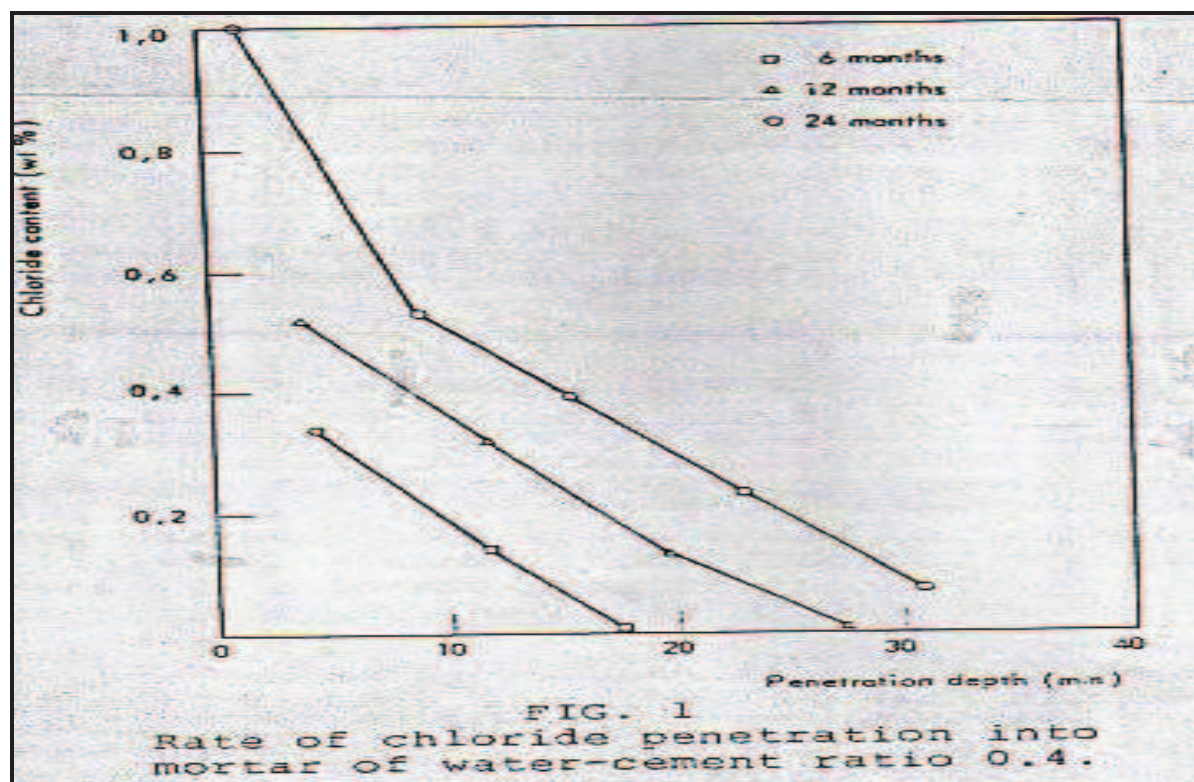


Figure (I-10): taux de pénétration des chlorure dans un béton avec $E/C = 0.4$ [39]

2 Influence du rapport E/C

La figure (I-11) montre l'influence du rapport E/C sur la contenance des chlorures est limitée principalement sur les parties proches de la surface (<10 mm), A cause de l'augmentation de la porosité.

A des profondeurs plus importantes 20 mm et plus, Les mortiers à différents rapport E/C n'ont pas de différences significatives en contenance des chlorures, Car en profondeur d'autres facteurs tels que la fixation et l'échange des ions influent sur la pénétration des chlorures. [39]

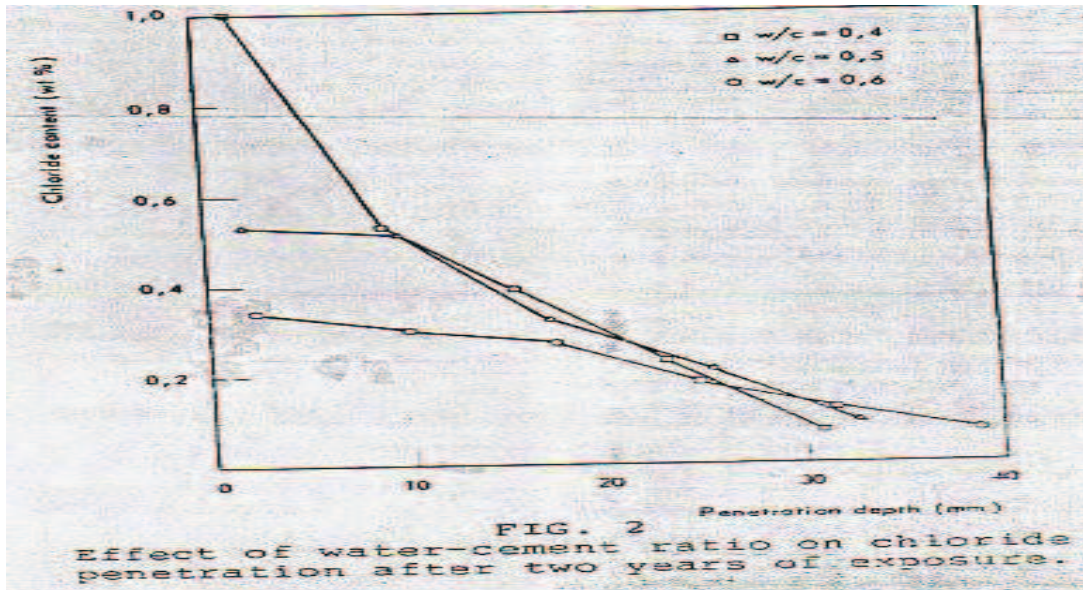


Figure (I-11): Effet du rapport E/C sur le taux de pénétration des chlorures après deux ans d'exposition [39].

3 Influence Du Type De Ciment

D'après la figure (I-12), nous remarquons que Le type du ciment a un rôle important à des profondeurs importantes, supérieure 15mm. L'augmentation des pouzzolanes ou le laitier dans le ciment, Diminue de la taille des pores.

Le mélange ciment est pauvre en ions hydroxyde ce qui minimise l'échange des ions entre la solution saline et pate du ciment [39]

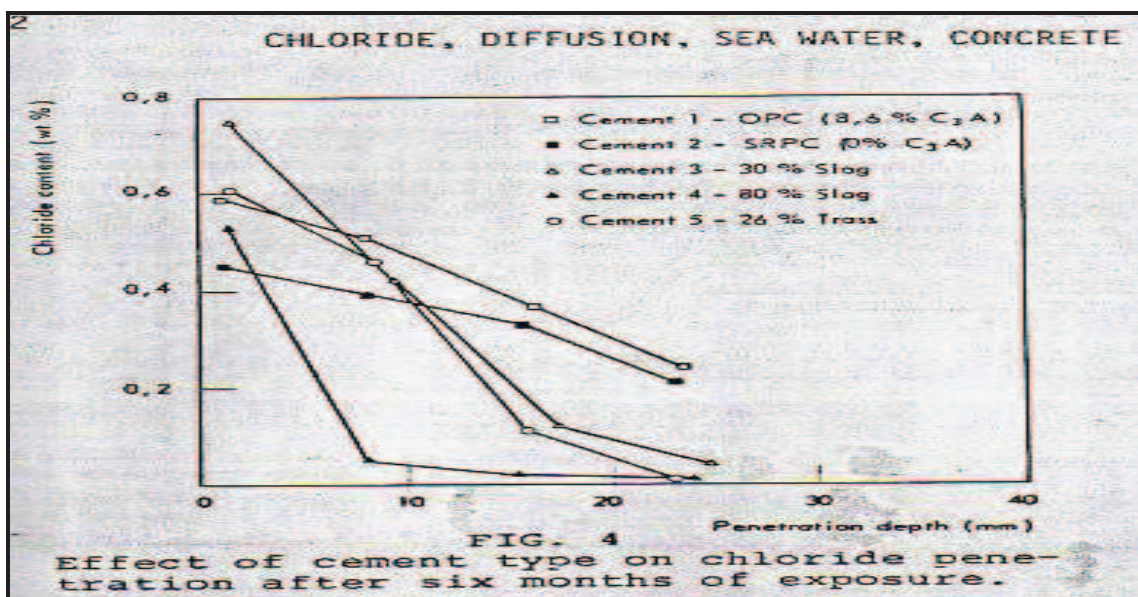


Figure (I-12): Effet du type de ciment sur la pénétration des chlorures après six mois d'exposition [39].

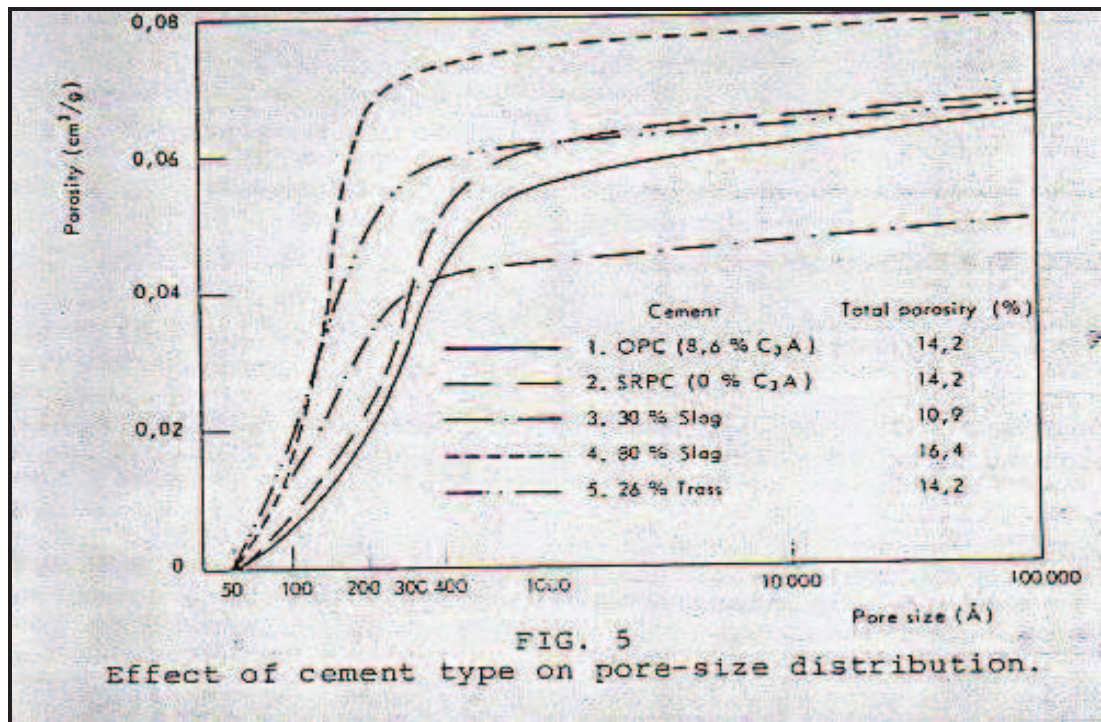


Figure (I-13): Effet du type de ciment sur la distribution de la taille des pores.[40]

A partir de la figure (I-13), on note que les ciments riches en C_3A offrent en général une meilleure protection contre la corrosion des aciers de renforcement, Car les chlorures en solution qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec le C_3A du ciment. Cette réaction produit des monochloroaluminates hydratés ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) qui est un hydrate relativement stable dans le béton .La formation des chloroaluminates permet de fixer des chlorures dans le béton, ce qui réduit la teneur en chlorures soluble et par le fait même, les risques de corrosion. [40]

4 Influence De La Teneur En Eau

- Dans les bétons très faiblement saturés, la corrosion ne se produit pas nécessairement même si la concentration en chlorures est très élevée (il n'y à pas assez d'eau pour amorcer la corrosion).

5 Influence De La Concentration En Oxygène

- Dans les bétons totalement saturés la corrosion ne se produit pas nécessairement (même si la concentration en CL^- est élevée) puisqu'il peut y avoir un manque d'oxygène pour entretenir le processus de corrosion.

6 Influence De La Température

L'augmentation de la température accroît la mobilité des ions de chlorure, Ce qui augmente la pénétration des chlorures, Cet effet a été modelé par l'équation d'ARRHENIUS_ [41]

7 Influence Du Cycle Humidification/Séchage

Lorsque le béton subit alternativement une humidification et un séchage, la solution qui contient des chlorures peut pénétrer avec une convection de vitesse, selon l'équation de Fick. Au cours d'un séchage du béton, l'eau s'évapore et les chlorures restent dans le matériau soit sous forme adsorbée sur les parois des pores, soit en formant des cristaux de sel. Si par la suite ce béton est ré-humidifié, Ces sels sont de nouveau dissous dans l'eau entrante. Le profil de teneur en chlorure peut ainsi différer de ce qui correspond à une pénétration de chlorures en immersion constante. [38]

8 Influence Du Rapport Cathode/Anode

Le rapport cathode/anode élevé favorise la progression localisée et en profondeur de la corrosion [39]

9 Influence De La Protection Cathodique

La protection cathodique handicape la pénétration des chlorures, Car les ions chlorures ont une charge négative et ils ont tendance à se déplacer dans le champ électrique directement vers les électrodes positives (externes), D'où la diffusion des ions chlorures dans le béton est minime. [39]

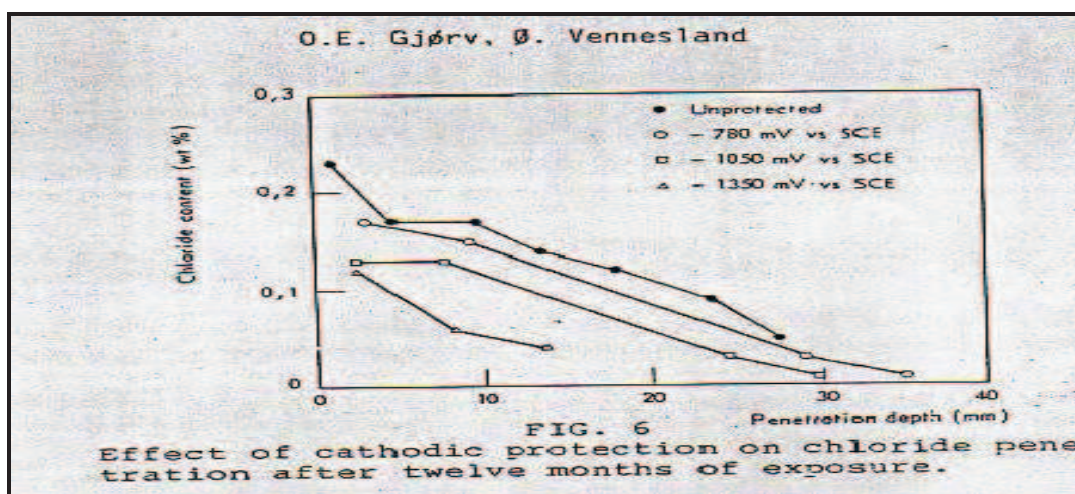


Figure (II-14): Effet de la protection cathodique sur la pénétration des chlorures après douze mois d'exposition [39]

Conclusion L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton, comme:

- les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage,
- ouvrages destinés à l'assainissement.

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions par mécanisme de dissolution du métal.

D'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue...etc. La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dé-passivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures, Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

La résistance à l'agressivité du milieu ambiant est fonction de l'étanchéité d'un béton qui dépend en premier lieu de sa compacité et de la cure humide du béton qui consiste à tenter de limiter l'évaporation d'eau préjudiciable à la compacité. [42]

3 Attaque Par Les Sulfates

La dégradation du béton provient le plus souvent de son attaque par les Agents chimiques : acides ou salins, contenus dans l'eau avec laquelle il est en contact, qui dissolvent la chaux du ciment en formant des composés nouveaux entraînant l'érosion, le gonflement et l'éclatement des bétons. [43]

3.1 Forme Et Provenance Des Sulfates

On peut retrouver les sulfates en solution dans les eaux souterraines, dans les eaux usées industrielles et dans certains sous-produits industriels. La plupart des sols contiennent des sulfates sous la forme de gypse (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO_4). Ces concentrations relativement faibles ne sont généralement pas agressives pour le béton.

- La solubilité du gypse dans l'eau à température normale est relativement faible (approximativement 1400 mg/litre). Dans les eaux souterraines, les concentrations plus

élevées en sulfates sont généralement dues à la présence de sulfates de magnésium (MgSO_4) ou de sulfates alcalins ($\text{K}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4$). Les sulfates d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) se retrouvent fréquemment dans les sols et les eaux en milieux agraires. L'activité agricole peut aussi générer différents types d'acides organiques (lactique, acétique, etc.)

-Les effluents des fours utilisant des combustibles riches en soufre et les effluents des industries chimiques peuvent contenir de l'acide sulfurique.

- La décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage peut conduire à la formation de H_2S (gaz) qui peut être transformé en acide sulfurique par l'activité bactérienne.

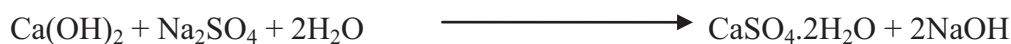
3.2 Mécanismes De Base

- Les mécanismes de destruction sont fonction de la concentration et de la source des ions sulfates (le cation qui leur est associé) dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Les dégradations dues aux milieux selvatiques se font selon deux mécanismes simultanés et interactifs:

Expansion: L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs, Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère le rythme de destruction. Ces expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables, En formant l'ettringite secondaire (l'ettringite primaire n'est pas expansive). [44]

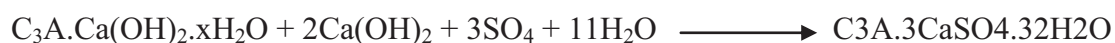
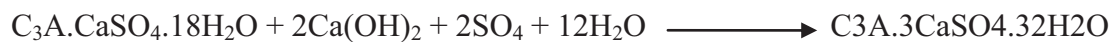
1.1) Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates)

. 1/Cas du sulfate de sodium:



NaOH : Alcalinité élevée stabilisation des C-S-H.

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

2/Formation d'ettringite secondaire:à partir du C₃A anhydre résiduel:à partir des aluminates hydratés:

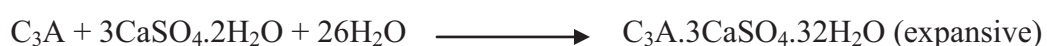
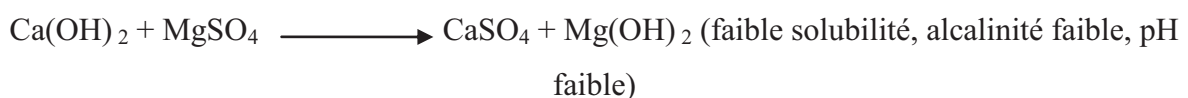
- Dépendant de la composition de la solution interstitielle, (particulièrement de la concentration en portlandite), la cristallisation de l'ettringite secondaire peut être expansive.

- La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures (suivant qu'il s'agit du C₃A ou du C₄AH₁₃) au volume du solide initial. [44]

Perte des propriétés liantes des C-S-H: L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface, A cause de l'altération des propriétés liantes de certains hydrates. Causés par la dissolution des composés calciques du liant hydraté ,silicate de calcium hydratés C-S-H et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂= portlandite ce qui conduit à un accroissement de la porosité du béton [45]

3.3 Association Des Différents Cations Aux Sulfates Et Leurs Agressivités**3.3.1 Sulfate De Magnésium**

Le sulfate de magnésium est très agressif par sa double action du Mg²⁺ qui s'échange avec le Ca²⁺ et l'amions SO₄²⁻ suivant:



Les échanges de Mg^{2+} avec le Ca^{2+} forment la brucite $Mg(OH)_2$ qui peut ralentir la pénétration des sulfates et provoquer la transformation des C-S-H en silicates de magnésium M-S-H sans propriétés liantes et la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la formation du gypse [45]

3.3.2 Attaque Par Le Sulfate De Calcium ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou $CaSO_4$ dans les sols)

Le sulfate de calcium présent dans le sol sous forme de gypse et d'anhydrite et dans les eaux séléniteuses attaque aussi le béton, Cette attaque est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive.

3.3.3 Attaque Par Le Sulfate De Sodium (Très Soluble) (Na_2SO_4)

L'attaque par le sulfate de sodium entraîne la formation de l'ettringite secondaire expansive et du gypse, Suivant deux facteurs, La concentration en ions SO_4^{2-} et de la teneur de l'aluminate tricalcique du ciment et du gypse, Les C-S-H sont moins sensibles que la portlandite, ils ne sont pas affectés directement mais ils sont susceptibles de se décomposer par lixiviation potentielle de leurs chaux et la formation du gypse.

3.3.4 Attaque Par Le Sulfate De Potassium (K_2SO_4)

Peut aussi être agressive. Le rythme d'attaque est similaire à celui du sulfate de sodium.

3.3.5 Attaque Par Un Des Sulfates Métalliques

La plupart des sulfates métalliques solubles ($FeSO_4, \dots$) peuvent être agressifs notamment en présence de certaines bactéries. A l'exception des sulfates peu solubles tels que les sulfates de plomb.

Les sulfates peuvent aussi être produits par l'oxydation du sulfure du fer contenu dans le sol [46] sous forme de pyrites de fer.

3.3.6 Attaque Par Formation De La Thaumaside

La thaumasite se forme généralement quand l'attaque sulfatique a lieu à des températures assez basses (entre 0 et 5°C). Elle est le produit de réactions entre les C-S-H, et les ions sulfates SO_4 et carbonates CO_3

Elle peut aussi se former à partir d'ettringite et être associée à la formation de gypse. La dégradation du béton liée à la formation de thaumasite provient donc de la dégradation des C-S-H. La probabilité de voir se produire ce type de dégradation augmente si des granulats ou des fillers calcaires sont utilisés sous des climats froids, car ces matériaux sont essentiellement constitués de carbonate de calcium et les ions carbonates interviennent dans les réactions de formation de la thaumasite, Son mécanisme de formation n'est donc pas encore bien connu, de même que l'influence de la température sur les attaques sulfatiques.

3.4 Facteurs Qui Influent Sur La Resistance Aux Sulfates Du Béton

3.4.1 Dosage En Ciment

Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible qui ralentie la pénétration des sulfates et de l'ion qui leur est associé.

3.4.2 Quantité De C_3A

Le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C_3A du ciment.

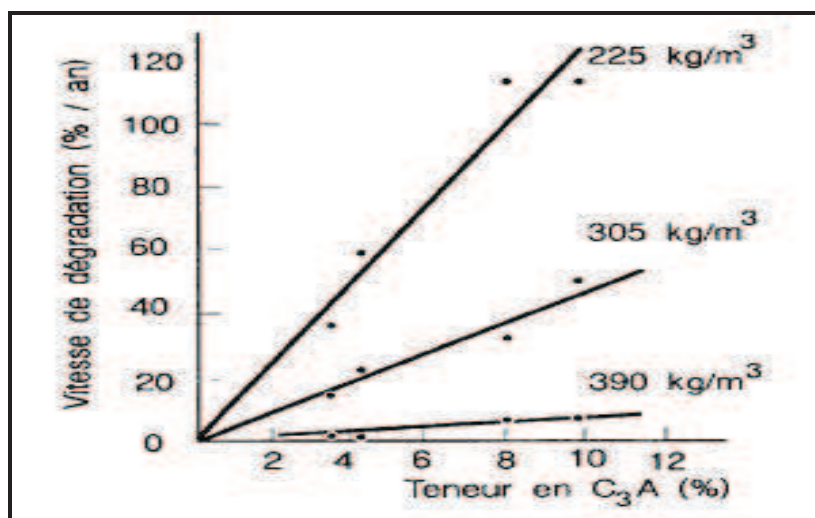


Figure (I-15): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C_3A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na_2SO_4 à 10%). [47]

3.4.3 Ajouts Minéraux

Particulièrement les laitiers permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates.

-Les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates.

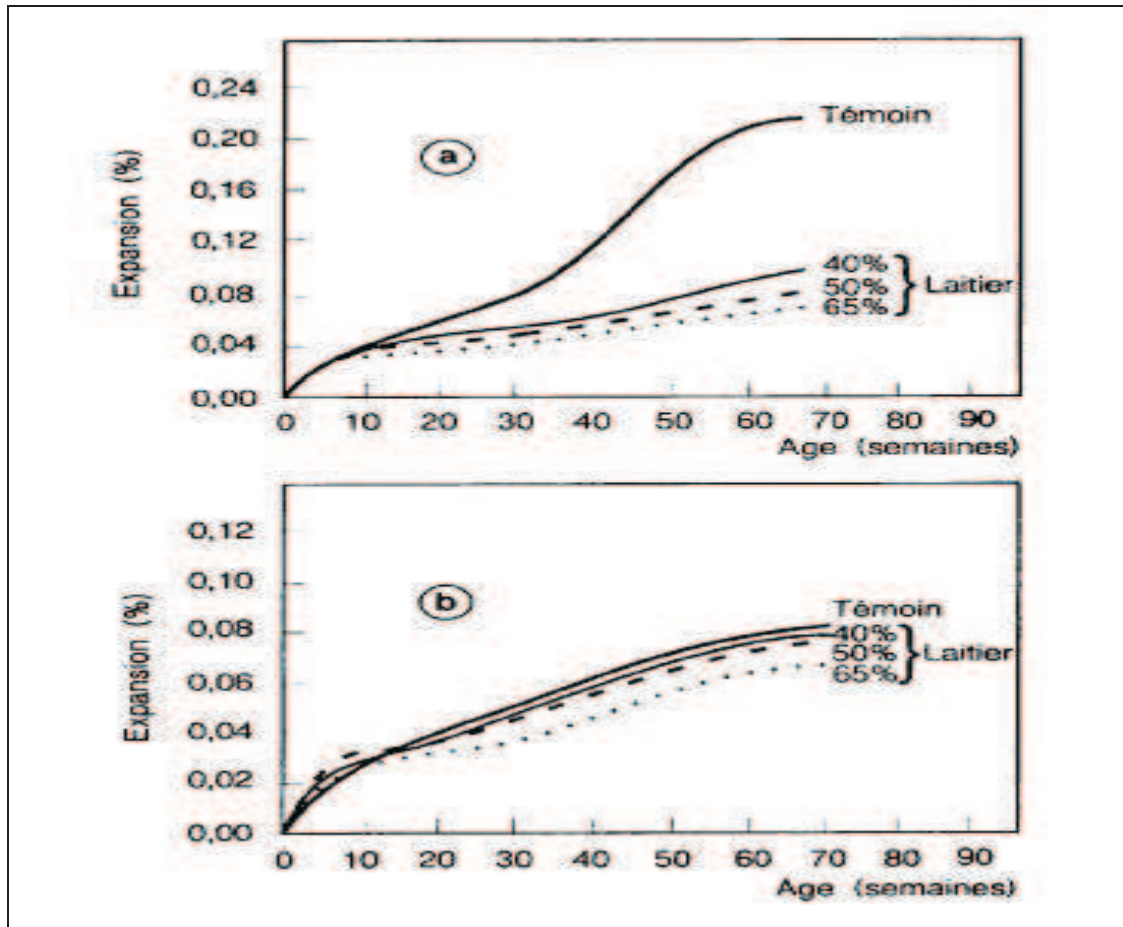


Figure (I-16) - Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de Laitier. [48]a: Ciment type II 6,4% de C3A [47]

b: Ciment type V 3,7% de C3A

- Les ciments avec plus de 20% à 30% de cendres volantes ont une meilleure résistance aux sulfates. L'effet des cendres est variable en fonction de leur composition chimique. Les cendres ayant un contenu en chaux > 20% ne devraient pas être utilisées.

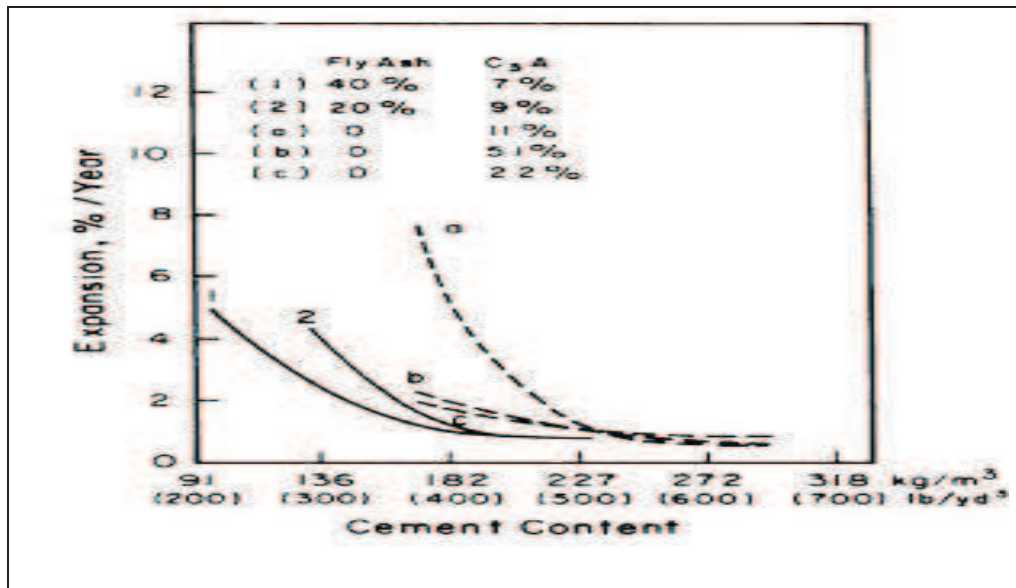


Figure (I-17): Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de Laitier. [49]

- La fumée de silice (7%-10%) améliore très significativement la résistance aux sulfates.

Conclusion: La rapidité et la gravité des attaques par sulfates dépendent:

- de la concentration de ces derniers sur les lieux,
- du type et du degré de liberté des ions sulfates
- , des facilités d'accès de l'eau,
- du type de ciment et de la qualité du béton.
- Les ciments résistant aux sulfates,
- les faibles rapports eau-ciment,
- les teneurs minimales en ciment,
- les entraîneurs d'air,
- les revêtements imperméables à l'eau,
- l'installation de dispositifs de drainage,
- une attention spéciale apportée au recouvrement de l'armature,

Tous les Facteurs précédents permettent, entre autres, de lutter contre l'action des sulfates.

4 Attaque Par Le Gaz Hydrogène Sulfure (H₂S)

Introduction

l'hydrogène sulfuré est un gaz d'odeur fétide caractéristique "oeuf pourri", Il est incolore plus lourd que l'air (densité = 1,19) qui a tendance à s'accumuler dans les parties basses d'espaces non ventilés, c'est un gaz susceptible de former avec l'air des mélanges explosibles (limite inférieure d'explosivité : 4 % en volume, limite supérieure d'explosivité : 46 % en volume), sa température d'auto-inflammation, relativement basse (250°C), peut être à l'origine d'incendies, c'est un gaz faiblement acide pouvant entraîner des phénomènes de corrosion, Sa combinaison avec l'humidité ambiante provoque la production d'acide sulfurique (H₂SO₄).

La réduction, en milieu pauvre en oxygène, par action des bactéries sulfato-reductrices des composés soufrés et contenus dans les eaux usées des réseaux d'assainissement, des fosse septiques ou des stations d'épurations, est à l'origine de dégagement d'hydrogène sulfuré H₂S. ce gaz n'est pas agressif en tant que tel vis-à-vis du béton mais la consommation de l'hydrogène sulfuré au cours du métabolisme des bactéries (principalement thiobacillus concretivorus) installées sur les parois internes des canalisations (voir figure (I-10) entraîne la production d'acide sulfurique H₂SO₄, ce composés est très agressif vis-à-vis du béton:

- d'une part en raison de sont acidité PH très bas pouvant atteindre des valeurs proches de 1 ce qui entraîne la dissolution des composés calcique et la formation du gypse suivant la réaction suivante:



-d'autre part en raison de la formation d'ettringite par réaction du gypse néoformé avec les aluminates du ciment dont la cristallisation peut engendrer une fissuration du béton. Qui corrode gravement les parties métalliques et le béton. A température ambiante et pression atmosphérique.

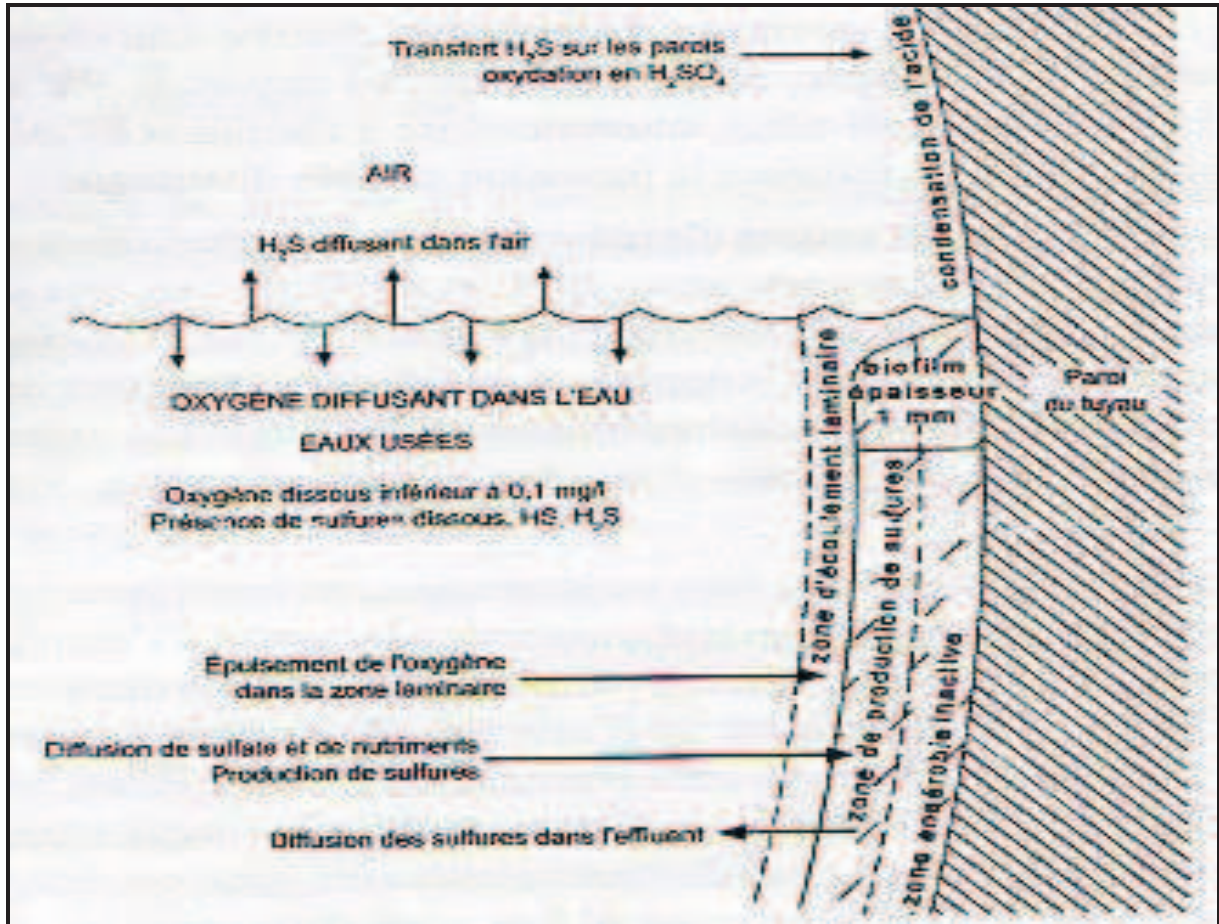


Figure (I-18): mécanisme d'attaque biochimique

4.1 Mécanismes de dégradation du béton

Il existe deux principaux types de bactéries pouvant être à l'origine de la détérioration du béton. [50]

-Milieu anaérobie : Desulfovibrio desulfuricans

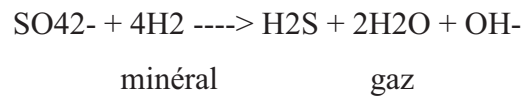
-Milieu aérobie: Thiobacillus,concretivorus

Le dégagement d'hydrogène sulfuré peut se produire dans des ouvrages tels que les fosses septiques, Les stations d'épuration ou les réseaux d'assainissement. Ce dégagement a pour origine la décomposition en milieu anaérobie des composés du soufre contenus dans les effluents brassés ou circulant dans les ouvrages. Les composés soufrés proviennent des sulfates et des produits organiques de type protéines végétales et animales ou de type sulfonates contenus dans les produits détergents [50]

La réduction de ces composés est due à l'action de bactéries anaérobies sulfato-réductrices et nécessite un milieu pauvre en oxygène " $O_2 < 0.1 \text{ mg/l}$ "

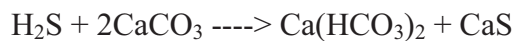
Bactérie sulfo-réductrice "Desulfovibrio desulfuricans":

Production de H₂S [51]

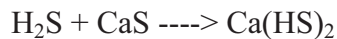


•L'activité bactérienne dans les effluents en milieu anaérobie produit des sulfures. Les sulfures sont ensuite transformés en hydrogène sulfuré (H₂S) .

•Action du H₂S sur le béton "acide faible"



Soluble Lixiviation

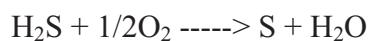


Soluble Lixiviation

Par consommation de l'hydrogène sulfuré au cours de leur métabolisme, les sulfato-bactéries rejettent de l'acide sulfurique H₂SO₄.

Bactérie produisant des sulfates "Thiobacillus concretivorus":

-Oxydation du H₂S "activité bactérienne"



-

Oxydation du S (au contact de l'atmosphère(



Lixiviation acide fort

Tous les matériaux à base de liants hydrauliques calciques sont très sensibles aux contacts de ces acides (formation d'un bio-film : dépôt gélatineux superficiel permettant à l'activité bactérienne de se poursuivre directement au contact du béton). Les acides secrétés peuvent correspondre à des solutions dont le pH peut être proche de zéro. Ce qui augmente significativement les risques de la corrosion des aciers. [45]

L'action de H₂S se résume principalement à une attaque par H₂SO₄ qui se décompose elle-même en :

-un phénomène d'attaque acide qui induit la dégradation du béton par dissolution des composés calciques et silico-calciques de la pâte ciment .

-une réaction sulfatée avec néoformation de minéraux à caractère expansif : gypse, ettringite...

Conclusion

Ce type de milieu contenant de l' H_2S peut être considéré comme fortement à très fortement agressif. En raison du type de mécanisme mis en jeu, il apparaît que les bétons à base de ciment riche en C_3A et/ou dont la pâte de ciment hydratée est riche en portlandite $Ca(OH_2)$. Sont sensibles aux agressions impliquant l'hydrogène sulfuré. Il y a donc lieu de s'orienter vers des ciments qui libèrent peu de $Ca(OH_2)$: ciments avec ajouts (cendres volantes réactives, laitier...) et dont la teneur en C_3A est réduite.

En ce qui concerne la formulation du béton, le dosage en ciment doit être augmenté et le rapport Eau/Ciment doit être diminué. La mise en œuvre doit être effectuée de manière à obtenir une bonne compacité du matériau.

L'hydratation du ciment doit être assurée avant la mise en contact du béton avec le milieu agressif.

Dans le cas de milieux très fortement agressifs, une protection supplémentaire de surface devra être appliquée. En plus des facteurs suivants:

- Ne jamais sur dimensionner les réseaux, les bâches et les canalisations .
- Avoir une vitesse des effluents suffisante pour assurer l'auto curage du réseau (>0,8m/s.)
- Diminuer le temps de séjour dans les canalisations
- Éviter les réseaux trop longs .
- Préférer les bâches synthétiques qui accrochent moins que le béton .
- Assurer une bonne ventilation.

Sommaire

| | |
|---|----|
| Chapitre I: Généralités Sur Les Propriétés Climato-Hydrologiques De La Zone De Ouargla Et Sur La Durabilité Du Béton | 5 |
| Partie I: Généralités Sur Les Propriétés Climato-Hydrologiques De La Zone De Ouargla | 5 |
| I.1 Situation Géographique | 5 |
| I.2 Hydro-Climatologie | 6 |
| I.2.1 Température | 6 |
| Figure (I-1): Températures moyennes mensuelles en (C°) entre 1988-2008. [6] | 6 |
| Figure (I-2): Températures Extrêmes Et Ecart (1988-2008) en (C°)[6] | 6 |
| I.2.3 Vent | 7 |
| Figure (I-4): Vitesse moyenne mensuelle du vent en (m/s) | 7 |
| I.2.4 Pluviométrie | 8 |
| Figure (I-5): Hauteurs moyennes mensuelles de la précipitation (Station météorologique de Ouargla, 1985-2008) | 8 |
| I.3 Evaporation Et Evapotranspiration | 8 |
| I.3.1 Evapotranspiration | 9 |
| Figure (I-6): Evaporation Mensuelle Moyenne (1990-2006). [8] | 9 |
| I.4 Hydrologie | 9 |
| I-4.1 Hydrologie Souterraine | 10 |
| I.4.1.1 Nappe Du Continental Intercalaire (Albien) | 10 |
| Figure (I-7) : Coupe hydrogéologique transversale du "CI" (UNESCO, 1972) | 11 |
| I.4.1.2 Nappe Du Complexe Terminal | 11 |
| Figure (I-8): Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (UNESCO, 1972) | 12 |
| I.4.1.3 Nappe Quaternaire (Nappe Phréatique) | 12 |
| I.5 Conclusion | 12 |
| Partie II: Généralités Sur La Durabilité Du Béton | 13 |
| I Définition De La Durabilité | 13 |
| I Agents Chimiques | 13 |
| I.1 Processus De Dégradation | 13 |

| | |
|--|----|
| I.2 Types D'agents Chimiques | 14 |
| I.3 Modes D'action Des Agents Chimiques | 14 |
| I-4 Mécanismes D'interaction Entre Les Agents Agressifs Et Le Béton | 15 |
| I.5 Dégradation Du Béton | 16 |
| 1 Attaque Par Dioxydes De Carbone | 16 |
| Introduction | 16 |
| 1.1 Mécanisme De Dégradation du béton | 16 |
| 1.2 Paramètres Influençant Sur La Carbonatation | 17 |
| 1 L'humidité Relative Et La Saturation En Eau | 17 |
| 2 Influence Des Paramètres Relatifs Aux Béton | 17 |
| 3 Influence Des Additions Minérales | 17 |
| 4 Influence Des Conditions D'exposition | 18 |
| Résumé | 18 |
| 2 Attaque par les chlorures | 18 |
| 1- Dégradation Par Echange Ionique | 18 |
| 2- Dégradation Par Ecaillage | 19 |
| 2.1 Le Mécanisme D'attaque Et Rôle Des Chlorures | 19 |
| Figure (I -9): phases du processus de corrosion des armatures [37]..... | 20 |
| 2.1.1 Seuil Critique | 20 |
| 2.1.2 Transport Des Chlorures | 21 |
| 2.1.2.1 Diffusion | 21 |
| 2.1.2.2 Pénétration Des Chlorures Par Imbibition | 22 |
| 2.1.3 Facteurs Influençant La Corrosion | 22 |
| 1 Influence du temps d'exposition | 22 |
| Figure (I-10): taux de pénétration des chlorure dans un béton avec E/C = 0.4 [39] | 23 |
| 2 Influence du rapport E/C | 23 |
| Figure (I-11): Effet du rapport E/C sur le taux de pénétration des chlorures après deux ans d'exposition [39]..... | 24 |

| | |
|---|----|
| 3 Influence Du Type De Ciment | 24 |
| Figure (I-12): Effet du type de ciment sur la pénétration des chlorures après six mois d'exposition [39]. | 24 |
| Figure (I-13): Effet du type de ciment sur la distribution de la taille des pores [40] | 25 |
| 4 Influence De La Teneur En Eau | 25 |
| 5 Influence De La Concentration En Oxygène | 25 |
| 6 Influence De La Température | 26 |
| 7 Influence Du Cycle Humidification/Séchage | 26 |
| 8 Influence Du Rapport Cathode/Anode | 26 |
| 9 Influence De La Protection Cathodique | 26 |
| Figure (II-14): Effet de la protection cathodique sur la pénétration des chlorures après douze mois d'exposition [39]. | 26 |
| Conclusion L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton, comme: | 27 |
| 3 Attaque Par Les Sulfates | 27 |
| 3.1 Forme Et Provenance Des Sulfates | 27 |
| 3.2 Mécanismes De Base | 28 |
| Expansion: L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs, Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère le rythme de destruction. Ces expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables, En formant l'ettringite secondaire (l'ettringite primaire n'est pas expansive). [44]..... | 28 |
| Perte des propriétés liantes des C-S-H: L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface, A cause de l'altération des propriétés liantes de certains hydrates. Causés par la dissolution des composés calciques du liant hydraté ,silicate de calcium hydratés C-S-H et l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = portlandite ce qui conduit à un accroissement de la porosité du béton [45] | 29 |
| 3.3 Association Des Différents Cations Aux Sulfates Et Leurs Agressivités | 29 |
| 3.3.1 Sulfate De Magnésium | 29 |
| 3.3.2 Attaque Par Le Sulfate De Calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou CaSO_4 dans les sols) | 30 |
| 3.3.3 Attaque Par Le Sulfate De Sodium (Très Soluble) (Na_2SO_4) | 30 |
| 3.3.4 Attaque Par Le Sulfate De Potassium (K_2SO_4) | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.3.5 Attaque Par Un Des Sulfates Métalliques | 30 |
| 3.3.6 Attaque Par Formation De La Thaumasite | 30 |
| 3.4 Facteurs Qui Influent Sur La Resistance Aux Sulfates Du Béton | 31 |
| 3.4.1 Dosage En Ciment | 31 |
| 3.4.2 Quantité De C₃A | 31 |
| Figure (I-15): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C ₃ A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na ₂ SO ₄ à 10%). [47]..... | 31 |
| 3.4.3 Ajouts Minéraux | 31 |
| Figure (I-16) - Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de | 32 |
| Laitier. [48]a: Ciment type II 6,4% de C ₃ A [47]..... | 32 |
| Figure (I-17): Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de | 33 |
| 4 Attaque Par Le Gaz Hydrogène Sulfure (H₂S) | 34 |
| Introduction | 34 |
| Figure (I-18): mécanisme d'attaque biochimique..... | 35 |
| 4.1 Mécanismes de dégradation du béton | 35 |
| Conclusion | 37 |

Chapitre II: Analyse Physico Chimique De La Nappe Phréatique De Ouargla

Introduction

La durabilité des ouvrages en béton est largement influencée par les éléments chimiques agressifs que contiennent le sol ou les eaux souterraines qui sont en contact avec le béton.

Nous allons voir dans ce chapitre que la nappe phréatique de la ville de Ouargla est très grande et large en espace. Afin de caractériser ces constituants chimiques, nous avons réalisé plusieurs essais dans le cadre d'une recherche groupée réalisée sous la direction de Mr ABIMILOUD, nous avons entamé les résultats chimiques suivants, ces essais sont réalisés au laboratoire de GENI CIVIL de l'université de Ouargla

II.1 Analyse physico-chimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla.

Une analyse chimique des eaux de cette nappe a été entreprise, en mai 2006, à fin de déterminer le taux de concentration des éléments agressifs [4]. Pour faciliter l'exploitation des résultats, nous avons proposé le décomptage suivant le tableau (II-1) ci-dessous.

Tableau (II-1): Découpage utile de la zone d'étude. [4]

| commune | Zone d'échantillonnage | nomenclature |
|------------|---|--------------|
| Aine Beida | Ain Beida | (I-1) |
| | Adjedja | (I-2) |
| Ouargla | Sidi Abderrahmane 1 (ksar) | (II-1) |
| | Sidi Abderrahmane 2 (ksar) | (II-2) |
| | Université | (II-3) |
| | Said I | (II-4) |
| | Said II | (II-5) |
| | Bouamer | (II-6) |
| | Quartier Enasser (parc d attraction) | (II-7) |
| | Quartier Enasser (côté de la route N° 49) | (II-8) |
| Rouissat | Sokra | (III-1) |
| | Rouissat | (III-2) |
| N'goussa | N' goussa à côté du stade | (IV-1) |
| | N'goussa entrée de la ville | (IV-2) |
| | N'goussa centre | (IV-3) |

II-1-1 Potentiel D'hydrogène

Le Potentiel d'Hydrogène est un indice permettant de mesurer l'activité de l'ion hydrogène dans une solution. C'est un indicateur d'acidité (pH inférieur à 7) ou de l'alcalinité (pH supérieur à 7) de la solution.

Le degré d'agressivité pour le béton devient très fort lorsque le Ph est inférieur à 5.5 [52]

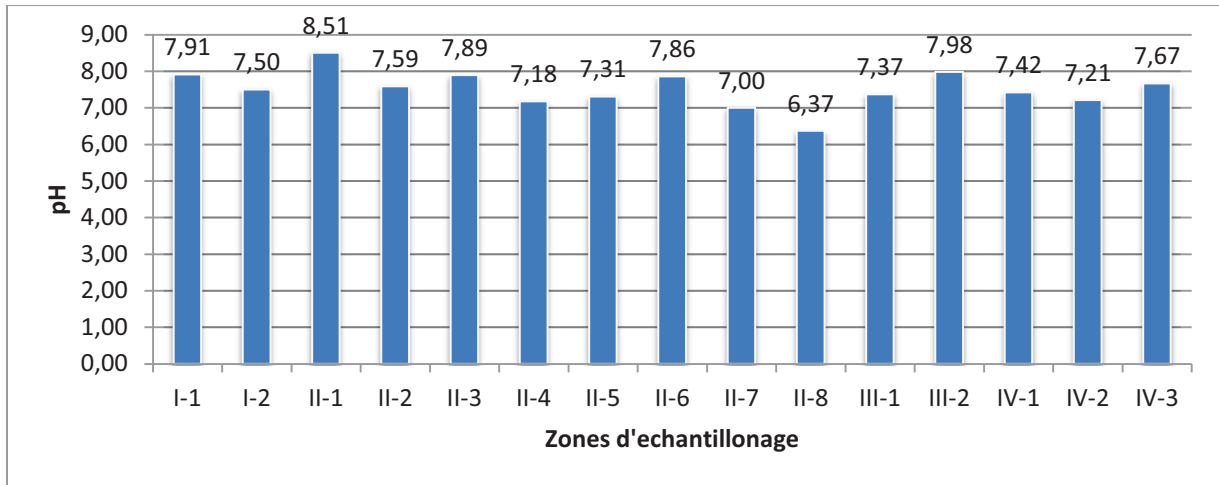


Figure (II-1): pH des eaux de la nappe phréatique dans différentes zones dans la cuvette d'Ouargla [53]

D'après la figure ci-dessus, nous remarquons que l'ensemble des échantillons présentent une eau légèrement alcaline sauf la zone du quartier Enasser (côté de la route R N 49) où nous touchons une eau neutre.

II.1.2 Concentration En Ca^{2+}

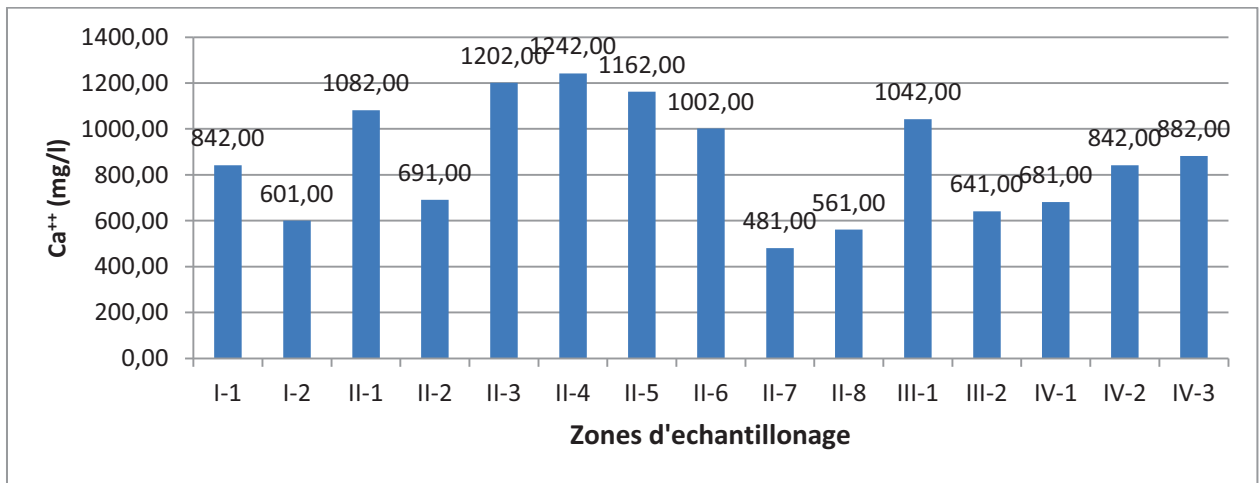


Figure (I-2) : Concentration en Ca^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla [53]

Le graphique ci-dessus montre que la concentration en Ca^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est comprise entre 1242 mg/l et 481 mg/l, qui correspondent respectivement au quartier Saïd Otba ayant la valeur maximale et au quartier Nasr ayant la valeur minimale.

II.1.3 Concentration En Mg^{++}

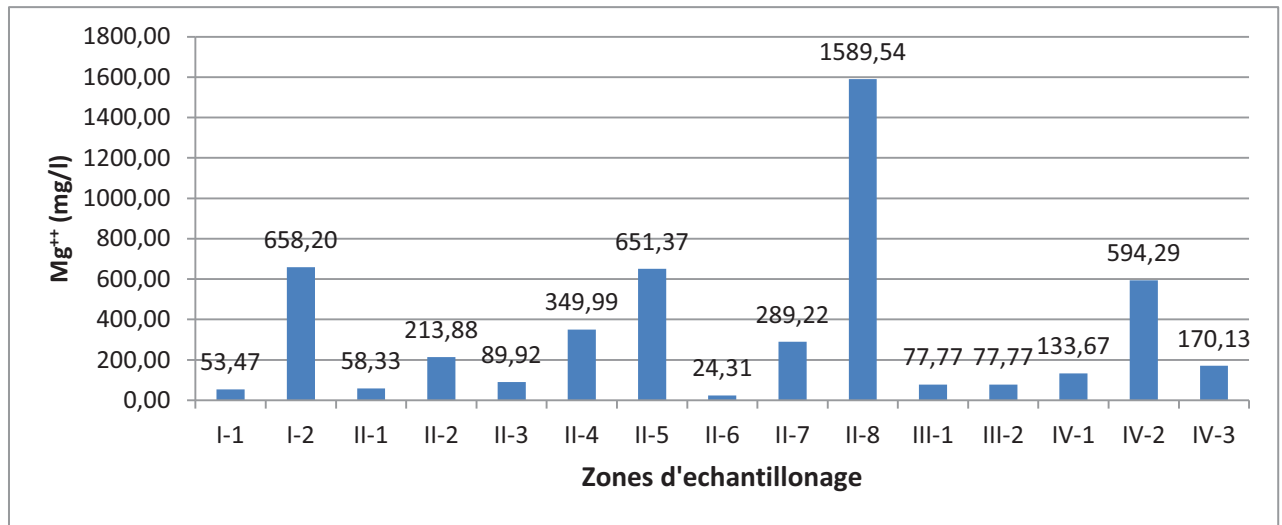


Figure (II-3): Concentration en Mg^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4], [53]

La figure (II-3) montre que la concentration en mg^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est comprise entre 658.2 mg/l et 24.31 mg/l, correspondant respectivement au quartier Adjadja et au quartier Bouamer. À l'exception de la valeur de 1589 mg/l trouvée au quartier Ennacer, ce qui n'influe pas sur la durabilité du béton car le Magnésium devient agressif au-delà de 1000mg/l [52]

II.1.4 Concentration En Na^{2+}

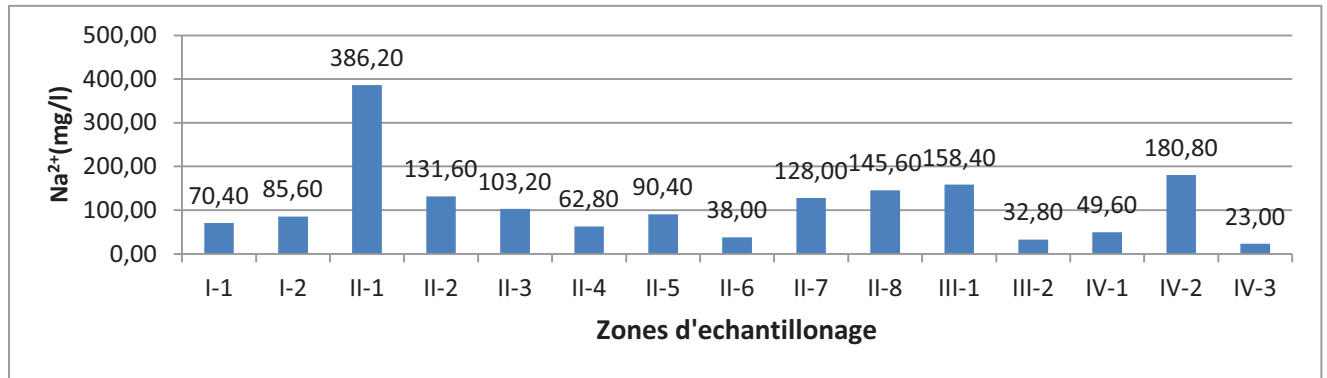


Figure (II-4): Concentration en Na^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]

D'après la figure (II-4) on remarque que la concentration en Na^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. A l'exception de Sidi Abderrahmane 1 (Ksar) ayant une concentration de 386.2 mg/l, est comprise entre 180.8 mg/l et 23 mg/l qui représentent respectivement les quartiers Ksar et N'goussa.

II.1.5 Concentration En K^{2+}

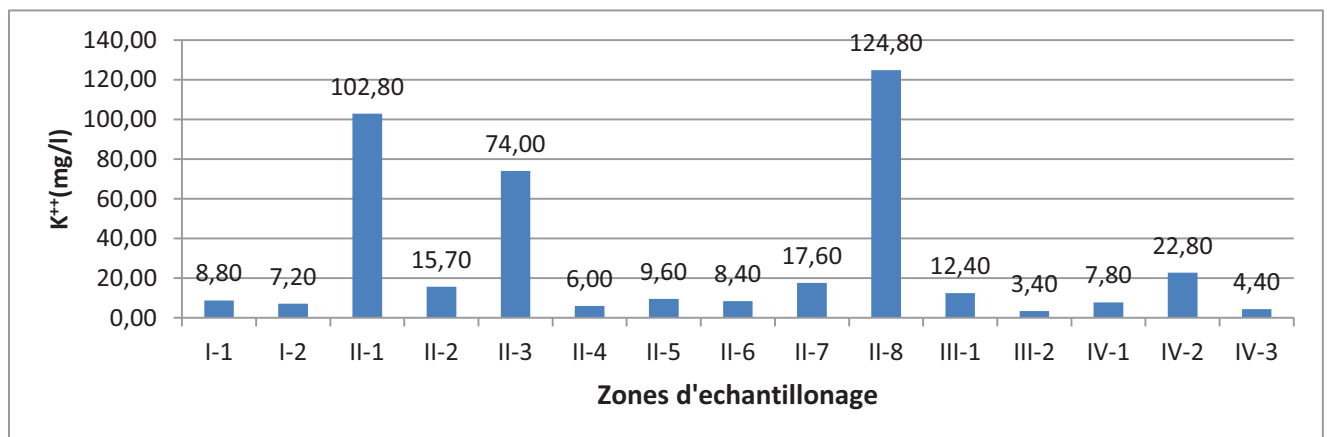


Figure (II-5): Concentration en K^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]

De la figue ci-dessus, on note que la concentration en K dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est comprise entre 22.8 mg/l. À l'exception des trois zones à savoir : l'université (institut d'hydraulique), Sidi Abderrahmane 1 (ksar) et quartiers Ennasr ayant respectivement les valeurs 74. 102.8 Et 124.8 mg/l.

II.1.6 Concentration de SO_4^{2-}

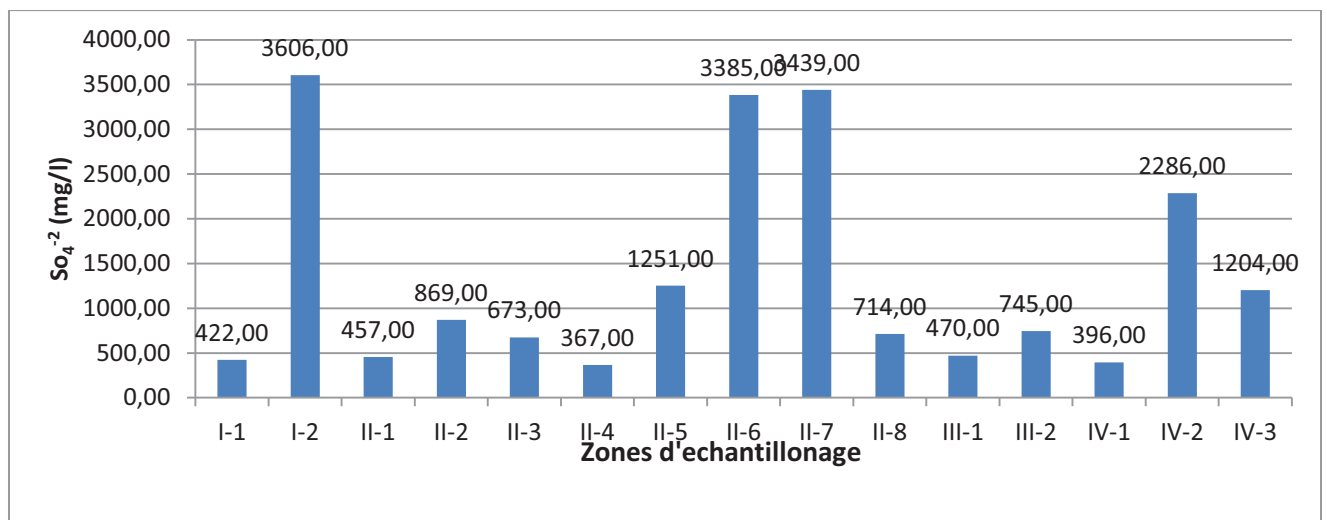


Figure (II-6): la concentration en SO_4^{2-} dans les eaux de la nappe Phréatique de la cuvette de Ouargla [4], [53]

La concentration en SO_4^{2-} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. D'après la figue (II-6) est comprise entre 367 et 3060 mg/l. Qui correspondent respectivement au quartier Adjadja ayant la valeur maximale et le quartier Said Otba commune de Ouargla ayant la valeur minimale. Sachant que l'eau contenant plus de 2000mg/l de sulfate est une eau agressive pour le beton [52]

Donc nous limitons l'agressivité due au sulfate dans les quartiers suivants:

- Ain baida jadida
- Bouameur
- Quartier ennasr
- N'goussa

II.1.7 Concentration Du SO_4^{2-} Dans Les Puits Et La Nappe Phréatique

Tableau (II-2) : Concentration du SO_4^{2-} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla. [4]

| commune | Nom du puits | zone | Concentration SO_4^{2-} (mg/l) | |
|-----------|--------------|--------------------------------|---|----------------------|
| | | | Au niveau du puits | Au niveau de la zone |
| Ouargla | -lala mimona | - Sidi Abderrahmane Ksar | 620 | 457.47 |
| | -Gara nord | | 720 | 868.99 |
| | -Ifri silice | - Sidi Abderrahmane 2 | 676 | 673.42 |
| | -Ifri | -université | 686 | 366.65 |
| | -Said | -Said Otba | 650 | 1250.55 |
| | | -Said Otba1 | | |
| Rouissate | | -Sokra | 610 | 469.55 |
| | -Hdeb1 | -rouissat | | 744.72 |
| Ain Beida | -Hdeb 2 | -Ain Beida | 580 | 421.99 |
| | | -adjadja | | 3606.36 |
| N'Goussa | -N'Goussa | -stade | 800 | 395.67 |
| | | -Entrée de la ville de Ouargla | 960 | 2286.11 |
| | | -centre ville | 965 | 1203.97 |

D'après les résultats trouvés. Nous remarquons que la concentration du SO_4^{2-} au niveau de la nappe phréatique est assez forte et varie entre 966 mg/l et 1250 mg/l. Alors que celle des puits varie entre 580 et 965 mg/l. De même, ces variations ne concordent pas entre elles, à titre d'exemple, le puits de Hdeb ayant une concentration de 610 mg/l et qui alimente Sokra et rouissat qui représentent respectivement 421.99 et 744.72 mg/l au niveau de leur nappes phréatiques.

II.1.8 Concentration En Cl^-

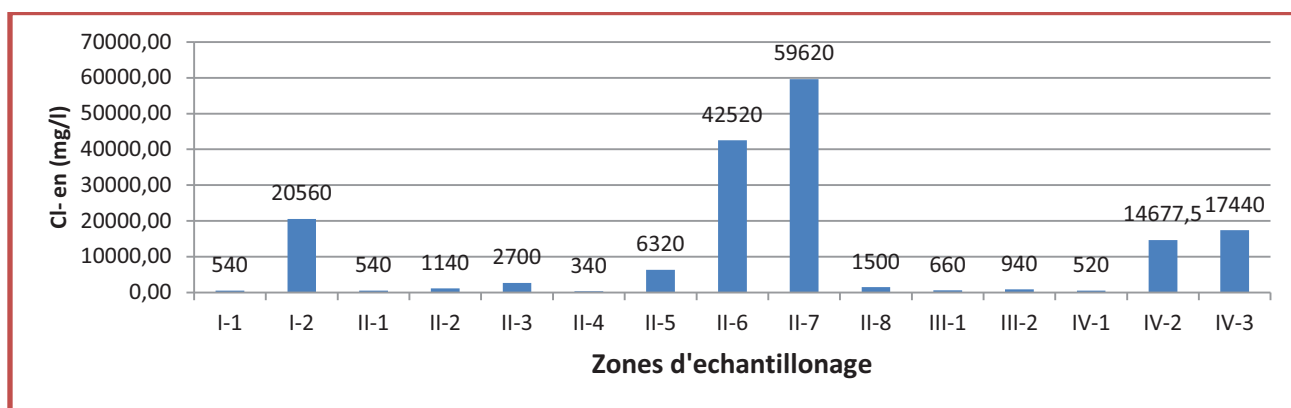


Figure (II-7): Concentration en Cl^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4], [53]

La concentration en Cl^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. Selon la figure (II-7) est comprise entre 59620 mg/l et 340 mg/l. Qui correspondent Respectivement au quartier Nasr et le quartier Saïd Otba.

II.1.9 Concentration Du Cl^- Dans Les Puits Et La Nappe Phréatique De Ouargla

Tableau (II-3) : Concentration du Cl^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla.

| commune | Nom du puits | zone | Concentration Cl^- (mg/l) | |
|-----------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| | | | Au niveau du puits | Au niveau de la zone |
| Ouargla | -lala mimona | - Sidi Abderrahmane Ksar | 360 | 540 |
| | -Gara nord | - Sidi Abderrahmane 2 | 515 | 1140 |
| | | -Said Otba | | 340 |
| | | -Said Otba1 | | 6320 |
| Rouissate | | -Sokra | 435 | 540 |
| | -Hdeb1 | -rouissat | | 20560 |
| Ain Beida | -Hdeb 2 | -Ain Beida | 400 | 421.99 |
| | | -adjadja | | 3606.36 |
| N'Goussa | -N'Goussa 1 | -stade | 455 | 17440 |
| | -N'Goussa 2 | -Entrée de la ville de Ouargla | 850 | 520 |
| | | -centre-ville | | 14677.5 |

D'après le tableau (II-3), on remarque que la concentration en Cl^- , au niveau des puits qui alimentent les différentes zones de Ouargla, est assez inférieure à celle trouvée au niveau de la nappe phréatique à l'exception de N'Goussa (entrée de la ville) qui ne convient pas à cette constatation. Cette constatation affirme l'existence d'autre source d'ions Cl^- dans la nappe phréatique telles que les eaux ménagères, les engrais, le tissu végétal et les sols...etc.

II.1.10 Concentration du HCO^-

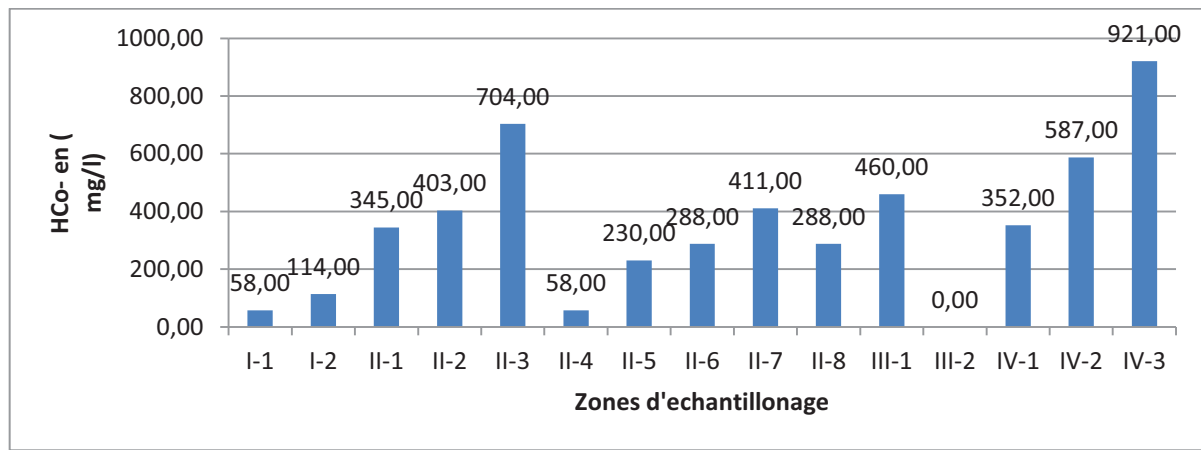


Figure (II-8): Concentration en HCO^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]

La concentration en HCO^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, selon la figure (II-8), est comprise entre 921 mg/l jusqu'à uniquement des traces. Ceci correspond respectivement à N'Goussa et Rouissat..

II.1.11 Concentration Du HCO_3^- dans Les Puits Et La Nappe Phréatique De OuarglaTableau (II-4): Concentration du HCO_3^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla.

| commune | Nom du puits | zone | Concentration HCO_3^- (mg/l) | |
|-----------|--------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| | | | Au niveau du puits | Au niveau de la zone |
| Ouargla | -lala mimona | - Sidi Abderrahmane | 85 | 345.28 |
| | -Gara nord | Ksar | 85 | 402.83 |
| | -Ifri silice | - Sidi Abderrahmane 2 | 76 | 703.84 |
| | -Ifri | - université | 79 | 57.54 |
| | -Said | - Said Otba - Said Otba 1 | 140 | 230.18 |
| Rouissate | -Hdeb 1 | -Sokra -rouissat | 125 | 460.37 372.33 |
| Ain Beida | -Hdeb 2 | -Ain Beida -adjadja | 67 | 57.54 114.42 |
| N'Goussa | -N'Goussa1 | -stade | 124 | 351.92 |
| | -N'Goussa2 | -Entrée de la ville | 110 | 586.53 |
| | | -centre-ville | 73 | 920.75 |

D'après le tableau (II-4), la concentration en HCO_3^- . Au niveau de la nappe phréatique de la cuvette Ouargla, est toujours supérieure à celle des puits qui l'alimentent à l'exception des zones Saïd Otba et Ain Beida.

II.1.12 Concentration du Zn^{2+}

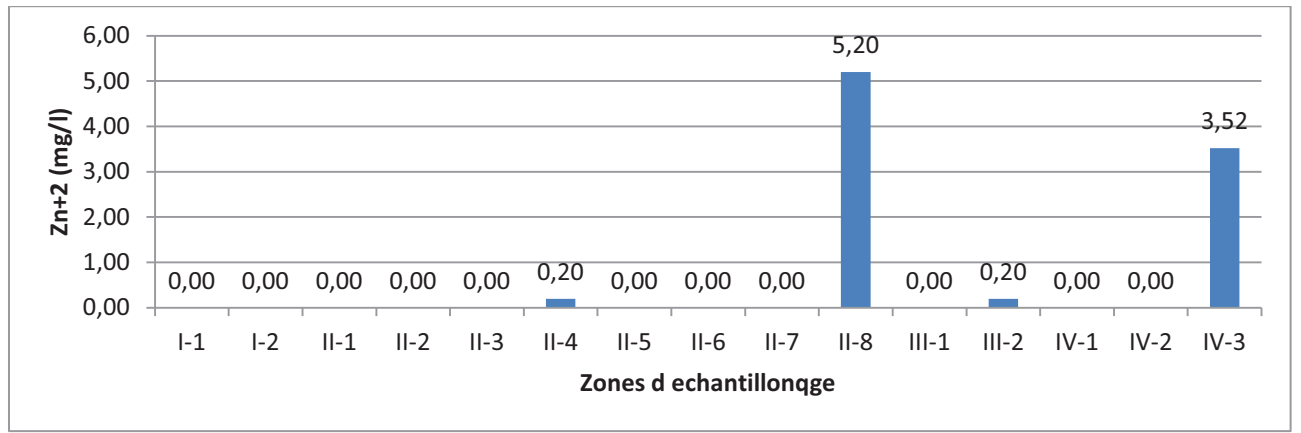


Figure (II-9): Concentration en Zn^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]

A partir de figure (II-9): on remarque que la concentration du Zn^{2+} au niveau de la cuvette est assez faible étant donné qu'elle est nulle dans la plus part des échantillons, à l'exception du quartier Nasr ou on enregistre 5.2 mg/l et N'Goussa 3.52 mg /l.

II.1.13 Concentration de Fe^{2+}

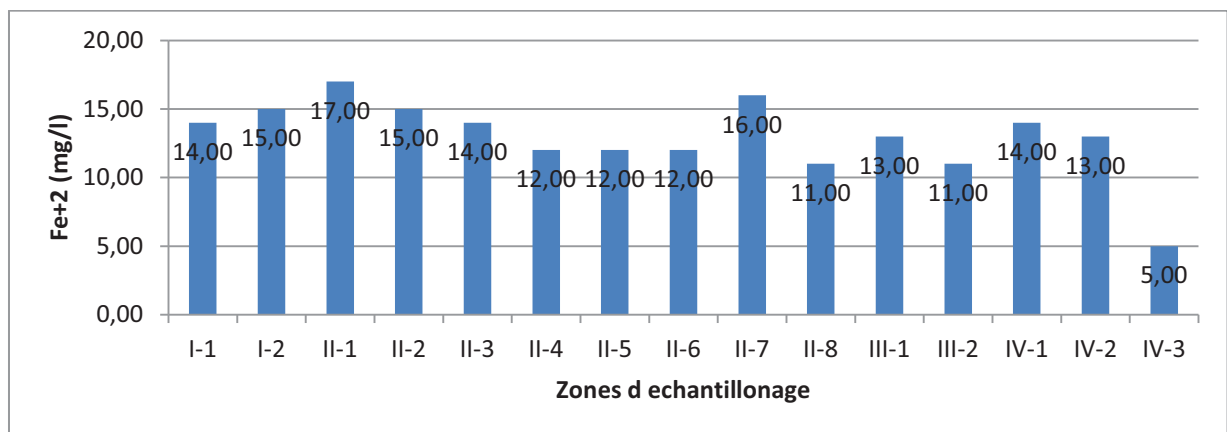


Figure (II-10): concentration en Fe^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]

D'après la figure (II-10), on remarque que la concentration en Fe^{2+} au niveau de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est pratiquement homogène comprise entre 17 mg/l et 11 mg/l, à l'exception de N'goussa ou nous avons enregistré une valeur de 5 mg/l.

I.2 Caractérisation Des Eaux Usées

Les eaux usées de Ouargla sont essentiellement de type domestique, La ville n'étant le siège que d'une modeste activité industrielle ou la plus grande agressivité industrielle provient du rejet des huiles et les acides des batteries à partir des station de vidange de véhicules. Il convient toutefois de garder en mémoire une triple particularité.

- Les eaux sont fortement sulfatées en raison de la contrainte du dégazage en H_2S est significative.

- En raison de venue d'eaux de drainage dans les collecteurs d'assainissement, les eaux sont également fortement minéralisées (la valeur globale de la salinité peut atteindre 6 g/l). [53]
Enfin, en région saharienne, il n'est pas étonnant de préciser que dans certains quartiers les eaux véhiculent du sable en quantité, obligeant à une grande vigilance sur les vitesses d'auto curage dans les collecteurs. [53]

I.2.1 Caractéristiques Des Eaux Usées De La Région

Une campagne de prélèvement a été effectuée, en juin 2009, aux niveaux du collecteur qui achemine les eaux usées vers la station d'épuration de Said Otba, afin de déterminer la concentration des éléments agressifs.

I.2.2 Caractéristiques Physicochimiques

Tableau (II-5): Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques

| | Unité | Said otba |
|--------------|-------|-----------|
| pH | | 7.61 |
| Conductivité | mS/cm | 25.4 |
| Température | °C | 25.3 |
| Turbidité | NTU | 15.9 |
| T.D.S | mg/l | 15.5 |
| résidus secs | mg/l | 26470 |

I.2.3 Minéralisation Globale

Tableau (II-6): Résultats d'analyse des paramètres minéralisation globale.

| | unité | Said otba |
|------------------------------|-------|-----------|
| TH | mg/l | 18500 |
| Ca ⁺⁺ | mg/l | 480.96 |
| Mg ⁺⁺ | mg/l | 21023.82 |
| TAC | mg/l | 290.90 |
| K ⁺ | mg/l | 234 |
| Na ⁺ | mg/l | 4600 |
| Cl ⁻ | mg/l | 12784.00 |
| SO ₄ ⁻ | mg/l | 19420 |

I.2.4 Paramètres De Pollution

Tableau (II-7): Résultats d'analyse des paramètres de pollution.

| | unité | Said otba |
|-------------------------------------|-------|-----------|
| NO ₃ ⁻ | mg/l | 16.5 |
| O- PO ₄ ³⁻ | mg/l | 06 |

- Les Nitrates (NO₃⁻):
- L'Ortho-Phosphate (O-PO₄³⁻):

Le pH est généralement un peu supérieur à 7.

La dureté totale de l'eau est due à la présence des sels solubles de Calcium et Magnésium. On observe que la dureté totale est très élevée.

La teneur en Magnésium est supérieure à 2000g/l, ce qui est agressif pour le béton [52] La teneur en sulfate est supérieur à 2000g/l, ce qui est agressif pour le béton [52]

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Chapitre II: Analyse Physico Chimique De La Nappe Phréatique De Ouargla..... | 38 |
| Introduction | 38 |
| II.1 Analyse physico-chimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. ... | 38 |
| Tableau (II-1): Découpage utile de la zone d'étude. [4] | 39 |
| II-1-1 Potentiel D'hydrogène | 39 |
| Figure (II-1): pH des eaux de la nappe phréatique dans différentes zones dans la cuvette d'Ouargla [53]..... | 40 |
| II.1.2 Concentration En Ca^{2+} | 40 |
| Figure (I-2) : Concentration en Ca^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla [53] | 40 |
| II.1.3 Concentration En Mg^{+} | 41 |
| Figure (II-3): Concentration en Mg^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4], [53] | 41 |
| II.1.4 Concentration En Na^{2+} | 42 |
| Figure (II-4): Concentration en Na^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4] | 42 |
| II.1.5 Concentration En K^{2+} | 42 |
| Figure (II-5): Concentration en K^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4] | 42 |
| II.1.6 Concentration de SO_4^{-2}..... | 43 |
| Figure (II-6): la concentration en SO_4^{-2} dans les eaux de la nappe | 43 |
| II.1.7 Concentration Du SO_4^{2-} Dans Les Puits Et La Nappe Phréatique..... | 44 |
| Tableau (II-2) : Concentration du SO_4^{2-} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla. [4] | 44 |
| II.1.8 Concentration En Cl^{-}..... | 45 |
| Figure (II-7): Concentration en Cl^{-} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4], [53]..... | 45 |
| II.1.9 Concentration Du Cl^{-} Dans Les Puits Et La Nappe Phréatique De Ouargla | 45 |
| Tableau (II-3) : Concentration du Cl^{-} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla. | 45 |
| II.1.10 Concentration du HCO_3^{-} | 46 |
| Figure (II-8): Concentration en HCO_3^{-} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]..... | 46 |
| II.1.11 Concentration Du HCO_3^{-} dans Les Puits Et La Nappe Phréatique De Ouargla | 47 |
| Tableau (II-4): Concentration du HCO_3^{-} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla..... | 47 |
| II.1.12 Concentration du Zn^{2+} | 48 |

| | |
|---|----|
| Figure (II-9): Concentration en Zn^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]..... | 48 |
| II.1.13 Concentration de Fe^{2+} | 48 |
| Figure (II-10): concentration en Fe^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla [4]..... | 48 |
| I.2 Caractérisation Des Eaux Usées | 49 |
| I.2.1 Caractéristiques Des Eaux Usées De La Région | 49 |
| I.2.2 Caractéristiques Physicochimiques | 49 |
| Tableau (II-5): Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques | 49 |
| I.2.3 Minéralisation Globale | 50 |
| Tableau (II-6): Résultats d'analyse des paramètres minéralisation globale..... | 50 |
| I.2.4 Paramètres De Pollution | 50 |
| Tableau (II-7): Résultats d'analyse des paramètres de pollution. | 50 |

Chapitre III: Essais Sur Matériaux Et Formulation Du Béton

Partie I: Essais sur les matériaux utilisés

III.1 Caractérisation Des Matériaux

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton ayant des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection du béton à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes européennes, normes françaises et les modes opératoires en vigueur.

III.1.1 Ciment

Finement moulu qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau ». Le ciment utilisé dans cette étude est le CRS, ce ciment a été choisi pour sa capacité de résister aux agressions chimiques et pour le fait que tous les travaux d'assainissement se font avec ce ciment.

III.1.1.1 Analyses Chimiques Du Ciment:

Les résultats de l'analyse chimique du ciment utilisé sont représentés dans le tableau (III-1):

Tableau (III-1): Résultats Des Analyses Chimiques Du Ciment CRS (fiche technique)

| | |
|---|-----------|
| Perte au feu en (%) | <1.5 |
| Résidus insolubles en (%) | <0.7 |
| Teneur en anhydride sulfurique SO ₃ en (%) | 1.80-2.00 |
| Teneur en magnésie MgO en (%) | 1.60-1.80 |
| Teneur en chlorures (%) | 0.01-0.03 |

III.1.1.2 Propriétés Physiques Du Ciment

Les résultats sont représentés dans le tableau (III-2):

Tableau (III-2): Résultats Des Analyses Physiques Du Ciment CRS, (fiche technique)

| | |
|---|---------------|
| Consistance normale de la pate de ciment en (%) | 25.50 - 26.50 |
| Finesse suivant la méthode de Blaine | 3000 – 3200 |
| Chaleur d'hydratation J/g | <310 |
| Retrait à 28 jours $\mu\text{m}/\text{m}$ | <1000 |
| Expansion mm | <5 |

III.1.2 Granulats

Les granulats naturels sont :

- Le sable naturel alluvionnaire de classe granulaire (0/5), provenant de la carrière "BEN BRAHIM", Haoud El-Hamra,
- Le gravier naturel de classe granulaire (3/8), (8/15) et (15/25) provient, aussi, de la station de concassage "BEN BRAHIM", Haoud El-Hamra, mais au PK 669 de la RN3.

Une série d'essais d'identification a été effectuée sur le matériau granulat utilisé, sable et gravillon, afin de les caractériser.

Tableau (III-3): Essais Effectués Sur Le Sable Et Le Gravier

| Essais ou analyses | Normes | Sable | Gravier |
|---|-----------------------------------|-------|---------|
| Analyse chimique | Mode opératoire | X | X |
| Analyse Granulométrique | (NF EN 933-1) (NF EN 933-21) | X | X |
| Module de finesse | (XP P 18-540) | X | |
| Masses volumiques | (NF EN 1097-3) (P 18-555) | X | |
| | Mode opératoire (P 18-554) | X | X |
| Absorption d'eau | (P 18-555) (P 18-554) | X | X |
| Équivalent de sable | [P 18-598] | X | |
| Essai au bleu de méthylène | (NF EN 933-9) | X | |
| Friabilité des sables | [P 18-576] | X | |
| Porosité | [P 18-554] | | X |
| Propreté superficielle | [P 18-591] | | X |
| Los Angeles | [P 18-573] | | X |
| Détermination des corps Insolubles | (NFP 15-461) | X | X |
| Détermination des Sulfates | (NB 1377/1975) | X | X |
| Détermination des Chlorures | Norme BS BOWLY (Version 1979). | X | X |
| détermination du taux des Carbonates | (Norme NFP15- 461) | X | X |

Remarque: Les essais d'identification des constituants de béton, Ont été réalisés au laboratoire LTPS (Laboratoire des Travaux Publics du Sud)

III.1.2.1 Échantillonnage Des Granulats

L'échantillonnage est un procédé de prélèvement, ayant pour objectif d'obtenir un échantillon global qui soit représentatif des propriétés moyennes de la quantité de production d'un tel granulat [57]. Il s'effectue soit avec une sonde, manuelle ou mécanique, enfoncée dans le stock, soit à la pelle, manuelle ou mécanique.

Pour une prise d'essai donnée, l'échantillon de laboratoire doit être réduit jusqu'à une masse minimale spécifiée par l'essai [58]. La réduction de l'échantillon a été effectuée par deux procédés, utilisés séparément ou conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et de la dimension maximale des grains :

- Réduction de l'échantillon à l'aide d'un diviseur ou par quartage.

III.1.2.2 Analyse Granulométrique Par Tamisage

L'analyse Granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées [59] de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs [60].

L'analyse a été effectuée conformément à la norme européenne NF EN 933 -1 [61], en utilisant les tamis préconisés par la norme européenne NF EN 933 - 2 [59] ainsi que les tamis nécessaires à la couverture des dimensions comprises entre: (photo III-1).

- 0,08 *mm* et 2*D* Pour les sables,
- 0,63*d* et 2*D* Pour les gravillons [62].

La photo (III-1) montre la manipe de cette dernière étape.

- **Module De Finesse** : c'est un module qui nous permet de caractériser la finesse des différents types de sable par la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis de série suivant (0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5 mm).

$$Mf = \frac{\sum \% \text{ refus}}{100} \quad \text{(III-1)}$$

- Facteur D'uniformité : Cu

C'est un coefficient pour la classification des agrégats. On définit l'uniformité d'une granulométrie par le coefficient de HAZEN ou coefficient d'uniformité.

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{III-2})$$

D60 : représente l'ouverture du tamis auquel passe 60 % du poids des grains, de même pour D10.

Pour $(D_{60}/D_{10}) > 2$, la granulométrie est dite étalée.

Et pour $(D_{60}/D_{10}) < 2$, la granulométrie est dite serrée [63]

III.1.2.3 Analyse Granulométrique Du Sable Alluvionnaire

- Les résultats de l'essai granulométrique sont représentés sur le tableau (III, 4) ci-après:

Tableau (III-4) : Analyse Granulométrique Du Sable Alluvionnaire

| Ouverture des tamis | Refus partiel | Refus cumulés | % refus | % passant |
|---------------------|---------------|---------------|---------|-----------|
| 5 | 13.58 | 13.58 | 1.36 | 98.64 |
| 3.15 | 20.02 | 33.6 | 3.36 | 96.64 |
| 2.5 | 15.95 | 49.55 | 4.95 | 95.04 |
| 1.25 | 94.50 | 144.05 | 14.4 | 85.59 |
| 0.63 | 212.57 | 356.62 | 35.68 | 64.32 |
| 0.315 | 516.52 | 873.14 | 87.31 | 12.69 |
| 0.160 | 102.93 | 976.07 | 97.61 | 2.39 |

Selon la formule (III-1) et (III-2) on trouve :

Mf = 1.47, Le module de finesse se trouve dans la fourchette des résultats acceptables

Cu=2, L'analyse granulométrie de sable concassée montre que la granulométrie est étalée.

III.1.2.4 Analyse Granulométrique Du Gravier Utilisé

Le gravier utilisé pour la confection du béton est un gravier de la classe 3/8, 8/15 et 15/25 prélevé de la station de concassage situé à Haoud el hamra, Hassi-Méssaoud Ouargla. Le tableau (III, 5) montre l'analyse granulométrique de ce dernier.

Tableau (III-5) : La Granulométrie Du Gravier Utilisé

| Ouverture des tamis (mm) | % passant | | |
|--------------------------|-----------|-------|-------|
| | 3/8 | 8/15 | 15/25 |
| 25 | / | / | 100 |
| 20 | / | 100 | 97.72 |
| 16 | / | 95.46 | 22.30 |
| 12.5 | / | 41.39 | 4.95 |
| 10 | 100 | 12.46 | 1.07 |
| 8 | 99.54 | 4.36 | 0.04 |
| 6.3 | 84.05 | 1.14 | / |
| 5 | 57.80 | / | / |
| 3.15 | 14.66 | 0.36 | / |
| 2.5 | 4.32 | / | / |
| 2 | 0.37 | / | / |
| 1.25 | / | / | / |

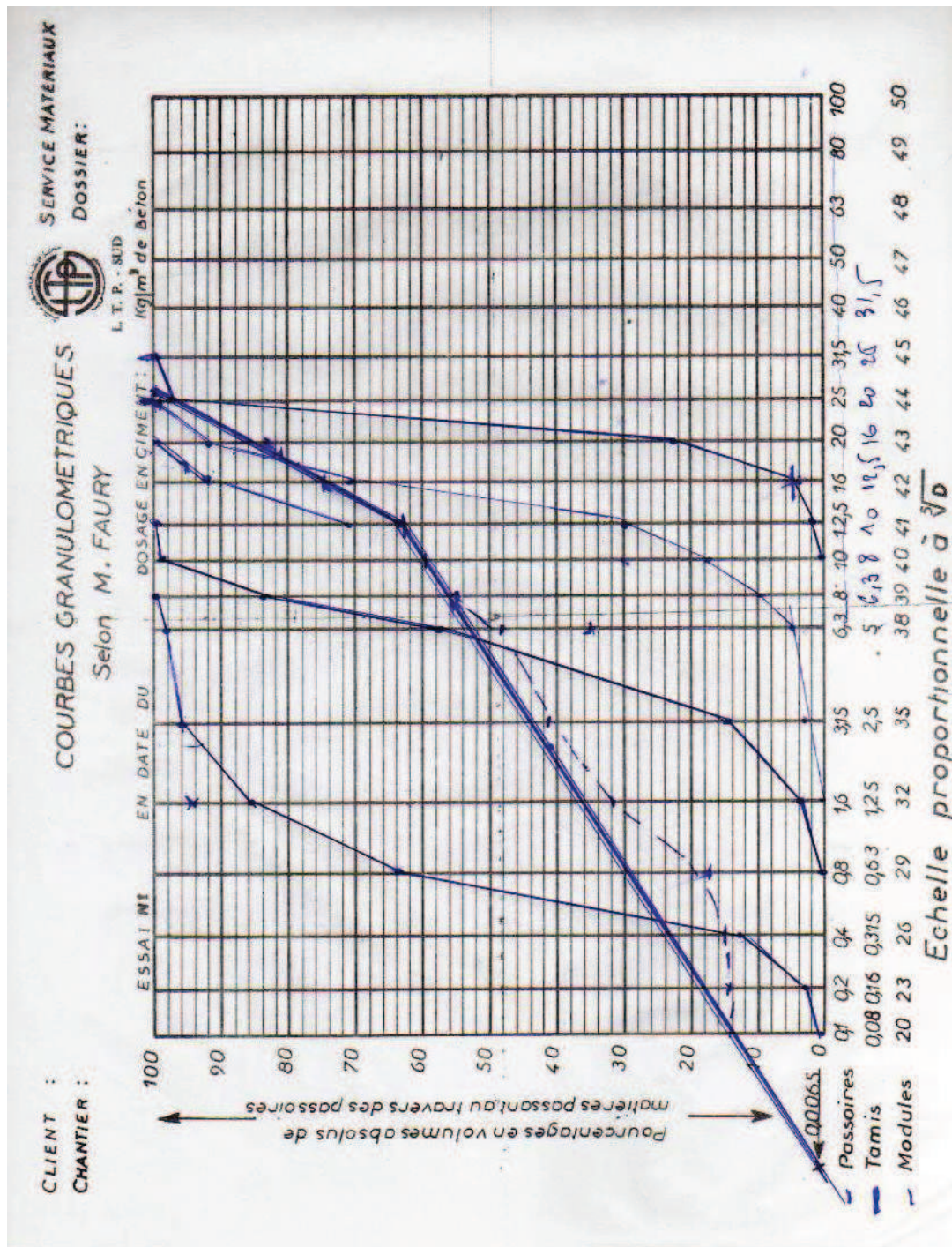


Figure (III-1): Courbes Granulométriques Des Granulats Utilisés

La figure (III-1), montre les courbes granulométriques des granulats utilisés, ou nous remarquons que les différents granulats choisis (sable, 3/8, 8/15 et 15/25) sont bien étalés ce qui nous permet une bonne homogénéité et densité du béton.

III.1.2.5 Essai D'équivalent De Sable (NF P 18-597) [64]

a) But de l'essai : l'essai de l'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons.

Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le granulat des éléments sableux plus grossier. Une procédure normalisée permet de terminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

b) Principe de manipulation : L'essai est effectuée sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide pour ne pas perdre les éléments fins.

c) Mode opératoire d'essai :

- Remplir les éprouvettes avec la solution lavante, jusqu'au premier trait (inférieur).
- Verser la quantité de sable $120 \pm 1g$ et laissé au repos 10 min.
- Boucher les éprouvettes et les agiter par des mouvements rectilignes horizontaux de 20 cm d'amplitude, 90 allés en 30 secondes (effectués de manière automatique par la machine, si possible).
- Laver et remplir les éprouvettes, avec le tube plongeur.
- Sortir le tube, fermer le robinet lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer 20 min en évitant toute vibration. La tolérance sur le temps de repos est faible (plus ou moins 10 sec) car la hauteur du flocculat dépend fortement de celui-ci.
- Mesurer à vue les hauteurs h_1 et h_2 .

Procéder à la mesure à l'aide d'une règle la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculat et h_2 à l'aide d'un piston descendu jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (III-3)$$

d) Matériel utilisé : Voir (Photo (III-2) annexe photos)

- Éprouvettes en plexiglas avec deux traits repères et leurs bouchons.
- Entonnoir pour introduire le sable.
- Bonbonne de solution la vante avec son bouchon, le siphon et le tube souple.

- Tube laveur métallique plongeant.
- Règle métallique pour la mesure des hauteurs des sables.
- Piston taré à masse de 1 Kg pour la mesure de l'ES.
- Un chronomètre.

e) Résultats d'essai

dans le cadre de notre étude, on a réalisé l'essai d'équivalent de sable pour contrôler la propreté, Le résultat de l'équivalent de sable est présenté dans le tableau (III, 6) suivant :

Tableau (III-6) : Équivalent De Sable.

| Échantillons | ES % | observation |
|----------------|-------|-------------|
| Sable concassé | 54.77 | Propre |

III.1.2.6 Essai Au Bleu De Méthylène (NF EN 933-9)

a) But De L'essai : Cet essai, utilisé d'une manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graviers d'origine naturelle ou artificielle.

Cet essai est un test performant pour quantifier d'une manière précise et simple la propreté des granulats

b) Principe De L'essai : Il consiste à introduire, dans le bain contenant la prise d'essai, des quantités croissantes de bleu de méthylène, par doses successives, et à contrôler après chaque ajout l'absorption du bleu du test « de la tache » jusqu'à ce que les particules argileuses du matériau soient saturées de bleu (test de la tache devenant positif).

c) Préparation De L'échantillon : Cet essai s'effectue sur la fraction granulométrique 0/5 mm. Ce sont principalement les éléments inférieurs à 2 mm qui contiennent la fraction argileuse. Cette fraction donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et donc quantifie la sensibilité du sol à l'eau.

On prélève 100g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 200 ml d'eau déminéralisée, le mélange est maintenu à l'aide de l'agitateur à ailette. Une fois cette procédure effectuée on passe au « *test de la tache* ». Voir (Photo (III-3) annexe photos)

Cet essai consiste à injecter, successivement des dosages précis de bleu de méthylène jusqu'à avoir saturation des particules d'argiles.

- Si la goutte centrale bleu est cerclée d'une zone incolore, le résultat du test est alors négatif.
- Si la goutte centrale bleue est cerclée d'une zone teintée de bleu plus claire, le test est donc positif.

Pour la lecture du résultat, on procède de la manière suivante :

Ajout de 2 cm³ de bleu et faire la tache.

- Si le test est négatif répéter l'opération jusqu'à l'obtention d'un test positif,
- Si le test est positif, fin du dosage.

d) Exploitation des résultats :

Une fois le test effectué est positif, on exploite les résultats :

$$V_{bs} = \frac{n}{M} \dots\dots\dots (III-4)$$

n: Volume (ml) de solution de bleu utilisé jusqu'à obtention du test positif.

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

Classification des sols :

- $V_{bs} = 0,1$; sol insensible à l'eau.
- $V_{bs} = 0,2$; apparition de la sensibilité à l'eau.
- $V_{bs} = 1, 5$; seuils distinguant les sols sablo limoneux des sols sablo argileux
- $V_{bs} = 2,5$; seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
- $V_{bs} = 6$; seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
- $V_{bs} = 8$; seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Résultats d'essai :

Pour 100 g sable concassée on a trouvé un volume de 18 ml en bleu de méthylène, $V_{bs}=0.19$ ml/g, Cette valeur caractérise un matériau insensible à l'eau et signifie que le sable ne contient pas des fines argileuses.

III.1.2.7 Détermination De La Masse Volumique Absolue Et Apparente D'un Sable Ou D'un Gravier

La masse volumique absolue et apparente permet le passage de la masse au volume des différentes classes granulaires, elle est souvent très nécessaire dans la composition du béton.

III.1.2.7.1 Détermination de la masse volumique absolue d'un sable ou d'un gravier

a) Définition : La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

b) Méthode de l'éprouvette graduée : Cette méthode est très simple très rapide et elle utilise du matériel très courant de laboratoire, Voir (Photo (III-4) annexe photos). Toutefois, sa précision est faible.

- Mettre dans une éprouvette un volume V_1 d'eau.
- Peser une masse M du corps (de l'ordre de 300 g), et l'introduire dans l'éprouvette.
- Lire de nouveau le volume V_2 .
- Le volume absolu est $V = V_2 - V_1$

La masse volumique absolue est :

$$MV_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (III-4)$$

III.1.2.7.2 Détermination De La Masse Volumique Apparente D'un Sable Ou D'un Gravier

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

b) Mode opératoire de l'essai :

Prendre l'échantillon dans les deux mains.

- Verser l'échantillon toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône, raser à la règle et Peser le contenu.
- Calculer la masse volumique apparente à partir de la formule suivante :

$$MV_{app} = \frac{MT - M_0}{V} \dots\dots\dots (III.5)$$

Avec : Mo : la masse du récipient de mesure vide.

M_T : la masse du récipient avec l'échantillon.

V : le volume du récipient de mesure.

Les résultats des masses volumiques absolues et apparentes des matériaux utilisés sont présentés dans le tableau (III-7) suivant :

Tableau (III-7) : Masse volumique apparente et Absolue des granulats utilisés-Mesure

| Matériaux | Masse volumique apparente (g/cm ³) | Masse volumique Absolues (g/cm ³) |
|------------------|--|---|
| sable concassé | 1.854 | 2.556 |
| Le gravier 3/8 | 1.314 | 2.563 |
| Le gravier 8/15 | 2.18 | 2.614 |
| Le gravier 15/25 | 1.409 | 2.58 |

III.1.2.8 Coefficient D'absorption De Sable (Nf p 18-555)

a)But de l'essai : Les granulats peuvent présenter des fissures ou des vides appelés porosité, il y a deux formes de porosité, Porosité ouverte et porosité fermée.

La porosité ouverte est celle qui pose un problème en construction, puisque l'eau pénètre dans ces vides et gèle, Par la suite provoque l'éclatement du béton .[65]

b) Principe de l'essai : calculer le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après l'imbibition par l'eau de la masse sèche de l'échantillon.

On fait imbiber l'échantillon pendant 24h et après, l'étaler sur surface plane non absorbante et on le met à l'air chaud à fin d'obtenir un échantillon avec des surfaces externes des grains séchés et pesés M_a .

Et après on le passe à l'étuve à 105° et on pèse M_s .

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots (III-6)$$

$$Ab = 100 (M_a - M_s) / M_s$$

Ab : coefficient d'absorption

M_a : masse de l'échantillon imbibé.

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105° .

Les résultats des essais :

$$Ab = 2.55 \%$$

III.1.2.9 Analyse Chimique

III.1.2.9.1 Détermination des corps Insolubles (NFP 15-461)

a) Définition : les insolubles sont des corps insolubles dans l'acide chlorhydrique et ce sont des silicates.

b) Principe de l'essai : l'essai consiste à bouillir l'échantillon avec l'acide chlorhydrique et filtrer le mélange pour déterminer les corps qui ne sont pas solubles dans l'acide chlorhydrique.

c) Étapes De L'essai : (Photo (III-5) annexe photos).

On prend $m_e = 2g$ de l'échantillon et on le met dans un bêcher de 250 ml.

- On ajoute 100 ml de l'acide chlorhydrique HCl 10%.
- On chauffe le bêcher contenant le mélange jusqu' à l'obtention d'une couleur jaune claire.

- On fait refroidir le mélange à la température ambiante.
- On filtre le mélange sur un papier filtre sans cendre.
- On lave le bûcher à l'aide de l'eau distillée.
- On réserve le filtrat qui servira à l'essai de détermination de sulfate.
- On met le papier filtre contenant les insolubles dans un creuset qui a été déjà pesé vide m_0 dans un four à 900°C.
- On pèse le creuset après calcination m_1 .

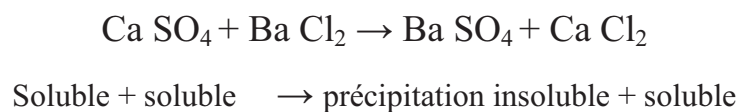
$$Insol = \frac{m_0 - m_1}{m_e} \times 100 \quad (III.7)$$

III.1.2.9.2 Détermination des Sulfates (NBS 1377/1975)

a) Définition : On trouve les sulfates dans les sols sous formes de sodium ($Na_2 SO_4$) et sous forme de sulfate de magnésium ($Mg SO_4$) et sous forme de sulfate de calcium ($Ca SO_4$).

L'essai de détermination de sulfate est très important puisque le sulfate peut attaquer le béton et par la suite chuter la résistance des constructions.

b) Principe de l'essai: L'essai consiste par l'obtention d'une précipitation blanche à l'aide de chlorure de baryum ($Ba Cl_2$)



c) Étapes de l'essai :

- Prend le filtrat obtenu par l'essai des insolubles (voir l'essai de détermination des insolubles).
- Ajuster ce filtrat jusqu'à 250 ml avec l'eau distillée, puis agiter.
- Prendre 100 ml du filtrat dans un bûcher
- Ajouter 10 ml de $Ba Cl_2$ diluée à 5% (détecteur)
- Bouillir doucement 4 à 5 min

- Refroidir à température ambiante.
- Filtrer la solution avec le papier filtre N° 541
- Peser un creuset vide P1
- Mettre le papier filtre dans le creuset
- Peser le creuset après calcination et après refroidissement

$$SO_3 = 34.3 \times (P_2 - P_1) / P_E \quad (III.8)$$

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = (184.23(P_2 - P_1)) / P_E \quad (III.9)$$

PE : la prise d'essai.

III.1.2.9.3 Essai De Détermination Des Chlorures Norme BS BOWLY (Version 1979).

a) Principe de l'essai : on fait agir en milieu neutre de pH une solution à titre de nitrate d'argent sur une prise d'essai en présence de chromate de potassium K_2CrO_4 . La solution est de couleur jaune, quand on verse la solution $AgNO_3$, le chlorure précipite à l'état de $AgCl$ la couleur rouge brique persistante est due à la formation de $(CrO_4 Ag_2)$.

b) Étapes de l'essai :

- Prendre 1 Kg d'un échantillon représentatif (les particules $\leq 20 \mu m$)
- Étuver l'échantillon à 105-110°C
- Écraser l'échantillon et tamisé au tamis 600 μm
- Placer 100g de l'échantillon dans une fiole de 500 ml
- Ajouter à l'échantillon 200 ml de l'eau distillée, et agiter pendant 24 heures.
- Filtrer la solution dans le papier filtre
- Prendre 100 ml de filtrat
- Ajouter 03 gouttes de l'acide nitrique HNO_3
- Ajouter une pincé de carbonate de calcium $CaCO_3$
- Ajouter 03 gouttes de chromate de potassium à 10%
- Titrer goutte à goutte par le nitrate d'argent $AgNO_3$ jusqu'à l'obtention d'une couleur rouge brique.
- lire le volume d' $AgNO_3$

$$\%NaCl = V(AgNO_3) \times (0.585) \quad (III.10)$$

III.1.2.9.4 Essai De Détermination Du Taux Des Carbonates D'un Sol (Norme NFP15-461)

a) Définition et but de l'essai

On détermine le taux des carbonates d'un sol pour déterminer le taux de calcaire une teneur en carbonate élevée signifie une faible teneur en minéraux argileux et généralement indique une résistance au cisaillement relativement élevée.

b) Etapes de l'essai :

- Prendre un échantillon et le tamiser au tamis 0,4 μ m.
- Euvé 24h à T° 110 à 115 °C
- Prendre une prise d'essais me = 0,5g (échantillon représentatif).
- Ajouter un volume Va = 10 ml de l'acide chlorhydrique HCl 1N
- Chauffer le mélange pour activer la réaction.
- Ajouter 02 gouttes de phénolphtaléine 0,1% (détecteur)
- Titrer avec NaOH 1N jusqu'à l'obtention d'une couleur violette.
- Prendre le volume de titrage de NaOH 1N (Vb).

$$\%CaCO_3 = \frac{5(Va - Vb)}{me} \dots\dots\dots (III.11)$$

Les résultats des analyses chimiques sont résumés dans le Tableau suivant :

Tableau (III-8): Résultats Des Analyses Chimiques

| | Sable concassé | Mélange de Gravier 8/15-15/25 et 3/8 |
|---------------------|----------------|--------------------------------------|
| % insoluble | 97.74 | 30.83 |
| % Sulfates | 0.30 | 0.86 |
| % gypse | 1.65 | 4.66 |
| % Carbonate | 0 | 51 |
| % Chlorures | 0.005 | 0.005 |
| %Chlorure de sodium | 0.009 | 0.009 |

D'après les résultats des analyses chimiques indiqués sur le tableau on peut dire que :
 La composition chimique de sable alluvionnaire est siliceuse avec absence des matières nuisibles, ce qui permet son utilisation dans le béton.
 Les graviers 3/8, 8/15 et 15/25 sont des matériaux d'origine calcaire.

III.1.2.10 Friabilité Des Sables

L'essai de friabilité des sables a été effectué conformément à la norme française (P 18 - 576) [66]. Il consiste à introduire une charge de 2500 g de billes d'acier, puis une masse de 500 g du sable testé de classe granulaire 0,2-2 ou 0,2 - 4 mm, en ajoutant ensuite 2,5 l d'eau dans un cylindre de l'Appareil Micro-Deval. L'ensemble est soumis en 1500 tours de rotation. Le pourcentage de la masse m des éléments inférieurs à 0,1 mm produits durant l'essai, représente le coefficient de friabilité du sable

$$F_s = 100(500 - m')/500 = m/5 \quad \text{(III-12)}$$

m' : La masse de refus sur le tamis de 0,1 mm

L'essai nous donne $F_s = 27\%$, Cette valeur est acceptable pour un béton normal

III.1.2.10 Porosité Des Gravillons

L'essai de porosité des gravillons a été effectué conformément à la norme française (P 18 - 554) [67].

Le résultat nous montre que les gravillons ont une porosité de 4.28% ce qui est acceptable. Ceci est traduit par une faible absorption d'eau.

III.1.2.11 Propreté superficielle

L'essai a été réalisé conformément à la norme française (P 18 - 591) [68], Il consiste à déterminer la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm par élimination des poussières et des particules argileuses inférieures à 0,5 mm. L'élimination est réalisée par lavage de l'échantillon sur le tamis correspondant. Le rapport du passant à 0,5 mm au poids total de l'échantillon représente la propreté superficielle des gravillons :

$$P = 100 (m/M_s) \quad \text{(III-13)}$$

$P = 0.54\%$, Essai effectué sur le gravier (8/15), Le résultat obtenu nous indique que le gravillon est propre.

III.1.2.12 Los Angeles

L'essai Los Angeles a été effectué conformément à la norme française (P 18 – 573) [69]. Il consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à $1,6 \text{ mm}$ produite par fragmentation du matériau testé de classe granulaire (10/14), soumis aux chocs d'une charge de 11 boulets par la mise en rotation du cylindre de la machine Los Angeles de 500 tours.

Le coefficient Los Angeles (LA) est le pourcentage du rapport de la masse m par le 5kg du matériau testé :

$$LA = 100(m/5000) \quad (\text{III-14})$$

LA trouvé est égal à 23.12% ,

On remarque que le gravillon naturel convient bien pour la confection de béton de qualité (granulat de catégorie A).

III.1.3 Eau De Gâchage

L'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, l'évolution des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion [54].

Les eaux naturelles conviennent comme eaux de gâchage du béton, à moins qu'elles ne contiennent des substances qui gênent le durcissement comme certaines eaux usées ou des eaux marécageuses. En cas de doute, une analyse chimique s'impose [55]. En effet, l'eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai [56]

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents bétons est une eau potable de robinet du laboratoire L.T.P.Sud, Unité de Ouargla.

Conclusion

L'analyse des résultats des caractéristiques des différents matériaux étudiés dans ce chapitre montre que Le ciment, l'eau de gâchage ainsi que les gravillons sont appropriés pour la confection de béton.

Partie II: Formulation De Béton

III.2 Formulation De Béton

III Introduction

L'objectif de cette partie est d'étudier expérimentalement la formulation d'un béton destiné aux ouvrages servant d'évacuer les eaux usées dans la vallée de Ouargla

La composition du béton préparé au laboratoire LTPS unité d'Ouargla dans le cadre de cette étude a été faite selon la méthode de "Faurry" où on s'est fixé initialement un rapport E/C de 0,6.

III.2.1 Principe De La Méthode

a) Déterminer la courbe du mélange des éléments secs, et chercher de se rapprocher le plus possible de la « courbe optimale » déterminée par la méthode de calcul classique.

b) Formulation et dosage des bétons

c) Courbe optimale

Deux segments de droites, formant une ligne brisée.

Il faut donc définir :

L'Origine : Point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0055 mm.

L'Extrémité : Point d'abscisses D et d'ordonnée 100

Point de brisure :

- Abscisse : D/2.

- Ordonnée Y D/2, donnée par formule :

$$Y_{D/2} = A + 17.8 \sqrt[5]{D} \quad (\text{III-14})$$

Avec :

A = constante, traduisant la maniabilité du béton ;

D = plus grande dimension de tamis

$$D_{max} = D1 + (D1 - D2) \times \frac{X}{Y} \quad \text{(III-15)}$$

Avec :

D1 : le diamètre de l'avant dernier tamis

D2 : le diamètre de tamis qui est après le tamis D1

On trouve : $D_{max} = 20 + (20 - 16) \times [(2.20) / 75.42]$;

Donc $D_{max} = 20.12 \text{ mm}$

Et on a :

$X = 100 - \% D1$

$Y = \% D1 - \% D2$

Donc $D_{max}/2 = 10.06 \text{ mm}$

Et avec :

$Y D/2 = A + 17,00 * \sqrt[5]{D}$

$Y D/2 = 32 + 17,00 * \sqrt[5]{20.12}$

On aura $Y D/2 = 62.99 \%$

A : dépend de la consistance du béton désiré et de la provenance des granulats.

Le tableau (III-9) nous montre les valeurs de A.

Tableau (III-9): Valeurs de A. [70]

| Consistance du béton | Sable roulé | | S. concassé |
|-------------------------|-------------|------------------|-------------|
| | G. roulé | Gravier concassé | |
| Assez plastique | 24 à 26 | 26 à 28 | 30 à 32 |
| Plastique | 26 à 28 | 28 à 30 | 32 à 34 |

$D < 25 \text{ mm}$: Béton armé courant pour Bâtiment et Ouvrages d'Art.

III.2.2 Détermination De La Quantité De L'eau De Gâchage

$$E = \left(\frac{K}{\sqrt[5]{D}} \right) \times 1000 \quad \text{(III-16)}$$

K : coefficient qui dépendant des agrégats, de la consistance et de la mise en place de béton.
Le *Tableau V.3* donne la variation de K. [23]

Tableau (III-10) : La variation du coefficient K. [70]

| Consistance | Serrage | Sable et gravier rous | Sable roule et gravier concasse | Sable et gravier concasse |
|-------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Très fluide | Inexistant | ≥ 0.37 | ≥ 0.405 | ≥ 0.46 |
| Molle | Moyen | 0.35 – 0.37 | 0.375 – 0.405 | 0.43 – 0.46 |
| Ferme | Très soigné | 0.33 – 0.35 | 0.350 – 0.375 | 0.40 – 0.43 |

$$E = (0.375/\sqrt[5]{20.12}) \times 1000 = 205 \text{ L} \quad \text{(III-17)}$$

III.2.3 Détermination De Volume Absolu Des Agrégats Secs

Volume absolu des éléments secs = 1000 dm³ - volume de l'eau.

$$V_{as} = 1000 - 205 = 795 \text{ L} \quad \text{(III-18)}$$

III.2.4 Détermination de pourcentage de ciment

$$C = 350/3.1 = 112.9 \text{ L} \quad \text{(III-19)}$$

$$\% C = (112.9 / 795) \times 100 = 14.20\%$$

$$\text{Masse volumique absolue du ciment} = 3,1 \text{ g/cm}^3.$$

III.2.5 Détermination Des Pourcentages Des Agrégats

Faury a mis au point une méthode particulière, la « Méthode des Indices Pondéraux » qui traite le problème par le calcul.

On applique la méthode graphique, le tableau ci-dessous montre les Pourcentages des agrégats pour les différents types de béton.

Tableau (III-11) : Pourcentages massique des agrégats

| Types de bétons | % Ciment | % sable | % gravier 3/8 | % gravier 8/15 | % gravier 15/25 | Quantité de l'eau (l) | Affaissement cône d'Abrams (cm) | E/C |
|-----------------|----------|---------|---------------|----------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------|------|
| total | 14.20 | 33.80 | 14 | 20 | 18 | 205 | 8 | 0.69 |

On note que la quantité de sable est obtenue par : $\% \text{ sable} = 100 - (\% \text{ 3/8} + \% \text{ 8/15} + \% \text{ 15/25} + \% \text{ C})$.

III.2.6 Affaissement Au Cône D'Abrams [71].

L'ouvrabilité du béton composé a été appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams, avant la confection des éprouvettes au laboratoire LTPS. L'essai d'affaissement a été effectué conformément à la norme européenne NF EN12350-2

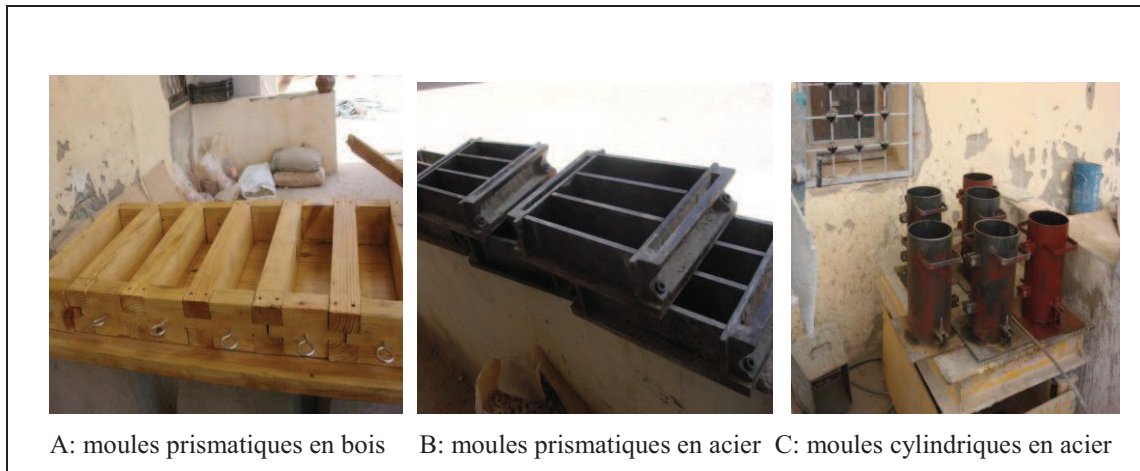
On remplit en trois couches, piquées chacune de 25 coups par une tige de Ø16 mm, un moule tronconique en tôle (D =20 cm ; d =10 cm ; h=30 cm). (Photo III-6 annexe photos)

Le moule est retiré lentement et la mesure de l'affaissement est réalisée. Dans notre cas l'affaissement est de 8 cm (voir tableau (III-11)).

III.3 Confection Et Cure Des Éprouvettes

Conformément à la norme européenne NF EN12390 -1[72], nous avons utilisé les moules suivants. pour la confection des éprouvettes selon la nature de l'essai à réaliser:

- Moule prismatique 7 x 7 x 28 cm, pour l'essai de traction par flexion et absorption capillaire
- Moule cylindrique Ø16, H32 cm. Pour l'essai de la compression.



Photos (III-1): types d'éprouvettes utilisées

III.3.1 Confection Des Éprouvettes

La préparation des mélanges a été effectuée suivant un dosage pondéral des granulats et conformément à la norme française NF P18 - 404 [73], qui consiste à :

- Introduire, en premier lieu, dans un malaxeur à béton, (Photo (III-7) annexe photos), les constituants dans l'ordre suivant : gravillons, liant, sable,
- Malaxer à sec les éléments de l'ordre de 1 *min*,
- Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2 *min*.

Nous avons prélevé la quantité volume pour le remplissage des moules en deux couches pour les moules prismatiques et en trois couches pour les moules cylindriques. Le serrage du béton doit être effectué immédiatement après le remplissage, par table vibrante (Photo (III-8) annexe photos), pour chaque couche du béton introduite (le temps de vibration est de 30 sec pour les moules cylindriques et de 10 sec pour les moules prismatiques).

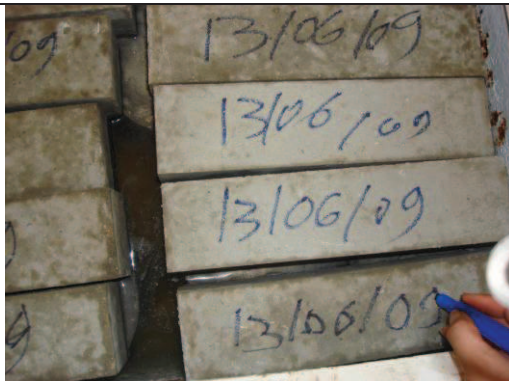


Photos (III-2): différentes étapes du remplissage des moules

III.3.2 Conservation Des Éprouvettes

Après la mise en place du béton, les éprouvettes sont maintenues pendant 24 heures, dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire ($T = 30 \pm 5$ °C, $HR = 35 \pm 5$). Pour éviter toute évaporation de l'eau, la face supérieure du moule est recouverte d'un film en plastique, durant la période de conservation.

Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau pendant 14 jours au laboratoire, à une température de 22 ± 2 °C, Par la suite une série d'éprouvette a été mise dans l'eau de la nappe phréatique (dans la région de Saïd Otba) (voir (Photo (III-3)), et une autre série a été immergée dans les eaux usées dans plusieurs regards (Said Otba) (voir (Photo III-3)) jusqu'à la date des écrasements.



A: éprouvettes prismatiques au laboratoire



B: éprouvettes cylindriques au laboratoire



C: éprouvettes conservées dans La nappe phréatique



D: éprouvettes conservées dans La nappe phréatique



C: éprouvettes conservées dans les eaux usées



D: éprouvettes conservées dans les eaux usées

Photos (III-3): différents milieux de conservation

III.3.3 Constatations Avant Ecrasement Des Eprouvettes

Les éprouvettes témoins conservées au laboratoire avaient une allure normale.

Les éprouvettes conservées dans les eaux usées avaient une couleur foncée, même après séchage par rapport aux éprouvettes témoins.

Les éprouvettes conservées dans la nappe phréatique avaient des cristaux de sel formés sur la surface, difficilement nettoyées à la brosse métallique.

Quelques éprouvettes prismatiques conservées dans la nappe phréatique étaient collées l'une à l'autre lors de leurs récupération de la fosse, difficilement séparées et nettoyées avant le test.



Photos (III-4): cristaux collés sur le béton conservé dans les eaux de la nappe

Sommaire

| | |
|---|----|
| Chapitre III: Essais Sur Matériaux Et Formulation Du Béton | 51 |
| Partie I: Essais sur les matériaux utilisés | 51 |
| III.1 Caractérisation Des Matériaux | 51 |
| III.1.1 Ciment « Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique | 51 |
| III.1.1.1 Analyses Chimiques Du Ciment | 51 |
| Tableau (III-1): Résultats Des Analyses Chimiques Du Ciment CRS..... | 51 |
| III.1.1.2 Propriétés Physiques Du Ciment | 52 |
| Tableau (III-2): Résultats Des Analyses Physiques Du Ciment CRS..... | 52 |
| III.1.2 Granulats | 52 |
| Tableau (III-3): Essais Effectués Sur Le Sable Et Le Gravier..... | 53 |
| III.1.2.1 Échantillonnage Des Granulats | 54 |
| III.1.2.2 Analyse Granulométrique Par Tamisage | 54 |
| III.1.2.3 Analyse Granulométrique Du Sable Alluvionnaire | 55 |
| Tableau (III-4) : Analyse Granulométrique Du Sable Alluvionnaire..... | 55 |
| III.1.2.4 Analyse Granulométrique Du Gravier Utilisé | 56 |
| Tableau (III-5) : La Granulométrie Du Gravier Utilisé | 56 |
| Figure (III-1): Courbes Granulométriques Des Granulats Utilisés | 57 |
| III.1.2.5 Essai D'équivalent De Sable (NF P 18-597) [64] | 58 |
| III.1.2.6 Essai Au Bleu De Méthylène (NF EN 933-9) | 59 |
| III.1.2.7 Détermination De La Masse Volumique Absolue Et Apparente D'un Sable Ou D'un Gravier | 61 |
| III.1.2.7.1 Détermination de la masse volumique absolue d'un sable ou d'un gravier | 61 |
| III.1.2.7.2 Détermination De La Masse Volumique Apparente D'un Sable Ou D'un Gravier | 61 |
| Tableau (III-7) : Masse volumique apparente et Absolue des granulats utilisés-Mesure | 62 |
| III.1.2.8 Coefficient D'absorption De Sable (Nf p 18-555) | 62 |
| III.1.2.9 Analyse Chimique | 63 |

| | |
|--|----|
| III.1.2.9.1 Détermination des corps Insolubles (NFP 15-461) | 63 |
| III.1.2.9.2 Détermination des Sulfates (NBS 1377/1975) | 64 |
| III.1.2.9.3 Essai De Détermination Des Chlorures Norme BS BOWLY (Version 1979) | 65 |
| III.1.2.9.4 Essai De Détermination Du Taux Des Carbonates D'un Sol (Norme NFP15- 461) | 66 |
| III.1.2.10 Friabilité Des Sables | 67 |
| III.1.2.10 Porosité Des Gravillons | 67 |
| III.1.2.11 Propreté superficielle | 67 |
| III.1.2.12 Los Angeles | 68 |
| III.1.3 Eau De Gâchage | 68 |
| Conclusion | 68 |
| Partie II: Formulation De Béton | 69 |
| III.2 Formulation De Béton | 69 |
| III Introduction | 69 |
| III.2.1 Principe De La Méthode | 69 |
| Tableau (III-9): Valeurs de A. [70]..... | 70 |
| III.2.2 Détermination De La Quantité De L'eau De Gâchage | 70 |
| Tableau (III-10) : La variation du coefficient K. [70]..... | 71 |
| III.2.3 Détermination De Volume Absolu Des Agrégats Secs | 71 |
| III.2.4 Détermination de pourcentage de ciment | 71 |
| III.2.5 Détermination Des Pourcentages Des Agrégats | 71 |
| Tableau (III-11) : Pourcentages massique des agrégats | 72 |
| III.2.6 Affaissement Au Cône D'Abrams [71] | 72 |
| III.3 Confection Et Cure Des Éprouvettes | 72 |
| Photos (III-1): types d'éprouvettes utilisées..... | 73 |
| III.3.1 Confection Des Éprouvettes | 73 |
| Photos (III-2): différentes étapes du remplissage des moules | 74 |

| | |
|---|----|
| III.3.2 Conservation Des Éprouvettes | 74 |
| Photos (III-3): différents milieux de conservation | 75 |
| III.3.3 Constatations Avant Ecrasement Des Eprouvettes | 76 |
| Photos (III-4): cristaux collés sur le béton conservé dans les eaux de la nappe | 76 |

Chapitre IV: Essais Et Résultats Sur Le Béton Durci

IV-1 Essais Effectués Sur Les Éprouvettes

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton Selon le mode de conservation et comparer ceux-ci aux propriétés de béton témoin conservé au laboratoire (LTPS).

Lors des essais destructifs, l'aspect interne des éprouvettes écrasées montre une bonne homogénéité.

IV .1.1 Essai De Résistance A La Compression (R_c)

Les essais de compression ont été réalisés au laboratoire LTPS unité de Ouargla, conformément à la norme européenne NF EN12390 - 3 [74], par application d'un effort de chargement sur une éprouvette cylindrique, dans le sens perpendiculaire de son axe longitudinal, jusqu'à la rupture, sous une presse (machine controls (Photo IV-1)), la résistance du béton est donnée par la formule (IV-1) suivante :

$$R_c = F/A_c \quad \dots\dots\dots (IV-1)$$

Avec:

F= la charge maximale à la rupture de l'éprouvette (en Newton).

A_c = l'aire de la section chargée de l'éprouvette (en mm^2).



(Photo IV-1) machine d'essai à la compression

La figure (IV-1), donne les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes conservées au laboratoire, en fonction de l'âge des éprouvettes, c'est-à-dire 28, 90, 180 jours et finalement 18 mois.

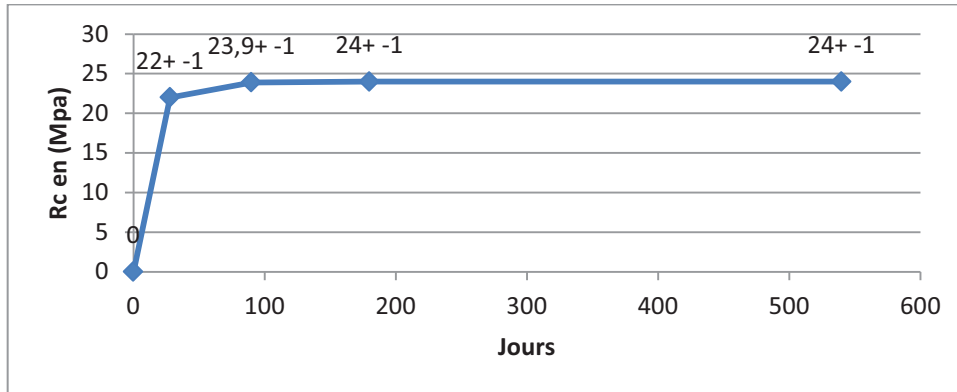


Figure (IV-1): Résistance A La Compression Des Eprouvettes Témoins

La figure (IV-1), montre que la courbe de résistance à la compression est de forme ordinaire, croissante où la résistance atteint son maximum de 24 MPa à 180 jours d'âge et reste constante même à l'âge de 18 mois.

La figure (IV-2), donne les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans les eaux usées, en fonction de l'âge des éprouvettes, c'est-à-dire 28, 90, 180 jours et finalement 18 mois.

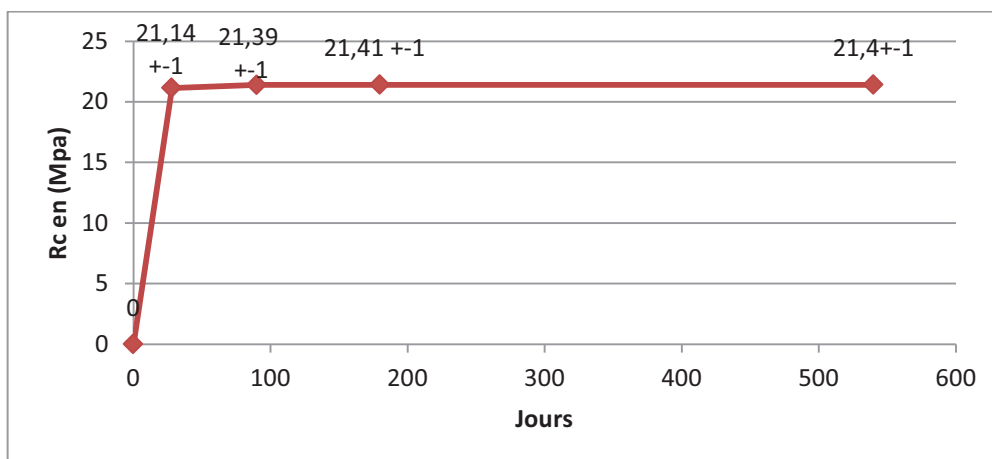


Figure (IV-2): Resistance A La Compression Des Eprouvettes Conservées Dans Les Eaux Usées.

Dans la figure (IV-2), nous remarquons que l'évolution de la résistance est d'une allure courante, elle atteint 21.14 MPa à 28 jours d'âge, néanmoins elle reste du même ordre de grandeur jusqu'à l'âge de 18 mois où nous enregistrons 21.40 MPa soit une petite régression.

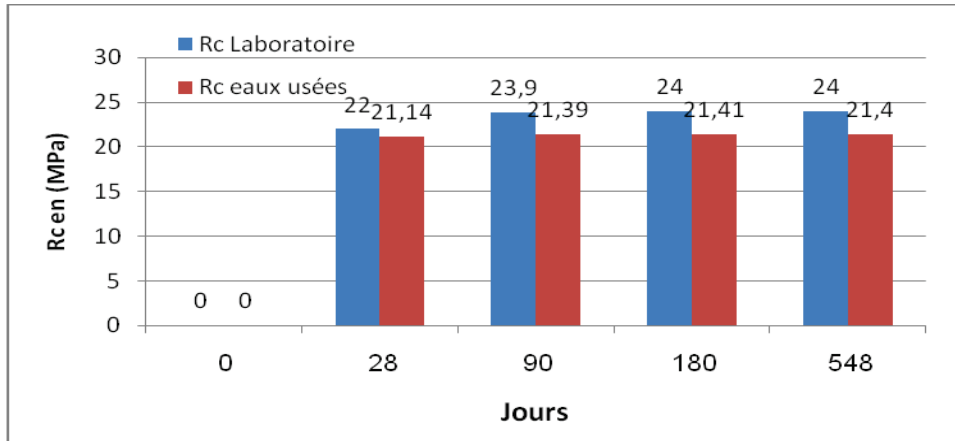


Figure (IV-3): Histogramme Présentant Les Résultats De Résistance A La Compression Des Epreuves Témoins Et Celles conservées Dans Les Eaux Usées.

D'après la figure (IV-3), nous enregistrons une régression de 3.90%, 10.79% 10.50% et 10.83% respectivement à 28 jours, trois mois, six mois et dix-huit mois d'âge, par rapport aux éprouvettes témoins, nous remarquons que le pourcentage de régression augmente avec le temps, ce qui représente l'effet défavorable des eaux usées sur la durabilité du béton.

La figure (IV-4), donne les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans les eaux de la nappe phréatique de la vallée de Ouargla, en fonction de l'âge des éprouvettes, c'est-à-dire 28, 90, 180 jours et finalement 18 mois.

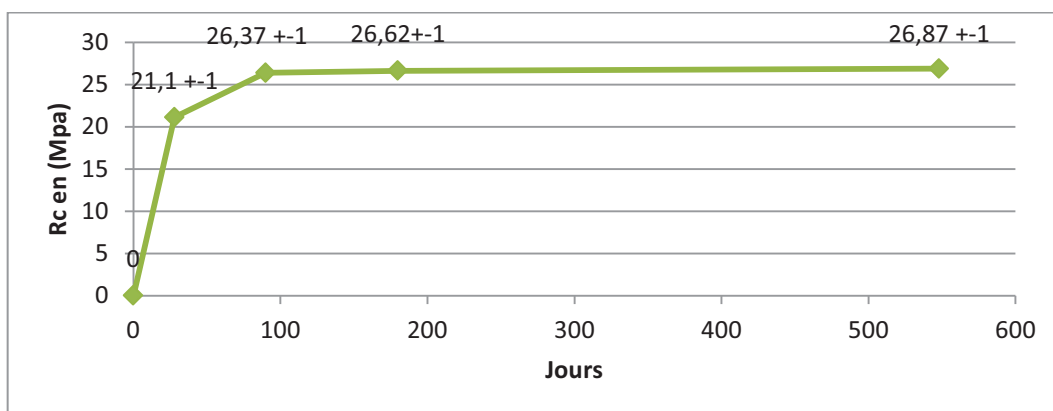


Figure (IV-4): Résistance A La Compression Des Epreuves plongées Dans La Nappe Phréatique De Ouargla (Said Otba)

Les éprouvettes conservées dans la nappe phréatique de Ouargla, comme le montre la figure (IV-4), présentent une courbe d'une allure ordinaire croissante jusqu'à l'âge de dix-huit mois où la résistance à 28 jours d'âge est égale à 21.10 MPa et 26.87 MPa à 18 mois.

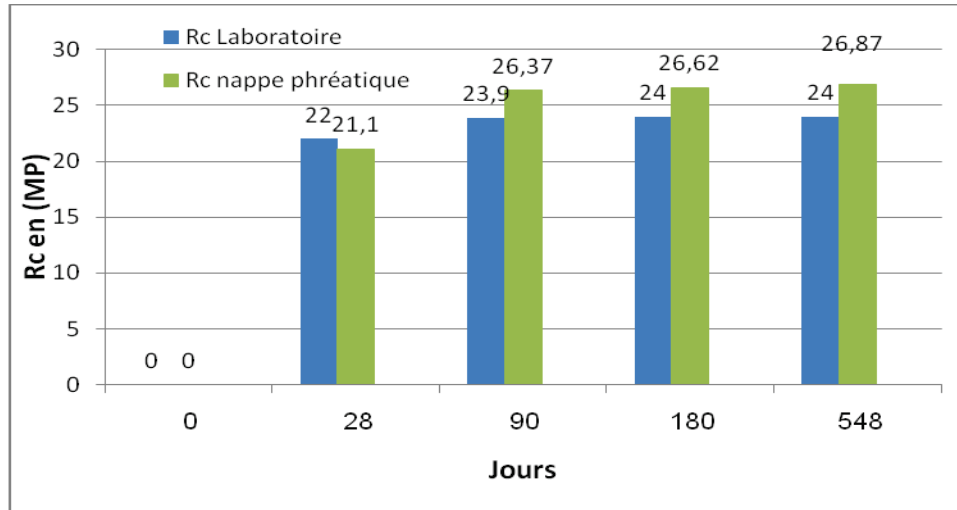


Figure (IV-5): Histogramme Présentant Les Résultats De Resistance A La Compression Des Eprouvettes Témoins Et Celles Plongées Dans La Nappe Phréatique.

La comparaison entre les résultats de résistance à la compression des éprouvettes soumises aux conditions de la nappe phréatique et les éprouvettes témoins est illustrée par la figure (IV-5), où on enregistre un recul de 4.09% à 28 jours, alors qu'au-delà de cet âge on enregistre un dépassement de 10.33% à 90 jours, 10.91% à 180 jours et 11.95% à 18 mois d'âge. Nous remarquons que le pourcentage de dépassement de résistance augmente avec le temps.

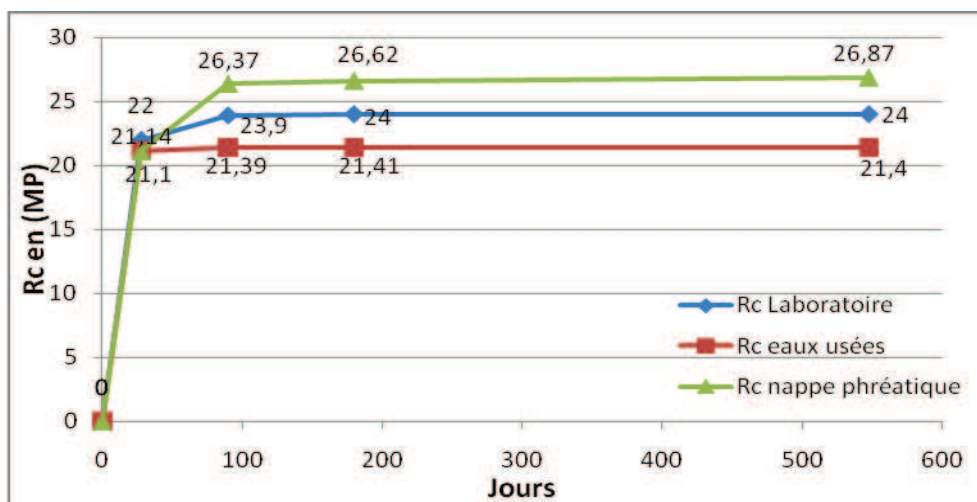


Figure (IV-6): Juxtaposition des résistances à la compression dans différents milieux

D'après la figure (IV-6) nous remarquons que les éprouvettes conservées dans la nappe phréatique présentent des valeurs supérieures à celles des éprouvettes témoins par contre celles des éprouvettes conservées dans les eaux usées sont de valeurs inférieures, ce qui montre l'effet positif des eaux de la nappe phréatique contrairement à l'effet des eaux usées, ce qui confirme l'efficacité du ciment CRS dans les milieux agressifs "eau de la nappe" et l'humidification continue dans la nappe a favorisé l'augmentation de la résistance par rapport à celles conservées au laboratoire.

IV.1. 2 Essai De Résistance A La Traction Par Flexion

Les essais de la traction par flexion ont été réalisés au laboratoire de l'institut de génie-civil à l'Université Kasdi Merbah Ouargla.

L'essai a été effectué conformément à la norme française NF P18 - 407 [75] par l'emplacement de l'éprouvette prismatique (7x7x28 cm) dans l'appareil de chargement de la machine d'essai (Photo(IV-2) annexe photos), en prenant comme faces de chargement, les faces de moulage.

La figure (IV-7) montre le dispositif de traction par flexion utilisé.

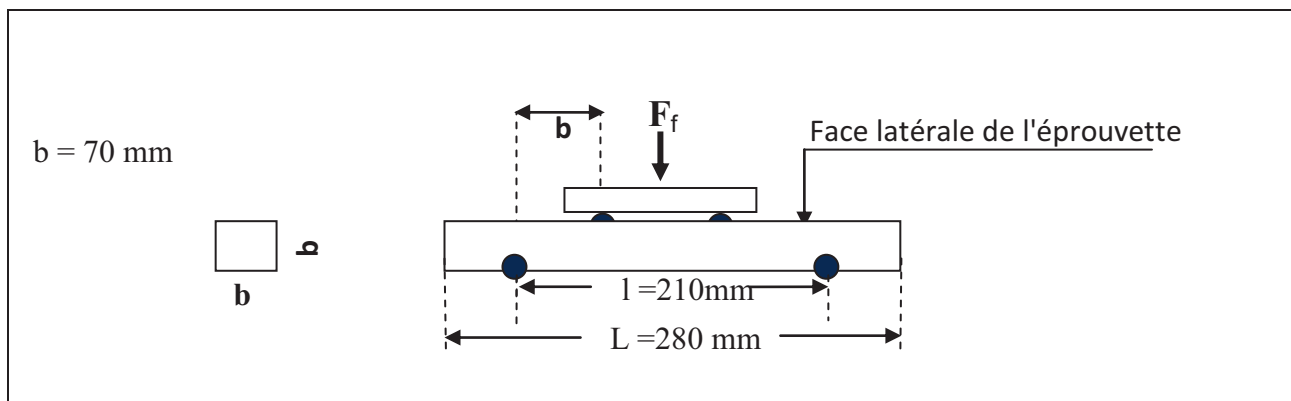


Figure (IV-7): Dispositif Pour L'essai De Resistance A La Flexion (4 points)

la rupture par flexion est déterminée par la formule d'élasticité suivante :

$$R_f = \frac{3F_f}{b^2} \dots\dots\dots (IV-2)$$

Avec:

R_f : résistance à la flexion en MPa.

F_f : charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N).

b : côte de l'éprouvette est égal à 70 mm.

La figure (IV-8), donne les résultats de la résistance à la traction des éprouvettes conservées au laboratoire, en fonction de l'âge des éprouvettes, c'est-à-dire 28, 90, 180 jours et finalement 18 mois.

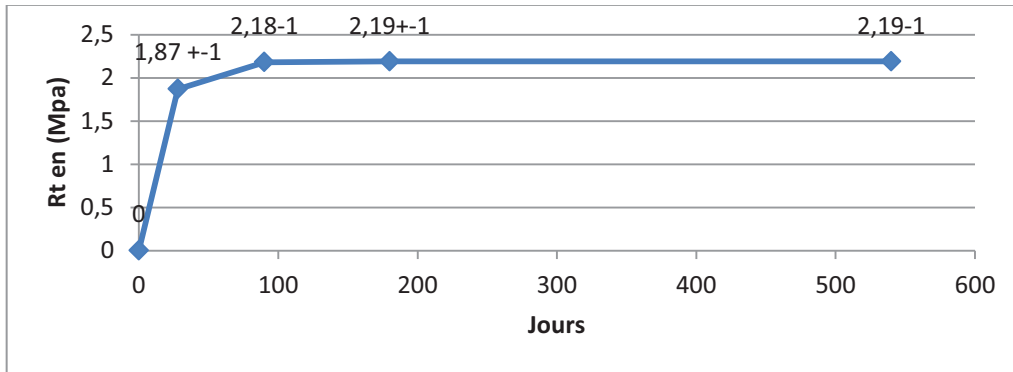


Figure (IV-8): Résistance à la traction des éprouvettes témoins.

D'après la figure (IV-8), la courbe de résistance à la traction est croissance de forme ordinaire, elle est de 1.87 MPa à 28 jours d'âge et elle reste quasiment statique jusqu'à l'âge de 18 soit de 2.19 MPa.

La figure (IV-9), donne les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans les eaux usées, en fonction de l'âge des éprouvettes, c'est-à-dire 28, 90, 180 jours et finalement 18 mois.

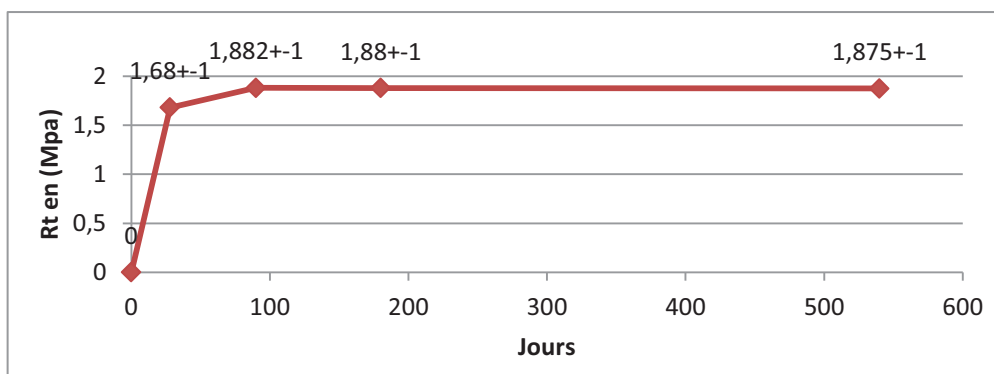


Figure (IV-9): Resistance A La Traction Des Eprouvettes Conservées Dans Les Eaux Usées.

D'après la figure (IV-9), la courbe de croissance de la résistance à la traction après 28 jours a une forme normale de ligne croissante jusqu'à 90 jours, puis on enregistre une légère régression entre 90 et 548 jours.

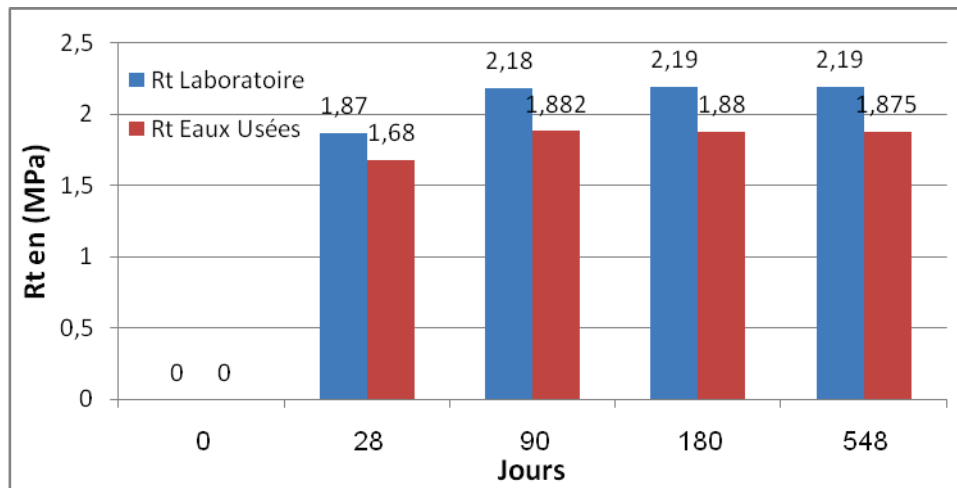


Figure (IV-10): Histogramme Présentant La Resistance A La Traction Des Éprouvettes Témoins Et Celles Conservées Dans Les Eaux Usées.

L'histogramme de la figure (IV-10), montre l'effet négatif des eaux usées sur le béton utilisé où on enregistre les régressions suivantes 10.16%, 13.67%, 14.15% et 14.38% qui correspondent respectivement à l'âge de 28 jours, 3 mois, 6 mois et 18 mois, on remarque encore que cette régression augmente avec l'âge.

La figure (IV-11), donne les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans les eaux de la nappe phréatique de la vallée de Ouargla, en fonction de l'âge des éprouvettes, c'est-à-dire 28, 90, 180 jours et finalement 18 mois.

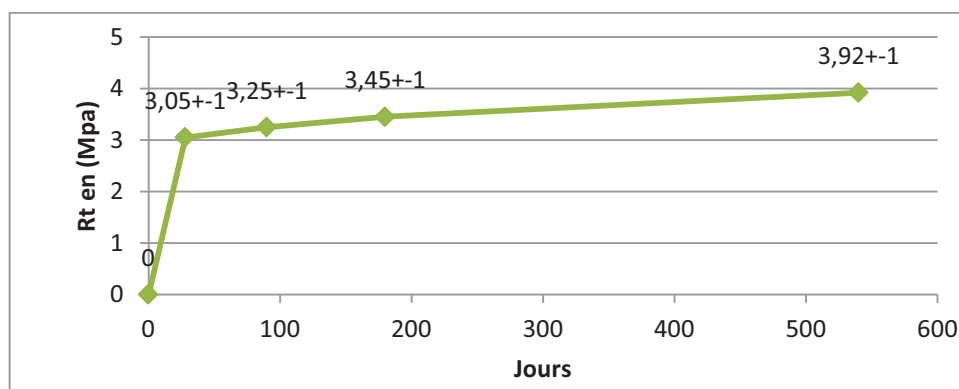


Figure (IV-11): Resistance A La Traction Des Eprouvettes Plongées Dans La Nappe Phréatique De Ouargla (Said Otba)

D'après la figure (IV-11), la courbe de résistance à la traction accroît de manière continue jusqu'à l'âge de 18 mois où nous n'enregistrons pas l'effet négatif attendu de la nappe phréatique.

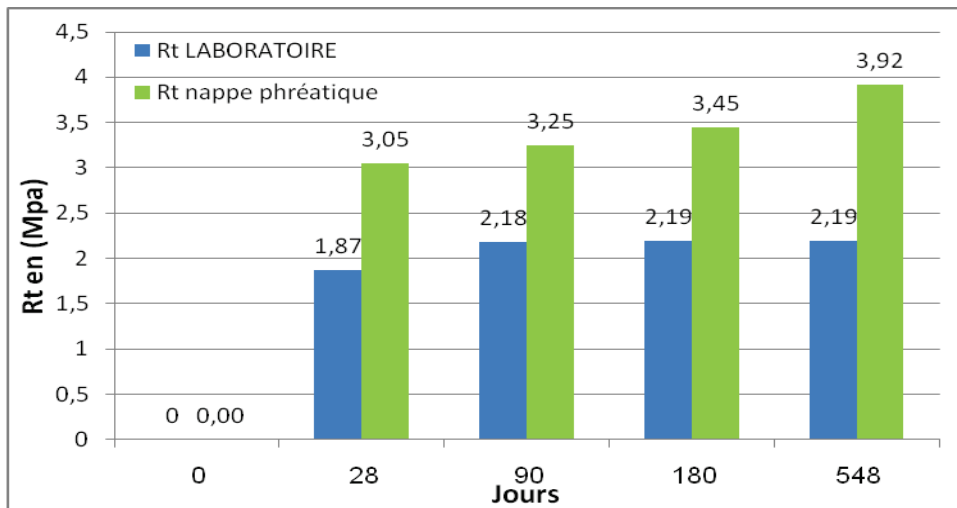


Figure (IV-12): Resistance A La Traction Des Epruvettes Témoins Et Celles De La Nappe Phréatique De Ouargla.

La comparaison entre les résultats de résistance à la traction des éprouvettes soumises aux conditions de la nappe phréatique et les éprouvettes témoins est illustrée par la figure (IV-12), où nous enregistrons un dépassement 63.10%, 49.08%, 57.53% et 78.99% respectivement à 28 jours, 3, 6 et 18 mois d'age.

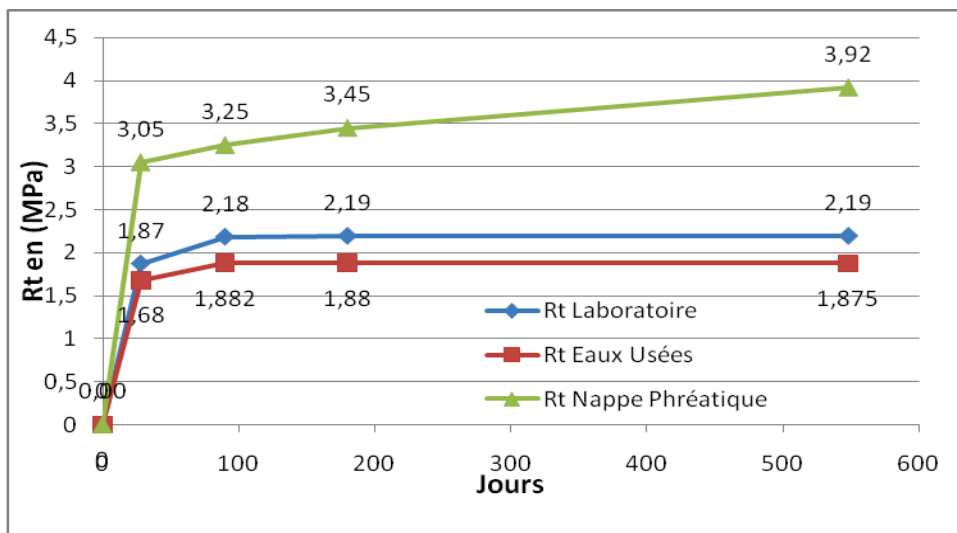


Figure (IV-13): Juxtaposition des résistances à la traction des différents milieux.

La figure (IV-13) distingue bien les courbes de résistance à la traction des bétons dans différents milieux, la résistance du béton conservés dans la nappe phréatique de Ouargla est nettement supérieure à celle du béton témoin par contre la résistance à la traction du béton conservés dans les eaux usées est inférieure aux deux autres.

D'autre part, au-delà de 3 mois les éprouvettes témoins ainsi que celles exposées aux eaux usées ne montrent pas une évolution significative contrairement à celles exposées à la nappe phréatique. Cela est dû aux causes citées dans l'interprétation du résultat à la compression.

IV.1.3 Essai D'auscultation Dynamique

L'essai d'auscultation dynamique, par vitesse du son, consiste à mesurer le temps de propagation d'ondes sonique dans une éprouvette de béton à l'aide d'un appareil à ultrasons,

L'essai a été effectué conformément à la norme française P18 - 418[76]. La vitesse de propagation du son est calculée par la formule suivante :

$$v = \frac{d}{t} \quad (\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots (\text{IV-3})$$

Où :

D : distance entre faces de l'éprouvette mesurée en mètres,

T : temps de propagation d'ondes en secondes.

Les vitesses de propagation du son calculées, sont exprimées en mètres par seconde, sous la forme de la moyenne des valeurs mesurées sur trois éprouvettes. Les résultats sont résumés dans la figure suivante Figure (IV-14)

La vitesse de propagation du son est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Elle fournit une indication sur les qualités des bétons, telles que :

- Homogénéité du béton,
- Cavités, fissures, défauts dus à l'effet du feu ou du gel,
- Module d'élasticité,
- Résistance à la compression.

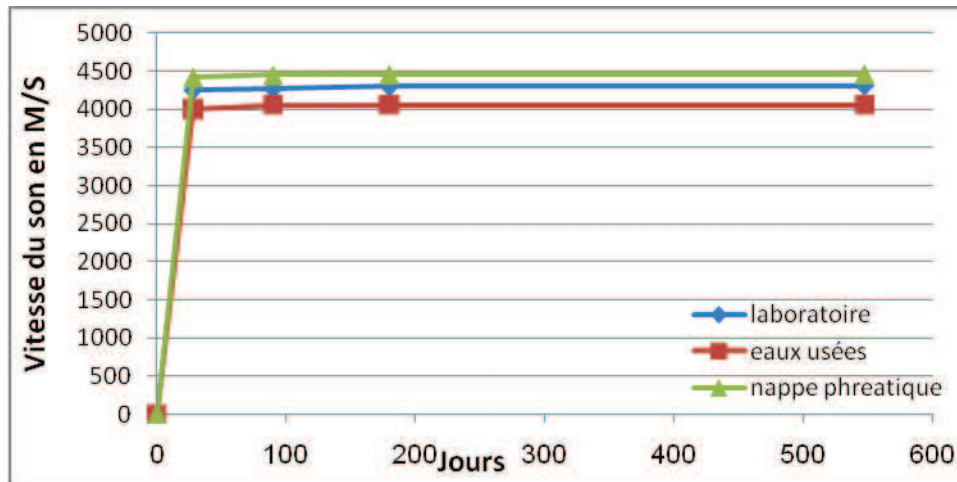


Figure (IV-14): Juxtaposition De la Vitesse Du Son des Différents Milieux.

La figure (IV-14), montre la vitesse des sons des bétons dans différents milieux et on remarque que le béton conservé dans la nappe phréatique présente la valeur des sons la plus élevée donc c'est le béton le plus dense est et celui des eaux usées est le moins dense, l'allure des courbes de transmission du son à travers les différentes éprouvettes confirme les résultats trouvés dans les essais mécaniques destructifs.

IV.1.4 Essai D'absorption Capillaire

Cet essai consiste en des mesures d'absorption d'eau à la pression atmosphérique.

Déshydraté à l'étuve jusqu'à masse constante, l'éprouvette subit un sciage sur la face absorbante et un traitement imperméabilisant sur les autres faces avec de la paraffine, l'éprouvette est mise sur la face sciée dans un bac contenant du sable saturé d'eau pendant 72 heures [77], voir (Photo (IV-3) annexe photos)

En mesure ensuite l'accroissement du poids de l'éprouvette en fonction du temps. [78]

Avec la formule suivante:

$$A.C = 100 * P / (S * t^{1/2}) \dots \dots \dots (IV-4)$$

P: poids d'eau absorbé.

S: surface sciée de l'éprouvette en contact avec l'eau.

.t = 72 heure.

L'essai a été effectué au laboratoire LTPS Ouargla, sur trois séries de trois d'éprouvettes (7x7x h=var) cm^3 , chaque série a été conservée dans un milieu différent (eau usée, nappe phréatique et témoins). Les résultats sont représentés dans l'histogramme suivant:

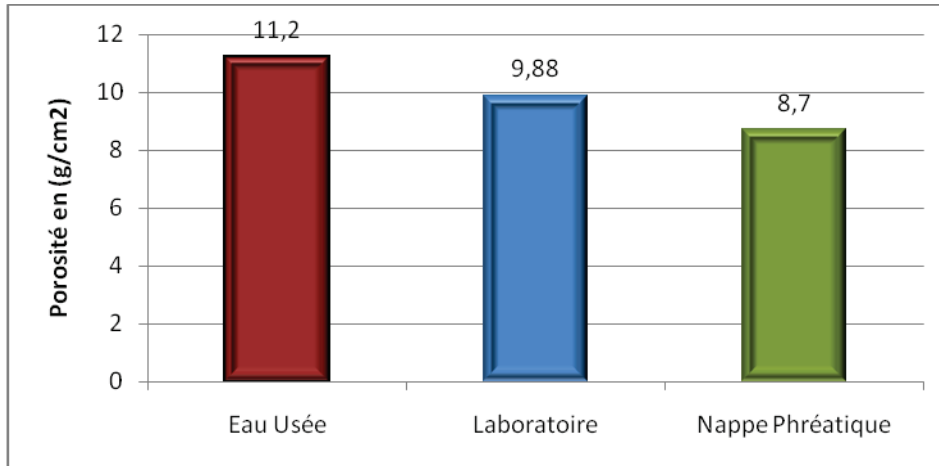


Figure (IV-15): Histogramme Presentant L'Absorption Capillaire Des Eprouvettes Dans Différents Milieux (témoins, nappe phréatique et eaux usées).

L'histogramme (IV-15) montre que:

Les éprouvettes conservées dans les eaux usées absorbent 11.20 g/cm^2 et dépassent les éprouvettes témoins de 1.32 g/cm^2 l'équivalent de 13.36%. Ce qui montre que le béton se trouvant dans les eaux usées est poreux par rapport au béton témoin, sachant que les deux bétons sont de la même formulation et du même coulage.

Les éprouvettes témoins absorbent 9.88 g/cm^2 , dépassant celles conservées dans la nappe phréatique de 1.18 g/cm^2 l'équivalent de 11.94%. Cette infériorité numérique de l'absorption capillaire du béton qui se trouve dans la nappe phréatique est forcément grâce à la formation des composés stables qui ont contribué au bouchage des pores et micro-pores, ce qui empêche la pénétration des ions agressifs et augmente la durabilité.

Les éprouvettes conservées dans les eaux usées absorbent 11.20 g/cm^2 par contre celles de la nappe phréatique absorbent 8.7 g/cm^2 , ce qui représente 2.5 g/cm^2 de différence l'équivalent de 25.3 %. Cette importante différence peut être expliquée par la cristallisation positive pour le béton conservé dans la nappe phréatique, et la dégradation du béton conservé dans les eaux usées. Nous pouvons constater que les composés chimiques entre le béton et les eaux usées sont instables et donnent naissance à la création des pores et des micro-pores alors que les

composés chimiques entre le béton et les eaux de la nappe phréatique sont stables et contribuent à l'obturation des pores et micro-pores. Ce qui nous conduit à se méfier de l'utilisation du CRS et penser à faire des couches protectrices en peinture bitumineuse ou en coaltar, dans les regards et les ouvrages d'assainissement.

En effet, nous avons montré le taux élevé du sulfate et du chlore dans les eaux usées, ce qui explique la chute de résistance et la propagation des pores ouvertes. Quand à la concentration des ions dans la nappe phréatique, les analyses que nous avons présenté montre les taux de concentration suivants: sulfate 1250 mg/l, magnésium 651 mg/l, chlore 6320 mg/l, malgré ces taux, le CRS a pu résister, ce qui encourage l'utilisation du CRS dans ces milieux.

Ces valeurs donnent une idée claire sur la durabilité. Donc les eaux usées attaquent le béton par contre les eaux de la nappe phréatique d'Ouargla le protègent.

IV.1.5 Mesure De La Carbonatation

La technique à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont la valeur se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$) qui reste incolore, de la zone non carbonatée ($\text{pH} > 9$ et allant jusqu'à 13) colorée en violet. Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages. [79]

L'essai a été effectué au laboratoire LTPS Ouargla, sur deux séries de deux d'éprouvettes de section $(7 \times 7) \text{ cm}^2$ et de 18 mois d'âge, chaque série a été conservée dans un milieu différent (eau usée, nappe phréatique). Les résultats sont représentés dans le tableau suivant: (photos (IV-4,6) annexe photos).

Tableau (IV-1): profondeur de carbonatation.

| | Nappe phréatique | Eaux usées |
|-----------------|------------------|------------|
| Profondeur (mm) | 0 | 3 |

Le tableau (IV-1), montre que le béton de la nappe phréatique n'a pas été carbonaté, ce résultat est dû au fait que le béton était entièrement immergé dans la nappe phréatique, donc il y a absence de CO_2 par contre le béton conservé dans les eaux usées montre une carbonatation de 3 mm, cela est dû au fait que dans les regards, la température et l'humidité relative sont très élevées et au fait que le niveau d'eau augmente et descend avec les heures de pointes, ce qui favorise la carbonatation.

Une profondeur de carbonatation de 3 cm à seulement 18 mois d'âge, nous pousse à poser de réelles questions sur l'efficacité de la couche d'enrobage qui est en générale entre 3 et 5 cm, et par la suite sur la durabilité des armatures, surtout en présence du chlore et du gaz H_2S .

IV.1.6 Analyses Chimiques

A- Analyses Chimiques Des Cristaux Prélevés A La Surface Des Éprouvettes Conservées Dans La Nappe Phréatique

Les résultats des analyses chimiques sont résumés dans le Tableau (IV-2) suivant :

Tableau (IV-2): Résultats Des Analyses Chimiques Des Cristaux

| Élément Chimique | Teneur dans l'échantillon |
|--|---------------------------|
| Insoluble en % | 7.37 |
| Sulfates S O_3 en % | 4.73 |
| gypse $\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ en % | 25.44 |
| Chlorures Cl^- en % | 31.48 |
| Chlorure de sodium NaCl en % | 51.63 |

D'après le tableau (IV-2), les cristaux trouvés à la surface du béton sont à 51.63 % de chlore de sodium, ce qui justifie la morphologie, le goût et la couleur des cristaux. L'échantillon contient des éléments naturellement détectables dans le sol voir 7.37% d'insolubles, 4.73% de sulfates et 25.44% de gypse.

B- Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans La Nappe Phréatique

Tableau (IV-3): Résultats Des Analyses Chimiques De La Peau Du Béton Prélevé d'une Éprouvettes Conservées Dans La Nappe Phréatique:

| Élément Chimique | Teneur dans l'échantillon |
|--|---------------------------|
| Insoluble en % | 23.41 |
| Sulfates S O ₃ en % | 1.43 |
| gypse Ca SO ₄ ,2H ₂ O en % | 7.70 |
| Carbonate de calcium en % | 41.00 |
| Chlorures Cl ⁻ en % | 0.418 |
| Chlorure de sodium NaCl en % | 2.325 |

Nous remarquons une grande teneur en chlorure de sodium dans le béton prélevé ce qui nous amène à dire que la couche protectrice à la surface des éprouvettes est formée en grande partie par les chlorures de sodium, ce confirme l'interprétation de nos résultats des essais mécaniques et l'essai de l'absorption capillaire.

C- Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans Dans Les Eaux Usées

Tableau (IV-4): Résultats Des Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans Les Eaux Usées.

| Élément Chimique | Teneur dans l'échantillon |
|--|---------------------------|
| Insoluble en % | 26.43 |
| Sulfates S O ₃ en % | 1.31 |
| gypse Ca SO ₄ ,2H ₂ O en % | 7.07 |
| Carbonate de calcium en % | 48.00 |
| Chlorures Cl ⁻ en % | 0.215 |
| Chlorure de sodium NaCl en % | 0.353 |

Dans les tableaux (IV-3,4), on remarque le tût élevé des Sulfates et Chlorures de sodium dans le béton prélevé dans la nappe phréatique par rapport à celui des eaux usées.

La forte concentration en NaCl dans le béton prélevé de la nappe phréatique explique la coloration à la phénolphtaléine, les résultats des essais mécaniques et de l'essai d'absorption capillaire c.-à-d. les dépôts de sel ont bloqués la pénétration des ions agressifs.

Remarque:

Les analyses chimiques ont étaient effectuées sur l'épiderme du béton c.-à-d. la couche superficielle du béton.

IV.2 Conclusion

Après avoir confectionner les éprouvettes en béton et les avoir exposées aux eaux de la nappe phréatique et aux eaux usées, des eaux supposées agressives, nous avons effectué différents essais mécaniques et de durabilité, sur ces bétons, et des analyses chimiques sur les cristaux trouvés coller aux bétons et des analyses chimiques de la peau des bétons, l'interprétation des résultats a abouti à ce qui suit:

IV.2.1 Essais Mécaniques

IV.2.1.1 Compression

A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique

Le résultat de l'essai à la compression est inattendu d'après l'étude bibliographique dans les chapitres précédents, vue que l'eau de la nappe phréatique de Ouargla est supposée aggressive pour le béton à cause de ses constituants, le résultat de la résistance à la compression est meilleur que celui même des éprouvettes témoins et cela peut être grâce aux cristaux signalés précédemment qui se sont formés sur toute la surface du béton et même dans les pores de la peau du béton voir tableau (IV- 3), durant l'exposition à l'eau de nappe phréatique, cette formation de cristaux, fait à ce que ces derniers contribuent favorablement à la résistance en faisant obturation des pores du béton. A ce titre, nous enregistrons à 18 mois, 12% de gains de résistance, par rapport aux bétons témoins.

Donc nous validons l'utilisation du ciment CRS dans les ouvrages enterré dans le sol de la vallée de Ouargla.

B- Béton Exposé Aux Eaux Usées

Le béton exposé aux eaux usées a montré une mauvaise tenue "attendue", vis-à-vis des eaux usées, selon les chapitres précédents, cela peut être expliqué par le fait que d'un coté les eaux usées sont de pH acide et nous savons que la solution interstitielle du béton est alcaline, donc toute solution acide est agressive pour le béton et d'un autre coté la haute température et la forte contenance des eaux usées en sulfate "4870 mg/l " et en chlorure "1528.1 mg/l", (chapitre II). On enregistre 11% de régression de la résistance à la compression par rapport aux bétons témoins à 18 mois d'âge et d'exposition aux eaux usées.

IV.2.1.2 Traction

A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique

Comme pour la résistance à la compression, l'essai de la résistance à la traction a dévoilé un très bon résultat de 79% de gain de résistance à 18 mois d'âge, par rapport aux bétons témoins, ce gain peut être attribué à la contribution des cristaux formés à la résistance totale des éprouvettes par adhérence béton et cristaux.



photo (IV-1): Éprouvettes lors de leur extraction des eaux de la nappe phréatique (Formation de cristaux a la surface).

B- Béton Exposé Aux Eaux Usées

Le résultat de l'essai à la traction accorde bien ce qui a été mentionné dans la bibliographie. Nous enregistrons une régression de 14% par rapport aux bétons témoins, vue l'acidité et l'agressivité des eaux usées.

IV.2.2 Essais De Durabilité

IV.2.2.1 Absorption Capillaire

A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique

Le béton conservé dans la nappe phréatique est moins absorbant de 12 % que le béton témoin, ceci est dû à la formation des cristaux, sur la surface du béton et dans les pores, soit l'augmentation de la durabilité par empêchement de la pénétration des ions agressifs à l'intérieur du béton, en faisant obturation des pores.

Le résultat de l'absorption capillaire, du béton exposé à l'eau de la nappe phréatique, montre la bonne structure, densité et porosité du béton qui sont des caractéristiques très importantes pour la durabilité de ce dernier, comme l'ont trouvé Mr A.Hummel et Mr K. Wesche sur des éprouvettes cylindriques après 20 ans d'exposition à l'eau de la mer (eau supposée agressive), et disent que la structure et la porosité du béton jouent un rôle de même importance pour la résistance chimique du béton, que la nature du liant [50]. Un autre travail fait par Mr K. Seidel qui a conclu que la densité et la cure initiale exercent une grande influence sur la qualité et la durabilité du béton, après avoir étudié une série de bétons fabriqués avec trois sortes de ciments, soumis 50 ans à l'action de l'eau de mer et 35 ans à l'eau des marais[50].

B- Béton Exposé Aux Eaux Usées

La mauvaise tenue tant attendue vis-à-vis des eaux usées s'est bien éclaircie après l'essai de l'absorption capillaire qui illustre 14% de médiocrité de la morphologie, la densité et la structure du béton exposé aux eaux usées, par rapport au béton témoin.

IV.2.3 Analyses Chimiques

A- Analyses Chimiques Des Cristaux

L'analyse des cristaux formés sur le béton montre plus de 50% de chlorure de sodium, cette formation de cristaux est due forcément à la forte concentration en sel minéraux dans la fouille, ou l'eau et les sels minéraux se sont infiltrés naturellement et donc la cristallisation est favorisée.



Photo (IV-2): Formation des cristaux dans la fouille et sur les éprouvettes en béton.

B- Analyses Chimiques De La Peau Du Béton:

Après avoir prélever les éprouvettes des différents milieux, et les avoir bien nettoyer à l'aide d'une brosse métallique et de l'eau, et après avoir effectuer les essais mécaniques, une couche de 2 cm du béton a été récupérée et analysée, les résultats donnent plus de 2.30 % et moins de 0.36% de chlorure de sodium, respectivement dans le béton se trouvant dans la nappe phréatique et dans les eaux usées. Ces résultats prouvent que le NaCl s'est formé dans les pores et les micros fissures superficielles du béton se trouvant dans la nappe phréatique, contrairement aux bétons exposés aux eaux usées. Ce qui explique les résultats des essais effectués sur les éprouvettes.

Sommaire

| | |
|---|----|
| Chapitre IV: Essais Et Résultats Sur Le Béton Durci | 77 |
| IV-1 Essais Effectués Sur Les Éprouvettes | 77 |
| IV .1.1 Essai De Résistance A La Compression (Rc) | 77 |
| (Photo IV-1) machine d'essai à la compression | 77 |
| Figure (IV-1): Résistance A La Compression Des Epreuves Témoins..... | 78 |
| Figure (IV-2): Resistance A La Compression Des Epreuves Conservées Dans Les Eaux Usées. | 78 |
| Figure (IV-3): Histogramme Présentant Les Résultats De Resistance A La Compression Des Epreuves Témoins Et Celles conservées Dans Les Eaux Usées. | 79 |
| Figure (IV-4): Résistance A La Compression Des Epreuves plongées Dans La Nappe Phréatique De Ouargla (Said Otba) | 79 |
| Figure (IV-5): Histogramme Présentant Les Résultats De Resistance A La Compression Des Epreuves Témoins Et Celles Plongées Dans La Nappe Phréatique..... | 80 |
| Figure (IV-6): Juxtaposition des résistances à la compression dans différents milieux | 80 |
| IV.1. 2 Essai De Résistance A La Traction Par Flexion | 81 |
| Figure (IV-7): Dispositif Pour L'essai De Resistance A La Flexion (4 points) | 81 |
| b : côte de l'éprouvette est égal à 70 mm..... | 82 |
| Figure (IV-8): Résistance à la traction des éprouvettes témoins. | 82 |
| Figure (IV-9): Resistance A La Traction Des Epreuves Conservées Dans Les Eaux Usées. | 82 |
| Figure (IV-10): Histogramme Présentant La Resistance A La Traction Des Éprouvettes Témoins Et Celles Conservées Dans Les Eaux Usées. | 83 |
| Figure (IV-11): Resistance A La Traction Des Epreuves Plongées Dans La Nappe Phréatique De Ouargla (Said Otba) | 83 |
| Figure (IV-12): Resistance A La Traction Des Epreuves Témoins Et Celles De La Nappe Phréatique De Ouargla. | 84 |
| Figure (IV-13): Juxtaposition des résistances à la traction des différents milieux. | 84 |
| IV.1.3 Essai D'auscultation Dynamique | 85 |
| Figure (IV-14): Juxtaposition De la Vitesse Du Son des Différents Milieux. | 86 |
| IV.1.4 Essai D'absorption Capillaire | 86 |
| Figure (IV-15): Histogramme Presentant L'Absorption Capillaire Des Epreuves Dans Différents Milieux (temoins, nappe phréatique et eaux usées). | 87 |
| IV.1.5 Mesure De La Carbonatation La technique à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont la valeur se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée (pH < 9) qui reste incolore, de la zone non carbonatée (pH > 9 et allant jusqu' à 13) colorée en violet. Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et | |

| | |
|--|----|
| de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages. [79] | 88 |
| Tableau (IV-1): profondeur de carbonatation..... | 88 |
| IV.1.6 Analyses Chimiques | 89 |
| A- Analyses Chimiques Des Cristaux Prélevés A La Surface Des Éprouvettes Conservées Dans La Nappe Phréatique | 89 |
| Tableau (IV-2): Résultats Des Analyses Chimiques Des Cristaux | 89 |
| B- Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans La Nappe Phréatique | 90 |
| Tableau (IV-3): Résultats Des Analyses Chimiques De La Peau Du Béton Prélevé d'une Éprouvettes Conservées Dans La Nappe Phréatique:..... | 90 |
| C- Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans Dans Les Eaux Usées | 90 |
| Tableau (IV-4): Résultats Des Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans Les Eaux Usées. | 90 |
| IV.2 Conclusion | 91 |
| IV.2.1 Essais Mécaniques | 91 |
| IV.2.1.1 Compression | 91 |
| A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique | 91 |
| B- Béton Exposé Aux Eaux Usées | 92 |
| IV.2.1.2 Traction | 92 |
| A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique | 92 |
| Éprouvettes lors de leur extraction des eaux de la nappe phréatique photo (IV-1):..... | 92 |
| B- Béton Exposé Aux Eaux Usées | 92 |
| IV.2.2 Essais De Durabilité | 93 |
| IV.2.2.1 Absorption Capillaire | 93 |
| A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique | 93 |
| B- Béton Exposé Aux Eaux Usées | 93 |
| IV.2.3 Analyses Chimiques | 93 |
| A- Analyses Chimiques Des Cristaux | 93 |
| Photo (IV-2): Formation des cristaux dans la fouille et sur les éprouvettes en béton. | 94 |
| B- Analyses Chimiques De La Peau Du Béton: | 94 |

Conclusion générale et recommandations

1 Conclusion générale:

L'étude expérimentale sur la durabilité des ouvrages en béton à base de ciment CRS réalisée au laboratoire "exploitation et valorisation des ressources naturelles en zones arides de l'université de Ouargla " et au "laboratoire des travaux publique sud de Ouargla LTPS" et qui a durée deux années nous a permis de tirer les conclusions suivantes.

-Nous concluons que la vallée de Ouargla est caractérisée par un climat chaud et sec et elle possède plusieurs nappes, dont la nappe phréatique qui s'étant sur une superficie très large, les eaux de la nappe phréatique de la vallée sont relativement agressives, elles contiennent 340mg/l de Cl , 349 mg/l de Mg, et 367mg/l de SO_4^{-2}

- Le béton subi divers mécanismes d'attaque par les ions agressifs tel que le sulfate, les chlorures et les dioxydes de carbone, mais à des concentrations modérées, et si le béton est bien conçu, ce dernier résiste bien à ces attaques.

- les résultats des différents essais effectués sur les matériaux utilisés dans la confection du béton étudié montrent que Le ciment CRS, l'eau de gâchage ainsi que les gravillons provenant de la carrière BENBRAHIM, sont appropriés pour un béton destiné à l'évacuation des eaux usées, la confection et la cure du béton ont étaient respectés, jusqu'à exposition aux eaux de la nappe phréatique et aux eaux usées.

-Sachant que les bétons étudiés sont de la même composition et de mêmes conditions de coulage, les essais mécaniques destructifs et les essais non destructifs effectués sur les éprouvettes en béton dans différents milieux montrent:

1/ Le béton exposé à l'eau de la nappe phréatique de Ouargla a présenté une bonne structure, densité, porosité et une bonne tenue vis-à-vis de la résistance mécanique, par rapport au béton témoin, soit un gain de:

12% concernant la résistance à la compression cela par occupation des vides et contribution à la résistance à la compression.

79% pour la résistance à la traction cela est probablement dû à l'adhérence "cristaux / béton" et à l'obturation des pores du béton.

Les cristaux ramassés à la surface du béton et se trouvant dans ces pores, ont un effet positif sur la résistance et la durabilité du béton.

La nappe phréatique de Ouargla n'est pas agressive pour le béton bien qu'elle augmente sa qualité, cela est grâce aux cristaux se trouvant dans les pores du béton ce qui augmente la résistance mécanique du béton d'un côté et empêche la pénétration des ions agressifs à l'intérieur du béton, d'un autre côté, ce qui donne au béton une durée de vie importante.

2/Le béton exposé aux eaux usées qui renferme (19400 mg/l de SO_4^{-2} et 12780 mg/l de Cl) a montré une mauvaise tenue vis-à-vis des eaux usées de moins de 11% pour la résistance à la compression et 14% pour la résistance à la traction, ce mauvais comportement tant attendue vis-à-vis des eaux usées s'est traduite par la médiocrité de la morphologie, la densité et la structure du béton de 14% par rapport les bétons témoins.

Donc le béton à base de CRS est négativement influé par les eaux usées et positivement influé par les eaux de la nappe phréatique de Ouargla.

L'essai de la coloration à la phénolphthaléine a montré une profondeur de carbonatation de 3cm après seulement 18 mois, ce qui nous pousse à augmenter la couche d'enrobage.

2 Recommandations

D'après l'étude effectuée sur le béton destiné aux ouvrages d'assainissement, nous recommandons de:

- Augmenter le recouvrement des aciers entre 5 et 7 cm.
- Utiliser le ciment sulfaté (CRS) dans les ouvrages en contact avec les eaux de la nappe phréatique c'est-à-dire les ouvrages enterrés.
- Ne pas utiliser le ciment sulfaté (CRS) dans les ouvrages d'assainissement.

- Appliquer, selon le degré de salinité, des couches protectrices en coaltar époxy ou une protection en multicouches croisées de peintures bitumineuses (> 3 couches) de l'extérieur et de l'intérieur [80]

- Casser les points aigus des bâches, regards et cuves par des chanfreins.

En perspectives

Pour la poursuite des travaux de recherche dans ce domaine et pour mieux maîtriser ce phénomène de durabilité des ouvrages en béton armé destinés à l'assainissement des eaux usées notamment dans la cuvette de Ouargla, il y a lieu de:

-Lancer une étude sur l'amélioration du matériau béton afin qu'il résiste mieux aux agents agressifs existant dans les eaux usées, par l'incorporation d'autres matériaux locaux tels que le sable de dunes, le laitier, la pouzzolane.

-Introduire l'étude de la durabilité des armatures dans le béton armé destiné aux ouvrages d'assainissement.

-s'intéresser plus à l'impacte de l'hydrogène sulfuré (H_2S), sur le béton et le béton armé, vue sa présence permanente dans les regards et les conduits d'assainissement.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Conclusion générale et recommandations | 95 |
| 1 Conclusion générale:..... | 95 |
| 2 Recommandations | 96 |
| 3 perspectives..... | 97 |

Bibliographie

- [1] "la durabilité des bétons"; (presse de l'école des ponts et chaussées ; Paris 1992
- [2] ABIMOULOUD.Y, "contribution à l'analyse de l'effet du type et durée de cure sur la qualité du béton en climat chaud", mémoire de magistère, université de Chlef 2004.
- [3].STEOPOE. AL La durabilité du béton, EYROLLES éditeur Parie 1970.
- [4] MACHRI B, "influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydrauliques et génie civil", mémoire de magistère, université de Ouargla 2009.
- [5] ROUVILOISE et BRIGOLE, "Le pays de ouargla" (Sahara Algérienne).
- [6] station pluviométrique de Ouargla "rapport annuel", 2008.
- [7] J DUBIEF, "Le climat du Sahara", tome II fascicule I ; édition Alger ; 1963.
- [8] (ANRH) agence nationale des ressources hydriques; "document technique "
- [9] FRANLAB; "Etude et gestion des ressources en eau du Sahara septentrional", volume I, pour UNESCO, 1972.
- [10] Cornet A; "Données sur l'hydrologie Algérienne, les eaux du crétacé inférieur, le continental dans le Sahara Algérien"; 1952.
- [11] Agence Nationale Des Ressources Hydriques;" Rapport ANRH" 1996.
- [12] LELIEVRE R F, "Assainissement de la cuvette de Ouargla, étude hydrogéologie d'ensemble et première synthèse" ; rapport N°2 1969, Alger.
- [13] MEZOUAR B et SALHI H; "Etude des possibilités de réutilisation des eaux de drainage de la palmeraie de Ouargla" ; PFE ENFSAS 1995.
- [15] ADAM.M "propriétés des bétons"; centre de recherches interuniversitaire sur le béton université SHERBOOK; édition EYROLLES,

Bibliographie

- [16] BARON J, "La Durabilité Des Bétons", Presses De l'École nationale des Ponts et chaussées, 1992.
- [17] EURIN.P; "action of time and environment: durability of construction materials", materials and structures, Paris 1988
- [18] Laboratoire Matière, Pathologie, "La carbonatation" revue 1 p n°2 • Janv./Fev. 2006.
- [19] LEA F and ARNOLD.E, "the chemistry of cement and concrete", 2eme Edition Londre 1956
- [20] VERBECK G.and laboratory studies; "the sulphate resistance of concrete, performance of concrete" A symposium in honor of T. Thorvaldsen, Toronto, 1967, university of Toronto.
- [21] LOCHER F.W., "zur frage des sulfatwiderstandes von huttenzementen" Z.K.G., 1966
- [22] KOLLEK J.J and LUMLEY J.S; "comparative sulfate resistance of SRPG and Portland slag cement", Brighton 1990
- [23] SMOLCZYK.H, "chemical reactions of strong chlorides-solutions with concrete", Proc 5th international symposium on the chemistry of cement; Tokyo 1968.
- [24] SERSALE R, "structure caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes," 7eme congrès international de la chimie des ciments, paris, 1980.
- [25] SOKORA I, and SETTERN N, "effect of mineral fillers and sulfate resistance of Portland cement mortars", 1980.
- [26] ARDEM, "recommandations FNTP, prévention des agressions du béton", 1986.
- [27] SCANLON. J.M, "Concrete durability", Conference edition 1987
- [28] MEHTA P.K, "experience with durability of concrete in marine environment" edition international 1989.
- [29] MOSKVIN V.M ;"concrete and reinforced concrete deterioration and protection" edition Moscow 1980.
- [30] REGOURD M, "chemical durability of concrete" edition Stockholm. 1981.

Bibliographie

- [31] LOCHER F.W, "influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack" Tokyo 1968.
- [32] REGOURD M, "carbonatation accélérée et résistance des ciments aux eaux agressives" Symp international, RILEM sur la carbonatation du béton, 1976
- [33] CEP, "durable concrete structures". CEB design guide, second edition 1989.
- [34] SALOMON M, "l'eau et la résistance chimique du béton, action des sulfates", conseil international de la langue française édition 1987.
- [35] UKRAINCIIK V, "concrete corrosion in a nitrogen fertilizer plant" Philadelphia 1990.
- [36] MALYER.D. "les bétons à hautes performances, caractérisation durabilité, applications", école française du béton, presse de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [37] Université de Sherbrooke GCI 714 – "Durabilité et réparations du béton" 2004
- [38] Durabilité des ouvrages en béton armé
- [39] BAZANT.Z; "diffusion of chloride ions from seawater into concrete" cement and concrete research institute, university of Trondheim; 1978.
- [40] PELTIER.R;"résultats des essais de longue durée de la résistance des ciment à la mer au laboratoire maritime de la ROCHELLE" revue des matériaux N° 680, mai 1973
- [41] Innovation design with emphasis on seismic, wind and environmental loading quality control and innovation in materiel/hot-weather concreting)
- [42] 2009 Dupain R., Lanchon R. et Saint-Arroman J.-C., "Granulats, Sols, Ciments et Bétons – Caractérisation des Matériaux de Génie Civil par les Essais de Laboratoire", Éditions Casteilla, 2ème Édition, Paris, 2000, p. 26 –394.
- [43] Kriker A., "Durabilité du Béton à Base de Laitier", Mémoire de Magister en Génie Civil – ENP d'Alger, 1992.
- [44] – BARON. J. et OLLIVIER J, "Durabilité et réparations du béton", Université de Sherbrooke, 1993
- [45]ARLIGUIE.G et HORNAIN.H; "grandubé, grandeurs associées à la durabilité des bétons", Presses de l'École nationale des Ponts et chaussées, 2007
- [46] activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats bull.des LPC, n°201, 1996

Bibliographie

- [47] VERBECK.G.J. and laboratory studies, " the sulphate resistance of concrete", PCA Research Department Bulletin; 1968
- [48] DOUGLAS.E. "Mortier de ciments au laitier et béton de laitier: caractéristiques de durabilité dans les Matériaux complémentaires en cimentation" CANMET V.M. Malhotra édition 1989
- [49] BROWN G and OATES.D. B."Concrete International" 1983.
- [50] STEOPOE A, "La durabilité du béton", édition eyrolles, paris 1970
- [51] REGOURD M. "Durability, physico-chemical and biological processes related to concrete, Durability of Concrete structures", CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, May 1983.
- [52] rapport du CTC sur l'agressivité des bétons d'infrastructure par les agents chimiques, ref N° 3055/8086/7993/h1, 13 dec 1983
- [53]BG, bureau d'etude suisse; " étude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation" –juillet 2002
- [54] Norme Française XP P 18-303, Août. 1999, "Eau de Gâchage pour Béton", Éditions AFNOR, Paris 1999.
- [55] Clauses Techniques: C.T. 7/75 ", GRAND –DUCHE de Luxembourg, Ministère des Travaux Publics, Commission Permanente de Normalisation des Matériaux de Construction, [en ligne], 2004
- [56] Norme Européenne NF EN 1008, Juil. 2003, "Eau de Gâchage pour Bétons – Spécifications d'Échantillonnage, d'Essai et d'Évaluation de l'Aptitude à l'Emploi, y compris les Eaux des Processus de L'Industrie du Béton, telle que l'Eau de Gâchage pour Béton", Éditions AFNOR, Paris, 2003.
- [57] Norme Européenne NF EN 932-1, Déc. 1996, "Essai pour Déterminer les Propriétés générales des Granulats –Partie 1 : Méthodes d'Échantillonnage ", Éditions AFNOR,Paris, 1996.
- [58] Norme Européenne NF EN 932-2, Août 1999, "Essai pour Déterminer les Propriétés générales des Granulats –Partie 2 : Méthodes de Réduction d'un Échantillon de Laboratoire", Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [59] Norme Européenne NF EN 933-2, Mai 1996, "Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats – Partie 2 : Détermination de la Granularité – Tamis de Contrôle, Dimensions Nominales des Ouvertures ", Éditions AFNOR, Paris, 1996.
- [60] Norme Européenne NF EN 933-1, Déc. 1997, "Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats – Partie 1 : Détermination de la

Bibliographie

Granularité – Analyse Granulométrique par Tamisage ", Éditions AFNOR, Paris, 1997.

[60] Baron J. et Sauterey R., "Le Béton Hydraulique, Connaissance et Pratique ", Presses ENPC, Paris, 1995.

[61] Norme Européenne NF EN 933-1, Déc. 1997, "Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats – Partie 1 : Détermination de la Granularité – Analyse Granulométrique par Tamisage ", Éditions AFNOR, Paris, 1997.

[62] ROZIERE.E et CUSSIGH.F, "méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons"; document élaboré sous la fédération nationale des travaux publics; [63] Yamani L, « cours de construction (1) » Edition OPU, Alger 1993.

[64] Norme Française P 18-597, Déc. 1990, "Granulats –Détermination de la Propreté des sables : Équivalent de Sable à 10 % de Fines ", Éditions AFNOR, Paris, 1990.

[65] Norme Française P 18-555, Déc. 1990, "Granulats – Mesures des Masses Volumiques, Coefficient d’Absorption et Teneur en Eau des Sables"", Éditions AFNOR, Paris, 1990.

[66] Norme Française P 18-576, Déc. 1990, “Granulats –Mesure du Coefficient de Friabilité des Sables """, Éditions AFNOR, Paris, 1990.

[67] Norme Française P 18-554, Déc. 1990, "Granulats – Mesures des Masses Volumiques, de la Porosité, du Coefficient d’Absorption et de la Teneur en Eau des Gravillons et Cailloux ", Éditions AFNOR, Paris, 1990.

[68] Norme Française P 18-591, Sept. 1990, "Granulats –Détermination de la Propreté Superficielle ", Éditions AFNOR, Paris, 1990.

[69] Norme Française P 18-573, Déc. 1990, "Granulats –Essai Los Angeles", Éditions AFNOR, Paris, 1990.

[70] Kedjour N, " Propriétés et Pathologie du Béton ", Editions OPU, Alger, 1993.

[71] Norme Européenne NF EN 12350-2, Déc. 1999, "Essai pour Béton Frais –Partie 2: Essai d’Affaissement ", Éditions AFNOR, Paris, 1999.

[72] Norme Européenne NF EN 12390-1, Oct. 2001, "Essai pour Béton Durci –Partie 1: Forme, Dimensions et autres Exigences relatives aux Éprouvettes et aux Moules ", Éditions AFNOR, Paris, 2001.

[73] Norme Française NF P 18-404, Déc. 1981, "Bétons – Essais d’Etude, de Convenance et de Contrôle –Confection et Conservation des Eprouvettes ", Edition AFNOR, Paris, 1981.

Bibliographie

[74] Norme Européenne NF EN 12390-3, Fév. 2003, "Essai pour Béton Durci –Partie 3 : Résistance à la Compression des Éprouvettes ", Éditions AFNOR, Paris, 2003.

[75] Norme Française NF P 18-407, Déc. 1981, "Bétons –Essai de Flexion ", Éditions AFNOR, Paris, 1981.

[76] Norme Française P 18-418, Déc. 1989, "Béton –Auscultation Sonique, Mesure du Temps de Propagation d'Ondes Soniques dans le Béton", Éditions AFNOR, Paris,1989.

[77] Neville Adam. M., " Propriétés des Bétons ", Éditions Eyrolles, Paris, 2000,

[78] GORISSE.F; "essais et contrôles des bétons" Editions Eyrolles, Paris, 1978-

[79] Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux - Génie Civil Bâtiment - Environnement - Patrimoine Bâti

[80] Bibliographie carbonatation Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM - Durabilité. Des bétons Toulouse - Laboratoire Matériaux de Durabilité des Constructions - Institut national des sciences appliquées – Université Paul Sabatier . Toulouse -Décembre 1997

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I: Généralistes Sur Les Propriétés Climato-Hydrologiques De La Zone De Ouargla Et Sur La Durabilité Du Béton | 5 |
| Partie I: Propriétés Physico-chimiques Des Eaux Et Du Sol De La Ville De Ouargla | 5 |
| I.1 Situation Géographique | 5 |
| I.2 Hydro-Climatologie | 6 |
| I.2.1 Température. | 6 |
| I.2.2 humidités de l'air | 7 |
| I.2.3 Vent | 8 |
| I.2.4 Pluviométrie | 8 |
| I.3 Evaporation Et Evapotranspiration | 8 |
| I.3.1 Evapotranspiration | 9 |
| I.4 Hydrologie | 9 |
| I-4.1 Hydrologie Souterraine | 10 |
| Partie II: Généralités Sur La Durabilité Du Béton | 13 |
| I Définition De La Durabilité..... | 13 |
| I.1 Agents Chimiques | 13 |
| I.1 Processus De Dégradation..... | 13 |
| I.2 Types D'agents Chimiques | 14 |
| I.3 Modes D'action Des Agents Chimiques | 14 |
| I-4 Mécanismes D'interaction Entre Les Agents Agressifs Et Le Béton... | 15 |
| I.5 Dégradation Du Béton | 16 |
| 1 Attaque Par Dioxydes De Carbone | 16 |
| 1.1 Mécanisme De Dégradation du béton | 16 |
| 1.2 Paramètres Influençant Sur La Carbonatation | 17 |
| 1 L'humidité Relative Et La Saturation En Eau | 17 |
| 2 Influence Des Paramètres Relatifs Aux Béton | 17 |
| 3 Influence Des Additions Minérales | 17 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| 4 Influence Des Conditions D'exposition | 18 |
| 2 Attaque par les chlorures | 18 |
| 1- Dégradation Par Echange Ionique..... | 18 |
| 2- Dégradation Par Ecaillage | 19 |
| 2.1 Le Mécanisme D'attaque Et Rôle Des Chlorures..... | 19 |
| 2.1.1 Seuil Critique | 20 |
| 2.1.2 Transport Des Chlorures | 21 |
| 2.1.3 Facteurs Influençant La Corrosion | 22 |
| 1 Influence du temps d'exposition | 22 |
| 2 Influence du rapport E/C | 23 |
| 3 Influence Du Type De Ciment | 24 |
| 4 Influence De La Teneur En Eau | 25 |
| 5 Influence De La Concentration En Oxygène | 25 |
| 6 Influence De La Température | 26 |
| 7 Influence Du Cycle Humidification/Séchage | 26 |
| 8 Influence Du Rapport Cathode/Anode | 26 |
| 9 Influence De La Protection Cathodique | 26 |
| 3 Attaque Par Les Sulfates | 27 |
| 3.1 Forme Et Provenance Des Sulfates | 27 |
| 3.2 Mécanismes De Base | 28 |
| 3.3 Association Des Différents Cations Aux Sulfates Et Leurs Agressivités.... | 29 |
| 3.3.1 Sulfate De Magnésium | 29 |
| 3.3.2 Attaque Par Le Sulfate De Calcium | 30 |
| 3.3.3 Attaque Par Le Sulfate De Sodium | 30 |
| 3.3.4 Attaque Par Le Sulfate De Potassium | 30 |
| 3.3.5 Attaque Par Un Des Sulfates Métalliques | 30 |
| 3.3.6 Attaque Par Formation De La Thaumassite | 32 |
| 3.4 Facteurs Qui Influent Sur La Resistance Aux Sulfates Du Béton..... | 31 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| 3.4.1 Dosage En Ciment | 33 |
| 3.4.2 Quantité De C3A | 31 |
| 3.4.3 Ajouts Minéraux | 31 |
| 4 Attaque Par Le Gaz Hydrogène Sulfure (H ₂ S) | 34 |
| 4.1 Mécanismes de dégradation du béton | 35 |
| Chapitre II: Analyse Physico Chimique De La Nappe Phréatique De Ouargla .. | 38 |
| II.1 Analyse physico-chimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. | 38 |
| II-1-1 Potentiel D'hydrogène | 39 |
| II.1.2 Concentration En Ca ²⁺ | 40 |
| II.1.3 Concentration En Mg ⁺ | 41 |
| II.1.4 Concentration En Na ²⁺ | 42 |
| II.1.5 Concentration En K ²⁺ | 42 |
| II.1.6 Concentration de SO ⁻² ₄ | 43 |
| II.1.7 Concentration Du So ²⁻ ₄ Dans Les Puits Et La Nappe Phréatique | 45 |
| II.1.8 Concentration En Cl ⁻ | 45 |
| II.1.9 Concentration Du Cl ⁻ Dans Les Puits Et La Nappe Phréatique De ouargla | 45 |
| II.1.10 Concentration du HCO ⁻ | 46 |
| II.1.11 Concentration Du HCO ³⁻ dans Les Puits Et La Nappe Phréatique De Ouargla | 47 |
| II.1.12 Concentration du Zn ²⁺ | 48 |
| II.1.13 Concentration de Fe ²⁺ | 48 |
| I.2 Caractérisation Des Eaux Usées | 49 |
| I.2.1 Caractéristiques Des Eaux Usées De La Région | 49 |
| I.2.2 Caractéristiques Physicochimiques..... | 49 |
| I.2.3 Minéralisation Globale | 50 |
| I.2.4 Paramètres De Pollution | 50 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| Chapitre III: Essais Sur Matériaux Et Formulation Du Béton | 51 |
| Partie I: Essais sur les matériaux utilisés | 51 |
| III.1 Caractérisation Des Matériaux | 51 |
| III.1.1 Ciment | 51 |
| III.1.1.1 Analyses Chimiques Du Ciment | 51 |
| III-1.1.2 Propriétés Physiques Du Ciment | 52 |
| III.1.2 Granulats | 52 |
| III.1.2.1 Échantillonnage Des Granulats | 54 |
| III.1.2.2 Analyse Granulométrique Par Tamisage | 54 |
| III.1.2.3 Analyse Granulométrique Du Sable Alluvionnaire..... | 55 |
| III.1.2.4 Analyse Granulométrique Du Gravier Utilise | 57 |
| III.1.2.5 Essai D'équivalent De Sable | 58 |
| III.1.2.6 Essai Au Bleu De Méthylène | 59 |
| III.1.2.7 Détermination De La Masse Volumique Absolue Et Apparente D'un Sable Ou D'un Gravier | 61 |
| III.1.2.7.1 Détermination de la masse volumique absolue d'un sable ou d'un gravier | 61 |
| III.1.2.7.2 Détermination De La Masse Volumique Apparente D'un Sable Ou D'un Gravier | 62 |
| III.1.2.8 Coefficient D'absorption De Sable | 62 |
| III.1.2.9 Analyse Chimique | 63 |
| III.1.2.10 Friabilité Des Sables | 67 |
| III.1.1.2.10 Porosité Des Gravillons | 67 |
| III.1.1.2.11 Propreté superficielle | 67 |
| III.1.2.11 Los Angeles | 68 |
| III.1.3 Eau De Gâchage | 68 |
| Partie II: Formulation De Béton | 69 |
| III.2 Formulation De Béton | 69 |
| III Introduction | 69 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| III.2.1 Principe De La Méthode | 69 |
| III.2.2 Détermination De La Quantité De L'eau De Gâchage | 70 |
| III.2.3 Détermination De Volume Absolu Des Agrégats Secs | 71 |
| III.2.4 Détermination de pourcentage de ciment | 71 |
| III.2.5 Détermination Des Pourcentages Des Agrégats | 71 |
| III.2.6 Affaissement Au Cône D'Abrams | 72 |
| III.3 Confection Et Cure Des Éprouvettes | 72 |
| III.3.1 Confection Des Éprouvettes | 73 |
| III.3.2 Conservation Des Éprouvettes | 74 |
| III.3.3 Constatations Avant Ecrasement Des Eprouvettes | 76 |
| Chapitre IV: Essais Et Résultats Sur Le Béton Durci..... | 77 |
| IV-1 Essais Effectués Sur Les Éprouvettes | 77 |
| IV .1.1 Essai De Résistance A La Compression (Rc)..... | 77 |
| IV.1. 2 Essai De Résistance A La Traction Par Flexion..... | 81 |
| IV.1.3 Essai D'auscultation Dynamique. | 85 |
| IV.1.4 Essai D'absorption Capillaire | 86 |
| IV.1.5 Mesure De La Carbonatation..... | 88 |
| IV.1.6 Analyses Chimiques..... | 89 |
| A- Analyses Chimiques Des Cristaux Prélevés A La Surface Des Éprouvettes Conservées Dans La Nappe Phréatique..... | 89 |
| B- Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans La Nappe Phréatique..... | 90 |
| C- Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans Dans Les Eaux Usées..... | 90 |
| IV.2 Conclusion..... | 91 |
| IV.2.1 Essais Mécaniques..... | 93 |
| IV.2.1.1 Compression..... | 91 |
| A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique..... | 91 |
| B- Béton Exposé Aux Eaux Usées..... | 92 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| IV.2.1.2 Traction. | 92 |
| A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique..... | 92 |
| B- Béton Exposé Aux Eaux Usées | 92 |
| IV.2.2 Essais De Durabilité | 93 |
| IV.2.2.1 Absorption Capillaire..... | 93 |
| A- Béton Exposé Aux Eaux De La Nappe Phréatique | 93 |
| B- Béton Exposé Aux Eaux Usées. | 93 |
| IV.2.3 Analyses Chimiques. | 93 |
| A- Analyses Chimiques Des Cristaux..... | 93 |
| B- Analyses Chimiques De La Peau Du Béton | 94 |
| Conclusion générale et recommandations..... | 95 |
| 1 Conclusion générale..... | 95 |
| 2 Recommandations | 96 |
| 3 perspectives..... | 97 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure (I-1): Températures moyennes mensuelles en (C°) entre 1988-2008..... | 6 |
| Figure (I-2): Températures Extrêmes Et Ecart (1988-2008) en (C°)..... | 6 |
| Figure (I-3): Variations de l'humidité moyenne mensuelle en (%) | 8 |
| Figure (I-4): Vitesse moyenne mensuelle du vent en (m/s)..... | 7 |
| Figure (I-5): Hauteurs moyennes mensuelles de la précipitation..... | 8 |
| Figure (I-6): Evaporation Mensuelle Moyenne (1990-2006)..... | 9 |
| Figure (I-7) : Coupe hydrogéologique transversale du "CI" | 11 |
| Figure (I-8): Coupe hydrogéologique transversale du "CT" | 12 |
| Figure (I -9): phases du processus de corrosion des armatures..... | 20 |
| Figure (I-10): taux de pénétration des chlorure dans un béton avec E/C = 0.4..... | 23 |
| Figure (I-11): Effet du rapport E/C sur le taux de pénétration des chlorures après deux ans d'exposition ... | 31 |
| Figure (I-12): Effet du type de ciment sur la pénétration des chlorures après six mois exposition | 32 |
| Figure (I-13): Effet du type de ciment sur la distribution de la taille des pores..... | 25 |
| Figure (I-14): Effet de la protection cathodique sur la pénétration des chlorures après douze mois d'exposition | 26 |
| Figure (I-15): Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton | 31 |
| Figure (I-16) - Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de Laitier..... | 32 |
| Figure (I-17): Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de..... | 33 |
| Figure (I-18): mécanisme d'attaque biochimique..... | 35 |
| Figure (II-1): pH des eaux de la nappe phréatique dans différentes zones dans la cuvette de Ouargla | 40 |
| Figure (II-2) : Concentration en Ca ⁺⁺ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 40 |
| Figure (II-3): Concentration en Mg ⁺⁺ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 41 |
| Figure (II-4): Concentration en Na ²⁺ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 42 |
| Figure (II-5): Concentration en K ⁺⁺ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 42 |
| Figure (II-6): la concentration en SO ₄ ⁻² dans les eaux de la nappe..... | 43 |
| Figure (II-8): Concentration en Cl ⁻ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 46 |
| Figure (II-9): Concentration en HCO ⁻ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 48 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure (II-10): Concentration en Zn^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla | 48 |
| Figure (II-11): concentration en Fe^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla..... | 50 |
| Figure (III-1): Courbes Granulométriques Des Granulats utilisés..... | 57 |
| Figure (IV-1): Résistance A La Compression Des Eprovettes Témoins..... | 78 |
| Figure (IV-2): Resistance A La Compression Des Eprovettes Conservées Dans Les Eaux Usées..... | 78 |
| Figure (IV-3): Histogramme Présentant Les Résultats De Resistance A La Compression Des Eprovettes Témoins Et Celles conservées Dans Les Eaux Usées..... | 79 |
| Figure (IV-4): Résistance A La Compression Des Eprovettes plongées Dans La Nappe Phréatique De Ouargla (Said Otba)..... | 79 |
| Figure (IV-5): Histogramme Présentant Les Résultats De Resistance A La Compression Des Eprovettes Témoins Et Celles Plongées Dans La Nappe Phréatique..... | 80 |
| Figure (IV-6): Juxtaposition des résistances à la compression dans différents milieux..... | 80 |
| Figure (IV-7): Dispositif Pour L'essai De Resistance A La Flexion (4 points)..... | 81 |
| Figure (IV-8): Résistance à la traction des éprovettes témoins..... | 82 |
| Figure (IV-9): Resistance A La Traction Des Eprovettes Conservées Dans Les Eaux Usées..... | 82 |
| Figure (IV-10): Histogramme Présentant La Resistance A La Traction Des Éprovettes Témoins Et Celles Conservées Dans Les Eaux Usées..... | 83 |
| Figure (IV-11): Resistance A La Traction Des Eprovettes Plongées Dans La Nappe Phréatique De Ouargla (Said Otba)..... | 83 |
| Figure (IV-12): Resistance A La Traction Des Eprovettes Témoins Et Celles De La Nappe Phréatique De Ouargla..... | 84 |
| Figure (IV-13): Juxtaposition des résistances à la traction des différents milieux..... | 84 |
| Figure (IV-14): Juxtaposition De la Vitesse Du Son des Différents Milieux..... | 86 |
| Figure (IV-15): Histogramme Présentant L'Absorption Capillaire Des Eprovettes Dans Différents Milieux (témoins, nappe phréatique et eaux usées)..... | 87 |

| | |
|--|----|
| Tableau (I-1): Longueurs et montants réservées depuis 2002 jusqu'à 2008 pour la rénovation des réseaux d'assainissement à Ouargla..... | 2 |
| Tableau (I-2): Présentation de quelques tronçons rénovés à Ouargla..... | 3 |
| Tableau (II-1): Découpage utile de la zone d'étude. | 39 |
| Tableau (II-2) : Concentration du SO_4^{2-} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla..... | 44 |
| Tableau (II-3) : Concentration du CL^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla..... | 45 |
| Tableau (II-4): Concentration du HCO_3^{3-} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla..... | 47 |
| Tableau (II-5): Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques..... | 49 |
| Tableau (II-6): Résultats d'analyse des paramètres minéralisation globale..... | 50 |
| Tableau (II-7): Résultats d'analyse des paramètres de pollution..... | 50 |
| Tableau (III-1): Résultats Des Analyses Chimiques Du Ciment CRS..... | 51 |
| Tableau (III-2): Résultats Des Analyses Physiques Du Ciment CRS..... | 52 |
| Tableau (III-3): Essais Effectués Sur Le Sable Et Le Gravier..... | 53 |
| Tableau (III-4) : Analyse Granulométrique Du Sable Alluvionnaire..... | 55 |
| Tableau (III-5) : La Granulométrie Du Gravier Utilisé..... | 56 |
| Tableau (III-7) : Masse volumique apparente et Absolue des granulats utilisés..... | 62 |
| Tableau (III-9): Valeurs de A. | 70 |
| Tableau (III-10) : La variation du coefficient K. | 71 |
| Tableau (III-11) : Pourcentages massique des agrégats..... | 72 |
| Tableau (IV-1): profondeur de carbonatation..... | 88 |
| Tableau (IV-2): Résultats Des Analyses Chimiques Des Cristaux..... | 89 |
| Tableau (IV-3): Résultats Des Analyses Chimiques De La Peau Du Béton Prélevé d'une Éprouvettes Conservées Dans La Nappe Phréatique:..... | 90 |
| Tableau (IV-4): Résultats Des Analyses Chimiques Du Béton Prélevé d'une Éprouvette Conservée Dans Les Eaux Usées..... | 90 |