

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**Mémoire présenté par :
Saida BOUALLEG**

**En vue de l'obtention du diplôme de
MAGISTER
Option : MATERIAUX**

THEME
**Effet des milieux agressifs sur les
caractéristiques de durabilité des bétons et
des matrices cimentaires**

Mémoire soutenu le : 28 / 09 / 2004

devant la commission d'examen composée de :

Président	:	M . KHEMISSA	Maître de conférence	U . M'SILA
Rapporteur	:	M . BENCHEIKH	Maître de conférence	U . M'SILA
Examineur	:	Z . BOUDAOUDE	Maître de conférence	U . M'SILA
Examineur	:	M . BIBI	Maître de conférence	U . M'SILA
Examineur	:	A . NACERI	M . A . C . C	U . M'SILA

I / INTRODUCTION

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité.

La première est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion. La seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration [1].

De nombreuses structures de génie civil sont situées dans des environnements plus au moins agressifs. Plusieurs modes d'altération sont responsables, au cours du temps, de la perte d'une partie de leur fonction (mécanique, étanchéité...).

Un premier enjeu de la recherche en génie civil est l'évaluation de la durée de vie résiduelle de ces ouvrages des centres de durabilité et l'obligation qu'auront de plus en plus.

Les altérations du béton sont variées :

- L'altération par des eaux agressives des structures en béton.
- L'altération par corrosion des aciers des structures en béton armé.

Les eaux agressives entraînent une altération par dissolution des hydrates de la matrice cimentaire. Celle-ci augmente localement la porosité et affecte les propriétés de transfert et mécaniques [2].

L'intensité de dégradation du béton est déterminée par l'interaction des facteurs suivants [3] :

- Nature, concentration et durée d'action des agents agressifs.
- Vitesse de transport des produits chimiques et de démolition (mode de transport, écoulement sous pression, aspiration capillaire, diffusion).
- Vitesse de réaction et température.
- Solubilité dans l'eau des composants du béton transformés ou détruits.
- Effets mécaniques additionnels (corrosion des fissures liées aux tensions).
- Propriétés de la structure poreuse du béton.

Une grande partie des problèmes de durabilité rencontrés dans les régions chaudes (région de M'sila) résulte de la présence des chlorures et des sulfates (dans le sol ou dans les agrégats...) avec l'aggravation additionnelle de l'effet du climat chaud et aride. Ce manque de durabilité a directement une influence sur la structure de la construction et peut conduire à la détérioration totale d'un grand nombre des constructions.

2/ OBJECTIF :

L'objectif principal de cette étude est de présenter les expérimentations primordiales qui seront utilisés pour évaluer la durabilité des bétons liée à la nature de son environnement. Le processus de détérioration est complexe et fait intervenir un nombre important de paramètres.

Les caractéristiques de deux types de ciment sont évaluées en fonction du degré d'agressivité du milieu en considérant comme moyen de caractérisation : les résistances mécaniques (compression, flexion), la porosité, la perméabilité à l'eau, la profondeur de carbonatation (essai de phénophtaléine), l'analyse par le diffractométrie X ainsi que l'influence des adjuvants superplastifiants. En plus, cette étude prend en compte la caractérisation des matériaux cimentaires (la pâte, le mortier et le béton).

Des éprouvettes seront exposées aux différents milieux de conservation chimiquement agressifs : eau potable, sels (chlorure de sodium, eau de mer artificielle), acide sulfurique H_2SO_4 , nitrate d'ammonium $((NH_4)NO_3)$, sulfates $(MgSO_4+Na_2SO_4), CaSO_4, (Al_2O_3)SO_4$, sans renouvellement des solution, ni contrôle du PH des solutions.

Les paramètres pris en compte sont :

- 1- l'âge.
- 2- la nature et degrés d'agressivité du milieu de conservation.
- 3- les types de ciments (pouzzolane, calcaire).
- 4- L'incorporation de deux type d'adjuvant fluidifiant.

Il s'agit donc de déterminer les critères à imposer sur ces paramètres, afin d'aboutir à la confection d'un béton à base de matériaux locaux, résistant à la dégradation chimique.

3/ LA STRUCTURE DU MEMOIRE :

Ce présent mémoire est composé de quatre chapitres

-Le premier chapitre consiste en un aperçu, global sur les agents agressifs, les essais utilisés pour l'évaluation du phénomène d'agressivité et sa relation avec la durabilité.

- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans l'expérimentation.

-La technique expérimentale est détaillée dans le chapitre trois avec une présentation des dispositifs d'essais.

-Enfin, dans le quatrième chapitre nous présentons une analyse des résultats obtenus et une conclusion générale.

I-1/ INTRODUCTION :

Le comportement chimique des bétons vis-à-vis des milieux extérieurs dépend de plusieurs facteurs, qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler (composition des différents constituants (ciment, granulats, technique de mise en œuvre, âge de béton, conditions climatique, nature des agents agressifs, qu'il soit minéral ou biologique

Cette approche est celle de la physiologie que celle de la pathologie, c'est à dire d'analyser et comprendre les mécanismes de dégradation, mais aussi les mécanismes de défense du ciment hydraté face à l'agression chimique [7].

I.2 /NOTION SUR LA DURABILITE

La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons [1].

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation – c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité [5]. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

La perméabilité est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte la figure I.1. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion.

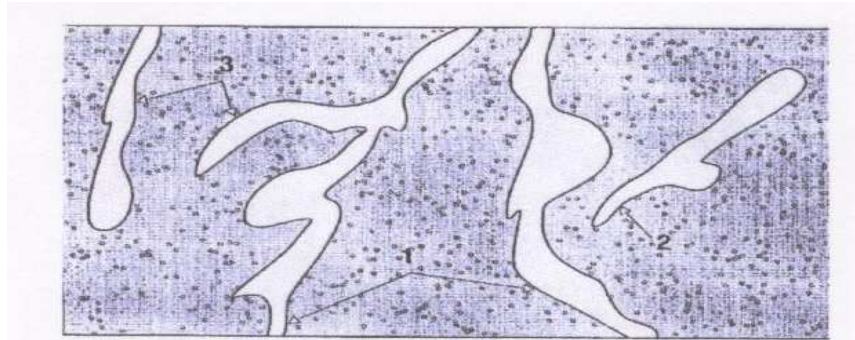


Fig. (I.1) : Représentation schématique d'un solide poreux

Les plastifiants et les additions minérales fournissent une grande variété de moyens pour faire des bétons ayant un niveau de résistance à la compression fixé. Les additions minérales peuvent aussi modifier la nature et la texture des hydrates formés, le cas des cendres volantes, le laitier, la fumée de silice. Un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et des capillaires, et donc, d'une réduction de la perméabilité. Cela peut apporter en soi un gain important vis-à-vis la durabilité [1].

I.3 / SEVERITE ET INTERACTION DES AGENTS AGRESSIFS

Les altérations observées sont d'ordre chimique ou physique. Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories :

- Les gaz, d'origine naturelle où résultent de pollutions atmosphérique.
- Les 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.
- Les solides essentiellement des sols et déchets d'origines diverses.
- Les milieux biologiques, fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies [1].

L'agression chimique entraîne presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et aluminates de chaux hydratés ne sont pas négligeables. Si les produits de réactions sont solubles, la matrice devient de plus en plus ouverte, la perméabilité augmente et la résistance de surface chimique diminue progressivement.

Au contraire, si les produits de réactions sont insolubles, deux cas peuvent se présenter suivant que la nouvelle phase est ou non expansive. Si les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, ils comblent progressivement la porosité des bétons et ainsi diminuent la perméabilité et augmentent la durabilité.

Lorsque la nouvelle formation est expansive, elle induit des pressions plus élevées que la résistance à la rupture [4].

I.4) / CRITERES GENERAUX DE DURABILITE DANS LES MILIEUX AGRESSIFS :

Que ce soit pour la carbonatation, la résistance au gel ou à la diffusion des ions chlorure, les limitations portant sur ces trois critères servent à limiter la capacité de transfert du béton, exprimée par un coefficient de perméabilité ou de diffusion [10].

I.4-1/ La résistance

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

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

Une forte décroissance de la résistance mécanique est observée avec l'augmentation de la porosité. En génie civil, ceci est traduit par « l'obtention d'un béton très compact passe la réalisation d'un béton mécaniquement très résistant ». Ces deux grandeurs sont intimement liées, la figure I.2 illustre cette liaison.

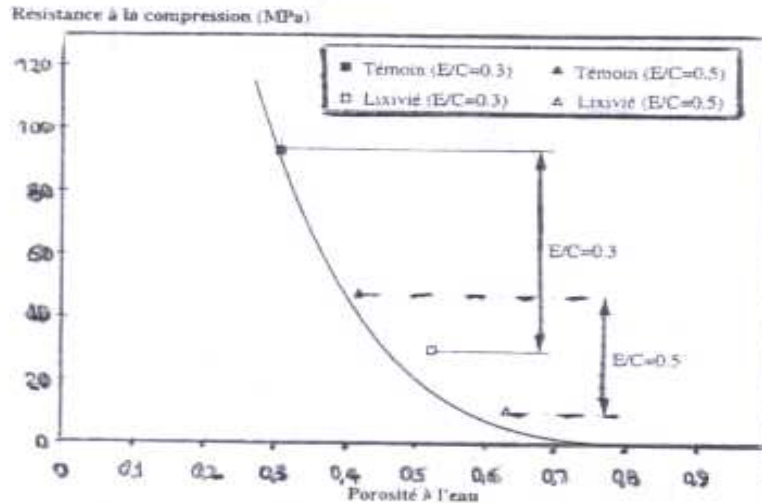


Fig.(I.2) :Evolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de la porosité pour des pâtes pures saines et dégradées.

I.4-2/ Le rapport E /C

La résistance mécanique dépend directement du rapport E/C, et qui est même en relation directe avec la porosité [10]. Il faut toutefois être prudent quant au rôle de ce paramètre sur les résistances à court terme, c'est-à-dire, que la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. C'est pour cela que le rapport E/C est considéré comme un critère général de durabilité.

I.4-3 /La nature de ciment et le dosage :

L'influence du dosage en ciment est inversement proportionnelle à celle du dosage en eau. La résistance en béton augmente avec le dosage en ciment. C'est surtout la classe de ciment qui importe plutôt que sa nature minéralogique.

Les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives au frottement, aux chocs thermiques, au gonflement ou au retrait. Elles entraînent l'érosion et la fissuration du béton (Figure I-3).

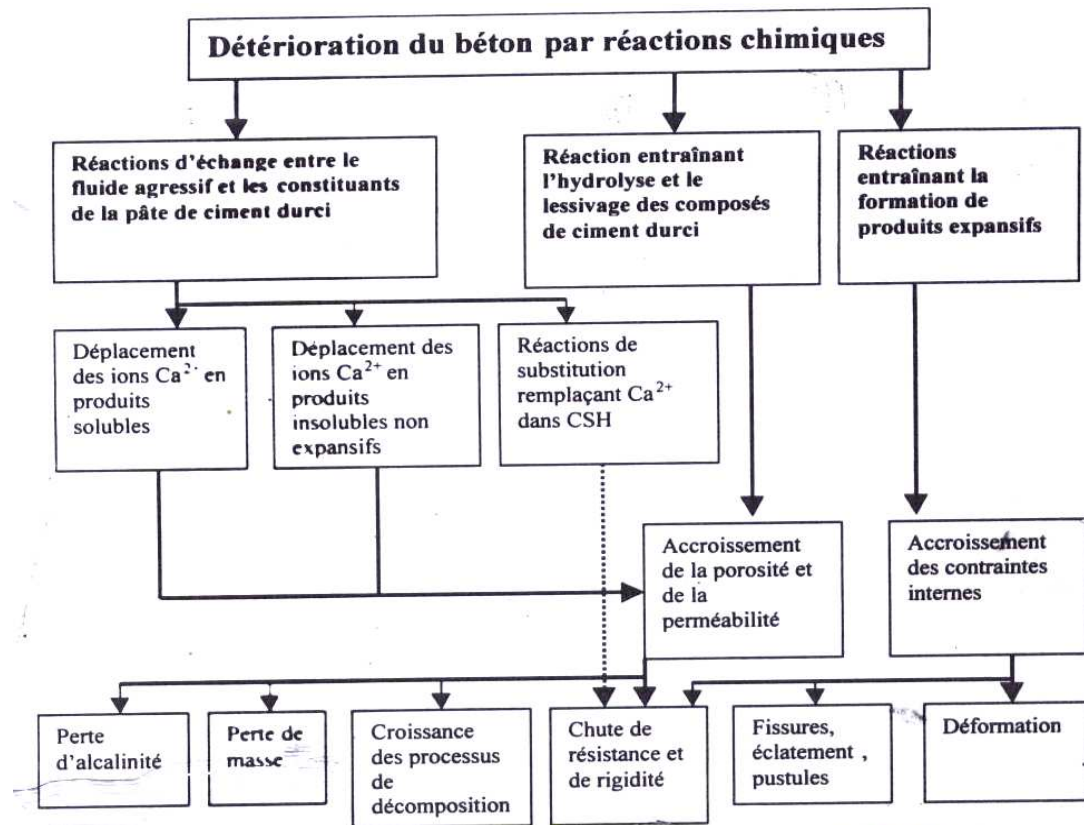


Fig.(1.3) Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [41].

I-5/LES MECANISMES D'ALTERATION DES BETONS

Les altérations sont deux types :

- **Erosion** : qui entraîne une partie du liant.
- **Gonflement** : et éventuellement fissuration par formation de composés expansifs [12].

Les principales causes d'altérations des matériaux cimentaires sont classées en identifiant les processus et leurs conséquences tableau I.1.

Tableau (1.1) : Processus généraux d'altération chimique des liants hydrauliques, Causes et conséquences [9].

Processus d'altération chimiques	Facteurs	A cours et moyen à long terme	
		Termes	
Hydrolyse Dissolution Lixiviation des composants de la pâte de ciments.	-PH des solutions au contact. -Dioxyde de carbone (attaque des acides)	Chute de PH du milieu interstitiel, décalcification Accroissement de la porosité et de la perméabilité.	Perte de cohésion de résistance mécanique.
Réactions solide/solution, entre le fluide et la pâte de ciment.	-Réaction avec des anions formant des sels de calcium. -Réactions formant des produits insolubles expansifs (sulfate, réaction alcali silice, corrosion de fer).	-Formation des composés solubles. -Décalcification accroissement de la porosité, de la perméabilité. -Formation de composé insoluble. -Augmentation des contraintes mécaniques internes	-Perte de cohésion de résistance mécanique. -Colmatage. -Fissuration. -Fracturation. -Eclatement.

Les mécanismes d'altérations du béton peuvent être dues à des agents extérieures (solutions acides, sols gypseux vis-à-vis de la pâte de ciment ou à des agents internes (hydratation de CaO et MgO) libre dans le ciment, alcali réaction, solidification de l'eau sous l'action du gel.

I-5.1/LA DISSOLUTION ET L'EROSION :

De tous les constituants hydratés du ciment, la chaux est le plus soluble, elle peut être dissoute par attaque superficielle ou par perlocation à travers le béton. La chaux qui émerge la structure par des fissures, forme des efflorescences blanches de Ca (OH)₂ ou de CaCO₃, l'eau dissout Ca(OH)₂, quelle acide, saline ou pure [4].

La dissolution de la chaux peut s'accompagner par la formation de composé nouveau, s'ils sont soluble, les sels formés diminuent la résistance du béton, s'ils sont insolubles ils peuvent au contraire se substituer à la chaux et former une couche protectrice.

Le processus principal résultant de l'hydrolyse des ciments hydratés est la décalcification du matériau. D'après [9] relèvent un accroissement de la quantité de calcium lixivié avec le temps figure I.4. La lixiviation du calcium ne possède pas d'un régime de lixiviation simple. « Deux régimes de lixiviation » distincts sont observés : une croissance forte et régulière de la concentration en calcium dans les lixiviats tant que le pH reste stable à 12.6, pH tomponné par la dissolution de la portlandite ; une croissance faible de la quantité de calcium lixiviée dans le temps correspondant à la dissolution des sulfo-aluminates et /ou à la décalcification des CHS, conjointement à la baisse du pH jusqu'à une valeur voisine de 11.5.

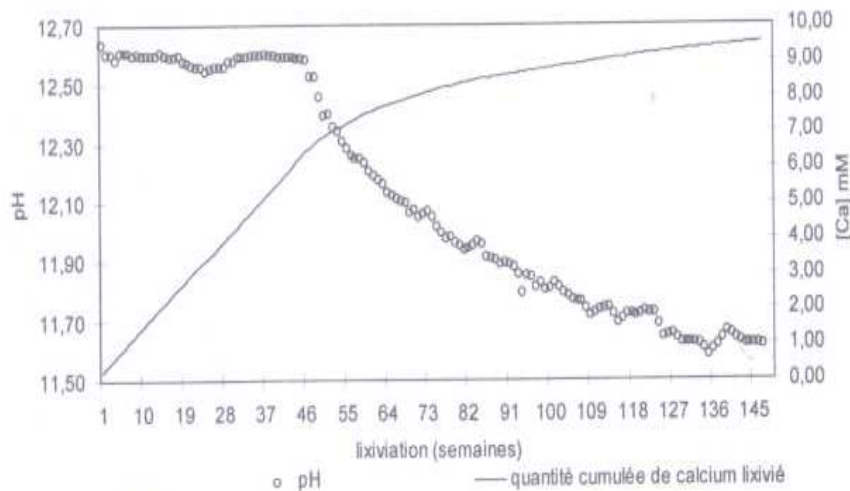


Fig. (1.4) : Evolution de PH et de la quantité de calcium en solution lors de la lixiviation d'un ciment hydraté [34].

Une des conséquences de la dissolution des phases du ciment hydraté est la forte augmentation de la porosité du matériau. Cette augmentation de porosité modifie l'accessibilité du cœur du matériau aux solutions externes et donc susceptible de simplifier les phénomènes de dégradation.

I.5-1-1/Action des acides :

***1^{er} cas**

la chaux passe en solution sans réagir.

Ex : eau pure, de caractère amphotère H^+ , OH^-
 la pâte de ciment se décalcifie par dissolution de la chaux des hydrates ($Ca(OH)_2$, C-S-H, C_4AH_{13})
 le stade ultime de la dégradation est formation de gels $SiO_2.nH_2O$, $Al_2O_3.nH_2O$

***2^{eme} cas**

la chaux passe en solution et réagit.

Il se forme $\xrightarrow{\text{Erosion}}$ Un composé nouveau
 - **soit une couche protectrice par formation d'un sel insoluble**
 ex : H_2CO_3 entraîne la précipitation de la $CaCO_3$.
 l'action particulière des ions CO_2 sera traitée dans le tableaux «I-2»
 - **soit une couche non protectrice par formation d'un sel soluble.**

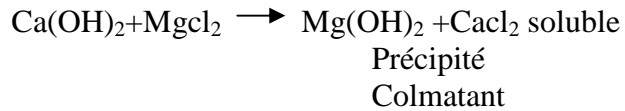
Ex : HCl et HNO_3 entraînent la formation de $CaCl_2$ et $Ca(NO_3)_2$

$\xrightarrow{\text{Erosion}}$
 L'action de H_2SO_4 conduit à la formation de sulfate de calcium peu soluble mais les réaction secondaires avec le constituant du ciment sont très importants et justifiant des études séparées

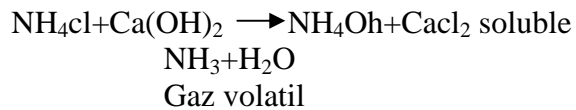
I.5-1-2/ Action des sels :

Dissolution → **formation**
De → **d'un**
La chaux → **composition**
nouveau
 par réaction
 D'échange
 ionique

.soit produit cohérent dans Ca(OH)₂
 ex : action de cl₂ substitution Mg²⁺ → Ca²⁺



. soit produit non cohérent dans Ca(OH)₂
 ex : action de NH₄cl₃ substitution 2NH⁴⁺ Ca²⁺ →



EROSION

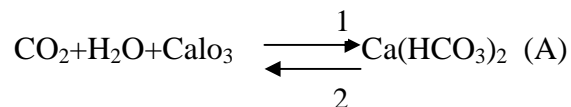
Ce schéma s'applique aux chlorures, sulfates et nitrates. Le sel formé par la substitution ionique peut réagir avec certaines constitutions du ciment comme les aluminates (formation de chloroaluminate par action de CaCl₂, sufloaluminate par action de CaSO₄). Le trisulfoluminate de calcium ou ettringite est expansif et entraîne le gonflement et l'éclatement du béton. Voir tableau «I-4»

I.5-1-3/ Action de l'acide carbonique :

L'acide carbonique H₂CO₃ peut être considéré comme la solution aqueuse de CO₂(BIC 2Ok, 1972).

CO₂ dans l'eau, existe sous différents états :

CO₂total {
 -CO₂ libre (gaz)
 - CO₂ semi lié chimiquement : Ca(HCO₃)₂ soluble
 -CO₂ lié chimiquement : CaCO₃insoluble,
 suivant la réaction d'équilibre :



<p>Si CO₂ libre est en défaut rapport à : déplacement de l'équilibre dans de sens 2 ; précipitation de CaCO₃ insoluble.</p>	<p>.Si CO₂ libre est en excès par rapport à CaCO₃ 1-déplacement de l'équilibre Dans le sens 1 → formation de Ca(HCO₃)₂ soluble 2-attaque de Ca(OH)₂ du ciment $CO_2 + H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$ 3-Transformation CaCO₃(cas 1) Eau agressive EROSION</p>
<p>tout li CO₂ libre n'est pas agressif . CO₂ équilibrant la réaction (A) CO₂ libre CO₂ en excès par rapport au CO₂ équilibrant : CO₂ agressif.</p>	

I.5-2/LE GONFLEMENT ET LES ECLATEMENTS :

L'action des eaux souterraines sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment la figure I.5. La réaction de base est la formation d'ettringite ou sel de Condlot (C₃A, CASO₄)₃₂ [4].

Nature du gonflement Gonflement dus aux :	Augmentation du volume
Sulfates	8 x
Magnésium	2.2 x
Alcalins	> 2 x
Calcaire	1.7 x

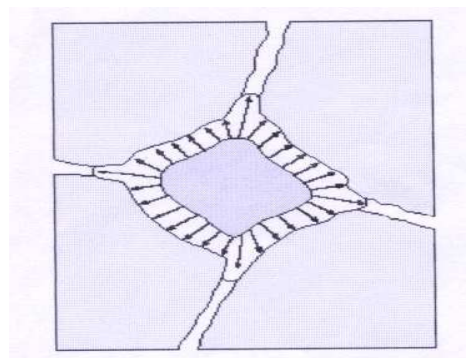
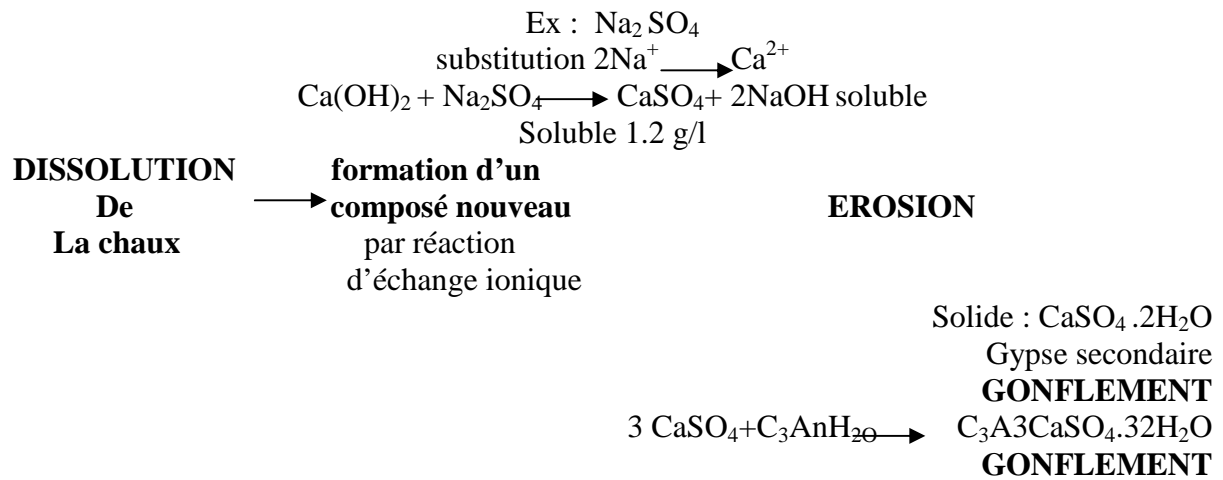


Fig.(1.5) :Gonflement au sein de la pâte de ciment durcie (Nature du gonflement : augmentation du volume [14].

Action des sulfates [4]



I.5-3/PROCESSUS D'ATTAQUE SULFATIQUE:

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle la figure I.6 dont ils présentent le risque majeur d'agression chimique.

Pour le béton « La fuma » écrivait en 1942, l'action du sulfate de chaux est connue depuis longtemps, elle à été signalée en 1887, par Conclot qu'il avait constatée sur les mortier des fortifications, partout ou' il se trouvaient en contact avec les eaux gypseuses [19].

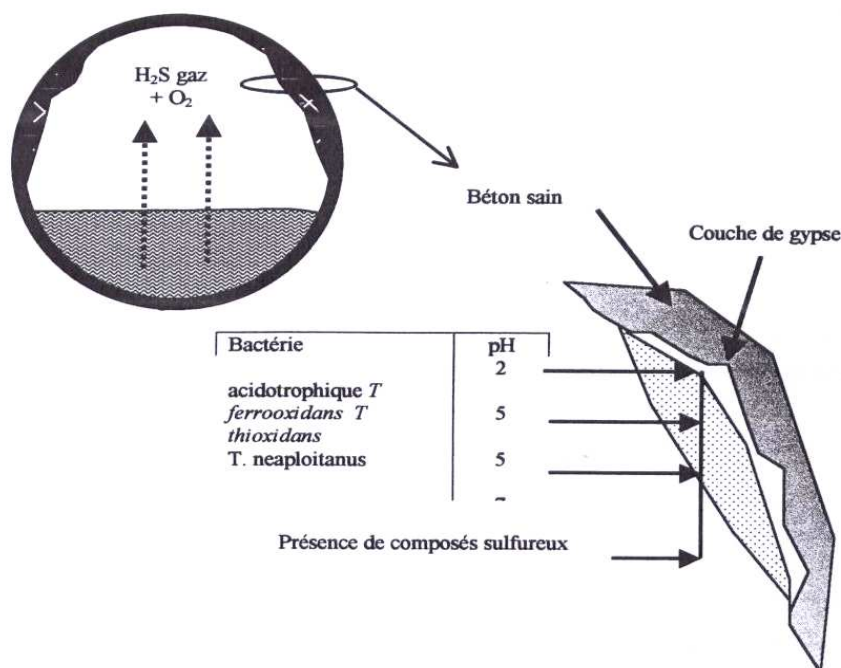


Fig. (1.6) la corrosion sulfo bactérienne d'un égout [39].

Les causes et les effets de l'attaque sur la face interne s'expliquent par les phénomènes suivants :

- Dans les parties anaérobies du réseau d'égouts, les bactéries desulphovibrio desulfuricans réduisant les sulfates dans l'eau usée pour former l'hydrogène sulfuré (H_2S).
- Dans la partie aérobie du réseau d'égouts, l'hydrogène sulfuré se dégage de l'eau usée.
- L'hydrogène sulfuré s'oxyde par l'intermédiaire d'une autre famille de bactéries aérobies et donne H_2SO_4 .
- A la fin de ce processus, le pH est de l'ordre de 2 et une couche de gypse se forme à la surface du béton ; ce gypse est normalement le produit de la réaction chimique entre l'acide sulfurique et la portlandite dans le mortier [39].



Fig. (1.7) : Des cas pathologiques rencontrés : l'influence des eaux agressifs en contact
La figure I.7 l'attaque sulfatique des pieux et pont, le premier élément de la construction qui en contacte des eaux agressives. Elle présente un état avancé.

I.5-3-1/Processus d'attaque par les sulfates internes :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive [19]. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

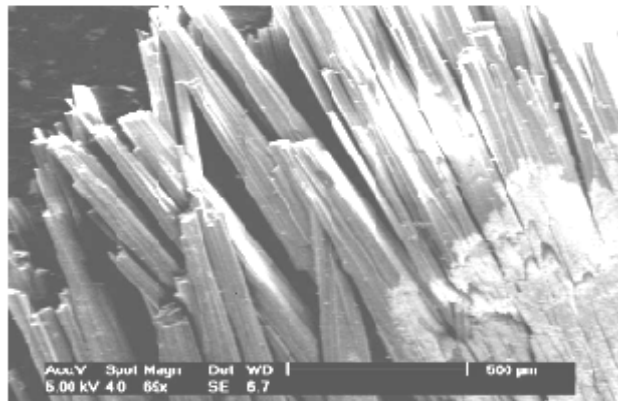


Fig.(1.8) : La formation de l'ettringite secondaire [21] .

1. Formation de gypse dit secondaire la figure I.8 par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.
2. Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :
 - Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre.
 - $C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 24-26H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{30-32}$.
 - Soit à partir de l'aluminate tetracalcique hydraté C_3AH13 ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3ASO_4H_{12}$ [1].

L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. Ces effets sont dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates la figure I.9.

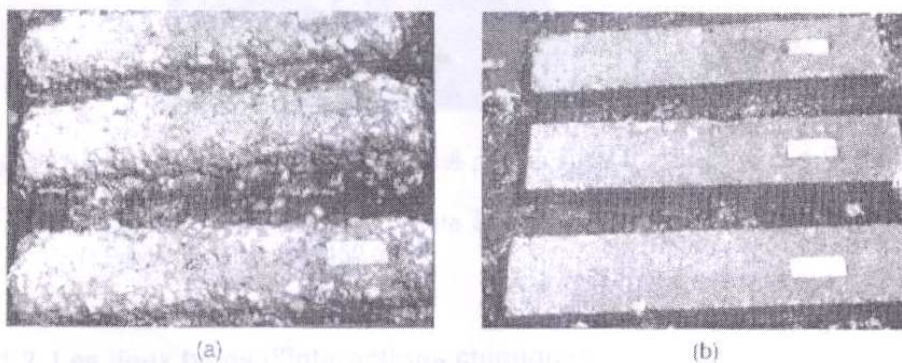


Fig.(1.9) : Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates [3].

a) E/C=0.5

b) E/C=0.39

I.5-3-2/Processus d'attaque par les sulfates externes :

Au travers du développement qui suit, ce type de dégradation sera abordée autant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation

Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive [9].
- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , $\text{NH}_4\dots$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$).
- Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite.
- Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- Destruction plus au moins complète du béton.
- D'après [21] qui propose d'après son étude un mécanisme d'attaque sulfatique, en utilisant les résultats de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et sulfate de magnésium (MgSO_4).

D'après [21] le mécanisme proposé dans la figure I.10, l'attaque due à la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) progresse par phase. L'expansion d'une peau externe de spécimen mène à la formation des fissures dans la région intérieure, qui chimiquement est inchangé avec immersion soutenue. La surface de la peau désagrégée et la solution de sulfate sont capables de réagir, avec les produits de l'hydratation dans la zone intérieure, à la disposition d'attaquer les produits dans cette zone.

-Maintenant cette zone devient la zone en expansion en menant des fissures plus loin à l'intérieur du mortier.

Etape1 : l'état initial de processus, juste après immersion, la solution à pour valeur de PH égale à 6-8.

Etape2 : Déposition du gypse et ettringite sur la surface. Changement de PH de la solution environnante (PH = 11-12).

Etape3 : La force de compression résultante est produite sur la surface pendant que la charge du mortier est soumise à une force d'extension. Cela cause des fissures qui apparaissent à l'intérieur du mortier.

Etape4 : La zone de surface se détériore à cause de la pénétration de la solution les zones intérieures.

Etape5 : La nouvelle région à l'intérieure du mortier devient la zone de dépôt du gypse. Cette région s'étend en causant de nouvelles fissures dans les zones intérieures de l'éprouvette en mortier.

Etape6 : Il y a formation de trois zones de dégradation de surface :

- Une zone de déposition des produits de l'attaque à l'intérieure de la zone de fissures qui est chimiquement inchangé.
- Une zone de surface dégradée ainsi que la formation du thaumasite.

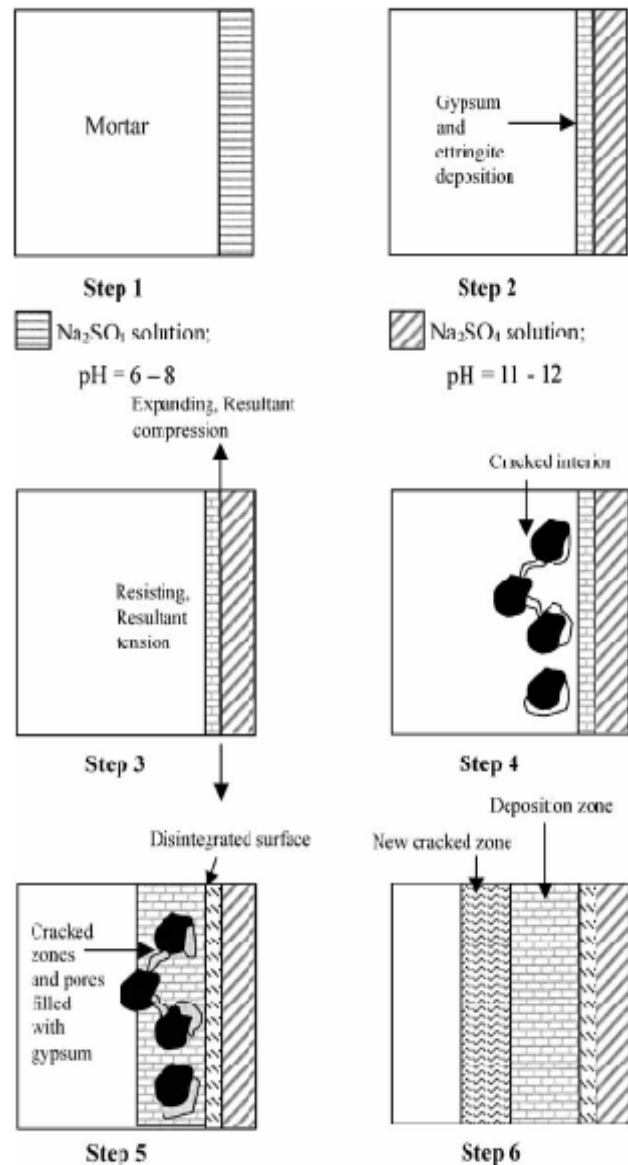


Fig.(1.10) : Le mécanisme d'attaque par le sulfate de sodium D'après[21].

- Dans le cas de solution de sulfate de magnésium ($MgSO_4$), la figure I.11 une formation d'une couche de brucite est observée sur la surface de l'éprouvette de mortier lors de la pénétration de sulfate. Il se produit alors par diffusion, à travers cette couche de surface, quand l'attaque progresse, la formation des produits de l'attaque tel que le gypse et l'ettringite dans la pâte sous cette surface.

Ceci mène à une expansion et une perte de la force. L'expansion cause des fissures dans le brucite, en se déposant en couche sur la surface. Cela laisse le mortier accessible à diriger l'attaque par la solution $MgSO_4$.

Etape 1 : Etat initiale. PH de solution Entre 7-8

Etape 2 : Formation des produits de réactions, le cas le gypse et la brucite due à la pénétration de sulfate par diffusion.

Etape 3 : L'attaque progresse - apparition des fissures à l'intérieur du mortier.

Etape 4 : La décalcification de (C.H.S), la substitution des (C.S.H) par l'hydrate de Mg(M..S.H)

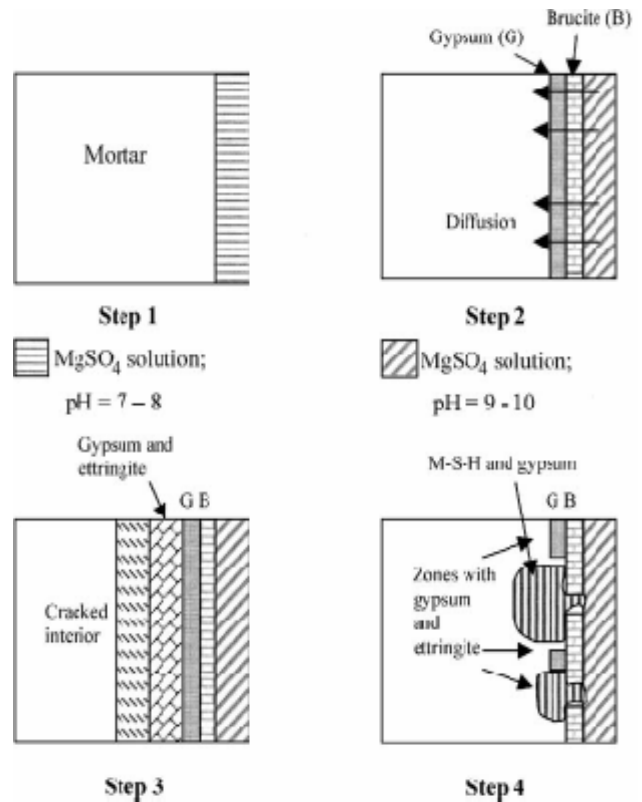


Fig.(I.11) :Le mécanisme d'attaque par le sulfate de magnésium ($MgSO_4$) sur une éprouvette en mortier [21].

Les changements physico chimique qui se produisent lors d'attaque des sels d'ammonium la figure I.12. Le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium, sont reconnus par leur agressivité.

Les éprouvettes immergé le sulfate d'ammonium sont couverte d'une couche de gypse aiguille comme cristaux, est qui subit des fissures.

Les éprouvettes en mortier immergé dans la solution du nitrate de l'ammonium ,il y'à décalcification rapide accompagné par perte de la force,les éprouvettes sont couvertes du surface de calcite rhombique qui est attribué à la réaction entre le calcium libéré et CO_2 dans l'eau.

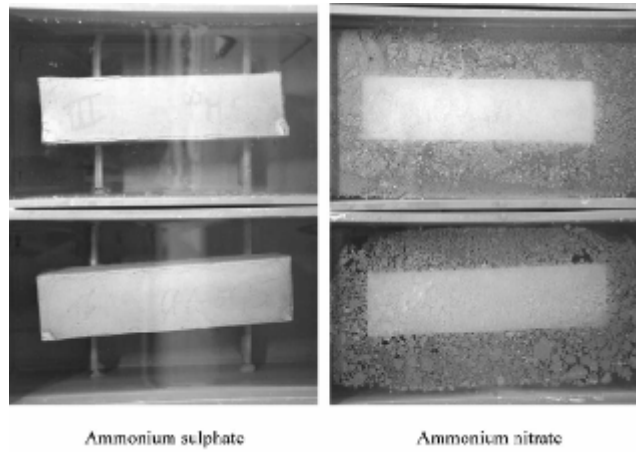
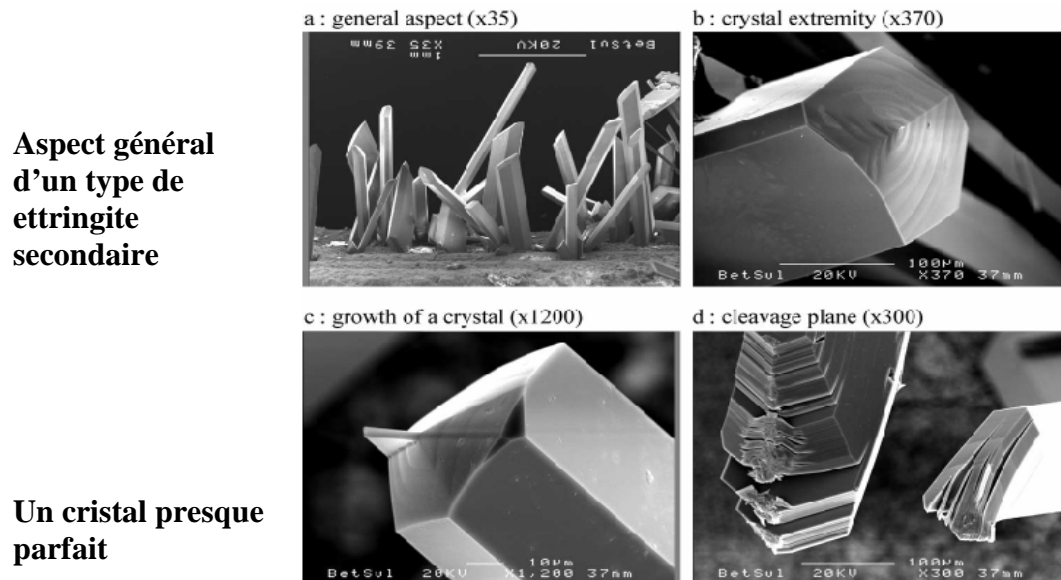


Fig.(I.12) :L'attaque par le sulfate d'ammonium et le nitrate d'ammonium sur des éprouvettes en mortier [22] .



Aspect général d'un type de ettringite secondaire

Un cristal presque parfait

Fig.(I.13) : Analyse par le micrograph SEM :montre le type de cristaux aiguille du gypse formés sur la surface d'une éprouvette immergée dans une solution de sulfate d'ammonium ((NH₄)SO₄) [22].

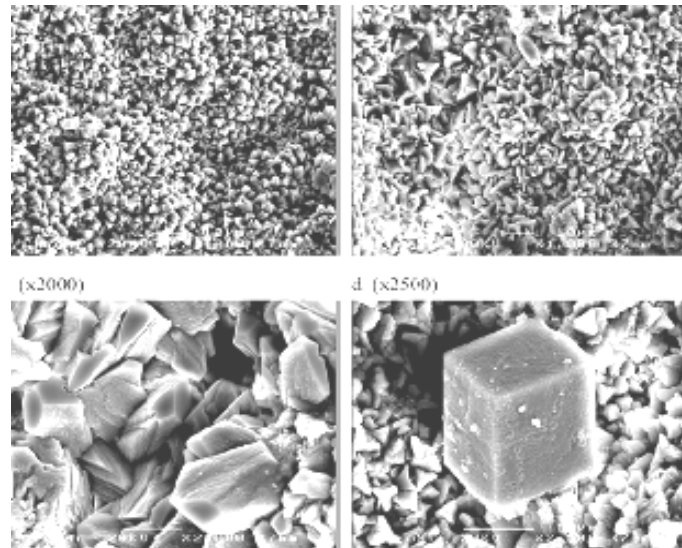
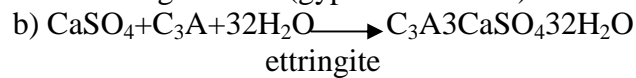
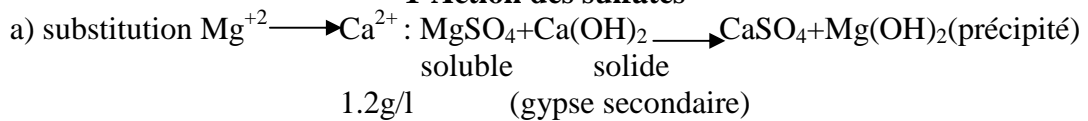


Fig.(I.14) : Analyse par le micrograph SEM: montre le dépôt de la calcite sur la surface d'une éprouvette immergée dans une solution de nitrate d'ammonium ((NH₄)NO₃) [22].

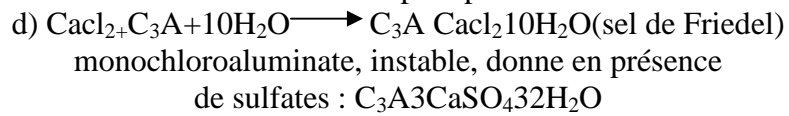
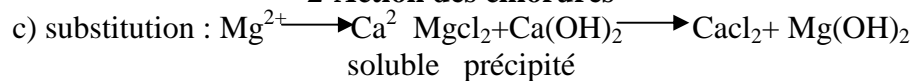
I.5-4/Attaque et action par l'eau de mer : [29]

1-Action des sulfates



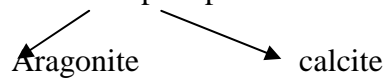
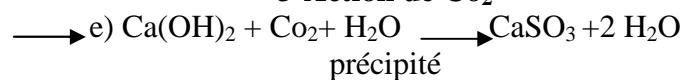
GONFLEMENT

2-Action des chlorures



GONFLEMENT

3-Action de Co₂



La durabilité en milieu marin est fonction d'un nombre relativement important de paramètres.

- Paramètres chimiques (ions agressifs).
- Paramètres géométriques (marées et fluctuation du niveau de la mer).
- Paramètres physiques (cycle de gel dégel, activation par les hautes températures).
- Paramètres mécaniques (abrasion).

Un béton bien formulé et bien mûris possède généralement une très bonne durabilité face à l'eau de mer. Les différents types d'attaques ont de la localisation préférentielle qui progressent vers l'intérieur du béton illustré par la figure I.15.

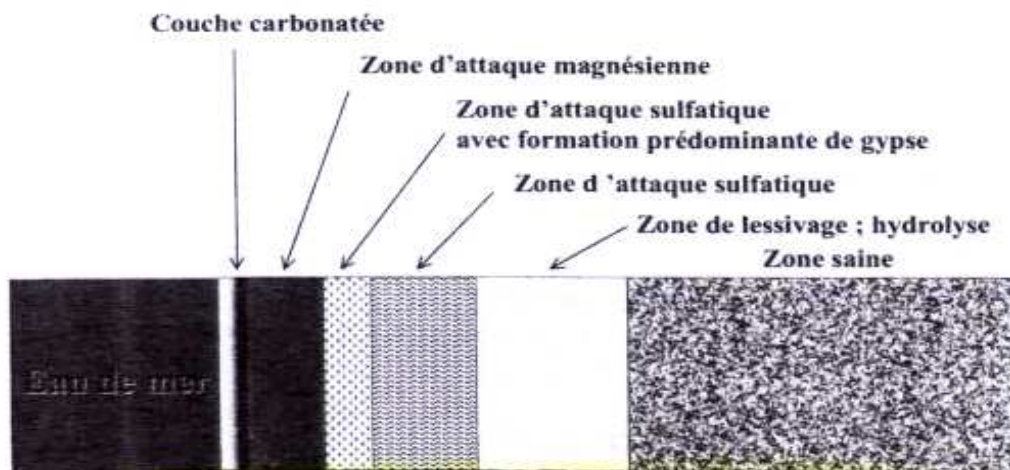


Fig. (1.15) : Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone immergée) [42].

I.5-5/Attaque par les ions chlorures :[26]

Dans les bétons la figure I.16, les chlorures proviennent pour l'essentiel du milieu extérieur, mais il est important de limiter les sources internes chlorures. Pour l'acier, le processus de corrosion généralement admis et débute par la dissolution du métal et la formation des ions ferreux.



Figure (1.16) : agression du béton par activité des chlorures [44].

L'hydrolyse de ces derniers entraîne l'acidification de la matière et la formation d'hydroxyde ferreux insoluble dont l'évolution donne la rouille la figure 1.17.

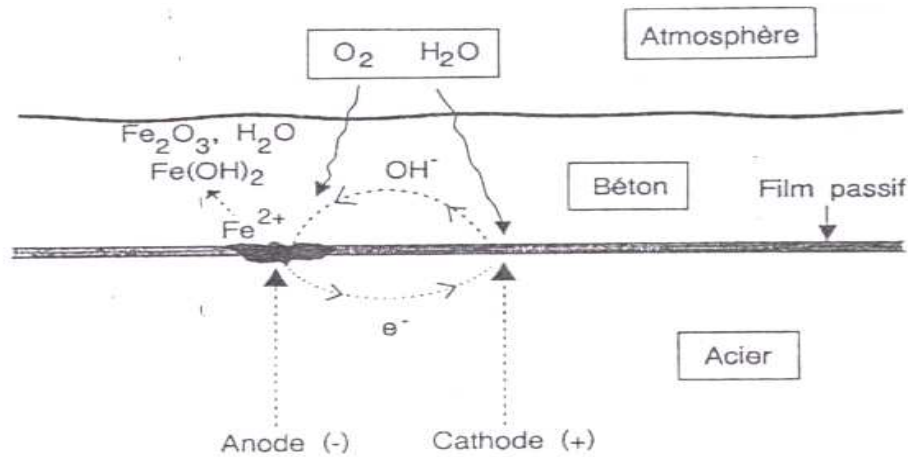


Fig.(1.17) :Le processus d'attaque dans les aciers [26],

La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultats de complexes mécanismes où l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important [25].

- La capacité de fixation des ions Cl^- par le ciment dépend de la nature du ciment, utilisé principalement de la quantité d'aluminate C_3A présente dans le clinker.
- D'autres espèces ioniques peuvent provenir sur la fixation chimique des chlorures.
- La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité de la pâte du ciment, elle décroît avec le rapport E/C, de façon exponentielle et dépend de la concentration de la solution environnante en sels.

I.5-6 /La carbonatation :

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à une transformation progressive d'essentiellement, un des composants des béton durci, la portlandite et la calcite, au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité la figure I.18.

Cette transformation s'accompagne d'une diminution de pH (le béton sain à un pH d'environ 13), ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Le pH d'un béton carbonaté est d'environ 9. A ces valeurs de pH, le film passif est détruit et la corrosion peut se développer à l'intérieure et provoque le vieillissement de béton.

On peut déterminer la profondeur de carbonatation par l'essai de phénophtaléine (indicateur coloré). La pulvérisation de cet indicateur, virant au rose vif lorsque le pH est supérieure à 9, permet de mettre en évidence le front carbonatation du béton (toutes les zones qui restent incolores sont carbonatées).

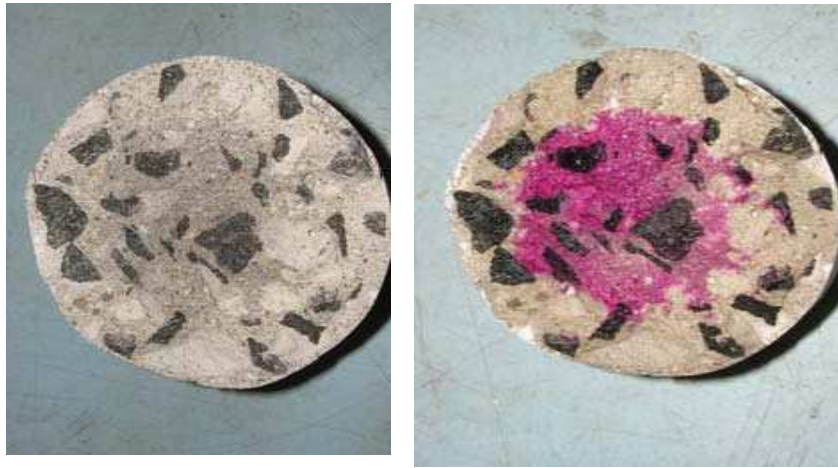


Fig.(1.18) : Détermination de la profondeur de carbonatation [45].

I.5-7/ Les cycles de gel- dégel [31]

Tous les bétons ne sont pas sensible aux cycle gel- dégel, seul les bétons dits « gélifs » s'altèrent. Les dégradations se manifestent sous forme de fissurations interne ou d'écaillage et concernent essentiellement les structures horizontales (ponts, terrasses....), susceptible d'être saturées en eau et donc plus sensibles à l'action du gel. Ce phénomène est encore mal connu.

1.5-8/ La réaction alcali silice [25]

Une pathologie du béton, souvent appelé « cancer du béton », fait intervenir les alcalins du ciment et la silice de certains granulats, c'est pourquoi on appelle l'alcali réaction granulats la figure I.19.

Trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu. Il faut que les granulats soient potentiellement réactifs, que l'humidité relative excède 80-85% et que la concentration en alcalins dépasse un seuil critique.

- Il trois type d'alcali réaction : les réactions alcali carbonate, alcali –silice et alcali silicate.
- La réaction la plus fréquente est la réaction alcali silice.
- Les désordres occasionnés par l'alcali réaction se présentent en général qu'après plusieurs dizaines d'années.



Fig.(1.19) :phénomène d'alcali réaction rencontré.

I.6 / LA TENUE DES BETONS DANS LES MILIEUX AGRESSIFS :

I.6-1 / La tenue des bétons dans les milieux sulfatique :

Dans un environnement sulfatique, la dégradation du béton n'est possible que si les ions de sulfates peuvent accéder aux phases réactives. Ce processus de transfert au sein du même matériau a lieu par diffusion. Un béton résistant sera donc d'abord un béton ayant des propriétés de diffusion faible (compacte et plus perméable). La figure I.20 illustre cette influence, la perméabilité étant liée au rapport E/C de gâchage.

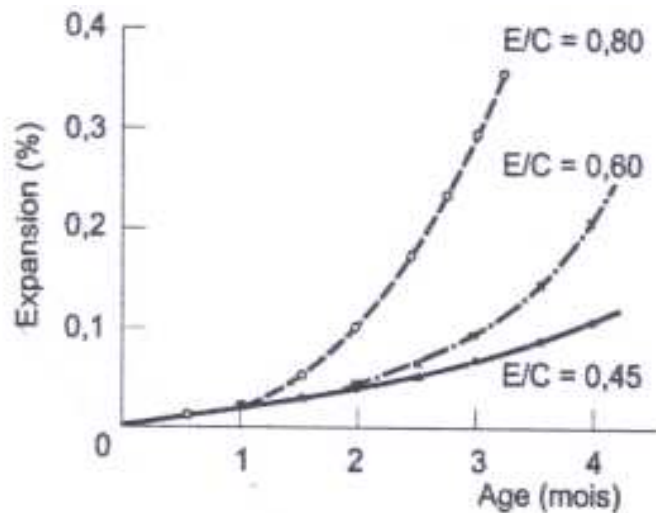


Fig.(1.20): Influence du rapport E/C sur l'expansion du mortier immergé dans une solution sulfatique contenant 4.3% de sulfate de magnésium et 2.5% de sulfate de sodium [40].

Les réactions impliquent les aluminates et la portlandite. Une faible teneur en C_3A est une précaution supplémentaire pour obtenir des bétons résistants aux sulfates figure I.16.

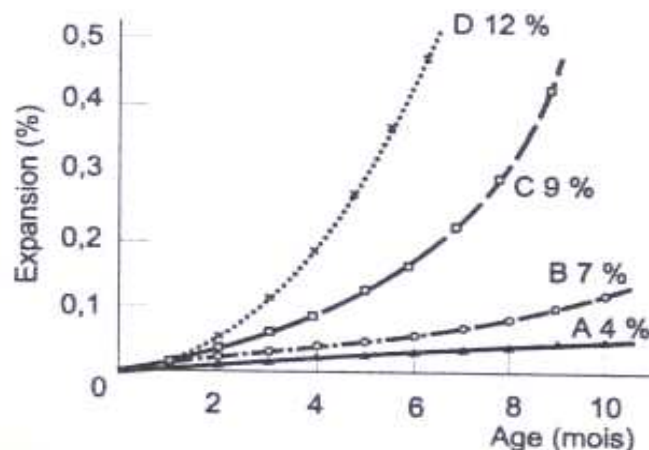


Fig. (1.21) : Influence de la teneur en C_3A du ciment sur l'expansion de mortiers [40].

Les mortiers sont préparés avec 4 ciments A, B, C et D qui diffèrent principalement par leur teneur en C_3A , respectivement 4.3%, 7%, 8.8% et 12%. Le comportement des ciments dans l'eau de mer est conditionné par le couple C_3A-SO_3 figure I.22. Si la teneur en SO_3 est inférieure à 3%, les gonflements restent relativement faibles ($<1000\mu m/m$), même pour la valeur la plus élevée de C_3A (12.8).

La figure montre également que les teneurs les plus élevées en SO_3 deviennent supérieures (jusqu'à 5%) n'entraînent pas d'expansion excessive si la teneur en C_3A reste faible ($<2\%$). En revanche, lorsque la teneur en C_3A dépasse 7%, les gonflements augmentent rapidement si la teneur en SO_3 devient supérieure à 3%.

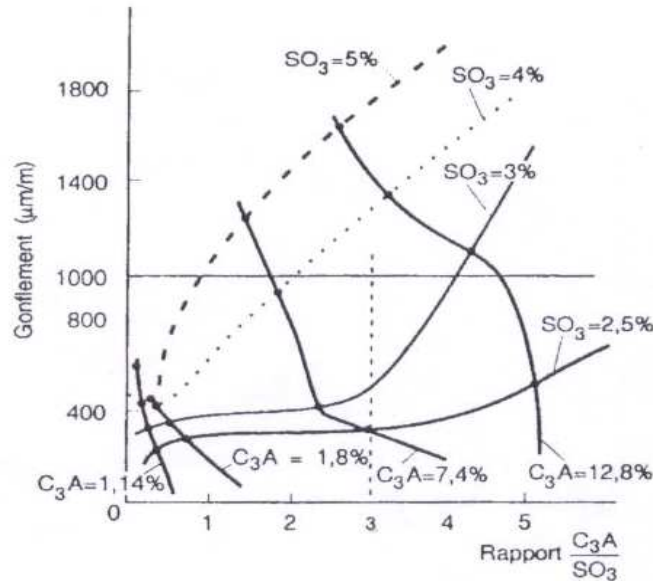


Fig. (1.22) : Relations entre les teneurs en C_3A et SO_3 du ciment et le gonflement des mortiers conservés en eau de mer pendant un an [41].

On observe que la résistance chimique du béton croît avec le dosage en ciment, c'est-à-dire avec la compacité du béton la figure I.23. De ce point de vue il y a lieu de signaler que l'augmentation du dosage en ciment est généralement accompagnée d'une réduction d'eau du rapport E/C.

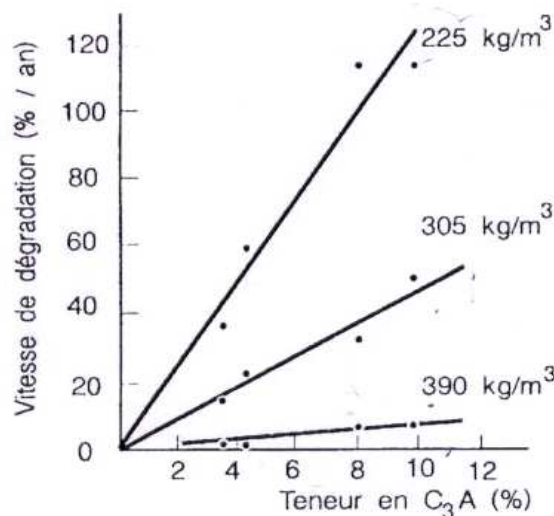


Fig. (1.23) : Influence du dosage en ciment et de la teneur C_3A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na_2SO_4 à 10%) [42].

Tableau (1.2) : Les résultats de Tumidajski [46] : profondeur de la frontière de sulfate en fonction de type de ciment et des pouzzolanes.

ciment	E/C	Laitier (%)	Cendre volante (%)	Fumée de silice (%)	Temps de cure (jours)	Profondeur (mm)
Type 10	0.42	-	-	-	14	5.0
Type 10	0.5	-	-	-	14	7.6
Type10	0.6	-	-	-	14	8.4
Type50	0.5	-	-	10	14	2.0
Type50	0.5	-	30	5	56	3.0
Type50	0.5	75		3	28	2.8

Solution de sulfate de sodium 88g/l, pendant 2 ans.
 Type 10 ciment $C_3A=6\%$, équivalence CPA CEMII.
 Type 50 ciments $C_3A=2.6\%$ équivalence CPA PMC I.

Les premiers résultats mettent en évidence l'importance du rapport E/C. Les résultats des ciments type 50, montrent l'avantage des ciments avec un teneur faible du C_3A . Ils soulignent aussi la valeur de pouzzolane dans les milieux sulfatique, d'autre part (5), signalent que pour un même béton, l'usage des cendres volantes réduit la perméabilité.

Tableau I.2 : Les ajouts minéraux (particulièrement les laitiers) permettent généralement d'augmenter la résistance aux sulfates ce qui entraîne :

- Moins de ciment produisant des teneurs en C_3A plus faible dans le béton.
- Perméabilité plus faible.
- Fumée de silice et cendres volantes : moins de $Ca(OH)_2$ dans la pâte de ciment hydraté (réaction pouzzolanique).

La résistance de la pâte de ciment pouzzolanique augmente avec la durée de cure la figure 1.24. Pour les deux autres ciments (CPA, CRS) la résistance diminue jusqu'à une durée d'un an pour les pâtes immergées dans $MgSO_4$. Dans le cas d'une immersion dans la solution Na_2SO_4 les résistances des ciments CPA et CRS, augmentent pendant une durée de 6 mois puis chute de manière aigue jusqu'à la durée d'un ans.

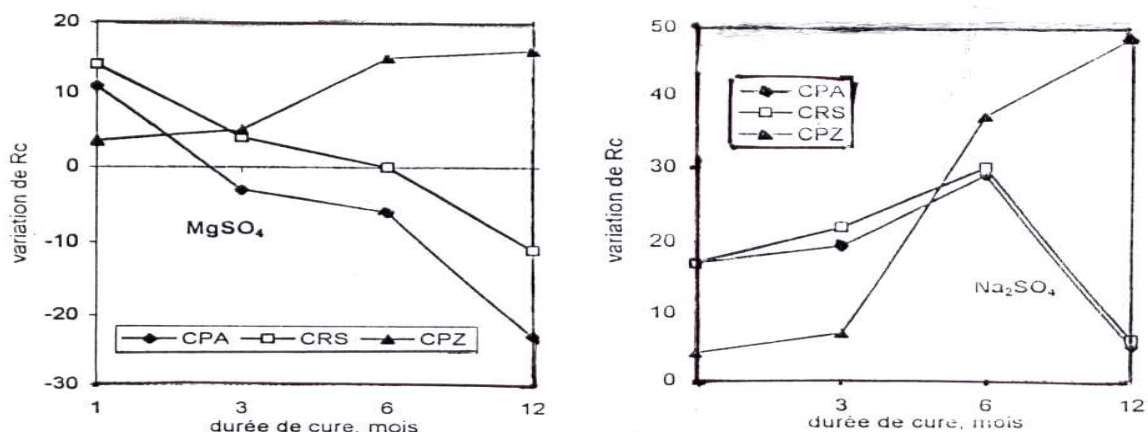


Fig. (1.24) : La variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment immergée dans les solutions sulfatiques en fonction de la durée de cure [11].

Le comportement de la résistance des différentes pâtes de ciment dans les solutions de sulfates la figure I.25 est principalement attribuée à la pénétration des sulfates et leur réaction avec les constituants de ciment. Les résultats de cette même étude, montrent que la quantité des sulfates imprégnés dans les pâtes de ciments augmente avec la durée d'immersion surtout au début de temps.

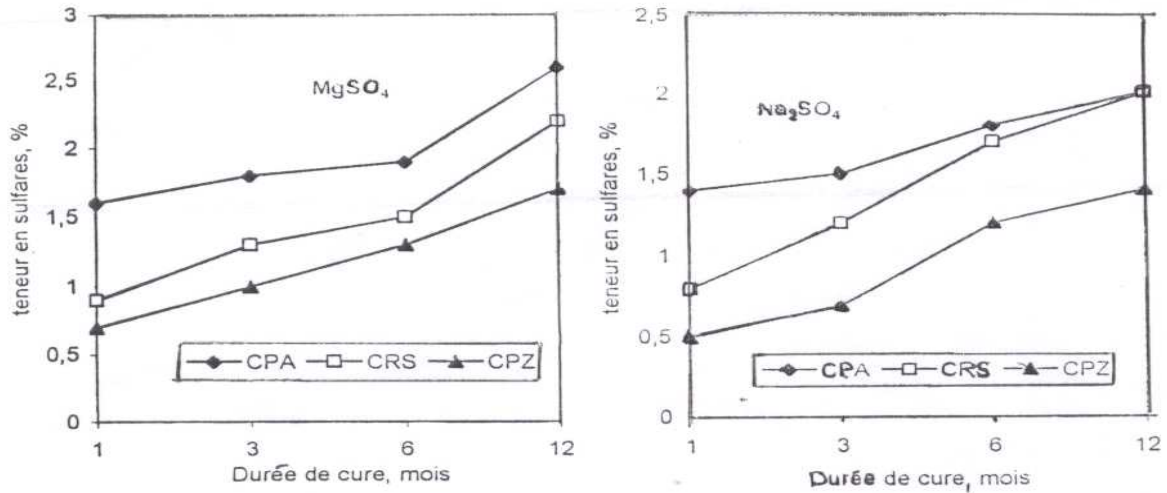


Fig. (1.25) : La teneur en sulfate des pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatiques en fonction de la durée d'immersion [11].

Les ciments contenant 40% ou plus de laitier ont généralement une bonne résistance aux sulfates la figure I.26.

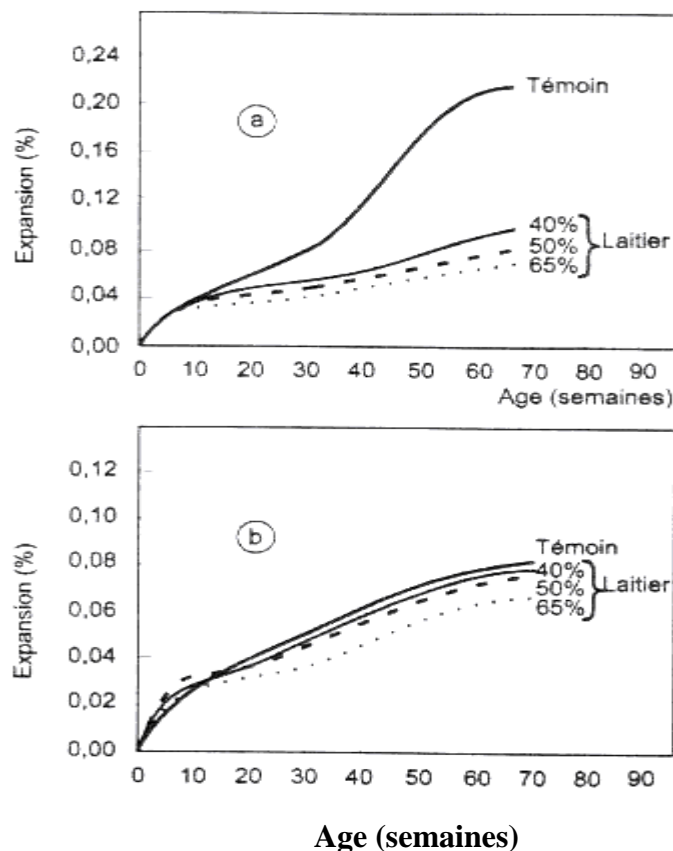


Fig.(1.26) : Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajouts de laitier.
a)-ciment type II 6.4% de C3A. b)-ciment type II 53.7% de C3A.

I.6-2/ La tenue du béton dans les milieux de chlorures :

La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité de la pâte de ciment La figure I.27. Elle décroît avec le rapport E/C de façon exponentielle et dépend de la concentration de la solution environnante en sels.

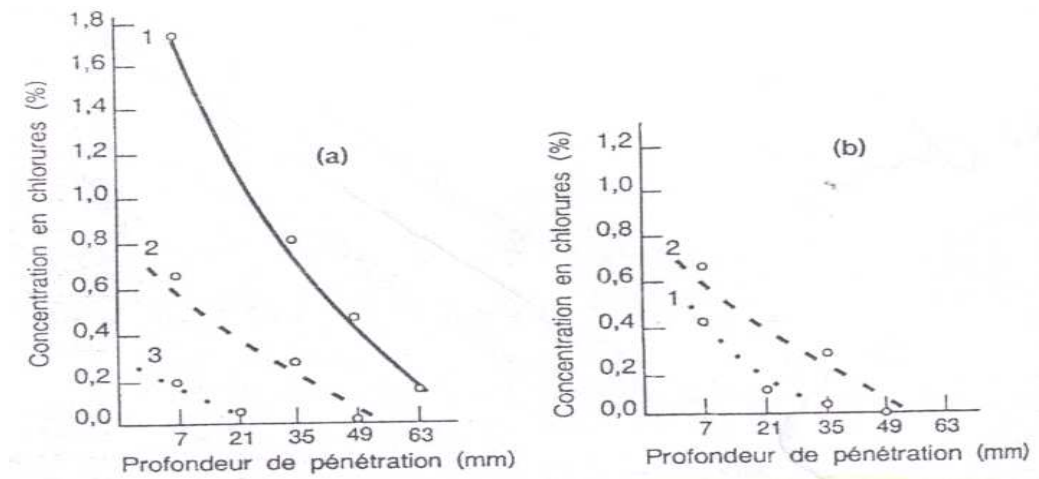


Fig.(1.27) : Evolution de la concentration en chlorures pour différents rapports E/C (a) et milieux environnants (b) [44].

- Pâtes de ciment plongées pendant six mois dans une solution contenant 150g/l de NaCl.
- **Fig.(a)** : avec des rapports E/C respectif de 0.71, 0.47 et 0.23 (courbes 1,2,3) pour un même rapport E/C = 0.47
- **Fig. (b)** : La profondeur de pénétration est relative à deux solutions de 30g/l (courbe1) et 150g/l (courbe2).

Quand le béton est complètement immergé, le transport d'ion a lieu par diffusion pure. Comme dans le cas de la carbonatation, nous allons présenter successivement l'influence du rapport E/C, de la cure de la résistance et de la quantité d'additions minérales sur la diffusion des ions chlorure. L'influence de rapport E/C est illustrée par la figure I.28.

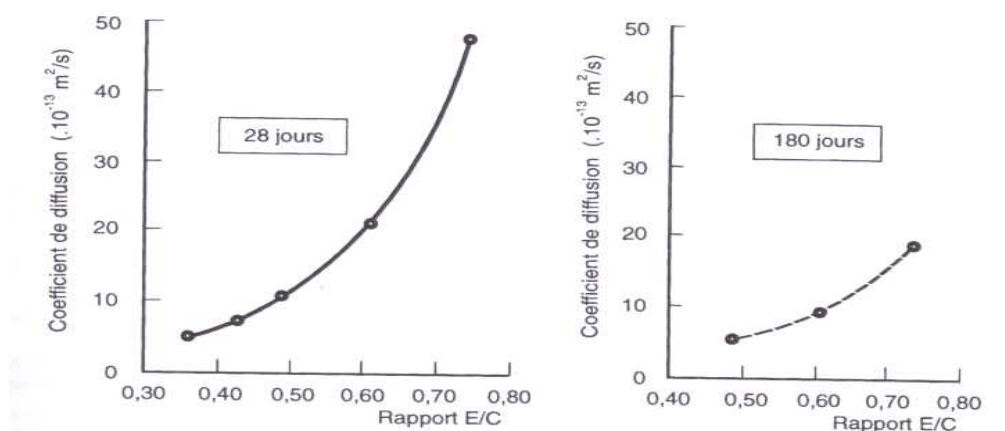


Fig. (1.28) : Influence du rapport E/C sur le coefficient de diffusion effectif des ions chlorure dans le béton [43].

Les pâtes durcies immergées dans la solution de NaCl montrent une grande augmentation dans la résistance jusqu'à un an, comparaison avec les autres types de ciment (CPA, CRS) la figure I.29, lequel fait augmenter le pH. La faible diminution dans la résistance après 6 mois est principalement attribuée à la présence d'ions de chlorure dans les treillis de C-S-H dans lequel change sa morphologie et à la formation des chloruroaluminates hydraté. Le ciment pouzzolanique montre une forte résistance à la pénétration des chlorures la figure I.30. La quantité d'ions de chlorure pénètrent dans les pâtes de ciment pouzzolanique est moins que celle constaté pour les autres ciments durcies.

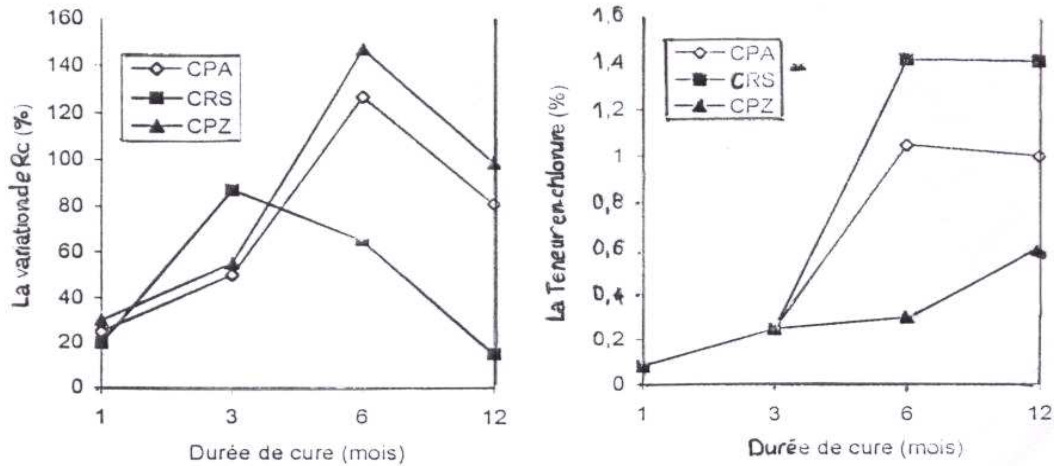


Fig.(I.29) :la variation de la résistance à la Compression de différente pâte de ciments Immergées dans une solution de 5% de NaCl [11].

Fig.(I.30) :La teneur en chlorure de différente Pâtes de ciments immergées dans une solution de Na Cl [11].

Les bétons sont conservés dans l'eau à 23°C, jusqu'à 28 jours (courbe 1) ou 180 jours (courbe 2), Le coefficient de diffusion et la résistance à la compression sont mesuré au moment de l'essai la figure I.31. Montre le coefficient de diffusion est une fonction décroissante de la résistance. Cela montre en toute chose que l'interconnexion des capillaires diminue avec l'âge quand le béton est conservé dans l'eau.

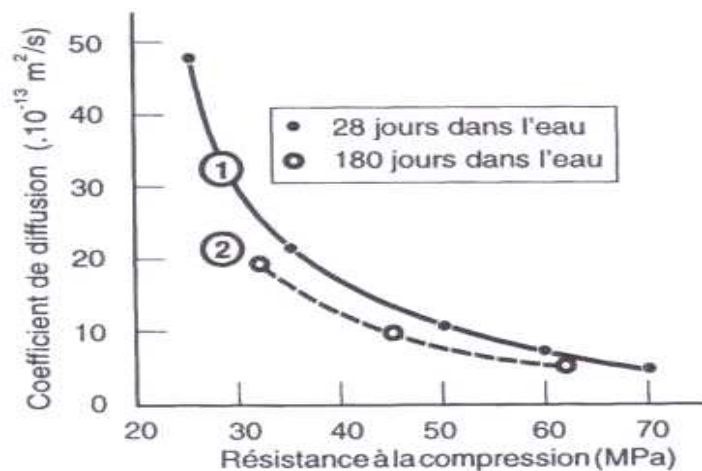


Fig. (I.31) : Influence de la résistance à la compression sur le coefficient de diffusion des ions chlorure dans des bétons de CPA-CEMI [40].

Avec les additions pouzzolaniques le pH de la solution interstitiel diminue, ce qui conduit à diminuer le seuil en ions Cl^- , admissible au droit des armatures

L'utilisation de cendres volantes permet, à une résistance à la compression donnée, de réduire la pénétration des ions chlorure et la corrosion des armatures. Ces améliorations sont illustrées par la figure I.32.

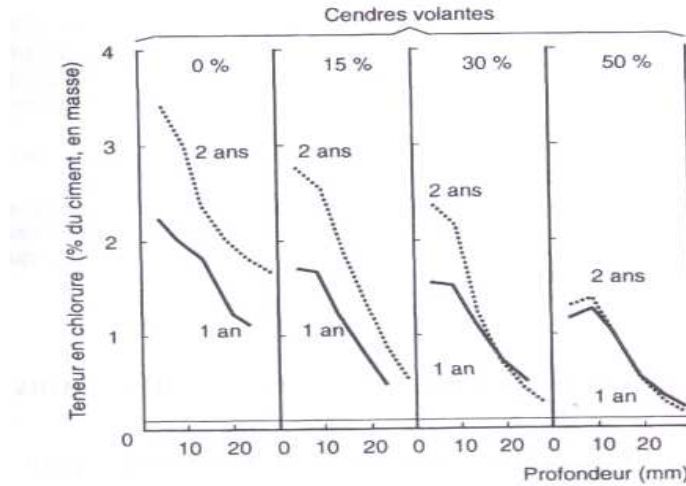


Fig.(I.32) :Profils de concentration des ions chlorure dans un béton [40].

I.6-3 /Les paramètres qui influent sur le phénomène de carbonatation :

La figure I.33 montre l'influence de rapport E/C et l'âge sur l'épaisseur carbonatée qui est en relation carrée du temps traduisant un processus de diffusion

Prisme de béton confectionnés avec un rapport E/C=0.8(courbe1),courbe 0.6(courbe 2),E/C=0.45(courbe 3),conservés à 20°C,et 50%HR,en atmosphère contrôlée,l'épaisseur carbonatée croît linéairement en fonction de la racine carrée du temps traduisant un processus de diffusion.

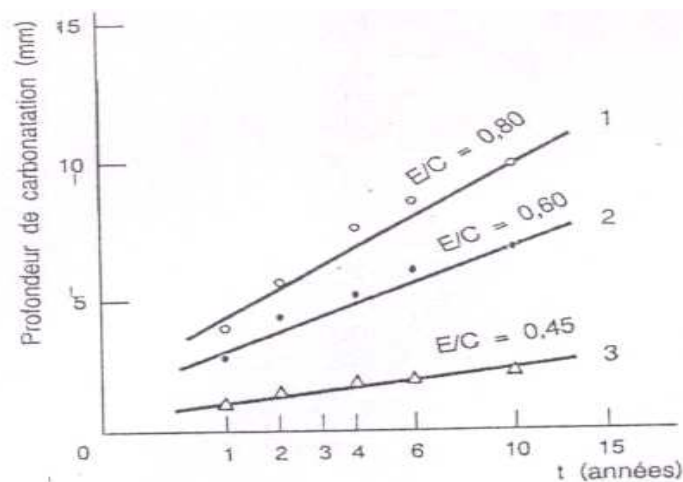


Fig.(I.33) : Loi de croissance linéaire de l'épaisseur carbonatée en fonction de \sqrt{t} [24].

Pour des bétons fabriqués de même maniabilité, l'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage en ciment est plus élevé figure I.34.

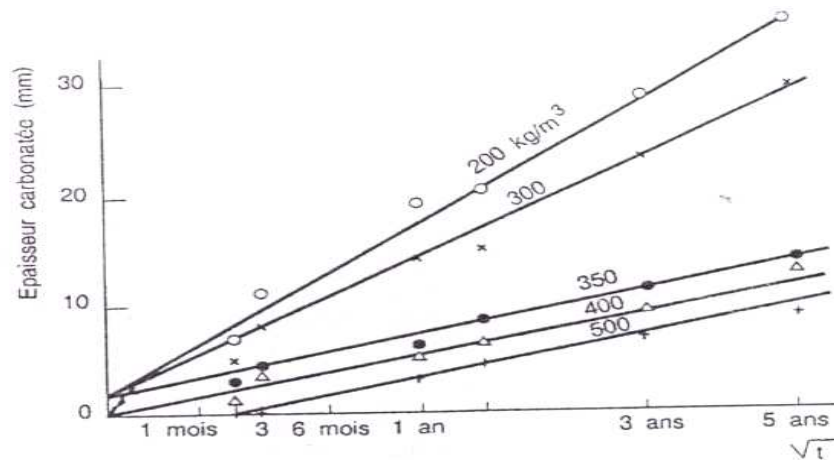


Fig. (1.34) : Relation entre l'épaisseur carbonatée et le dosage en ciment [44] .

La figure I.35 la courbe 1 correspond à des conditions intérieures contrôlées (20°C et 65% HR) et la courbe 2 à des conditions extérieures sont abri (en moyenne 7°C et 77 %HR) et la courbe 3 aux mêmes conditions extérieures exposées à la pluie.

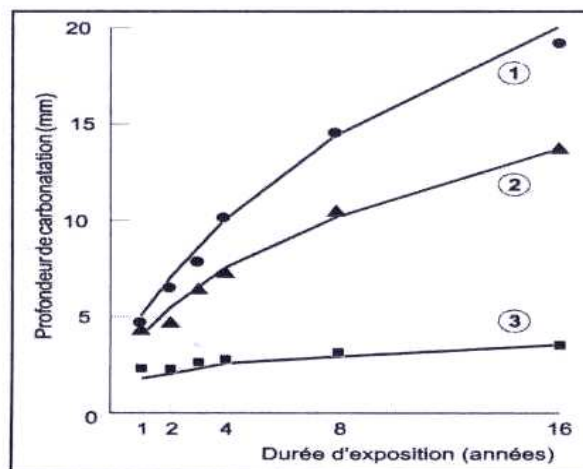


Fig.(1.35) Influence de l'humidité de l'environnement sur la progression de l'hydratation [43].

La figure I.36 montre qu'en conditions contrôlées (ici 20°C, et 50 %HR), la profondeur de carbonatation est proportionnelle au rapport E/C. Cette figure illustre aussi l'influence des conditions de cure.

Les bétons de CPA-CEM I sont conservés :

- Courbe 1 : 24 heures en moules puis 6 ans dans l'air.
- Courbe 2 : 24 heures en moules puis 27 jours dans l'eau et 6 ans dans l'air.

Plus le rapport E/C est élevé, plus il est nécessaire de prolonger la durée de la cure humide pour obtenir des bétons résistants à la carbonatation.

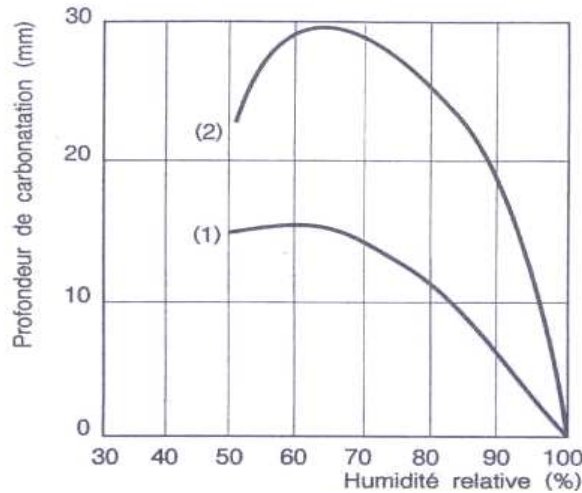


Fig.(1.36) : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation. Les bétons confectionnés avec un rapport E/C=0.6 (courbe1), 0.8 (courbe2) ont été conservés 16 ans à 20°C à différentes humidités relatives [44].

L'importance de la nature du liant figure I.37 des bétons confectionnés avec du ciment au laitier CLK-CEM III contiennent de plus faible quantité de portlandite et présentant une carbonatation légèrement plus importante.

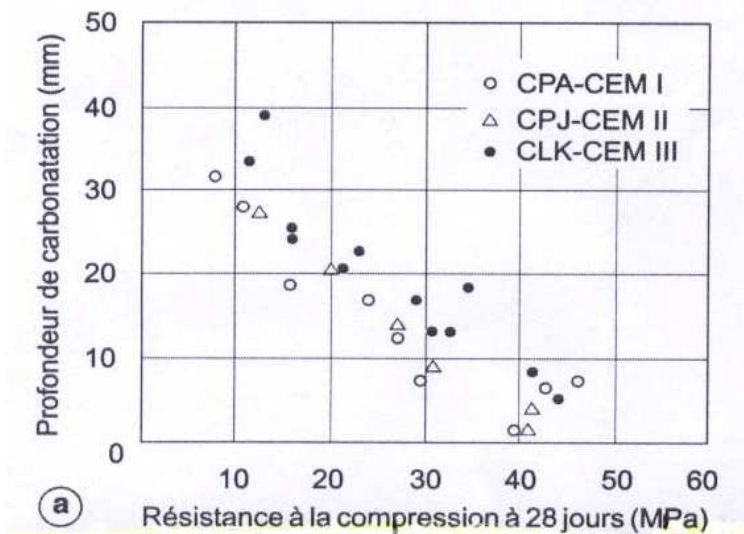


Fig.(1.37): Relation entre la profondeur de carbonatation et la résistance à 28j, influence de la nature du liant (16 ans d'exposition en laboratoire à 20°C et 65% HR) [42] .

La teneur en cendres, au-delà de 30% on observe une augmentation de la profondeur de carbonatation figure I.38. Ce résultats justifie l'existence d'un seuil maximum en additions minérales utilisées en substitution dans les bétons.

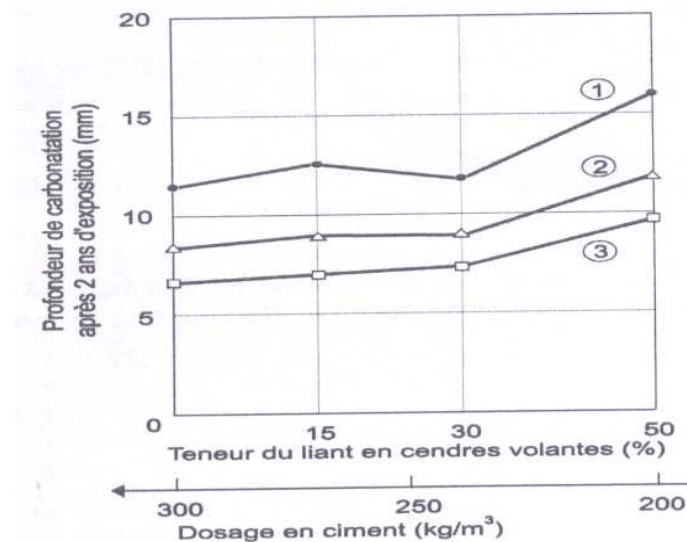


Fig.(1.38): Influence de la teneur en cendres volantes utilisées en substitution sur la profondeur de carbonatation [42] .

I.7/IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON :

Un milieu poreux se compose d'une pâte solide et d'un espace poreux ou espace des vides, dans le béton durci, ce sont les granulats, les hydrates et les anhydres qui constituent la phase solide, les pores sont remplis d'air, la forme géométrique de cet espace poreux est très complexe, sa description simplifiée au moyen d'un nombre limité de paramètres est présentée. Les lois qui décrivent les transferts par perméabilité ou par diffusion sont très différentes.

I.7-1/Transport par diffusion :

Ce processus est caractérisé par un coefficient D_f défini par la première loi de Fick.

$$J_x = -D_f \frac{dc}{dx} \dots \dots \dots (1).$$

Où

J_x : est le flux de constituants dans la direction X et dc/dx : est le sous gradient de concentration dans cette direction.

L'indépendance entre la cinétique de diffusion et la taille des capillaires. Constitue une différence fondamentale avec le transport par écoulement visqueux. s'exprime en (m^2/s). La progression de la pénétration par diffusion se fait par une loi caractéristique en \sqrt{t} , cette relation est en fait dans beaucoup de cas de diffusion plus complexes.

I.7-2/Transport par écoulement hydraulique :la perméabilité ,
Hypothèse et loi 'écoulement du fluide :

Loi de Darcy :

C'est Darcy qui établi, au 19 siècle une relation expérimentale entre le débit traversant une surface unité d'échantillon, et le perte de charge entre deux points d'une ligne de courant, cette relation s'écrit :

$$V = -K \text{grad} H \dots (2)$$

V : vitesse de filtration (m.s^{-1}).

K : conductivité hydraulique (m.s^{-1}).

H : charge hydraulique (m).

Dans cette expression **K** n'est pas une caractéristique propre du matériau, et dépend du fluide percolent, l'équation (2) peut se mettre sous la forme :

$$V = -(K/\mu)[\text{grad}P + \rho g \text{grad}z] \dots (3)$$

Ou :

K : perméabilité intrinsèque du milieu (m).

μ : viscosité du fluide (Pa.S).

P : pression du fluide (Pa).

Z : altitude par rapport à un niveau de référence (m).

ρ : masse volumique du fluide (Kg.m^{-3}).

g : accélération de la pesanteur (m.s^{-2}).

On fait alors apparaître **K**, qui ne dépend pas de la propriété du fluide saturant. Ces deux paramètres sont reliés par :

$$K = K\mu / \rho g \dots (4) \quad [37]$$

Pour l'eau, en prenant pour valeurs approximatives : $\mu = 10^{-3} \text{pa.s}$.

$\rho = 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$. Et $g = 9.8 \text{ m.s}^{-2}$, on obtient $K = 10^{-7} K$.

Si on fait de plus l'hypothèse d'un gradient de pression suffisamment élevé, on pourra négliger le terme $\rho g \text{grad}z$, et (4) devient :

$$V = -[K/\mu] \text{grad}P \dots (5).$$

Par la suite, on désignera par : «loi de Darcy» l'équation (5), qui se généralise au cas des matériaux anisotropes par :

$$V = -[K/\mu] \text{grad}P \dots (6).$$

Expression dans le quelle **K** désigne le tension symétrique de perméabilité intrinsèque du milieu [37].

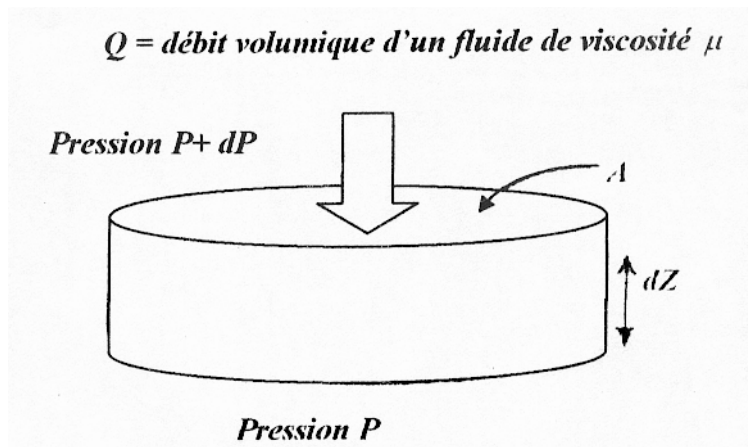


Fig.(1.39) :définition de la perméabilité [37].

K : cette grandeur est appelée perméabilité, et non pas coefficient de perméabilité, c'est une caractéristique du matériau, elle est donc indépendante de la nature de fluide utilisé pour sa mesure dans la validité de la loi de Darcy [32].

I-7-2-1/ RELATION ENTRE LA PERMEABILITE ET LA GEOMETRIE DES PORES :

Divers modèles visant à relier la perméabilité des matériaux poreux et les caractéristiques de sa microstructure ont été proposés. Ils visent tous à dégager l'influence de deux paramètres essentiels : la taille des vides et leur interconnexion

Dans le cas des matériaux consolidés tels que les bétons deux approches paraissent intéressantes : la modélisation statique et les modèles utilisant les données classiques de la pométrie au mercure.

I-7-2-1-1/ Modèle de Diennes [32]

Les pores sont assimilés à des tubes cylindriques dans lesquels le fluide s'écoule en régime laminaire. Une autre modélisation concerne les matériaux fissurés : les fissures sont modélisées par des disques minces. Les tubes ou fissures répartis uniformément dans l'espace, et leurs caractéristiques géométriques sont des variables statistiques. En introduisant la porosité, la théorie de la percolation permet de calculer la perméabilité.

A- Pour les matériaux poreux:

$$K = \frac{f \cdot r^2 \cdot p}{32} \dots\dots\dots(7).$$

K: est relié au rayon « r » des tubes modèles

B- Pour les matériaux fissurés :

$$K = 2/15 \cdot f \cdot w^2 \cdot p \dots \dots \dots (8).$$

K : est relié à l'ouverture moyenne des fissures

I-7-2-1-2/Le modèle de katz.Thomson : [32].

La modélisation proposée par ces deux auteurs, relie la perméabilité à un seuil de pénétration déterminé. Dans l'essai de porométrie au mercure. Ce seuil correspond au d'inflexion (diamètre D_c) de la courbe de pénétration de mercure figure 1.40. La perméabilité est calculée selon:

$$K = D_c^2 / 226 F \dots \dots \dots (9).$$

F : Est le facteur de formation, rapport entre la conductivité du béton saturé et celle de la solution, interstitielle.

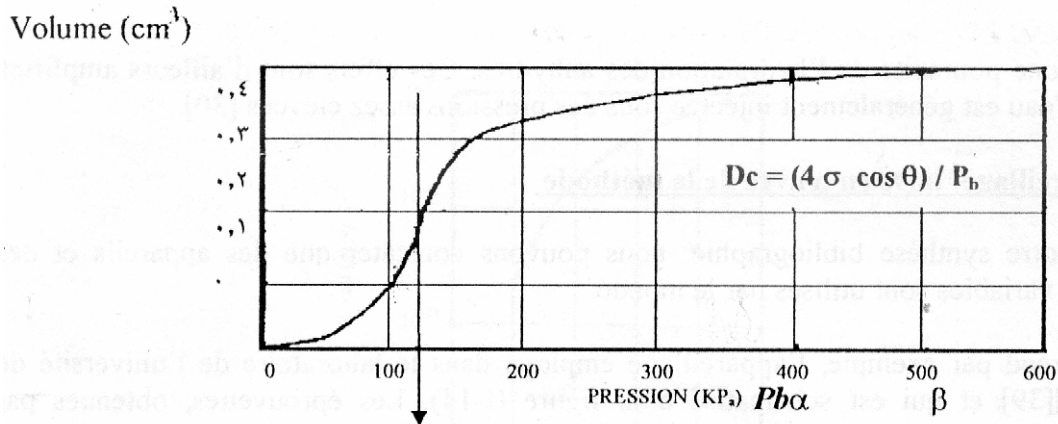


Figure (I-40): définition du seuil D_c dans la théorie de Katz –Thomson, [32]

Ces théories établissent des relations entre la perméabilité, l'interconnexion et la géométrie des pores [34].

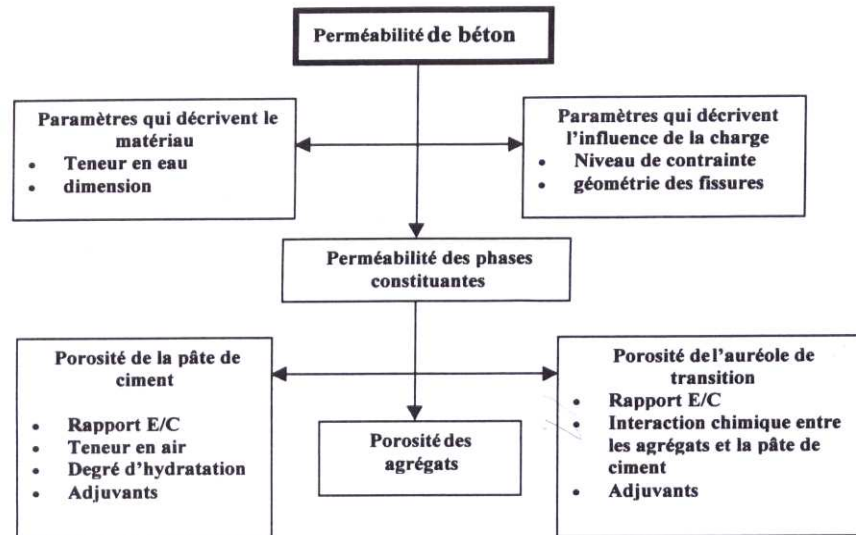


Fig.(I.41) :mécanisme de transport de fluide.

I.7-3/ Influence des additions minérales et adjuvants sur la perméabilité .Cas d'ajout calcaire:

Les additions calcaires sont des produits secs, finement divisés, obtenus par broyage, provenant de gisement de roche calcaires, pouvant être dolomitique, massives ou meubles, dont les caractéristiques sont définies par la norme. Deux caractéristiques sont particulièrement significatives pour compléter cette définition.

-une teneur minimale en carbonate totaux (calcaire+dolomie).

Ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 .

-Une valeur minimale en carbonate de l'indice d'activité 2.

-Une granulométrie très fine.

-Une composition presque pure.

-Une présence de fillers dans le béton inférieure à 30%.

-Une très faible présence d'élément nocif.

-Un coefficient d'absorption d'eau très voisin de celui des liants traditionnels.

- le calcaire contient aussi : SiO_2 . Al_2O_3 Fe_2O_3 . ou le minéral accessive, qui est la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (54.27%), CaCO_3 et 45.73% MgCO_3 ou 30.41 % MgO . 47.72%.

- les fillers calcaires sont des ajouts cimentaires inerte, mais qui peuvent se résister d'une grande efficacité la figure 42.

Dans l'utilisation pour les bétons de masse par effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire de béton [27].

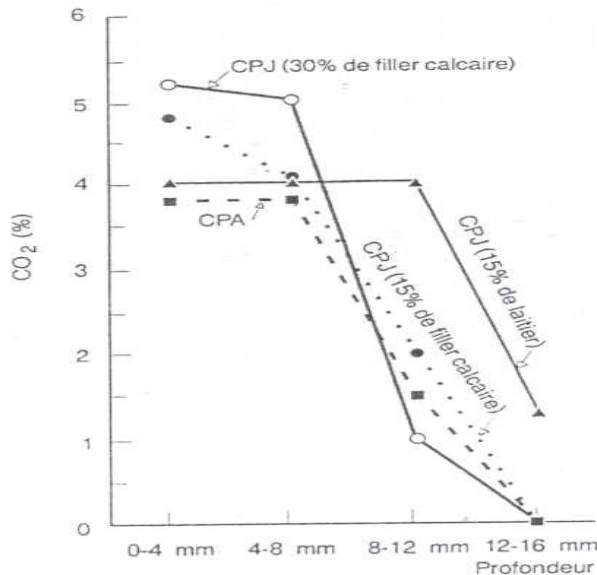


Fig.(I.42) :Variation de la carbonatation en fonction de la profondeur pour différents ciments avec fillers.

Prisme de mortier avec un rapport E/C=0.5 conservés un an à 20% et 50% HR.

I.7-4/Ajout et activité pouzzolanique de pouzzolane

Les pouzzolanes peuvent être définie comme des matériaux ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau, et à former des composés possédant des propriétés liantes, sont formées d'éléments surtout vitreux. Des éléments cristallisés comme la zéolite). Elle peuvent contenir des constituants nocifs tel que :

Les substances organiques et argiles gonflantes [18].

L'activité pouzzolanique et la transformation pouzzolane/chaux, en un matériau dur et compact à des températures ordinaires.

Les pouzzolanes sont de la roche acide, ayant des teneurs élevées en silice puis en alumine et en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux qui réagissent :

Silice (SiO_2) -silicate calcique hydrate C.H.S

+Chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +eau H_2O =

Alumine (Al_2O_3) -aluminat calcique hydraté C.A.H.

L'activité d'une pouzzolane est aussi caractérisée par la quantité de chaux (CaO), absorbée par un gramme d'ajout pendant 30 jours. La réactivité des pouzzolanes dépend de nombreux facteurs.

- la composition chimique et minéralogique
- état de divisions.
- structure de l'état de surface.

Tout les matériaux appelés pouzzolane ne possédant pas forcément cette propriétés. On peut dans certains cas activer les pouzzolanes par certains procédés : ajout de produits chimique à une finesse plus élevée, où un traitement thermique

La perméabilité, quelque soit le fluide utilisé figure I.43, est souvent employée pour caractériser un matériau. Les performances de compacité sont traduites généralement par ce type de grandeur [13].

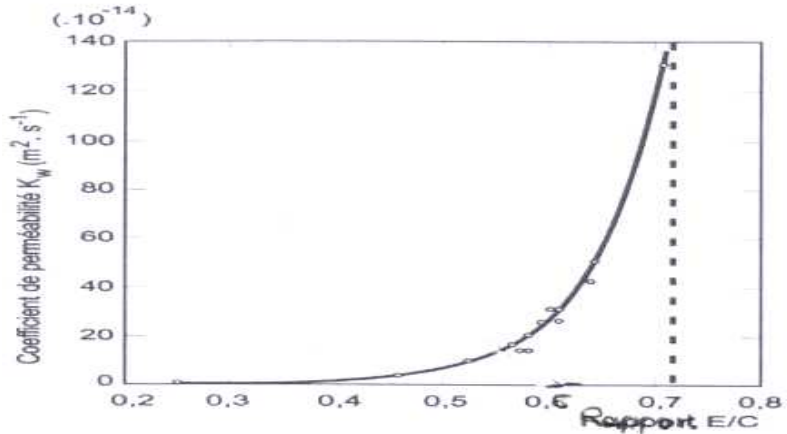


Fig.(I.43) :Variation de la perméabilité à l’eau avec le rapport E/C[10].

Des études ont étudié la perméabilité au gaz de béton en fonction de leur résistance mécanique pour 3 ciments différents figure 44. Les résultats semblent indiquer que l’utilisation de laitier augmente légèrement la perméabilité alors que les cendres volantes la diminuent.

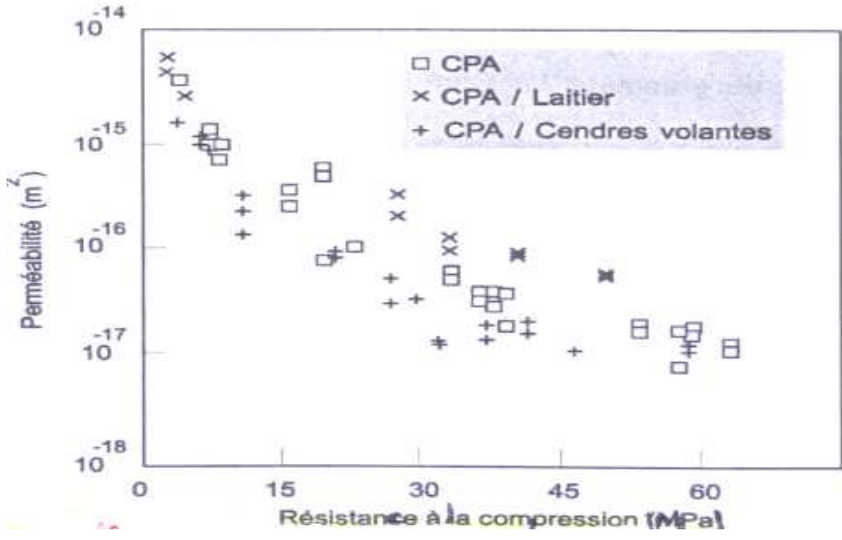


Fig.(I.44) :Influence du type de liant sur la perméabilité à résistance mécanique donnée[10].

CONCLUSION :

- ✚ Nous avons essayé dans ce chapitre d'identifier les environnements qu'il faut considérer, la sévérité des conditions, leur interaction et le risque de leurs existences continues. Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation, c'est à dire sa durabilité, était appréciée par sa résistance à la compression.
- ✚ Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité, et par conséquent à la durabilité, le comportement des bétons dans les eaux agressives et liée à d'autres influents qui sont également importants et qui sont appelées par les critères généraux de durabilité des bétons dans les eaux agressives :
 - ☒ La résistance.
 - ☒ Le rapport E/C.
 - ☒ La nature du ciment et le dosage.
- ✚ Divers travaux sur ces recherches ont été effectués pour la détermination des mécanismes de dégradation, pour divers milieux agressifs notamment le cas d'attaque sulfatique, les eaux acidifiées et les chlorures.
- ✚ Deux grands types de mécanismes sont connus pour leur agressivité :
 - ☒ la dissolution, l'agression résolvante.
 - ☒ la gonflement, due à la cristallisation.
- ✚ Les différents types d'attaques chimiques affectant le béton sont les suivants :
 - ☒ l'attaque sulfatique, l'attaque par les sels et par les acides sulfuriques sont classés comme un type d'attaque sulfatique, mais leur effet diffère l'un de l'autre.
 - ☒ l'attaque des nitrates est connue parmi les milieux les plus agressifs à court terme.
 - ☒ l'attaque des chlorures.
- ✚ La bonne tenue dans les milieux agressifs est fonction des critères généraux.
- ✚ l'incorporation des additions minérales et adjuvants ouvre des nouvelles perspectives pour des travaux de recherches ce concerne qui le domaine de durabilité des bétons dans les milieux agressives.

II.1/ CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES :

Les altérations du béton sont variées, elles atteignent soit, la matrice cimentaire soit, les armatures, parfois les deux. Leurs origines sont très nombreuses, elles dépendent du milieu et du béton lui-même.

Le processus de détérioration est complexe et fait intervenir un nombre important de paramètres. Actuellement, il existe en Europe un certain nombre de procédures qui établissent les conditions de durabilité des matériaux et les conditions de leur mise en œuvre. En ce qui concerne la spécification de la qualité des bétons, il existe un système de classification qui répond à la sévérité des milieux ambiants [5].

II.1-2/ LA SELECTION DES CIMENTS :

Les deux types de ciment portland composé sont :

- ciment composé à base d'ajout calcaire (15%).
- ciment composé à base d'ajout pouzzolane (20%).

II.1-2-1/ Composition chimique des ciments :

Tableau (II.1) : Composition chimique des ciments :

Elément	Exigence NF P18-011	CPZ-20%	CPC-15%
SiO ₂		32.1	19.1
Al ₂ O ₃		4.53	3.95
Fe ₂ O ₃		3.11	3.7
CaO		49.7	63.1
Mg O		1.52	1.23
K ₂ O		0.81	0.13
Na ₂ O		0.09	0.02
SO ₃	≤4%	2.22	2.48
P.A.F		4.66	4.31
CaO .L	0.10%	0.61	0.5
RI		1.09	4.35
Cl	≤ 0.05	0.021	0.008

Les ciments de classe **CPJ-CEM II / 32.5** possèdent des propriétés physico-chimiques satisfaisantes aux exigences normatives NA 442/2000.

La PAF influe directement sur la résistance du ciment, au delà des limites prescrites pour chaque type de ciment. La résistance de ce dernier diminue, perte de poids au feu 100C°.

- Un grand pourcentage de CO₂ qui se dégage (décarbonatation en CO₂).
- D'un peu d'eau qui s'évapore.
- Des produits volatiles.

II.1-2-2/ La composition potentielle (Bogue) [16].

Si le refroidissement est très lent, la détermination minéralogique du clinker peut être calculé par les équations de Bogue.

Ces équations indiquent la composition potentielle et permettent la détermination des composés :

- C₃S : silicate tricalcique,
- C₂S : silicate bicalcique.
- C₃A : Aluminate tricalcique.
- C₄AF : Alumineux ferrite tetracalcique.

Et de gypse à partir des teneuses pondérales en oxydes indiquées dans le tableau.

Tableau (II.2) : Composition potentielle des ciments [16].

C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)
58.08	16.6	8.65	9.82

II.1-2-3/ Rôle du C3A et de la portlandite :

Dans le cadre de cette étude, la dégradation chimique est un facteur primordial. Le mécanisme d'attaque comprend la dissolution de la portlandite, la décalcification des C.H.S et la formation de sel expansif.

Il est bien connu que la teneur en C₃A, qui dépasse (>5%) d'après la norme, conduit à la formation d'un excès de portlandite. La forte teneur en portlandite diminue la résistance à l'attaque chimique.

Ces conditions favorisent la formation d'ettringite. De plus, une faible teneur en C₃A s'accompagne d'une forte teneur en C₃S et ceci provoque une augmentation de la résistance mécanique. La micro fissuration pendant la cure sera limitée.

II.1-3/ LA POUZZOLANE :

La pouzzolane utilisée est une roche naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamdi, située à 2500m au sud de Beni-saf. Suite à une étude comparative établie en 1985 par la cimenterie de Beni-saf, il a été décidé d'exploiter des scories et pierre ponce, qui présentent une meilleure qualité pour le ciment portland composé de pouzzolane [11].

II.1-3-1/ Analyse minéralogique et diffractométrique de la pouzzolane:

Tableau (II.3) : Analyse minéralogique de la pouzzolane:

Minéraux	Pourcentage
Feldspath Plagioclase (Anorthite : $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)	40
Pyroxène (Augite : $\text{Mg} \cdot \text{Fe})_2 \cdot \text{SiO}_6$)	15
Verre volcanique	14
Analcine (zéolithe)	12
Chlorite ($6\text{Mg} \cdot 5\text{AlSi} \cdot 3\text{O}$ $6)(\text{OH})_8$)	6
Hématite : Fe_2O_3 , Magnétite : Fe_3O_4 , Biotite : $2\text{k}(\text{Fe} \cdot \text{Mg})_2\text{AlSi}$ $3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8
Autre minéraux ; basalte, calcite dolomite, argile....etc.	5

Les analyses par diffraction X ont été réalisées au niveau du laboratoire des matériaux et durabilité des constructions à INSA de Toulouse (LMDC) - France.

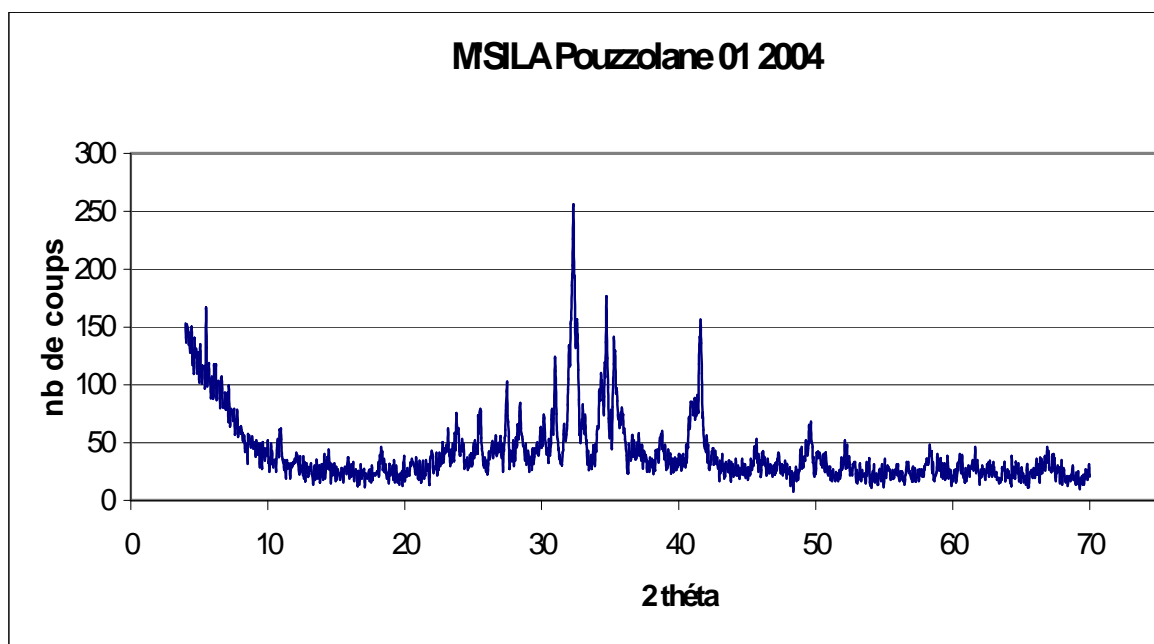


Fig.(II.1) : Analyse par diffraction X de pouzzolane.

Commentaire : Le diagramme de pouzzolane est plus complexe, il est composé du quartz, (31°), du carbonate à 34° , et l'hématite à 41° et surtout des feldspaths plagioclases type albite à 32° .

II.1-3-2/ Analyse chimique et diffractométrique du ciment pouzzolanique :

Tableau (II.4) : Analyse chimique du ciment pouzzolanique :

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF	Cl ⁻
(%)	46.54	17.34	9.91	10.10	3.81	0.22	1.48	3.23	4.30	0.021

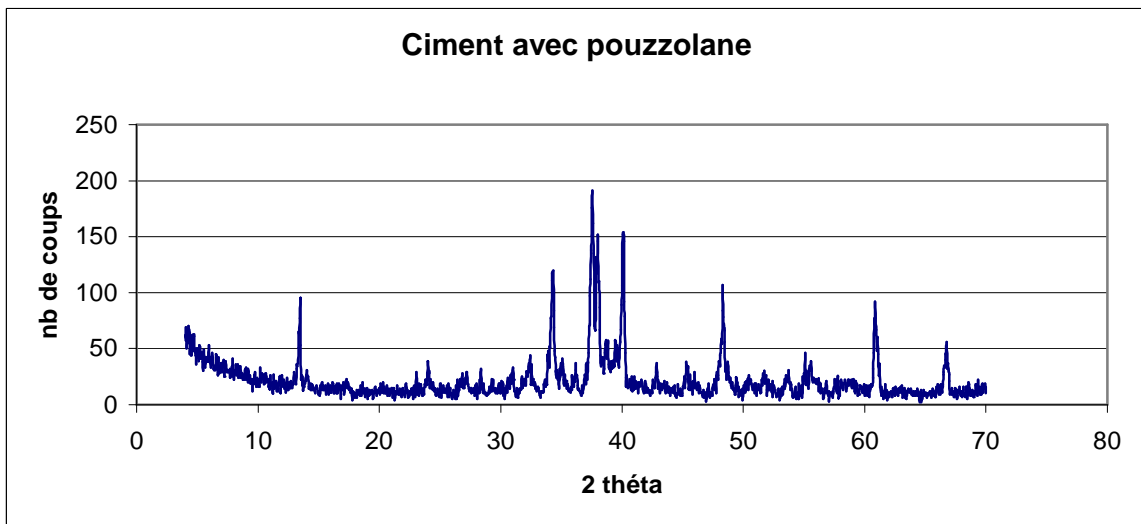


Fig.(II.2) :Analyse par diffraction X du ciment pouzzolanique .

Commentaire : Le ciment composé de pouzzolane présente lui aussi des pics de C₃A, caractéristiques du ciment portland. Par contre, le premier grand pic à 13 n'a pas été identifié

II.1-4/ LE CALCAIRE :

Les roches calcaires sont d'une composition simple, elles sont constituées par 75% de carbonate de chaux mélangé à un autre matériau (argile, silice, magnésie, oxyde métallique) [27].

II.1-4-1/Analyse par diffraction X du calcaire :

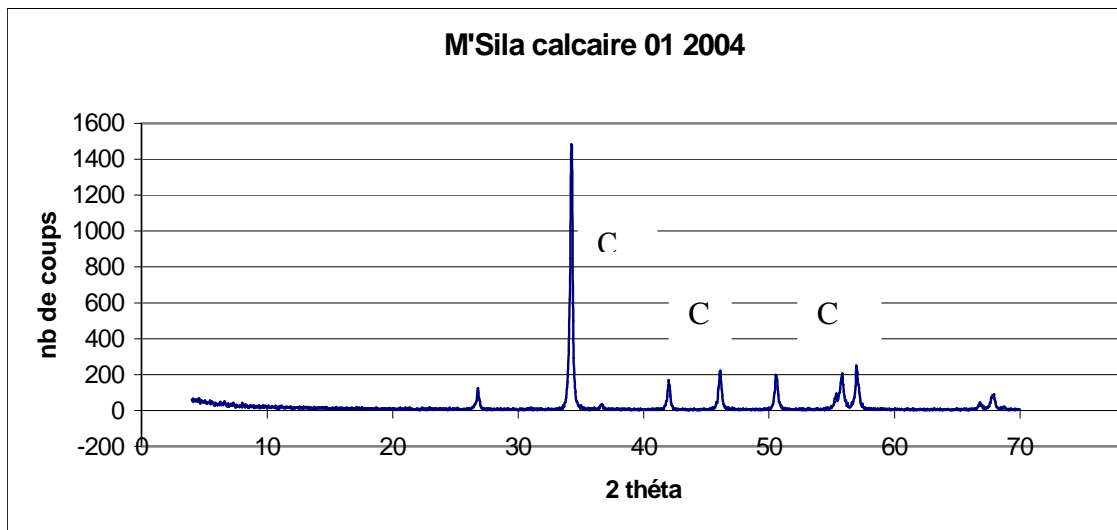


Fig.(II .3) :Analyse par diffraction X du calcaire.

Commentaire: Le calcaire c'est du carbonate pur.

II.1-4-2/Analyse chimique et diffractométrique du ciment calcaire :

Tableau (II.5) : Analyse chimique du ciment calcaire :

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF	Cl ⁻
(%)	19.1	3.95	3.7	63.1	1.23	2.48	0.13	0.02	4.31	0.008

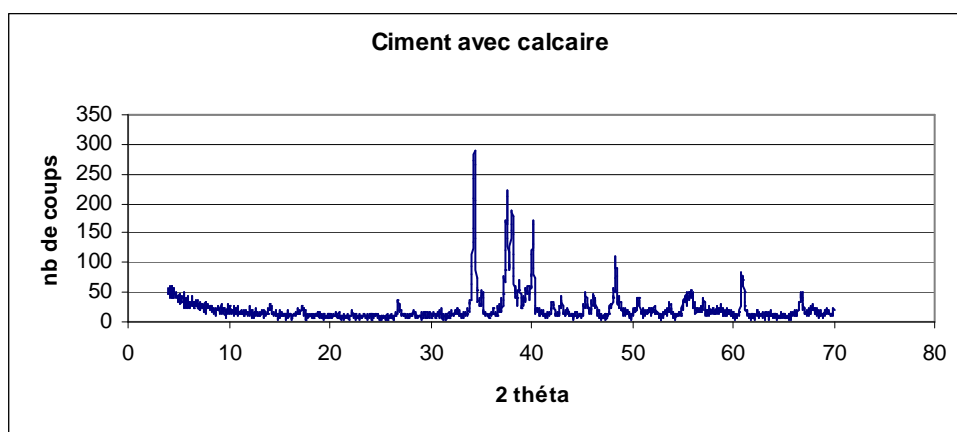


Fig.(II.4) : Analyse par diffraction X du ciment calcaire .

Commentaire : Le ciment calcaire présente surtout les pics de C₃S, avec un renforcement du pic à 34°, par le carbonate (calcaire), et peu de C₃A à 39°.

II.1-5/LE CIMENT PORTLAND :

Le ciment portland artificiel résulte du broyage d'une roche artificiel, le clinker, avec environ (5%) de gypse pour la régularisation de la prise. Le clinker utiliser est celui de la Cimenterie Ain Touta, de BATNA.

II.1-5-1/Analyse chimique du clinker :

Tableau (II.6) : Analyse chimique du clinker.

oxyde	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Rins	SO ₃	CaOL
Teneur limite (%)	60-69	18-24	4-8	1-8	< 5	< 2	< 3	0.93
Valeur moyenne (%)	63.1	20.9	6.3	3.31	1.58	0.95	0.4	

II.1-5-2/Analyse chimique et diffractométrique du gypse

Tableau (II.7) : Analyse chimique du gypse.

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF
(%)	4.1	0.67	0.1	25.3	0.57	33.84	35.75

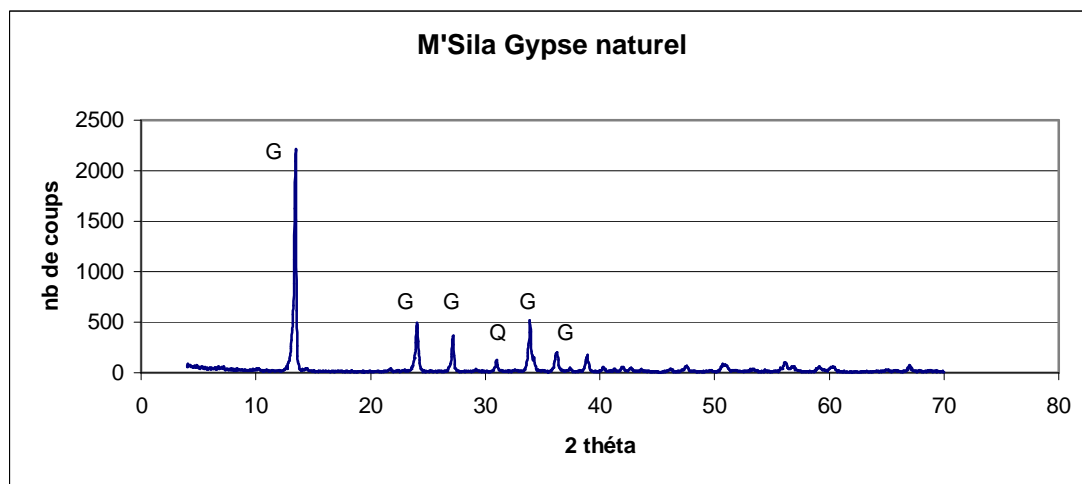


Fig.(II.5) : Analyse par diffraction X du gypse .

Commentaire :

C = calcite, Q = quartz, G = gypse.

Pour le gypse naturel, il n'y a presque que du gypse, avec un peu de carbonate (pic à 27°), et un peu de quartz (pic à 31°).

II.1-5-3/Comparaison entre différents composants (gypse +ciment calcaire+calcaire).

L'analyse thermique différentielle (ATD) ;

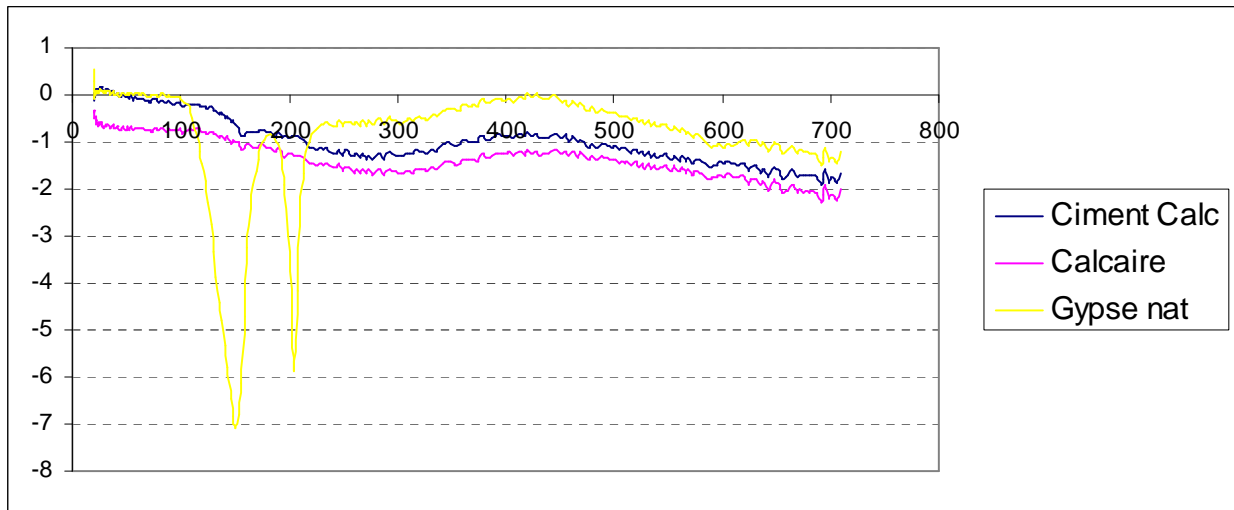


Fig. (II.6) : Comparaison entre différents composants (gypse +ciment calcaire+calcaire).

II.1-5-4/Caractéristique physico mécanique des ciments :

Tableau (II.8) : Caractéristique physico mécanique des ciments

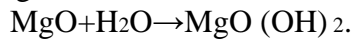
Caractéristiques	Dénomination du ciment		Norme	
	pouzzolane	calcaire		
Masse spécifique (g/cm ³)	3.04	3.06	NF-P18-555	
Finesse de mouture (cm ² /g)	3890	3895	EN196-6	
Refus sur tamis 45Mm	17.92			
Consistance normale E/C(%)	27.5	25	EN-196-3	
Temps de prise	début	2h	2h 15min	EN-196-3
	fin	3h 30min	3h 15min	
Expansion de chatelier	A chaud	1.5	2	EN-196-3
	A froid	0	0.5	
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.98	0.987	NF-P18-555	

D'après les résultats obtenus, l'expansion à chaud comme à froid ne dépend pas du pourcentage d'ajouts, mais elle dépend plutôt de la composition chimique du produit fini, qui est indirectement liée au pourcentage d'ajouts. Ces derniers fixent la quantité du clinker dans le composé et celui-ci détermine, en grande partie, la composition chimique finale du mélange.

L'expansion à chaud et froid dépend de :

a)-L'expansion à chaud comme illustré ci-dessous :

Le MgO, reste à l'état libre, se combine avec l'eau selon la réaction :



Le volume Mg (OH)₂ est très supérieure à celui de MgO, ce qui provoque l'expansion à chaud, et ce dernier provoque la fissuration des ouvrage en béton.

II.1-5-5/ Activité du ciment :

Pour constater les résistances réelles, on réalise des essais de traction par flexion et de compression sur des éprouvettes (4×4×16) cm³.

II.1-5-6/ Préparation des mélanges :

Pour les matrices cimentaires (pâte et mortier)

- 1- CPJ avec ajout pouzzolane (20%) +75% clinker+5% gypse), avec et sans adjuvant.
- 2- CPJ avec ajout calcaire (15%) +80% clinker+5% gypse), avec et sans adjuvant.

Tableau (II.9) : Préparation des mélanges

ajout (%)	Pouzzolane		calcaire	
	S.Adj	Avec Adj.	S.Adj	Avec Adj.
20%	P	P+Adj.	-	-
15%	-	-	C	C+Adj.

II.1-6/ LE SABLE :

Nous avons utilisé, pour la confection du béton, un sable provenant des abords de l'oued Maiter. Cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, dont le vent provient du sud est chargé de grains fins.

L'avancée du désert a permis donc, au fil des ans, le dépôt du sable dans l'oued, qui par la suite a assuré son transport et son étalement. Ainsi plusieurs couches de sable fin mélangé aux galets de l'oued se sont formées sur des profondeurs de plusieurs mètres, le long de l'oued Maiter. Ce sable est d'origine édenienne. C'est un sable de dune. Le matériau mélangé de grains fins et de galets à été tamisé à travers des mailles égales à 50mm, puis livré aux différents chantiers des régions environnantes tel que M'sila..

II.1-6-1/Caractéristiques physiques du sable :

Tableau.(II.10) : Caractéristiques physiques du sable:

Sable	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique Apparente (g/cm ³)		Porosité %		Compacité %	Teneur en eau %	Degré D'absorption.	Equivalent de sable	
		E. lâche	E. com.	E. lâche	E. com.				E.S.V	E.S.P
0-5	2.6	E. lâche	E. com.	E. lâche	E. com.	67.76	0.03	1.87	E.S.V	E.S.P
		1.63	1.82	35.1	26.3				76.3	71.7
Norme	NF P18-555	N PF18-553		NF P18-554			NF18-555	NF-P18-555	NF P18 -598	

La porosité du sable à l'état lâche et de l'ordre 35.1 moins que 40%, elle est un peu plus grande que 30%. Par conséquent, ce sable n'est pas de meilleure qualité mais il peut être tout de même utilisé et il est considéré comme acceptable du point de vue porosité.

Equivalent du sable :

$$75 < E.S.V < 80.$$

$$70 < E.S.P < 80.$$

C'est un sable à faible pourcentage de fine argileuse, convenant parfaitement pour le béton de haute qualité.

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P18 -554, et NF P18-555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%, c'est à dire $Ab = 5\%$. Donc, dans notre cas, cette propriété est vérifiée

II.1-6-2/Analyse granulométrique, chimique, diffractionométrique du sable de dune : NF P18-304.

Tableau (II.11) : Analyse granulométrique du sable de dune.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	132	132	8.8	91.2
1.25	92	224	14.93	85.07
0.63	110	334	22.26	77.74
0.315	388	722	48.13	51.87
0.125	735	1457	97.13	2.87
0.08	33	1490	99.33	0.67
Fond	10	1500	100	0

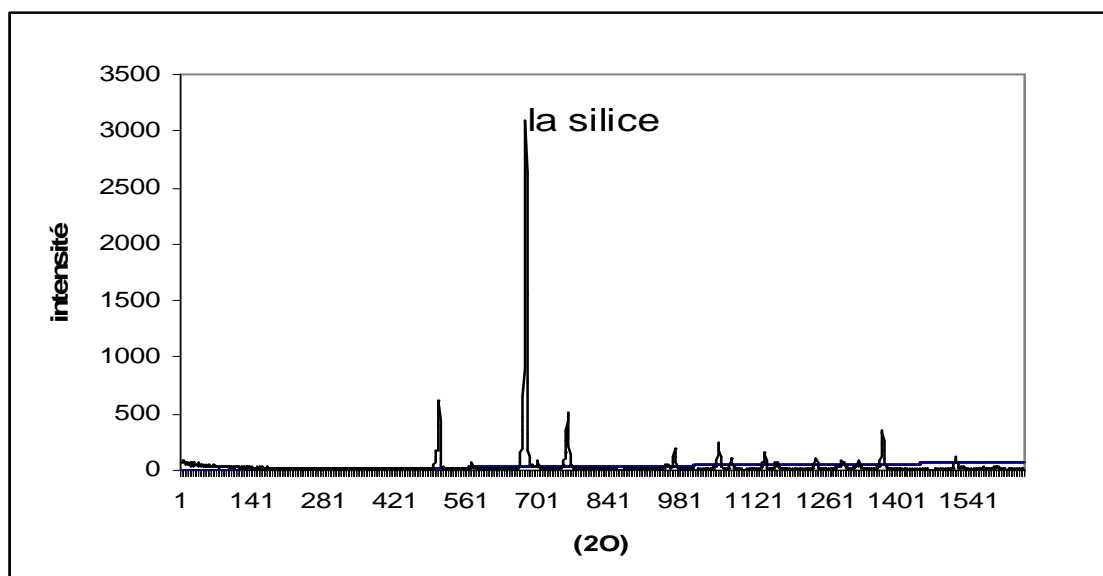
Remarques :

D'après les résultats présentés ci-dessus :

- 1- Avec un pourcentage de (49%) des grains de sable compris entre 0.315 et 0.125, le sable est comme fin.
- 2- Le pourcentage défini (particule inférieure à 0.08mm) est inférieur à 5%, ceci montre que ce sable est propre et n'a pas besoin d'être lavé avant son utilisation du point de vue de la granularité.
- 3- la plupart des grains sont de diamètre sensiblement égaux (le caractère homo métrique du sable).
- 4- Module de finesse : $Mf=1.85$.

Tableau (II.12) : Analyse chimique du sable :

Constituants		Sable de dune
Elément	Teneur (%)	
Silice	SiO ₂	80.4
Chaux	CaO	10.5
Oxyde ferrique	Fe ₂ O ₃	0.4
Alumine	Al ₂ O ₃	1.84
Oxyde de magnésium	MgO	0.44
Perte au feu	P.A.F	4.08

**Fig.(II.7) : Analyse par diffraction X du sable de dune :**

Commentaire: Le sable de dune est un sable très pur à haute teneur en silice.

II.1-7/ GRAVIERS:

Dans ce paragraphe, on présente les caractéristiques du gravier utilisé (gravier concassé).

II.1-7-1/ ORIGINE DU GRAVIER :

Le gravier de base utilisé dans la confection du béton est obtenu par concassage de la roche d'une carrière située à 25 km de M'sila, en allant vers BBA (Carrière de Cosider).

II.1-7-2/ Caractéristiques physiques des graviers utilisés :

Tableau (II.13) : Caractéristiques physiques des graviers utilisés :

Caractéristiques	Dénomination			Normes
	3/8	8/16	16/25	
Masse (g/cm ³) volumique absolue	2.6	2.62	2.63	NF P18-554
Masse (g/cm ³) volumique apparente	1.23	1.36	1.38	NF P18-554
Porosité (%)	50.63	47.90	48.70	NF P18-554
Degrés d'absorption d'eau (%)	1.78	1.36	1.10	NF P18-554
Teneur en eau (%)	0.20	0.27	0.32	NF P18-554

II.1-7-3/Analyse granulométrique

Tableau (II.14) : Analyse granulométrique : fraction 3/8, (3Kg).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	0	0	0	100
6.3	308	308	19.25	80.75
5	534	842	52.62	47.38
4	427	1269	79.31	20.69
3.15	223	1492	93.25	6.75
2.5	99	1591	99.43	0.57
Fond	8	1599	99.94	0.06

Tableau (II.15) : Fraction de 8/16 (3.5Kg).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	32	32	0	99.09
12.5	855	887	25.34	74.66
10	1699	2586	73.88	26.12
8	773	3359	95.97	4.03
6.3	135	3494	99.83	0.17
5	3	3497	99.91	0.09
Fond	3	3500	100	0

Tableau (II.16) : Fraction de 16/ 25, (3.5Kg).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	0	0	0	100
20	1497	1497	49.9	50.1
16	976.5	2474.5	82.48	17.52
fond	525.5	3000	100	0.00

II.1-8/LES ADJUVANTS:**Fluidifiant : Médafluid SFR 122**

C'est un super plastifiant, haut réducteur d'eau. Il présente comme effet secondaire un retard de prise [33]. Il est compatible avec les ciments CPA, CPJ, CRS.

Effet :

Utilisé pour la réalisation de tous bétons rhéoplastiques, c'est à dire des bétons fluides s'écoulant facilement sans ségrégation avec un rapport E/C très faible ; de plus il permet :

Sur béton frais

D'augmenter la maniabilité du béton.

De faciliter la mise en œuvre

De retarder le temps de prise.

Sur béton durci

D'augmenter l'imperméabilité.

D'augmenter les résistances mécaniques à long terme.

D'augmenter les résistances aux agents agressifs.

D'augmenter la durabilité

De diminuer le retrait [33].

Tableau (II.17) : Caractéristiques du Médafluid SFR122 (fluidifiant).

Forme	Couleur	-PH	Densité	Teneur en chlore
liquide	Marron foncé	6.7±0.1	1.18±0.1	<1g /l

Fluidifiant : Medaplast SP : C'est un super plastifiant réducteur d'eau. Il est compatible avec tout les types de ciment et se dilue parfaitement dans l'eau de gâchage.

Effet : Il permet :

- d'améliorer l'ouvrabilité à rapport E/C constant.
- de diminuer la ségrégation.
- de réduire le rapport E/C de 10 à 15%.
- de réduire le dosage en ciment de 5 à 10%.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques.
- d'augmenter l'imperméabilité.
- d'augmenter la cohésion granulats ciment.
- d'augmenter la durabilité du béton.
- d'obtenir de beaux bétons brut au décoffrage [37].

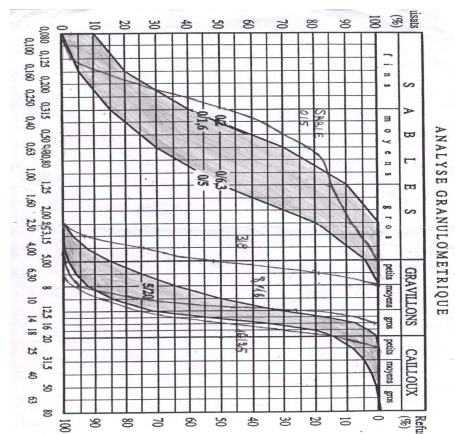
Tableau (II.18) : Caractéristiques du Médafluid SP40 fluidifiant).

Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore
Liquide	Marron	7-8	1.18	<1g /l

II.2-9/L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable fournie au laboratoire de génie civil.

Fig.(II.8) :La courbe d'analyse granulométrique du sable et graviers :



II.2/PROGRAMME EXPERIMENTAL :

Selon Le fascicule de documentation « Classification des environnements agressifs »-la norme française NF-P18-011, Les environnements agressifs sont classé dans le tableau II.1. Juin 1992 [15].

Tableau (II.19) : Valeurs limites pour les classes d'exposition en cas d'attaque chimique [3].

	XA1	XA2	XA3
Elément en béton			
SO⁻²₄ mg/l	≥200 et ≤600	>600 et <3000	> 3000 et ≤ 6000
SO⁻²₄ mg/kg dans le Sol en général	≥2000 et ≤ 3000	> 3000 et < 12000	≥12000 et ≤ 24000
PH de l'eau	≤6.5 et ≥5.5	≤ 5.5 et ≥4.5	< 4.5 et ≥4.0
Degrés d'acidité du sol	> 20° C		
CO₂ mg/l dissolution de calcaire dans l'eau	≥ 15 et ≤40	> 40 et ≤ 100	> 100
NH⁺₄ mg/l dans l'eau	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et < 60	>60 et <100
Mg⁺ 2mg/l	≥300 et ≤1000	> 1000 et ≤3000	> 3000

II.2-1/Sélection des traitements :

Le but du traitement chimique est de simuler l'altération des pâtes et des mortiers afin de comprendre les modifications des matériaux, et identifier le processus de dégradation. Un échantillon servira de témoin, notre démarche expérimentale repose sur les points suivants :

- Traitements des différents milieux,
- Le milieu de l'eau sert de témoin.

II.2-2/ Environnement de l'exposition et leur classification :

Tableau (II.20) : Les milieux d'exposition de la pâte et du mortier :

Milieu / Code	(%)	Classification de l'exposition NF-P18-011	Condition de conservation
Eau	-	-	20 °C , HR=60%
Sulfate (Mg+Na)S	5%	≥ XA3	
Na Cl (Na Cl)	5%	≥ XA3	
Acide sulfurique (As)	PH= 4		
Nitrate d'ammonium (Na)	5%	≥ XA3	

Tableau (II.21) : Les milieux d'exposition du béton.

Milieux	(%)	Classification NF-P18-011	Condition de conservation
Sulfate de calcium (CaSO ₄)	20%	≥XA3	T°, varie entre (30-40)°C
Na CL	20%	≥XA3	T°, varie entre (30-40)°C
Acide sulfurique (As).	PH=4		T°, varie entre (30-40)°C
Sulfate d'alumine (la pâte blanche)(Al ₂ O ₃) ₄ SO ₄ (Al S)	20%	≥XA3	T°, varie entre (30-40)°C
Eau de mer (Em)	Artificielle	≥XA3	T°, varie entre (30-40)°C

II.2-3/ Plan expérimental des différents traitements :

Le programme expérimental est montré sur le tableau suivant qui illustre les déroulements des essais.

Tableau (II.4) : Plan expérimental

La matrice cimentaire	Type de ciment	Les paramètres	Les milieux d'expositions	âge	Nombre de gâchée	Nombre d'éprouvette
Les pâtes (pâte, mortier)	CPZ (20%) CPC (15%)	Résistance à la compression (Mpa) Résistance en flexion (Mpa) Avec et sans adjuvant (SFR, SP).	Témoin Na Cl S (Mg+Na) As Na	7 j 28j 90j	180	540
béton	CPZ (20%)	Résistance à la compression (Mpa) La porosité (%) La perméabilité (m/s) Avec et sans adjuvant (SFR, SP).	Témoin Na Cl S Ca Sal As Em	28j 90j 180j	54	486

II.2-4/ Confection des mélanges et conservation :

Des éprouvettes sont destinées aux tests de résistance mécanique (flexion.compression). Le mélange de chaque gâchée comprend, selon la norme (EN 196-3) les quantités suivantes ;

Sable normale	1350g.
Ciment	450g.
Eau	225g.

Le sable utilisé pour la confection des mortiers est un sable normalisé avec un rapport E/C = 0.5. Il est contrôlé et certifié conforme au Normes (EN196-1). Le gâchage a été confectionné suivant la norme indiquée. Ce mélange est effectué avec un rapport agrégat/ciment de 3.

Le mélange de mortier est placé dans les moules (4×4×16) cm³ ; chaque gâchage permet la confection de 3 éprouvettes, avec et sans adjuvant.

Pour la pâte pure, des essais sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³ sont confectionnées selon chaque mélange avec un rapport E/C=0.4, avec ou sans adjuvant.

Pour les béton à base de ciment pouzzolanique, Les éprouvettes sont destinées aux essais de porosité, perméabilité, et résistance mécanique.

II.2-5/ Condition de conservation :

La durée de cure est un facteur important de la durabilité, ceci surtout pour les ciments composés. Dans la perspective de notre étude, quatre régimes de cure ont été adoptés; une cure de 7,28 et 90 jours, pour les matrices cimentaires et 180 jours pour le béton.

Pour les éprouvettes de pâte et de mortier, elles sont directement conservées après coulage dans une chambre humide (HR=90%, T=20°C), pour une période de 24h. Elles seront ensuite plongées dans des solutions et placées dans une salle de conservation (T=20°C, HR=60%).

La dégradation d'un mortier et d'une pâte placée dans un milieu agressif conduit à une modification progressive de la pâte et du mortier. Le but de cette étude est de caractériser cette modification en premier lieu. Pendant la période de traitement, ils peuvent provoquer des effets dynamiques : gonflement, fluage, lixiviation, fissuration.

En second lieu, le matériau subit une modification permanente de ses propriétés, notamment la résistance mécanique qui permet de caractériser ces modifications

III.1 / MISE EN PLACE DES ESSAIS DE DURABILITE SUR LA PATE ET MORTIER :

Ce chapitre présente les expérimentations primordiales qui seront réalisées pour évaluer la durabilité des bétons. Celle-ci est liée à la qualité du béton, mais aussi à la nature de son environnement. Si le processus de détérioration est complexe et fait intervenir un nombre important de paramètres, l'attaque chimique des bétons s'effectue principalement sur la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenue dans la pâte de ciment. L'attaque des silicates et de chaux et aluminates hydratés n'est pas négligeable. Si les produits de réaction sont solubles, la matrice devient de plus en plus ouverte.

Dans cette étude, le choix des milieux est assez représentatif, dans le but:

- d'améliorer le comportement mécanique de deux types d'ajouts minéraux dans le ciment qui sont en générale bien adapté au milieu agressif (pouzzolane, calcaire).
- d'étudier l'influence de deux types d'adjuvants super plastifiants qui permettent la confection des matrices cimentaires et bétons.
- d'évaluer la profondeur de la zone de basicité réduite.
- d'observer la modification de la structure interne (diffraction RX).

Les essais sur béton (essai de perméabilité, porosité et résistance mécanique) sont primordiaux pour l'évaluation de la durabilité à travers les paramètres à identifier.

III.2/DETERMINATION DES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES CIMENTS :

III.2-1/Essai de finesse :

La finesse de mouture présente un facteur important dans le phénomène de l'hydratation des ciments, ce qui influe directement sur les propriétés mécaniques du ciment. La finesse de mouture est déterminée par le « perméabilimètre de Blaine », qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour le passage d'un volume d'air à travers les couches du haut après avoir déterminé la température, densité et masse volumique [17].

$$S=K(\sqrt{e} \sqrt{t})/e(1-e)\sqrt{\mu} \text{ (cm}^2 \text{ /g)}\dots\dots\dots(1).$$

T : temps de passage de l'air entre les deux traits en seconde.

K : constante de l'appareil, égale à 28,26. .

E : porosité de la couche des grains g/cm^2

e: masse spécifique des grains g/cm^2 .

μ : viscosité de l'air, la température de l'air est de 20°C.

$$N=0,0001808 \sqrt{\mu}.$$

III.2-2/ Essai de consistance : NORME (NFP15-402).

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du Temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite consistance normalisée [17].

III.2-3/ Essai de prise : NORME (NFP 15-413) .

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée. L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.133 mm de diamètre. Alors, quand sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que :

$$D= 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm} [17].$$

Type de ciment en fonction du temps de prise). :(NFP 15-403) [8].

Désignation	Temps de prise
Ciment à prise rapide	5 à 8 minutes
Ciment à prise semi lente	8 à 30 minutes
Ciment à prise lente	30minutes à 6 heures
Ciment à prise très lente	Plus de 6 heures

II.2-4/ Essai de gonflement : (NFP 15-432)

Le gonflement est engendré par les agents expansifs ; la détection de ce phénomène se fait à l'aide des aiguilles de chatelier

- pour l'essai à chaud : la pâte est mise dans l'eau 3h : 30min jusqu'à ébullition
- pour l'essai à froid : la pâte est conservée 7 jour dans l'eau à $(20 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$.

Si le gonflement excède 10mm, il y a trop de gypse ou de chaux dans la pâte. Selon la norme **NF P (15-432)** , l'expansion doit avoir une valeur inférieur à 10mm [17].

III.3/LA CARACTERISATION DE LA STRUCTURE INTERNE :

Un milieu agressif peut provoquer une modification physico-chimique d'une matrice cimentaire. Pour caractériser ces modifications, nous avons adopté les méthodes suivantes :

III.3-1/Analyse chimique coloration:

Une décalcification du mortier peut entraîner une chute de son pH due à la consommation de chaux. Cette modification du pH est mise en évidence par un indicateur coloré (phénophtaléine, virage (8,2-10))

Le test de colorimétrie permet de quantifier la profondeur d'une zone où il y a un abaissement du pH du mortier et béton. Cette chute de pH n'est pas seulement engendrée par la carbonatation, mais aussi dans un sens plus général, par la diminution de chaux ou la décalcification des CSH engendrés par un autre agent agressif [23].

III.3-2/Analyse par diffraction X :

Cette analyse est réalisée par diffractométrie de rayon X.

*Cette étude avec DR X comprend une caractérisation de la modification de la surface analysée par diffraction X des échantillons.

* L'analyse au rayon X à été réalisée à l'aide d'un diffractomètre siemens D500, utilisant une anticathode de cobalt (Cokx, $L=1,0789A^\circ$) sur une plage de 10° à 70° , avec un pas d'avancement de $0,02^\circ$ et un temps de compactage de 125min.

Ces échantillons sont réalisées par diffractométrie de Rayon X et permettent :

-De caractériser la microstructure des échantillons pâte pure et mortier.

- D'analyser des phases présentes.

-de connaître la composition chimique.

L'analyse en rayon X permet de déterminer la structure des minéraux, s'il sont amorphes ou cristallisés. La nature des phases cristallisées nous permet de suivre l'évolution de l'hydratation des ciments [39].

Ces analyses ont été menées sur deux types de ciment pour pâte et mortier.

III.4/ LES ESSAIS MECANIQUES:

III.4-1/ Mesure de la résistance à la compression et à la flexion (NORME (NF P 451))[17] :

L'essai consiste à étudier les résistances à la compression et à la flexion d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier, la seule variable est la nature du liant hydraulique et l'adjuvant utilisé.

-la résistance à la compression **RC** (mpa) sera calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{RC = P Max /S(2).}$$

P Max : l'effort enregistré au moment de la rupture de l'éprouvette.



Fig.(III.1) :Appareil de compression pour mortier(cimenterie de Ain Touta).

III.4-2/Essais de traction par flexion : [17]

Cet essai consiste à rompre en flexion une éprouvette de coté (a) et de longueur (L=4a) à l'aide d'une machine de flexion.

La résistance de traction par flexion

$$R_{fl} = \Delta p l / a^3 \dots \dots \dots (3).$$



Fig. (III.2) : Appareil de flexion (cimenterie de Ain Touta).

III.5/ ESSAIS DE POROSITE-PROCEDURE :

La porosité est un facteur qui influence plusieurs caractéristiques de matériaux à base de ciment. Elle régit notamment la résistance et la perméabilité, facteurs primordiaux dans l'évaluation de la durabilité [12].

L'objectif est de déterminer le pourcentage du volume des pores internes sur l'interconnexion des pores.

La méthode utilisée est celle de la norme (ASTMC642). Son avantage réside dans sa simplicité et le peu de moyens nécessaires à son utilisation.

L'essai de la porosité est réalisée sur des éprouvettes de dimension (10x10x10) cm³ en appliquant les étapes suivantes :

1-séchage à l'étuve à 105C° de l'échantillon, pendant au moins 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante, afin de faire évaporer toute la quantité d'eau évaporable ; cette masse est notée «**A**».

2-immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures.

3-chauffage jusqu'à ébullition pendant 5 heures, puis pesage de l'échantillon à l'air (soit «**C**»ce poids) puis pesage à l'eau (pesée hydrostatique),)(soit «**D**»ce poids) [20].



Fig.(III.3) :Appareil de mise en ébullition des éprouvettes (essai de porosité).



Fig.(III -4) Pesée hydrostatique des éprouvettes pour calcul de la porosité.

Calcul de la porosité :

La porosité est calculée par la formule : (Norme ASTM, C642)[21] :

$$V_p = (C - A / C - D) \cdot 100 \dots \dots \dots (4).$$

Avec :

V_p : volume des vides (%).

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

C : poids de l'air après immersion et ébullition (g).

D : poids à l'eau après immersion et ébullition (g).

III.6/ESSAIS DE PERMEABILITE :

La perméabilité quantifie quant à elle l'aptitude d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide. Elle caractérise un écoulement visqueux sous gradient de pression. Cet écoulement peut se produire dans un béton de barrage par exemple.

Ce processus est décrit par la loi phénoménologie de Darcy, sur laquelle on reviendra en détail ultérieurement [33].

Le but de cette méthode est de déterminer le temps de passage d'un volume d'eau délimité par des graduations des cellules, c'est-à-dire la durée d'une quantité d'eau qui traverse l'éprouvette en béton à partir des pores ou des microfissures à l'intérieur pour ressortir sur la surface extérieure de l'éprouvette[40].

III.6-1/Mesure de la perméabilité à l'eau :

La perméabilité **K** d'un matériau caractérise son aptitude à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression.

K est définie par la relation de Darcy qui exprime le débit volumique **Q** d'un fluide de viscosité **m** qui traverse une épaisseur **dz**. du matériau de section apparente **A** sous la différence de pression **dP**

$$Q = - (K / \mu) \cdot A \cdot dP / dZ \dots \dots \dots (5).$$

Cette relation suppose un régime d'écoulement laminaire dans les pores du matériau.

Q débit volumique d'un fluide de viscosité **μ**.

L'essai consiste à faire pousser de l'eau, par une pression de 7 bars à travers la surface d'une éprouvette araser pour en ressortir par la surface extérieure : la perméabilité est alors calculée par la loi de Darcy :

(Pression à l'intérieur de l'éprouvette –pression extérieur)/épaisseur du béton.

La pression à l'extérieur est équivalente à la pression atmosphérique, Elle est prise égale à 101,3KPa ; elle peut être exprimée comme un équivalent d'une colonne d'eau de hauteur de 10,34m.

Mesure de débit : loi de Darcy

$$K = Q.X / A.h \dots \dots \dots (6).$$

Où :

K : coefficient de perméabilité à l'eau.

Q : débit volumique (m³/s).

A : section de l'échantillon en (m²).

h : hauteur de l'eau.

X : épaisseur de spécimen (m).

III.6-2/Description générale de perméamètre :

Le perméamètre disponible au niveau de laboratoire de l'université Med Boudiaf de M'sila est schématisé. La technique utilisée est basée sur l'écoulement d'eau ; c'est à dire l'eau traverse l'éprouvette en béton sous l'effet d'une pression de 7 bars.



Fig.(III.6) :Des éprouvettes cylindriques(16×16)cm²

Des éprouvettes cylindriques (16cm de diamètre et 16cm de longueur, sont utilisés pour l'essai de perméabilité. Elles se composent de :

- 1- Trois cellules graduées de capacité 1000 L. Pour la mise en place de l'eau elles sont liées par deux conduites ; une pour le remplissage d'eau et l'autre pour l'air.
- 2- Trois emplacements, pour le maintien des éprouvettes cylindriques (16*16) cm munis d'un joint pour assurer l'étanchéité.
- 3- Conduite d'eau et d'air en pression.
- 4- Un régulateur de pression.
- 5- Un compresseur à air de capacité de 10 bars sert à la mise en pression à l'eau [20].



Fig.(III.6) :Perméamètre à l'eau(laboratoire de (Géomatériaux-M'sila).

III.7/ESSAIS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION :

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

Le principe est que L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

$$R = F / S$$

F : est la charge maximale en **KN**.

S : est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carrée.

R : la résistance à la compression en (Mpa).

III.8/ EXPERIMENTATION:

III.8-1/ Détermination de la composition du béton : [8]

Selon la méthode de Dreux Gorisse, on a déterminé la composition du béton :

- sable.....648kg /m³.
- Gravier3/8.....167kg/m³.
- Gravier8/16.....186kg /m³.
- Gravier 16/25.....861kg/m³.
- Ciment.....350kg /m³ .

III.8-2/Confection d'éprouvettes pour la perméabilité :

Pour la préparation des éprouvettes cylindriques (16×32) cm² qui seront après démoulage coupées en deux (16×16)) cm².

Après avoir vérifié et serré, nous avons préparé un mélange homogène et convenable pour une série de moules.

Le décoffrage se fait après 24 heures. Les éprouvettes seront conservées dans le milieu de l'eau potable.

III.9/Conservation des éprouvettes :

Après coulage, Les éprouvettes seront conservées a l'air pendant 24h. Après démoulage, elles seront immergées dans un bac qui contient de l'eau potable de laboratoire afin d'éviter l'évaporation prématurée d'eau.

En ce qui concerne les éprouvettes qui seront conservées dans les milieux agressifs, elles seront conservées dans de l'eau potable pendant 7jours (période initiale) et puis on les mets dans les milieux agressifs.

IV-1 / PRESENTATION DES RESULTATS :

Ce Présent chapitre consiste à présenter les résultats obtenus en laboratoire.

L'étude des différentes propriétés des matrices cimentaires (la pâte, le mortier et le béton), exposées au milieu agressifs, fait l'objectif de la corrélation entre les différents paramètres établis afin de découpler l'influence de l'âge, le type de ciment, avec la résistance mécanique, comme le montre les courbes .

Les paramètres étudiées, tel que la perméabilité, la porosité, la résistance à la compression et à la flexion varient en fonction :

- De l'âge.
- De la nature du milieu agressif, (degrés d'agressivité).
- Du type de ciment.
- De deux type d'adjuvants fluidifiants.

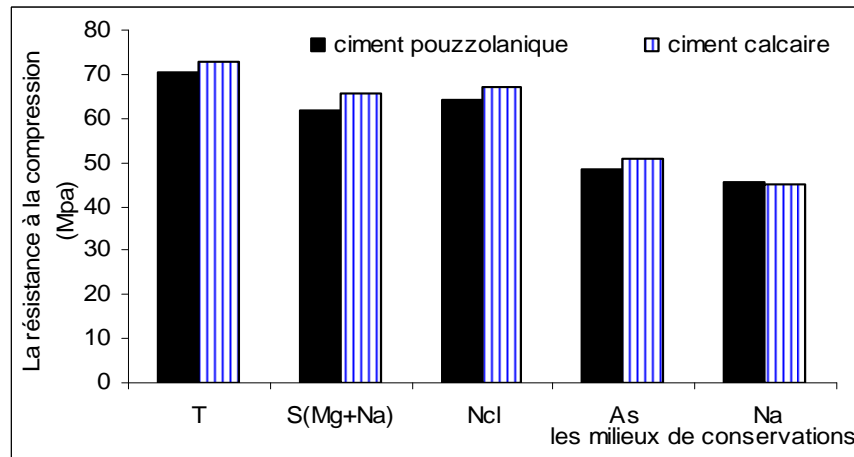
IV.1-1/ Les résistances mécaniques des matrices cimentaires (pâte,mortier) dans les différents milieux de conservation :

Les résultats des résistances mécaniques obtenus sur la pâte pure et le mortier des deux types de ciment (pouzzolane, calcaire) sont représentés dans les tableaux. (Voir annexe)

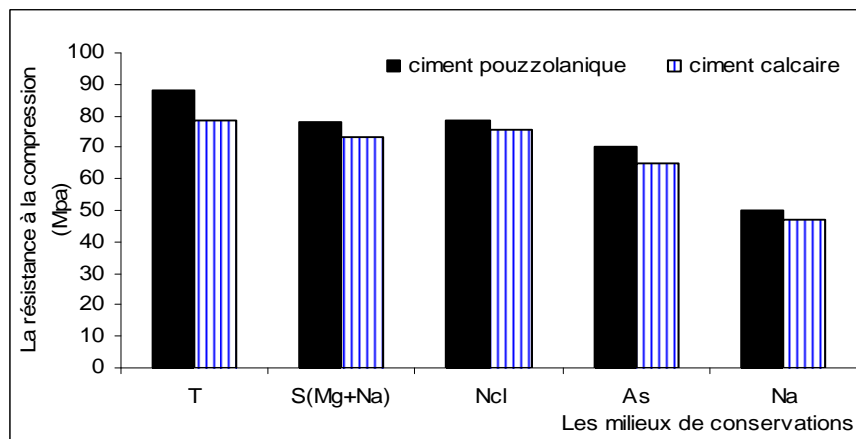
IV.1-2/ Influence des milieux de conservation sur les résistances mécaniques des matrices cimentaires :(Pâte, mortier)

Fig.(IV.1) Variation de la résistance à la compression(MPa) de la pâte de ciment en fonction des milieux de conservation , paramètre : type de ciment.

a)- 7jours.



b)- 28 jours.



c)- 90 jours.

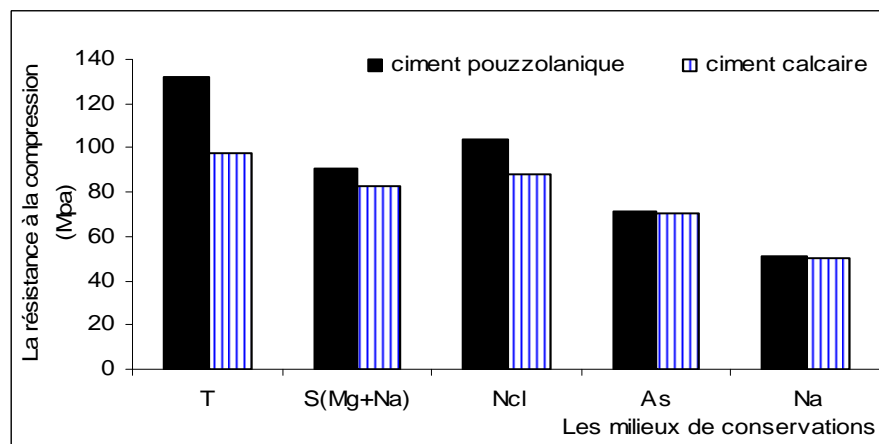
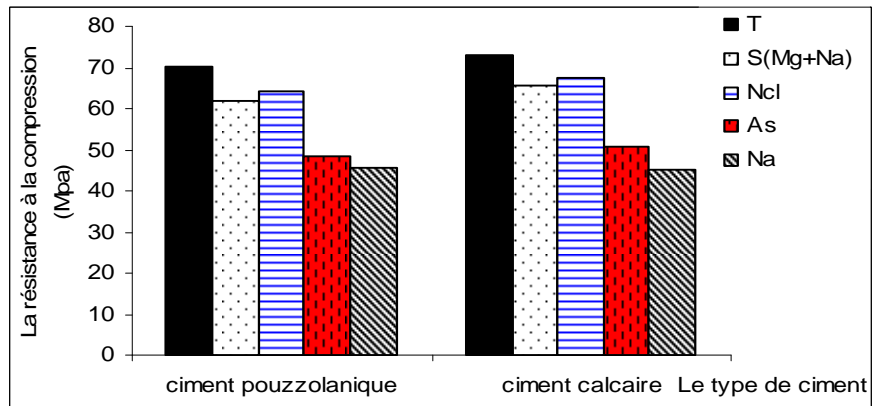
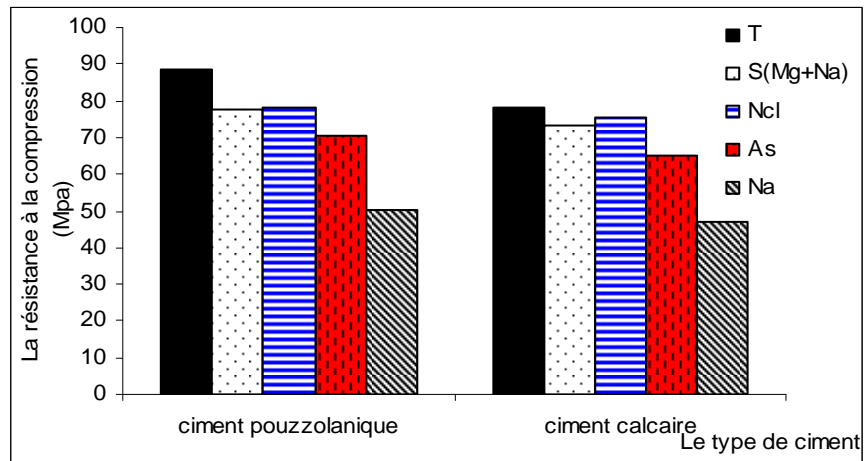


Fig.(IV.2): Variation de la résistance à la compression(MPa) dans les différents milieux de conservation en fonction du type de ciment, paramètre : milieu de conservation

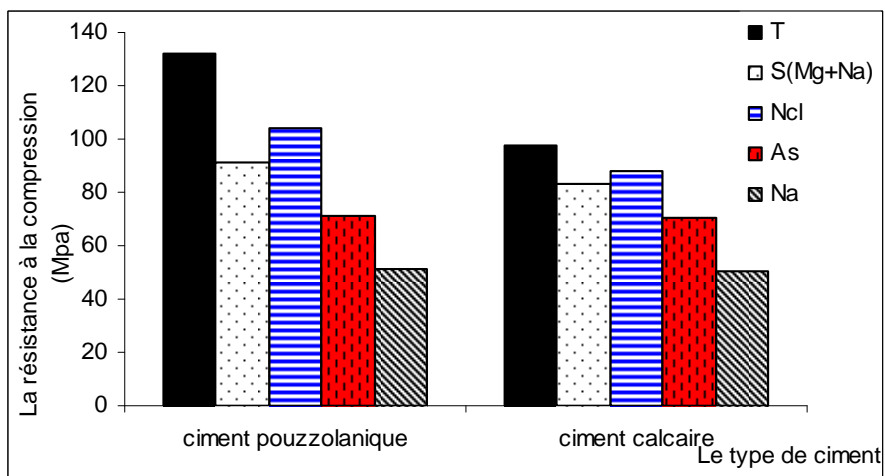
a)- 7 jours.



b)- 28 jours.



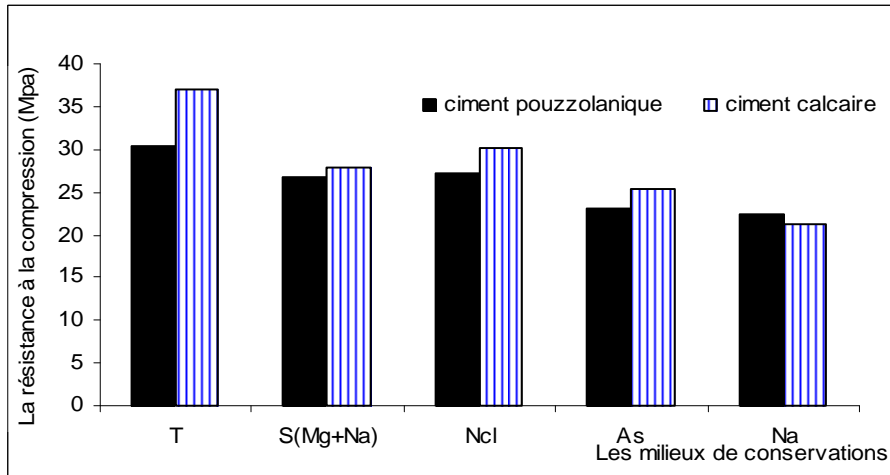
c)- 90 jours.



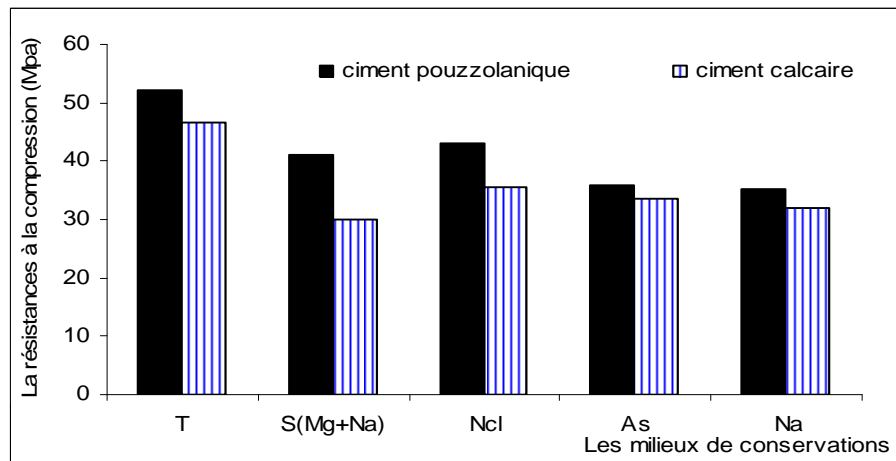
Pour le mortier :

Fig. (IV.3) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier en fonction des Milieux de conservation, paramètre : type de ciment.

a)- 7 jours.



b)- 28 jours.



c)- 90 jours.

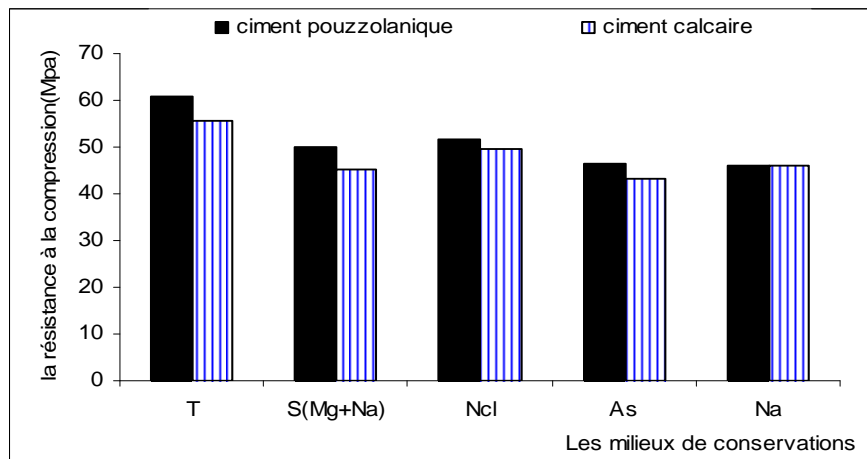
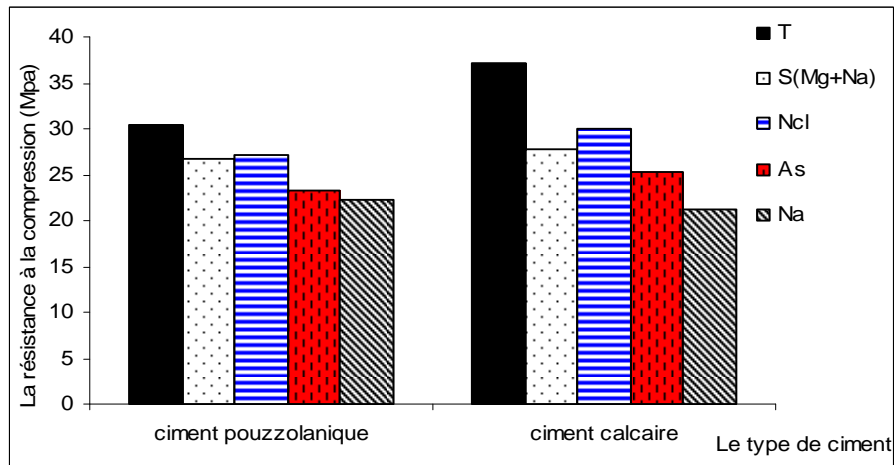
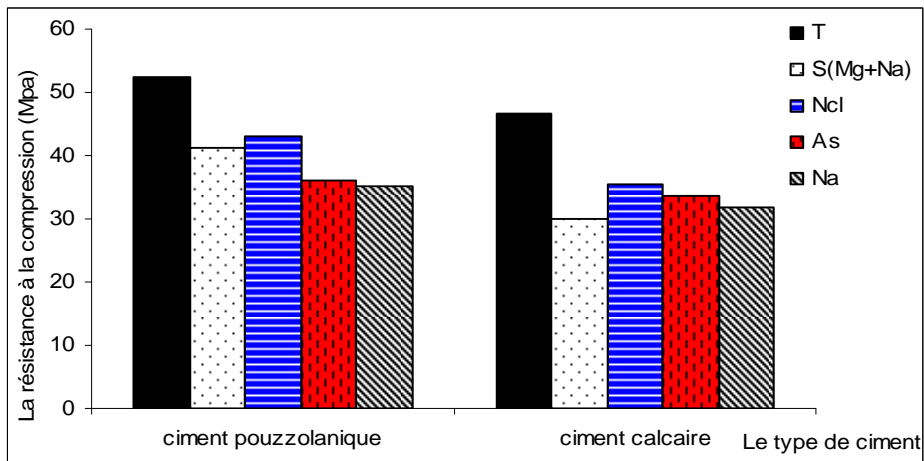


Fig.(IV.4) : Variation de la résistance à la compression(MPa) dans les différents milieux de conservation du mortier en fonction du type de ciment , paramètre : milieu de conservation.

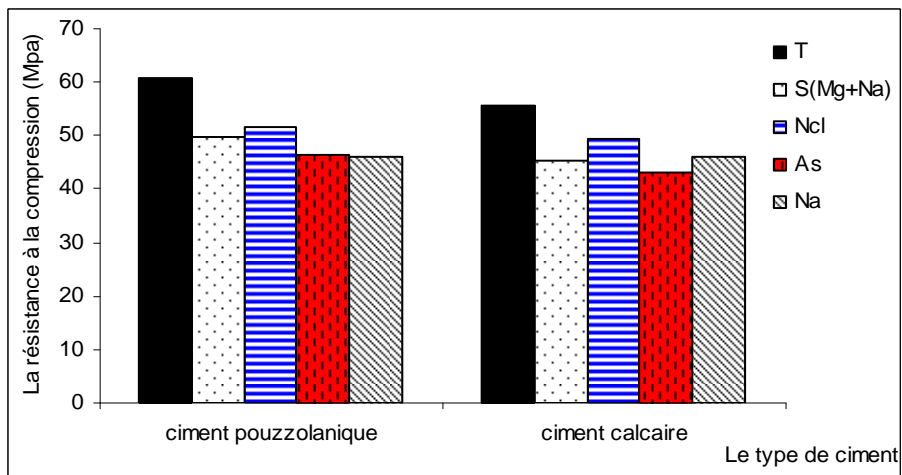
a)- 7 jours.



b)- 28 jours.



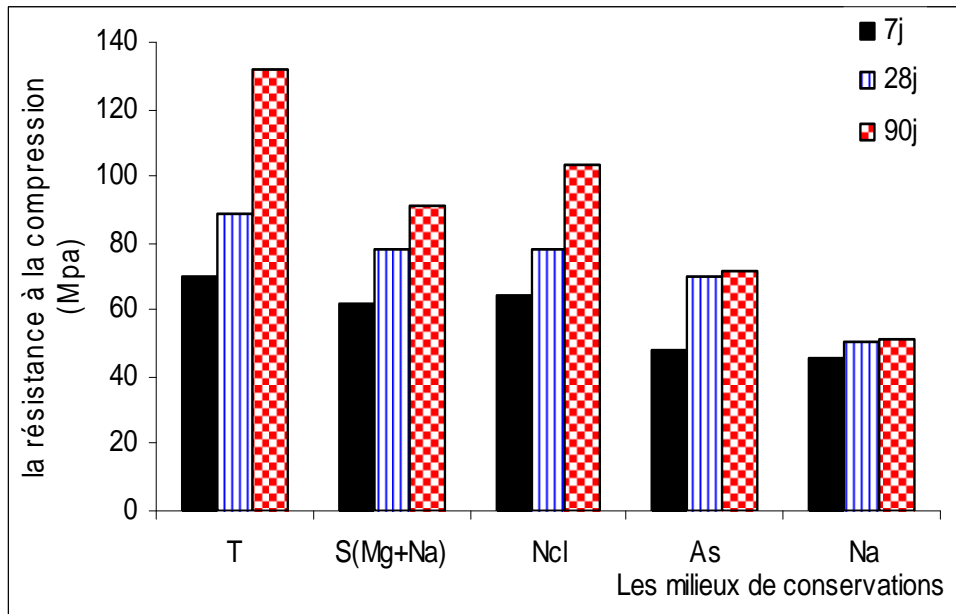
c)- 90 jours.



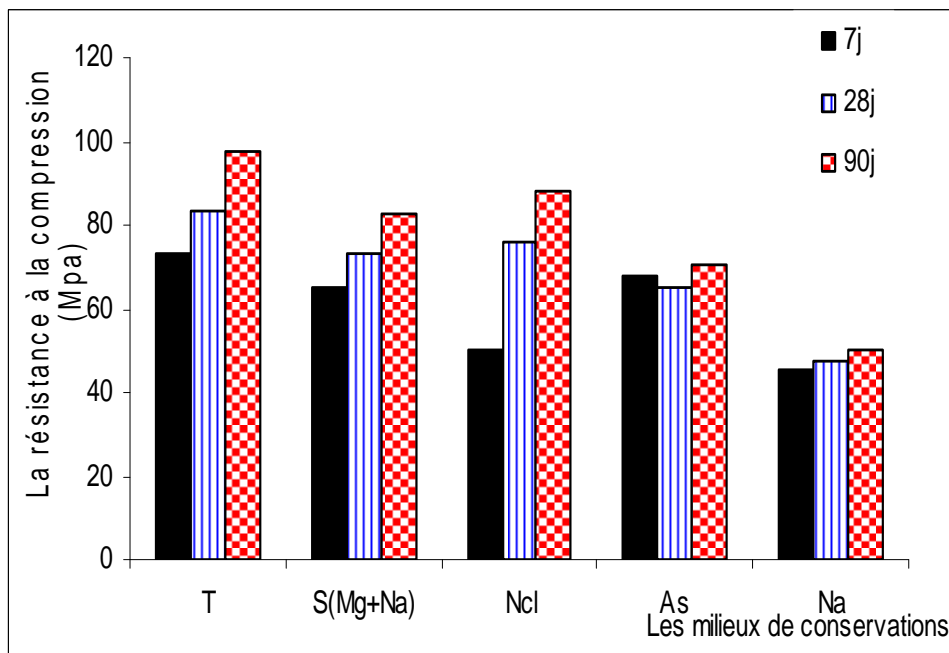
La pâte de ciment :

Fig. (IV.5) : Variation de la résistance à la compression (MPa) de la pâte de ciment en fonction des milieux de conservation, paramètre : âge.

a)-La pouzzolane.



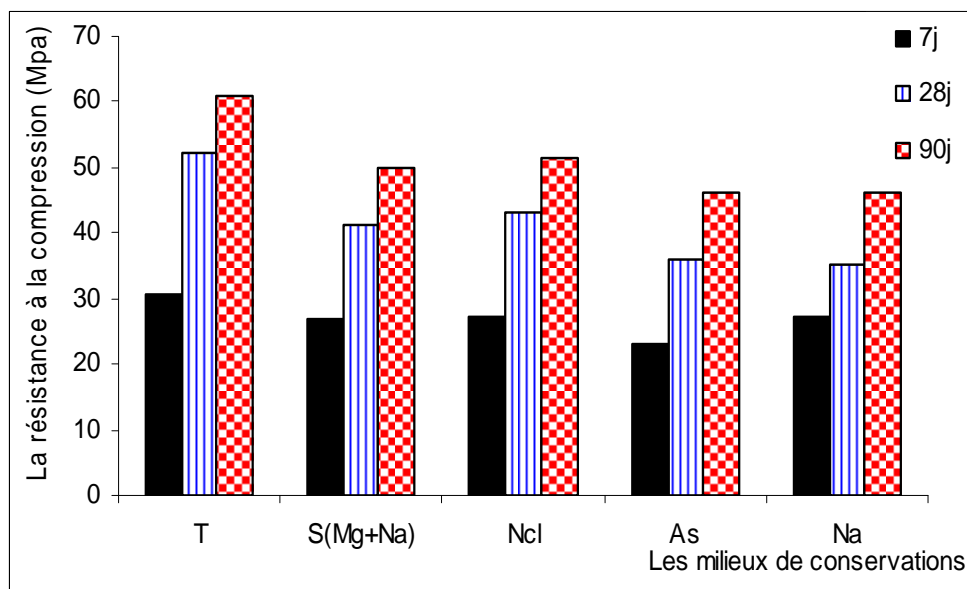
b)- Le calcaire.



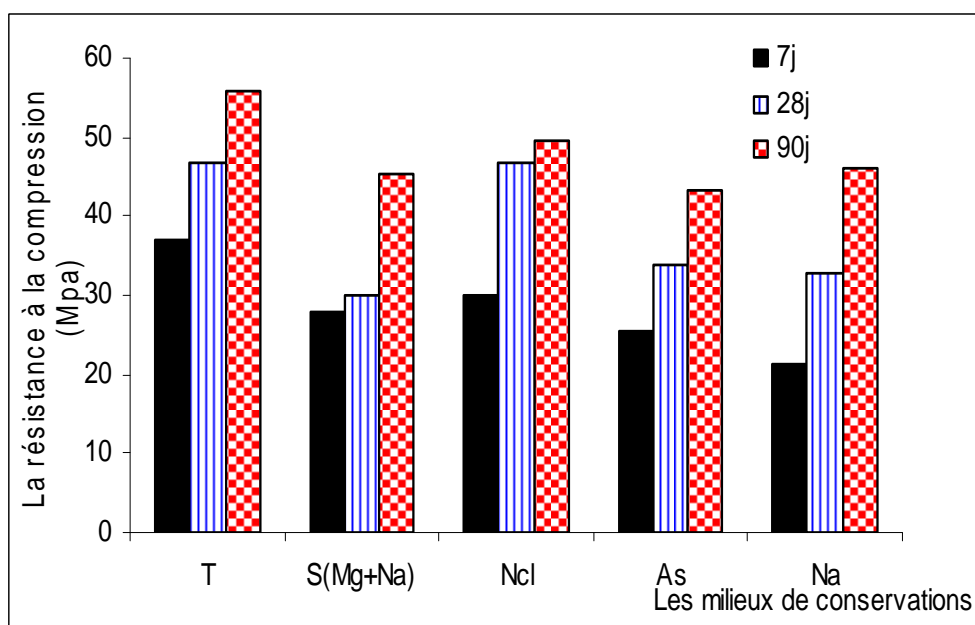
Le mortier :

Fig. (IV.6) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier en fonction du milieu de conservation. , paramètre : âge.

a)- La pouzzolane.



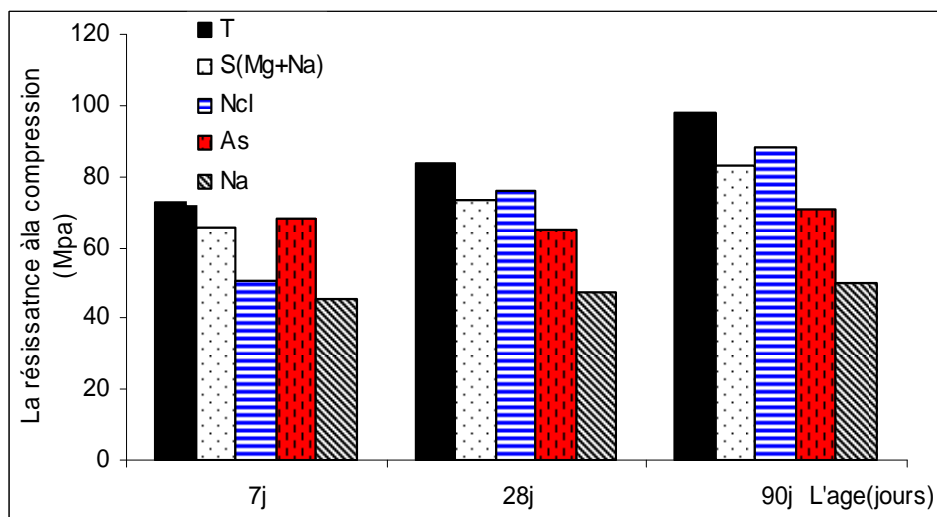
b)- Le calcaire.



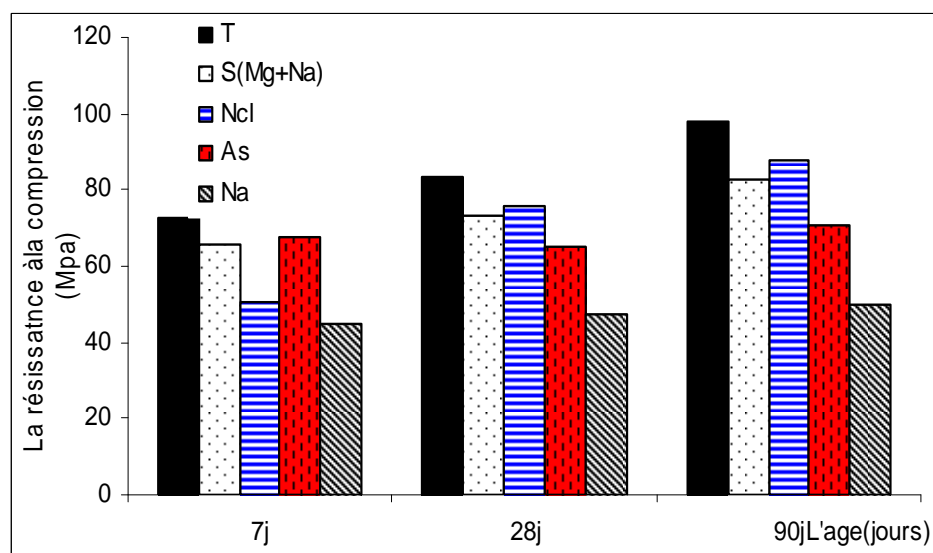
La pâte pure :

Fig. (IV.7) : Variation de la résistance à la compression (MPa) de la pâte en fonction de l'âge, paramètre : milieu de conservation.

a)-La pouzzolane.



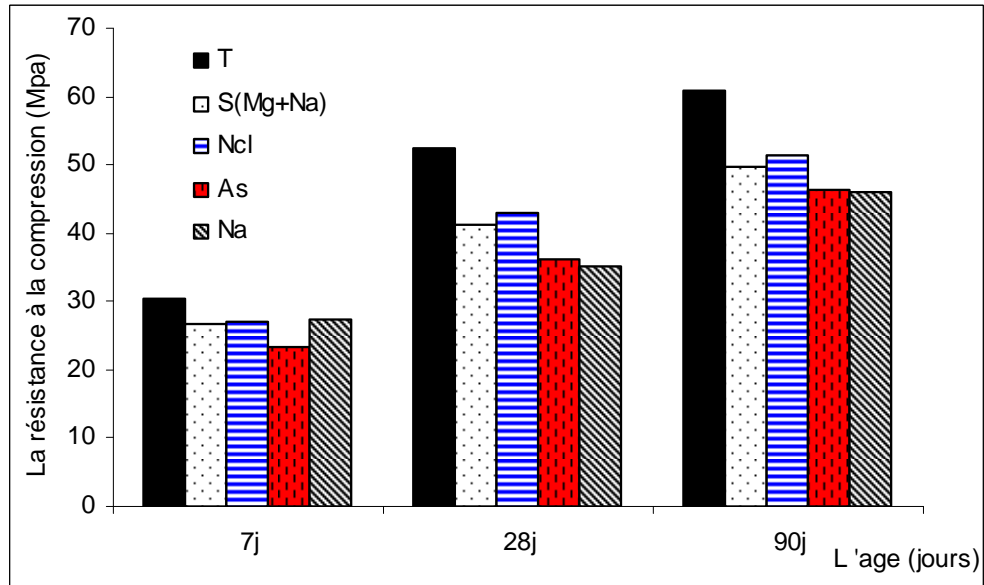
b)- Le calcaire.



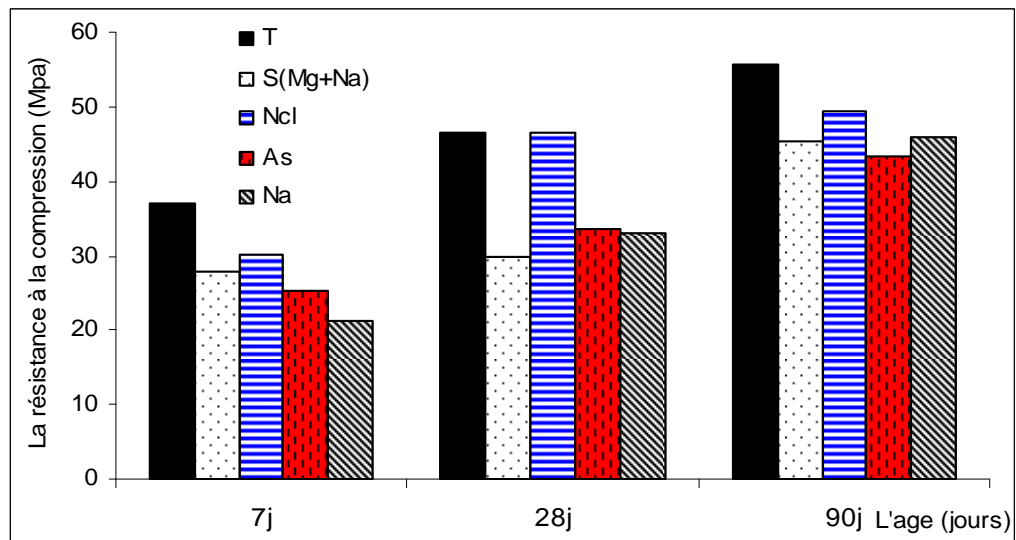
Le mortier :

Fig. (IV.8) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier en fonction de l'âge, paramètre : milieu de conservation.

a)- La pouzzolane.



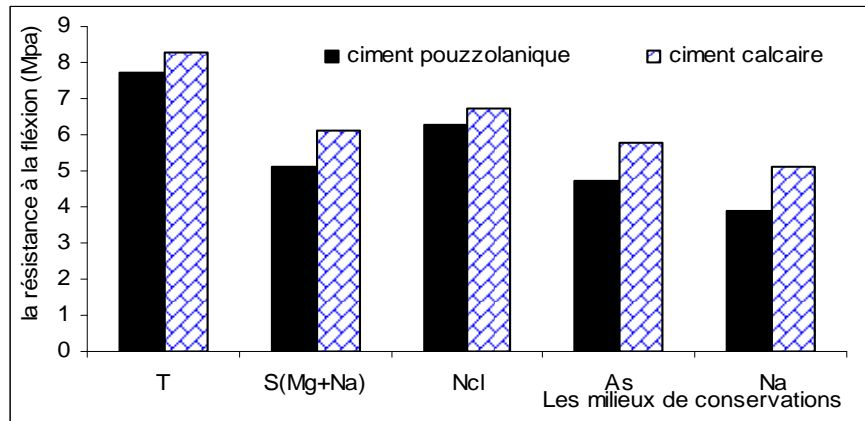
b)- Le calcaire.



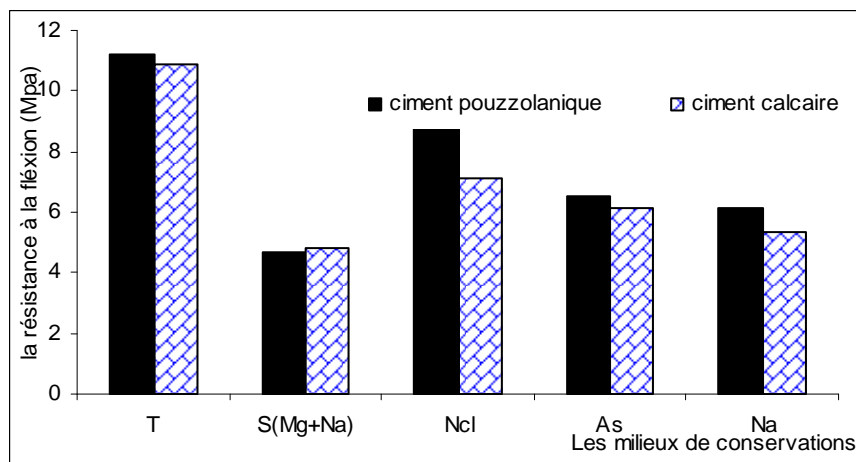
La résistance à la flexion : Pâte, mortier.

Fig. (IV.9) : Variation de la résistance à la flexion (MPa) de la pâte de ciment en fonction des milieux de conservation, paramètre : type de ciment.

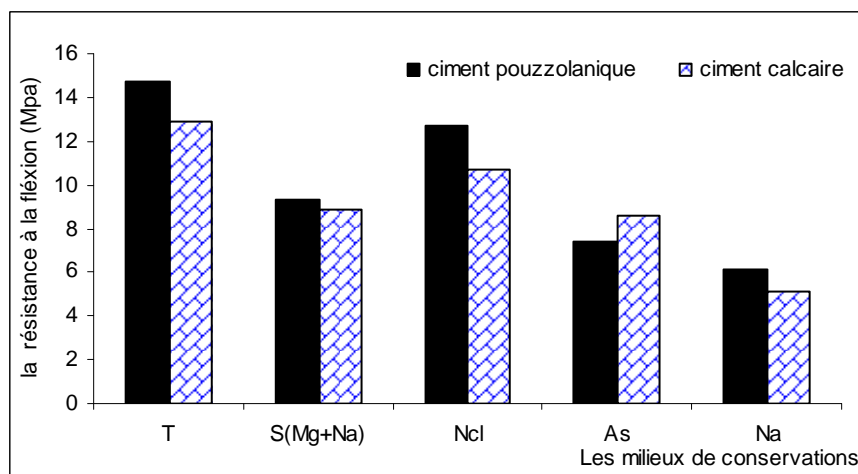
a)- 7 jours.



b)- 28 jours.



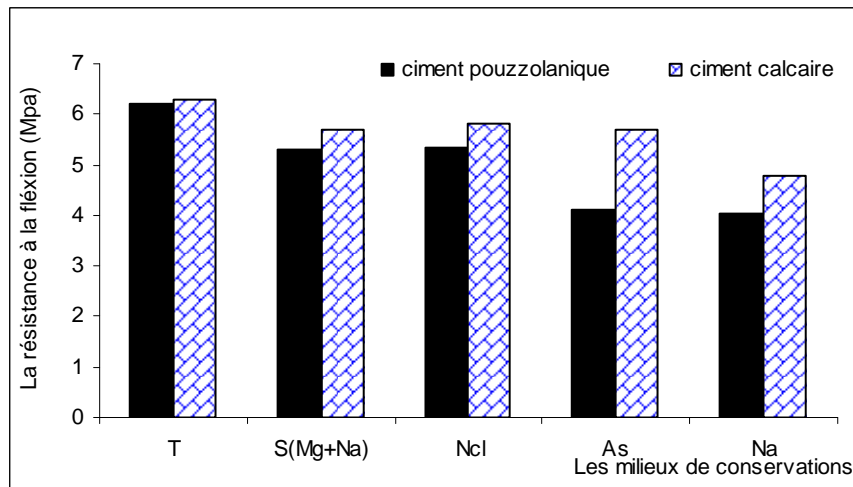
c)- 90 jours.



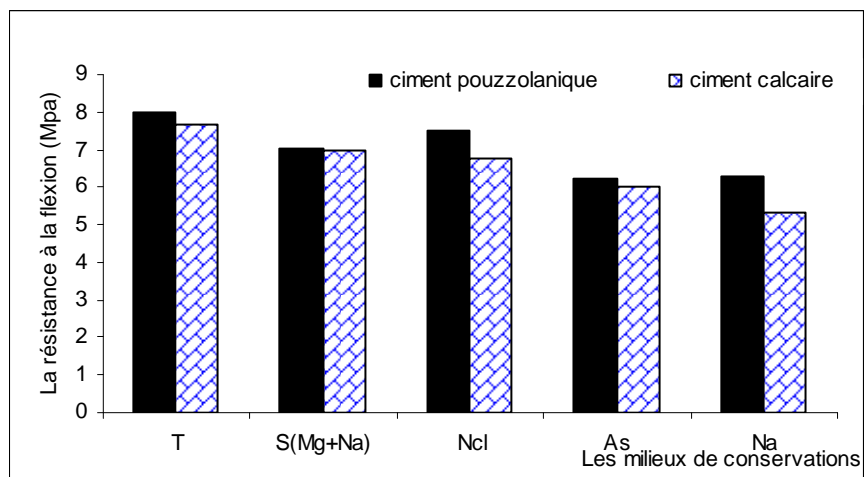
Pour le mortier :

Fig. (IV.11) : Variation de la résistance à la flexion (MPa) du mortier en fonction des milieux de conservation, paramètre : type de ciment.

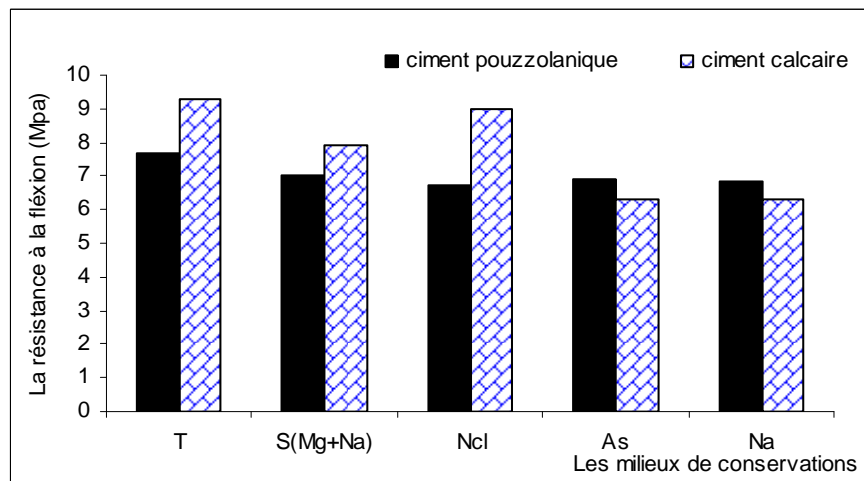
a)- 7 jours.



b)- 28 jours.



c)- 90 jours.

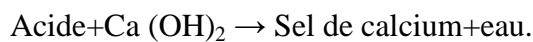


IV.2/ LES MECANISMES D'ATTAQUES :

Le comportement mécanique des matrices dans les milieux agressifs diffère de l'un à l'autre. Cela est dû au mécanisme de dégradation qui est, lui à son tour, aux attaques sulfatiques, attaques des acides, des chlorures et des nitrates qui sont totalement différentes l'une de l'autre.

Le cas d'attaque sulfatique provoque des dégradations internes du matériau ; par contre la solution de nitrate d'ammonium, provoque le dépôt de produits superficiels sur la surface d'éprouvette dus à la formation du carbonate ; c'est la décalcification rapide du mortier [22].

Ce que l'on peut expliquer par l'influence de la (Na Cl), par le phénomène de diffusion en contact avec la surface d'éprouvette, l'incursion d'ions de chlorure (les ions de chlorures attachés aux cations divalents pénètrent plus vite que ceux attachés aux cations monovalents. Une réaction d'échange peut provoquer une modification des composés hydratés, principalement la portlandite.



Dans le cadre de notre suite de traitements, on peut identifier les mécanismes de dissolution et précipitations pour les deux types de ciments CPZ, CPC.

IV.2-1/Réaction dans le milieu témoin(l'eau potable) :

Le processus de dégradation des pâtes dans l'eau et la lixiviation, c'est à dire la dissolution des phases hydratées de ciment, la dissolution de la portlandite est primordiale à cause de sa faible solubilité.

IV.2-2/ REACTION DANS LE MILIEU DE SULFATE :

IV .2-2-1/ Décalcification :

En premier lieu, la dissolution de la portlandite et, en deuxième lieu, la dissolution du C-H-S, mal cristallisé. Ce processus est associé à une augmentation de la concentration en ions de calcium ; la décalcification entraîne un affaiblissement du mortier.

IV.2-2-2/ Précipitation :

La migration des ions sulfate peut provoquer des réactions qui aboutissent à la précipitation de sel, principalement du gypse, et de l'ettringite.

IV.2-2-3/ Cristallisation :

La germination et la croissance des cristaux peuvent conduire à un développement des contraintes internes qui engendrent une fissuration des pâtes.

D'après [22] : il a enquêté sur les effets du pH, et concentration de sulfate, la forme et les dimensions de l'éprouvette, sur l'expansion des éprouvettes de mortier, soumis à l'attaque.

IV.2-2-4/Mécanisme réactionnel à la surface des pâtes :

Observation visuelle :

- Observation des échantillons exposés pendant 3 mois à la solution de sulfate :
- Dans la solution de sulfate, des aiguilles comme cristaux ont été trouvés sur le périphérique du bain et couvraient des échantillons de mortier.
 - Des fissures se sont produites. Après lavage des éprouvettes, on peut constater visuellement l'augmentation de volume des éprouvettes (gonflement).
 - Le dépôt des produits de réaction en surface ; le gypse, forme cristaux d'aiguille.
 - Les sulfates ne subissent qu'une faible modification d'apparence.
 - Il y a une faible dissolution de la portlandite ; une sursaturation de gypse sera atteinte sur les cristaux de portlandite de la surface. On constate la formation des cristaux qui hérissent la surface.
 - La grande solubilité du sulfate peut entraîner une élévation du pH, là où a eu lieu la réaction.

IV.2-2-5/ Mécanisme réactionnel à l'intérieure des pâtes :

Pareil pour tous les types d'attaque sulfatique ; c'est bien la formation des cristaux de gypse qui hérissent la surface provoquant une diminution locale de la concentration des Ca^{+2} . Ce déséquilibre peut entraîner une diffusion à la surface vers le noyau sain des ions calcium, à cause du gradient de concentration, qui peut solubiliser la portlandite [4].

D'après [22] ; l'expansion provoquée de la peau externe de spécimen, mène à la formation des fissures, dans la région intérieure qui, chimiquement inchangé, avec immersion soutenue. Avec le temps, la zone de surface se détériore suite à la pénétration de la solution

Quand la solution atteint la zone intérieure, elle réagit avec les produits principaux et joue un rôle, le dépôt des produits pour l'attaque à l'intérieur des fissures, aussi bien le dépôt du gypse dans les vides, à l'origine des fissures (zone de dépôt), une nouvelle zone se forme à l'intérieure de la pâte.

IV.2-3/REACTION DANS LE MILIEU D'ACIDE SULFURIQUE

IV.2-3-1/Mécanisme réactionnel à la surface des pâtes :

On peut expliquer les mécanismes réactionnels de détérioration par l'acide sulfurique : Les éprouvettes de pâtes sont rapidement recouvertes, après immersion d'une couche de gypse qui va ralentir la progression de l'attaque.

La faible solubilité du gypse en environnement acide rend cette couche relativement stable, c'est à dire, que la peau de la pâte a une forte teneur en ciment, une couche riche en portlandite, la concentration de Ca^{+2} sera forte à cause de la dissolution de la portlandite superficielle.

Dans la solution également forte. Il y aura donc une sursaturation de gypse, c'est la formation d'une couche de cristaux très fines.

Observation :

Pendant les premiers jours, il y a une libération de gaz de la surface du mortier. Après ce laps de temps, une couche blanche tapisse la surface et le dégagement de gaz s'arrête, bien que le processus de lavage mensuel enlève cette couche et on constate qu'elle se reforme très vite.

La couche de gypse est très dense sur les éprouvettes immergées dans la solution forte d'acide sulfurique.

La couche de gypse qui se forme sur la surface est chimiquement très soluble, et joue le rôle de barrière physicochimique, entre les solutions et le mortier sain. La profondeur de la zone de basicité est réduite et elle est limitée à la couche visiblement comblée par le gypse.

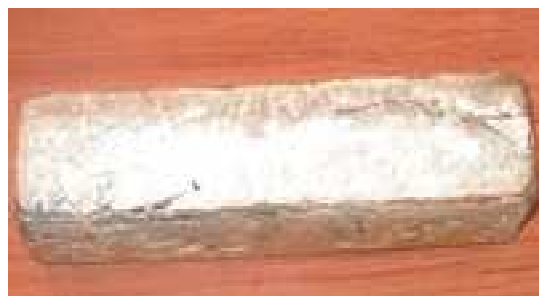


Fig. (IV.11) : Éprouvette du mortier immergée dans une solution d'acide sulfurique.

Éprouvette immergée dans l'acide sulfurique, apparition des fissures dans la couche de gypse, après 6 mois de conservation.

IV.2-3-2/ Mécanisme réactionnel à l'intérieure des pâtes :

Avant la formation d'une couche stable de gypse, les ions SO_4^{2-} , peuvent s'infiltrer dans la pâte le long des capillaires et des microfissures.

Dans les capillaires plus grandes, il y a dissolution de la portlandite, et une précipitation du gypse, dans ce site, il y aura, cette conditions qui favorise la formation des granulats de cristaux et le comblement de la structure poreuse.

IV.2-4/ REACTION DANS LE MILIEU DE NITRATE D'AMMONIUM :

IV.2-4-1/Mécanisme réactionnel à la surface des pâtes [(NH₄) NO₃]:

Observation visuelle :

Après le lavage des éprouvettes, on n'observe pas de fissures pour les deux types de ciment. IL y a un dépôt blanc sur la surface de l'ammonium, es cristaux de calcite[22]. Ces dépôts sont aussi trouvés sur la surface liquide dans le bain ; les ions de calcium passent dans la solution et se combinent avec (CO_3).

Le nitrate produit une formation de carbonate à la surface et une décalcification rapide des pâtes due à la haute solubilité de nitrate de calcium [22].

IV.2-4-2/Mécanisme réactionnel à l'intérieure de la pâte :

2 ions : pour la formation du gypse ; les germes pour l'augmentation du cristal est probablement zone de portlandite, cela en peut expliquer clairement par le revêtement des cristaux sur la surface, avec la solubilité relativement basse de gypse à un pH neutre.

2 ions : dans la solution pour former la calcite, comme dans le cas précédent, l'événement de formation du cristal est clair.

IV.2-5/ Mécanisme réactionnel dans le milieu de chlorure (Na Cl) :

Les pâtes durcies immergées dans la solution de Na Cl, n'auront pas changement de volume, ni de lessivage important (les chlorures ne lessive pas, ne gonfle pas), en comparant avec le milieu de sulfate qui provoque le phénomène de gonflement, et la lixiviation dans le milieu acide.

La diffusion d'ions de chlorure dans la pâte et béton est le résultat de complexes mécanismes ou d'échanges d'ions entre la solution agressive, et la solution poreuse interstitiel, dans le béton joue un rôle important.

Il est trouvé que le taux de diffusion des chlorures dans le béton est affecté principalement par le type de cation associé avec le chlorure.

IV.3/EFFET DES ADJUVANTS FLUIDIFIANTS SUR LES MATRICES CIMENTAIRES (PATE ,MORTIER) :

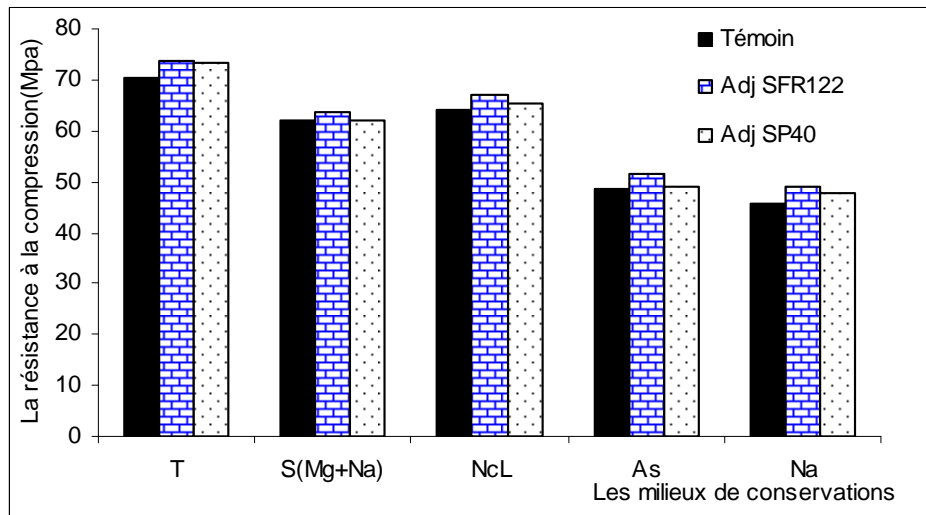
Tableau (IV. 17) : fluidité et réduction d'eau.

Code	Type de ciment	E/C			Réduction et L'excès d'eau		
		Témoin (0%)	Adju SFR (1%)	Adju SP (1%)	T	SFR	SP
La pâte	Pouzzolane	0.4	0.33	0.35	0%	-17.5%	-12.5%
	Calcaire	0.4	0.32	0.33	0%	-20%	-17.5%
Le mortier	pouzzolane	0.5	0.43	0.45	0%	-14%	-10%
	Calcaire	0.5	0.40	0.42	0%	-20%	-16%

IV.3-1/ Effet d'adjuvant fluidifiant sur la résistance à la compression (Mpa) de la pâte pure en fonction du milieu de conservation:

Fig. (IV.12) : Variation de la résistance à la compression (MPa) de la pâte en fonction de milieu de conservation, paramètre : type d'adjuvant.

a)- La pouzzolane, l'âge de 7 jours.



b)- Le calcaire, l'âge de 7 jours.

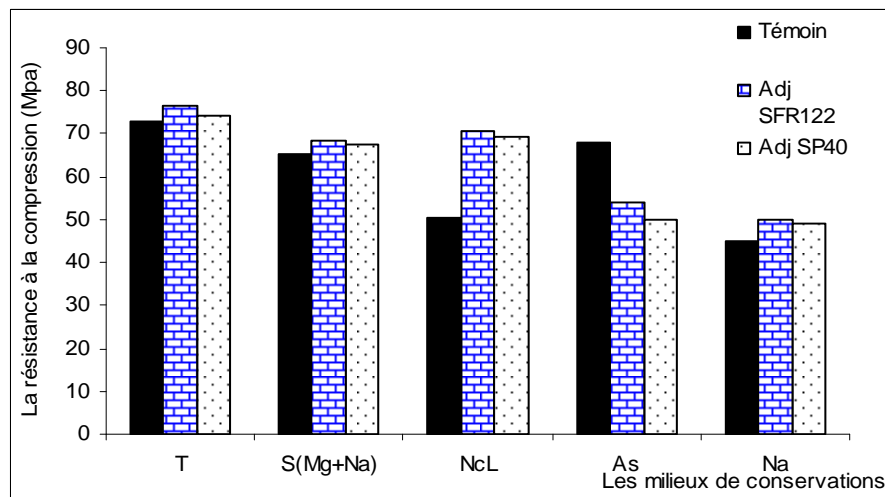
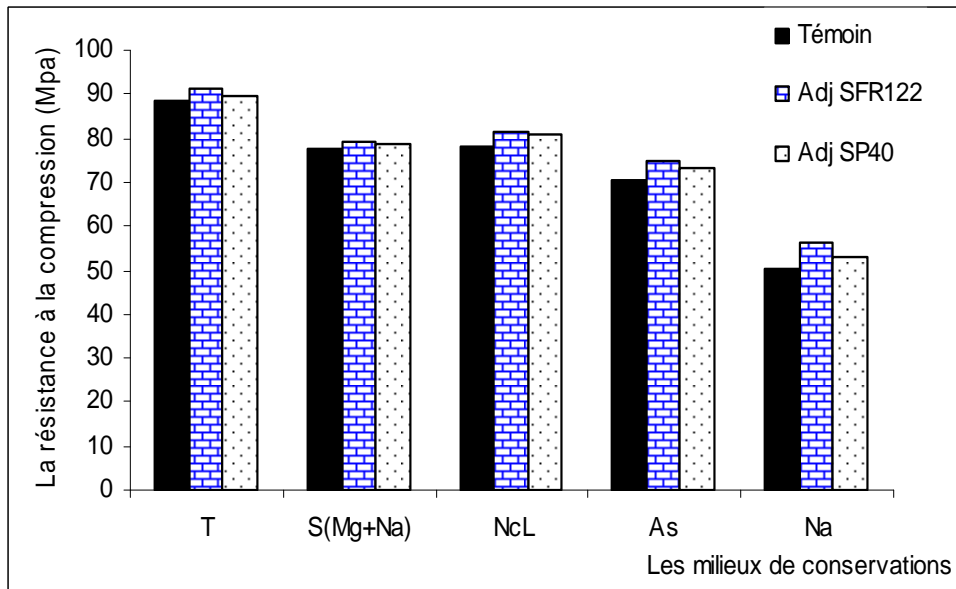


Fig. (IV.13) : Variation de la résistance à la compression (MPa) de la pâte en fonction de milieu de conservation, paramètre : type d'adjuvant.

a)- La pouzzolane, l'âge de 28 jours.



b)- Le calcaire, l'âge de 28 jours.

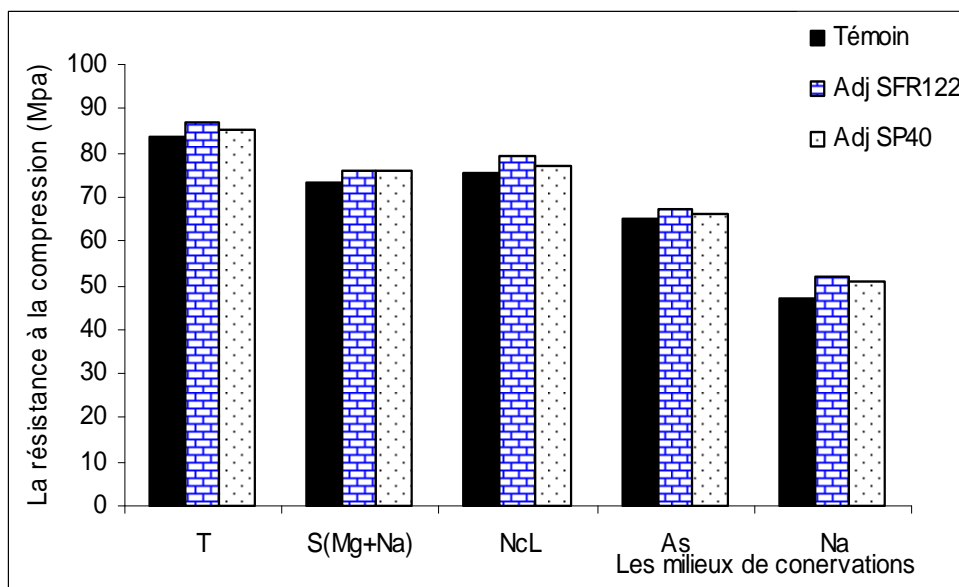
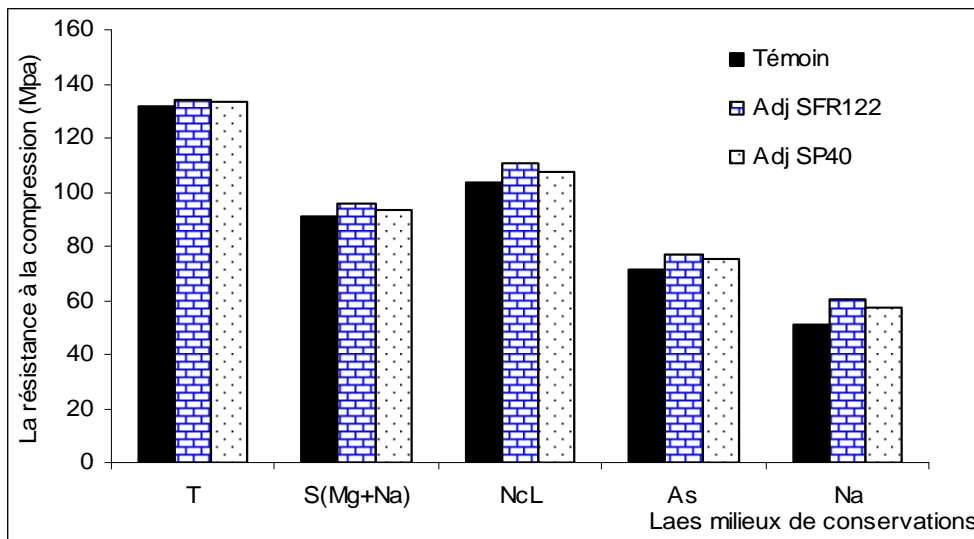
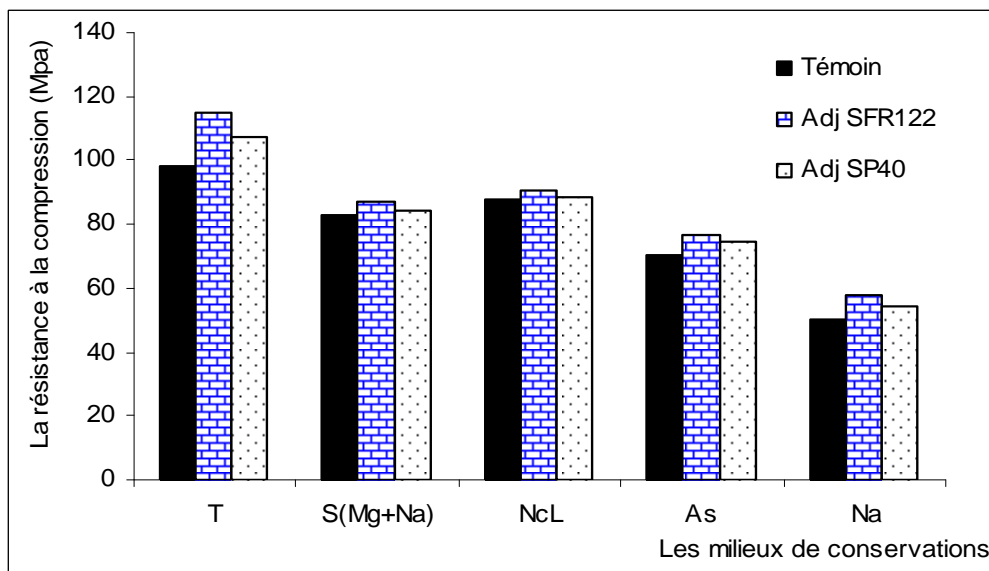


Fig. (IV.14) Variation de la résistance à la compression (MPa) de la pâte en fonction du milieu de conservation, aramètre type d'adjuvant.

a)-La pouzzolane, l'âge de 90 jours.



b)- Le calcaire, l'âge de 90 jours.

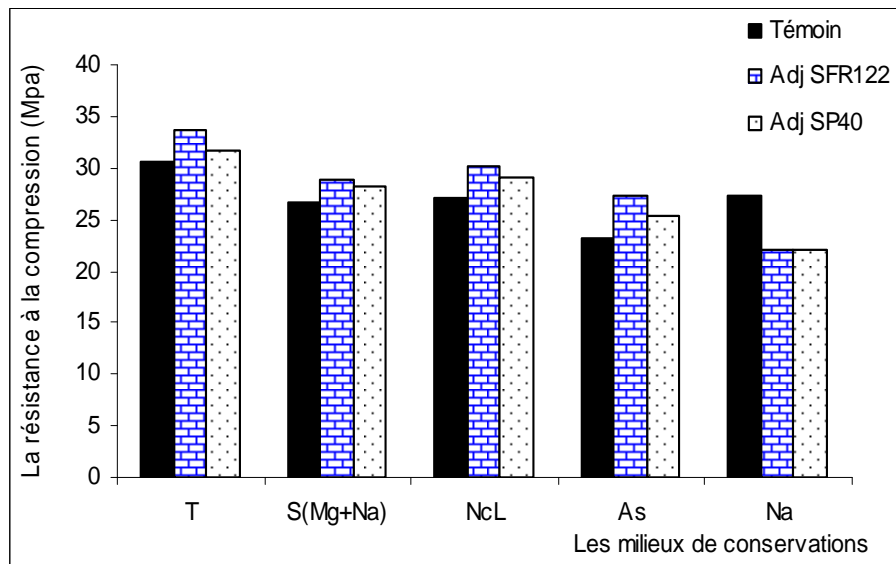


IV.3-2/ Effet d'adjuvant fluidifiant sur la résistance à la compression (Mpa) du mortier

Fig. (IV.15) :Variation de la résistance à la compression MPa) de mortier en fonction du

milieu de conservation, paramètre type d'adjuvant

a)- La pouzzolane, l'âge de 7 jours.



b)- Le calcaire, l'âge de 7 jours.

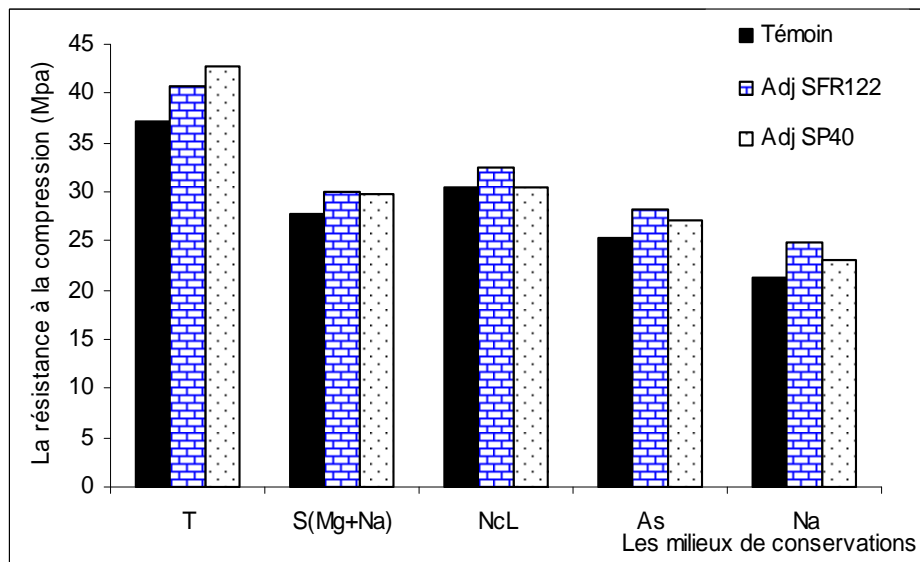
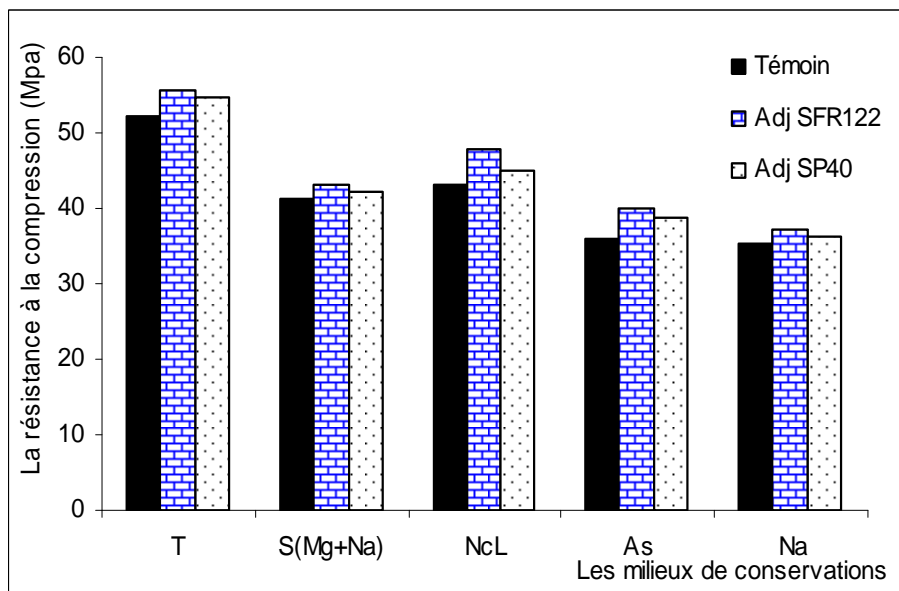


Fig. (IV.16) :Variation de la résistance à la compression (MPa) de mortier en fonction du milieu de conservation , paramètre type d'adjuvant.

a)- La pouzzolane, l'âge de 28 jours.



b)- Le calcaire, l'âge de 28 jours.

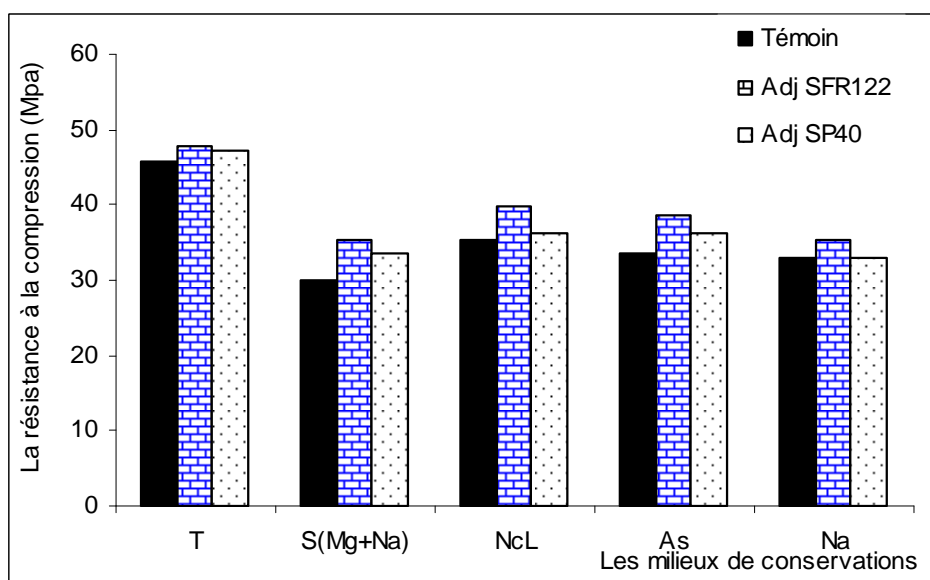
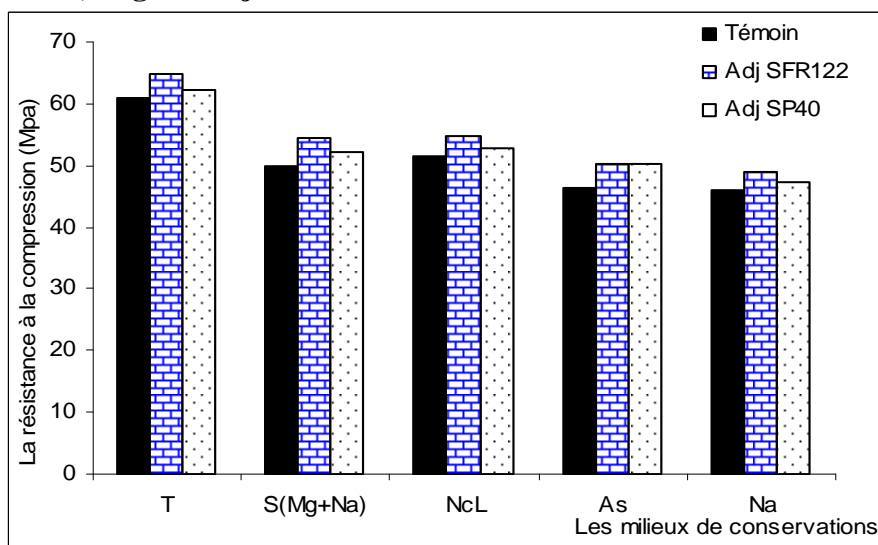
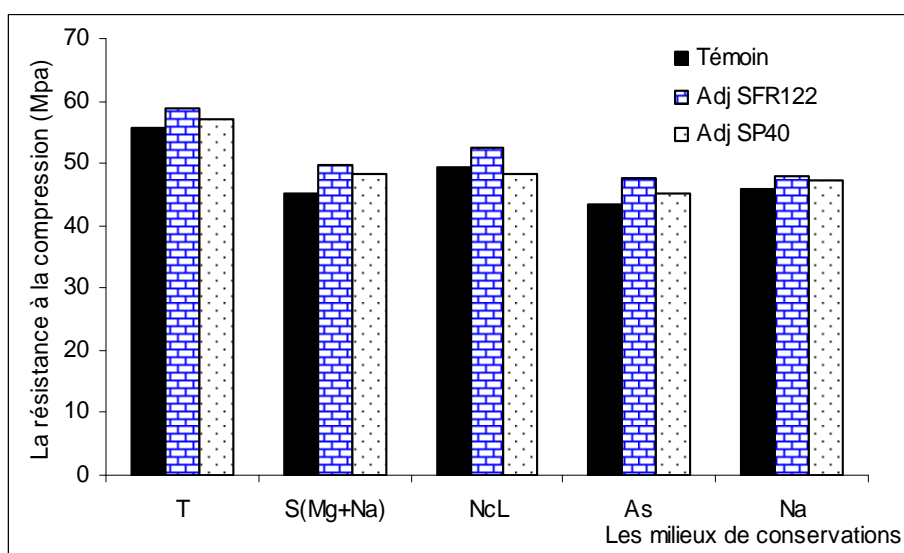


Fig. (IV.17)Variation de la résistance à la compression (MPa) de mortier en fonction du milieu de conservation,paramètre type d'adjuvant.

a)- La pouzzolane, l'âge de 90 jours.



b)- Le calcaire,l'âge de 90 jours.



IV.4/ CORRELATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE :

Concernant le choix et la sensibilité du ciment, qui est un facteur clé assurant une bonne durabilité, le choix des deux types de ciment (pouzzolane, calcaire) est l'objectif de cette étude.

Les ciments composés ont un effet bénéfique sur la durabilité et la résistance à la corrosion chimique est étroitement liée à la teneur en portlandite de la pâte de ciment et béton.

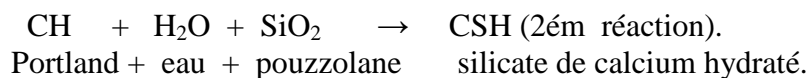
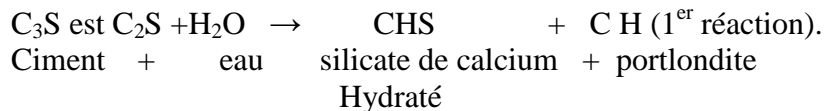
IV.4-1/Discussion des résultats-Le comportement des ciments dans l'eau :

L'observation des résultats met en relief les observations suivantes :
La résistance à la flexion et compression de la pâte immergée dans l'eau augmente avec la durée d'immersion ; cette tendance existe quelque soit le type de ciment.

D'après les courbes précédentes, on constate que les résistances mécaniques du ciment Pouzzolanique montrent une meilleure résistance dans les milieux nocifs.

En la comparant à celle du calcaire, ce comportement du ciment pouzzolanique est principalement attribué à sa faible teneur en chaux Ca(OH)_2 , car la portlandite est souvent le responsable des dégâts du béton (réduire la proportion de portlandite dans les hydrates).

La cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et la réaction Pouzzolanique de l'ajout selon le schéma des réactions suivantes :



Et même d'après les résultats obtenus, la plus grande partie de l'évolution de la résistance mécanique (compression, flexion), par conséquent, l'effet pouzzolanique qui y est associé se produit à partir de 7jours. Toutefois, à l'âge de 28j et de 3mois, les mortiers contenant de la pouzzolane atteignent des résistances importantes.

L'ajout pouzzolanique présente de faibles résistances mécaniques à court terme (7j), mais se développent et augmentent à long terme (28j-90j) grâce à sa propriété d'ajout actif à l'eau.

Le comportement des ciments dans les milieux agressifs est contrôlé par la teneur en portlandite. Aussi, on constate qu'il y a augmentation de pH (de la solution), due à la dissolution du portlandite pour les deux types de ciment.

D'après les résultats des milieux agressifs, on constate la bonne tenue du ciment pouzzolanique qui dégage le moins de chaux, ce qui favorise le phénomène de dissolution (lixiviation) et la création des pores vides dans la structure.

Le comportement du ciment avec ajout calcaire, inversement comparé à la pouzzolane, développe ses résistances à court terme (7j) et qui chute à long terme (28j) grâce à ses propriétés d'ajout inerte.

Les résistances sont moins importantes que celles obtenues pour le ciment Pouzzolanique. Ceci se justifie par la formation des hydrocarboaluminates de calcium sous forme de gel qui densifie la Matrice cimentaire par pénétration dans les pores de la structure. D'autre part, la présence des fines calcaires consolide cette formation par remplissage de ces derniers.

IV.4-2 /Le comportement des ciments dans les milieux agressifs :

La solution de sulfate comporte deux types ($MgSO_4+NaSO_4$)=5%. Sachant que l'effet de chaque sulfate diffère de l'un à l'autre, soit en degré de solubilité ou en degré d'agressivité, implique que le processus de dégradation diffère, mais l'influence des sulfates cause toujours les mêmes dégâts le cas du gonflement.

Parmi les sulfates connues, le cas de $MgSO_4$ (un milieu des plus nocifs et qui le plus dominant dans la solution par son degré d'agressivité), forme une couche de brucite $Mg(OH)_2$ à la surface de l'éprouvette.

Alors il n'aura pas de diffusion des produits de sulfates à travers cette couche de surface et ne contribue pas à l'augmentation de la valeur du PH à cause de sa très faible solubilité comparé avec (Na_2SO_4). Et comme l'attaque progresse, la formation des produits de l'attaque, tel que le gypse et ettringite, sur la surface de l'éprouvette et mène à expansion et perte de force, cette expansion cause des fissures dans la brucite, condition favorable pour la décalcification d'hydrate des silicates des calcium (C-H-S), l'attaque est directe et la distraction ultime du mortier se produit par la suite par la substitution des C-H-S par M-S-H.

Les pâtes de ciment (CPZ-CPC) immergées dans le milieu de chlorures ($NaCl$), peut s'expliquer par l'incursion d'ions de chlorure dans la pâte est qui influencé par le cation du chlorure.

Le ciment calcaire dans le $NaCl$ donne de bons résultats au jeune âge ; ce qui est dû à l'interaction de ce dernier avec C_3A et, par conséquent, la formation des hydrocarboaluminates de calcium. Ceci rend la matrice des pâtes plus dense et empêche la pénétration des éléments nocifs, vers la structure interne de la pâte.

En comparant l'effet du milieu de chlorure à celui du sulfate, on remarque que les sulfates sont plus nocives que les chlorures, cela est dû au mécanisme de dégradation.

Si on compare l'effet des milieux de chlorure, l'acide et le sulfate, on constate que le milieu acide est le plus agressif le plus nocif.

D'après les courbes, le nitrate est le plus nocif des solutions.

En revenant aux ciments, on a pu constater que le ciment pouzzolanique est le plus durable dans les milieux agressifs. Un grand intérêt doit donc être donné au ciment pouzzolanique dans le cas où on craint la corrosion des armatures (dû principalement à la contamination par les chlorures).

Cela est dû aussi à la forte imperméabilité des ciments durcis ainsi qu'à la formation supplémentaire des hydrates CSH qui précipitent dans les pores en diminuant par la suite la porosité de la pâte de ciment.

Comparativement à ce type de ciment (pouzzolanique), le comportement du ciment calcaire dans les milieux nocifs, donne de moins importants résultats.

L'utilisation des adjuvants fluidifiants améliore nettement les résistances par rapport au témoin dans les différents milieux de conservation du à la réduction d'eau.

IV.4-3/Comportement couple (lixiviation / traction) :

En ce qui concerne la résistance à la flexion, le temps de fissure a été défini comme le temps où la force de flexion de la barre du mortier est maximale [21].

En effet, le béton en traction se fissure et il y a un couplage entre ces fissures et la lixiviation.

Ce couplage existe bien pour les propriétés de transfert qui sont modifiées par l'existence de fissures, mais aussi parce qu'il peut y avoir de la lixiviation le long de la fissure

IV.5/MODIFICATION DE LA STRUCTURE INTERNE:

IV.5-1/Analyse par diffraction X :

Ces échantillons sont réalisées par diffractométrie de Rayon X et permettent :

- De caractériser la microstructure des échantillons pâte pure et mortier.
- D'analyser des phases présentes.
- De connaître la composition chimique.

L'analyse en rayon x permet de déterminer la structure des minéraux, s'il sont amorphe ou Cristallisés et la nature des phases cristallisés nous permet de suivre l'évolution de l'hydratation des ciments.

Ces analyses ont été menées sur deux types de ciment en mortier.

La composition de la peau du béton diffère physiquement et chimiquement à partir de la profondeur identifiée [5].

L'hétérogénéité de la surface du béton influence sur sa durabilité. On constate Trois types d'hétérogénéité influant sur le comportement de la couche superficielle.

Un rapport E/C.

Une croissance de la teneur en ciment.

Une diminution du rapport entre agrég/ciment.

Cette couche est particulièrement sensible à la condition de cure.

La figure (IV.18) correspond à l'échantillon MZ - 20%, mortier à base d'ajout pouzzolanique (CPJ CEM II), été immergé dans l'eau pendant 28jours, conservé à l'air pour 45jours

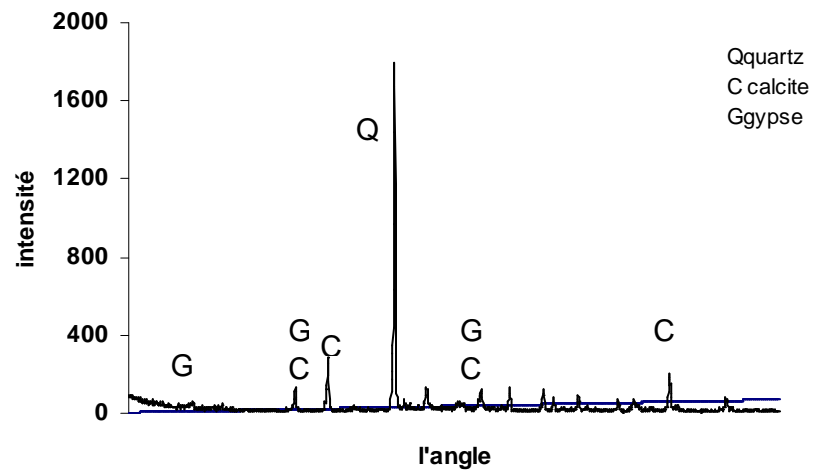


Fig.(IV.18):Diagramme de diffraction X, surface en contact avec l'eau

La figure (IV.18) montre que l'échantillon ayant été immergé dans l'eau ne présente en surface que deux phases cristallisées, le quartz et la calcite.

La figure (IV.19) correspond à l'échantillon MZ, S - 20% mortier à base d'ajout Pouzzolanique (**CPJ CEM II**), cure de 7 jours, qui à été immergé dans le sulfate (Mg+Na)=5% pendant 28 jours, conservé à l'air pour 45 jours.

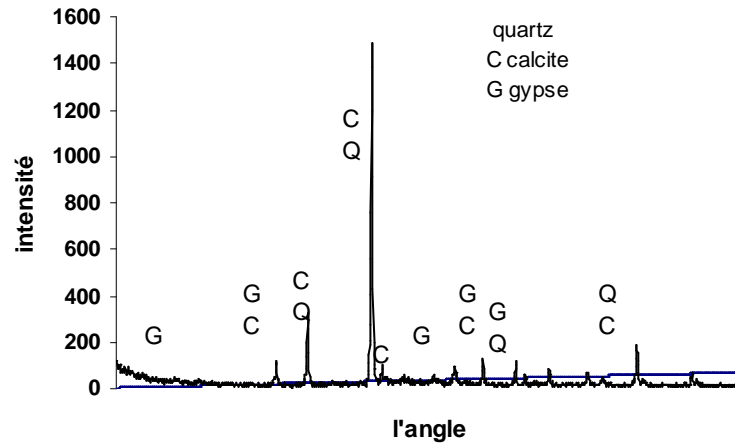


Fig.(IV.19) : Diagramme de diffraction X, surface en contact avec le milieu De sulfate S(Mg+Na).

La figure (IV.19) correspond à l'échantillon immergé dans le milieu de sulfate (Mg+Na) $SO_4=5\%$. A base ciment pouzzolanique.

L'échantillon soumis à l'action de la solution de sulfate provoque la dégradation avec une plus grande quantité de quartz sur la surface. Par contre, le gypse est toujours en très faible quantité. Ce qui laisse supposer que les ions de sulfate restent dans la solution.

Ces analyses par diffraction X permettent de dire que l'attaque des mortiers par une solution de sulfate conduit à une formation de gypse fibreux.

La figure(IV.20) correspond à l'échantillons MZ,H-20%, mortier à base d'ajout pouzzolane(CPJ CEM II), cure de 7jours, qui à été immergé dans L'acide sulfurique (H_2SO_4),PH=4 pendant 28jours, conservé à l'air pour 45jours

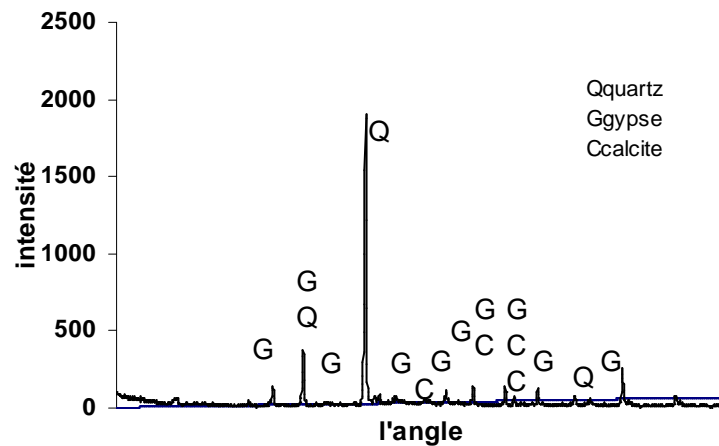


Fig. (IV.20):Diagramme de diffraction X, surface en contact avec l'acide sulfurique (H_2SO_4).

L'échantillon soumis à l'action d'une solution d'acide sulfurique présente une surface très dégradée avec les grains de quartz du mortier.

Entre les grains de quartz, la surface est blanchâtre (couche de gypse), et une grande quantité du quartz.

D'autre part, le gypse est en plus grande quantité, l'épaisseur de la couche dégradée est donc plus importante.

Le quartz déchaussé (dégradé) est en plus grande quantité comme la calcite de chaux transformée en gypse qui se présente en plus grande quantité aussi.

Une solution d'acide sulfurique conduit à une formation superficielle de gypse, cette formation est tapissante [5].

Mortier à base de ciment calcaire:

La figure (IV.21) correspond à l'échantillon MC,-15%, mortier à base d'ajout calcaire (CPI CEM II), cure de 7jours qui a été immergé dans L'eau potable pendant 28jours, conservé à l'air pour 45jours.

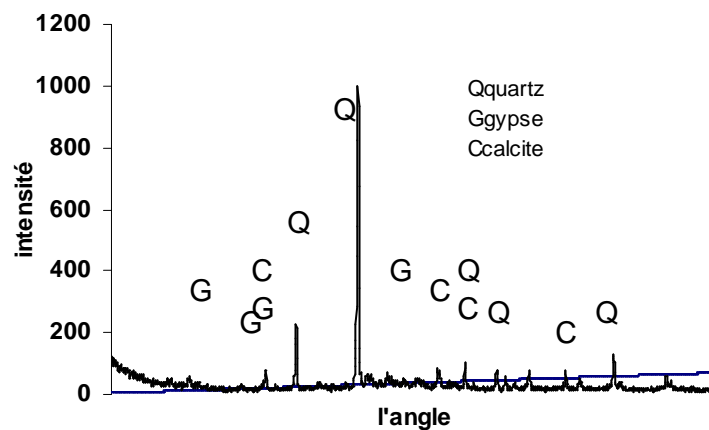


Fig.(IV.21):Diagramme de diffraction X, surface en contact avec l'eau potable.

D'après la figure (IV.21), on n'a pas constaté une grande différence entre les analyses des deux types de ciment.

La présence de l'ajout calcaire dans la matrice cimentaire fait apparaître des nouveaux composants.

On a constaté une série des pics qui sont dus à l'interaction des fines calcaires avec les composants du ciment, probablement le (C_3A), bien qu'il se forme de carboaluminate de calcium qui densifient la matrice cimentaire et rendent le béton plus imperméable. Ce qui diminue la dissolution de la $Ca(OH)_2$ et ralentie la diffusion des ions agressifs.

L'apparition de C_3AH_6 est due au C_3A

On constate l'apparition dans la courbe un grande quantité le quartz. D'autre part, le gypse et le même cas pour le calcite.

La figure (IV.22) correspond à l'échantillon MC, -15% (CPJ CEM II), cure de 7 jours, qui a été immergé dans le sulfate de $(Mg+Na)SO_4$ pendant 28 jours, conservé à l'air pour 45 jours

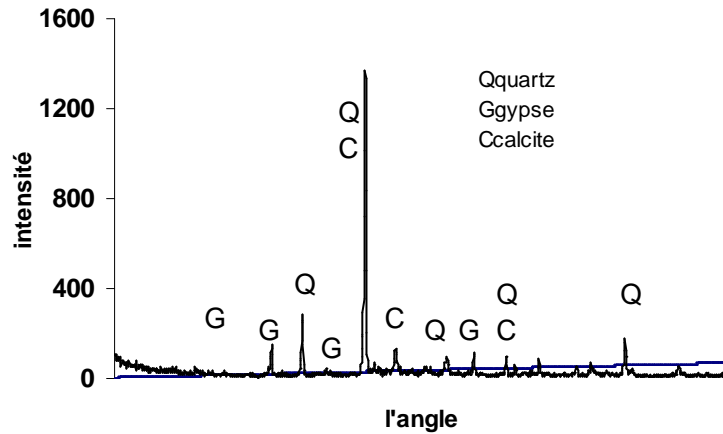


Fig. (IV.22): Diagramme de diffraction X, surface en contact avec les sulfates de S (Mg+Na).

Les mêmes constats sont faits :
 Pour le quartz : qui apparaît en grande quantité.
 La gypse ; en quantité importante ; formation à la surface.
 La calcite : apparaît en quantité plus importante, comparant avec le mortier témoin.

Presque les hydrosilicates de calcium, la densification de la matrice se forme par la présence d'hydrocarboaluminates de calcium, ainsi que le degré d'hydratation élevée du ciment fait diminuer la diffusion des éléments nocifs.

IV.5-2/ETUDE DE BASICITE DES MATRICES CIMENAIRES PAR COLORATION SPECIFIQUE :

IV.5-2-1/ Interprétation des résultats :

Nous avons fait une étude pour déterminer les modifications physico-chimiques de la pâte, du mortier et du béton. Les processus qui sont associés à la sulfatation, conduisent normalement à une décalcification de la pâte de ciment ; ce qui entraîne une réduction du pH.

Nous avons quantifié la profondeur de cette modification par coloration à la phénophtaléine ; Le virage s'effectue à PH compris entre 8.2 -10.

Après avoir établi l'existence d'une zone structurale modifiée, et cette modification est quantifiée par changement de résistance mécanique.

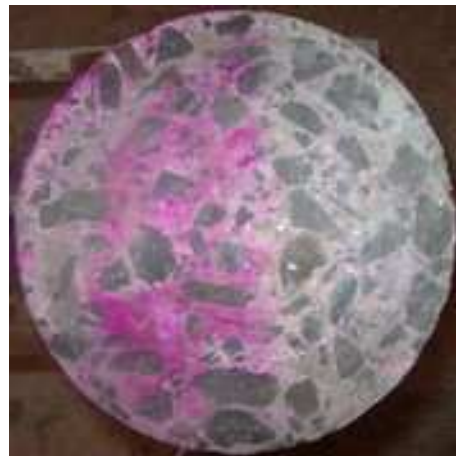
Le test de colorimétrie permet de quantifier la profondeur d'une zone où il y a un abaissement du pH de la matrice. Cette chute du pH n'est pas seulement engendrée par la carbonatation, mais aussi dans un sens plus général, par la diminution de la chaux ou la décalcification de CSH, engendrée par un autre agent agressif.

La profondeur de la couche de la matrice de pH faible est déterminée par coloration à la phénophtaléine sur une fracture fraîche, des éprouvettes en béton et en mortier sont montrées dans les images.

La zone qui reste incolore est à un pH inférieur à 8-10, et la zone colorée a un pH plus élevé. La surface arasée est plus sensible à l'altération sulfatique (identique au phénomène signalé).



Attaque du béton de par la solution De sulfate d'alumine, 9 mois d'immersion, (cure de 7jour) d'immersion.



Attaque du béton par la solution Sulfate de calcium (gypse). (Cure de 7 jours). 9 mois

Remarque :

Les éprouvettes cylindriques sont immergées dans les solutions après avoir été coupées en deux.

Observations :

On a constaté une dégradation superficielle pour le milieu de sulfate d'alumine, cela est dû à la lixiviation de la portlandite, toute la zone qui reste incolore chute du pH du béton.

En ce qui concerne l'éprouvette immergée dans le gypse, on a constaté une dégradation superficielle. La zone qui reste incolore, diminution du PH, dû a lixiviation de la portlandite (demi immersion), la surface en contact avec le milieu agressif subit l'attaque.



Eprouvette du mortier à base ciment Pouzzolanique (la profondeur $e=4\text{mm}$)
Après 3 mois d'immersion, cure de 7 j.



Eprouvette du mortier à base ciment calcaire (la profondeur $e=5\text{mm}$)
Après 3 mois d'immersion, cure de 7j)

Attaque par la solution de **NITRATE D'AMMONUIM**.

Fig. (IV.23) : montre la zone de basicité réduite des matrices, déterminé par coloration à la phénophtaléine.

La durée de cure est un facteur très important, la cure de longue durée, entraîne une plus faible zone dégradée.

IV.5-2-2/Commentaire :

Les essais sur des éprouvettes en béton et des pâtes conservées dans les milieux agressifs, montrent avec l'essai de phénophtaléine une zone qui a subi le phénomène de lessivage. Les éprouvettes de béton sont conservées pendant 9 mois dans le milieu de sulfate de calcium et sulfate d'alumine. Alors que les éprouvettes de mortier sont conservées pendant une période de 3 mois.

L'épaisseur de cette zone diminue au fur et mesure que la durée d'immersion augmente ; cet effet est lié à la porosité plus faible.

La conservation des pâtes dans l'air après leur durée de conservation, entraîne une profondeur de basicité plus importante (la conservation à l'air pendant 6 mois pour les pâtes conduit à la plus grande profondeur de carbonatation).

Dans le cas des éprouvettes ayant été en contact avec l'acide sulfurique, la zone de basicité réduite, coïncide avec la zone sensiblement dégradée. En d'autres termes, elle correspond à la couche superficielle blanche de gypse ; une réduction de la basicité derrière cette couche n'a pas été clairement mise en évidence.

IV.6/LES ESSAIS SUR BETON :

IV.6-1/Etude des propriétés du béton :

Les résultats de la résistance à la compression et porosité et Perméabilité des différents milieux sont présentés dans les tableaux,

Tableau (IV.18) : Fluidité du béton et réduction d'eau.

Type du béton		Dénomination du béton	Rapport E/C	Fluidité (cm)	Réduction et l'excès d'eau
Témoin		0%	0.56	6	0%
Béton adjuvante	SFR122	1%	0.46	7.0	-17.85%
	SP 40	1%	0.47	7.2	-16.07%

Tableau (IV.19) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du béton témoin dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton témoin E/C=0.56).

TYPE DE CIMENT	Age (jours)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	Na Cl	eau de mer
			Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
CPZ-20%	28	33,75	29,75	30,5	28	29	30
		0%	-11,85%	-9,62%	-17,03%	-14,07%	-11,11%
	90	38,1	34,25	33,4	29	35,25	33,5
		0%	-10,10%	-12,33%	-23,88%	-7,48%	-12,07%
	180	43,167	38,5	35	37,4	41,7	38,33
		0%	-10,81%	-18,91%	-13,39%	-3,39%	-11,20%

Tableau (IV.20) : Variation de la porosité (%) du béton témoin dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton témoin E/C=0.56).

TYPE DE CIMENT	Age(jours)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	Na Cl	eau de mer
CPZ-20%	28	1,8	5.21	6.09	7,1	3,43	3,41
		0%	238,33%	189,44%	294,45%	90,55%	89,44%
	90	0,734	4,46	4,67	5,31	2,1	2,9
		0%	536,23%	507,62%	582,56%	186,10%	295,09%
	180	0,534	3.37	3,2	4,79	1,012	1,7
		0%	386,69%	480,52%	797,00%	89,51%	218,35%

Tableau (IV.21) : Variation de la perméabilité (m/s) du béton témoin dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton témoin E/C=0.56).

TYPE DE CIMENT	Age(jours)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	NCL	eau de mer
CPZ-20%	28j	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$2,19 \cdot 10^{-12}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$3,75 \cdot 10^{-11}$	$2,17 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
		0%	82,50%	191,67%	3025%	80,83%	-250%
	90j	$0,34 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$3,11 \cdot 10^{-11}$	$0,9 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$
		0%	2011,10%	3122,22%	3355,56%	277,77%	1233,33%
	180j	$0,19 \cdot 10^{-12}$	$0,95 \cdot 10^{-12}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$	$0,863 \cdot 10^{-12}$	$0,96 \cdot 10^{-12}$
		0%	52.95	11398,61%	12557,35	77.98%	1123.9%

IV.6-2/INFLUENCE DE MILIEU DE CONSERVATION SUR LES PROPRIETES DU BEON TEMOIN :

IV.6-2-1/Influence de milieu de conservation sur la résistance à la compression

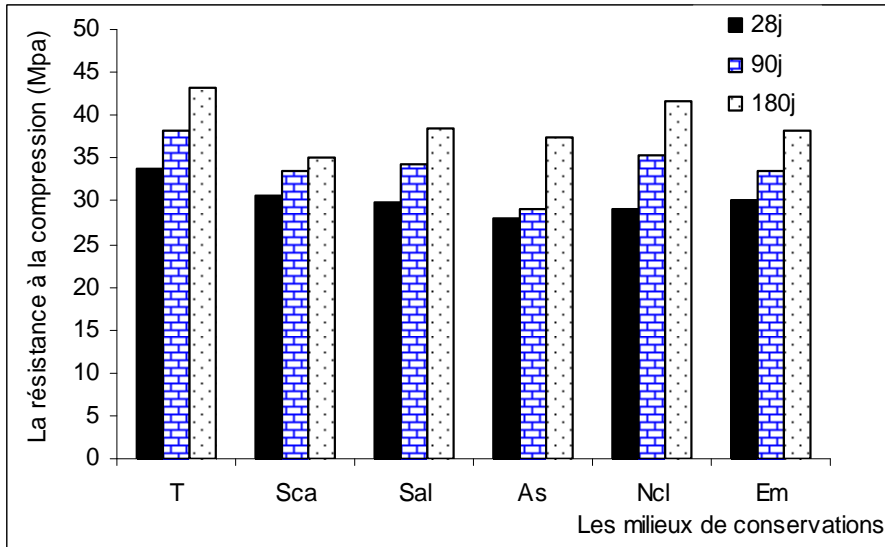


Fig.(IV .24):Variation de la résistance à la compression en fonction de milieu de conservation, paramètre âge.

IV.6-2-2/Influence du milieu de conservation sur la porosité (%) (paramètre âge) :

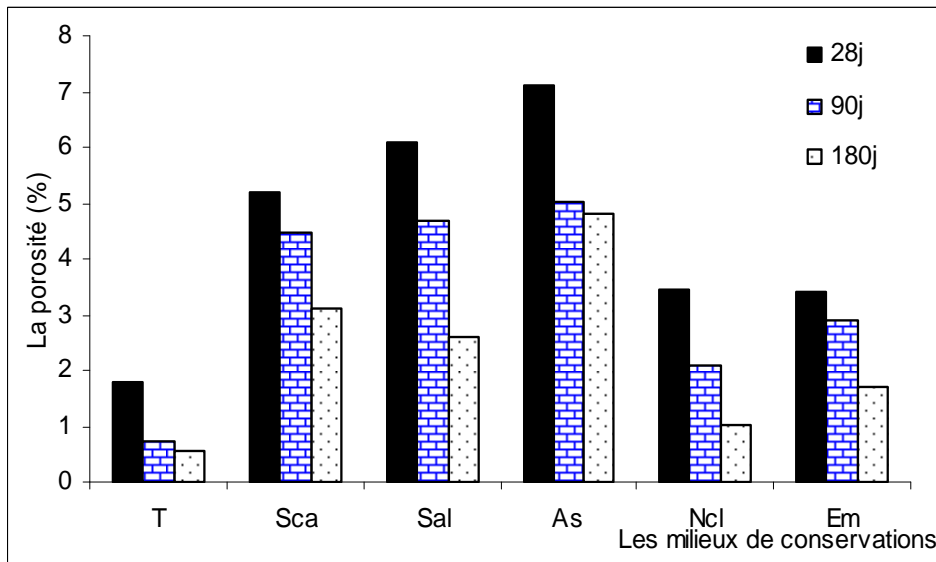


Fig.(IV.25): Variation de la porosité (%) en fonction de milieu de conservation.

IV.6-2-3/Influence de milieu de conservation sur la perméabilité (paramètre âge) :

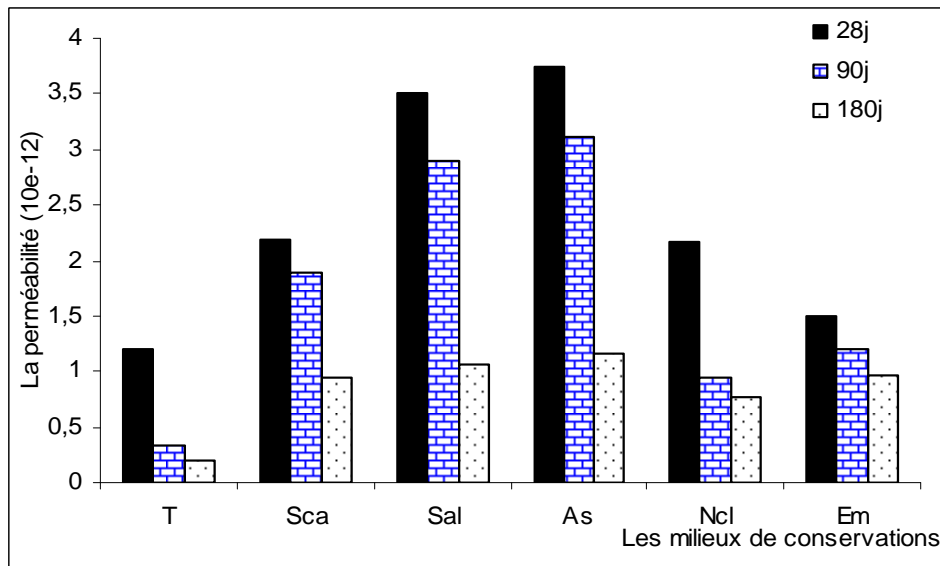


Fig.(IV.26) :Variation de la perméabilité (m/s) en fonction des milieux agressifs.

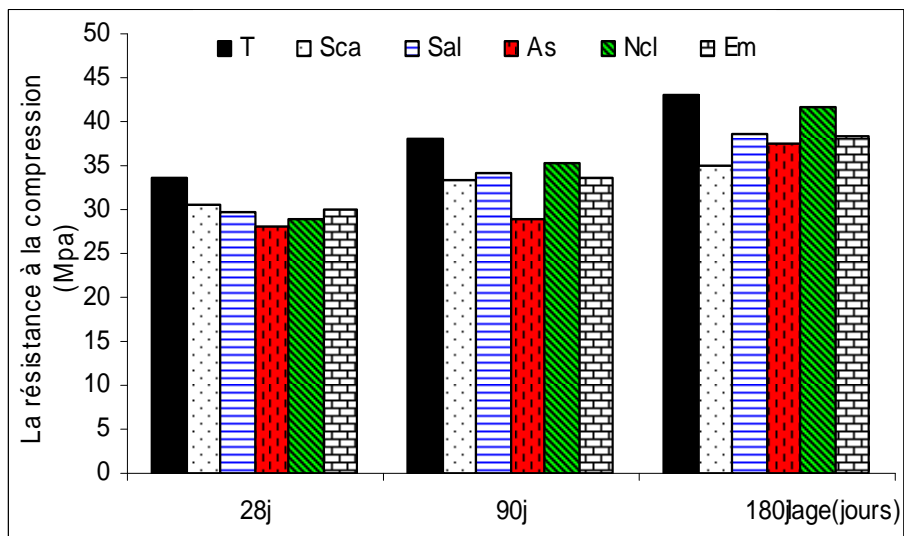


Fig.(IV.27) :Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge,

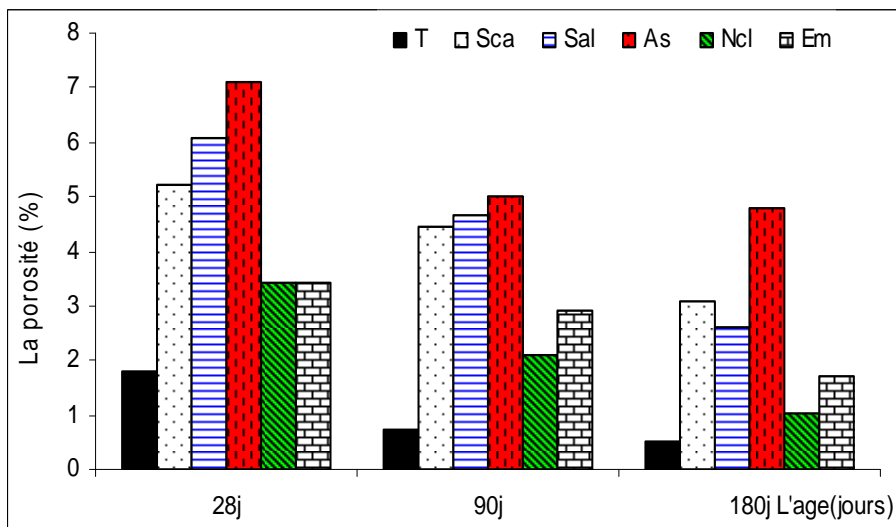


Fig.(IV.28) :Variation de la porosité (%) en fonction de l'âge.

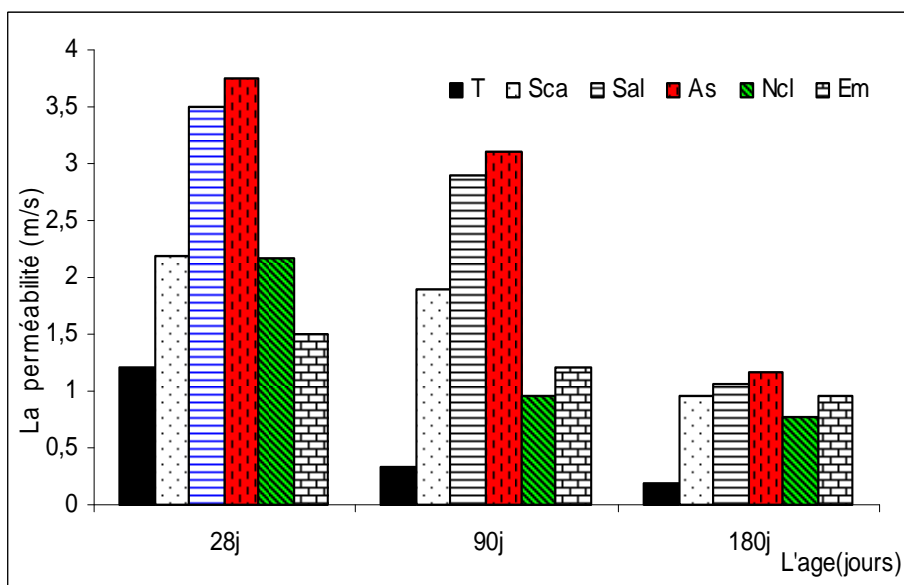


Fig.(IV.29) :Variation de la perméabilité en fonction de l'âge.

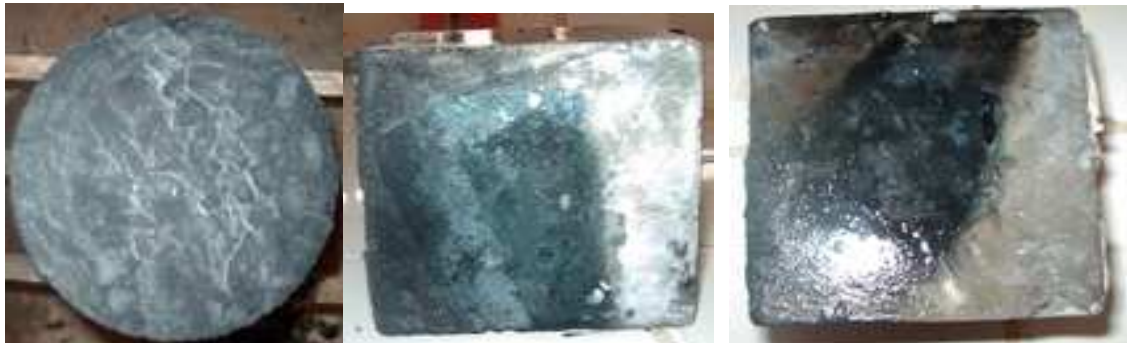
IV.6-4/Observations :

Le lessivage des composés des chaux conduit à la formation et dépôt de sel à la surface du béton pour les éprouvettes conservées dans les milieux agressifs.

Pour les éprouvettes qui sont conservées dans les milieux de sulfates, il y'a plutôt formation des cristaux de portlandite à la surface (surtout la sulfate d'alumine), cristallisation au bords de bain.

On constate visuellement l'expansion des éprouvettes.

Pour les éprouvettes conservées dans le milieu de sulfate d'alumine pour neuf mois, on voit une dégradation superficielle montrée dans une couche sombre formée à la surface, due à la pollution industrielle (activité bactérienne).



Immergée dans la solution
Du sulfate d'alumine, se trouve
Au fond du bac (précipitation
Du produit).

épreuve cubique, subit dégradation superficielle, formation
d'une couche sombre



Epreuve cylindrique immergée dans
Le milieu de sulfate d'alumine.

Fig. (IV.30) : Epreuve pour l'essai de perméabilité, surface dégradée.

Le milieu de la pâte blanche (déchet) est considéré comme un milieu très agressif.

La température ; Un facteur très important qui n'est pas contrôlé ; la plage de variation est entre (30-40) °C. Pour ce qui concerne la conservation des éprouvettes en béton, cela a posé le problème de dessiccation rapide des solutions de conservations, surtout durant la période d'été,

et les éprouvettes se trouvent en demi immersion, ce qui a été constaté pour l'essai de colorimétrie (phénophtaléine).

L'utilisation des adjuvants d'après les résultats, donne des résultats plus importants.

IV.6-5/IMPACTE SUR LES PROPRIETES MECANQUES–INFLUENCE DE LA LIXIVIATION SUR LE COMPORTEMENT EN COMPRESSION:

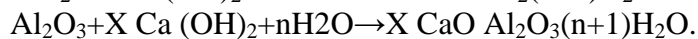
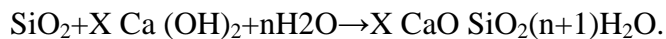
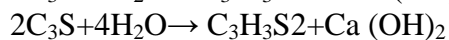
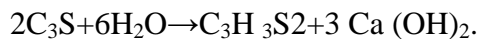
Les composés à la fois majoritaires dans le ciment hydraté et assurant la cohésion mécanique des matériaux sont des composés calciques

La présence de composé pouzzolanique modifie significativement ce comportement. La réaction pouzzolanique (silice+chaux) entraîne la formation de C-S-H, la décalcification de C-S-H est significativement plus difficile que la dissolution de la portlandite.

Alors, les conséquences en terme de réa arrangement de la structure des matériaux est moindre ; la perte de résistance mécanique est donc plus limitée.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la résistance à la compression, pour tous les échantillons, augmente au court du temps quelque soit le type de conservation.

Pour le milieu potable, cette augmentation est principalement due à la propriété pouzzolanique de cet ajout qui, en présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et l'eau, donne naissance à de nouvelles formations (CSH et CAH) possédant des propriétés liantes analogues à celles formées à base des minéraux du ciment.



Pour tout les milieux de conservation du le béton, nous remarquons une augmentation continue de La résistance en compression en fonction de l'age (28j.90j.180j).mais elle dépend du milieu ou les éprouvettes sont conservées.

A l'age de 28jour, on constate que les résistances sont proches de celles du béton de référence,mais à (90j.180j),surtout pour le béton du milieu de (Na Cl),il donne des résultats plus proches du témoin, comme on a déjà expliqué précédemment le processus de dégradation.

Ce béton présente une bonne stabilité, de part sa résistance aux altérations, d'ordre chimique et physique. Cela est dû principalement à la fixation progressive de la portlandite. Cette réaction assure l'amélioration du comportement vis-à-vis des agents agressifs par réduction de la portlandite.

**IV.7/EFFET DES ADJUVANTS SUR LES PROPRIETES DU BETON CONSERVE
DANS LES MILIEUX AGRESSIFS :**

IV.7-1/ EFFET D'ADJUVANT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION:

Tableau (IV.20) : Variation de la résistance à la compression (MPa) dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton adjuvante E/C=0,43). Utilisation d'adjuvant SFR122.

TYPE DE CIMENT	Age, (JOUR)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	Na Cl	eau de mer
CPZ-20%	28	40	32,1	34,1	32,2	33	31,1
		0%	-19,75%	-14,75%	-19,50%	-17,25%	22,25%
	90	52,3	42,5	40,1	41,33	44,1	41,2
		0%	-18,73%	-23%	-20,97%	-15,67%	21,22%
	180	58,25	43,1	42,7	42,3	46	44
		0%	-26%	-26,69%	-27,38%	-21,03%	24,46%

Tableau (IV.23) : Variation de la résistance à la compression (MPa) dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton adjuvante E/C=0,45).avec l'adjuvant SP40.

type de	Age (jours)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	Na Cl	eau de mer
CPZ-20%	28	39	31,5	32,1	30,25	32,5	30,1
		0%	-19,23%	-17,69%	-22,43%	-16,67%	22,82%
	90	49,6	41	39,7	40,17	42,5	40,7
		0%	-17,33%	-19,95%	-19%	-14,31%	-17,94%
	180	54,75	43,4	40,1	41,1	45,7	43,1
		0%	-20,73%	-26,75	-24,93%	16,52%	-21,27%

IV.7-1-1/Observation :

La résistance augmente en fonction de l'âge pour le milieu témoin (l'eau potable), pour les milieux agressifs, l'agression sera remarquée à long terme, (chute de résistance).

Le milieu d'acide sulfurique et le plus agressives, cela est dus au mécanisme du dégradation.

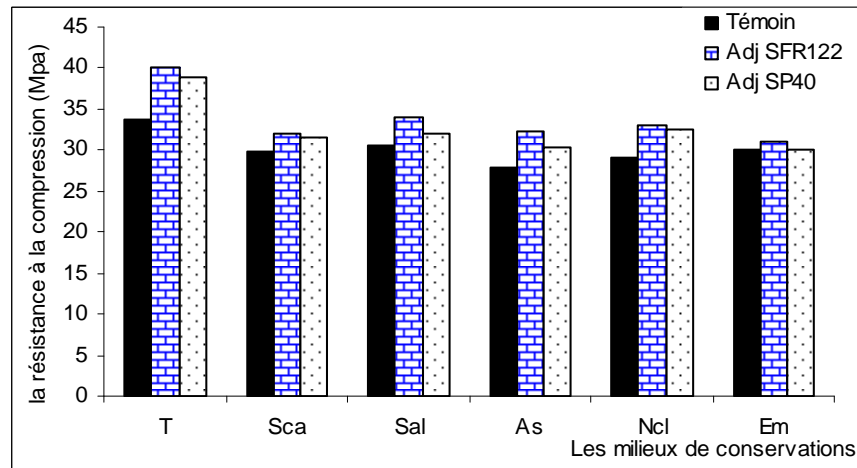
La résistance augmente avec la diminution de l'eau, veut dire que l'utilisation d'adjuvant permet de réduire la quantité d'eau, cette réduction sera remarquer sur les résultats du béton à court et long terme.

Cette augmentation de la résistance est liée à la réduction du dosage en eau.

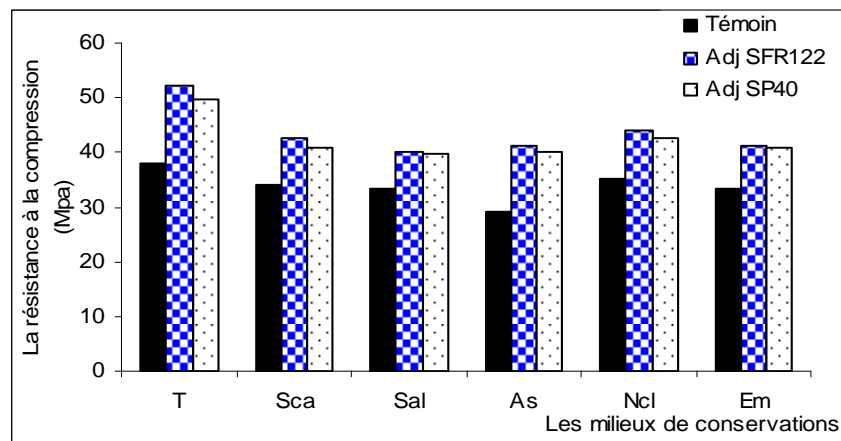
Les résultats obtenus avec adjuvant à court terme, sont dus à une augmentation notable de la vitesse de durcissement, comme on peut le constater sur les courbes. L'ajout de pouzzolane donne des bons résultats, dus aux propriétés d'hydratation des ajouts actifs.

Fig. (IV.31): Variation de la résistance à la compression en fonction des milieux de conservation, paramètre : type d'adjuvant.

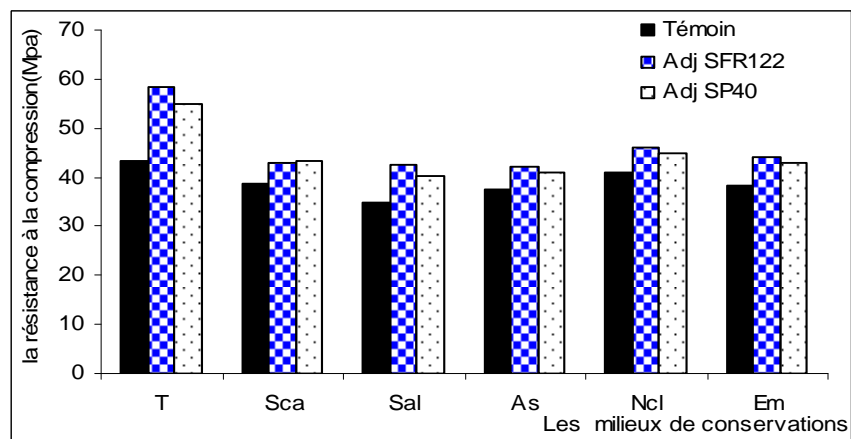
a)- 28 jours.



b)- 90 jours



c)- 180 jours.



IV.7-1-2/CONCLUSION :

On constate que les résistances obtenues par notre béton sont plus au moins proches du témoin, la dégradation par les sulfates et due principalement à l'action combinée des ions de sulfates et des cations(Ca^{+2} , Al_2O_3) avec la portlandite.

Les sulfates réagissant avec les aluminates du ciment donnent des composés expansifs tel que l'ettringite dont la cristallisation provoque la fissuration dans le béton.

Les ajouts actifs ont le pouvoir de réduire l'action chimique et physique de ces sels (eau de mer, Na Cl) ce qui conduit à une amélioration des résistances des bétons avec ajout de pouzzolane

En comparant entre les deux milieux (sulfates de gypse / sulfates d'alumine), on remarque, d'après les résultats, que le sulfate d'alumine et le plus nocif, à cause de sa composition chimique.

L'acide sulfurique est considéré parmi les milieux les plus agressifs ; cela est dû au processus de dégradation.

L'influence des chlorures est liée à l'incursion de son cation monovalent par la surface de l'éprouvette par le phénomène de diffusion.

IV.7-2/EFFET D'ADJUVANT SUR LA POROSITE :

Tableau (IV.24) : Variation de la porosité (%) dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton avec adjuvant E/C=0.43), avec l'adjuvant SFR 122.

TYPE DE CIMENT	Age (jours)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	Na Cl	eau de mer
CPZ-20%	28	1,4	4.7	5.1	6,62	3,03	2,07
		0%	269,28%	235,71%	377,14	116,42%	478,58%
	90	0,37	3.12	4.1	4,7	1,01	1,11
		0%	1008,10%	743,24%	1335,13%	172,97%	200%
	180	0,11	3,1	3.37	3,35	0,87	0,91
		0%	2963,64%	2636,36%	2945,45%	690,90%	727,27%

Tableau (IV.25) : Variation de la porosité (%) dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton avec adjuvant E/C=0.45).utilisation d'adjuvant SP40.

TYPE DE CIMENT	Age (jours)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	Na Cl	eau de mer
CPZ-20%	28	1,5	4.9	4,3	6,75	3,1	2,69
		0%	250%	186,67%	306,67%	106,67%	79,33%
	90	0,51	4,43	3,9	5	1.83	1,5
		0%	768,62%	664,70%	933,33%	474,50%	194,12%
	180	0,25	3.2	3,7	4,71	0.98	1.2
		0%	1540%	1196%	1384%	360%	296%

IV.7-2-1/Observation :

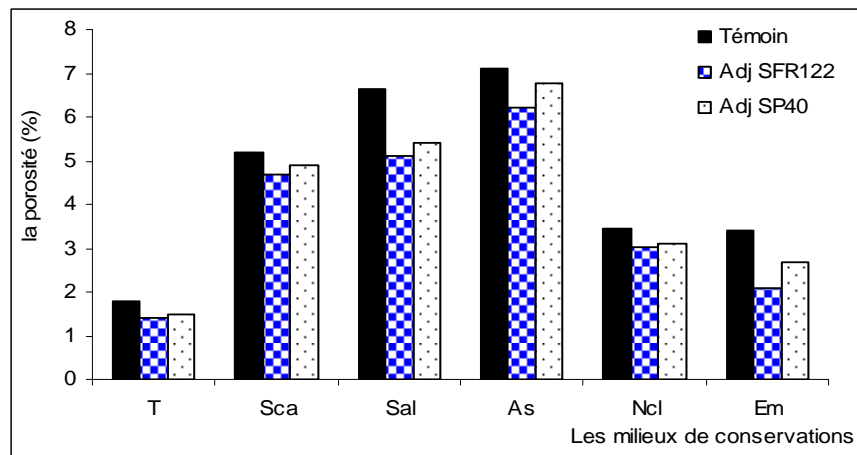
On constate d'après les résultats des tableaux (24 ,25), une diminution continue du taux de développement de la porosité dans les différents milieux de conservation, et pendant tous les âges d'essais. Mais la dégradation sera remarquée à long terme ; ce qui va influencer sur la porosité.

Le milieu le plus agressif est l'acide, qui entraîne une dégradation rapide de la surface des éprouvettes.

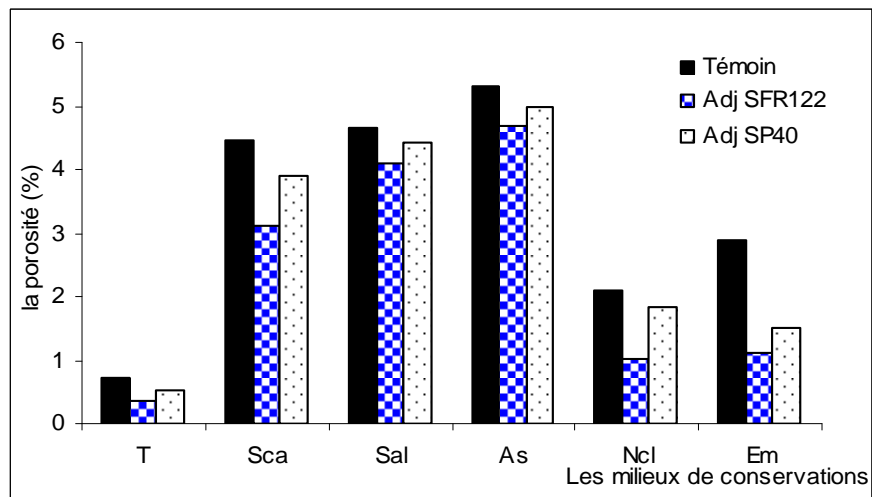
L'adjonction des adjuvants est plus importante que celle du témoin à cause de ces caractéristiques surtout sur la réduction d'eau qui liée à la porosité.

Fig. (IV.32) : Variation de la porosité (%) en fonction des milieux de conservation, Paramètre : type d'adjuvant.

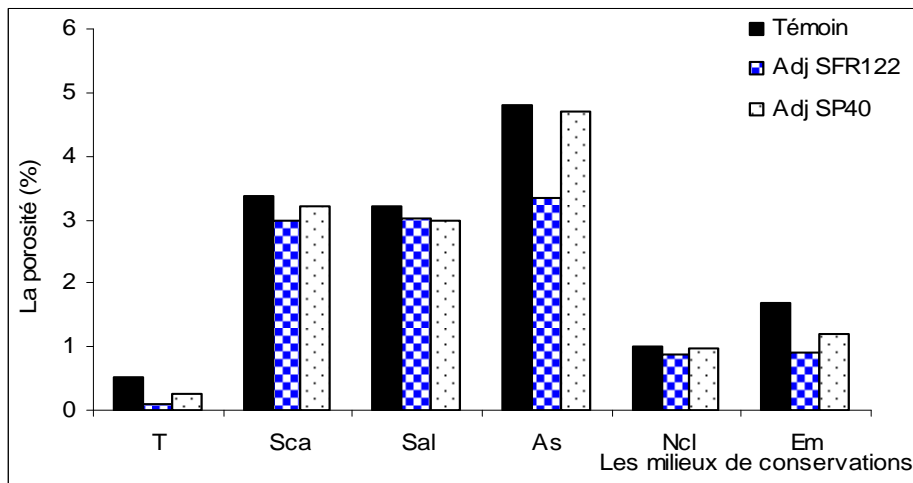
a)- 28 jours.



b)- 90 jours.



c)- 180 jours.



IV.7-2-2/Conclusion :

La structure des mortiers ou de la pâte de ciment est primordiale pour l'évaluation de la durabilité.

La porosité est liée à la structure ; c'est-à-dire au taux d'absorption des ions agressifs. C'est pourquoi on constate que la porosité est fonction de la diminution du rapport E/C.

Un adjuvant super plastifiant : il n'est plus possible de conserver le dosage en eau des mortiers normaux ; le mélange obtenu serait beaucoup trop liquide et il y aurait alors ségrégation. Il convient alors de réaliser des pâtes ayant le même temps d'écoulement au maniabilimètre, en réduisant la quantité d'eau de la pâte adjuvante.

Cette réduction d'eau se traduit par une importante augmentation de la résistance à la compression à 28 jours. Cette augmentation est directement liée à la diminution de la porosité de la pâte consécutive à la diminution du dosage en eau.

L'adjonction des superplastifiants peut se traduire également par une augmentation notable de la vitesse de durcissement pour les premiers jours. Et, par conséquence, augmentation de la résistance.

La porosité diminue avec l'augmentation d'âge, cela peut s'expliquer par le fait que la plupart des particules des hydrates sont complètement liées et densifiées; cela entraîne un bouchage des pores en provoquant la diminution de la porosité. Par ailleurs, les vestiges des espaces inter granulaires laissés par l'hydratation du ciment sont beaucoup plus petits dans ce cas mais sont plus interconnectés. Ils ont la tendance de former des vides sous forme de cheveux.

La porosité diminue avec l'utilisation des adjuvants, et dans tous les intervalles d'âge. Par ailleurs, l'augmentation de la perméabilité ne signifie pas que le pourcentage des vides (pores) dans le béton augmente. En fait, les pores sont interconnectés entre elles ; ce qui va former un espace continu (sous forme de conduite). Une faible porosité ne signifie pas une faible perméabilité.

IV.7-3/EFFET D'ADJUVANT SUR LA PERMEABILITE :

Tableau (IV.26) : Variation de la perméabilité (m/s) dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton avec adjuvant SFR (1%) , E/C=0.43)

TYPE DE CIMENT	AGE(Jour)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	NCL	eau de mer
CPZ-20%	28j	0,7310 ⁻¹¹	1,97 10 ⁻¹¹	2,01 10 ⁻¹¹	3,6 10 ⁻¹¹	0,8710 ⁻¹¹	1,1 10 ⁻¹¹
		0%	169.86%	175.34%	393.15%	23.28%	50.68%
	90j	0,5110 ⁻¹²	1,78 10 ⁻¹²	3,12 10 ⁻¹²	6,5 10 ⁻¹²	0,9 10 ⁻¹²	0,98 10 ⁻¹¹
		0%	249.01%	511.76%	1174.5%	70.58%	1664.7%
	180j	0,1710 ⁻¹²	1,35 10 ⁻¹²	2,8710 ⁻¹²	4,5 10 ⁻¹²	0,29 10 ⁻¹²	0,35 10 ⁻¹²
		0%	694.11%	1588.23%	2547.05%	70.58%	105.88%

Tableau (IV.27) : Variation de la perméabilité (m/s) dans les milieux agressifs, après traitement de 6 mois. (Béton avec adjuvant SP(1%) , E/C=0.45).

TYPE DE Ciment	AGE (JOUR)	L'eau potable	Milieux agressifs				
			SCA	SAL	AS	NCL	eau de mer
CPZ-20%	28j	0,83110 ⁻¹¹	1,7-10 ⁻¹¹	2,7-10 ⁻¹¹	3,1-10 ⁻¹¹	0,95-10 ⁻¹¹	1,7-10 ⁻¹¹
		0%	131.04%	224,90%	273,04%	143.20	104,72%
	90j	0,67-10 ⁻¹²	1,72-10 ⁻¹²	7,41-10 ⁻¹²	8,47-10 ⁻¹²	0,75-10 ⁻¹²	0,8-10 ⁻¹²
		0%	156.71%	1005,97%	1164,17%	11,94%	194,02%
	180j	0,2-10 ⁻¹²	1,65-10 ⁻¹²	5,3-10 ⁻¹²	6,65-10 ⁻¹²	0,88-10 ⁻¹²	0,67-10 ⁻¹²
		0%	725%	2550%	3225%	340%	235%

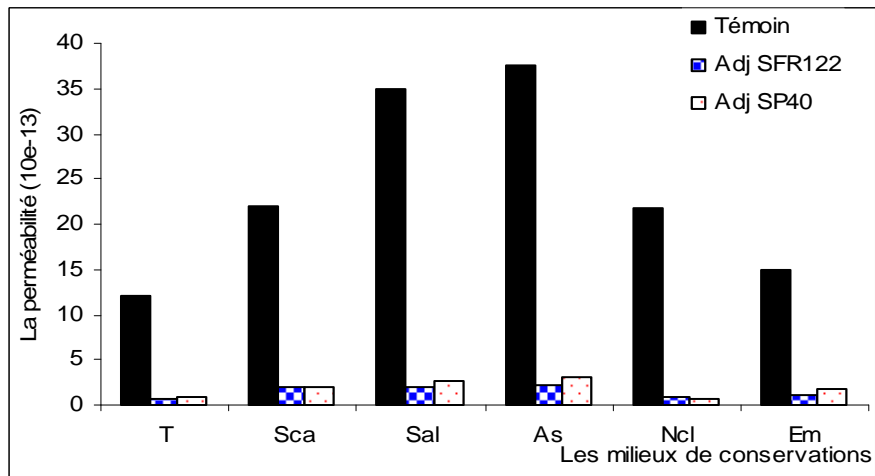
IV.7-3-1/Observation :

D'après les courbes, la perméabilité diminue proportionnellement avec l'âge. Les valeurs les plus élevées de la perméabilité sont obtenues pour le milieu d'acide sulfurique. Le moins imperméable des milieux agressifs est le Na Cl, cela est dû au mécanisme de dégradation (déjà mentionné).

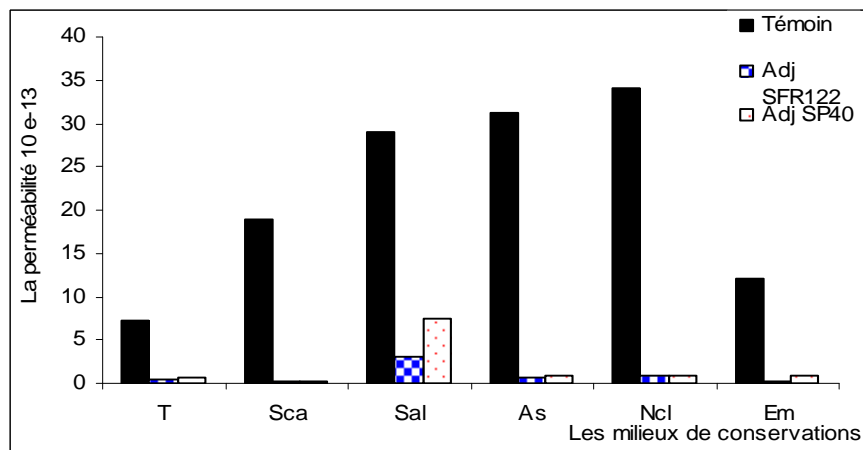
Les taux d'accroissement sont regroupés aussi dans le tableau. L'utilisation d'adjuvant améliore nettement la perméabilité.

Fig. (IV.33) : Variation de la perméabilité (m/s) en fonction des milieux de conservation, Paramètre : type d'adjuvant.

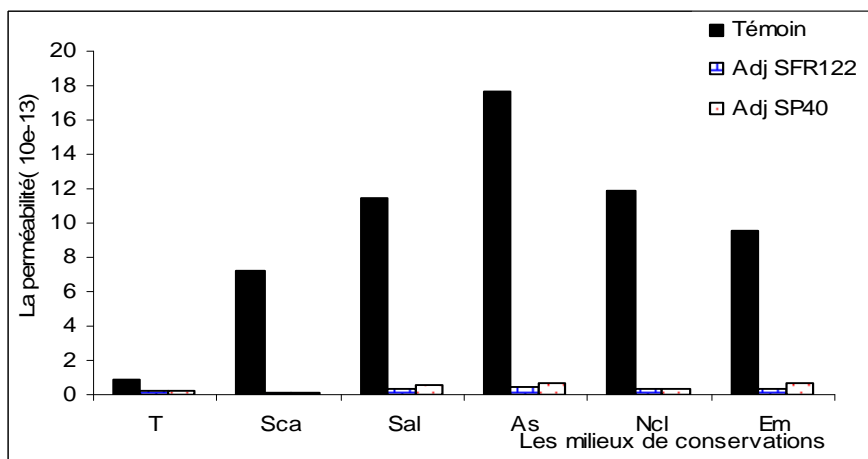
a)- 28 jours.



b)- 90 jours.



c)- 180 jours.



IV.7-3-2/Conclusion :

D'après les courbes, la perméabilité diminue proportionnellement avec l'âge. Les valeurs les plus élevées de la perméabilité sont obtenues pour le milieu d'acide sulfurique. Le moins imperméable des milieux agressifs est le Na Cl, cela est dû au mécanisme de dégradation (déjà mentionné).

Les taux d'accroissement sont regroupés aussi dans le tableau. L'utilisation d'adjuvant améliore nettement la perméabilité.

Cette augmentation est due à l'ajout de pouzzolane qui change la structure des pores. Il fait diminuer le nombre des gros pores et fait augmenter celui des petits pores (réduit la taille des pores).

Les grains de pouzzolane, à cause de leur taille très fine, se précipitent dans les pores et, bien qu'ils soient incapables de remplir complètement les pores larges, ils sont suffisants pour stopper les passages entre les pores, ou encore de réduire considérablement leur largeur.

L'augmentation considérable de la durabilité à travers la perméabilité du béton contenant de la pouzzolane par apport au béton sans ajouts s'explique généralement par une plus fine répartition des pores. Mais la réduction de la perméabilité peut également être due à une meilleure liaison entre la pâte de ciment durcie et les granulats.

IV.8/CONCLUSION :

L'utilisation de deux types d'adjuvant SFR ,SP avec un pourcentage (1%), réduit sensiblement la valeur E/C, et cette réduction est engendrée par une augmentation de la résistance jusqu'à une valeur maximale. Au delà de cette valeur, la résistance diminue avec l'emploi d'adjuvant fluidifiant. Ceci donne des résultats plus importants que celle du béton témoin, surtout la période initiale (7j).

L'augmentation du dosage en adjuvant entraîne une diminution de la résistance, de la porosité et de la perméabilité.

Le pourcentage réduit d'eau en SFR est plus important que celui de SP. Cela est dû à leur composition chimique qui influe positivement et directement sur la vitesse du mécanisme d'hydratation, ce qui favorise l'amélioration de la quantité d'hydrate.

Il est important de connaître la composition des adjuvants afin de comprendre le mécanisme réactionnel entre l'adjuvant et la matrice.

L'utilisation des adjuvants montre une amélioration de l'ouvrabilité de tous les bétons testés. En effet, l'affaissement au cône augmente avec le dosage en fluidifiant.

Les éprouvettes des milieux du sulfate d'alumine sont moins dégradées, comparativement avec celles du témoin.

Les résultats obtenus montrent, d'une façon pratique, une augmentation relativement importante des résultats de SFR que SP et ça est dû au pourcentage de la réduction E/C qui est un facteur très important, en relation directe avec la porosité et la microstructure.

A la vue des résultats, on peut dire que les adjuvants améliorent les trois propriétés: porosité, perméabilité, et résistance mécanique. Mais, par ailleurs, on a constaté qu'au delà de ce dosage, il peut causer des effets négatifs.

L'utilisation d'ajout type pouzzolanique, conjoint avec celui d'un fluidifiant, donne des résultats plus intéressants (résistance mécanique, porosité, perméabilité), qui permet de réduire très significativement la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance donnée.

Valeur de premier ordre, la porosité est ainsi très fortement réduite, mais l'effet du pouzzolane touche également les autres de la texture des bétons.

Elle réduit la dimension des pores capillaires et densifie l'auréole de transition au voisinage des granulats. En plus de cet effet géométrique, il modifie la structure de CSH, néoformation par réaction pouzzolanique, et donne un béton plus compact, plus imperméable et plus résistant, donc plus durable.

CONCLUSION GENERALE

L'attaque chimique des bétons s'effectue principalement sur la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, contenue dans la pâte de ciment. Mais l'attaque des silicates d'aluminates de chaux hydratées n'est pas négligeable. Si les produits de réaction sont solubles, la matrice devient de plus en plus ouverte.

Ce travail est une contribution à la compréhension des processus d'altération de matériaux cimentaires par des eaux acidifiées, sulfatées des sels.

L'identification expérimentale des différents paramètres et leurs effets sur les propriétés du béton s'avère nécessaire à imposer pour identifier notre champ d'investigation autour de:

- 1-Les mécanismes de dégradation des matrices cimentaires dans les différents milieux de Conservation.
- 2-L'influence de la nature de deux types de ciment (pouzzolane, calcaire).
- 3-L'effet des adjuvants fluidifiants.
- 4-L'influence de l'âge.

La corrosion des bétons dans ces environnements peut être grossièrement classée dans l'un des deux groupes :

Décalcification du mortier qui ouvre des pores dans la structure, et conduit à une perte de résistance.

Production des phases expansives, qui engendrent des contraintes internes, sources de microfissures.

Le choix et la sensibilité des matériaux à base de ciment, la durée de cure sont le facteur clé pour assurer une bonne durabilité. Le choix du type de ciment composé (contrôle de la teneur en portlandite), avec ajout pouzzolane et calcaire ont un effet bénéfique et particulièrement le ciment pouzzolanique qui ouvre des possibilités de formulation, adaptées à des conditions variées.

La résistance à la corrosion chimique est étroitement liée à la teneur en portlandite de chaque type de ciment.

Dans plusieurs environnements, pour les matrices cimentaires, on a choisi :

- L'eau potable, comme référence
- Les sulfates ($\text{Mg}+\text{Na}$) SO_4 , CaSO_4 , $(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{SO}_4$ trois milieux.
- L'acide sulfurique (AS), H_2SO_4 .
- Na Cl,
- Eau de mer artificielle (Em).
- Nitrate d'ammonium (Na) $[(\text{NH}_3)_4\text{NO}_3]$.

- 1- L'âge est un paramètre prédominant, au vu des résultats observés, particulièrement sur les résistances mécaniques.
- 2-Apparence des surfaces dégradées dans les différents milieux.
- 3-Influence du type de ciment et plus significativement pour les mortiers.

La ciment avec ajout pouzzolane donne les meilleurs résultats grâce à la résistance mécanique élevée; cela est du à :

- Sa réactivité pouzzolanique.
- La faible teneur en portlandite et le C_3A .

Avec ses bonnes propriétés, notamment sa réaction pouzzolanique complète, il conduit à une pâte de ciment bien durable (bonne résistance); c'est à dire que l'effet pouzzolanique qui y est associé se produit à partir de l'âge de (7jours).

A l'âge de 28j, 180j, les pâtes, mortiers et bétons contenant la pouzzolane, présentent des résistances mécaniques importantes, proches de celles du témoin.

Ce qui confirme la propriété latente de l'hydratation des ciments pouzzolanique (activité lente de la pouzzolane).

L'emploi d'ajout de pouzzolane en pourcentage est limité jusqu'à (30%), vu la couleur rouge naturelle de la pouzzolane, le pourcentage utilisé est limité à (20%).

On remarque que le ciment à base de ciment pouzzolanique conduit au résultat suivant :

La résistance des matrices cimentaires évolue régulièrement avec le temps, et ne présente aucune chute (grâce à ses propriétés d'ajout actif). Cela est du à l'effet de résistance du ciment pouzzolanique aux altérations d'ordre physique et chimique, surtout la fixation progressive de la teneur en portlandite.

Il réduisent les dimensions des pores les plus gros (pores capillaires). En plus de cet aspect géométrique, les pouzzolanes ont un effet chimique qui modifie la structure des C-S-H néoformé par réaction pouzzolanique : à long terme la taille des pores des C-S-H diminue. C'est-à-dire que la formation supplémentaire des hydrates C-S-H, qui précipitent dans les pores, diminue par la suite la porosité de la pâte de ciment

Les résistances développées à base du ciment calcaire sont sensiblement moins importantes que celles de la pouzzolane.

La présence des fines calcaires consolide en densifiant la matrice cimentaire par remplissage des pores de la structure.

Le comportement avec l'ajout calcaire est inversement comparé à la pouzzolane. Autrement dit, il développe ses résistances mécaniques à court terme (7j), et puis elles chutent à long terme (28j).

En ce qui concerne la consistance normale pour les deux types d'ajout :
Pour la pouzzolane ; augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale. $E/C=0.27$.

Pour le ciment calcaire : la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale $E/C=0.255$.

D'après les résultats des résistances mécaniques (flexion, compression), le ciment pouzzolanique montre un meilleur résultat en comparativement avec le ciment calcaire dans les milieux agressifs.

On a constaté aussi que le milieu de nitrate d'ammonium ($(\text{NH}_4) \text{NO}_3=5\%$) est le plus nocif, et ensuite, par ordre décroissant, on trouve le milieu d'acide sulfurique (As) le milieu des sulfates et enfin celui des chlorures.

Les mécanismes de dégradation dus aux attaques sulfatiques, $(\text{Mg}+\text{Na})\text{SO}_4=5\%$, et l'acide sulfurique (H_2SO_4) sont totalement différents, $\text{pH}=4$ L'acide sulfurique détériore progressivement la surface, tandis que le sulfate provoque une dégradation interne du matériau..

Remarque

Pour tous les milieux agressifs, le pH et la composition de solution n'ont pas été suivis régulièrement, en début d'expérience.

Dans le milieu d'acide sulfurique, les éprouvettes de mortier sont rapidement recouvertes, après immersion, d'une couche de gypse qui ralentit la progression de l'attaque.

La faible solubilité du gypse en environnement acide rend cette couche relativement stable au sein du matériau. L'analyse par diffraction X, confirmant la pression de cristallisation du gypse dans la couche superficielle tapissante, se traduit par le gonflement observé lors des essais d'exposition.

L'attaque des nitrates d'ammonium produit des dégâts considérables. Le dépôt superficiel des produits de carbonate formé par le nitrate et une décalcification du mortier se produit rapidement, ce qui affaiblira la matrice du ciment inévitablement et la détérioration est accentuée rapidement par lavage de surface. Cela explique la détérioration rapide des pâtes.

Dans le milieu de sulfate $(\text{Mg}+\text{Na})\text{SO}_4=5\%$ la première remarque qu'on peut faire sur les éprouvettes c'est le gonflement qu'on peut constater visuellement, surtout après lavage des éprouvettes, c'est l'apparition des microfissures.

Après immersion, il se forme une couche de gypse faible sous forme d'aiguille à la surface. Des cristaux ont été trouvés sur le périmètre du bain.

C'est le même constat pour le milieu de gypse (CaSO_4) et le sulfate d'alumine.

Les analyses par diffraction X, $(\text{Mg}+\text{Na})\text{SO}_4=5\%$ montrent une dégradation moins importante par la formation de gypse fibreux en très faible quantité. Par contre, le gonflement produit, durant l'immersion des solutions de sulfates de gypse et l'alumine, est très important. Ça peut être expliqué par une pression de cristallisation agissant dans la zone de basicité réduite. L'essai de phénol met en évidence une zone de pH réduite importante.

La dégradation des propriétés mécaniques peut s'expliquer par la décalcification de la zone superficielle et par les niveaux élevés de microfissuration induite par le gonflement.

Pour le milieu de béton, le sulfate d'alumine (la pâte blanche), on remarque qu'il y a dégradation superficielle présentée à la surface sous forme d'une couche sombre (pollution industrielle).

L'attaque par l'eau de mer est moyennement agressive, d'après les résultats obtenus.

L'action de Na Cl est moins nocive sur le béton (il ne lessive pas et ne gonfle pas), l'incursion des ions se fait par le phénomène de diffusion avec la surface de l'éprouvette.

En ce qui concerne les propriétés du béton :

Pour la porosité et la perméabilité : l'utilisation d'un béton à base de liant pouzzolanique présente une meilleure durabilité à travers sa résistance mécanique, sa porosité, et sa perméabilité, dans les différents milieux de conservation.

Toutefois, l'utilisation d'adjuvant fluidifiant permet d'améliorer encore plus les performances dans les milieux de conservation. Avec l'exigence d'un bon traitement de cure, surtout pour le béton contenant de la pouzzolane.

L'ajout de pouzzolane ou calcaire en quantité satisfaisante présente un avantage essentiel: de bonnes résistances et une meilleure économie. Ce travail confirme aussi que les ciments pouzzolaniques sont les mieux adaptés particulièrement pour les milieux agressifs. Une durabilité extrême des structures en béton doit être recherchée.

PERPECTIF ET COMPELIMENT DE RECHERCHE :

Pour compléter cette étude, il est nécessaire de donner quelques perspectives :

- 1-Etudier les processus de dégradation dans les milieux agressifs. En tenant compte du régime de cure comme paramètre essentiel.
- 2-Etude comparative entre le CPA, CPJ dans les milieux d'acide ou sulfate.
- 3-L'incorporation des différents adjuvants dans les bétons exposés en milieux agressifs
- 4-Etude complémentaire, avec des analyses en diffractomètre X, la MEB (Microscope Électronique à balayage) s'avère très nécessaire pour expliquer les phénomènes D'hydratation réactionnel, surtout pour les pâtes exposées en milieux agressifs.
- 5-L'influence de la concentration des milieux agressifs.
- 6-Suivre le phénomène de gonflement des différents types de ciments.
- 7-Les essais par colorimétrie, pour déterminer la profondeur de carbonatation des différents Types de ciment. En même temps, constater l'influence de régime de cure.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE :

- [1] : **J.BARON** « Introduction à la durabilité des bétons »-La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussés, ISBN 2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 23-40.
- [2] : **B.Gerard** « représentative des essais accélérer de vieillissement et leur utilisation Pour prédire la durée de service des ouvrages », article 2002, LMT, Cachan, France, pp : 1-3.
- [3] : **K.Hermann** « Résistance chimique », article 2002, Internet, pp :1-6.
- [4] : **M, regourd** « La résistance du béton au altérations physique et chimique »-le béton Hydraulique Connaissance et pratique, presse de l'imprimerie : la source D'or, dépôt légal : 2ème trimestre 1995, N : 5603, pp : 513-530.
- [5] : **F.Randell** « Le comportement des bétons dans les systèmes d'assainissement »-Thèse Doctoral, L'institut national des sciences appliquées de rennes, Génie33-125. Civil, JANVIER 2004, N° d'ordre D00-01, LMDC, INSA deToulouse, France.
- [6] : **ANDRA** « Généralité sur les matériaux cimentaires »-Les matériaux cimentaires « Référentiel matériaux » Tome 3,C.RP.AMAT.060/A, INSA De Toulouse, France, page : 17.
- [7] : **B.Albert** « Altérations des matrices cimentaires par les eaux de pluie et des Eaux, ENSMS, Saint Etienne, France, N° d'ordre : 278 CD, pp : 210-215.
- [8] : **G.Dreux** « Propriétés des ciments courants » Nouveau guide de béton et ses Constituants,huitième éditions, Editions Eyrolles, ISBN : 2-212-10.231-3, Dépôt légal : mars 1998, paris, pp : 34.
- [9] : **ANDRA** « Réactivité chimique et durabilité », Tome 4-Les matériaux Cimentaires «Référentiel matériaux », CRP.AMAT.01060/A. Pp : 18-94.
- [10] : **ANDRA** « Les propriétés physiques mécaniques hydrodynamique, thermiques Des matériaux cimentaires », Tome3, les matériaux cimentaires « Référentiel Matériaux », CRP.AMAT.01.060/A, pp : 26-36.
- [11] : **A.M.Amine, A.H.ALI, H, ALI, EL-Didamony**, durabilité of some portland Cement pastes in various chloride solutions, ZKG international, N° 3, pp : 172-177 ,1997.
- [12] : **M.Vénuat** « Conseils et recommandations pour confectionner un béton Résistant à l'action agressives de l'eau de mer »-chapitre 6, la Pratique des ciments et des bétons.
- [13] : **A.M.Neville** « Propriétés des bétons »-propriétés des bétons, Editions Eyrolles, ISBN :2-212-01320-5 ,Paris septembre 2000,pp :627-631.
- [14] : **L'attaque sulfatique** « Durabilité et réparation du béton », Université de Sherbrooke, article d'Internet, GC1714, pp : 160-169.
- [15] : **NORME FRANCAISE** « Classification des environnements agressifs »-fascicule De documentation publier par l'afumer en juin 1992.
- [16] : **R.H.BOGUE** « Durcissement des pâtes de ciments »-la chémie du ciments Portland, Editions Eyrolles, Paris 1992, pp : 510-517.
- [17] : **A.Capliez** «Sols »-deuxième partie -Granulats, sols, ciments et bétons, Editions CASTELLA, Paris, pp : 34-99.
- [18] : **G.Youcef** « Effet des ajouts cimentaires ultrafines sur la durabilité et les Propriétés physico mécaniques des bétons »-mémoire de magister, Université de Boumerdes 2002, pp : 36.

- [19] : **C.Vernet** « Stabilité chimique des hydrates, mécanisme de défense de béton Face aux agressions »- La durabilité de béton, presse de l'école nationale Des ponts chaussés, ISBN-2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 137-150.
- [20] : **B.Laid** «perméabilité, porosité et résistance mécanique d'un béton à base de Matériaux locaux comme critère de durabilité », université de Guelma.
- [21] : **M.Southanama** « Mécanisme proposer par les sulfates »-article-India institut Of thécnology, Chanai, India, School of civil engineering, Rerche University, USA.
- [22] : **M.Raoul** « Etude physico chimique d'altération et modification exposer aux Sels d'ammonium, article, University of east London, received 20 octobre 2001, accepted 9 July 2002.
- [23] : « **Influence de la carbonatation superficielle sur la carbonatation du béton** »- DEA, LMDC, INSA de Toulouse, France, pp : 27-29.
- [24] : **C.Vernet** « Stabilité chimique des hydrates de défense du béton, face aux Agressions chimiques »-La durabilité des bétons, Presse de l'école Nationale du Ponts chaussés, ISBN 2-85978-184-6, Paris 1992, pp : 23-40.
- [25] : **A.Carles, M.Abérubé** « La durabilité des face à l'alcali réaction »-La Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 300-307.
- [26] : **R.Duval** « La durabilité des armatures et du béton d'enrobage »-La Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 190-198.
- [27] : **K.Riçale** « Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés Mécaniques des mortiers et des bétons, mémoire de magister Université De Batna, 2001, pp : 55.
- [28] : **H.Hornain, R.Duval** « La durabilité des bétons, presse de l'école Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 165-174.
- [29] : **R.Lesage** « Les granulats »-Le béton hydraulique-La Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 39-58.
- [30] : **P, La plante, G.Chnuillar** « Viser une résistance à court terme pour tenir les Délais de fabrications »-Les bétons base et données pour leur Formulation, Editions Eyrolles,N° :2434875-Dépôt légal, Janvier 1997,2ème Tirage, N° éditeur N°5820, pp : 224-265.
- [31] : **Pierre Claude –Aitcin** « **Béton haute performance** »-La durabilité du BHP- Editions Eyrolles,N°289166.dépôt légal, Janvier 2001,Paris,pp :563.
- [32] : **David.Whiting** « Perméability of sélect concrete »-Perméability of concrète, Arthur walit, David whiting, editors,ACI Publication,SP 108-11, Editorial Production : Patricia j. kost,N :USA 1998.pp :195-222.
- [33] : **Fiche technique de Granitex**, concernant l'adjuvants SFR122, Alger 2003.
- [34] : **ANDRA** « Evolution du PH et de la quantité de calcium en solutions lors de Lixiviation d'un ciment hydraté »-Réactivité chimique et durabilité, Référentiel matériaux, C.RP AMAT 1060 /A, LMDC, INSA, Toulouse, France, pp : 27-2
- [35] : **Fiche technique de Granitex**, concernant l'adjuvant SP40, Alger 2003.

- [36] : **ANDRA** « Les matrices cimentaires »-Référentiel matériaux, tome 4, C.RP.AMAT 01060/A, pp : 44.
- [37] : **S.Gorkee** « mesure de la perméabilité »-rapport du stage DEA, INSA LMDC, Toulouse, France, 2003, pp : 5-19.
- [38] : **J.Baron, R.Sauterey** « Le retrait de la pâte de ciment »-Le béton hydraulique Sixième éditions, Presse de l'école Nationales des Ponts Chaussés, ISBN-2-85978- 033-5, Paris 82, pp : 491.
- [39] : **F.Randell** «Le comportement des bétons dans les systèmes d'assainissement Thèse de doctorat, INSA, de Rennes, Génie civil, Janvier 2000, N°d'ordre 001- 01. LMDC, INSA de Toulouse, France, pp19.
- [40] : **J.P.Ollivier** « Viser la durabilité »-béton bases et données pour leur formulation Editions Eyrolles, N°2434875, Dépôt légal, Janvier 1997, pp : 353-354.
- [41] : **R.Duval** « La durabilité des bétons vis –à vis des eaux agressives »-La durabilité Des bétons, Presse de l'école nationale de ponts chaussés, ISBN/2-86978-186- 6, Paris 1992, pp : 153-154
- [42] : **ANDRA** « Les attaques chimiques couples »-Les matériaux cimentaires, Tome 4, INSA, LMDC, Toulouse, France, C.RP.AMAT 01060 /A, pp : 60.
- [43] : **R.Duval** « La durabilité des bétons et bétons d'enrobage »-La durabilité des Bétons, Presse de l'école nationale des Pont chaussés ; ISBN 285-978-186-6, Paris 1992, pp : 202.
- [44] : **R.Duval** « Evolution de concentration en chlorures »-La durabilité des bétons, Presse de l'école national des ponts chaussés, pp : 198.
- [45] : « **Concret durability** »-article d'Internet,pp :1-14.
- [46] : **Tumidajski P.J. , Chang G.W.,Philipose K.E.**, « An effective diffusivity for Sulphate Transport into concrete Research, Vol 25 No 6, 1995, pp : 1159.
- [47] : **Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics JUIN 1953 N°66.** Séance du 17/02/1953.par M.DURIEZ.

ANNEXE1

CHAPITRE I : LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Représentation schématique d'un solide poreux.....	01.
Figure I.2 : Evolution de la résistance mécanique en compression de la porosité pour Des pâtes pures saines et dégradée.....	05.
Figure I.3 : Processus de la détérioration du béton par les attaques chimiques.....	05.
Figure I.4 : Evolution de PH de la quantité de la quantité de calcium en solution lors De la lixiviation d'un ciment hydraté.....	08.
Figure I.5 : Gonflement au sein de la pâte de ciment durcie, nature de gonflement et Augmentation du volume.....	10.
Figure I.6 : Corrosion sulfo bactérienne.....	11.
Figure I.7 : Des cas pathologiques rencontrés, l'influence des eaux agressifs en Contact.....	12.
Figure I.8 : La formation de l'ettringite secondaire.....	13.
Figure I.9 : Eprouvette de béton dégradée après 5 ans de contact avec des sols riches En sulfate. a) E/C=0.5,b)E/C=0.39.....	13.
Figure I.10 : Le mécanisme d'attaque par sulfate de sodium (Na_2SO_4) sur une Éprouvette en mortier.....	15.
Figure I.11 : Le mécanisme d'attaque par le sulfate de magnésium (Mg_2S_4) sur des Éprouvettes en mortier.....	16.
Figure I.12 : L'attaque des éprouvettes en mortier par le sulfate d'ammonium et le Nitrate d'ammonium.....	17.
Figure I.13 : Analyse par le micrographe SEM, le type de cristaux aiguille du gypse Former à la surface d'éprouvette immergée dans la solution de sulfate D'ammonium.....	17.
Figure I.14 : Analyse par le micrographe SEM, montre le dépôt de la calcite à la Surface d'éprouvette immergée dans la solution de sulfate D'ammonium.....	18.
Figure I.15 : Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone Immergée).....	19.
Figure I.16 : Agression du béton par activité des chlorures.....	19.
Figure I.17 : Le processus d'attaque par les aciers.....	20.
Figure I.18 : Détermination de la profondeur de carbonatation.....	21.
Figure I.19 : Phénomène d'alcali réaction rencontré.....	21.
Figure I.20 : Influence du rapport E/C sur l'expansion de mortier immergée dans Une solution sulfatique contenant 4.3% de sulfate de magnésium, 2.5% De sulfate de sodiu.....	22.
Figure I.21 : Influence de la teneur en C_3A du ciment sur l'expansion de mortier.....	22.
Figure I.22 : Relations entre les teneurs en C_3A et SO_3 du ciment, et gonflement Des mortiers conservés en eau de mer pendant un an.....	23.
Figure I.23 : Influence du dosage en ciment et la teneur en C_3A , sur la vitesse de Dégradation du béton (16 ans dans Na_2SO_4 à 10%).....	24.
Figure I.24 : La variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment Immergée dans les solutions sulfatique en fonction de la durée de Cure.....	25.
Figure I.25 : La teneur en sulfate des pâtes de ciments immergées dans des	

	Solutions sulfatiques en fonction de la durée d'immersion.....	25.
Figure I.26:	Résistance aux sulfate d'échantillons de mortier avec ajouts de Laitier,.....	26.
	a)-ciment type II 6.4% de C3A.	
	b)- ciment type II 53.7 % de C3A.	
Figure I.27:	Evolution de la concentration en chlorure pour différents rapports E/C.....	27.
Figure I.28 :	Influence du rapport E/C, sur le coefficient de diffusion effectif es ions Chlorure dans le béton.....	27.
Figure I.29 :	La variation de la résistance à la compression de différente pâtes de Ciments, immergée dans une solution de 5% Na Cl.....	28.
Figure I.30 :	La teneur en chlorure de différente pâte de ciment, immergée dans Une solution de Na Cl.....	28.
Figure I.31 :	Influence de la résistance à la compression sur la coefficient de Diffusion des ions chlorures dans les bétons de CPA CEMI.....	28.
Figure I.32 :	Profils de concentration des ions chlorures dans le béton.....	29.
Figure I.33 :	Loi de croissance linéaire de l'épaisseur carbonatée en fonction \sqrt{t}	29.
Figure I.34 :	Relation entre l'épaisseur carbonatée et le dosage en ciment.....	30.
Figure I.35 :	Influence de l'humidité de l'environnement sur la progression de L'hydratation.....	30.
Figure I.36:	Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation.....	31.
Figure I.37 :	Relation entre la profondeur de carbonatation et résistance à (28jour), influence de la nature de liant (16 ans en labo).....	32.
Figure (I.38) :	Influence de la teneur en cendre volante utilisé en substitution sur la Profondeur de carbonatation.....	32.
Figure I.39 :	Définition de la perméabilité.....	33.
Figure I.40 :	Définition du seuil Dc dans la théorie de Katz Thomson.....	35.
Figure I.41 :	Mécanisme de transport de fluide.....	35.
Figure I.42 :	Variation de la carbonatation en fonction de la profondeur, pour Différents ciments avec fillers.....	36.
Figure I.43 :	Variation de la perméabilité à l'eau avec le rapport E/C.....	37.
Figure I.44 :	Influence de type de liant sur la perméabilité à résistance mécanique Donné.....	38.
Figure I.45 :	Influence de la fumé de silice en présence de fluidifiant, sur la Structure poreuse des pâtes de ciment.....	40.

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 :	Processus généraux d'altération du béton par les attaques chimiques.....	07.
Tableau I.2 :	Les résultats de tumidajski.....	24.
Tableau 1.4 :	Adjuvants normalisée modifiant la mise en œuvre des Bétons et mortier..	39.

CHAPITRE II :

LISTE DES FIGURES :

Figure II.1 : Analyse par diffraction X de pouzzolane	41.
Figure II.2 :Analyse par diffraction X de ciment pouzzolanique.....	42.
Figure II.3 : Analyse par diffraction X de calcaire	43.
Figure II.4 : Analyse par diffraction X de ciment calcaire.....	43.
Figure II.5 : Analyse par diffraction X de gypse.....	44.
Figure II.6 : Comparaison entre différent composant (gypse, calcaire, ciment de calcaire).....	45.
Figure II.7 : Analyse par diffraction X de sable de dune.....	46.
Figure II.8 : La courbe d'analyse granulométrique du sable et gravier.....	52.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II .1 : Composition chimique des ciments.....	39.
Tableau II .2 : Composition potentielle de ciment.....	40.
Tableau II .3 : Analyse minéralogique de la pouzzolane.....	41.
Tableau II .4 : Analyse chimique du ciment pouzzolanique.....	42.
Tableau II .5 : Analyse chimique du ciment calcaire.....	43.
Tableau II .6 : Analyse chimique du clinker.....	44.
Tableau II .7 : Analyse chimique de gypse.....	45.
Tableau II .8 : Caractéristique physico mécanique des ciments.....	45.
Tableau II .9 : Préparation des mélanges.....	46.
Tableau II .10 : Caractéristique physique des sables.....	47.
Tableau II .11 :Analyse granulométrique de sable de dune.....	47.
Tableau II .12 : Analyse chimique de sable.....	48.
Tableau II .13 : Caractéristique physique du graviers utilisés.....	49.
Tableau II .14 : Analyse granulométrique 3/8.....	49.
Tableau II .15 : Analyse granulométrique 8/16.....	50.
Tableau II .16 : Analyse granulométrique 16/25.....	50.
Tableau II .17 : La courbe d'analyse granulométrique du sable et graviers.....	51.
Tableau II.18 : Caractéristique du Médafluid SFR 122.....	51.
Tableau II.19 : Caractéristique du Médafluid SP 40.....	51.
Tableau II .20 : Valeurs limites pour les classes d'exposition en cas d'attaque chimique.....	52.
Tableau II .21 : Les milieux d'expositions pour pâte et mortier.....	52.
Tableau II .22 : Les milieux d'expositions pour béton.....	53.
Tableau II.23 : Plan expérimental.....	53.

CHAPITRE III

LISTE DES FIGURES

Figure III.1 : Appareille de compression pour mortier	58.
Figure III.2 : Appareille de flexion pour mortier.....	58.
Figure III.3 : Appareille de mise en ébullition.....	59.
Figure III.4 : Pesée hydrostatique des éprouvettes pour le calcule de la porosité.....	59.
Figure III.5 : Type d'éprouvette cylindrique.....	61.
Figure III.6 :Le perméamètre à l'eau (laboratoire de géo matériaux de M'sila).....	62.

CHAPITRE IV

Liste des figures

- Figure IV.1 :** Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment en fonction du milieu de conservation, paramètre type de ciment.....65.
a)- 7 jours
b)- 28 jours.
c)- 90 jours.
- Figure IV.2 :** Variation de la résistance à la compression de la pâte en ciment en fonction du type de ciment, paramètre milieu de conservation.....66.
a)- 7 jours.
b)-28 jours.
c)- 90 jours.
- Figure IV.3:** Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du milieu de conservation, paramètre type de ciment.....67.
a)- 7 jours.
b)- 28 jours.
c)-90 jours.
- Figure IV.4 :** Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du type de ciment, paramètre milieu de conservation68.
a)- 7 jours.
b)- 28 jours.
c)- 90 jours.
- Figure IV.5:** Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment en fonction du milieu de conservation, paramètre l'âge.....69.
a)- La pouzzolane.
b)- Le calcaire.
- Figure IV.6 :** Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction du milieu de conservation , paramètre l'âge.....70.
a)- La pouzzolane.
b)- Le calcaire.
- Figure IV.7:** Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment en fonction de l'âge, paramètre milieu de conservation.....71.
a)- La pouzzolane.
b)- Le calcaire.
- Figure IV.8:** Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction de l'âge , paramètre milieu de conservation.....72.
a)- La pouzzolane.
b)- Le calcaire.
- Figure IV.9 :** Variation de la résistance à la flexion de la pâte de ciment en fonction du milieu de conservation, paramètre type de ciment.....73.
a)- 7 jours..
b)- 28 jours.
c)- 90 jours..
- FigureIV.10 :** Variation de la résistance à la flexion du mortier en fonction du milieu de conservation, paramètre type de ciment.....74.
a)- 7 jours
b)- 28 jours.
c)- 90 jours.

Figure IV.11 : Eprouvette du mortier immergé dans une solution d'acide sulfurique.....	75.
Figure IV.12 : Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment, en fonction de milieu de conservation , paramètre type d'adjuvant.....	79.
a)-La pouzzolane, l'âge de 7 jours.	
b)- Le calcaire , l'âge de 7 jours.	
Figure IV.13 : Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment, en fonction de milieu de conservation, paramètre type d'adjuvant.....	80.
a)- La pouzzolane, l'âge de 28 jours.	
b)- Le calcaire, l'âge de 28 jours.	
Figure IV.14 : Variation de la résistance à la compression de la pâte en ciment en fonction de milieu de conservation, paramètre type d'adjuvant.....	81.
a)- La pouzzolane, l'âge de 90 jours.	
b)- Le calcaire, l'âge de 90 jours.	
Figure IV.15 : Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction de milieu de conservation , paramètre type d'adjuvant.....	82.
a)- La pouzzolane , 7 jours.	
b)- Le calcaire , 7 jours.	
Figure IV.16 : Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction de milieu de conservation , paramètre type d'adjuvant.....	83.
a)- La pouzzolane, 28 jours.	
b)- Le calcaire, 28 jours.	
Figure IV.17 : Variation de la résistance à la compression du mortier en fonction de milieu de conservation , paramètre type d'adjuvant.....	84.
a)- La pouzzolane, 90 jours.	
b)- Le calcaire, 90 jours	
Figure IV.18 : Diagramme de diffraction X de ciment en pouzzolane – surface en Contacte avec l'eau.....	89.
Figure IV.19 : Diagramme de diffraction X de ciment en pouzzolane – surface en Contacte le milieu de Sulfate S (Mg+Na).....	90.
Figure IV.20 : Diagramme de diffraction X de ciment en pouzzolane – surface en Contacte le milieu d'acide Sulfurique (As).....	91.
Figure IV.21 : Diagramme de diffraction X de ciment en calcaire – surface en Contacte l'eau potable.....	92.
Figure IV.22 : Diagramme de diffraction X de ciment en calcaire – surface en Contacte le milieu du sulfate S (Mg+Na).....	93.
Figure IV.23 : Montre la zone basicité réduites des matrices déterminé par Coloration à la phénophtaléine.....	95.
Figure I.24 : Variation de la résistance à la compression (MPa) du béton en fonction Du milieu de conservation (paramètre âge).....	98.
Figure I.25 : Variation de la porosité (%) du béton en fonction du milieu de Conservation (Paramètre âge).....	98.
Figure I.26 : Variation de la perméabilité (m/s) du béton en fonction du milieu de Conservation (Paramètre âge).....	99.
Figure I.27 : Variation de la résistance à la compression (MPa) du béton en fonction Du l'âge (paramètre milieu de conservation).....	99.
Figure I.28 : Variation de la porosité (%) du béton en fonction du l'âge (Paramètre Milieu de conservation).....	100.
Figure I.29 : Variation de la perméabilité (m/s) du béton en fonction du l'âge	

(Paramètre milieu de conservation).....	100.
Figure I.30 : Eprouvette pour essai de perméabilité,surface dégradé.....	101.

Figure I.31 : Variation de la résistance à la compression en fonction du milieu de Conservation paramètre type d'adjuvant.....	105.
a)- 28 jours.	
b)- 90 jours.	
c)-180 jours.	

Figure I.32 : Variation de porosité (%) en fonction du milieu de Conservation paramètre type d'adjuvant.....	105.
a)- 28 jours.	
b)- 90 jours.	
c)-180 jours	

Figure I.33 : Variation de la perméabilité en fonction du milieu de Conservation paramètre type d'adjuvant.....	105.
a)- 28 jours.	
b)- 90 jours.	
c)-180 jours.	

LISTES DES TABLEAUX

Les résultats des essais mécaniques sur les matrices cimentaires :

Les résultats des résistances mécaniques obtenus sur la pâte pure et mortier des deux types de ciment (pouzzolane, calcaire) sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau (IV.1) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du ciment pouzzolanique après le traitement de 3mois. Le rapport $E/C=0.4$.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPZ-20%	7		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
		Z1	75,3	60,9	63,5	50	43,6
		Z2	74	65,18	64,23	47,6	44,6
		Z3	61,63	59,53	64,93	47,69	48,31
		Moyenne	70,3125	61,87	64,22	48,43	45,47
	écart type	9.66	4.48	1.11	2.475	5.175	
	28	Z1	82,6	78,5	75	67,136	48,7
		Z2	89,1	74	80	74,3	49,56
		Z3	93,143	80	78,8	69,5	52
		Moyenne	88,381	77,81	78,281	70,312	50,08
		écart type	5.96	3.85	3.19	5.09	3.29
	90	Z1	127,5	89,6	97,5	69,7	49,6
		Z2	131	93,1	99,1	70,1	53,6
		Z3	131,8	89,73	114,41	74,43	50,13
		Moyenne	131,8	90,81	103,67	71,41	51,11
écart type		1.63	1.925	8.15	3.31	3.91	

Tableau (IV. 2) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du ciment calcaire après traitement de 3 mois. Le rapport E/C= 0.4

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPC-15%	7		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
		C1	70,5	66,9	53,2	65,5	47
		C2	73,6	64,2	49,5	69,3	46,5
		C3	74,69	65,7	48,2	68,81	41,8
		Moyenne	72,93	65,4	50,3	67,87	45,1
	écart type	2.84	2.075	4.965	2.435	3.3	
	28	C1	82,1	75	74,5	66,1	48
		C2	79,6	74,6	77	64	45,5
		C3	88,59	69,7	75	64,9	47,86
		Moyenne	83,43	73,1	75,625	65	47,12
		écart type	5.38	3.73	1.64	1.61	2.64
	90	C1	96	81,6	85,3	69,6	48,5
		C2	97,5	83,2	89	71	47,3
		C3	103,23	83,82	89,43	70,9	54,5
		Moyenne	97,91	82,876	87,91	70,5	50,1
		écart type	3.69	1.34	2.345	1.055	3.705

Tableau (IV.3) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier a base de ciment Pouzzolanique après traitement de 3 mois. Le rapport E/C=0.5.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na cl	As	Na
CPZ-20%	7		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
		Z1	30,8	26,45	24,5	22,47	18,8
		Z2	31,2	26,3	29	22,1	19,2
		Z3	29,5	27,5	27,8	25	22,3
		Moyenne	30,5	26,75	27,1	23,19	27,3
	écart type	2.78	2.24	8.3	6.25	9.08	
	28	Z1	48,14	44,47	46,69	38,29	38,7
		Z2	42,3	38,6	39,6	34,2	32,3
		Z3	49,5	40,3	42,8	35,6	34,6
		Moyenne	46.64	41,125	43,031	36,031	35,2
		écart type	5.39	7.13	5.05	5.67	9.08
	90	Z1	57,02	50,92	55,05	50,14	49,5
		Z2	52,3	48,5	50,1	43,2	45,6
		Z3	50,3	50,1	49,53	45,5	43,2
		Moyenne	53.20	49,84	51,56	46,28	46,1
		écart type	6.07	2.42	5.34	7.49	6.83

Tableau (IV.4) : Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier a base de ciment calcaire après traitement de 3 mois. Le rapport E/C=0.5.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPC-15%	7		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
		C1	38	30,05	32,3	24,19	23,47
		C2	31,1	28,3	30	24,3	20,78
		C3	32,2	25,2	30	27,5	19,65
		Moyenne	33,76	27,85	30,1	25,33	21,3
		écart type	10	8.7	3.81	6.53	8.96
	28	C1	47,17	33	38,5	38,5	37,461
		C2	45,13	27,5	34	34	29,6
		C3	47,5	29,5	33,9	33,9	31,6
		Moyenne	46,6	30	35,468	33,687	32,9
		écart type	2.52	9.16	6.48	7.455	9.2
		90	C1	55,49	51,6	52,26	42,74
	C2		57,4	41,1	48,9	45	43,2
	C3		54,3	43,2	47,34	42,1	46,2
	Moyenne		55,73	45,3	49,5	43,28	45,93
	écart type		2.745	9.7	4.96	3.34	5.645

Les résultats des essais mécaniques sur les matrices cimentaires :

Les résultats des résistances mécaniques à la flexion obtenus sur la pâte pure et mortier des deux types de ciment (pouzzolane, calcaire) sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau (IV.5) : Variation de la résistance à la flexion (MPa) du ciment pouzzolanique après traitement de 3 mois. Le rapport E /C=0.4.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPZ-20%	7		Rf	Rf	Rf		Rf
		Z1	6,9	6,5	6,8	3,35	4,1
		Z2	8,3	4,5	5,32	4,6	3,6
		Z3	7,9	4,3	6,78	6,3	4
		Moyenne	7,7	5,1	6,3	4,75	3,9
		Taux (%)	0	-33.76	-18.18	-38.31	-49.35
	28	Z1	10,46	4,15	8,6	6,63	6,43
		Z2	9,6	5,2	8,32	6,7	6,7
		Z3	13,54	4,75	9,6	6,27	5,17
		Moyenne	11.2	4,7	8,84	6,5	6,1
		Taux (%)	0	-58.03	-21.07	-41.96	-45.53
		90	Z1	15,55	12	12,63	5,41
	Z2		15,3	7,5	12,4	8,5	6,1
	Z3		13,4	8,5	13,1	8,2	7,5

	Moyenne	14,75	9,35	12,71	7,37	6,15
	Taux (%)	0	-36.61	-13.83	-50.03	-58.30

Tableau (IV.6) : Variation la résistance à la flexion (MPa) du ciment calcaire après traitement de 3 mois. Le rapport E/C=0.4.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S (Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPC-15%	7		Rf	Rf	Rf	Rf	Rf
		C1	8,1	6,5	6,6	6,5	5,23
		C2	8,9	6,43	6,4	5,6	4,56
		C3	7,9	5,37	7,1	5,24	5,51
		Moyenne	8,3	6,1	6,7	5,78	5,1
	Taux (%)	0	-26.5	-19.27	-30.36	-38.55	
	28	C1	11,3	4,5	7,5	6,5	4,42
		C2	10,53	4,3	6,3	5,47	5,4
		C3	10,87	5	7,5	6,13	6,23
		Moyenne	10,9	4,8	7,1	6,1	5,35
		Taux (%)	0	-55.96	-34.86	-44.03	-50.91
	90	C1	12	10,64	10,62	10	5,6
		C2	15,14	8,66	10,5	7,6	4,6
		C3	11,56	7,4	11,1	8,2	5,1
		Moyenne	12,9	8,9	10,74	8,6	5,1
Taux (%)		0	-31.00	-16.74	-33.33	-60.46	

Tableau (IV.7) : Variation de la résistance à la flexion (MPa) du mortier a base de ciment pouzzolanique après traitement de 3 mois. Le rapport E/C=0.5.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPZ-20%	7		Rf	Rf	Rf	Rf	Rf
		Z1	5,1	4,4	4,15	3,7	4,22
		Z2	6,3	5,2	6,3	4,3	3,6
		Z3	7,2	6,3	5,6	4,3	4,3
		Moyenne	6,2	5,3	5,35	4,1	4,04
	Taux (%)	0	-14.52	-13.7	-33.87	-34.83	
	28	Z1	8,5	6,12	7,5	4,66	6,8
		Z2	8,1	7,4	8,6	6,8	6
		Z3	7,4	7,6	6,4	7,2	6,1
		Moyenne	8	7,04	7,5	6,22	6,3
		Taux (%)	0	-12	-6.25	-22.25	-21.25
	90	Z1	11,16	7,6	8,8	6	7,11
		Z2	6,35	8,4	9,6	7,3	6,8
		Z3	8,35	8,3	9,5	7,4	6,7
		Moyenne	8,35	8,1	9,3	6,9	6,87
Taux (%)		0	2.99	-11.37	-17.36	-17.72	

Tableau (IV.8) : Variation de la résistance à la flexion (MPa) du mortier a base de ciment calcaire après traitement de 3 mois. Le rapport E/C=0.5.

type de ciment	l'age	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPC-15%	7		Rf	Rf	Rf	Rf	Rf
		C1	6	5,1	4,7	6,4	3,1
		C2	6,2	6,4	6,8	5	6
		C3	6,7	5,6	5,9	5,7	5,3
		Moyenne	6,3	5,7	5,8	5,7	4,8
	Taux (%)	0	-9.52	-7.93	-9.52	-23.8	
	28	C1	7,95	7,4	6,55	5,2	5,35
		C2	7,6	7,1	6,2	6,5	5,4
		C3	7,4	6,5	7,5	6,3	5,3
		Moyenne	7,65	7	6,75	6	5,35
		Taux (%)	0	-8.49	-11.76	-21.56	-30.06
	90	C1	11,7	7	9	5,9	5,66
		C2	8,6	8,6	9,4	6,3	6,8
		C3	7,6	8,1	8,6	6,7	6,5
		Moyenne	9,3	7,9	9	6,3	6,32
Taux (%)		0	-15.05	-3.22	-32.25	-32.04	

Utilisation des adjuvants fluidifiant :

Tableau (IV.10) : Variation de la résistance à la compression (MPa) de ciment pouzzolanique avec adjuvant SFR122 après traitement de 3 mois, la réduction d'eau E/C=0.33

type de ciment	L'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S (Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPC-20%	7	Z1	Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
			73,62	63,8	67,18	51,72	49,3
	28	Z2	91,35	79,031	81,38	75	56,17
90	Z3	134,2	95,72	110,8	77,1	60,1	

Tableau (IV. 11) : Variation de la résistance à la compression (MPa) de ciment calcaire avec adjuvant SFR122 après traitement de 3 mois, la réduction d'eau E/C=0.30.

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable Rc	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na) Rc	Na Cl Rc	As Rc	Na Rc
CPC-15%	7	C1	76,3	68,62	70,83	53,9	50,1
	28	C2	87,013	76,1	79,3	67,3	52,12
	90	C3	115,1	86,9	90,75	76,31	57,6

Tableau (IV.12): Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier pouzzolane avec Adjuvant SFR122 après traitement de 3 mois. La réduction d'eau E/C=0.4.

type de ciment	l'age (jours)	Code	l'eau potable Rc	Milieux agressifs			
				S (Mg+Na) Rc	Na Cl Rc	As Rc	Na Rc
CPZ-20%	7	Z1	33,7	28,9	30,1	27,3	22,1
	28	Z2	55,5	43,2	47,8	40,031	37,15
	90	Z3	64,81	54,3	54,7	50,36	49

Tableau (IV.13): Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier calcaire avec adjuvant SFR122 après traitement de 3 mois, La réduction d'eau E/C=0.40.

type de ciment	L'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPC-15%	7	C1	Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
			40,84	30,1	32,4	28,3	24,75
	28	C2	46,281	35,27	38,95	38,69	35,43
	90	C3	58,71	49,83	52,625	47,75	47,8

Tableau (IV.14): Variation de la résistance à la compression (MPa) avec adjuvant SP40 de la pâte de ciment pouzzolanique après traitement de 3 mois.,la réduction d'eau E/C=0.35

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S (Mg+Na)	Na Cl	As	Na
CPZ-20%	7	Z1	Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
			73,5	62,1	65,43	49,11	47,68
	28	Z2	89,38	78,73	80,7	73,17	53,1
	90	Z3	120,27	93,7	107,5	75,15	57,1

Tableau (IV.15): Variation de la résistance à la compression (MPa) avec adjuvant SP40 de la pâte de ciment calcaire après traitement de 3 mois, la réduction d'eau E/C=0.33

type de ciment	l'age	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S(Mg+Na)	Na Cl	As	Na
		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
CPC-15%	7	C1	74,3	67,41	69,37	50,1	49,1
	28	C2	85,47	75,9	77,18	66,2	50,72
	90	C3	107,1	84,25	88,75	74,75	54,1

Tableau (IV.16): Variation de la résistance à la compression (MPa) du mortier pouzzolane avec adjuvant SP40 après traitement de 3 mois, la réduction d'eau E/C=0.45

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S (Mg+Na)	Na Cl	As	Na
		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
CPZ-20%	7	Z1	31,7	28,1	29,1	25,3	22,1
	28	Z2	54,6	42,17	45,1	38,74	36,1
	90	Z3	62,35	52,17	52,9	50,1	47,3

Tableau(IV.17):Variation de la résistance à la compression(MPa) du mortier calcaire avec adjuvant SP40 après traitement de 3 mois.,la réduction d'eau E/C=0.42

type de ciment	l'age (jours)	code	l'eau potable	Milieux agressifs			
				S (Mg+Na)	Na Cl	As	Na
			Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
CPC-15%	7 J	C1	42,8	29,7	30,35	27,1	23,1
	28J	C2	47,1	33,42	36,19	36,1	33,1
	90J	C3	56,9	48,3	50,3	45,3	47,1

- Tableau IV.17 :** fluidité et réduction d'eau des pâtes.....98.
Tableau IV.18 : fluidité et réduction d'eau du béton.....98.
Tableau IV.19 : Variation de la résistance à la compression du béton témoin dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois E/C =0.56.....98.
Tableau IV.20 : Variation de la porosité (%) du béton témoin dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois E/C =0.56.....99.
Tableau IV.21 : Variation de la perméabilité (m/s) du béton témoin dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois E/C =0.56.....99.
Tableau IV.22 : Variation de la résistance à la compression du béton dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois. Adjuvant SFR122, E/C=0.43..105.
Tableau IV.23 : Variation de la porosité (%) du béton dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois. Adjuvant SFR122, E/C=0.43..105.
Tableau IV.24 : Variation de la perméabilité (m/s) du béton dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois. Adjuvant SFR122, E/C=0.43..107.
Tableau IV.25 : Variation de la résistance à la compression du béton dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois. Adjuvant SP 40, E/C=0.45....108.
Tableau IV.26 : Variation de la porosité (%) du béton dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois. Adjuvant SP 40, E/C=0.45....110.
Tableau IV.27 : Variation de perméabilité (m/s) du béton dans les milieux De conservation après traitement de 6 mois. Adjuvant SP 40, E/C=0.45.....110.

ANNEXE 2

Notation :

E/C : rapport massique Eau / Ciment (proportion lors du gâchage du ciment).

Sulfate de calcium (CaSO₄) : S (Ca) , gypse.

Sulfate de Magnésium + sodium : S (Mg+Na).

Chlorure : Na Cl.

Acide sulfurique (H₂SO₄) : (As).

Nitrate d'ammonium ((NH₄) NO₃): Na.

Sulfate d'alumine : (Al₂O₃) SO₄, S (Al).

