

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Badji Mokhtar - Annaba
Badji Mokhtar - Annaba University



جامعة باجي مختار - عنابة

ANNEE 2013

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

*L'EFFET DE LA DEGRADATION CHIMIQUE
SUR
LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS*

Option: Structures et Matériaux

Par

GUETARI Zoubaida

Directeur de Mémoire:

Pr.HABITA Mohamed Faouzi Professeur Université de Annaba

DEVANT LE JURY :

Président:	Pr. REDJEL Bachir	Professeur	Université de Annaba
Examineurs:	Dr. MERZOUD Miloud	M. de Conférence	Université de Annaba
	Dr. ARABI Noureddine	Professeur	Université de Annaba
	Dr. OUCIEF Hocine	M. de Conférence	Université de Annaba

REMERCIEMENTS

Honorablement je tiens à dédier ce travail à mes parents chéris que dieux les bénisse, ils m'ont incité et insisté à finaliser cette thèse et ne cessent de me pousser à réaliser mes rêves,
Grand Merci ;

à mes deux petits Lionceaux Alaeddine et Mohamed Islam qui me donnent chaque fois la joie de vivre malgré tout.

à Mon Beau Frère Mourad merci beaucoup pour tes précieux services.

A Mr SERAOUI pour son aide, disponibilité et approvisionnement en matériaux.

Cette recherche a été réalisée sous la codirection de Mr le Professeur M.F. HABITA. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour la confiance et l'aide qu'il m'a apporté. Qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Mes plus vifs remerciements s'adressent :

à Monsieur le Professeur B. REDJEL directeur du laboratoire de génie civil pour ses conseils et d'avoir bien voulu présider le jury,

à Monsieur le Docteur M.BEHIM, Chef de département des études supérieures option matériaux pour ses précieux conseils, sa collaboration et son soutien moral.

à Mademoiselle F.BOUABDALLAH pour sa compréhension et sa complicité.

à tous les doctorants de l'institut de génie civil pour leur soutien moral.

Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leur aide et leurs encouragements, m'ont permis de réaliser cette thèse.

Résumé

L'Effet de la dégradation chimique sur le comportement mécanique des bétons

Ce travail de thèse se situe dans le contexte du comportement à long terme des bétons dans des milieux chimiquement agressifs.

L'objectif est d'étudier l'effet de la dégradation chimique (en Eau Pure et celle de l'Eau de Mer) sur deux types de bétons à différents dosage de ciment. Ainsi que le comportement à long terme vis-à-vis la compression, la traction par flexion ainsi que la variation dimensionnelle.

Une série d'essai est effectuée ou la lixiviation chimique et les propriétés mécaniques ainsi que le comportement couple du béton sont mis en évidence. Parmi les principales réactions décrivant les mécanismes fondamentaux de l'altération des bétons par réactions chimiques, on trouve l'hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durcie (phénomène associé à la Dégradation en Eau Pure) et les réactions entraînant la formation de produits expansifs (associées à l'attaque sulfatique de l'eau de mer). La conjugaison de ces deux processus, conduisant à la dégradation chimique du matériau et la formation d'un hydrate expansif, ont des conséquences d'ordre macroscopiques, en particulier d'ordre mécanique.

Mots clés

Couplage - lixiviation - diffusion - comportement mécanique - béton - endommagement – Dégradation.

Abstract

The effect of chemical degradation on the mechanical behavior of concrete

This thesis is in the context of long-term behavior of concrete in chemically aggressive environments. The objective is to study the effect of chemical degradation (on Pure Water and that of sea water) on two types of concrete at different dosage of cement.

As well as the long-term behaviour the compression, tensile bending and dimensional change.

A series of tests is performed on chemical leaching and mechanical properties and behaviour of concrete torque are highlighted. Among the main reactions describing the basic mechanisms of the alteration of concrete by chemical reactions, there is hydrolysis of the hydrates of hardened cement paste (a phenomenon associated with the degradation in Pure Water) and the reactions resulting in formation of expansive products (associated with sulphate attack of sea water). The combinations of these two processes, leading to chemical degradation of the material and the formation of a hydrate expansive, have macroscopic consequences of order, especially of a mechanical nature.

Keywords

Coupling - leaching - diffusion - mechanical behaviour - concrete - damage - Degradation.

ملخص

تأثير التدهور الكيميائي في السلوك الميكانيكي للخرسانة

هذه الأطروحة تندرج في سياق سلوك الخرسانة على المدى الطويل في الأوساط العدوانية كيميائيا.

الهدف هو دراسة اثر التدهور الكيميائي (المياه النقية و مياه البحار) على نوعين من الخرسانة ذوو

تركيز إسمنتي مختلف، كذلك السلوك في الأجل الطويل إزاء الضغط و الشد عن طريق الانحناء و أيضا تغيرات الأبعاد.

سلسلة من التجارب أجريت أين يقع إنحلال بالترحيل للمادة كيميائيا ، كذلك الخواص الميكانيكية للخرسانة هي الأبرز .

من بين أهم ردود فعل التي تصف الآليات الأساسية لإتلاف الخرسانة من التفاعل الكيميائي، نجد ان التحليل لمكونات عجينة الاسمنت الصلبة (ظاهرة مرتبطة بالتدهور عن طريق المياه النقية) و التفاعل الكيميائي الذي يسفر عن تشكيل مواد قابلة للتمدد و الانتفاخ (المرتبطة بالهجوم الكيميائي لمياه البحر).

ان الجمع بين هاتين العمليتين , تؤدي إلى تدهور كيميائي في المادة ، و إنتاج مواد تمديدية تؤدي إلى نتائج على المستوى الماكروسكوبي , ولا سيما النظام الالى.

كلمة رئيسية

الربط -إنحلال بالترحيل- نشر -السلوك الميكانيكية -الخرسانة -تضرر - التدهور.

TABLE DES MATIERES

Chapitre I/ Introduction Générale.	1
I.1- Introduction Générale.	2
I.2- Théorie de la lixiviation du béton.	4
I.2.1 Le béton.	4
I.2.2 Lixiviation du béton :	5
I.3- Les Milieux Agressifs et les Mécanismes de dégradation.	6
3.1. Les milieux agressifs.	6
3.2. Les mécanismes de dégradation.	8
3.2.1. Action des eaux douces.	8
3.2.2. Action des chlorures.	10
3.2.3. Action des sulfates.	10
3.2.4. Action du dioxyde de carbone.	16
3.2.5. Action du nitrate d'ammonium.	17
3.2.6. Action de la température.	19
I.4- Conclusion.	20
Chapitre II/ Caractérisation des matériaux Utilisés et formulation des bétons:	21
II.1- Introduction:	22
II.2- Caractérisation des matériaux utilisés:	24
2.1- L'eau:	24
2.2- Le ciment:	24
2.3- Les granulats:	25
2.3.1- Analyse granulométrique par tamisage:	25
2.3.2- Préparation des granulats:	25
2.3.3- Analyse granulométrique par tamisage:	26
II.3- Formulation et mise en œuvre des bétons	26
3.1- Méthode de formulation de béton:	26
3.2- Formulation et préparation des bétons:	27
3.3- Confection et cure des Eprouvettes :	28
3.3.1. Caractéristiques des milieux de conservation.	28
3.4- Composition des bétons:	29
3.4.1. La formulation du béton utilisé au laboratoire :	29
3.4.2. Préparation des moules.	29
3.4.3 Malaxage du béton :	30

3.4.4 Mesure de l'affaissement.	30
3.4.5 Coulage du béton	31
3.4.6 Démoulage et cure.	32
III.1/ Variation Dimensionnelle et Comportement Mécanique du béton:	36
III.1.1. Mesures et essais sur les Eprovettes.	36
III.1.2. Influence du milieu de cure sur les dimensions des	37
III.2 Comportement mécanique en compression après lixiviation.	41
2.1 Effet de la lixiviation sur le comportement mécanique du mortier.	42
2.1.1. Mécanismes physico-chimiques de la lixiviation	42
2.1.2. Effets de la lixiviation sur le comportement en compression et traction du mortier.	43
III.3 Partie Experimentale :	45
III.3.1- Comportement mécanique à la compression après lixiviation :	45
III.3.2- Comportement mécanique à la traction par flexion après lixiviation :	47
III.4 Conclusion Générale.	55
Annexes.	59

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

- Figure I.1 :** Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [02]
- Figure I.2 :** l'Effet des Milieux Agressifs sur le béton.
- Figure I.3 :** Processus de lixiviation d'un matériau cimentaire [03]
- Figure I.4 :** Schéma de la dégradation chimique des bétons par l'eau pure [05]
- Figure I.5 :** Zonation de la partie altérée, où chaque zone de minéralogie constante est délimitée par des fronts nets dans le matériau cimentaire à base de CEM I [05]
- Figure I.6 :** Bilan des flux d'ions hydroxyles et calcium sortant et sulfates entrant pour les expériences de lixiviation en eau déminéralisée (DEP) et de lixiviation en milieu sulfaté (ASSO) [12]
- Figure I.7 :** Zonation minéralogique obtenue par DRX de la pâte de ciment ($e/c = 0,4$) soumise à l'ASSO[12]
- Figure I.8 :** Micrographies d'ettringite cristallisé dans pâtes de ciment :gauche, des cristaux de fibre en forme d'aiguiller dans un pore-droite, des cristaux massifs dans la matrice après réactions chimiques [15].
- Figure I.9 :** Les évolutions voluminales des phases solides dans la première cellule du ciment collent contre la racine carrée de temps, en raison d'un 0.05 sulfate de magnésium de concentration mol.l-1 la solution agressive. [15]
- Figure I.10:** Profils voluminal des solides dans la matière après 30 jours d'agression chimique avec un 0.05 sulfate de magnésium de concentration mol.l-1 solution agressive [15]
- Figure I.11:** Comparaison des cinétiques de dégradation moyenne des différentes méthodes extrait dans Le Bellégo, 2001[19]
- Figure I.12:** Visualisation de la profondeur dégradée dans un cylindre creux après 36 jours de lixiviation sous solution de NH_4NO_3 6M. [03]
- Figure I.13:** Visualisation de la profondeur dégradée dans un cylindre plein après 36 jours de lixiviation sous solution de NH_4NO_3 6M. [03]
- Figure I.14 :** Lixiviation d'une pâte de ciment à différentes températures[21]
- Figure I.15 :** Courbes contrainte-déformation de l'essai de compression des éprouvettes à différentes échéances de dégradation chimique au nitrate d'Ammonium. [03]
- Figure I.16 :** Courbe de compression d'un béton sain et béton lixivié (28, 56 et 98 jours). [18]
- Figure I.17 :** Comportement en compression du mortier avec et sans portlandite (CH) [01]
- Figure I.18 :** Courbes contraintes moyennes déformations moyennes à différents taux de Dégradation (pate de ciment CEMI $E=C = 0.45$) [Carde et al, 1996]
- Figure I.19 :** Courbes contraintes moyenne déformations moyennes à différents taux de Dégradation (pate de ciment CEMI + fumées de silice $E=C = 0.45$, $FS/C = 0.3$) [Carde et al, 1996]

Chapitre II

- Figure II.1 :** Disposition des éprouvettes dans un bac en tôle galvanisée (1,50x1,00x0,75) pour l'essai de lixiviation du béton sous l'eau de robinet et/ou l'eau de mer
- Figure II.2 :** Composition granulaire des types de bétons d'étude.
- Figure II.3 :** Moule prismatique 7*7*28cm et Moule cylindrique [Selon CSA A23.2-3C et (-1D) AFNOR 90 NF P18-400] [24]
- Figure II.4 :** Moule de flexion pour poutres 120*20*15cm confectionné, correspondant aux exigences de ACNOR et AFNOR. [24]
- Figure II.5 :** l'Affaissement du cône d'Abrams des différents types de bétons
- Figure II.6 :** Eprouvettes cylindriques 11x22 & éprouvettes prismatiques 7x7x28

Chapitre III

- Figure III.1** : Appareil de mesure de la déformation dimensionnelle
- Figure III.2** : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en eau de robinet & eau de mer à 40°C
- Figure III.3** : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en cure de 01 mois en eau de robinet & eau de mer à 40°C
- Figure III.4** : Comparaison entre les résultats de Variation Dimensionnelle après un(01) mois de dégradation en eau de robinet & eau de mer à 40°C
- Figure III.5** : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en cure de 03 mois en eau de robinet & eau de mer à 40°C
- Figure III.6** : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en cure de 03 mois en eau de robinet & eau de mer à 40°C
- Figure III.7** : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en cure de 06 mois en eau de robinet & eau de mer à température ambiante
- Figure III.8** : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de pleines dégradation en cure de 06 mois en eau de robinet & eau de mer à température
- Figure III.9** : La Presse utilisée pour l'essai de compression sur les éprouvettes cylindriques
- Figure III.10**: Essai de compression sur une éprouvette cylindrique.
- Figure III.11**: Contrainte de compression de deux types de béton à différents taux de dégradation en eau de robinet
- Figure III.12**: Contrainte de compression de deux types de béton à différents taux de dégradation en eau de mer
- Figure III.13**: Comparaison des contraintes de compression d'un béton dosé à 350Kg/m³ à différents types de dégradation
- Figure III.14**: Comparaison des contraintes de compression d'un béton dosé à 420Kg/m³ à différents types de dégradation
- Figure III.15**: Essai de flexion par 4 points pour poutre $b \cdot h \cdot L$
- Figure III.16**: Essai de traction par Flexion sur une poutre (15x20x120)
- Figure III.17**: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 01 mois de Dégradation en Eau de Robinet
- Figure III.18**: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 01 mois de Dégradation en Eau de Mer
- Figure III.19**: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 03 mois de Dégradation en Eau de Robinet
- Figure III.20**: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 06 mois de dégradation en eau de Mer
- Figure III.21**: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 06 mois de dégradation en eau de Robinet
- Figure III.22**: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 06 mois de dégradation en eau de Mer
- Figure III.23**: Comparaison des Flèches de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge à Différents Ages du Béton dosé à 350Kg/m³ en eau de Robinet
- Figure III.24**: Comparaison des Flèches de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge à Différents Ages du Béton dosé à 420Kg/m³ en eau de Robinet

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 - Définition des classes d'agressivité

Tableau I.2 - Agressivité des solutions et des sols

Chapitre II

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment CEM II 42,5 utilisé

Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5 utilisé

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé pour la confection des bétons.

Tableau II.4 – Caractéristiques chimiques des bains de conservation

Tableau II.5 - Composition ionique moyenne de l'eau de mer

Tableau II.6 – Composition granulaire et quantité d'eau de gâchage des bétons utilisés

Tableau II.7 - Récapitulatif des Valeurs d'Affaissements des différents types de bétons

Tableau II.8- Tableau récapitulatif des la distance entre l'axe de la poutre et la ligne de rupture après l'essai de flexion par la méthode au tiers.

CHAPITRE I:

INTRODUCTION GENERALE

&

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- INTRODUCTION

Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton est un des facteurs importants dans les domaines du génie civil et du génie industriel. C'est une préoccupation de plus en plus mise en avant par les gestionnaires d'ouvrages. Ces derniers exigent des durées de vie de plus en plus longues avec un minimum d'entretien. Par exemple, les ponts, les tunnels, les réseaux d'assainissement ou le patrimoine bâti doivent avoir une longue durée dans le temps.

Or la durabilité des ouvrages en béton est étroitement liée à celle du béton lui-même. Ce dernier est un matériau hétérogène et poreux en équilibre chimique réagissant avec son environnement (marin, gel - dégel, pluie...).

L'étude de sa durabilité fait intervenir des couplages entre plusieurs disciplines : chimie, physique et mécanique, ceci à diverses échelles de la nanostructure à la macrostructure. Les études expérimentales des phénomènes liés à la durabilité nécessitent souvent un temps très long et les résultats sont parfois difficiles à exploiter. [01]

Le PH de la matrice cimentaire est très Alcalin, il est voisin de 13, tout autre milieu dont le PH est inférieur à cette valeur peut être considéré comme un milieu agressif. Cependant le comportement du béton placé dans un environnement chimiquement agressif dépend de facteurs complexes et multiples liés d'une part à l'environnement (nature, concentration et renouvellement ou non des éléments agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication et de cure).

Pour réaliser un béton durable, il suffit, dans la majorité des cas, de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact. Le respect d'exigences supplémentaires, notamment le choix du ciment, est nécessaire pour maîtriser des situations plus sévères, telle qu'une conservation en milieu chimique agressif (eau de mer, eau séléniteuse, nitrate d'ammonium etc...) éventuellement couplée à une température de climat chaud. [02].

Dans cette étude les paramètres de quantification de la durabilité des ciments sont :

- la résistance en compression simple.
- la résistance en traction par flexion.

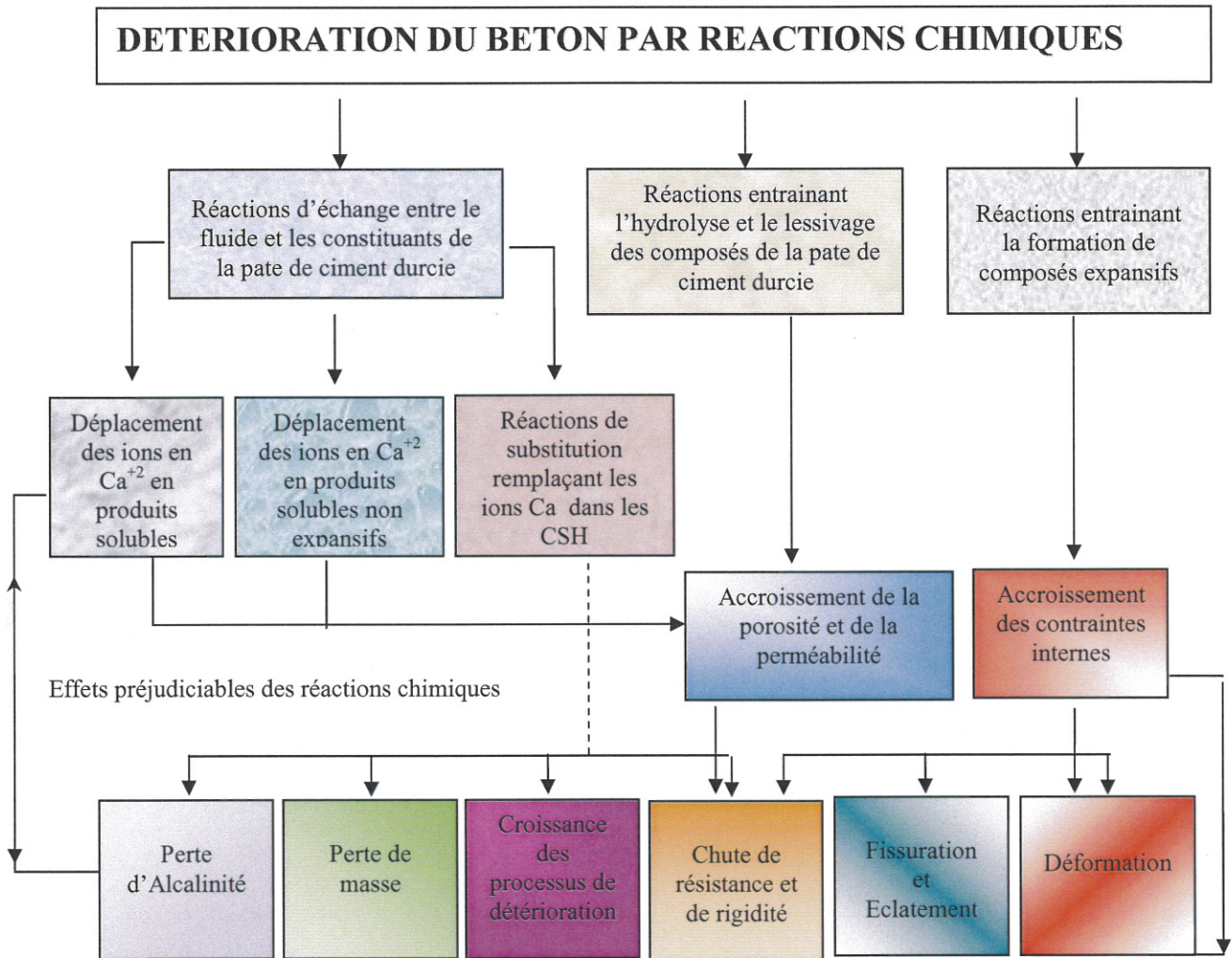


Figure I.1: PROCESSUS DE DETERIORATION DU BETON PAR LES ATTAQUES CHIMIQUES [02]

I.2- THEORIE DE LA LIXIVIATION DU BETON

I.2.1 Le béton

Le béton est un mélange de liant, de granulat (sable, gravier) et d'eau. Après la prise, il se forme un milieu poreux constitué d'un squelette granulaire, d'une pâte de ciment hydratée et de vides plus ou moins occupés par une solution interstitielle composée d'eau chargée en ions alcalins, Ca^{++} ; OH^- et caractérisée par un pH basique. Dans notre cas, le béton est considéré comme complètement saturé.

La présence de granulats modifie les propriétés de transfert du béton par rapport à une pâte de ciment. Dans le béton et le mortier, lors de l'hydratation du ciment, plusieurs phénomènes se développent aux interfaces pâte-granulat formant une zone plus poreuse que le reste de la pâte de ciment. Ces zones favorisent les processus de diffusion du béton. Elles sont appelées auréoles de transition. En revanche, les granulats sont imperméables, ils sont des obstacles qui gênent les transferts avec l'environnement. La longueur du parcours de diffusion s'allonge à cause de la présence des granulats. Ce phénomène se traduit par un paramètre appelé tortuosité [03].



Figure I.2: L'EFFET DES MILIEUX AGRESSIFS SUR LE BETON

I.2.2 Lixiviation du béton :

La lixiviation résulte des déséquilibres liés au transport d'ions de la solution interstitielle directement en contact avec les phases solides du béton. A priori, ce transport peut être assuré par diffusion ou perméation. Le processus de lixiviation du matériau est présenté de façon simple à la figure (03).

- ✓ un transport de matière par diffusion, engendrée par les gradients de concentration entre la solution interstitielle de la pâte de ciment du béton et la solution agressive ;
- ✓ des réactions chimiques de dissolution - précipitation, provoquées par les variations de concentrations résultant de la diffusion. Si l'on compare la cinétique de ces réactions par rapport au temps caractéristique du transport, on s'aperçoit que les réactions chimiques sont beaucoup plus rapides. Cela conduit à négliger la cinétique de ces réactions : c'est l'hypothèse d'équilibre chimique local.

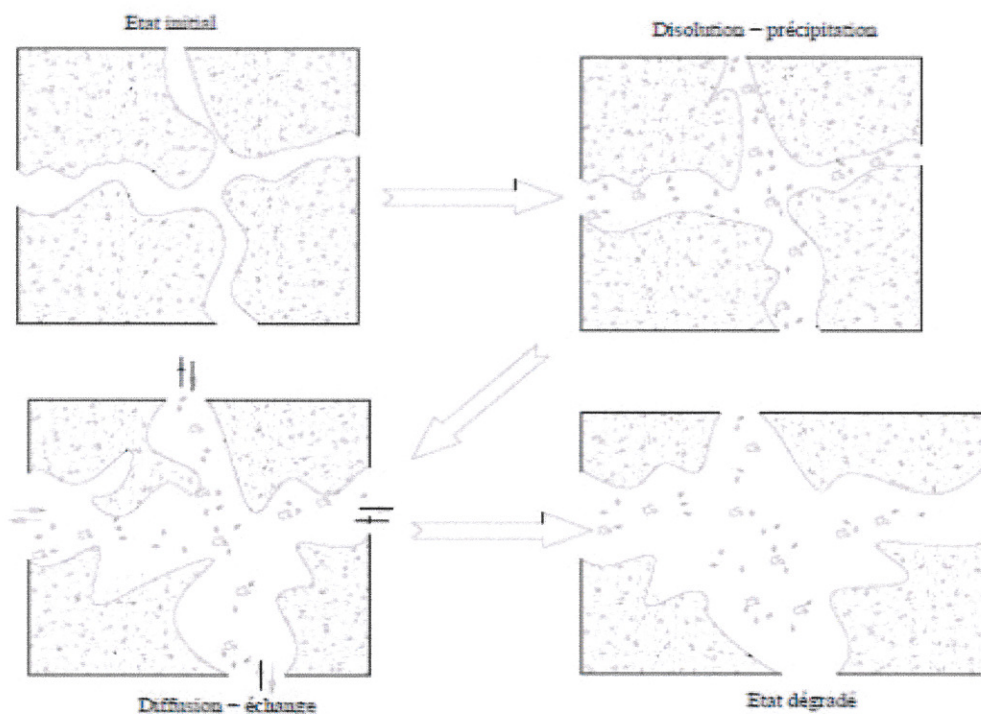


Figure I.3 : Processus de lixiviation d'un matériau cimentaire [03]

I.3- LES MILIEUX AGRESSIFS ET LES MECANISMES DE DEGRADATION

(rappel de la norme NF P 18 – 011)

La norme Française NF P 18 – 011 [04] définit les environnements agressifs les plus courants :

3.1. Les milieux agressifs

Trois catégories peuvent être distinguées :

- ✓ Milieux gazeux: gaz et vapeur, auquel cas l'agressivité dépend de l'humidité relative ambiante, de la pression, de la température et du renouvellement des gaz...
- ✓ Milieux liquides: eaux douces, eaux de mer, solutions de sel, d'acides ou de bases, eaux résiduaires, liquides organiques (huile, pétrole, solvants)
- ✓ Milieux solides: sols, produits de stockage. Ils agissent surtout par extraction ou dissolution, le plus souvent par l'eau, des agents nocifs.

Quatre classes d'agressivité sont définies: environnement faiblement agressif, moyennement agressif, fortement agressif et très fortement agressif. Elles sont regroupées dans le tableau 1 qui donne en outre leurs symboles et les niveaux de protection correspondants.

Tableau I.1 - Définition des classes d'agressivité

Environnement	Symbole	Niveau de protection
Faiblement agressif	A ₁	1
Moyennement agressif	A ₂	2
Fortement agressif	A ₃	3
Très fortement agressif	A ₄	4

Le tableau 2 donne le degré d'agressivité des solutions et des sols les plus courants.

Tableau I.2 - Agressivité des solutions et des sols

a) agressivité des solutions en fonction de leur concentration en agents et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale				
Degré d'agressivité	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Agents agressifs	Concentration en mg / l			
CO ₂ agressif *	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
SO ₄ ²⁻	250 à 600	600 à 1500 (1)	1500 à 6000	> 6000
Mg ²⁺	100 à 300	300 à 1500	1500 à 3000	> 3000
NH ₄ ⁺	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
PH	6.5 à 5.5	5.5 à 4.5	4.5 à 4	< 4
La limite est fixée à 3000 mg / l pour l'eau de mer				

b) Cas de l'eau douce

T A C **	< 1 mé / l	-	-	-
----------	------------	---	---	---

c) Agressivité des sols en fonction de la teneur en SO₄²⁻

% SO ₄ ²⁻ dans le sol sec ***	0.24 – 0.6	0.8 – 1.2	1.2 – 1.4	> 2.4
Mg / SO ₄ ²⁻ extrait du sol ****	1200 à 2300	2300 à 3700	3700 à 6700	> 6700

Niveau de protection	1	2	2	3
----------------------	---	---	---	---

* CO₂ agressif = excès de CO₂ dissous par rapport au CO₂ nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de Ca et Mg

** T A C titre alcalimétrique complet (norme NF T 90 – 036)

1 mé = 5 degrés français = 2.8 degrés allemand

*** Extraction par HCl à chaud

**** Extraction par l'eau (rapport eau / solution = 2 / 1)

3.2. LES MECANISMES DE DEGRADATION

3.2.1. Action des eaux douces

L'agressivité d'une eau naturelle est fonction de trois paramètres qui sont :

- ✓ **Le PH** de l'eau se traduit par son caractère acide ou basique : une eau sera acide si elle renferme du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou des sels d'acide fort et de base faible. Elle sera basique si elle contient des bicarbonates, des carbonates ou des hydroxydes.
- ✓ **La dureté ou le titre hydrotimétrique** d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de l'hydrogène et des métaux alcalins.
- ✓ **Le dioxyde de carbone** agressif représente une partie du dioxyde de carbone dissout dans l'eau.

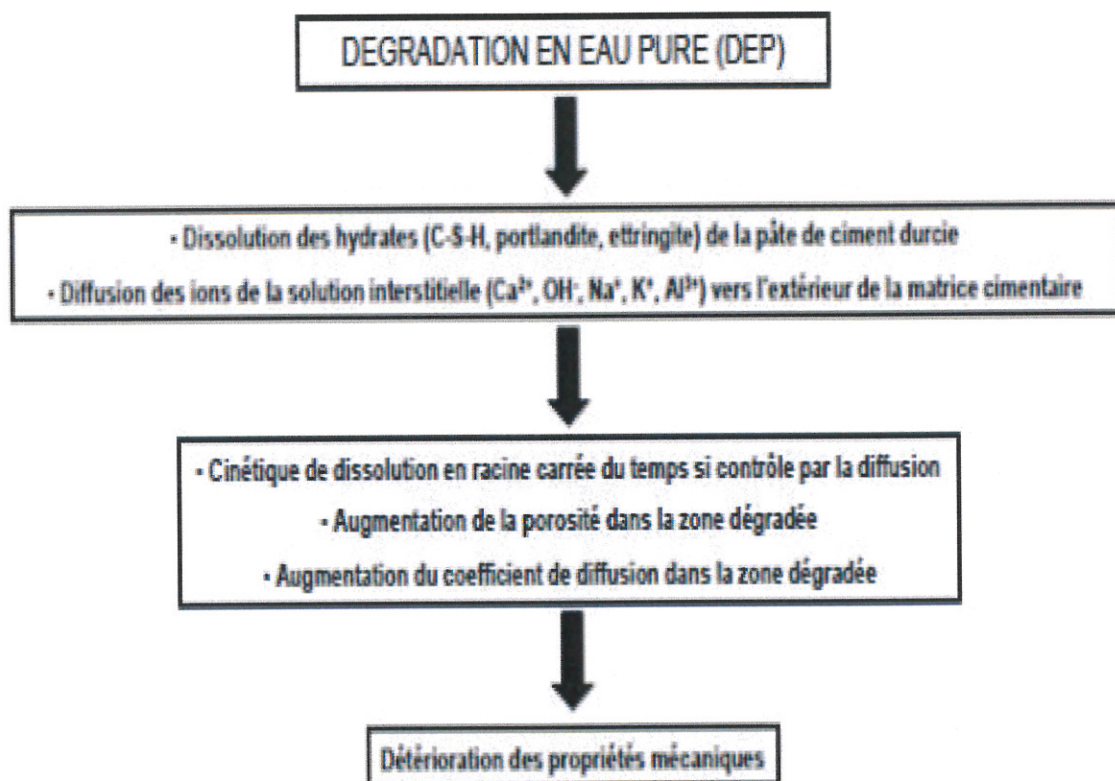


Figure I.4 : Schéma de la dégradation chimique des bétons par l'eau pure [05]

La lixiviation est un lessivage des produits solubles de la pâte de ciment durcie (*portlandite, ettringite, monosulfoaluminate de calcium hydraté, C-S-H*) :

$\text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (pour la portlandite)

$\text{C}_{1,65} - \text{S} - \text{H} + 3,3 \text{H}^+ \leftrightarrow 1,65 \text{Ca}^+ + (\text{SiO}_2)_{\text{aq}} + 3,3 \text{H}_2\text{O}$ (pour un silicate de calcium hydraté de rapport C/S = 1,65) [05].

Les cations H^+ proviennent de la réaction de dissociation de l'eau : $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$

La lixiviation se produit dès que le béton est en contact avec une eau dont le pH est inférieur au pH de la solution interstitielle. La dégradation en eau pure peut s'accompagner également d'une précipitation d'espèces secondaires. On assiste ainsi à deux phénomènes :

- ✓ Un transport de matière par diffusion, engendré par les gradients de concentration entre la solution interstitielle du matériau cimentaire et la solution agressive,
- ✓ Des réactions chimiques de dissolution / précipitation, provoquées par les variations de concentration résultant de la diffusion.

En effet, la portlandite, qui est l'hydrate le plus soluble des matériaux cimentaires, est absente de la zone dégradée (Figure I.4) [05].

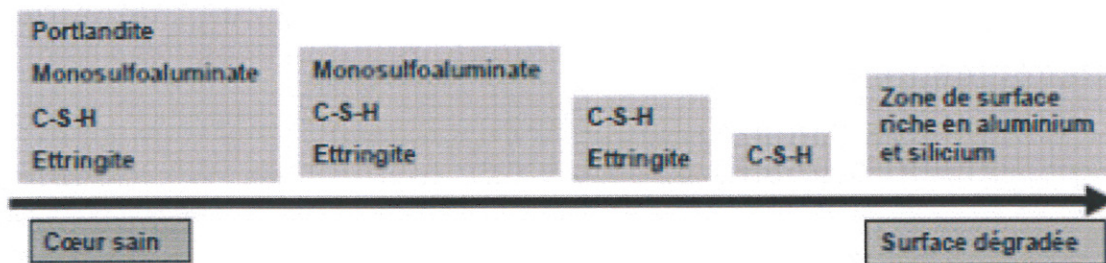


Figure I.5 : Zonation de la partie altérée, où chaque zone de minéralogie constante est délimitée par des fronts nets dans le matériau cimentaire à base de CEM I [05]

La cinétique de la diffusion est beaucoup plus lente que celle des réactions chimiques. Ainsi, les flux de lixiviation sont imposés par la diffusion, c'est-à-dire qu'ils sont proportionnels à la racine carrée du temps. En phase solide, on observe une zonation, où chaque zone de minéralogie constante est délimitée par des fronts de dissolution ou de précipitation : dès qu'une phase solide est en sursaturation ou sous-saturation par rapport à la solution au contact, elle précipite ou se dissout. En surface, on observe un « gel » qui remplace la pâte de ciment initialement présente. [05]

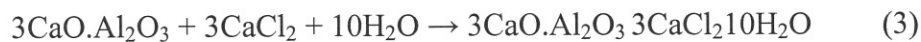
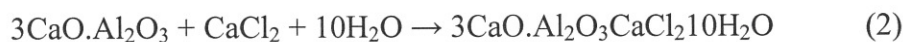
3.2.2. Action des chlorures

Indépendamment de leur effet nocif sur les aciers du béton armé, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre partie se combine avec le C₃A sous forme de monochloroaluminate de calcium (3CaO,Al₂O₃,CaCl₂,10H₂O) [06].

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite selon la réaction 1 :



La brucite (Mg(OH)₂) est insoluble et se dépose à la surface du béton. Le chlorure de calcium réagit avec l'aluminate tricalcique (C₃A) du ciment selon les relations 2 ou 3 pour former le monochloroaluminate de calcium (3.CaO.Al₂O₃. CaCl₂10H₂O) ou sel de Friedel [06et 07], ou le trichloroaluminate de calcium (3.CaO.Al₂O₃3.CaCl₂10H₂O) :



3.2.3. Action des sulfates

Les sulfates représentent le risque majeur d'agression chimique pour le béton [07]. L'action du sulfate de calcium est connue depuis longtemps ; elle a été signalée en 1887 par CANDLOT [09].

Parmi les principales réactions décrivant les mécanismes fondamentaux de l'altération des bétons par réactions chimiques, on trouve les sulfates. La conjugaison de ce processus, conduisant à la dégradation chimique du matériau et la formation d'un hydrate expansif, ont des conséquences d'ordre macroscopiques, en particulier d'ordre mécanique [10] : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et physico-chimiques [11] ; affaiblissement des propriétés liantes, modification de la porosité et des propriétés de transport. [12]

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits « secondaires » (dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment), d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion.). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport e/c).

Expérimentalement, les échantillons sont lixiviés par les solutions sulfatiques. L'analyse chimique régulière du lixiviat a mis en évidence une consommation de sulfates par la matrice proportionnelle à la racine carrée du temps. Cette évolution des quantités d'ions lixiviés, Ca^{2+} , OH^- et consommés, SO_4^{2-} linéaire en fonction de la racine carrée du temps, sous-entend des phénomènes diffusifs (Figure 6).

On relève, par ailleurs, peu de différences entre les dégradations réalisées en eau déminéralisée (DEP) et en eau sulfatée (ASSO) en matière de concentrations lixiviées. [12]

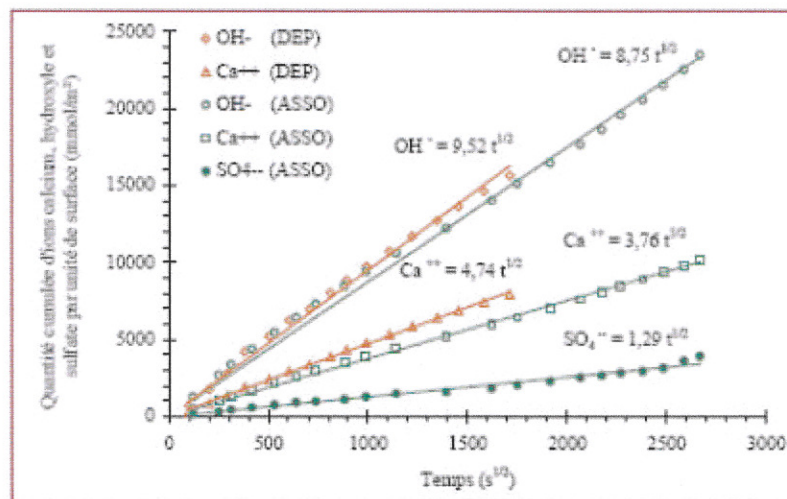


Figure I.6: Bilan des flux d'ions hydroxydes et calcium sortant et sulfates entrant pour les expériences de lixiviation en eau déminéralisée (DEP) et de lixiviation en milieu sulfaté (ASSO) [12]

L'attaque externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d'évaluer l'agression :

- le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusivité du matériau,
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et les ions SO_4^{2-} ,
- Le phénomène d'expansion, résultant de l'apparition de nouvelles phases cristallines, [12].

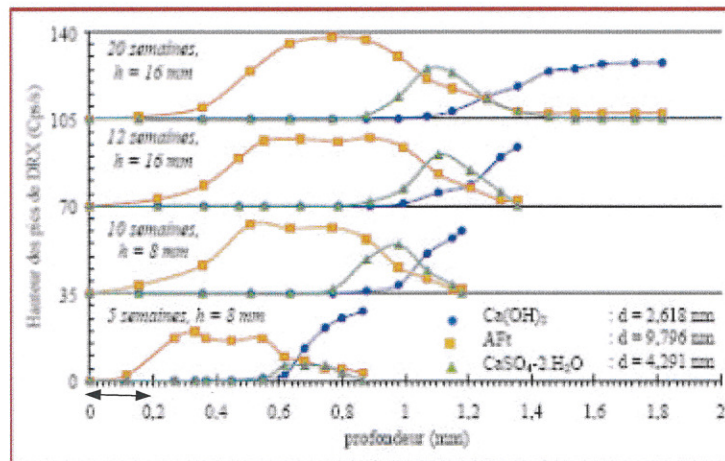


Figure I.7 : Zonation minéralogique obtenue par DRX de la pâte de ciment ($e/c = 0,4$) soumise à l'ASSO[12]

Les trois phases minérales les plus présentes et caractéristiques de la pâte de ciment dégradée en ASSO sont représentées, à savoir, la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), l'ettringite (AFt) et le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le profil minéral correspondant à l'ettringite apparaît au pied du front de dissolution de la portlandite et s'étale dans la zone décalcifiée sur une largeur croissante avec l'échéance de dégradation.

La Figure (7) permet donc de mettre en évidence les zones suivantes (depuis la surface d'attaque au contact avec la solution agressive vers le cœur sain, non décalcifié) :

- une zone de surface (entre 0 et 200 μm) où l'on ne détecte plus la présence des minéraux comme la portlandite, l'ettringite ou le gypse, à l'échéance 12 semaines ;
- une large zone où l'intensité des pics de diffraction associée à l'ettringite est forte. Celle-ci atteint 600 μm d'épaisseur (entre 500 et 1100 μm) à 12 semaines de dégradation en milieu sulfaté, soit 40 % de la zone dégradée. Cette zone où précipite de façon importante l'ettringite est une zone où la portlandite a disparu (ou en partie disparu pour la zone la plus profonde), ce qui laisse à l'ettringite qui précipite, un volume disponible suffisant à sa croissance ;

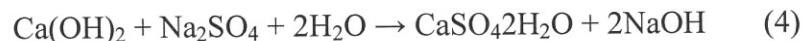
- une zone où coexistent trois phases bien distinctes : la portlandite en proportion moins importante que dans le matériau sain, l'ettringite et le gypse. Cette zone semble localisée et d'épaisseur relativement petite. Elle atteint 200 μm (entre 1100 et 1300 μm) d'épaisseur à 12 semaines de dégradation ;
- une zone de pâte de ciment contenant de la portlandite en quantité importante, au delà de 1300μm (à partir de la surface d'attaque) pour l'échéance 12 semaines. Dans cette partie, il n'y a plus de gypse et la quantité d'ettringite devient très faible et comparable à celle déterminée dans la pâte saine.

a - Action du sulfate de sodium

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation de gypse ou d'ettringite secondaire expansive [13]. Cela peut être résumé comme suit :

- Formation du gypse secondaire

La formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate selon la relation (4) :

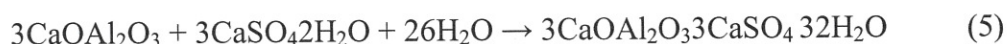


Gypse	Produit
Secondaire	soluble

Une expansion peut se manifester mais dans la majorité des cas elle restera limitée dans la mesure où le gypse secondaire se forme selon un processus de dissolution et de cristallisation [06].

- Formation de l'ettringite secondaire

La formation de l'ettringite secondaire peut résulter de la réaction chimique entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium anhydres (C₃A) selon la relation (5) ou hydratés (C₄AH₁₃) :



Suivant la teneur en chaux de la phase liquide, la cristallisation de l'ettringite peut être expansive ou non [14].

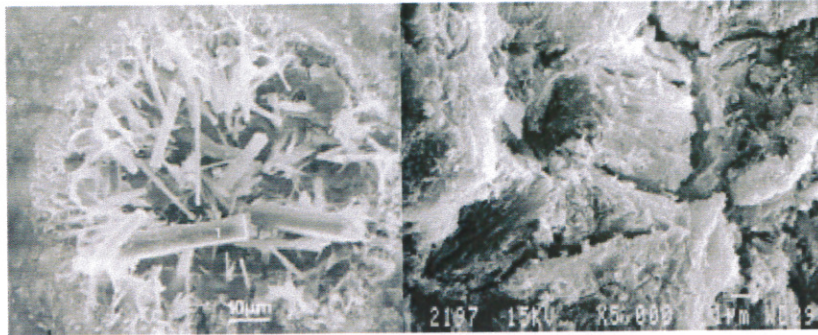
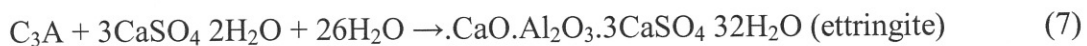


Figure I.8 : micrographies d'ettringite cristallisé dans pâtes de ciment : gauche, des cristaux de fibre en forme d'aiguille dans un pore droite, des cristaux massifs dans la matrice après réactions chimiques(Guillon15).

b - Action du sulfate de magnésium

Le sulfate de magnésium est particulièrement agressif par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec le cation Ca^{2+} selon les relations (6), (7) et (8) [06]:



Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduisent à la formation de la brucite $Mg(OH)_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des CSH en un silicate de magnésium hydraté MSH sans propriétés liantes. De plus la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation du gypse secondaire.

On aura donc les deux phénomènes consécutifs suivants avec chacun sa propre cinétique :
Les figures (I.9 et I.10) sont déduites de calculs faits par Guillon [15]. En raison de la diffusion d'ions de magnésium (principalement Mg^{2+}) et des ions de sulfate par la

porosité, des équilibres chimiques entre des phases solides et la solution de pore sont changés. La figure(I.9) montre que, d'abord, la précipitation d'ettringite arrive, par les dissolutions simultanées de monosulfoaluminate et portlandite. Deuxièmement, quand tout le monosulfoaluminate est consommé, la diffusion d'ions de sulfate et la dissolution de la portlandite cause la précipitation de gypse. Simultanément, les ions de magnésium se répandent dans la porosité et le précipité dans brucite, qui est le magnésium hydroxyde.

Si nous nous concentrons sur l'évolution de porosité dans le profil (la figure I.10), il y a trois zones distinctes en termes d'évolution de l'espèce solide. De la zone saine, à droite du profil, l'évolution de la porosité est en raison de la différence dans le volume entre ettringite précipité et l'espèce dissoute, c'est-à-dire monosulfoaluminate et portlandite. Dans la deuxième zone, quand tout le monosulfoaluminate est consommé et le gypse n'a pas précipité encore, le volume total de porosité ne se développe pas. Finalement, quand le gypse commence à précipiter, l'équilibre de volume entre portlandite, brucite et le gypse devient négatif, qui aboutit à la valeur inférieure de la porosité et le risque pour la matière pour étendre et craquer.

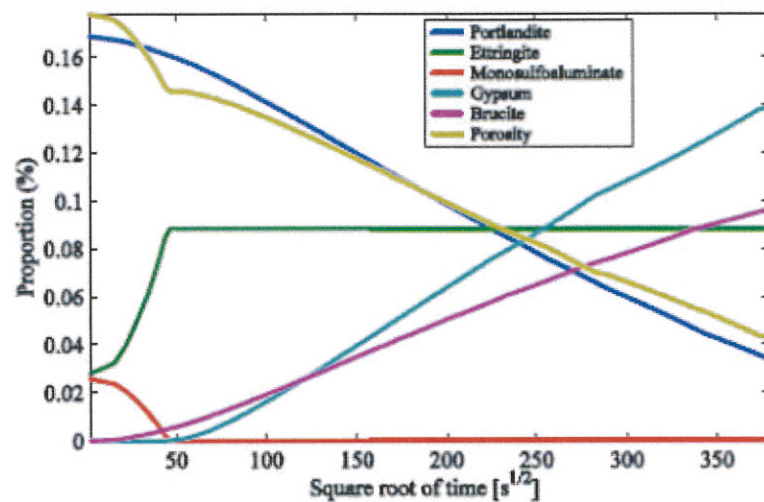


Figure I.9 : les évolutions voluminales des phases solides dans la première cellule du ciment collant contre la racine carrée de temps, en raison d'un 0.05 sulfate de magnésium de concentration mol.l-1 la solution agressive. [15]

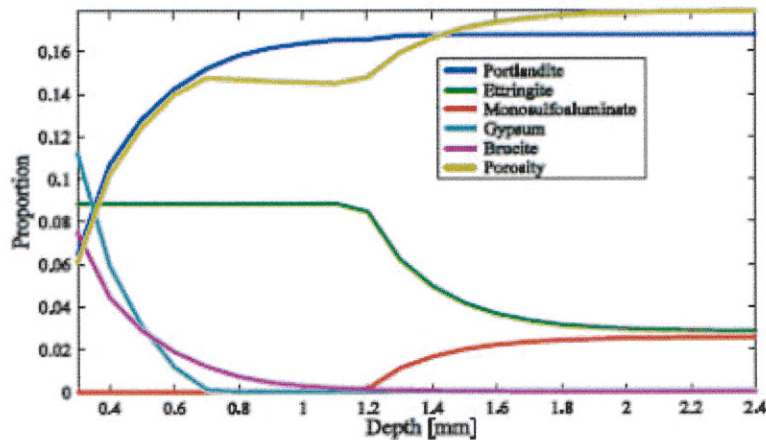


Figure I.10: Profil voluminal des solides dans la matière après 30 jours d'agression chimique avec un 0.05 sulfate de magnésium de concentration mol.l-1 solution agressive [15]

3.2.4. Action du dioxyde de carbone

La carbonatation du béton à l'air résulte de la fixation du gaz carbonique (CO_2) par les hydrates du ciment et principalement la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La réaction est favorisée par une humidité du milieu comprise entre 60 et 70 %.

Il faut préciser que l'agent réel de carbonatation est l'acide carbonique (H_2CO_3) résultant de la réaction (9), car le dioxyde de carbone à l'état gazeux n'est pas réactif.



L'action du dioxyde de carbone se manifeste même à de très faibles concentrations telles celles que l'on rencontre dans l'air qui varie de 0.03 % (en volume) dans un milieu non pollué à 0.3 % dans les grandes villes et peut atteindre exceptionnellement 1 % dans les lieux fortement pollués [16].

Le dioxyde de carbone (CO_2) réagit avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, le carbonate de calcium précipite sous forme d'aragonite et de calcite selon la relation (10), mais d'autres hydrates peuvent être décomposés, des silicates hydratés, de l'alumine et de l'oxyde de fer étant formés.



La carbonatation en soi n'endommage pas directement le béton. Cependant ses effets constituent un risque de corrosion de l'acier. La carbonatation de la portlandite entraîne une

diminution du pH de la pâte de ciment hydratée, qui peut descendre à une valeur inférieure à celle que nécessiterait la protection de l'acier (pH = 9 environ). Lorsque toute la portlandite est carbonatée, la valeur du pH descend à 8.3 [17].

La baisse du pH couplée à une profondeur de carbonatation suffisante (égale ou inférieure de quelques millimètres à l'épaisseur de l'enrobage) [16] conduit inévitablement à la disparition de la couche de passivation de l'acier et la corrosion peut alors se développer.

La carbonatation se développe progressivement à partir de la face extérieure exposée au CO₂ mais à une vitesse décroissante qui dépend de :

- la porosité de la pâte de ciment, car le CO₂ diffuse à travers le réseau poreux
- du degré de saturation en eau des pores, car la diffusion de CO₂ dans l'eau est quatre fois plus lente que dans l'air [16].

3.2.5. Action du nitrate d'ammonium

Le nitrate d'ammonium est très soluble dans l'eau et réagit dans un premier temps avec la pâte de ciment par des réactions d'échange d'ions avec la formation d'un sel de calcium soluble [Ca(NO₃)] et un dégagement gazeux d'ammoniac (NH₃) et dans un second temps avec celle d'un nitro - aluminate de calcium de formule (3.CaO.Al₂O₃.Ca(NO₃)₂.10H₂O) [18].

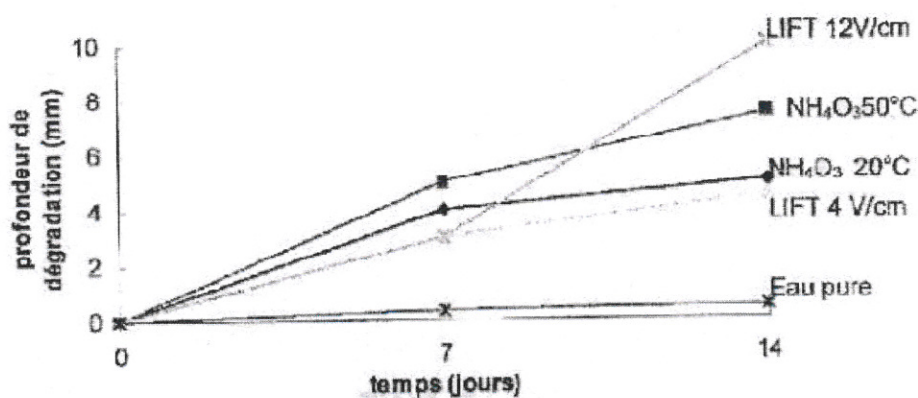


Figure I. 11 : Comparaison des cinétiques de dégradation moyenne des différentes méthodes extrait dans Le Bellégo, 2001[19]

précédemment, pour déterminer les profondeurs dégradées. « Zone dégradée ou décalcifiée grise et celle saine rose ». [03]

3.2.6. Action de la température.

De façon générale, la température est un paramètre important dans l'activation des réactions chimiques dans le cas des ciments. Une température élevée joue un double rôle [06]:

- elle intervient sur la cure du béton qui doit être particulièrement soignée afin d'éviter des fissures de retrait préjudiciables à sa bonne résistance ultérieure.

- elle accélère la cinétique des réactions chimiques : celle de formation des hydrates, mais aussi celle des réactions chimiques de dégradation.

L'accélération de lixiviation par augmentation de température est utilisée par Torrenti et al, 1999 (cité par [Viet-Hung NGUYEN 03]). Une campagne d'essais de lixiviation sur pâte de ciment de CEM I a été réalisée. La cinétique était contrôlée par la diffusion pour les trois températures étudiées (20°C, 50°C, 85°C). On a observé une accélération de la lixiviation du calcium à 50°C par rapport à 20°C. En revanche, les cinétiques globales de lixiviation sont identiques à 50°C et 85°C (voir figure I.14).

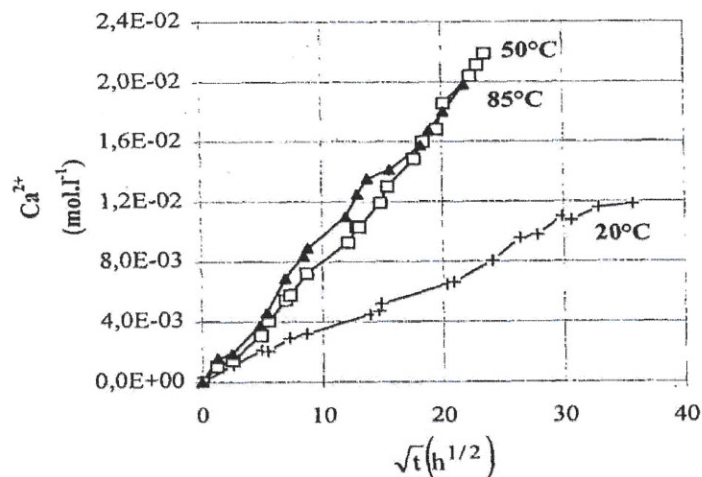


Figure I.14 : Lixiviation d'une pâte de ciment à différentes températures
Extrait de [Torrenti et al.1999] [21]

I.4 Comportement mécanique en compression après lixiviation

Cette section présente les résultats des essais de compression du béton qui permettent d'évaluer le comportement mécanique en compression du béton aux différents états de dégradation.

Le but est de faire une comparaison de la compression mécanique entre deux types de béton, l'un dosé à 350kg/m³ et l'autre dosé à 420kg/m³, tout les deux ayant subi une lixiviation en eau de robinet et eau de mer pendant des durées respectives de 28 jours, 90 jours et 180 jours.

Comme indiqué précédemment, quand le béton est lixivié, les hydrates sont dissous et les produits sont diffusés vers l'environnement. Ce phénomène entraîne une augmentation de la porosité dans le béton et une diminution de la cohésion entre les granulats. D'une part, il provoque des pertes de rigidité et de résistance à la compression, et d'autre part, il entraîne un comportement contractant, de plus en plus déformable avec des déformations anélastiques. [03]

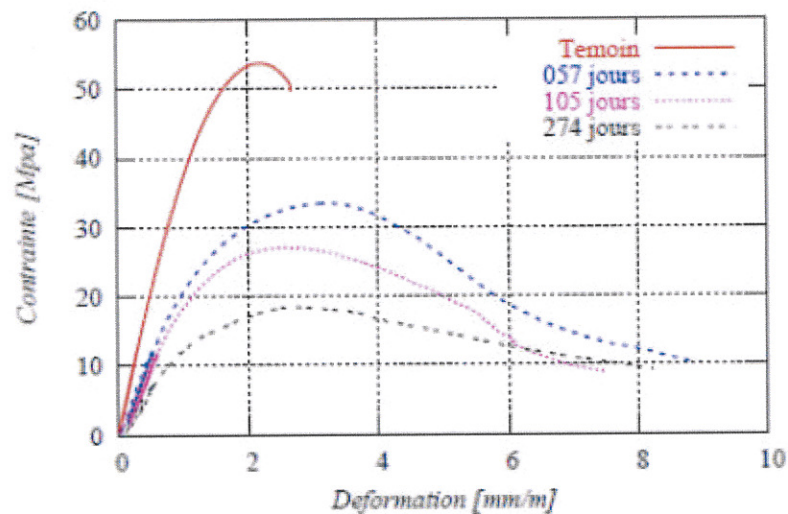


Fig.I. 15 Courbes contrainte-déformation de l'essai de compression des éprouvettes pleines à différentes échéances de dégradation chimique au nitrate d'Ammonium. [03]

A partir des résultats de le Belego [18], on constate que la dégradation chimique aux Nitrates d'Ammonium (480 g/l et 30°C), fait diminuer non seulement la rigidité et la résistance à la compression du béton dégradé mais fait aussi changer son comportement post-pic.

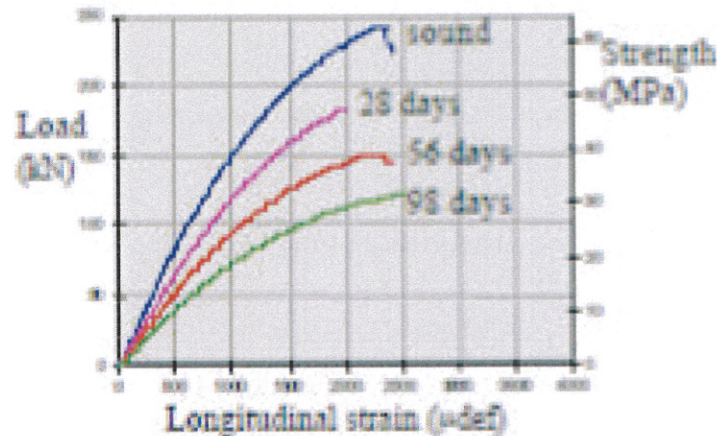


Fig. I. 16 : courbe de compression d'un béton sain et béton lixivié (28, 56 et 98 jours). [18]

4.1 Effet de la lixiviation sur le comportement mécanique du mortier

4.1.1. Mécanismes physico-chimiques de la lixiviation

La lixiviation par l'eau entraîne la dissolution de certaines phases solides de la pâte de ciment hydraté. Le mécanisme a été longuement étudié et décrit par plusieurs auteurs (Adenot, 1999) (Carde, 1996). La dégradation est caractérisée par la modélisation expérimental Déf ($\times 10^{-3}$) Contrainte (MPa) avec présence de fronts nets de dissolution-précipitation délimitant ainsi des zones de caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes. La portlandite (CH) est la phase la moins stable de la pâte cimentaire, elle se dissout en premier. Il a été montré par plusieurs auteurs que ce phénomène d'origine physico-chimique entraîne une chute des propriétés mécaniques : module élastique, résistance à la flexion et compression (Carde, 1996) (kamali, 1999) (Le Bellégo, 2001), angle de frottement interne (Heukamp, 2001). Récemment, Kamali et al (2004) ont montré que la lixiviation de la portlandite uniquement peut entraîner une chute de module élastique d'environ 50% pour une pâte de ciment. [04]

4.1.2. Effets de la lixiviation sur le comportement en compression et traction du mortier

Seul l'effet de la lixiviation de la portlandite est étudié. La teneur volumique en portlandite de la pâte de ciment est d'environ 15%. Cet hydrate est la phase la moins stable de la pâte cimentaire, elle se dissout en premier créant une porosité supplémentaire non-négligeable. Sa dissolution est modélisée en affectant aux éléments fins représentant les caractéristiques de l'eau. La dissolution de la portlandite entraîne une chute d'environ 32% du module élastique (de 42 GPa à 29 GPa) et d'environ 40% de la résistance à la compression (de 63 MPa à 38 MPa) du mortier étudié. [01]

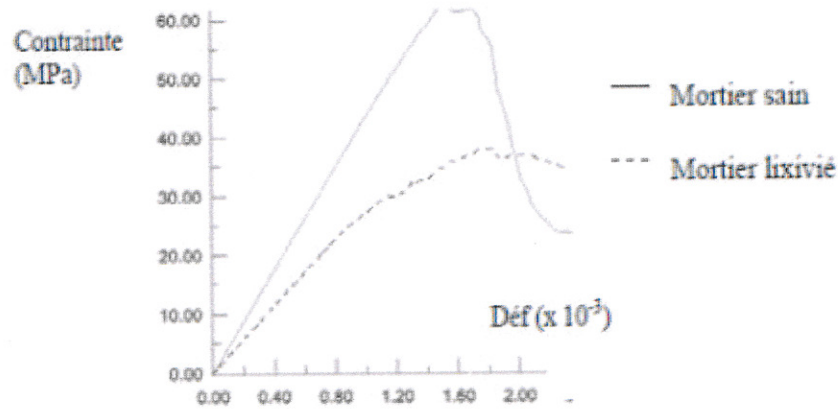


Figure I.17 : Comportement en Compression du Mortier avec et sans Portlandite (CH) [01]

En utilisant une lixiviation au nitrate d'ammonium, [Carde, 1996] trouve en analysant les résultats d'essais de compression que le mélange sans fumée de silice perd environ 80% de la résistance quand il est complètement dégradé au lieu de 40% de perte de résistance dans le cas du mélange avec fumée de silice (voir les figures I.18 et I.19). [03]

Les résultats indiquent aussi que la résistance à la compression des matériaux chute brutalement d'environ 70% après la dissolution de la portlandite et que la dissolution progressive des C-S-H après la dissolution de la portlandite est responsable de la perte de 6% de la résistance de compression. [03]

Donc la dissolution de la portlandite a une influence considérable sur la résistance et le module de la pâte de ciment durcie.

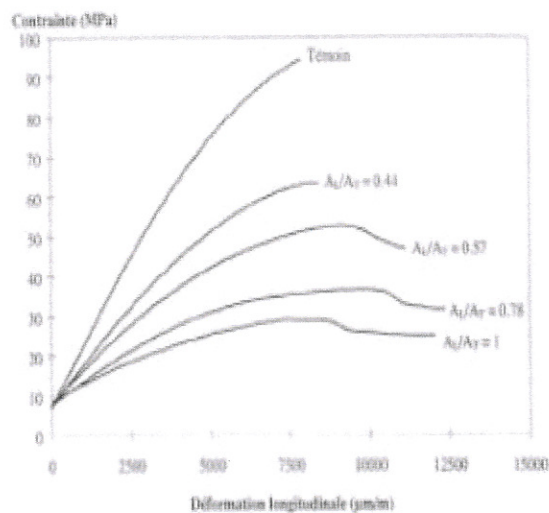


Fig. I. 18 : Courbes contraintes moyennes déformations moyennes à différents taux de dégradation (pâte de ciment CEMI $E=C = 0.45$) [Carde et al, 1996]

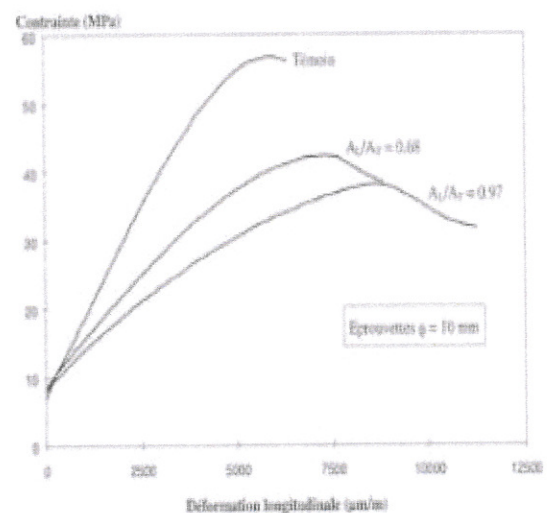


Fig. I.19 : Courbes contraintes moyennes déformations moyennes à différents taux de dégradation (pâte de ciment CEMI+fumées de silice $E=C = 0.45$, $FS/C = 0.3$) [Carde et al, 1996]

I.5. CONCLUSION

Les mécanismes d'altération chimique des matrices cimentaires dans un environnement agressif sont les phénomènes de dissolution des hydrates ou décalcification progressive de la pâte de ciment suivant le diagramme d'équilibre local entre la phase solide et la phase liquide et la diffusion des ions de la solution interstitielle vers le milieu extérieur. On observe tout d'abord une dissolution de la portlandite CH par contact avec la solution aqueuse, puis une dissolution progressive des C-S-H.

Il s'agit d'une décalcification progressive de la pâte de ciment durcie, principalement par dissolution de la portlandite par contact avec la solution aqueuse. Cette décalcification est alors susceptible d'altérer les propriétés mécaniques de la pâte de ciment durcie par modification de la porosité.

Les réactions de dissolution et la précipitation sont gouvernées par une succession d'équilibres locaux infinitésimaux. En conséquence, localement, la sous-saturation ou la sur-saturation de la solution de pore de quelques composants du squelette solide peut arriver.

CHAPITRE II:

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DES BETONS

II/ CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DES BETONS:

A travers ce chapitre, on a présenté les matériaux utilisés dans cette étude et les techniques expérimentales pour caractériser ces matériaux ainsi que et la formulation des bétons.

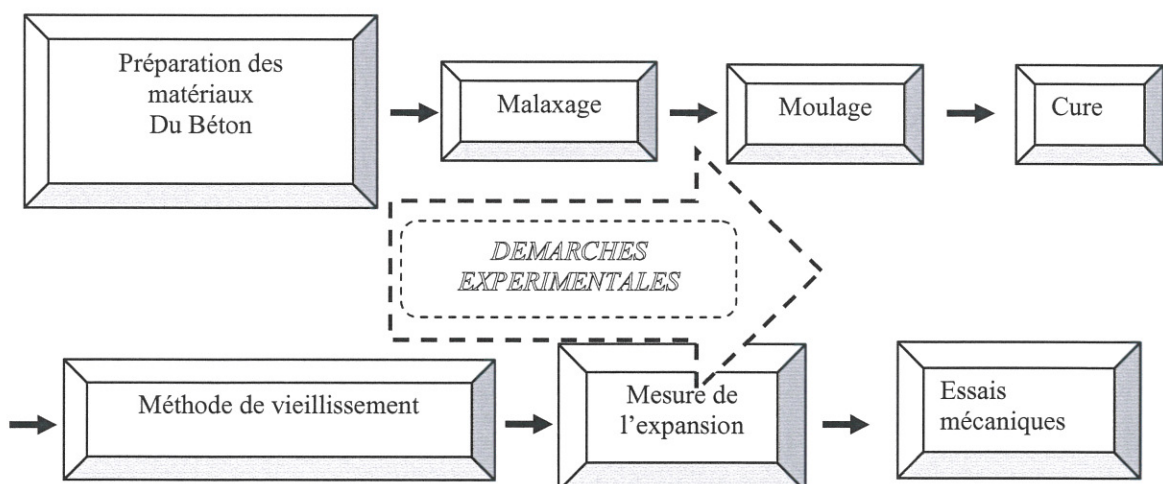
II.1/ INTRODUCTION:

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et l'eau, afin de réaliser un béton répondant aux qualités recherchées.

Avant la détermination des dosages des constituants qui rentrent dans la formulation du béton, il est recommandé de vérifier certaines propriétés et caractéristiques des matériaux composants le béton (granulats, ciment, eau, adjuvant), en les mesurant, par des méthodes et essais normalisés. Une fois le béton préparé, il doit subir des essais à l'état frais et durci, afin de matérialiser notre matériau et donc confectionner des ouvrages résistants, durables et économiques.

Ce deuxième chapitre est composé de trois parties :

- La première partie traite les caractéristiques des matériaux utilisés.
- La deuxième partie concerne la préparation et la formulation des bétons.



Deux types de bétons ont été choisis pour l'élaboration de ce travail qui sont :

- ✓ dosage de 350Kg/m³ pour le premier béton
- ✓ dosage de 420 Kg/m³ pour le deuxième type de béton afin d'éviter l'ajout des plastifiants ou tout autres types fluidifiants ce qui risque de provoquer des réactions chimiques non contrôlées.

Le choix a été porté sur deux types de bains de dégradation pendant 180 jours :

- Le 1^{er} étant un bac de l'eau de robinet
- Le 2^{ème} étant un bac similaire de l'eau de mer, malheureusement par manque de moyen cette dernière n'a pas pu être renouvelable afin d'accélérer le processus de lixiviation et atteindre des résultats optimaux.



Figure. II 1. Disposition des éprouvettes dans un bac en tôle galvanisée (1,50x1,00x0,75) pour l'essai de lixiviation du béton sous l'eau de robinet et/ou l'eau de mer

Une série de mesure du retrait ou gonflement a été effectuée au cours de l'essai de durabilité selon la norme ASTM C1012-02 dans un intervalle de temps précis après le démoulage du béton.

II.2/ CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES:

II.2.1/ L'EAU:

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet (potable),

II.2.2/ LE CIMENT:

La composition chimique et minéralogique du CEM II 42,5 utilisé pour la confection des bétons sont résumés dans les tableaux II.1 et II.2, qui sont élaborés à la base de la fiche technique fournie par le laboratoire de l'usine "Hadjar Essoud", [Annexe].

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment CEM II 42,5 utilisé

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	P.A.F 975 °C
59,5	5,0	23,0	3,0	1,5	0,13	0,45	0,01	2,5	3,0

Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5 utilisé

C ₃ S ¹	C ₂ S ²	C ₃ A ³	C ₄ AF ⁴
57,5	17,5	10,5	9,0

Les principales caractéristiques du ciment utilisé sont données par le Tableau II.3.

¹ C₃S: 3CaO.SiO₂

² C₂S: 2CaO.SiO₂

³ C₃A: 3CaO.Al₂O₃

⁴ C₄AF: 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé pour la confection des bétons.

Caractéristiques	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	kg/m ³	1100
Masse volumique absolue	kg/m ³	3100
Porosité	%	64,51
Consistance normale	%	27,0
Début de prise	h	2h.25mn
Fin de prise	h	5 h
Classe de résistance	MPa	42,5
Résistance vraie	MPa	35
Finesse de mouture	cm ² /g	3200
Refus sur tamis 45 μ	%	22

II.2.3/ LES GRANULATS:

II.2.3.1/ ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE:

Dans cette étude, on a utilisé deux types de granulats:

- Sable roulé (sable de mer), siliceux et fin provenant de la région d'Annaba;
- Granulats naturels (concassés), roche naturel calcaire d'origine locale extraite des carrières de Ben Azzouz dans la région de Skikda;

II.2.3.2/ PREPARATION DES GRANULATS:

On a choisi pour cette étude, de concevoir 3 classes granulaires 0/5, 5/12,5 et 12,5/20, et cela pour avoir des bétons ternaires avec un étendu granulaire meilleur et une formulation adaptée aux exigences voulues (Consistance et Résistance).

– Fractionnement et préparation des granulats naturels concassés:

Les granulats naturels concassés sont commercialisé avec des classes granulaires 0/5, 3/8, 5/15 et 15/25, et pour des raisons techniques (D_{max} est en fonction de dimensions des moules) et pour avoir un bon béton ternaire, on a procédé aux fractionnements des granulats pour avoir trois nouvelles classes: 0/5, 5/12,5 et 12,5/20. Notant que lors de la séparation (tamisage) des graviers, on a éliminé certaines quantités des fillers qui peuvent influencer la qualité des bétons.

II.2.3.3/ ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE:

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560, elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M ($200D < M < 600D$) préalablement séché dans une étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat suivant :

- Pour le sable roulé: 0,8 - 0,5 - 0,315 - 0,2 - 0,125 - 0,08 mm.
 - Pour les sables concassés: 5 - 3,15 - 2 - 1,25 - 0,8 - 0,5 - 0,315 - 0,2 - 0,125 - 0,08 mm.
 - Pour les graviers: 20 - 16 - 12,5 et 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 mm.
- **Courbes granulométriques :** Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale du matériau et exprimées en pourcentage, servent pour tracer la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D sont indiquées en abscisse.

II.3/ FORMULATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS

II.3.1/ METHODE DE FORMULATION DE BETON:

Nous avons décidé de n'utiliser aucun adjuvant de façon à éviter tout risque d'interaction Chimique. Le béton est formulé en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse. Cette démarche est largement utilisée en France par la profession. Comme toutes les méthodes classiques, la méthode de Dreux repose sur l'utilisation de courbes granulaires de référence. Elles permettent d'approcher par le calcul ou par construction géométrique les proportions optimales des différentes fractions granulaires. Les courbes de Dreux ont été obtenues de façon purement empirique, en collectant des données relatives à des bétons ayant donné satisfaction.

La figure II.2 nous montre les courbes granulométriques des granulats et la courbe de référence construite par la méthode de Dreux.

Les performances requises pour un béton impliquent :

- Une consistance adaptée à sa destination.
- Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours.
- Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment (C_{\min}) Et un rapport E/C maximum $(E/C)_{\max}$.

II.3.2/ FORMULATION ET PREPARATION DES BETONS:

La méthode de formulation des bétons utilisés dans cette étude est celle de Dreux-Gorisse [23]. La composition est calculée selon les données suivantes :

- Type de béton : Ordinaire.
- Diamètre maximal des granulats $D_{\max} = 20$ cm
- Les trois classes granulaires : 0/5, 5/12,5 et 12,5/20.
- Ouvrabilité du béton : plastique (Affaissement au cône d'Abrams, $A_{ff} = 7 \pm 2$ cm), qui est le paramètre le plus important pour la mise en œuvre des bétons.
- Serrage : vibration courante (Table vibrante).
- Résistance caractéristique projetée à 28 jours pour tous les bétons $R_{c28} = 20$ MPa.
- Dosage en ciment des différents bétons est variable suivant chaque série des bétons. Il est de l'ordre de: 350 kg/m^3 pour le premier type de béton et de 420 kg/m^3 pour le deuxième ;

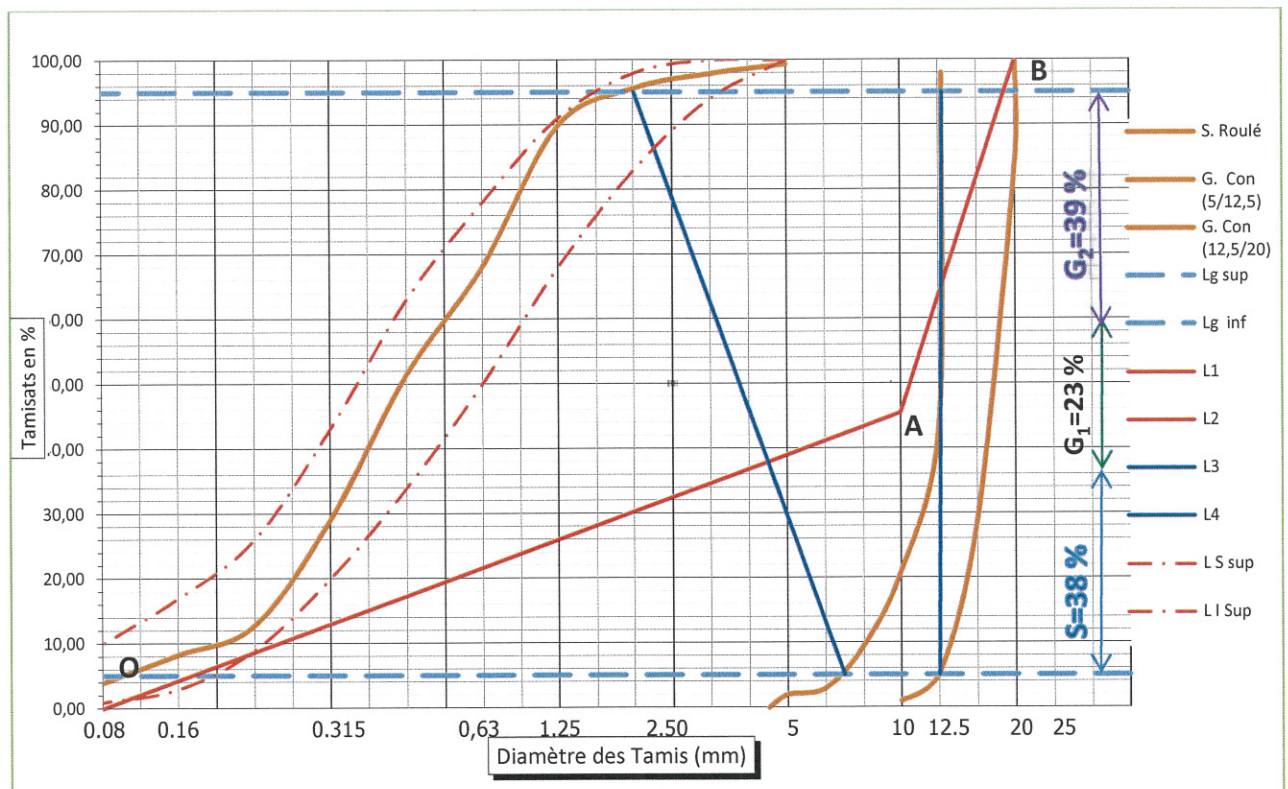


Figure II.2: Composition granulaire des types de bétons d'étude

II.3.3/ CONFECTION ET CURE DES EPROUVETTES :

Deux types d'éprouvettes utilisées dans cette étude, prismatiques de (7x7x28cm) et cylindriques de (11x22 cm) en plus d'une poutre de (15x20x120 cm)

Les éprouvettes couvertes laissées à l'air libre sont démoulées après 24 heures et immergées sous l'eau du robinet et l'eau de mer à une température de 40°C au bout de 7 jours (par mesure de sécurité afin d'éviter la ruine de la poutre lorsqu'elle est plongée dans les deux bacs).

La cure de conservation des deux types de béton a été effectuée pendant :

1. **28 jours ;**
2. **90 jours ;**
3. **180 jours.**

Une moyenne de 3 éprouvettes de béton et une poutre ont été admise pour chaque essai.

3.3.1. Caractéristiques des milieux de conservation

Les solutions constituant les milieux agressifs sont préparés au laboratoire (tableau II.4), notamment l'eau de mer qui a été reconstituée selon la référence [22] donnée au tableau II.5.

Tableau II.4 – Caractéristiques chimiques des bains de conservation

Milieu	Concentration g /l	pH
Eau douce (E)	0	7
Eau de mer (A)	35	7.8

Tableau II.5 - Composition ionique moyenne de l'eau de mer [22]

Ions	Na ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Molarités mmol/l	460.0	52.0	14.2	2.0	538.0	27.1	2.0

II.3.4/ COMPOSITION DES BETONS:

II.3.4.1. La formulation du béton utilisé au laboratoire :

Le tableau suivant résume la méthode Dreux, calculé pour 1m³ de béton.

Dosage de Béton	Eau (L/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Gravier (Gr1) (Kg/m ³)	Gravier (Gr2) (Kg/m ³)
350 kg/M ³ (A-1C-1D-3D-1E-3E)	163,33	692,87	495,98	658,17
420 kg/M ³ (B-2C-2D-4D-2E-4E)	183,50	670,59	424,64	690,09

Tableau II.6 – Composition granulaire et quantité d'eau de gâchage des bétons utilisés

Masse expérimentale des granulats pour un volume de 0,04m³ égale masse théorique plus 25% pour la confection d'un modèle réduit de poutre 120x20x15cm trois (03) éprouvettes cylindriques 11x22cm et trois (03) autres éprouvettes prismatiques 7x7x28cm

II.3.4.2. Préparation des moules

- Moule de compression

Le béton est mis en place dans des moules cylindriques 11x22cm, pour l'essai de la compression, ils sont conforme à la norme [AFNOR NF P18-400, p387] et [ACNOR CSA/ octobre1994, CSA.A23.2-2C (p321) et CSA.A23.2-3C (p326), A23.2-1D (p81)], ils sont métalliques solides résistant à la déformation et vibration, réutilisables, avec des caractéristiques constantes pour chaque utilisation.

Selon la norme canadienne CSA/octobre 1994.A23.2 (-2), (-3) et (-1D) ; la hauteur doit être égale à 2 fois le diamètre du cylindre, et selon AFNOR/90 NF P18-400 ces dimensions sont (diamètre, hauteur égale deux fois le diamètre).

Les moules cylindriques ont deux trous , l'un au fond du moule centré de Φ 5mm et l'autre au centre du couvercle du moule afin de pouvoir placer des plots pour permettre la mesure des variations dimensionnelles (retrait ou gonflement) des bétons.

-Moule d'éprouvette prismatique (compression et flexion) :

Les moules pour les éprouvettes prismatiques 7x7x28cm égale à $a \times a \times 4a$, ne figure pas dans la norme NF P18-400 mais elle permet leurs utilisation pour l'essai de flexion selon la norme NF P18-407, conformément à AFNOR 1990 et ACNOR 1994, CSA A23.2 (3C p326). Ces moules sont métalliques rigides, ne réagissent pas avec le béton ordinaire, ils résistent aux vibrations, aux déformations et réutilisable avec des caractéristiques constantes à chaque utilisation. Il est conseillé par AFNOR de vérifier la tolérance du moule (rectitude des génératrices, planéité, orthogonalité.)

Notre moule est conforme aux conditions exigées par la norme CSA/octobre 1994 :

- Dimension maximale de $(b, a) > 3D$; avec D le grand diamètre.
- Le rapport $b/a < 1,5$
- La longueur $L > 3a$ et $L \geq 50\text{mm}$

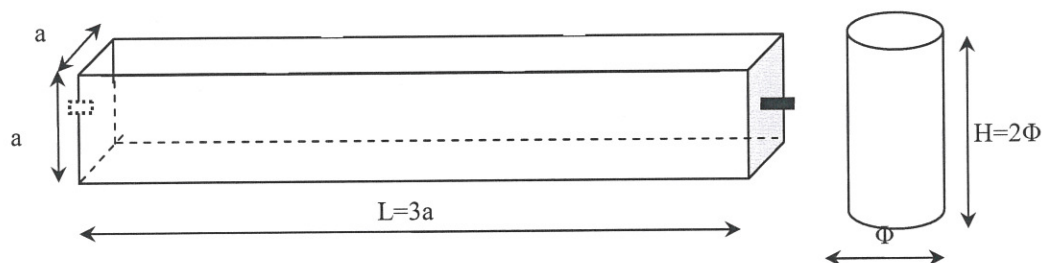


Figure II.3 : Moule prismatique 7*7*28cm et Moule cylindrique [Selon CSA A23.2-3C et (-1D) AFNOR 90 NF P18-400][24]

Les plots sont mis en place au centre de la section carrée 7x7cm du moule, pour les deux cotés gauches et droits.

L'Essai de compression par flexion des éprouvettes prismatiques n'a malheureusement pas été réalisé parce que les deux machines qui lui sont destinées, sont en panne !!.

- Moule pour modèle réduit (poutre)

Le moule destiné à la confection du modèle réduit est construit par des plaques métalliques épaisses, de dimension $b \times h \times l$ est $15 \times 20 \times 120$ cm,

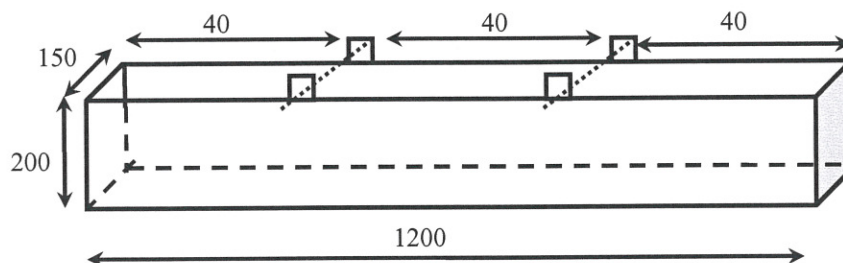


Figure II .4: Moule de flexion pour poutres $120 \times 20 \times 15$ cm confectionné, correspondant aux exigences de ACNOR et AFNOR. [24]

II.3.4.3 Malaxage du béton :

La bétonnière utilisée est de type B.ALCO Top 1200 capacité 30 litres ; on introduit d'abord les deux types de gravier puis le sable les malaxer ensuite le ciment un second tour de malaxage et en dernier l'eau de gâchage versée à plusieurs reprises ; le malaxage dure 3 minutes.

II.3.4.4 Mesure de l'affaissement

Pour chaque moitié de gâché, on mesure l'affaissement selon la norme CSA A23.2-5C et NF P18 -451, on humidifier le cône d'Abrams (surface intérieur) préalablement, le béton est introduit à l'intérieur du cône en trois couches de même hauteur 7 cm, et avec le bourroir on pique 25 fois chaque couche tout autour des coins vers le centre (le bourroir est vertical), il faut remplir la dernière couche avec excès, la pilonné puis la rasé. L'enlèvement du cône doit être vers le haut et a ne pas dépassé les 5 secondes.

Enfin l'affaissement A est la différence de hauteur entre le cône plein du béton et la hauteur de l'échantillon affaissé (le point le plus élevé) ; pour tous les essais l'affaissement est entre 5 et 9.

II.3.4.5 Coulage du béton

La mise en place du béton dans le moule se fait en deux couches égales. Pour les éprouvettes cylindriques et prismatiques on a utilisé la table vibrante comme moyen de vibration, les 2 couches sont vibrées jusqu'à l'arrêt d'apparition des bulles d'air à la surface de moulage.

Pour la poutre, on doit utiliser l'aiguille vibrante à air comprimé; la vibration a été effectuée par la méthode classique (les coups du bourroir du cône d'abrams) après le coulage de chaque couche de béton ;

Essai	Type de béton	Affaissement moyen	Type de Cure	Durée de Cure
A	350 kg/M ³	6,5	Eau Douce	180 j
B	420 kg/M ³	5	Eau de mer	180 j
1C	350 kg/M ³	7	Eau Douce	180 j
2C	420 kg/M ³	6	Eau de mer	180 j
1D	350 kg/M ³	6	Eau Douce	90 j
2D	420 kg/M ³	6,5	Eau de mer	90 j
3D	350 kg/M ³	5	Eau Douce	90 j
4D	420 kg/M ³	7	Eau de mer	90 j
1E	350 kg/M ³	6,5	Eau Douce	28 j
2E	350 kg/M ³	5,5	Eau de mer	28 j
3E	420 kg/M ³	6	Eau Douce	28 j
4E	350 kg/M ³	6,5	Eau de mer	28 j

Tableau II.7: Récapitulatif des Valeurs d'Affaissements des différents types de bétons



Béton « A »



Béton « B »



Béton « 1C »



Béton « 2C »



Béton « 1D »

FIG II.5 l'Affaissement du cône d'Abrams des différents types de bétons

II.3.4.6 Démoulage et cure

Selon AFNOR 1990 la norme NF P18-405 (p393), normalement Les éprouvettes sont démoulées au bout de 24 h éventuellement 48 h

On commence par l'enlèvement des visses de fixation (plots), ensuite et avec un marqueur permanent, en indiquant le numéro d'essai de 1 à 3 pour les essais de 6 mois, 3 mois et 28 jours successivement.

(A-1D-1E) béton dosé à 350kg/m^3 ;	} Pour la cure dans un bain d'eau de robinet.
(1C-3D-3E) béton dosé à 420kg/m^3	
(B-2D-2E) béton dosé à 305kg/m^3	} Pour la cure dans un bain d'eau de mer.
(2C-4D-4E) béton dosé à 420kg/m^3	

Les éprouvettes cylindriques (11x22) et prismatiques (7x7x28) ainsi que la poutre (0,15x0,20x1,20) ont été plongées dans les bacs de dégradation après 07 jours de leur démoulage pour éviter la rupture de la poutre lors de son transport et sa plongée.

On note qu'afin d'assurer une dégradation significative des éprouvettes et d'augmenter l'agressivité des bains, nous avons décidé d'utiliser pour chaque bac un thermoplongeur de température de 40° C (malheureusement celui-ci est tombé en panne au bout de trois mois) ; le renouvelable des deux solutions de lixiviation « l'eau de robinet et l'eau de mer » n'ont pas été renouvelées par manque de moyens.



FIG II.6 : éprouvettes cylindriques 11x22 & éprouvettes prismatiques 7x7x28

CHAPITRE III:

ANALYSE DES RESULTATS

VARIATION DIMENSIONNELLE ET COMPORTEMENT MECANIQUE DES EPROUVETTES DE BETON

III.1/ VARIATION DIMENSIONNELLE ET COMPORTEMENT MECANIQUE DES EPROUVETTES DE BETON:

III.1.1. Mesures et essais

Le nombre d'éprouvettes par dosage, par essai et par échéance est de 3. Les éprouvettes sont retirées des différents bains de conservation à différentes échéances (28, 56, 90 et 180) jours pour subir les essais indiqués en introduction.

Pour la mesure du retrait ou gonflement des éprouvettes en béton, on doit les faire sortir des bacs une journée avant la mesure, ensuite dépoussiérer les plots à l'aide d'un torchon humide afin d'éliminer les particules fines qui risquent d'influencer sur les résultats, la mesure doit être à la même heure de la journée programmé pour le mesurage.



Fig. III.1 Appareil de mesure de la déformation dimensionnelle

La variation dimensionnelle « ε » est définie selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 10^3, [\mu\text{m}]$$

ε : Déformation relative en $\mu\text{m}/\text{m}$

Δl : Déformation absolue en μm

l : Longueur réelle de l'éprouvette en mm

III.1.2. Influence du milieu de cure sur les dimensions des éprouvettes :

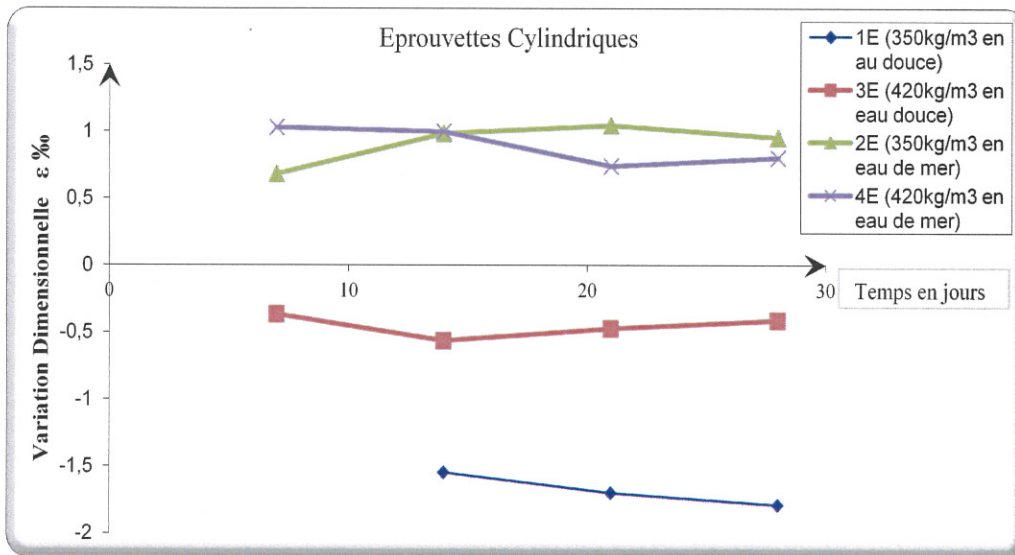


Fig. III. 2 : Variation Dimensionnelle de Deux Types de Béton à Différents Taux de Dégradation en Eau de Robinet & Eau de Mer à 40°C.

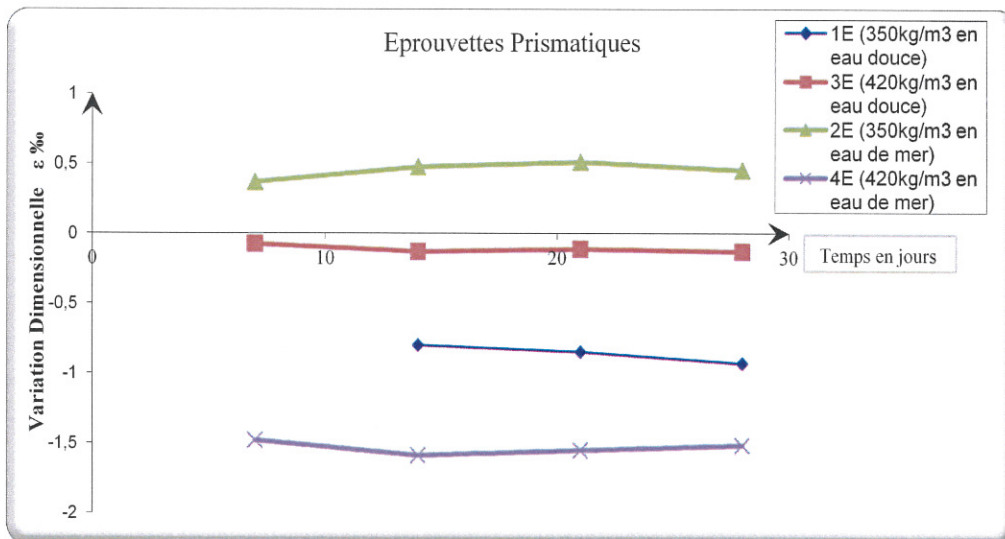


Fig. III. 3 Variation Dimensionnelle de Deux Types de Béton à Différents Taux de Dégradation en Cure de 01 mois en Eau de Robinet & Eau de Mer à 40°C.

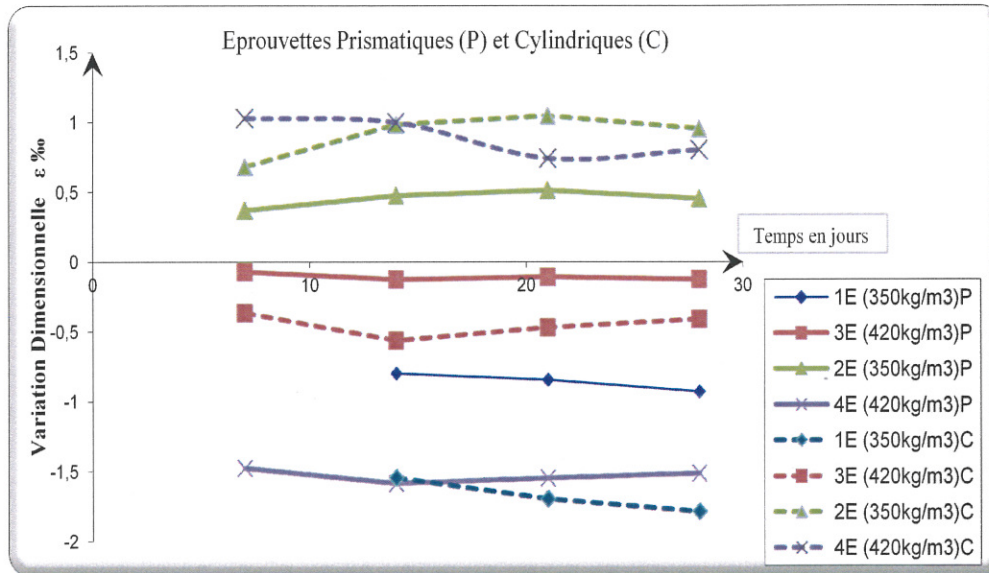


Fig. III. 4 Comparaison Entre les Résultats de Variation Dimensionnelle après un (01) mois de Dégradation en Eau de Robinet & Eau de Mer à 40°C.

Comparablement les schémas de variation dimensionnelle des éprouvettes cylindriques et prismatiques sont vraisemblablement très rapprochés en terme d'allure.

On remarque qu'au bout d'un mois de cure dans des bains d'eau de robinet et d'eau de mer, l'allure de la variation dimensionnelle des différentes éprouvettes est modérée car l'altération ne peut être sentie qu'après six mois ou un an de dégradation (pour rappel, les bains n'ont pas été renouvelés pendant cette période, ce qui peut être assimilé dans la pratique à une eau stagnante) [02].

- En ce qui concerne les éprouvettes 1E (dosage 350kg/m³) plongées dans l'eau de robinet, elles présentent un léger retrait ;
- Ainsi les éprouvettes 3E (dosage 420kg/m³) plongées dans l'eau de robinet, leur retrait est relativement insignifiant puisque l'hydratation des éléments anhydres n'a pas atteint son optimum ;
- Les 2E (dosage 350kg/m³) et 4E (dosage 420kg/m³) subissant une cure en eau de mer présentent respectivement un léger gonflement pour les premières et un petit retrait des deuxièmes éprouvettes ;

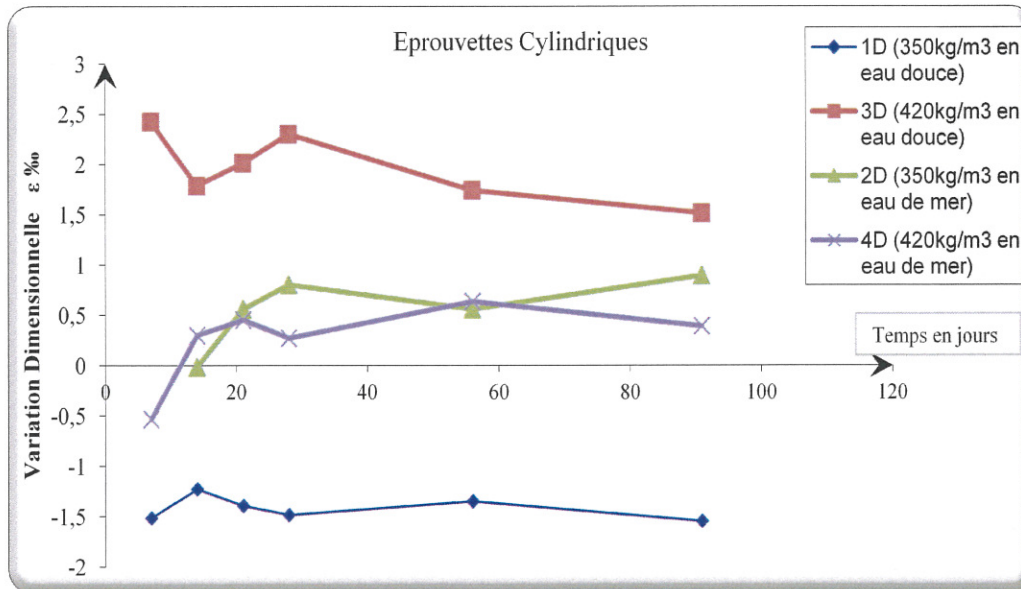


Fig. III. 5 Variation Dimensionnelle de Deux Types de Béton à Différents Taux de Dégradation en cure de 03 mois en Eau de Robinet & Eau de Mer à 40°C

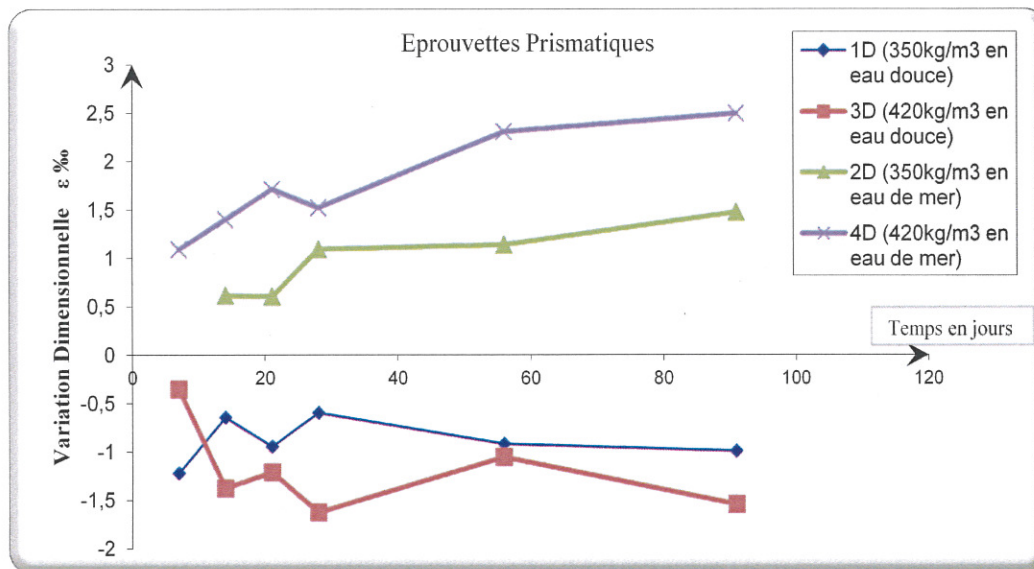


Fig. III.6 Variation Dimensionnelle de Deux Types de Béton à Différents Taux de Dégradation en cure de 03 mois en Eau de Robinet & Eau de Mer à 40°C

La cinétique de dégradation au bout de trois mois de cure parait plus représentative sur le graphe de variaion dimensionnelle des éprouvettes en ayant une allure ascendante ou descendante :

- ❖ Le retrait est présent pour les deux types de bétons de 350kg/m³ (**2D**) et celui de 420kg/m³ (**4D**) en ce qui concerne les éprouvettes en bains d'eau de robinet à une température de 40°C ;
- ❖ Par contre celles en bain d'eau de mer ont subi un gonflement assez important ; on note qu'on a remarqué une précipitation de matière au fond des deux bacs dès la première semaine de la mise en dégradation des différentes éprouvettes et poutres, liée à la dissolution de la portlandite et des monosulfoaluminates ainsi que la précipitation de l'ettringite [15].

L'agressivité des milieux est réduite à cause de l'augmentation du PH des solutions aqueuses ; Après un mois de cure le PH des deux solutions est respectivement égale à 9,24 de l'eau de robinet et 8,97 de l'eau de mer, alors qu'avant de plonger les éprouvettes dans leurs bains les PH des deux solutions était au début de 7,90 de l'eau de robinet et de 7,50 de l'eau de mer (PH-mètre non Etalonné); cette augmentation est régie par le résultat d'un ensemble de réactions d'équilibre chimique et de concentration entre la matière cimentaire et le milieu extérieur.

La solution des deux bains n'a été renouvelée qu'une seule fois au bout de trois mois, malheureusement le maintien d'une température de 40°C n'était pas possible ;alors une deuxième phase prend naissance (chute de la température de 40°C à une température ambiante)

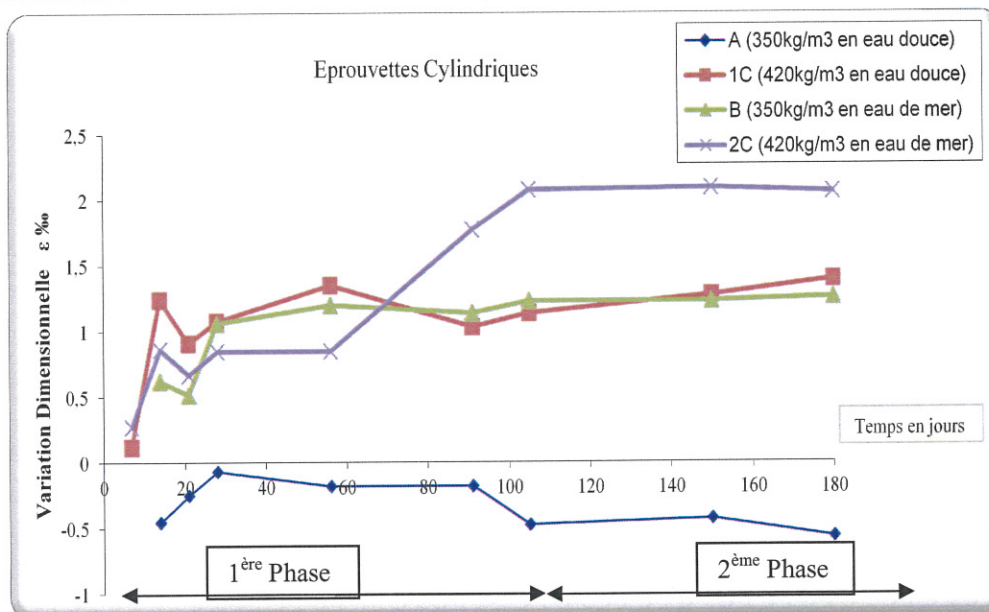


Fig. III .7 Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en cure de 06 mois en eau de robinet & eau de mer à température ambiante

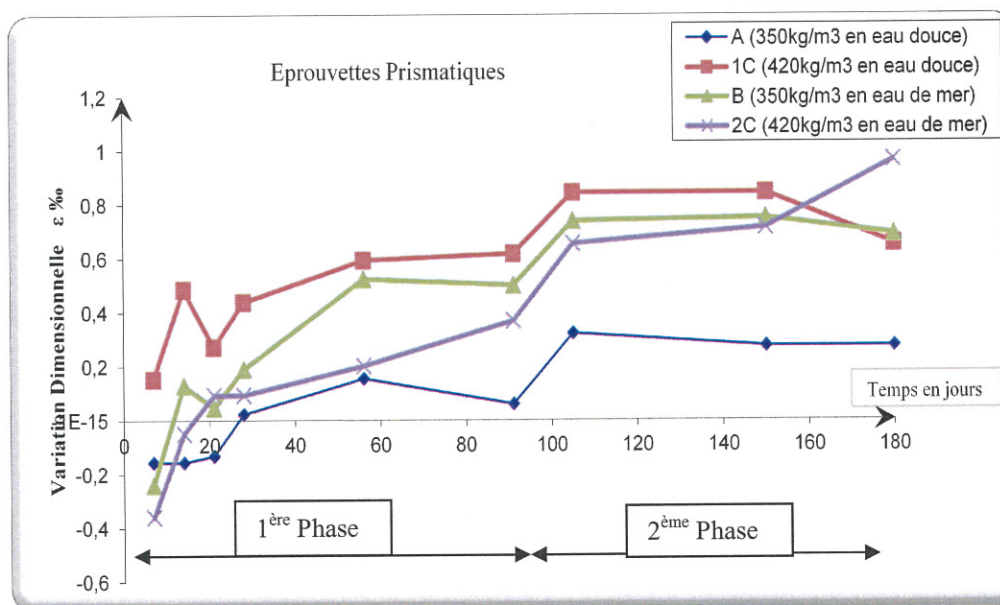


Fig. III. 8 : Variation Dimensionnelle de deux types de béton à différents taux de dégradation en cure de 06 mois en eau de robinet & eau de mer à température ambiante

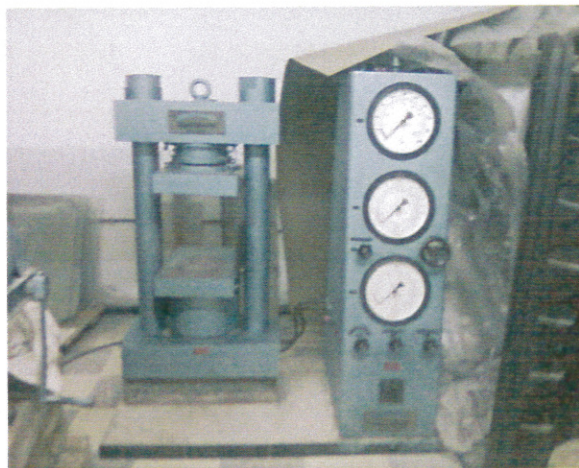
Les différents types d'éprouvettes cylindriques ou prismatiques des deux types de bétons présentent des courbes d'allure ascendante assez importante en première phase de dégradation ; les différentes réactions chimiques ainsi que la variation dimensionnelle prennent naissance dès que les éprouvettes sont plongées dans les bains de cure ; en deuxième

phase, on remarque que la courbe s'adoucit et devient visiblement régulière malgré le renouvellement des deux solutions, on peut donc affirmer que la décalcification de la matière cimentaire générée par la dissolution de la portlandite d'autant plus la cristallisation de l'ettringite d'où la formation d'un nouveau produit expansif « l'ettringite secondaire » qui à son tour tend vers fermer les pores et bloquer ainsi la diffusion des éléments agressifs.

La lixiviation est donc ralentie ou freinée par la formation des produits expansifs tels que l'ettringite et le gypse secondaires.[12]

Les résultats montrent que le béton dosé à 420kg/m³ présente plus de compacité, plus de continuité de matière, moins de porosités selon la variation dimensionnelle définie par un retrait comparé à celui du béton dosé à 350kg/m³.

III. 2 Comportement mécanique à la Compression après lixiviation :



FigIII .9: La Presse Utilisée pour l'Essai de Compression sur les Eprouvettes Cylindriques



Fig III.10 : Essai de Compression sur une Eprouvette Cylindrique.

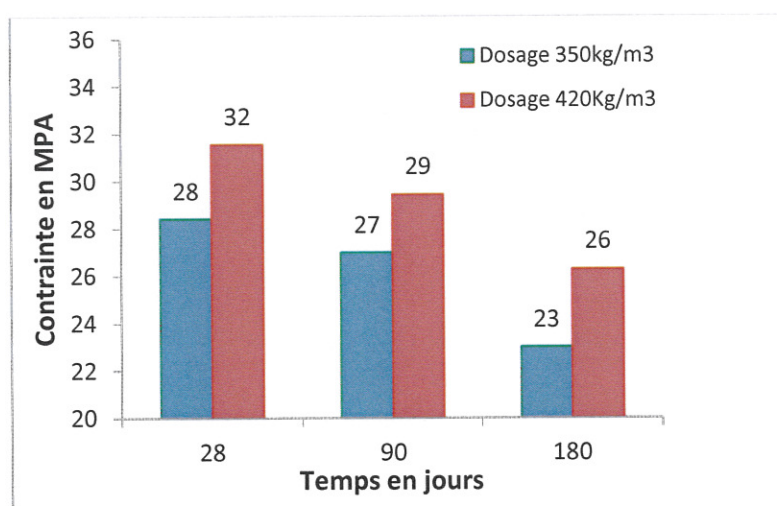


Fig. III .11 Contrainte de Compression de Deux Types de Béton à Différents Taux de Dégradation en Eau de Robinet

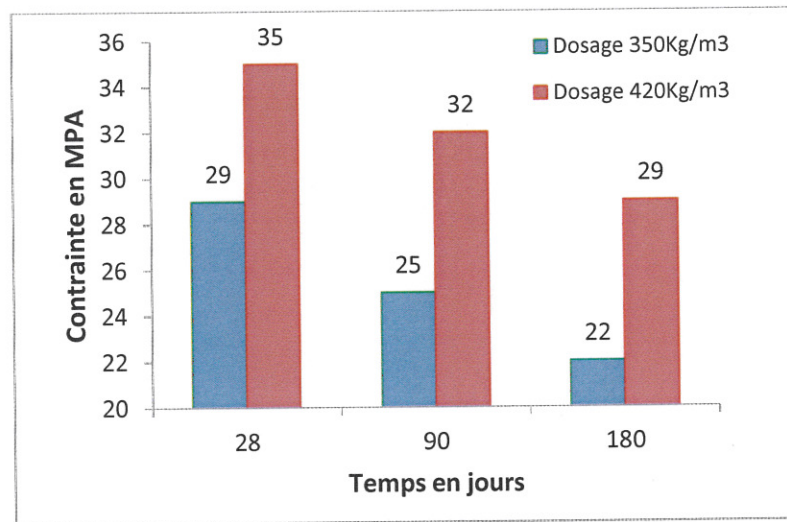


Fig. III. 12 : Contrainte de Compression de Deux Types de Béton à Différents Taux de Dégradation en Eau de Mer

Une diminution de résistance est sensiblement visuelle d'après les figures III.11 et III.12 ce qui met en évidence les résultats d'études des différents auteurs cités dans la bibliographie ; au bout de 6 mois de dégradation dans les deux bains d'eau de robinet et/ou l'eau de mer, le béton dosé à 420kg/m³ présente une durabilité meilleure dans le temps par rapport à celui dosé à 350kg/m³.

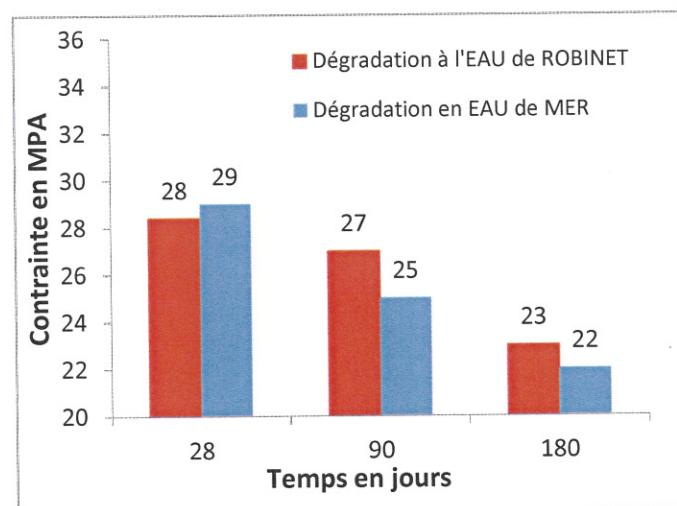


Fig.III.13 : Comparaison des Contraintes de Compression d'un Béton Dosé à 350Kg/m³ à Différents Types de Dégradation

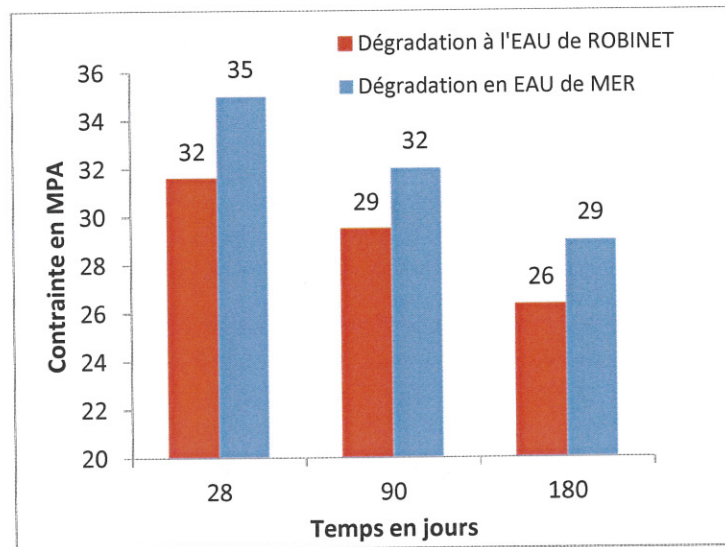


Fig.III.14 Comparaison des Contraintes de Compression d'un Béton Dosé à 420Kg/m³ à Différents Types de Dégradation

III.3 Comportement mécanique à la traction par flexion après lixiviation :

Cet essai est réalisé au moyen de poutre de dimensions (bxhxL) chargé aux tiers, conformément aux normes ASTM-C78 et ACNOR CSA A23.2-8C ; la machine utilisée est manuelle modèle STRASSENTEST Banstoff-Prufsysteme.

Eventuellement la détermination des contraintes critiques sera donc en fonction de b, h et L .Les normes ASTM et ACNOR exigent des formules selon la position de la ligne de rupture dans ou hors le tiers médian [24] :

$$\sigma_{rup} = \frac{P * L_p}{b * h^2} \quad [\text{Ligne de rupture est au tiers median } L_p : \text{longueur de la portée}]$$

$$\sigma_{rup} = \frac{3 * \alpha * P}{b * h^2} \quad [\text{Rpture en dehors du tiers median et } \alpha < 5\% L_p \text{ avec}$$

α : Dis tan ce entre la ligne de rupture et l'appui le plus proche].

$$\sigma_{rup} = 0 \quad [\text{Résultat faux si } \alpha > 5\% L_p]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P \text{ en } N \\ a, b, L_p \text{ et } \alpha \text{ en } mm \end{array} \right.$$

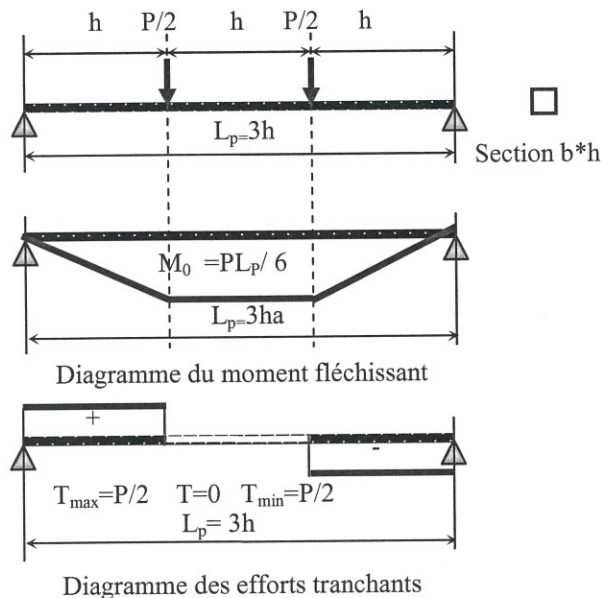


Figure III.15: Essai de Flexion par 4 Points pour Poutre b x h x L

Afin d’assurer une bonne application de l’effort de flexion, la position des points d’appui doit être précise, avant l’application des essais. Il faut donc adapter des rainures sur la surface de moulage pour fixer les cylindres métalliques (appui). Car tout déplacement des points d’appui influe sur la position des lignes de rupture.

Dans le cas de nos essais les lignes de rupture sont toutes aux tiers médians, alors on peut appliquer aisément selon la première formule déjà citée de l’ASTM C78 et ACNOR CSA A23.2- 8C ;

Sachant qu’on a pris comme longueur médiane a=33cm au lieu de a=h=20cm (démarche suivie dans quelques thèses par contre on a respecté les mêmes distances entre les appuis). avec limites du tiers médian de :

$$\left[0, \frac{\text{tiers médian}}{2}\right] = [0, 16.5]$$

Référence de la poutre.	1A	1B	1C	2C	1D	2D	3D	4D	1E	2E	3E	4E
Distance (cm) entre lignes de ruptures et l’axe de mi-portée.	9.5	7	0	1	2	0	3	4.8	0	14	12	10

Tableau II.8 : Tableau récapitulatif de la distance entre l’axe de la poutre et la ligne de rupture après l’essai de flexion par la méthode au tiers.

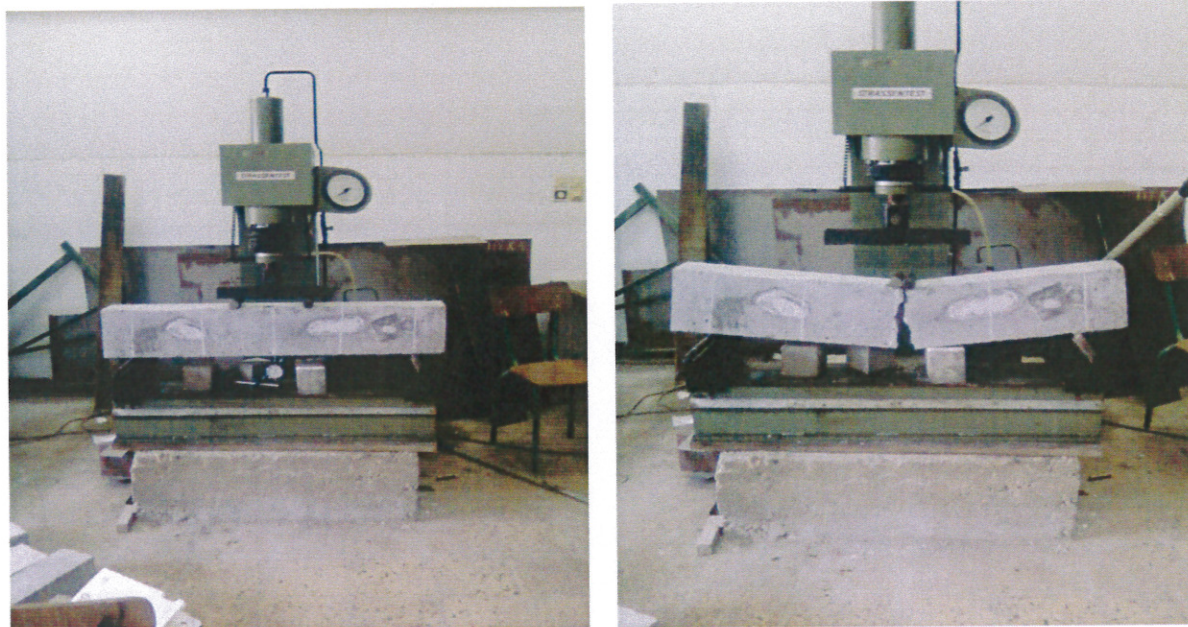


Fig III.16 : Essai de Traction par Flexion sur une poutre (15x20x120)

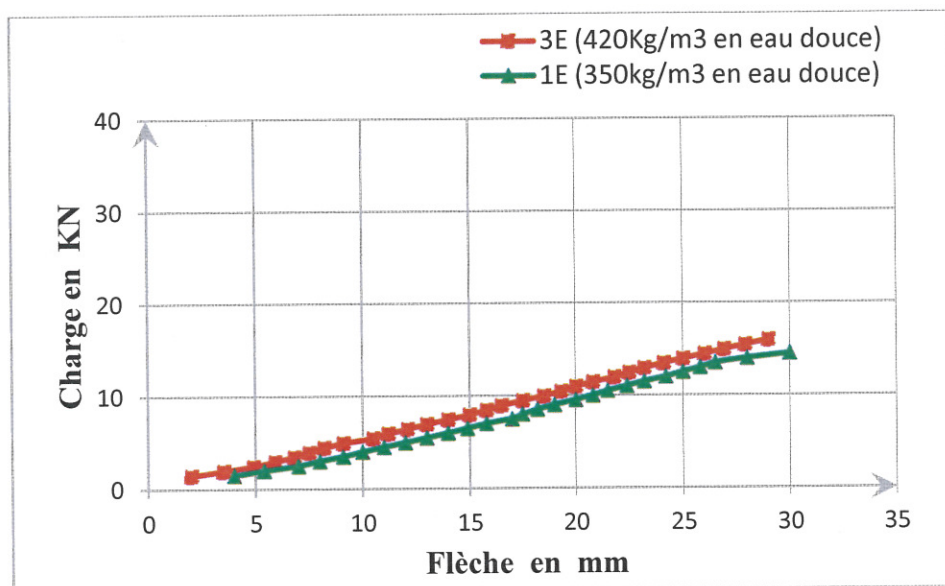


Fig. III.17: La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 01 mois de Dégradation en Eau de Robinet

Type de Béton	Charge de rupture (KN)	Flèche (mm)
« 1E » dosé à 350kg/m3	14.50	30
« 3E » dosé à 420kg/m3	16	29

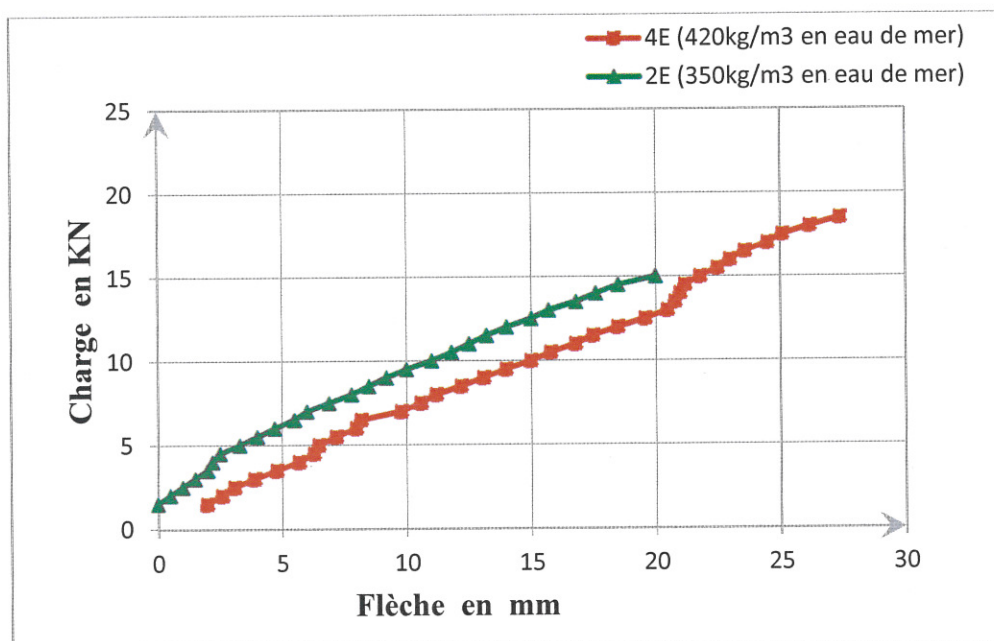


Fig. III .18 : La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de béton à 01 mois de dégradation en eau de Mer

Type de Béton	Charge de rupture (KN)	Flèche (mm)
« 2E » dosé à 350kg/m3	15	20
« 4E » dosé à 420kg/m3	18.50	27.5

d'après l'allure des deux graphes on remarque que la dégradation en eau de robinet au bout d'un mois n'est pas significative car le béton est en cours d'accomplissement de son cycle d'hydratation , par contre ceux plongés dans l'eau de mer montre une légère différence entre les deux types de bétons ; la Flèche de celui dosé à 420kg/m3 égale à **27.5 mm** , est plus importante que celle du béton dosé à 350kg/m3 de **7.5 mm** ;

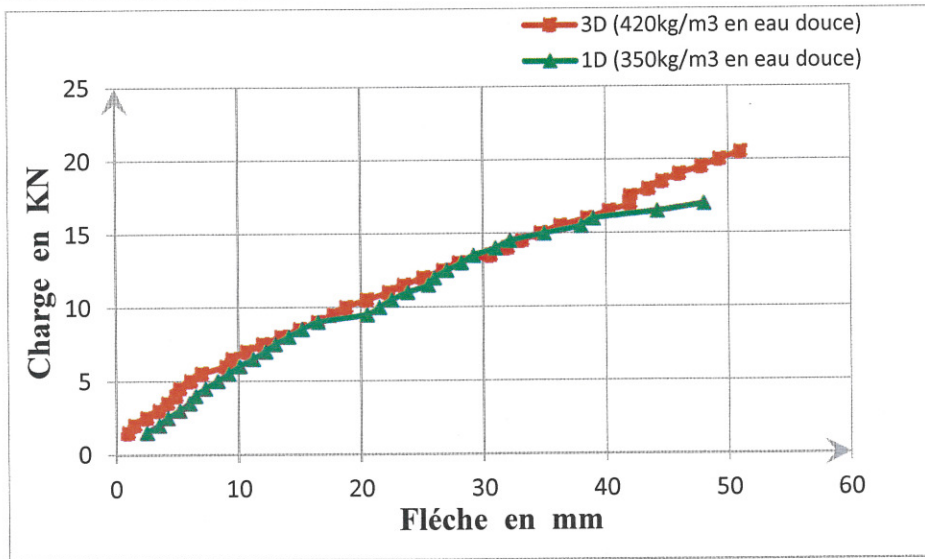


Fig. III.19 : La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 03 mois de Dégradation en Eau de Robinet

Type de Béton	Charge de rupture (KN)	Flèche (mm)
« 1D » dosé à 350kg/m3	17	48
« 3D » dosé à 420kg/m3	20.5	51

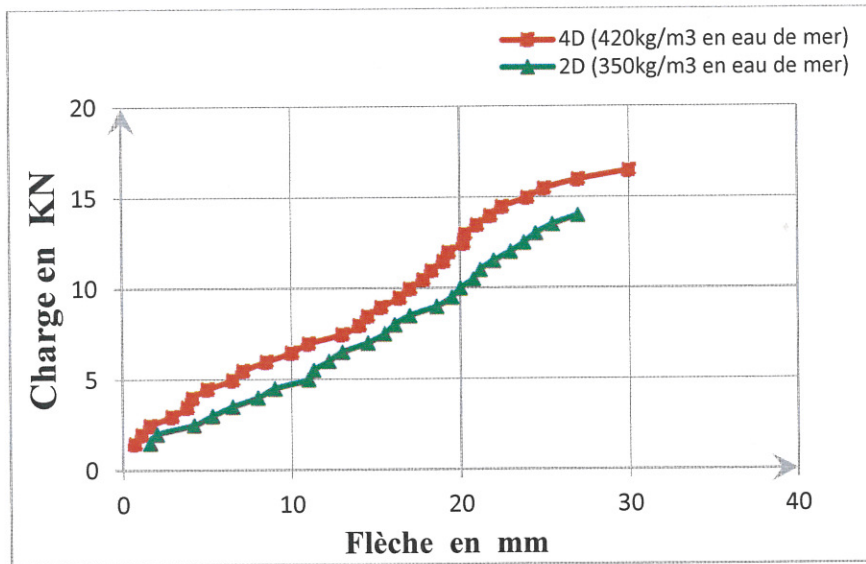


Fig. III.20 : La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 03 mois de Dégradation en Eau de Mer

Type de Béton	Charge de rupture (KN)	Flèche (mm)
« 2D » dosé à 350kg/m3	14	27
« 4D » dosé à 420kg/m3	16.5	30

La faible agressivité et la modification du PH de la solution par la dissolution des phases solides conduisent à une dégradation très lente (rappelant que les bains n'ont été renouvelés qu'une seule fois au bout de 3 mois) ;

les résultats après 3 mois de dégradation par lixiviation en eau de robinet (douce) ou en eau de mer montrent qu'il y a quand même une différence dans le comportement des deux types de béton :

- ✓ la Flèche du béton dosé à 420 kg/m³ (3D) est plus importante que celle du béton (1D) dosé à 350 kg/m³ de **3mm** pour la lixiviation **en eau de robinet** ;
- ✓ la Flèche du béton dosé à 420 kg/m³ (4D) est plus importante que celui (2D) dosé à 350 kg/m³ de **3mm** pour la lixiviation **en eau de mer** ;
- ✓ la Charge de rupture du béton dosé à 420 kg/m³ est supérieure à celle du béton dosé à 350 kg/m³ de 3.5 KN pour les deux types ;
- ✓ On remarque que la Flèche maximale des poutres plongées dans le bain d'eau de robinet (douce) est sensiblement plus importante que celles plongées dans le bain d'eau de mer pour les deux types de bétons ;

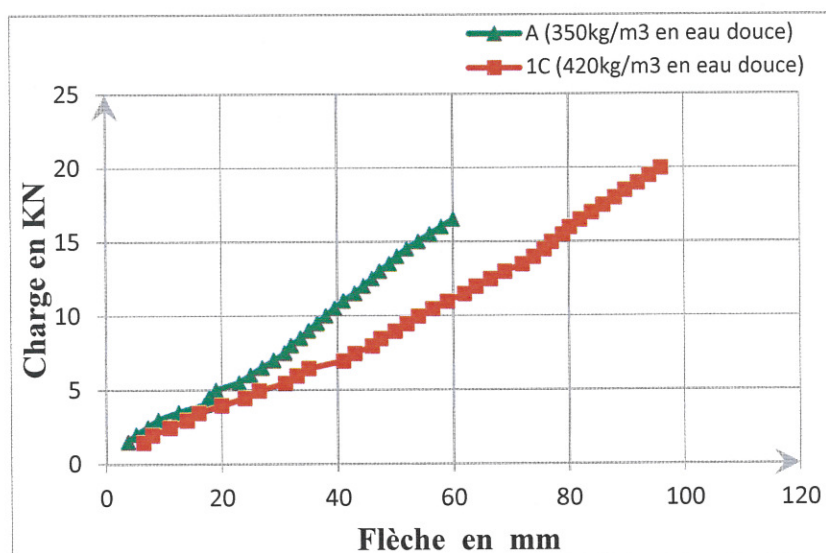


Fig. III.21 : La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de Béton à 06 mois de Dégradation en Eau de Robinet

Type de Béton	Charge de rupture (KN)	Flèche (mm)
« A » dosé à 350kg/m ³	16.5	60
«1C » dosé à 420kg/m ³	20	96

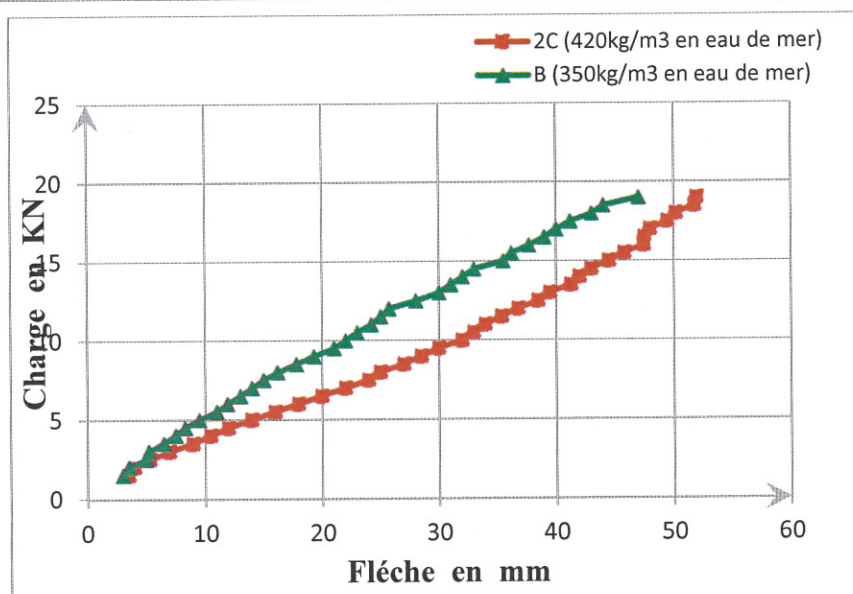


Fig. III.22 : La Flèche de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge de deux types de béton à 06 mois de dégradation en eau de Mer

Type de Béton	Charge de rupture (KN)	Flèche (mm)
« B » dosé à 350kg/m3	18	47
«2C » dosé à 420kg/m3	19.5	52

Au bout de 6 mois de dégradation en eau de robinet (douce) ou en eau de mer les résultats sont relativement plus significatifs, on peut donc en établir une étude comparative :

- ✓ la Flèche du béton dosé à 420 kg/m3 (A) est plus importante que celle du béton (1C) dosé à 350 kg/m3 de **36 mm** pour la lixiviation **en eau de robinet** ;
- ✓ la Flèche du béton dosé à 420 kg/m3 (B) est plus importante que celle du béton (2C) dosé à 350 kg/m3 de **5 mm** pour la lixiviation **en eau de mer** ;
- ✓ On remarque aussi que la Flèche maximale des poutres plongées dans le bain d'eau de robinet (douce) est sensiblement plus importante que celles plongées dans le bain d'eau de mer pour les deux types de bétons ;

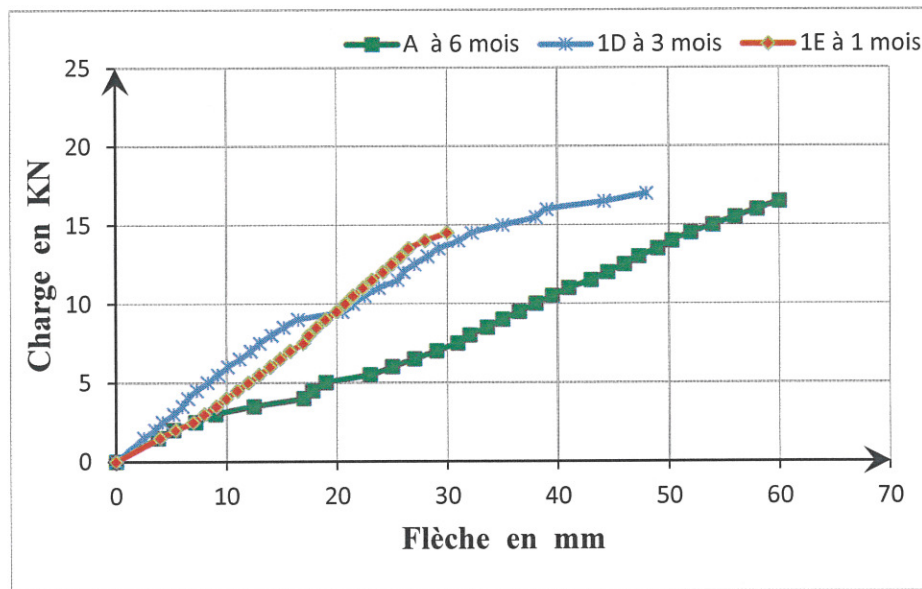


Fig. III.23 : Comparaison des Flèches de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge à Différents Ages du Béton dosé à 350Kg/m3 en Eau de Robinet

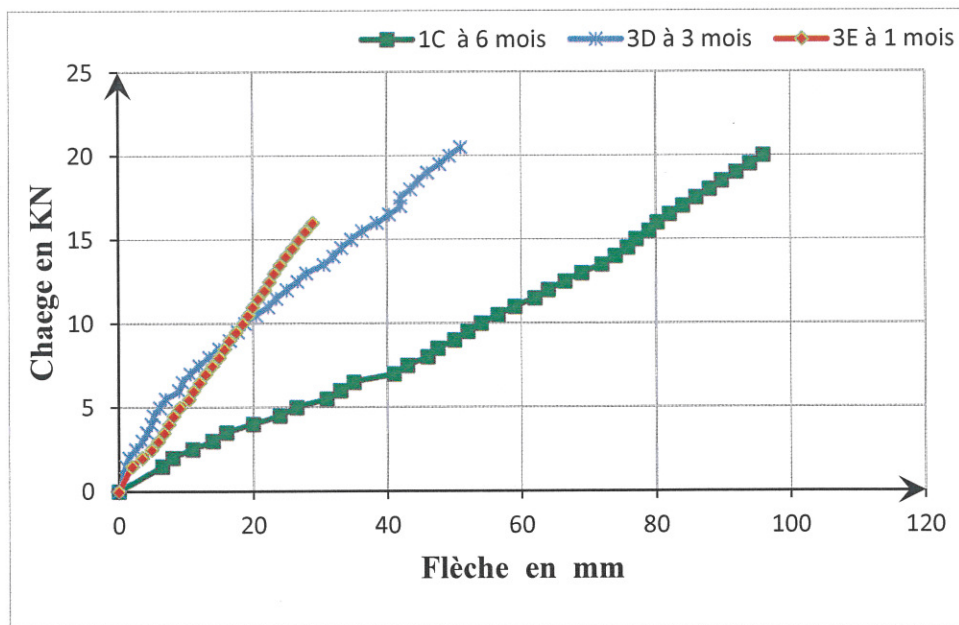


Fig. III.24 Comparaison des Flèches de la Poutre à mi-portée en Fonction de la Charge à Différents Ages du Béton dosé à 420Kg/m3 en eau de Robinet

On remarque que d'après l'allure des courbes « Charge – Flèche », que la pente diminue dans le temps ce qui implique que le module de Young (E_i) a tendance aussi à chuter en cours de la lixiviation ;

Les valeurs des pentes à un (01) mois et de trois (03) mois de dégradation sont proche ce qui montre qu'au bout de trois mois la lixiviation n'est pas vraiment significative comme cela a été prouvé d'après les différents textes de la bibliographie.

III.4 CONCLUSION GENERALE :

On remarque que le comportement des bétons, dans les deux types de bains (eau douce et eau de mer), est relativement similaire ainsi que les valeurs des flèches et charges de rupture se rapprochent, ce qui confirme que l'eau douce présente aussi bien un milieu agressif contre les bétons au delà de son rôle essentiel pendant le cycle d'hydratation ;

Les résultats montrent que le béton dosé à 420kg/m³ présente encore une fois plus de compacité, plus de continuité de matière, moins de porosités selon les valeurs reportées sur les graphes de compression et/ou de traction par flexion comparé à celui du béton dosé à 350kg/m³ contre ces types de dégradation.

➤ Le paramètre principal garantissant la durabilité du béton est sa compacité,

❖ **Un béton durable est un béton peu poreux.**

Les moyens d'y parvenir :

- Courbe granulométrique adaptée favorisant la compacité,
- Densification du béton par serrage (vibration),
- Teneur en eau minimale,
- Assurer la protection du béton pendant la prise et le durcissement (**cure du béton**).

❖ **La porosité du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton**

- Presque toutes les caractéristiques mécaniques
- Toutes les perméabilités (eau, ions , gaz)
- **Durabilité**

❖ Plus la **porosité** diminue, plus la **compacité augmente** et plus les **propriétés mécaniques** augmentent.

Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO₂, Cl⁻, etc).[25]

Remarques :

- Pour tous les milieux agressifs, le pH et la composition de solution n'ont pas été suivis régulièrement, par manque de moyen et faute de matériels étalonnés.
- Dans le milieu d'eau de mer, les éprouvettes de béton sont rapidement recouvertes, après immersion, d'une couche blanche due à la précipitation des hydrates qui ralentissent la progression de l'attaque.[26]
- Dans le bain d'eau de mer la première remarque qu'on peut faire sur les éprouvettes c'est le gonflement qu'on a pu constater après séchage des éprouvettes, c'est l'apparition des microfissures.

PERSPECTIVE ET COMPLEMENT 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 plusieurs types de bétons 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 réactionnelle, 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 bétons.
7. Les essais par colorimétrie, pour déterminer la profondeur de dégradation des différents types de bétons.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- **KAMALI S., BERNARD F. ET PRINCE W.**, Modélisation tridimensionnelle et Multi-échelles du comportement des matériaux cimentaires-Application à la lixiviation. 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux
- 2- **BEHIM M.**, Sous produits industriels et Développement Durable : Réactivité, Rçole et durabilité des Laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire. Doctorat université Badji Mokhtar Annaba-Algérie 2005.
- 3- **VIET-HUNG NGUYEN**, « Couplage Dégradation Chimique – Comportement en compression du Béton » Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- 4- **NORMES FRANCAISES NF P 18 – 011**, « Bétons – Classification des environnements agressifs », juin 1982.
- 5- **CODINA M.**, Les bétons bas PH Formulation, Caractérisation et étude à long terme ; Doctorat INSA Toulouse 2007.
- 6- **DUVAL R. et HORNAIN H.**, « La durabilité des bétons vis à vis des eaux agressives », in la durabilité des bétons. Presses de l'ENPC, 1992
- 7- **DUVAL . R** , « La durabilité des armatures et du béton d'enrobage », in : La durabilité des bétons, presse de l'ENPC, 1992, p 453
- 8- **LAFUMA. H**, « Liants hydrauliques, propriétés, choix et conditions d'emploi », Dunot, 3^{ème} Ed, Paris 1964, p 117.
- 9- **CANDLOT. E**, « Ciments et chaux hydrauliques, fabrication, propriétés et emploi », 3^{ème} Ed, Librairie Polytechnique Ch Berranger Ed, Paris, 1906, p 408.
- 10- **MEHTA P.K.**, (1986) « Concrete: structure, properties and materials ». Prentice-Hall, p. 105-169, Ed. 1986
- 11- **LOVERA P.**, Le Bescop P., Gallé C., Adenot F., Bouniol P., Richet C., (1999) « Synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des colis bétons », Rapport Technique CEA Saclay, DESD/SESD/LBSE N°99-201.
- 12- **PLANEL D.**, Les effets couplés de la Précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimiques des bétons. Doctorat Juin 2002, Université de marne la vallée.
- 13- **ALEXANDRE L. ET SEBILEAU J L.** , « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- 14- **REGOURD M.**, « Les laitiers de haut fourneau », rapport principal du 8^{ème} Congrès International de la Chimie du Ciment, Rio, volume 1, thème 3, 1986, p 200 – 229.

- 15- **GUILLOE E. ET MORANVILLE M.**, Physical and Chemical modeling of Portland cement pastes under deawater attack ENS de cauchan 2004.
- 16- **NEVILLE A.M.**, « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000, p 806.
- 17- **DOUGLAS E.**, « Mortier de ciment au laitier et béton de laitier, caractéristiques de durabilité », Matériaux complémentaires en cimentation, CANMET, V.M. Malhore Ed, 1989, p 330
- 18- **LUDWING U.**, « Zement - kalk – gips in the chemistry of cement and concrete", 3^{ème} édition, Edouard arnold publishers, London, 1970
- 19- **LE BELLEGO C.**, Couplage chimie-mécanique dans les structures en béton attaquées par l'eau: étude expérimentale et analyse numérique; Thèse: ENS Cachan 2001.
- 20- **CARDE.C.**, « Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques de la lixiviation des matériaux cimentaires », Doctorat – INSA de Toulouse, 1996
- 21- **TORRENTIET AL**1999, Didry O., Ollivier J. P. et Plas F. La dégradation des bétons – couplage fissuration-dégradation chimique. Hermès, 1999.
- 22- **VERNET C.**, « stabilité chimique des hydrates – Mécanisme de défense du béton face aux agressions chimiques » in « La durabilité des bétons », Presses de l'ENPC, 1992.
- 23- **DREUX G et FESTA J.** : nouveau guide du béton et ses constituants *Edition Eyrolles, 8^{ème} édition, 409 p., (1998).*
- 24- **BOUABDALLAH F.**: Incidence de l'alcali réaction sur le comportement mécanique des bétons [cas de la compression], thèse de magister université baji mokhtar de annaba 2009
- 25- **GCI 714** - Durabilité et réparations du béton, Université de Sherbrooke.
- 26- **BOUALLEG S.**, « Effet des milieux Agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires », thèse de magister université de mohamed boudiaf M'sila 2004.

ANNEXES:

Annexe 1: La fiche technique du ciment CEM II 42,5, élaborée par le laboratoire de l'usine "Hadjar Essoud".

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE		CARACTERISTIQUE MECANIQUE	
CODE	% EN MASSE	CODE		CODE	EN MPA
NA 235	PAF 975°C 1 - 5	NA230	CONSISTANCE NORMALE 25 - 27,5	NA 234	RESISTANCES A LA COMPRESSION
NF P15 467 FLUOX	CaO 56 - 63	NA230	DEBUT DE PRISE 100 - 170'	2j	32,5
NF P15 467 FLUOX	SiO2 19-27	NA230	FIN DE PRISE 180 - 270	7j	42,5
NF P15 467 FLUOX	Al2O3 4 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD 0,3 - 5	28j	42,5
NF P15 467 FLUOX	Fe2O3 2,5-3,5	NA231	AIR MASSIQUE 3200 - 3700	NA 234	RESISTANCES A LA FLEXION
NF P15 467 FLUOX	MgO 1 - 2	NA231	MASSE VOLUMIQUE 3,05 - 3,12 g/cm ³	2j	3,4
NF P15 467 FLUOX	K2O 0,3-0,6	INSTR	REFUS AU TAMIS 45µ 18 - 28	7j	4,7
NF P15 467 FLUOX	Na2O 0,1-0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER µm/m ≤ 800	28j	4,2 - 8
NF P15 467 FLUOX	SO3 2 - 3	COMPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS Hors gypse	
GLYCOL	CaOL 0,5 - 2,5	C3S	50 - 65	CLINKER	75
NF P15 467 FLUOX	CL ⁻ 0 - 0,02	C2S	10 - 25	GYPSE	5
		C3A	9 - 12	LAITIER/TUF	20
		C4AF	7 - 11		

PRECAUTION D'EMPLOI

Ce type de ciment ne convient pas pour :

- Ouvrages en milieux agressifs (terrains gypseux, sulfates, eaux industrielles)
- Travaux à la mer
- Bétonnage au dessous de 5° C

* LE PRODUIT DECRIT SUR CETTE FICHE CONFORME A LA NORME NA 442 VERSION 2000

* LES CARACTERISTIQUES DU PRODUIT CI-DESSUS INDIQUEES SONT MEASUREES AU LABORATOIR DE LA SCHS

Annexe 2: L'analyse granulométrique des granulats**Sable Roulé**

Tamis	Masse du Refus	Masse cumulée	% Refus	Refus cumulé	Tamisât cumulé
5,00	6,10	6,10	0,61	0,61	99,39
3,15	14,60	20,70	1,47	2,08	97,92
2,5	11,40	32,10	1,14	3,22	96,78
2,00	11,20	43,30	1,12	4,35	95,65
1,60	20,80	64,10	2,09	6,44	93,56
1,25	37,10	101,20	3,72	10,16	89,84
0,630	217,10	318,30	21,80	31,95	68,05
0,500	165,20	483,50	16,58	48,54	51,46
0,315	223,10	706,60	22,40	70,94	29,06
0,200	162,00	868,60	16,26	87,20	12,80
0,16	44,70	913,30	4,49	91,69	8,31
0,100	43,30	956,60	4,35	96,03	3,97
Fines	39,50	996,10	3,97	100,00	0,00

Gravier. Concassé (5/12,5)

M=2000g

Tamis	Masse du Refus	Masse cumulée	Refus cumulé	Tamisât cumulé
12,5	0,04	0,04	2,00	98,00
10	1,100	1,14	57,00	43,00
8,00	0,440	1,58	79,00	21,00
6,30	0,230	1,81	90,50	9,50
5,00	0,130	1,94	97,00	3,00
3,15	0,020	1,96	98,00	2,00
Fond	0,040	2,00	100,00	0,00

Gravier. Concassé (12,5/20)

M=4000g

Tamis	Masse du Refus	Masse cumulée	Refus cumulé	Tamisât cumulé
25.00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	640,00	640,00	16,00	84,00
16	2200,00	2840,00	71,00	29,00
12,5	945,00	3785,00	94,63	5,38
10	175,00	3960,00	99,00	1,00
Fond	130,00	4090,00	102,25	

Annexe 3 : Méthode de Dreux Gorisse pour la formulation des bétons

Béton dosé à 350kg/m³

								$F_c = G \cdot F_{CE} (C/E - 0,5)$				
Consistance désirée	Dim des Granulats	Resistance Moyenne à (28 J) visée	Resistance souhaitée	Classe Vrai du ciment à 28 j (CPJ II 42,5)	Coefficient Granulaire	Rapport eau / ciment	Dosage en ciment	Calcul et correction du Dosage en Eau				
Affais au cone	D_{max}	F_{c28}	F_c	F_{CE}	G	C/E	C	$E = G \cdot F_{CE} \cdot C / (F_c + G \cdot F_{CE} \cdot 0,5)$	Correction au dosage en eau	Teneur en eau mesurée	Dosage en Eau Total	Nbre de Piquage
	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	Tab 10-8	$C/E = (F_c + G \cdot F_{CE} \cdot 0,5) / G \cdot F_{CE}$	Kg/m ³ Fig X-14	(L/M ³)	Fig X-16	Feuille Abs. d'eau	(L/M ³)	Fig X-15
7	20	25	28,75	35	0,5	2,14	350	163,33	0	0	163,33	25

Tracé de la courbe Granulaire de référence

Composition granulaire de référence					Pourcentage des Granulats d'après le graphe			coefficient de compacité	
$D \leq 20$	K	K_s (Tab 10-12)	K_G	$Y = 50 - (D)^{1/2} + K$	Pourcentage du sable	Pourcentage du Gravier 5/12,5	Pourcentage du Gravier 12,5/20	γ	Volume Tot
$X = D/2$ (mm)	Tab 10-12	$K_s = 6Mf-15$	$K_G = K + K_s$		(g1)	(g2)	(g3)	Tab 10-13	$1000 \cdot \gamma$
10	0	0	0	45,53	0,380	0,230	0,390	0,815	815

Tracé de la courbe Granulaire de référence									
Composition granulaire de référence					Pourcentage des Granulats d'après le graphe			coefficient de compacité	
$D \leq 20$	K	Ks (Tab 10-12)	K_G	$Y = 50 - (D)^{1/2} + K$	Pourcentage du sable	Pourcentage du Gravier 5/12,5	Pourcentage du Gravier 12,5/20	γ	Volume Tot
$X = D/2$ (mm)	Tab 10-12	$K_s = 6M_f - 15$	$K_G = K + K_s$		(g1)	(g2)	(g3)	Tab 10-13	$1000 \cdot \gamma$
10	0	0,00	0	45,53	0,380	0,230	0,390	0,815	815

Dosage des Granulats pour un dosage de 420kg/m ³											
Calcul du Volume absolu des composantes (ciment + Granulats)					La masse Volumique absolue des granulats			Calcul du des masses spécifiques de chaque Granulat			
Volume de Ciment	Volume absolu de l'ensemble des granulats	Volume absolu du sable (G1)	Volume absolu du G. 5/12,5 (G2)	Volume absolu du G. 12,5/20 (G3)	masse Volumique absolue du sable (G1)	masse Volumique absolue du G. 5/12,5 (G2)	masse Volumique absolue du G. 12,5/20 (G3)	masse spécifique du sable (M1)	masse spécifique du G. 5/12,5 (M2)	masse spécifique du G. 12,5/20 (M3)	Masse Total des granulats
$c = C/3,1$	$V = 1000 \cdot \rho - c$	$v_1 = g_1 \cdot V$	$v_2 = g_2 \cdot V$	$v_3 = g_3 \cdot V$	ρ (G1)	P (G2)	ρ (G3)	$M1 = \rho(G1)V_1$	$M2 = \rho(G2)V_2$	$M3 = \rho(G3)V_3$	$M = M1 + M2 + M3$
135,48	679,52	258,22	156,29	265,01	2,597	2,717	2,604	670,59	424,64	690,09	1785,31

Dosage des Granulats pour un dosage de 350 kg/m³

Calcul du Volume absolu des composantes (ciment + Granulats)					La masse Volumique absolue des granulats			Calcul du des masses spécifiques de chaque Granulat			
Volume de Ciment	Volume absolu de l'ensemble des granulats	Volume absolu du sable (G1)	Volume absolu du G. 5/12,5 (G2)	Volume absolu du G. 12,5/20 (G3)	masse Volumique absolue du sable (G1)	masse Volumique absolue du G. 5/12,5 (G2)	masse Volumique absolue du G. 12,5/20 (G3)	masse spécifique du sable (M1)	masse spécifique du G. 5/12,5 (M2)	masse spécifique du G. 12,5/20 (M3)	Masse Total des granulats
$c = C/3,1$	$V = 1000 \cdot \rho - c$	$v_1 = g_1 \cdot V$	$v_2 = g_2 \cdot V$	$v_3 = g_3 \cdot V$	$\rho (G1)$	$\rho (G2)$	$\rho (G3)$	$M1 = \rho(G1) \cdot V_1$	$M2 = \rho(G2) \cdot V_2$	$M3 = \rho(G3) \cdot V_3$	$M = M1 + M2 + M3$
112,90	702,10	266,80	161,48	273,82	2,597	2,717	2,604	692,87	438,75	713,02	1844,64

Béton dosé à 420kg/m³

$$F_c = G \cdot F_{CE} (C/E - 0,5)$$

consistance désirée	Dim des Granulats	Resistance Moyenne à (28 J) visée	Resistanc e souhaitée	Classe Vrai du ciment à 28 j (CPJ II 42,5)	Coeff Granulai re	Rapport eau / ciment	Dosage en ciment	Calcul et correction du Dosage en Eau				
								$E = G \cdot F_{CE} \cdot C / (F_c + G \cdot F_{CE} \cdot 0,5)$	Correction au dosage en eau	Teneur en eau mesuré	Dosage en Eau Total	Nbre de Piquage
Affaiss au cone	D_{max} (mm)	F_{c28} (MPa)	F_c (MPa)	F_{CE} (MPa)	G Tab 10-8	C/E $C/E = (F_c + G \cdot F_{CE} \cdot 0,5) / G \cdot F_{CE}$	C Kg/m ³ Fig X-14	(L/M ³)	Fig X-16	Feuille Abs. d'eau	(L/M ³)	Fig X-15
7	20	35	40,25	45	0,5	2,29	420	183,50	0	0	183,50	25