

République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Civil



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE CIVIL  
Spécialité : STRUCTURE  
Thème

***Recherche bibliographique et étude expérimentale sur la diffusion  
des ions chlorure dans le béton pouzzolanique sous l'effet de la  
température***

Présenté Par :

- 1) FATMI Narimane
- 2) TOLBA Asmaa

Devant les jurys composés de :

.....  
.....  
.....  
.....

Président  
Encadreur  
Examineur  
Examineur

1.1	Introduction :	7
1.2	Histoire du béton :	8
1.3	Définition du béton :	9
1.4	Constituants du béton	9
1.4.1	Ciment :	9
1.4.2	L'eau de gâchage:	12
1.4.3	Les granulats :	12
1.5	Propriétés de béton :	14
1.5.1	Propriétés physiques :	14
1.5.2	Propriétés mécaniques :	15
1.6	Utilisations du béton :	15
1.6.1	Le béton armé :	16
1.7	Les différents types de béton :	17
1.7.1	Le béton fibré :	17
1.7.2	Le béton léger :	17
1.7.3	Le béton Autoplaçants :	17
1.8	Principaux avantages et inconvénients du béton :	18
1.8.1	Les avantages :	18
1.8.2	Les inconvénients :	18
1.9	Les adjuvants :	19
1.9.1	Entraîneurs d'air :	19
1.9.2	Plastifiants :	19
1.9.3	Produits de cure :	20
1.9.4	Retardateurs :	20
1.9.5	Accélérateurs de prise :	20
1.10	Les ajouts:	21
1.10.1	La pouzzolane :	21
1.10.2	Le laitier :	24
1.10.3	Les poudres fines:	25
1.11	Conclusion :	25
2.1	Introduction :	27
2.2	Définition de la durabilité :	27
2.3	Effet de la température sur le transport dans un matériau cimentaire :	28
2.4	Effet des hautes températures sur la microstructure du béton	29

2.5	Effet de la température sur la pâte de ciment : .....	30
2.6	Effet de la température sur les granulats : .....	32
2.7	Comportement du béton au feu : .....	33
2.8	Perte de masse : .....	34
2.9	La porosité accessible à l'eau : .....	35
2.9.1	Effet de la température sur la porosité du béton : .....	35
2.10	Effets de la température sur la perméabilité du béton : .....	36
2.10.1	Perméabilité à l'eau: .....	37
2.10.2	Perméabilité au gaz : .....	37
2.11	La carbonatation : .....	38
2.11.1	Description du phénomène : .....	38
2.11.2	La profondeur de carbonatation : .....	38
2.11.3	Mesure de la profondeur de carbonatation : .....	39
2.11.4	Le dioxyde de carbone : .....	40
2.11.5	Effet de la température sur la carbonatation: .....	41
2.12	La diffusion des ions chlorures: .....	42
2.12.1	Influence de la température d'essai sur la pénétration des ions chlorures dans le béton ..	42
2.13	Conclusion : .....	42
3.1	Introduction : .....	44
3.2	Transport par diffusion : .....	44
3.3	La pénétration des ions chlorures : .....	45
3.4	Diffusion des ions chlorures dans le béton : .....	45
3.5	Effet de la fissuration sur la pénétration des ions chlorures : .....	46
3.6	L'interaction des chlorures dans les bétons : .....	47
3.7	Effets de l'eau de mer sur la durabilité des bétons : .....	48
3.8	Corrosion en présence d'ions chlorure : .....	49
3.9	L'amorçage et la propagation : .....	50
3.10	Etat des chlorures : .....	51
3.11	Coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton : .....	51
3.11.1	Le régime stationnaire ou permanent : .....	52
3.11.2	Le régime transitoire .....	55
3.11.3	La migration : .....	58
3.12	Conclusion : .....	62
4.1	Introduction : .....	63

4.2	Les matériaux utilisés sont :	63
4.2.1	Le ciment :	63
4.2.2	Sable :	64
4.2.3	Gravier :	65
4.2.4	La Pouzzolane :	65
4.2.5	L'adjuvant :	68
4.2.6	L'eau de gâchage :	69
4.2.7	Four :	69
4.3	Essai sur matériaux :	70
4.3.1	Analyse granulométriques :	70
4.3.2	Masse volumique apparente :	74
4.3.3	Masse volumique absolue :	75
4.3.4	Equivalent de sable (ES) :	76
4.3.5	Coefficient d'absorption :	77
4.4	Techniques expérimentales :	78
4.4.1	Mode opératoire de cette formulation :	78
4.4.2	Préparation et confection des échantillons :	79
4.4.3	Essai d'affaissement au cône d'Abrams :	80
4.5	Choix des températures des essais :	81
4.5.1	Chargement thermique :	82
4.6	Essai de résistance mécanique en compression :	82
4.7	Absorption capillaire :	83
4.8	L'effet de la température sur les essais de durabilité :	84
4.8.1	Porosité :	84
4.8.2	Diffusion des ions chlorure :	87
	□ Matériel.....	88
4.9	Conclusion :	95
5.1	Introduction :	96
5.2	Résultat et interprétation :	96
5.2.1	Résultats d'essai de résistance à la compression :	96
5.2.2	L'absorption capillaire :	97
5.2.3	Evolution de la perte de masse :	102
5.2.4	Porosité accessible à l'eau :	103
5.2.5	Les essais de diffusion :	105
5.3	Conclusion :	110

<b>Liste de la notation :</b>	<b>Unité</b>
<b>C</b> Concentration des ions chlorure par unité de volume	mol/l
<b>Ccl<sup>-</sup></b> Concentration des chlorures libres dans la solution	mol/l
<b>Ccl<sup>-</sup> Amont</b> Concentration des chlorures à l'amont	mol/l
<b>Ccl<sup>-</sup> Total</b> Concentration totale en chlorures du matériau	mol/g
<b>C mB, cl<sup>-</sup></b> Concentration des chlorures liés du matériau	mol/g
<b>Cs</b> Concentration des chlorures à la surface du béton	%(Cl <sup>-</sup> )/g
<b>C1</b> Paramètre constant	
<b>cb</b> Concentration en chlorures liés par unité de masse du matériau	g(Cl <sup>-</sup> )/g
<b>ccr</b> Concentration en chlorures critique	%(Cl <sup>-</sup> )/g
<b>cf</b> Concentration d'équilibre de la solution	g (Cl <sup>-</sup> )/l
<b>ci</b> Concentration initiale en chlorure dans le matériau	mol/l
<b>ct</b> Concentration totale en chlorure dans le matériau	mol/l
<b>c0</b> Concentration initiale des chlorures en béton ou en amont	mol/l
<b>Da</b> Coefficient de diffusion apparent	m <sup>2</sup> .s-1
<b>Damig</b> Coefficient de migration apparent du béton	m <sup>2</sup> .s-1
<b>De</b> Coefficient de diffusion effectif	m <sup>2</sup> .s-1
<b>De,mig</b> Coefficient de migration effectif du béton	m <sup>2</sup> .s-1
<b>Di</b> Coefficient de diffusion de l'ion	m <sup>2</sup> .s-1
<b>Dmig</b> Coefficient de migration effectif du béton	m <sup>2</sup> .s-1
<b>d</b> Diamètre des pores (porosimétrie mercure)	m
<b>E</b> Champ électrique	V/m
<b>F</b> Constante de Faraday (96480)	J/(V.mol)
<b>Je</b> Flux effectif des ions chlore	mol/(m <sup>2</sup> .s)
<b>L</b> Longueur de l'échantillon	M
<b>M</b> Masse de l'échantillon	G
<b>M</b> Masse molaire	kg.mol-1
<b>N</b> Paramètre constant	
<b>P</b> Pression	Pa
<b>p</b> La porosité du béton	%
<b>Cl<sup>-</sup></b> - Quantité cumulée de chlorures à l'aval	mol/m <sup>3</sup>
<b>R</b> Constante molaire des gaz parfaits (8,3143)	J.K-1mol-1
<b>S</b> Section	m <sup>2</sup>
<b>T</b> Température absolue	K
<b>Tr</b> Temps de retard	S

<b>Tref</b> Température de référence	K
<b>T0</b> Température de référence	K
<b>t</b> Temps	S
<b><math>\rho</math></b> Masse volumique kg.m-3	
<b>V</b> Volume de solution	m <sup>3</sup>
<b>X</b> Profondeur	cm
<b>Z</b> Valence de l'ion	
<b>ATG</b> Analyse Thermo Gravimétrique	
<b>BO</b> Béton Ordinaire	
<b>BPZ</b> Béton avec Pouzzolane	
<b><math>\Delta c</math></b> Différence de concentration	

## *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur madame DERBAL Ahlem , pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période de ce mémoire.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury Mme BENDOUINA et Mr MANAA, qui nous remercions profondément du fond du cœur pour l'honneur qu'ils nous ont accordé pour présider notre soutenance et examiner notre projet.

Nos remerciement s'adressent à l'ensemble des professeurs qui nous ont guidé durant le cycle de notre formation et à qui nous serons reconnaissants jusqu'à la fin de nos jours car sans eux on ne serait jamais arrivés là où on est aujourd'hui vous présentant ce mémoire.

Finalement nous remercions les ingénieurs de laboratoire du CUAT (monsieur KEDDOU Adel et Mme BEN TAOUDINA Nadjet et Mme OUMARI Kawter) pour leurs aide et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## *Dédicaces*

*Ce modeste travail je le dédie aux êtres qui sont les chers dans ma vie et à mon cœur qui m'ont soutenu inconditionnellement durant tout ce que j'ai entrepris durant le long de ma vie quotidienne :*

***A toi mon papa,** l'homme le plus généreux du monde qui soit.*

***A toi ma maman,** ma plus grande enseignante de tout le temps.*

***A mes très chères sœurs :***

*Fatima, Hadjria et Wassila pour leur appui et leur encouragement, je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, et de réussite. Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

***A mon très cher fiancé :***

*Quand je t'ai connu, j'ai trouvé l'homme de ma vie,*

*Tes sacrifices, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études, Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour. Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.*

***A mon binôme:***

*Tolba Asmaa qui m'a vraiment soutenue.*

*Narimane*

## *Résumé*

La durabilité du béton, dans des conditions extrêmes comme les incendies, est devenue un sujet d'intérêt majeur et par conséquent, un domaine de recherche largement exploré.

Actuellement le matériau de construction utilisé par excellence est le béton. Ce matériau est considéré comme vivant, par conséquent on veille sur sa santé et son comportement dans le temps vis-à-vis de son milieu d'exposition, comme les attaques par les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton. et en passant par la porosité qui est le portail pour la pénétration de ses agents.

Ce travail vise à étudier le comportement mécanique du béton pouzzolanique à base de la poudre de la pouzzolane en fonction de l'évolution de la température, ainsi que l'évaluation de la durabilité en étudiant sa diffusivité des ions chlorures et sa porosité.

Pour cela les bétons sont chauffées à des températures variées (200,400,600 et 900 °C), puis soumis aux différents tests.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle comme ajout dans le bétons a pour but la valorisation d'un produit naturel abondant en Algérie.

**Mots-clés** : Béton pouzzolanique , durabilité, chlorures, diffusion, porosité, température.

## *Abstract*

The Durabilité of Concrete Disease in the Important Conditions, Incendies, Great-Object-Finding-Large-User Interface, Un domaine de recherche largement élargi.

Actuellement, le matériau de construction utilisé par excellence est le béton. This is a self-life, one-is-it-at-the-face-of-the-way-of-the-social-position-of-the-jeu, il est vrai que les événements se déroulent de manière différente. Soit ils sont présents au moment où ils sont: utilisation d'eau contenant des chlorures ou des agrégats contaminés. Il y a une atmosphère marine, ils sont diffusés dans le béton, en passant par la porosité qui est le portail pour la pénétration de ses agents.

Ce travail a été étudié pour le comportement mécanique du béton pouzzolanique à la base de la poudre à la pouzzolane, en fonction de l'évolution de la température, de sorte que l'évaluation de la durée de vie de l'étudiant est diffusé par les ions chlorures et sa porosité. Pour cela, les bétons sont chauffés à des températures différentes (200 400 600 et 900 ° C), puis soumis aux différents tests.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle comme ajout dans les bétons et la valorisation d'un produit naturel abondant en Algérie.

Mots-clés: Béton pouzzolanique, durable, chlorures, diffusion, porosité, température.

## ملخص

لقد أصبحت متانة الخرسانة، في ظل الظروف القاسية مثل الحريق ، موضوعاً مهماً للغاية وبالتالي تم استكشاف مجال البحث على نطاق واسع.

حاليا مواد البناء المستخدمة من قبل التميز ملموسة. تعتبر هذه المادة على قيد الحياة ، لذلك تتم مراقبة صحتها وسلوكها بمرور الوقت فيما يتعلق بوسط التعرض لها ، حيث يمكن أن تأتي هجمات الكلوريد في الخرسانة من مصدرين مختلفين. سواء كانت موجودة في وقت الخلط: استخدام المياه التي تحتوي على الكلوريدات الملوثة أو المجاميع. إما أنها تأتي من البيئة (الغلاف الجوي البحري ، أملاح إزالة الجليد ، المواد الكيميائية) وانتشرت في الخرسانة ومن خلال المسامية التي هي بوابة لاختراق عواملها.

يهدف هذا العمل إلى دراسة السلوك الميكانيكي لمسحوق البوزولان استناداً إلى تطور درجة الحرارة ، بالإضافة إلى تقييم المتانة من خلال دراسة مدى انتشار أيونات الكلوريد ومساميتها. لهذا ، يتم تسخين الخرسانات بدرجات حرارة متفاوتة (200،400،600 و 900 درجة مئوية) ، ثم تخضع لاختبارات مختلفة.

يهدف استخدام البوزولان الطبيعي كمضاف في الخرسانة إلى الترويج لمنتج طبيعي وفير في الجزائر.

كلمات البحث: الخرسانة البوزولانية ، المتانة ، الكلوريد ، الانتشار ، المسامية ، درجة الحرارة.

## Introduction générale :

Dans le domaine de la construction des ouvrages en béton, longtemps les ingénieurs bâtisseurs s'intéressaient seulement à la résistance mécanique comme paramètre devant offrir la sécurité en reprenant l'ensemble des sollicitations, sans pour autant se soucier de la durée de vie de ces ouvrages évoluant dans des milieux d'agressivité diverses. Parmi les agents

agressifs pouvant nuire à l'intégrité des ouvrages construits, nous citons : la température diurne, la carbonatation, l'alcali-réaction, la diffusion des ions chlorures, etc. Ce sont autant de maladies qui peuvent nuire au béton et en particulier sur sa durabilité.

La durabilité des bétons dépend de plusieurs paramètres et surtout la porosité et la diffusion des ions chlorures. La porosité est le réseau par lequel les agents agressifs tels les fluides ou les gaz peut traverser un béton. Elle dépend fortement du réseau poreux, de sa fissuration et de la teneur en eau du matériau.

La pénétration des chlorures dans le béton qui est un milieu poreux se fait en présence d'eau. En milieu saturé (béton immergé), les ions chlorures pénètrent par diffusion dans le béton sous l'effet d'un gradient de concentration. Le coefficient de diffusion des ions chlorures est une grandeur essentielle de la durabilité des bétons exposés aux chlorures. Pour les bétons soumis à des cycles d'humidification-séchage, comme les bétons en zone de marnage ou exposés aux sels de diverglaçage.

### **Notre objectif :**

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, on a entamé une série d'expérience afin de pouvoir identifier le comportement des bétons utilisés sous l'effet de la température tout en posant la lumière sur la durabilité de ces bétons, on a pris en considération deux indicateurs majeurs la porosité et la diffusion des ions chlorures.

### **Organisation du mémoire :**

Pour répondre à cet objectif, l'organisation suivante a été préconisée.

- Dans le premier chapitre on a effectué une synthèse bibliographique, composée de trois chapitres : Le premier chapitre présente une généralité sur le béton.
- Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse aux indicateurs de durabilité notamment la porosité accessible à l'eau et la diffusion des chlorures sous l'effet de température.
- Le troisième chapitre expose les différents essais de diffusion des chlorures trouvés dans la littérature.
- Le quatrième et le cinquième chapitre sont consacrés à la partie expérimentale, où on explique largement notre travail dans le laboratoire pour obtenir les coefficients de diffusion et la porosité accessible à l'eau pour les bétons utilisés.

A la fin une conclusion générale a été présentée dans laquelle on met en revue les renseignements qu'on a peu tiré dans notre travail expérimental, ensuite on propose des perspectives pour des futurs travaux.

## 1.1 Introduction :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de construction, il est composé de ciment, eau, granulats et adjuvants.

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière offshore.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques. [1]

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix:

- Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues à la surface de la terre.
- Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'œuvre rapidement formée.
- Il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes ;
- Sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles.
- Sa durabilité est plus que séculaire dès lors qu'il est correctement formulé et mis en œuvre.
- Il s'accommode des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier, aux actions agressives de l'eau de mer.
- Il offre une bonne tenue au feu, garanti de sécurité vis-à-vis des incendies son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau de construction par excellence. [1]

## 1.2 Histoire du béton :

Les Romains de l'Antiquité savaient faire du béton. Ils avaient découvert que, pour fabriquer un liant hydraulique qui fasse prise sous l'eau, il fallait mélanger à de la chaux des déchets de fabrication des tuiles et des briques ou des cendres volcaniques (provenant notamment de

Pozzuoli, dans la baie de Naples, qui donna son nom à la pouzzolane, roche volcanique). Cette connaissance leur a, par exemple, permis de construire des ports protégés par des jetées en béton qui faisait prise sous l'eau, contrairement à la chaux (Vitruve, De l'architecture). Leur savoir s'est ensuite perdu au Moyen Âge. C'est la mise au point et le développement de la production des ciments artificiels modernes qui a permis l'essor de la construction actuelle en béton. [2]

Aux barques en béton (1848) de Joseph-Louis Lambton (1814-1887) et aux caisses à fleurs (1849) de Joseph Monier (1823-1906) succèdent les réalisations d'entrepreneurs qui développent des « systèmes » de béton armé : François Cosignait (1814-1888), qui met au point le béton aggloméré ; Monier, dont les brevets de 1877 et 1878 seront exploités en Allemagne ; François Hennebique (1842-1921), dont la société construira plus de 7 000 ouvrages, parmi lesquels le siège de cette dernière au 1, rue Danton (1900) à Paris et la villa de l'architecte à Bourg-la-Reine (1903) sont des exemples encore existants ; Armand Considère (1841-1914), qui invente le béton fretté (1901)... En 1906, cette première phase prend fin avec la publication des Instructions relatives à l'emploi du béton armé, véritable premier règlement français de calcul des structures en béton armé. Au XXe siècle, c'est l'invention du béton précontraint par Eugène Freyssinet (1879-1962) qui ouvrira de nouveaux horizons au matériau béton. La précontrainte, qui consiste à garder le béton dans un état comprimé grâce à des câbles en acier tendus, permet d'atteindre de grandes portées avec du béton et a trouvé, notamment, son application dans les ponts. Depuis lors, les progrès dans les sciences des matériaux ont permis d'améliorer encore de manière spectaculaire les propriétés des bétons. [2]

### **1.3 Définition du béton :**

Le béton est un matériau composite présentant une forte hétérogénéité constituée d'un mélange de granulats, d'une pâte de ciment incorporant éventuellement des adjuvants et additions. Le béton peut aussi être considéré comme un matériau multiphasique contenant trois phases : solide (granulats et pâte cimentaire), liquide (eau libre et adsorbée) et gazeuse (air et vapeur d'eau). Ses propriétés mécaniques se développent grâce à l'hydratation du ciment. [3]

## 1.4 Constituants du béton

### 1.4.1 Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, Il est issu de la cuisson de matières premières (calcaire, argile) sous forme de clinker.

S'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement, même sous l'eau. C'est un constituant de base du béton et mortier.[4]

#### 1.4.1.1 Composition et caractéristiques du ciment :

Le ciment est caractérisé par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques (la forme et la finesse des grains). Les grains de ciment sont hétérogènes et polyphasés. Au contact de l'eau ils donnent naissance à des produits dont la composition chimique est variable. Il est principalement composé de clinker, de sulfate de calcium, et d'ajouts éventuels. [4]

##### ➤ Le clinker :

C'est le constituant principal des ciments, il est obtenu d'un mélange de calcaire et d'argile (figure 1.1), ces matières sont broyées, finement moulues et mélangées dans des proportions bien définies, ensuite ils sont placés dans un four et chauffées à environ 1450 °C. Au cours de la calcination les matières premières vont réagir, pour former à la fin de la cuisson, un produit de composition complexe appelé clinker. [4]

Les principaux constituants du clinker sont :

- Le silicate tricalcique ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ).
- Le silicate bi calcique ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ).
- L'aluminate tricalcique ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ).
- L'alumino-ferrite tétracalcique ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{F}_2\text{O}_3$ ).



Figure 1.1 le clinker le constituant principale du ciment[4].

➤ **Le gypse :**

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement. [4]

Tableau 1.1 composant de gypse

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl-
%	10.05	2.99	1.55	26.90	3.86	0.41	0.05	30.33	0.007

La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories :

- Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples. [5]
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.
- Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants. [5]

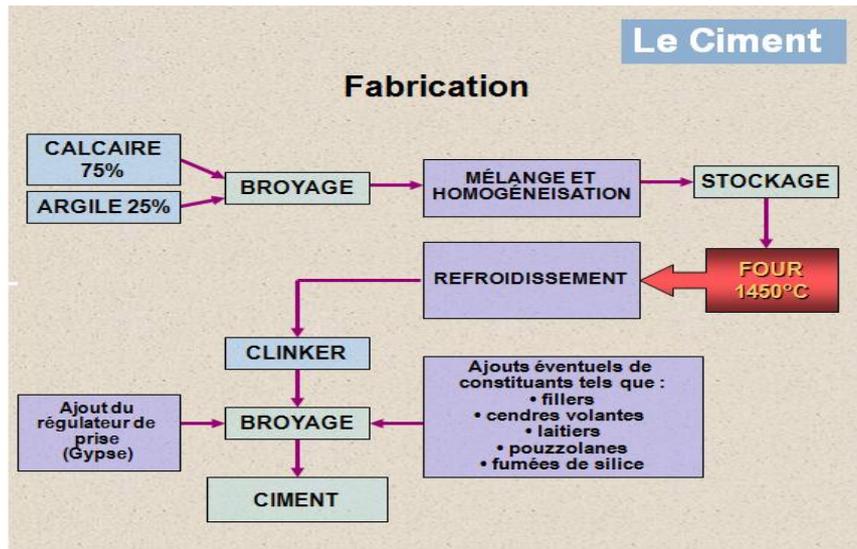


Figure 1.2 Fabrication du ciment portland [3].

### 1.4.1.2 Hydratation du ciment :

Lorsque le ciment est mis en contact avec de l'eau, il s'hydrate selon une série de réactions chimiques individuelles s'effectuant à la fois en parallèle et successivement. Ce processus est associé à une libération de chaleur. Le ciment doit être mélangé avec suffisamment d'eau pour pouvoir s'hydrater complètement. D'après (Per) on peut diviser l'hydratation d'un ciment portland en quatre périodes[6] :

- Période de prés- induction (les premières minutes).
- Période d'induction ou période dormante (les premières heures).
- Période d'accélération (3- 12 h après mélange).
- Période de post accélération.

Les figures 1.3 et 1.4 représentent respectivement le taux d'hydratation des différentes phases de clinker et le taux de formation des différents produits au cours de l'hydratation d'un ciment portland typique

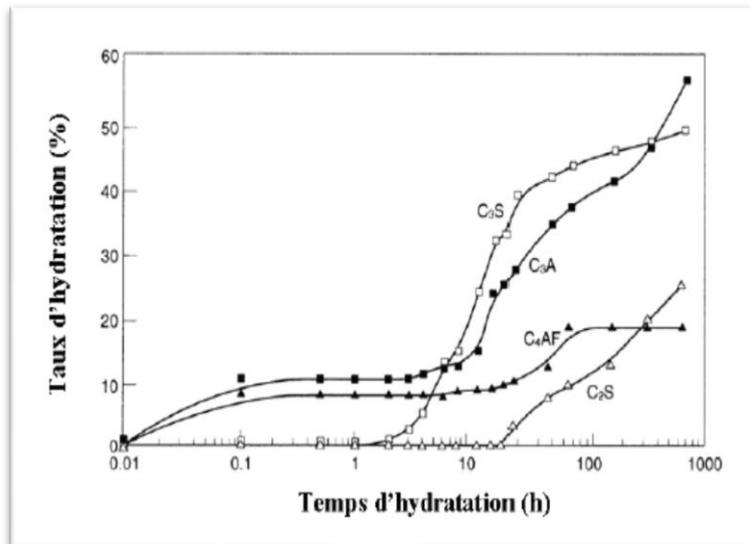


Figure 1.3. Hydratation du ciment Portland (consommation du clinker (Car)) [6].

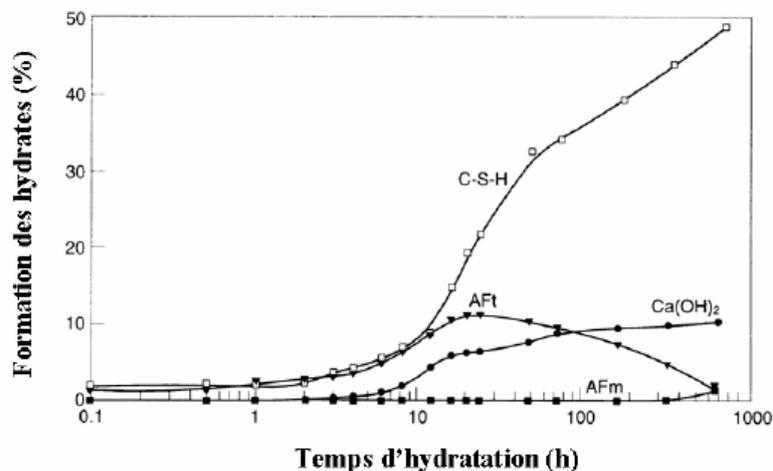


Figure 1.4. Hydratation du ciment Portland [6].

### 1.4.2 L'eau de gâchage:

L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. L'eau utilisée doit être propre ! (Évitez d'utiliser de l'eau de mer) et prenez garde à ne pas l'ajouter avec excès sous risque d'altérer les performances de votre béton. En effet, cela pourrait diminuer sa résistance et sa durabilité. [5]

### 1.4.3 Les granulats :

Les granulats, d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. En tant que principaux composants du béton, ils lui transmettent certaines

caractéristiques techniques et esthétiques, notamment sa résistance. Le choix du type de granulat utilisé ne doit donc pas être fait à la légère car il aura une influence sur la durabilité de votre béton. On distingue alors différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravi On classe les différents types de granulats en fonction de leurs dimensions, exprimées par la formule  $d/D$ .

$d$  = diamètre le plus petit du granulat.

$D$  = diamètre le plus grand du granulat.[7]



Figure 1.5. Dimension des granulats [7].

### 1.4.3.1 Caractéristiques des granulats :

Les granulats sont caractérisés par un certain nombre de propriétés liées à leur origine (Caractéristiques intrinsèques) et à leur mode de fabrication :

#### ➤ La résistance mécanique

Il faut noter que la résistance mécanique du béton est étroitement liée à la résistance mécanique des gravillons.

#### ➤ Absorption d'eau

Le coefficient  $A_b$  mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Il est d'autant plus élevé que le matériau est absorbant.

#### ➤ Granularité

Il s'agit de la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle est déterminée par une analyse granulométrique qui fait l'objet d'une représentation graphique, cette courbe représente la distribution en pourcentage des poids des matériaux passant dans le tamis et passoirs de dimensions normalisées.

### ➤ **Forme des gravillons**

Elle est mesurée par le coefficient d'aplatissement A. Il est d'autant plus élevé que les gravillons contiennent des grains plats, allongés, ou aiguilles, qui rendent la mise en œuvre et le malaxage difficiles.

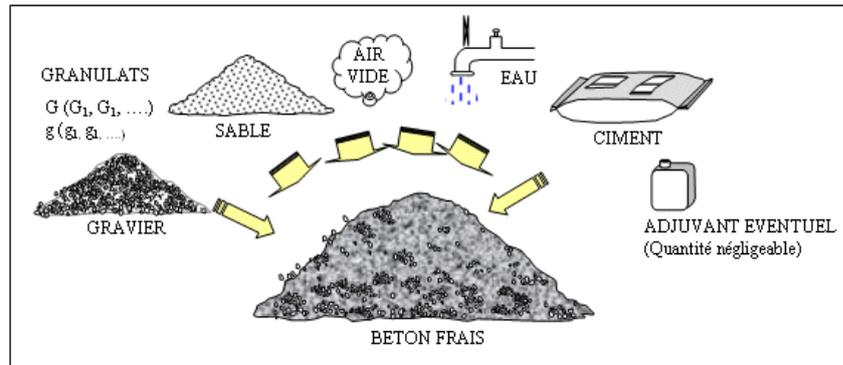


Figure 1.6 : Les différents composants du béton [3].

## 1.5 Propriétés de béton :

### 1.5.1 Propriétés physiques :

On distingue, un peu arbitrairement, les propriétés physiques des propriétés mécaniques des bétons. Elles procèdent toutes, en fait, de leur degré de porosité [8].

**Poids volumique** : il varie entre 23 et 24 kN/m<sup>3</sup> pour les bétons ordinaires ; il atteint 25 kN/m<sup>3</sup> pour les BHP. La présence d'armatures dans le béton armé ou précontraint conduit à prendre en compte dans les calculs un poids volumique de 25 kN/m<sup>3</sup> (2.500 kg/m<sup>3</sup>) pour les bétons courants.

**Imperméabilité** : le béton est d'autant plus imperméable que la porosité est plus faible. Les bétons dont le rapport E /C est inférieur à 0,40 sont pratiquement imperméables à l'eau (leur perméabilité ne peut plus être mesurée).

**Résistance aux agents agressifs** : les bétons compacts et à porosité réduite offrent une grande résistance aux effets corrosifs de divers agents agressifs. Ils présentent, en particulier, une excellente tenue vis-à-vis des effets corrosifs de l'eau de mer.

**Durabilité** : les diverses propriétés physiques des bétons lui confèrent une grande durabilité.

Réalisées correctement, selon les règles de l'art, les structures en béton conservent donc leur aptitude au service pendant toute leur durée de vie prévue, sans nécessiter de coûteuses réparations.

**Imperméabilité** : le béton est d'autant plus imperméable que la porosité est plus faible. Les bétons dont le rapport E /C est inférieur à 0,40 sont pratiquement imperméables à l'eau : leur perméabilité ne peut plus être mesurée.

### 1.5.2 Propriétés mécaniques :

On ne considère ici que les propriétés prises en compte par l'ingénieur de génie civil. De ce point de vue, un béton est défini par les caractères suivants [8]:

#### ➤ Résistance à la compression :

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours,  $f_{c28}$ . En France, par convention, la résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, ceux de qualité atteignent 40 à 50 MPa, et les bétons à hautes performances peuvent dépasser 100 MPa. Le diagramme représentatif de la loi de comportement du béton montre que la contrainte maximale de compression  $f_c$  est atteinte pour une déformation de l'ordre de  $3,5 \cdot 10^{-3}$ . La ruine de l'éprouvette se produit pour une déformation  $\epsilon_r$  de l'ordre de  $3,5 \cdot 10^{-3}$ . La pente de la partie linéaire du diagramme définit le module d'élasticité instantané  $E_i$  (module de Young). Sa valeur peut être évaluée par des relations empiriques telles que celle donnée par les règles françaises :  $E_i = 11.000 f_c^{1/3}$  (MPa). Un béton de 40 MPa de résistance a donc un module de déformation longitudinale instantanée de l'ordre de 38 GPa.

Résistance à la traction : la résistance à la traction est environ égale au 1/10 de la résistance à la compression.

### 1.6 Utilisations du béton :

Le béton seul n'est pratiquement utilisé que pour la construction de chaussées routières et autoroutières, ou de barrages poids. En règle générale, les ouvrages, quelle que soit leur nature, sont réalisés en béton armé ou en béton précontraint.

## 1.6.1 Le béton armé :



Figure 1.7. Les composants du béton armé et les pièces ce que nous donne [9].

Le béton armé est le matériau composite constitué par du béton et par des armatures en acier judicieusement disposées.

Un élément de structure est généralement l'objet de sollicitations de flexion, d'effort normal et d'effort tranchant quand il est soumis à l'action de charges. Les moments de flexion sont équilibrés dans une section donnée de la pièce par des contraintes normales dont la valeur varie linéairement sur la hauteur de la section. Elles sont maximales sur les fibres extrêmes ; ce sont, par exemple, des contraintes de compression dans la partie supérieure de la section, et de traction dans sa partie inférieure. Si la contrainte de traction atteint la résistance à la traction du béton, résistance dont on a dit qu'elle est relativement faible, celui-ci se rompt. Cette rupture est évitée en disposant des barres d'acier, ou armatures, dans la zone où les contraintes de traction sont maximales. Le moment est alors équilibré, d'une part, par les contraintes de compression qui se développent dans la partie supérieure de la section et, d'autre part, par l'effort de traction qui s'exerce alors dans les armatures longitudinales disposées en partie inférieure. De même, les efforts tranchants sont à l'origine de contraintes de cisaillement réparties sur la hauteur de la section. Celles-ci sont reprises par des armatures transversales, cadres et étriers, en général perpendiculaires aux armatures longitudinales.

Cette disposition permet d'utiliser au mieux la capacité élevée de résistance à la compression du béton, tout en palliant sa faible résistance à la traction.

Le comportement normal d'une pièce en béton armé suppose une fine fissuration des zones tendues. La durabilité n'est pas affectée dès lors que l'ouverture des fissures demeure inférieure à 0,1 mm en environnement agressif, et à 0,3 mm en milieu non agressif : de telles

ouvertures ne permettent pas la corrosion des armatures en acier, le béton constituant un milieu basique qui protège les aciers par passivation. Il est à noter que le composite béton acier ne présente un comportement satisfaisant que parce que le béton et l'acier ont à peu près le même coefficient de dilatation thermique.

Le béton armé est utilisé pour la construction de bâtiments, d'usines, de couvertures en coques minces, de réservoirs et de silos de petite capacité, de ponts de petite portée, de routes, d'ouvrages de fondation, d'ouvrages portuaires [9].

### **1.7 Les différents types de béton :**

#### **1.7.1 Le béton fibré :**

Le béton fibré est un matériau dans lequel sont intégrées des fibres synthétiques ou métalliques de dimensions diverses et réparties de manière homogène dans la masse du béton. [11] Il existe différents types de fibres, ayant des impacts variables sur le béton. Elles ont par exemple pour fonction d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que la résistance en flexion ou la limitation de la fissuration.

Il existe différentes catégories de fibres :

- Les fibres métalliques.
- Les fibres organiques.
- Les fibres minérales.

#### **1.7.2 Le béton léger :**

Le béton léger est un type de matériau qui vous facilitera grandement la tâche. Ce béton est composé en majorité de constituants l'allégeant, ce qui le rend bien moins lourd qu'un béton ordinaire et par conséquent, bien plus pratique d'utilisation. Les matériaux lourds qu'on retrouve chez les bétons classiques tels que les granulats sont remplacés. A la place, il est possible d'ajouter

Des billes de polystyrène par exemple. Cette caractéristique rend ce béton très utile dans la réalisation de certains types d'ouvrages tels que pour les fondations ou dans l'isolation. [11]

#### **1.7.3 Le béton Autoplaçants :**

Le béton Autoplaçants, aussi nommé béton auto-nivelant (BAN) ou bien béton auto-compactant, est un béton se différenciant des autres par son importante fluidité. Une

caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers. Il était fréquent de rajouter de l'eau au mélange afin d'obtenir un béton plus fluide mais cela le fragilisait. C'est pourquoi le BAP est une véritable révolution. Apparu dans les années 1980 au Japon, il s'est développé en France à la fin des années 1990. Si le béton Autoplaçants possède une telle fluidité, c'est grâce aux divers adjuvants super plastifiants qui le composent. Ceci a rendu les constructions plus sûres et a grandement facilité les méthodes de mise en œuvre du béton [11].

### 1.8 Principaux avantages et inconvénients du béton :

#### 1.8.1 Les avantages :

- C'est une construction solide et stable qui résiste très bien au temps.
- Il permet une construction rapide. Après sept semaines à peine, l'habitation est étanche à l'air et à l'eau.
- Le niveau d'isolation et l'étanchéité sont excellents grâce au fait que le revêtement complet est fabriqué par une entreprise. En outre, on utilise de grands éléments qui s'assemblent parfaitement.
- Il procure un confort agréable à l'intérieur, grâce à une inertie thermique inégalée.
- Le logement est sobre et élégant sans poutres, barres et linteaux visibles.
- Le souterrain est habitable grâce aux parois parfaitement étanches et isolées.
- Les équipements techniques sont dépourvus de rainures : les coupe-circuit et les canalisations sont intégrés au coffrage des murs préfabriqués.
- L'achèvement intérieur est lisse et élégant, sans plâtrage. [12]

#### 1.8.2 Les inconvénients :

- Le système de construction se prête beaucoup moins à une architecture plus classique et traditionnelle.
- Le placement d'un revêtement de façade lourd (brique, pierre naturelle...) entraîne des coûts considérables, notamment pour les fondations plus épaisses et les linteaux de fenêtre.
- L'intégration d'un grand nombre d'équipements techniques dans les panneaux préfabriqués vous force à prendre des décisions dans la phase de création. Les modifications au cours des travaux sont pratiquement impossibles sans payer très cher.

- Les adeptes d'architecture écologique apprécient moins, même si le béton est entièrement recyclable [12].

### 1.9 Les adjuvants :

Un adjuvant est un produit qui ajoutée en faible proportion améliore certaines propriétés du béton en général chaque adjuvant a une action principale qui défini et d'après laquelle il est classe cependant il peut présenter d'autres actions secondaires [13].

#### 1.9.1 Entraîneurs d'air :

Les entraîneurs d'air sont employés afin d'augmenter la quantité d'air comprise dans le béton. Pour ce faire, des microbulles sont injectées dans le béton de manière régulière, afin de permettre à l'eau transformée en glace de disposer de la place suffisante sans entraîner de dégradation du parement.



Figure 1.9. Adjuvant entraîneur d'air [3].

#### 1.9.2 Plastifiants :

Les plastifiants sous forme liquide ou de poudre sont employés pour faciliter la maniabilité du béton en le rendant plus souple et plus onctueux. Les plastifiants permettent également de diminuer la teneur en eau du béton en conservant la même ouvrabilité. Cette diminution en eau permet d'augmenter sa durabilité et sa résistance mécanique.

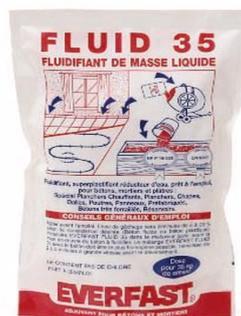


Figure 1.10. Adjuvant plastifiants [3].

### 1.9.3 Produits de cure :

Sous forme liquide, les produits de cure sont destinés à réduire la perméabilité du béton tout en renforçant sa résistance à l'usure. Ils sont mis en œuvre sur du béton frais, afin d'éviter l'évaporation trop rapide de l'eau contenue dans le béton. Ils permettent de lutter contre la formation de fissures de retrait et contre le délitage de la surface.

### 1.9.4 Retardateurs :

À l'inverse des accélérateurs de prise, les retardateurs ont pour but de retarder la prise. Retarder la prise peut être utile en cas de fortes chaleurs, ou lorsque le béton est en attente pendant un certain temps avant d'être coulé (transport etc.). Les retardateurs de prise se présentent dans la majorité des cas sous forme liquide.

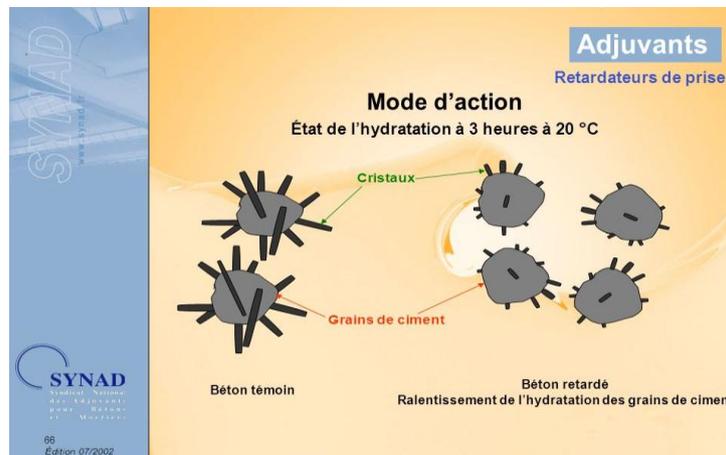


Figure 1.11. Adjuvant retardateur de prise [3].

### 1.9.5 Accélérateurs de prise :

Les accélérateurs de prise sont utilisés principalement en cas de températures basses empêchant ou entravant la prise du béton. Ils permettent de travailler la matière jusqu'à -10°C.

Les accélérateurs sont préconisés pour éviter que les températures basses ne bloquent la prise du béton, ne l'interrompent pas en le transformant en glace en cours de prise, ou pour accélérer sa montée en résistance.

Ils sont employés pour les ouvrages épais ou volumineux particulièrement sensibles au gel en raison d'une prise plus longue.



Figure 1 .12. Adjuvant accélérateur de prise et de durcissement [3].

### 1.10 Les ajouts:

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers et les bétons permettent de jouer sur les caractéristiques mécaniques, à savoir la résistance, les délais de mise en œuvre, la plasticité. Ces ajouts permettent de rendre le mortier/béton très performant. Cependant ils en augmentent le coût [14].

Il existe plusieurs types d'ajouts :

#### 1.10.1 La pouzzolane :

La pouzzolane vient de très profonds de la terre, née au cœur des volcans, ce mélangeant des minéraux et métaux rendus liquides sous forme de magma est violemment projeté dans l'air à très haute température lors des explosions des cratères des volcans. C'est une sorte de mousse de basalte expulsée par les volcans en éruption dont la structure scoriacée et alvéolaire résulte de la dilatation des gaz à l'intérieur du magma liquide et emprisonnés durant son refroidissement au contact de l'air. Cette substance est appelée pouzzolane, parce qu'elle se trouve dans le voisinage de Pouzzoles située à 27Km du Vésuve en Italie [15].

##### 1.10.1.1 Types de pouzzolanes :

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux Naturels et les artificiels [15].

### 1.10.1.1.1 Pouzzolanes naturelles :



Figure 1.13 : pouzzolane naturelles [15].

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Algérie côté ouest du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le méta kaolin [15].

### 1.10.1.1.2 Pouzzolanes artificielles :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi la schiste cuite, et les déchets de l'industrie a base de méta kaolinite [15].



Figure 1.14. Pouzzolane artificiel [15].

### **1.10.1.2 Effet de La pouzzolane :**

#### **1.10.1.2.1 A l'état frais :**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [16].

#### **1.10.1.2.2 A l'état durci :**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables [16].

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

### 1.10.1.3 Evaluation de l'activité pouzzolanique :

Plusieurs méthodes ont été avancées pour expliquer les propriétés des pouzzolanes comme étant un matériau naturel ou artificiel riche en silice et l'alumine capable de :

- Réagir avec la chaux en présence d'eau,
- Former par cette réaction des produits aux propriétés liantes.

A partir de cette définition, on distingue deux catégories d'essais qui, en premier lieu caractérisent l'existence de la réaction pouzzolanique, et en second lieu, mettre en évidence les produits d'hydratation aux propriétés liantes et leur influence sur les caractéristiques mécaniques.

### 1.10.1.4 Domaine d'utilisation de la pouzzolane :

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

- Dans la fabrication du ciment : la pouzzolane est fournie principalement aux cimenteries pour être utilisé autant qu'ajout actif au clinker.
- En hiver : elle sert pour le sablage des routes verglacées.
- Dans les travaux publics : elle est utilisée comme matériaux de remblais légers pour la réalisation des terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnés.
- Dans l'industrie : additionnée au ciment elle permet la confection de béton léger très utile pour la construction des bâtiments, elle entre dans la fabrication des parpaings et hourdis légers.
- En agriculture : La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols.
- Dans la fabrication des carreaux granito.
- Fabrication des allumettes.
  - Fabrication des produits cosmétiques

### 1.10.2 Le laitier :

de haut fourneau ou le laitier broyé comme il voudrait peut être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé, il se présente sous forme de la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium 40 à 50% et la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30%, ainsi que la magnésie et d'autres d'oxydes en très faibles quantités tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [13].

### 1.10.3 Les poudres fines:

Les poudres sont composées de :

#### 1.10.3.1 Cendres volantes :

D'une façon générale, l'introduction de cendre volante dans le béton diminue la porosité et la perméabilité, elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives en fixant progressivement la chaux, la cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable, elles jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton et l'imperméabilité des surfaces.

#### 1.10.3.2 Fumée de silice :

est sous-produit de fabrication de silicium, d'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice, elle s'appelle aussi micro silice, la fumée de silice est un matériau peu économique, ce produit se présente sous forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise, comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées en générale pour des raisons d'économie comme ajout pour améliorer les propriétés du béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [13].



Figure 1.15. Les poudres fines [13].

### 1.11 Conclusion :

Le béton, qu'il soit armé, précontraint ou non, est présent partout où l'on construit, et il doit cette présence à ses nombreuses qualités.

Le béton est un matériau qui sait adapter ses performances selon son utilisation: on pourra développer des hautes résistances mécaniques, ou chercher des gains de poids ou des solutions plus économiques. Le béton peut tantôt satisfaire les plus grandes exigences

## Chapitre 1 : Recherche bibliographique

---

esthétiques ou tenir un rôle moins apparent, apportant son concours indispensable dans les structures.

Le béton est aussi modulable et donc capable d'épouser toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.

### **2.1 Introduction :**

Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton, est un des facteurs importants dans le domaine du génie civil. Elle est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais aussi par l'environnement. Ces influences deviennent plus importantes quand on doit garantir une durée de service pendant une grande période. Par exemple, les ponts, les tunnels, les réseaux d'assainissement ou le patrimoine bâti doivent avoir une longue durée dans le temps. Dans le cas des milieux agressifs les ouvrages en béton accueillant ces produits doivent avoir une durée de vie très longue dépendant du niveau d'agressivité de ces produits.

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques et modifie sa microstructure. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les pores, la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats (la matrice cimentaire et les granulats) engendrent des effets importants sur la résistance de béton à haute température. Les résultats issus de différentes investigations sur le comportement du béton exposé à des hautes températures, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres.

Ces différences ne sont pas dues seulement à la nature et au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme : la durée et le taux de chauffage et de refroidissement, la géométrie des éprouvettes.

### **2.2 Définition de la durabilité :**

La durabilité d'un béton est sa capacité de pouvoir conserver sa résistance et ses caractéristiques tout en continuant de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation auxquels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques.

La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton, les actions peuvent être mécaniques, physiques

ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles. Il convient de noter avant toutes choses que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause: le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apprêteront. [17]

### **2.3 Effet de la température sur le transport dans un matériau cimentaire :**

La diffusion est caractérisée par la mobilité des espèces à l'échelle moléculaire, qui dépend de la température. Or, les structures au contact avec des chlorures sont dans des environnements soumis aux variations de température entre l'hiver et l'été, le jour et la nuit. De plus, dans le cas des ouvrages implantés dans les villes côtières à travers l'Algérie, la température du climat peut atteindre des valeurs très élevées. En ce qui concerne la température, les travaux trouvés dans la littérature traitent plutôt de l'influence de la température de cure sur le comportement des matériaux. Il existe très peu de recherches qui étudient l'influence de la température ambiante sur le transport dans un matériau cimentaire. Il existe deux directions de recherche concernant l'influence de la température sur le transport des chlorures [18] :

- ✓ l'influence de la température de cure initiale (la température influe fortement sur l'hydratation et le durcissement des matériaux)
- ✓ l'influence de la température d'essai, c'est-à-dire la température d'environnement (au moment où les matériaux atteignent un certain degré d'hydratation).

Dans notre cas on vas traité le comportement du béton sous hautes températures des cas qui se produit lors d'un incendies par exemple.

### 2.4 Effet des hautes températures sur la microstructure du béton

Dans cette partie nous présentons les effets physico-chimiques de la température sur la pâte de ciment et sur les granulats, et puis nous étudions par la suite le comportement à haute température du béton. [19]

Tableau 2.1 Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement

Entre 30 et 120°C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 120°C.
Entre 130 et 170 °C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C	la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton
A environ 250 et 370 °C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570 °C	Il y a transformation de structure du quartz α en quartz β accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques

<p>Entre 600 et 700 °C</p>	<p>Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de P -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.</p>
<p>Entre 700 et 900 °C</p>	<p>Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en <math>\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2</math> réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.</p>
<p>A dessus de 1300°C</p>	<p>Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment</p>

### 2.5 Effet de la température sur la pâte de ciment :

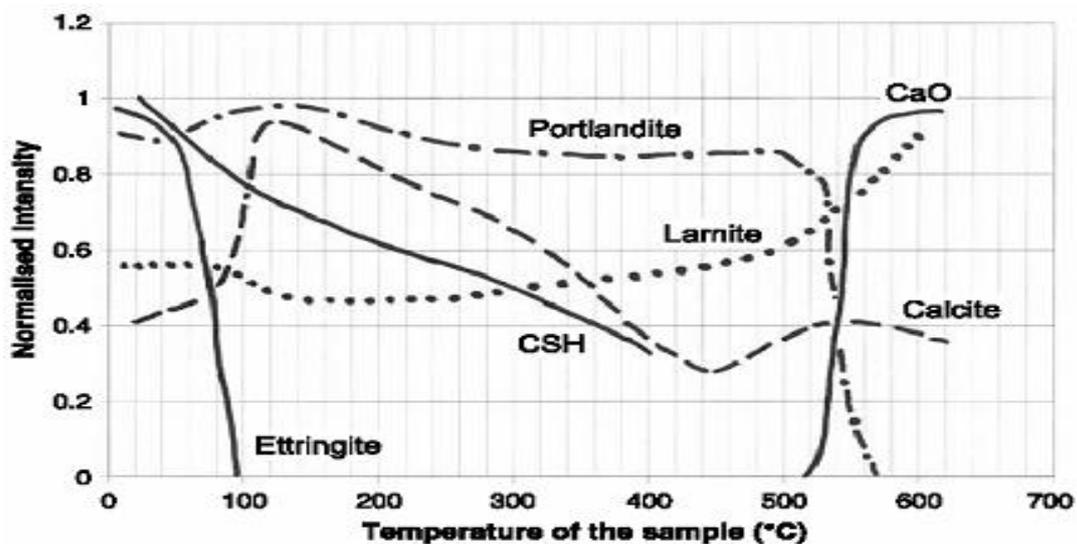


Figure 2.1. Evolution des composants du ciment sous l'échauffement [20].

## Chapitre 2 : effet de la température sur la durabilité du béton

la présence de l'eau sous différentes formes comme nous l'avons déjà dit. Entre 30 et 120°C, l'eau libre et l'eau adsorbée s'évaporent, et au-delà de 105°C les hydrates commencent à se décomposer. Cependant d'autres travaux, notamment ceux de [20], montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable.

Ensuite à Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de partir de 180 °C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium  $\beta$ C2S,  $\beta$ CS et en eau tandis que se forme l'hydroxyde de calcium CH qui donne l'oxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$ . A l'aide de la diffraction aux rayons X, les chercheurs ont observé un phénomène d'hydratation additionnelle entre 200 et 300°C. Cette réaction se traduit par une diminution des phases  $\beta$ C2S et C3S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de  $\text{Ca(OH)}_2$ . La technique de la diffraction des neutrons, permet de suivre les transformations de phases des principaux constituants de la pâte de ciment. (La figure 3.1) présente un résultat d'essai mené, à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), sur une pâte de ciment chauffée à la vitesse de 1°C/min jusqu'à 700°C. [20]

La figure 2.2 présente les courbes d'analyse thermo gravimétrique et d'analyse thermique différentielle réalisées sur une pâte de ciment après différents traitements thermiques. On y observe des zones bien marquées de décomposition de Portland ite et du carbonate de calcium. [21]

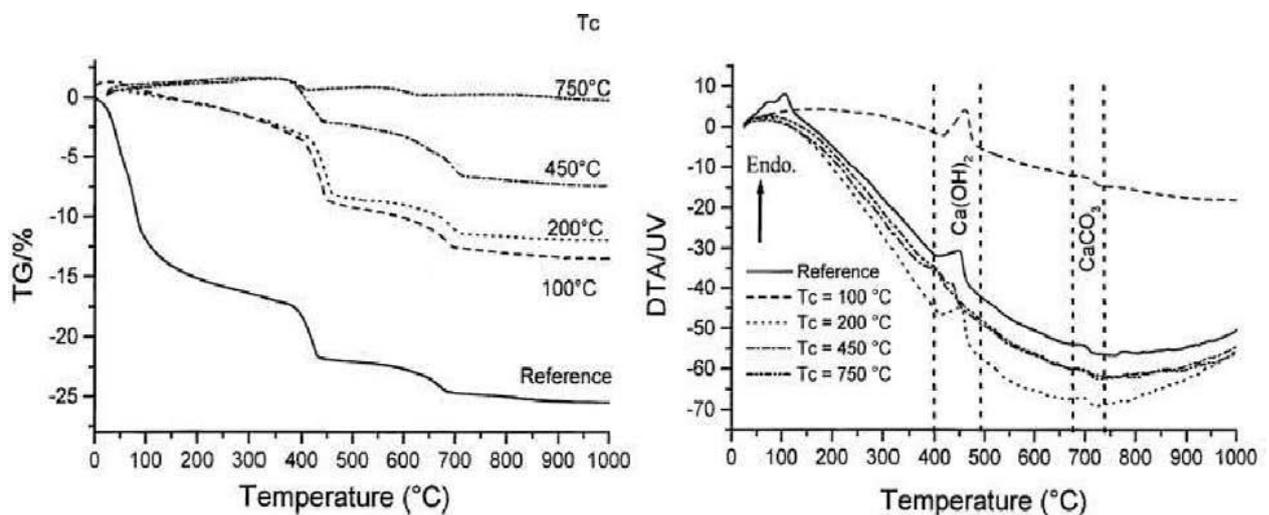


Figure 2.2 .Courbes d'analyse thermo gravimétrique thermique et d'analyse thermique différentielle d'une pate de ciment à différentes températures [21].

### 2.6 Effet de la température sur les granulats :

A haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau. La majorité des granulats est généralement stable jusqu'à 600°C. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. La Figure 2.3 montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux). [22]

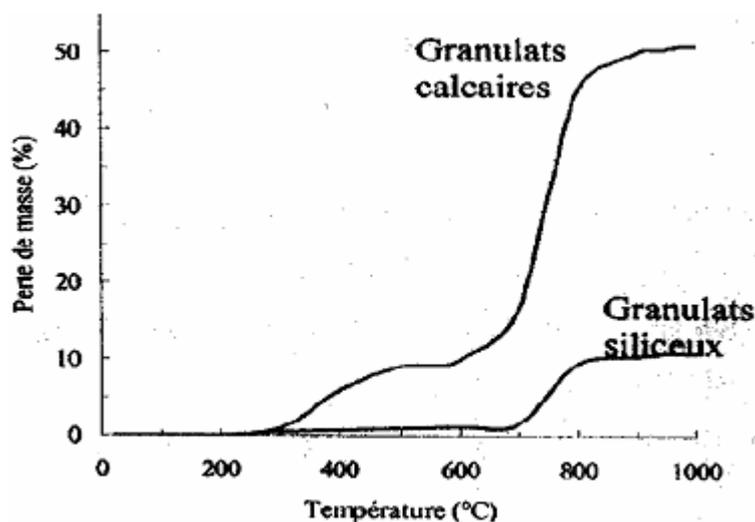


Figure 2.3. Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) [22]

La figure 2.4 présente la stabilité minéralogique de divers granulats sous l'effet de sollicitations thermiques. Les granulats étudiés peuvent présenter un caractère instable. Dans cette étude, les granulats légers possèdent une bonne stabilité thermique jusqu'à 1000°C. Par contre, les granulats calcaires, siliceux et silico-calcaires sont instables dès 550 °C.

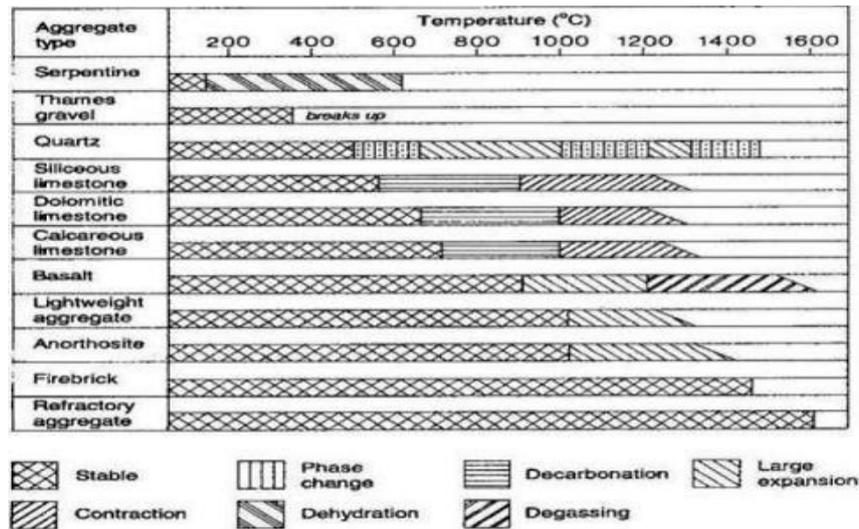


Figure 2.4. : Etude de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de divers granulats en fonction de la température [22].

### 2.7 Comportement du béton au feu :

Bien que l'on est traité de la résistance au feu du béton à plusieurs occasions, le traitement complet de ce sujet en dehors de l'objectif de ce livre parce que la résistance au feu s'applique en réalité à un élément de bâtiment plutôt un matériau de construction. [23] Cependant, on peut dire que, en général, le béton un bon comportement sur le plan de la résistance au feu, c'est-à-dire que le béton et non combustible virgule la durée d'exposition au feu durant laquelle il continue d'offrir de bonnes performances est relativement élevé et il ne dégage pas de fumée toxique. Les critères correspondant de performance sens de la capacité à reprendre les charges virgule la résistance à la pénétration des flammes et la résistance à la transmission de la chaleur lorsque le béton est utilisé comme matériau protecteur pour l'acier une analyse générale de la résistance au feu du béton est décrite par Smith. En pratique, on s'attend à ce que le béton de structure conserve sa capacité de solidité pendant le temps voulu, ce qui est tout à fait différent d'être résistant à la chaleur. En considérant le comportement du béton en tant que matériaux, on doit noter que le feu introduit du gradient élevé de température et, en conséquence, les couches chaudes de surface en tendance à se séparer du cœur plus froid du béton. La formation de fissures est favorisée au juin, dans les parties du béton pour consolider ou dans des plans des armatures, une fois les armatures exposés, elle véhicule la chaleur et accélère l'action de température élevées. Le type de granulats influence la tenue du béton température élevé. La perte de résistance est considérablement moindre lorsque les granulats ne contient pas de silice certaine forme de silice subissent un changement dimensionnelle.

C'est le cas par exemple des calcaires, des roches signé basiques et particulièrement des brique concassée et du laitier de haut fourneau. Le béton de faible conductivité thermique

Thermique présente une meilleure résistance au feu de sorte que, par exemple, en béton léger résiste mieux au feu en béton ordinaire. [23]

### 2.8 Perte de masse :

Lors d'une sollicitation thermique du béton à haute température, celui-ci perd de sa masse à cause du départ de l'eau libre contenue dans les capillaires et de l'eau liée contenue dans les hydrates qui s'évaporent et s'échappent par les pores.

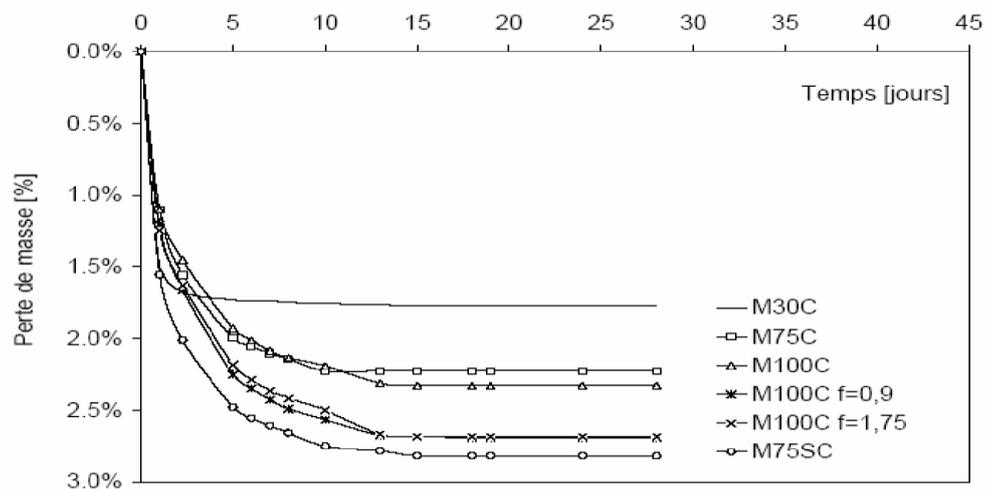


Figure 2.5. : Perte de masse des éprouvettes de béton étuvées à 105°C [24].

La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau. Il est possible d'étudier la cinétique du processus de séchage et de déshydratation. Sur la figure 2.6 on observe la perte de masse en phase transitoire, c'est-à-dire durant le traitement thermique.

Dans ce cas, la vitesse de chauffage est de 10°C /min jusqu'à 600°C. Mais, la perte de masse ne débute qu'à partir de 100°C. L'auteur [24] observe que la perte de masse commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Puis progressivement, les gaz et fluides présents dans le matériau sont mis en mouvement

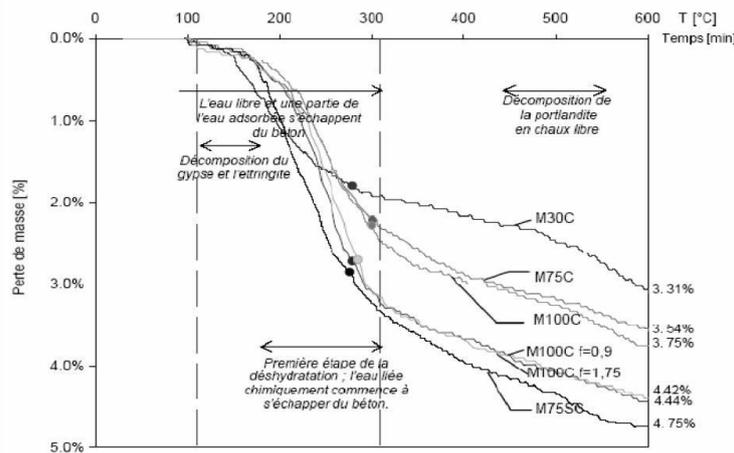


Figure 2.6. Perte de masse des bétons chauffés à la vitesse de 1°C/min [24]

### 2.9 La porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de durabilité au sens du document publié par l'AFGC en 2004. Parmi les méthodes disponibles, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique selon le mode opératoire AFPCAFREM est une mesure simple et praticable sur une large variété de matériaux. On peut déterminer aussi la densité sèche à partir de cette technique [25].

#### 2.9.1 Effet de la température sur la porosité du béton :

Les transformations physico-chimiques, dont la décomposition du gel C-S-H, et la fissuration thermique due à l'incompatibilité des déformations thermiques, modifient la géométrie de la structure poreuse du béton. Le départ de l'eau, sans modifier la porosité totale, augmente le volume de pores accessibles à la phase gazeuse par rapport à la phase liquide. Cependant, la fissuration thermique, accompagnée d'un élargissement des pores, participe à l'augmentation de la porosité totale. Par ailleurs, avec l'augmentation de la porosité, la résistance mécanique diminue [Bazant et Kaplan, 1996, Vodak et al., 2004 cités par CHO, 06]. Pour décrire l'évolution de la porosité  $P$  avec la température  $T$ , Dal Pont (2004) utilise une relation initialement proposée par Schneider et Herbst (1989)[26], retenue également par Gawin (2003) :

$$P = P_0 + A_n (T - T_0) \dots \dots \dots (2.1)$$

Où :  $p_0$  : porosité initiale déterminée à la température  $T_0$

An : coefficient dépendant du type de béton.

L'évolution de la porosité, obtenue expérimentalement et à partir de la relation (I.3.1) sur plusieurs types de béton, est montrée sur la Figure 2.7

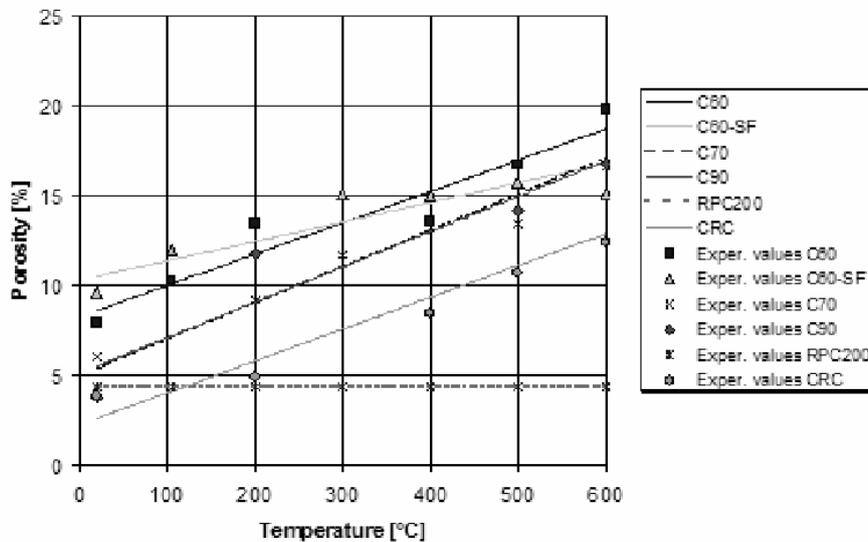


Figure 2.7. Valeurs expérimentales et approximation de la porosité pour différents bétons sous l'effet de la variation de la température [26].

A travers la figure 2.7, nous constatons que la porosité augmente en fonction du gradient thermique pour l'ensemble des bétons. La porosité est donc en évolution dès que la taille des pores augmente. Les différents phénomènes qu'on peut observer dans le réseau poreux, sont liés à la température maximale atteinte. A des températures pas trop élevées, jusqu'à environ 300°C, la variation des pores est due à la décomposition de la pâte de ciment suite à la déshydratation. Au-delà de cette température, et en particulier lorsqu'on dépasse 500° C, le changement de la porosité est lié aussi à la désintégration des agrégats calcaires. La porosité est aussi affectée par le changement de volume : en général, on peut observer une expansion de la pâte de ciment entre 20 et 200° C. Au delà de 200° C, on observe une expansion des granulats limitée par le retrait de la pâte de ciment [26]

### 2.10 Effets de la température sur la perméabilité du béton :

Parmi le nombre restreint d'études expérimentales qualifiant les effets de la température sur la perméabilité du béton, certains ont mis en évidence l'évolution de la perméabilité après refroidissement du matériau (perméabilité résiduelle), alors que d'autres ont montré l'évolution de la perméabilité sous température.

### 2.10.1 Perméabilité à l'eau:

Concernant l'évolution de la perméabilité à l'eau sous température élevée, les essais conduits par Joos et Reinhardt (2002) [15] ont montré une augmentation de la conductivité hydraulique de 13 à 62 % sous la température de 50 °C par rapport à la conductivité hydraulique mesurée à 20 °C et de 3 à 55 % sous la température de 80 °C par rapport à la conductivité hydraulique mesurée à 50 °C. Ces auteurs expliquent ces effets par la diminution de la viscosité de l'eau avec la température, ce qui provoque une augmentation de la conductivité hydraulique. L'eau utilisée pour mesurer la perméabilité peut provoquer le colmatage des pores par des particules fines et éventuellement la cicatrisation du béton. De plus, ce phénomène est favorisé par la température élevée [27]. Par conséquent, un biais risque d'être introduit lorsque la perméabilité est mesurée à l'eau.

### 2.10.2 Perméabilité au gaz :

Tsibrovskaja (1998) a réalisé des mesures de la perméabilité au gaz (azote) sur des mortiers et des bétons soumis préalablement à un traitement thermique jusqu'à l'obtention de la masse constante à des températures comprises entre 105 °C (état de référence) et 400 °C. La même vitesse de montée en température, 0,2 °C/min, a été appliquée à toutes les éprouvettes en mortier (cylindres de diamètre 54 mm et de hauteur 30 mm) et en béton (cylindres de diamètre 150 mm et de hauteur 50 mm)[28]

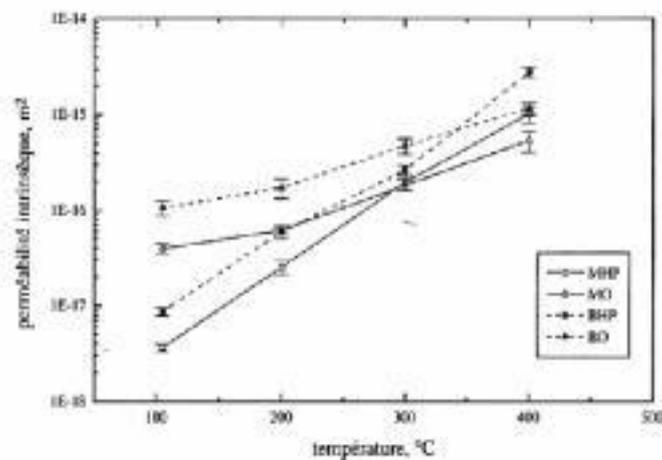


Figure 2.8. Evolution de la perméabilité intrinsèque avec la température dans les mortiers et les bétons ordinaires (MO, BO) et hautes performances (MHP, BHP) [28].

Les résultats obtenus (Figure 2.8) ont mis en évidence que la perméabilité au gaz, mesurée après refroidissement, qu'elle soit intrinsèque ou apparente, augmente avec la température.

En particulier, la perméabilité d'un mortier ou d'un béton à hautes performances subit une augmentation de deux ordres de grandeur, tandis que la perméabilité d'un mortier ou d'un béton ordinaire subit une augmentation d'un ordre de grandeur à 400 °C par rapport à 105 °C. L'auteur attribue ces augmentations de la perméabilité à l'évolution de la microstructure des mortiers et des bétons avec la température, en particulier à l'augmentation du volume et de la taille des pores capillaires connectés dont une famille est propre à la pâte de ciment et l'autre aux mortiers et bétons (pores aux interfaces pâte-granulat).

### **2.11 La carbonatation :**

#### **2.11.1 Description du phénomène :**

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO<sub>2</sub>) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH, NaOH et Ca(OH)<sub>2</sub>] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton. Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le Ca(OH)<sub>2</sub>, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée [24].

#### **2.11.2 La profondeur de carbonatation :**

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.



illustration de la méthode d'évaluation de la profondeur carbonatée  $x_c$  à l'aide d'un indicateur coloré (phénolphtaléine)

Figure 2.9. Mesure de la profondeur de la carbonatation [24].

### 2.11.3 Mesure de la profondeur de carbonatation :

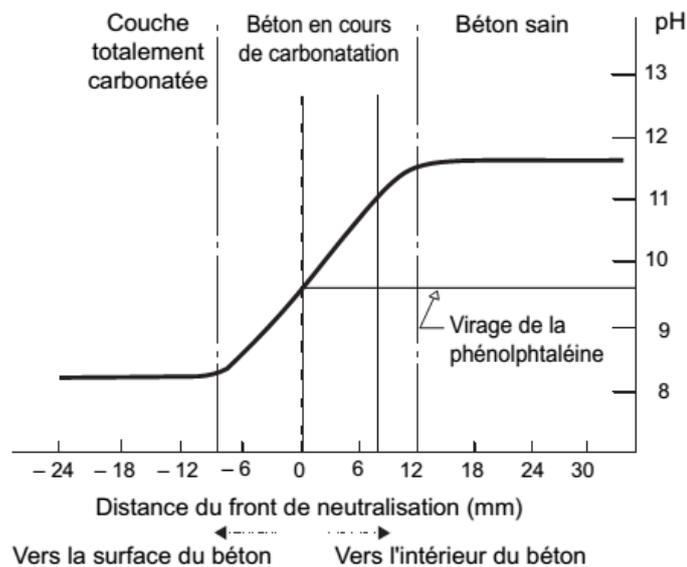


Figure 2.10. Gradient de pH au niveau du front de carbonatation [24].

La carbonatation du béton s'accompagne d'une diminution progressive du pH comme le montre schématiquement la figure (2.10). Il est utile de connaître la profondeur à laquelle le pH atteint une valeur de l'ordre de 9 car une armature d'acier située à cette profondeur est dans la zone de corrosion. La technique la plus simple à mettre en œuvre est le test à la phénolphtaléine qui consiste à mesurer le changement de couleur de cet indicateur coloré en fonction du pH Figure (2.10) Le virage de la phénolphtaléine est représentatif d'une zone de

pH de l'ordre de 9,5. La mesure de la profondeur de carbonatation s'effectue de manière normalisée en faisant la moyenne des valeurs mesurées en différents points [24]



Figure 2.11. Mise en évidence de la profondeur carbonatée par la phénolphtaléine dans un béton courant [24].

### 2.11.4 Le dioxyde de carbone :

Le dioxyde de carbone agressif représente une partie du dioxyde de carbone dissous dans toute eau naturelle. Le schéma suivant l'explique :

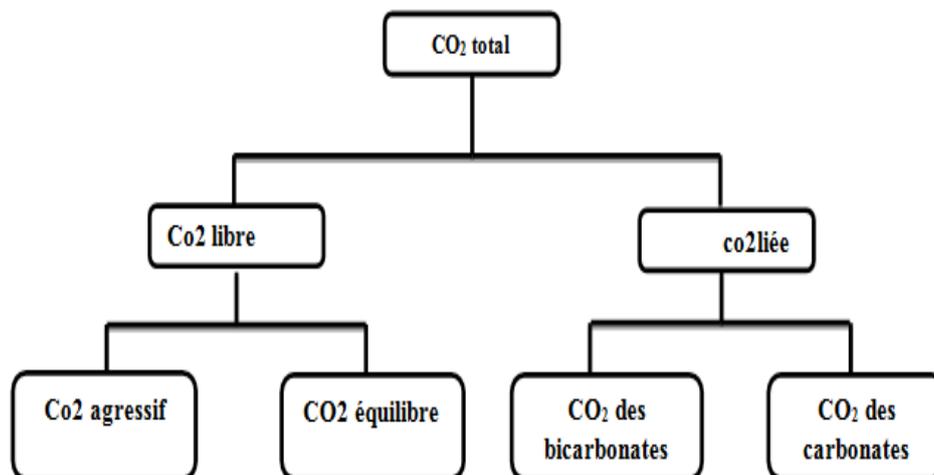


Figure 2.12. Le dioxyde de carbone agressif [3].

### 2.11.5 Effet de la température sur la carbonatation:

La température peut également avoir une influence sur la vitesse de carbonatation. En effet, la carbonatation est d'autant plus rapide que la température est basse. Par contre, la solubilité du dioxyde de carbone diminue quand la température augmente selon la relation empirique suivante [25].

$$S = 5,283 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{2608,2}{T}\right) \dots \dots \dots 2.2$$

où : T en Kelvin

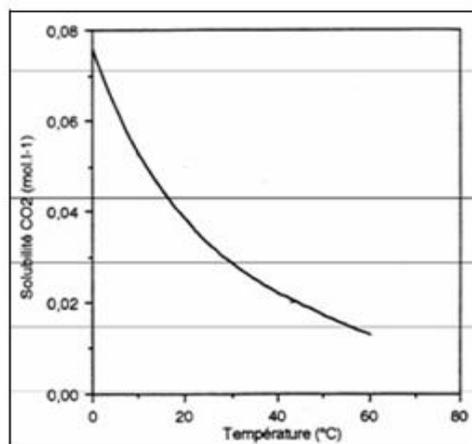


Figure 2.13. Solubilité du CO2 dans l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique ( $P_{CO_2} = 105 \text{ Pa}$ ) [25].

Ainsi, la vitesse de carbonatation semble plus importante en hiver qu'en été. La fréquence de l'exposition au soleil semble sans influence sur les profondeurs de carbonatation [25]. La température la plus favorable pour un taux maximal de carbonatation est entre 20 à 25°C. Contrairement, d'autres recherches montrent que la pénétration du gaz carbonique augmente avec l'augmentation de température jusqu'à 60°C (à la pression atmosphérique). De ce fait l'augmentation de la température favorise la solubilité du CO2 dans l'eau. Au dessus de 60°C, la solubilité du CO2 diminue.

D'autre part, la réaction de carbonatation est exothermique et la chaleur dégagée favorise la formation du  $\text{CaCO}_3$ . Des auteurs montrent que, la réaction de carbonatation est favorisée pour des températures comprises entre 0 et 10°C [29].

### 2.12 La diffusion des ions chlorures:

La diffusion Est la propagation des ions chlores véhiculés par l'eau dans le réseau poreux du béton d'enrobage. Lorsqu'ils atteignent les armatures en quantité suffisante appelée «concentration critique», les aciers vont être dépassivés et la corrosion est amorcée pour se propager ensuite en présence d'oxygène. Ce taux limite est fonction du rapport entre les ions chlores et les ions hydroxydes présents dans la solution interstitielle [KAY 1995] et du traitement de la surface des armatures [30].

#### 2.12.1 Influence de la température d'essai sur la pénétration des ions chlorures dans le béton :

Certains auteurs dont notamment ont utilisé la loi d'Arrhenius (2.3) pour présenter l'évolution du coefficient de diffusion des chlorures en fonction de la température [31 ]:

$$\frac{Deff(T)}{Deff(Tref)} = \exp [be] \left( \frac{1}{Tref} - \frac{1}{T} \right) \dots \dots \dots (2.3)$$

$$[be] = \left( \frac{Ea}{R} \right) \dots \dots \dots (2.4)$$

Deff(T), Deff(Tref) : coefficients de diffusion effectifs respectivement à la température T et à la température de référence Tref [m2/s],

be : paramètre de régression,

T : température d'exposition [K],

Tref : température de référence [K],

Ea : énergie d'activation de diffusion de chlorures [J/mol],

R : constante des gaz parfaits (R=8,314 [J/mol K])

### 2.13 Conclusion :

Le béton est un matériau essentiel dans la composition des ouvrages, il est influe par les agressions chimique et par les problèmes d'incendies, la haute température est l'un des phénomènes influant énormément sur la microstructure de la pâte de ciment, ainsi que l'influence sur les indicateur de durabilité

Dans cette partie on a travaillé sur la reconnaissance du phénomène de haute température et de son effet néfaste sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du béton, et pour cela l'analyse de béton semis à la haute température est nécessaire pour comprendre précisément ce matériau et son comportement.



### 3.1 Introduction :

Il est indispensable de pouvoir caractériser d'une manière très rigoureuse la microstructure des matériaux cimentaires dans le but d'évaluer non seulement leurs propriétés mécaniques mais aussi celle liées à leur durabilité.

La diffusion est un mécanisme de transport de substance dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée. [32]

### 3.2 Transport par diffusion :

Le transport par diffusion est un phénomène irréversible, qui peut intervenir sous deux formes [33]

- **En phase liquide** : concerne la diffusion des constituants en solution dans la phase liquide (les ions chlorures, les sulfates). Elle intervient, par exemple, dans l'attaque par l'eau de mer et la corrosion des aciers d'armature.
- **En phase gazeuse** : concerne, par exemple, la diffusion de la vapeur d'eau dans un béton partiellement saturé ou encore la diffusion de l'oxygène ou du CO<sub>2</sub>

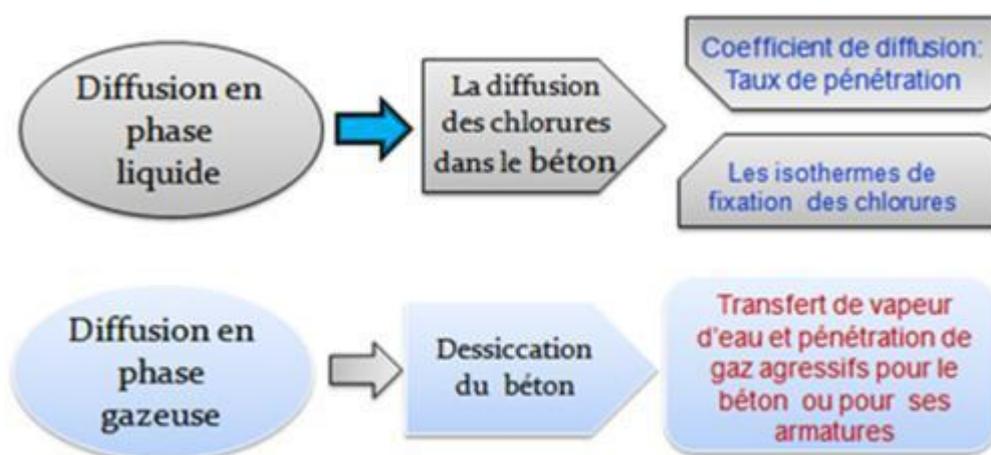


Figure3.1. Schéma représentant les formes de transports par diffusion dans le béton [33].

### 3.3 La pénétration des ions chlorures :

La pénétration des ions chlorures au sein de la structure de béton peut provoquer des déséquilibres significatifs dans la solution interstitielle du béton pouvant initier la corrosion des aciers d'armature. Ce processus peut avoir pour conséquence la détérioration du béton d'enrobage et la diminution de la capacité portante de la structure. Les chlorures que l'on trouve dans la structure interne des bétons peuvent provenir de trois sources différentes :

- Ils peuvent être ajoutés aux constituants d'un mélange lors du malaxage sous forme de  $\text{CaCl}_2$ , dans le but d'accélérer l'hydratation. Ce type d'ajout est très utilisé dans les pays où le climat est rigoureux.
- Ils peuvent être présents sous forme de contaminants dans les granulats ou dans l'eau de gâchage, si, lors de l'enrobage, ils sont exposés à un milieu marin.
- Ils peuvent également pénétrer dans la structure de béton si celle-ci est exposée à des sels fondants ou à de l'eau de mer.

Pour que les chlorures puissent contribuer à la corrosion des armatures, ils doivent être libres dans la solution et avoir accès aux barres d'acier. Les chlorures qui ne sont pas fixés chimiquement ou physiquement aux hydrates peuvent migrer à l'intérieur du béton par l'intermédiaire de sa porosité, sous l'effet des variations d'humidité consécutives aux alternances de cycle de séchage mouillage ou sous l'effet de gradients de concentration entre la structure interne du matériau et l'eau de mer, par exemple. Ces chlorures sont ainsi susceptibles d'atteindre, en quantité suffisante, l'armature pour la dépassiver. La vitesse de pénétration des ions chlorures jusqu'au droit des armatures dépend de la porosité de béton. Elle décroît avec le rapport E/C et en fonction de la concentration en sels de la solution interstitielle.

### 3.4 Diffusion des ions chlorures dans le béton :

Le déplacement des ions chlorures dans le réseau poreux du béton se fait par divers processus tels que les suctions capillaires, la diffusion voire la convection. Nous avons étudié ici le cas d'un milieu saturé où la diffusion des ions chlorures est donc le mécanisme dominant. Ce phénomène se produit dans la solution contenue dans les pores du béton lorsqu'un gradient de potentiel chimique existe. Les ions diffusent alors dans le sens des potentiels décroissants

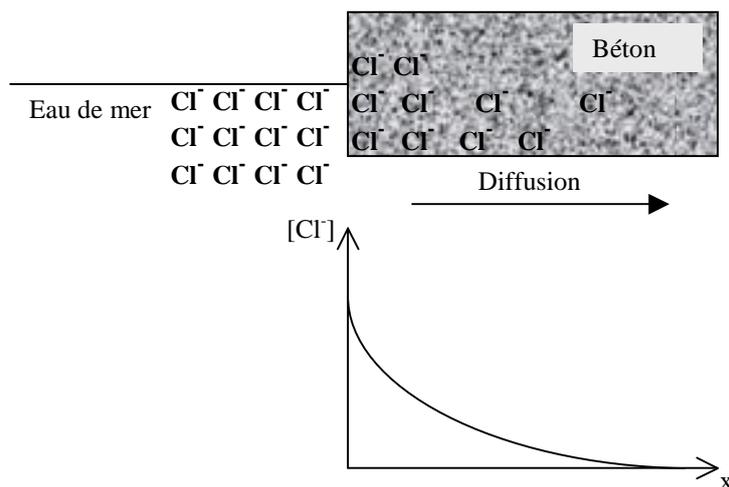


Figure 3.2. Représentation schématique de la diffusion des ions chlorures dans le béton [3].

Ce processus diffusionnel est accompagné d'un phénomène d'interaction entre les chlorures et la pâte de ciment hydraté. Sa prise en compte dans les équations de transport est essentielle à la prédiction de la pénétration des chlorures, car les interactions influencent directement la quantité des chlorures libres dans la solution interstitielle du béton. Donc pour prédire la pénétration des ions chlorures dans le béton, il faut non seulement connaître le coefficient de diffusion mais également sa capacité à fixer des chlorures.

### 3.5 Effet de la fissuration sur la pénétration des ions chlorures :

Une fissuration du béton est quasiment inévitable. Les origines de cette (micro)fissuration sont diverses :

-Fissuration dite « fonctionnelle » résultant des sollicitations mécanique en service de tout élément de béton.

-Fissuration qualifié « d'accidentelle », due au retrait thermique, au retrait hydriquegéné ou empêché, aux gradients thermiques, à l'auto dessiccation pour les BHP et BTHP ou encore à l'expansion de produits issus de l'alcali-réaction ou de la corrosion des armatures. Cette fissuration

Peut résulter par exemple d'une formulation ou d'une mise en œuvre (cure) mal adaptée. Une fissuration accidentelle peut aussi provenir d'un problème structurel (augmentation de la charge par exemple).

Les propriétés de transport, telles que la perméabilité aux gaz et aux liquides et le coefficient de diffusion des ions chlorure, peuvent être modifiées par la (micro)fissuration. Ces propriétés varient avec deux paramètres fondamentaux caractérisant le réseau fissural, à savoir le degré d'interconnexion des fissures et leur ouverture. Cependant leur sensibilité respective à ces deux paramètres est différente car la permutation et la diffusion sont régies par deux modes de transport différents.

### 3.6 L'interaction des chlorures dans les bétons :

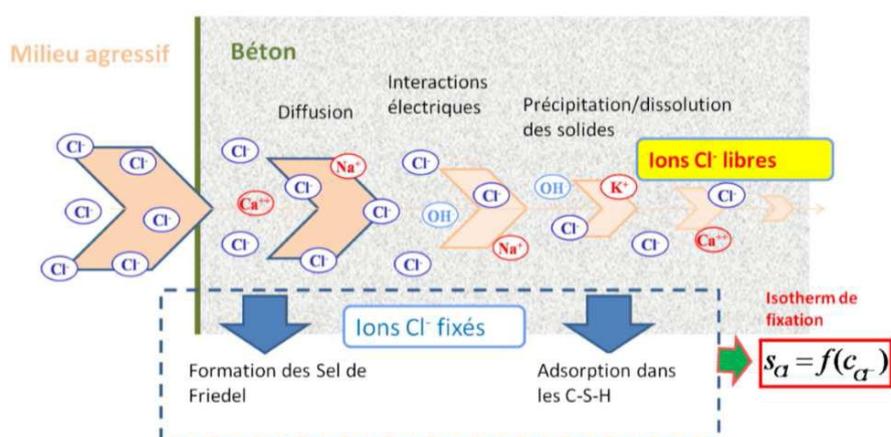


Figure 3.3. Schématisation de la pénétration des ions chlorure dans un béton [34].

Il est bien connu maintenant que lorsque les ions chlorures pénètrent dans le béton, ils sont soit dissous dans la solution des pores en chlorures libres, soit ils interagissent chimiquement et physiquement avec les hydrates du ciment pour donner des chlorures liés. Généralement, la liaison chimique ou chimisorption résulte de la réaction entre les ions chlorures et les composés aluminates ( $\text{C3A}$  et  $\text{C4AF}$ ) de la matrice cimentaire du béton ainsi que leurs produits d'hydratation pour former une phase solide complexe à base de chlorure connu sous le nom de sel de Friedel (Arya et col., 1990). Physiquement, la liaison est associée essentiellement aux forces électrostatiques qui maintiennent des ions chlorures à la surface du gel C-S-H (Tang et Nilsson, 1993). A priori, quel que soit l'origine physicochimique des interactions citées précédemment, la cinétique de fixation semble être, quant à elle, très rapide devant les processus de diffusion, et peut affecter la durabilité du béton [34].

### 3.7 Effets de l'eau de mer sur la durabilité des bétons :

Les environnements marins des ouvrages construits en béton conventionnel sont parmi les milieux naturels les plus agressifs vis-à-vis des matériaux cimentaires. En effet, les ions chlorures contenus dans l'eau de mer pénètrent dans le béton par diffusion ou par capillarité lors de phénomènes tels que les marées. La présence de ces ions agressifs dans la solution interstitielle du béton, peut conduire à la formation de précipités, la dissolution ou la modification de la structure de certaines phases, au sein de la matrice cimentaire (Duval, 1992). De plus, s'ils atteignent une certaine concentration limite, ils peuvent altérer la protection des aciers assurée par le béton, en provoquant la corrosion par piqûres à la suite de la réaction entre les ions chlorures et l'acier. Ce qui engendre par conséquence l'éclatement du béton d'enrobage et une instabilité de l'ouvrage en béton armé.

Cependant, les conditions environnementales (immersion totale, marnage, de l'humidité et l'ensoleillement, aspersion, embruns, agressions du vent), les agressions chimiques (les chlorures, les sulfates, les carbonates, les acides), et les impacts physico-mécaniques (gel, vagues), peuvent affecter la durabilité du béton exposé à l'eau de mer, en contribuant en pratique à des mécanismes de dégradations sévères qui peuvent agir simultanément avec des effets synergétiques comme l'illustre la figure 3.4 [35]

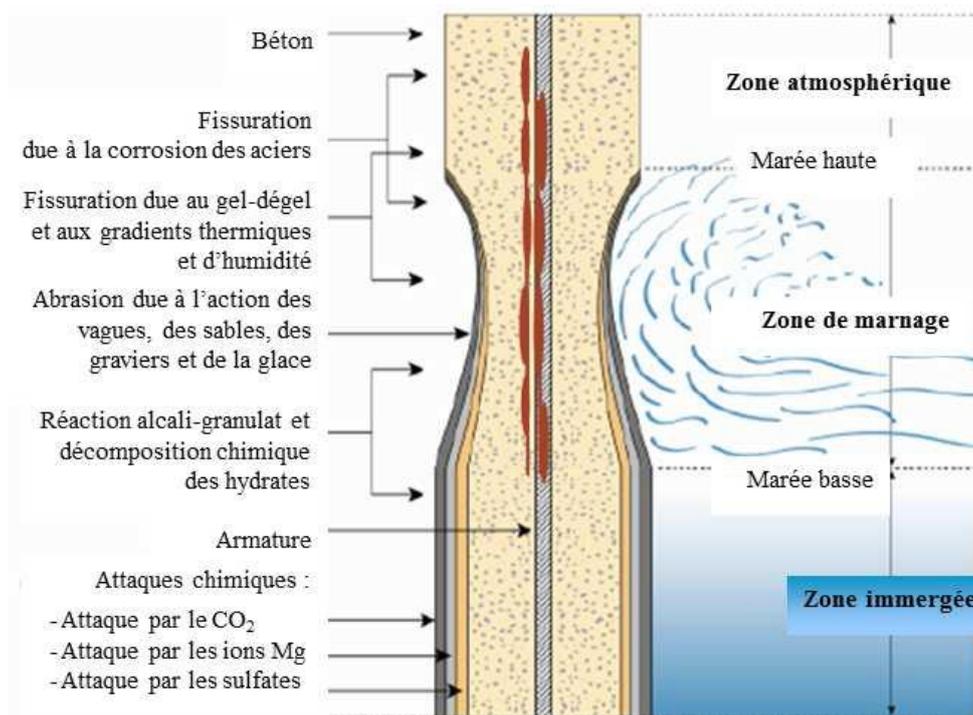
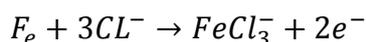


Figure 3.4. Processus de dégradation des bétons par l'eau de mer (Mehta, 1986) [3].

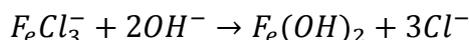
### 3.8 Corrosion en présence d'ions chlorure :

Dans le cas de la corrosion amorcée par les ions chlorure, la dépassivation des aciers est initiée lorsque le front de pénétration des chlorures a traversé le béton d'enrobage et atteint le premier lit d'armatures en quantité suffisante pour détruire la couche passive. La corrosion devient alors possible lorsque leur concentration dépasse un certain seuil, appelé concentration critique et noté  $C_{crit}$ . Le processus de corrosion diffère un peu de celui qui s'initie après carbonatation : la corrosion s'amorce par phénomène de piquûre après la formation de micro piles. Selon Sandberg, ces ions chlorure agissent [36] :

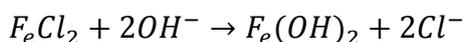
Par la formation des ions  $FeCl_3^-$  ou  $FeCl_2$ , à partir des réactions :



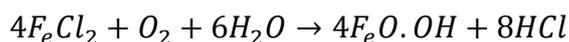
Ensuite, les ions formés consomment les hydroxydes présents, selon les réactions :



et en l'absence d'oxygène en quantité suffisante



ou, en présence d'oxygène en quantité suffisante



Cette réaction montre d'une part que les ions chlorure sont « recyclés » en permanence, et d'autre part que la consommation des ions  $OH^-$  entraîne une diminution du pH au niveau de l'interface acier/béton.

les produits de corrosion formés sont principalement constitués de :

- composés amorphes, tels que  $Fe(OH)_3$  et  $FeO.OH$ , de l'ordre de 55 à 65 % ;
- composés cristallins, tels que la magnétite ( $Fe_3O_4$ ), la goethite ( $\alpha-FeO.OH$ ) et la lépidocrocite ( $\gamma-FeO.OH$ ) de l'ordre de 30 % ;
- d'autres types de composés hydratés.

Les données de la littérature ne sont pas tout à fait homogènes vis-à-vis de la nature et de la microstructure des produits de corrosion formés suite à une initiation de la corrosion par les chlorures. Mais l'ensemble de la communauté scientifique s'accorde sur l'existence d'une concentration critique en chlorures à atteindre pour permettre la dissolution de la couche passive

### 3.9 L'amorçage et la propagation :

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives [37] (figure 3.5) : une phase d'incubation (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, due à des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton, sans aucune constatation visible à l'échelle macroscopique, cette phase s'arrête lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un volume critique provoquant un gonflement néfaste du béton ou lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion

Une phase de développement (dite parfois de propagation) est celle où les dégradations du matériau sont visibles. Cependant, si l'enrobage est chimiquement modifié, l'acier se recouvre de produits " intermédiaires " qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits " finaux " non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier. C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai

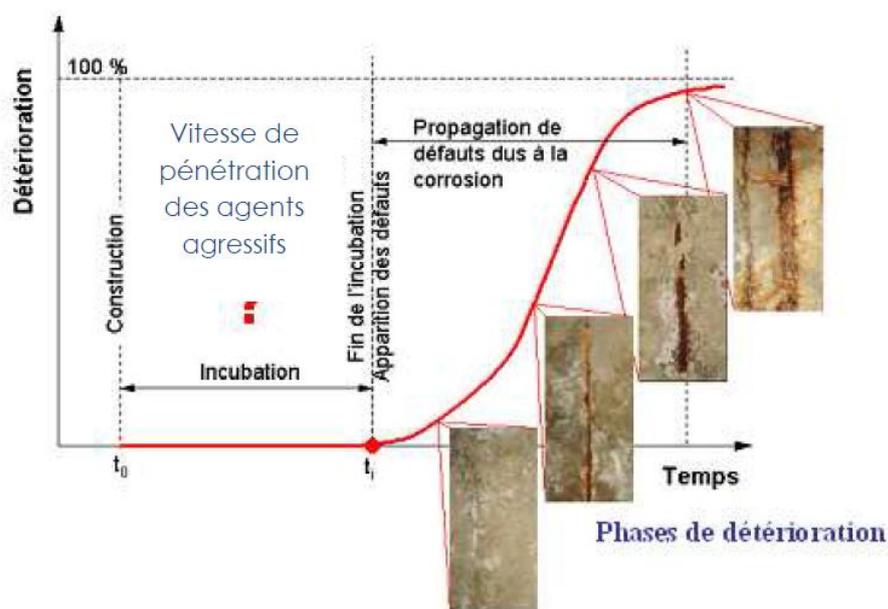


Figure3.5. Evolution du niveau de corrosion des armatures en fonction du temps (Bamforth, 1997) [3].

### 3.10 Etat des chlorures :

Comme pour l'eau, les chlorures peuvent se trouver sous plusieurs formes dans le béton. On distingue : les chlorures libres, les chlorures fixés et les chlorures cristallisés.[38]

- Les chlorures libres

Ils représentent la part des chlorures qui peuvent se déplacer dans la solution interstitielle par processus de diffusion. Ils sont considérés comme les principaux acteurs du processus de corrosion des armatures, une fois ils atteignent une concentration critique.

- Les chlorures fixés

Ils représentent la part des chlorures piégés par la matrice cimentaire. Ce piégeage peut être aussi bien physique que chimique. Ils dépendent étroitement de la concentration de la solution saline, de la porosité du matériau et de son taux en C3A.

- Les chlorures cristallisés

Ils caractérisent la limite de solubilité de cristaux dans la solution interstitielle. Il y a donc possibilité de précipitation de sels dans le réseau.

### 3.11 Coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton :

La mesure du coefficient de diffusion des ions chlorure au sein des matériaux cimentaires peut s'effectuer par plusieurs méthodes soit par essai de diffusion ou de migration en appliquant un champ électrique pour accélérer la pénétration des ions. Pour ces deux méthodes le coefficient de diffusion peut être évalué en régime non stationnaire ou en régime stationnaire

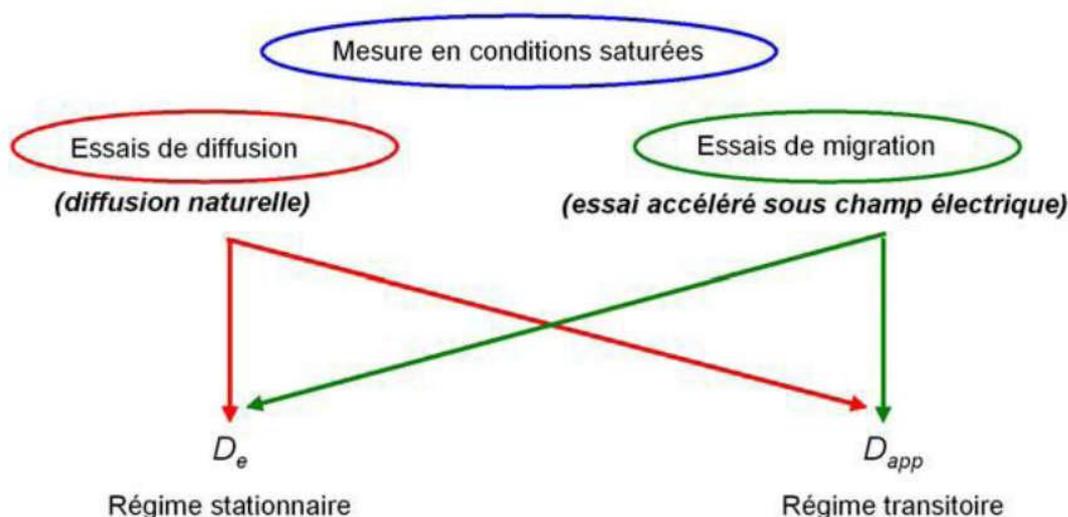


Figure 3.6. Organigramme des méthodes de mesure du coefficient de diffusion des chlorures [3].

### 3.11.1 Le régime stationnaire ou permanent :

Considéré lorsque les interactions entre la matrice cimentaire et les ions chlorures on atteint l'équilibre et n'interfèrent plus sur le flux des ions chlorures traversant le béton. Le coefficient de diffusion du béton est, dans ce cas, désigné effectif ( $D_{eff}$ ) et déterminé à partir de ce flux constant d'ions chlorures en application de l'équation de Nerst-Planck [39].

#### 3.11.1.1 Diffusion en régime stationnaire :

Dans ce type d'essai, le flux de pénétration des ions chlorures devient constant et s'effectue à travers la solution interstitielle contenue dans les pores. Le coefficient de diffusion effectif peut être obtenu à partir de l'équation

$$D_{diff} = - \frac{j d}{\frac{\partial c_f}{\partial x}} \dots \dots \dots 3.1$$

Avec :

$c_f$  : concentration en chlorures libres par unité de masse de solution,

Si on prend en considération la structure poreuse du béton, l'équation devient :

$$\frac{D_{diff}}{p} = - \frac{1}{p} \frac{j d}{\frac{\partial c_f}{\partial x}} \dots \dots \dots 3.2$$

Où  $p$  : porosité du béton

Afin de caractériser la diffusion des ions chlorures dans la solution au niveau des pores du béton, on peut définir le coefficient de diffusion intrinsèque noté par la relation suivante :

$$D_x = \frac{De\ diff}{p} \dots\dots\dots 3.3$$

Le coefficient de diffusion peut être directement obtenu à partir d'un essai de diffusion en régime stationnaire, en appliquant la première loi de Fick. Il est à préciser que ces essais sont particulièrement longs et deviennent donc impraticables avec des matériaux peu poreux.

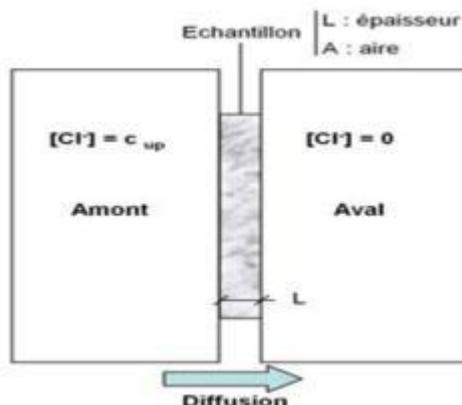


Figure 3.7. Schéma d'une cellule de diffusion [40].

Ces essais consistent à déterminer la quantité d'ions chlorures qui traversent un échantillon du compartiment amont au compartiment aval. Par dosages chimiques réguliers du compartiment aval, on doit mesurer à chaque fois le flux de chlorures ayant traversé l'échantillon.

Du fait de l'appauvrissement du compartiment amont et de l'enrichissement du compartiment aval en chlorures, un renouvellement des solutions amont et aval est généralement réalisé lors des prélèvements effectués pour doser les chlorures. Les conditions aux limites sont ainsi maintenues les plus stables possibles [40].

La partie linéaire de la courbe représentée sur la figure 3.8, représente le régime permanent au bout d'un certain temps d'essai. Nous pouvons ainsi calculer le coefficient de diffusion effectif en utilisant la première loi de Fick.

$$D_{diff} = \frac{L}{cP} Jd \dots\dots\dots 3.4$$

Le flux des ions chlorures J est exprimé par l'équation

$$Jd = \frac{Dcf}{t} \dots\dots\dots 3.5$$

Avec :

Jd : flux effectif en régime stationnaire (mol/m<sup>2</sup>.s)

## Chapitre03 : La diffusion des ions chlorures

$D_{ediff}$  : coefficient de diffusion ( $m^2/s$ ) (représente la pente de la partie linéaire de la courbe)

$C_p$  : concentration de l'espèce diffusante ( $mol/m^3$ ),

$L$  : épaisseur de l'échantillon (m),

$\Delta c$  différence de concentration des ions chlorures traversant la section apparente du matériau pendant l'intervalle de temps  $t$

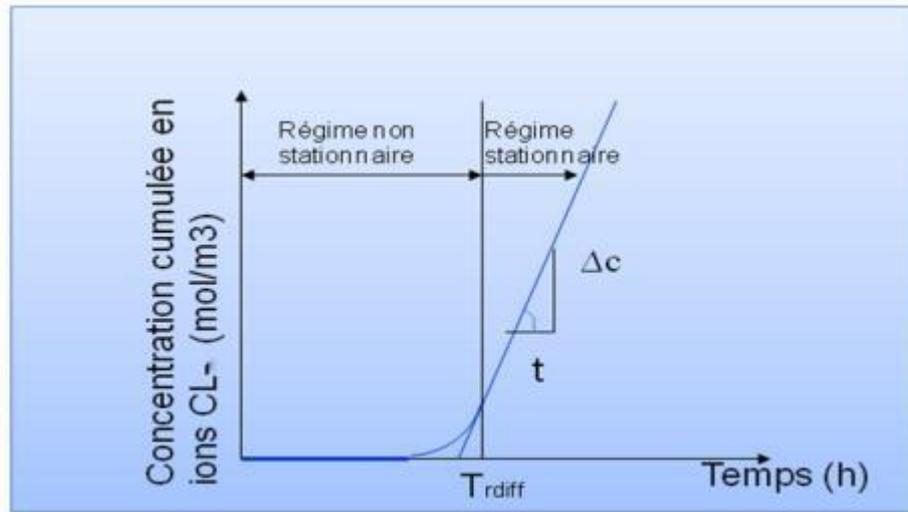


Figure 3.8. Evolution de la concentration cumulée en ions chlorures dans le compartiment aval en fonction du temps [40].

La durée de cet essai dépend de l'épaisseur de l'échantillon et des caractéristiques du béton à savoir :

- le type de ciment,
- le rapport E/C,
- la taille des granulats.

La durée de la phase du régime stationnaire est évaluée suivant le temps de retard  $T_{rdiff}$ . La quantité cumulée des ions chlorures  $Q(t)$  diffusée dans le compartiment aval, exprimée par la relation (3.6), est obtenue à partir de la première loi de Fick et de l'équation de conservation de la matière [40].

$$\frac{Q(t)l}{C_0} = D_{ediff} f t - \frac{\alpha L^2}{6} - \frac{2\alpha L^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-D_{ediff} \frac{n^2 \pi^2}{\alpha L^2}\right) \dots\dots\dots 3.6$$

Avec :

$\alpha$  : facteur de retard qui dépend des isothermes d'interaction.

## Chapitre03 : La diffusion des ions chlorures

---

Cette quantité cumulée présente donc une asymptote linéaire en fonction du temps et on peut l'écrire, lorsque le régime est stationnaire (t suffisamment grand) :

$$\frac{Q(t)l}{c_0} = D_{ediff} t - \frac{\alpha L^2}{6} \dots\dots\dots 3.7$$

Le temps de retard  $T_{rdiff}$  s'écrit :

$$T_{rdiff} = \frac{\alpha L^2}{6D_{ediff}} \dots\dots\dots 3.8$$

L'interprétation des résultats de l'essai de diffusion en régime stationnaire repose sur quelques hypothèses :

- la différence de concentration entre le compartiment amont et aval reste constante au cours de l'essai,
- il n'y a pas de potentiel local induit par les particules chargées,
- il n'y a pas d'interaction entre les flux des différents ions,
- l'activité ionique de la solution est négligeable.

Compte tenu de la durée d'essai qui peut atteindre plusieurs années pour les bétons, cet essai est réservé aux pâtes de ciment et aux mortiers [41].

Pour diminuer la durée de l'essai de diffusion, deux possibilités sont envisageables :

- augmenter le gradient de concentration,
- Et/ou évaluer le coefficient de diffusion en régime transitoire

### 3.11.2 Le régime transitoire

Au cours duquel les interactions entre la matrice cimentaire et les ions chlorures sont en évolution et interfèrent sur le flux des ions chlorures traversant le béton. Le coefficient de diffusion du béton est, dans ce cas, désigné apparent ( $D_{app}$ ). Ce dernier est déterminé à partir de la profondeur du front de pénétration des ions chlorures dans l'échantillon du béton suivant la méthodologie proposé par L. Tang [39].

### 3.11.2.1 Diffusion en régime transitoire :

Les chlorures peuvent interagir avec la matrice cimentaire. Dans un volume d'échantillon donné de béton, la concentration totale  $C_t$  en chlorure est définie par :

Avec :

$$C_t = P c_f + (1-p) \varphi_s c_b \dots\dots\dots 3.10$$

$\varphi_s$ : masse volumique du solide,

$C_b$  : concentration en chlorures liés à la matrice par unité de masse du matériau.

Ces interactions qui privent les chlorures de tout mouvement par rapport à la matrice cimentaire, résultent d'interactions physiques et chimiques :

- Les interactions physiques : adsorption de chlorures sur la surface de la phase solide C-H-S
- Les interactions chimiques : formation des sels de Friedel ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2, 10\text{H}_2\text{O}$ )

En utilisant la relation (3.10), l'accroissement du diffusant en fonction du temps est définie par l'équation de conservation suivante :

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\partial J_d}{\partial x} = D_{ediff} \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} \dots\dots\dots 3.11$$

En remplaçant l'équation (3.10) dans (3.11), on obtient la 2ème loi de Fick :

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{D_{ediff}}{p + (1-p) \rho \frac{\partial c_b}{\partial c_f}} \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} = D_{adiff} \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} \dots\dots\dots 3.12$$

Avec :

$D_{adiff}$ : Coefficient de diffusion apparent déterminé en régime non stationnaire ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),

$\frac{\partial c_b}{\partial c_f}$  : Capacité de fixation du béton.

Le facteur de retard  $\alpha$  est exprimé par la relation suivante :

$$\alpha = p + (1 - p) \rho \frac{\partial c_b}{\partial c_f} \dots\dots\dots 3.13$$

Le coefficient de diffusion apparent est exprimé alors par :

$$D_{adiff} = \frac{D_{ediff}}{\alpha} \dots\dots\dots 3.14$$

L'étude de la diffusion en régime transitoire consiste à placer un échantillon de béton saturé en immersion dans une solution à forte concentration en chlorures. L'éprouvette est placée dans une enceinte fermée de telle sorte qu'une seule face soit en contact avec la solution saline. Les autres faces sont recouvertes de résine ou de papier aluminium adhésif. La température est maintenue constante ( $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

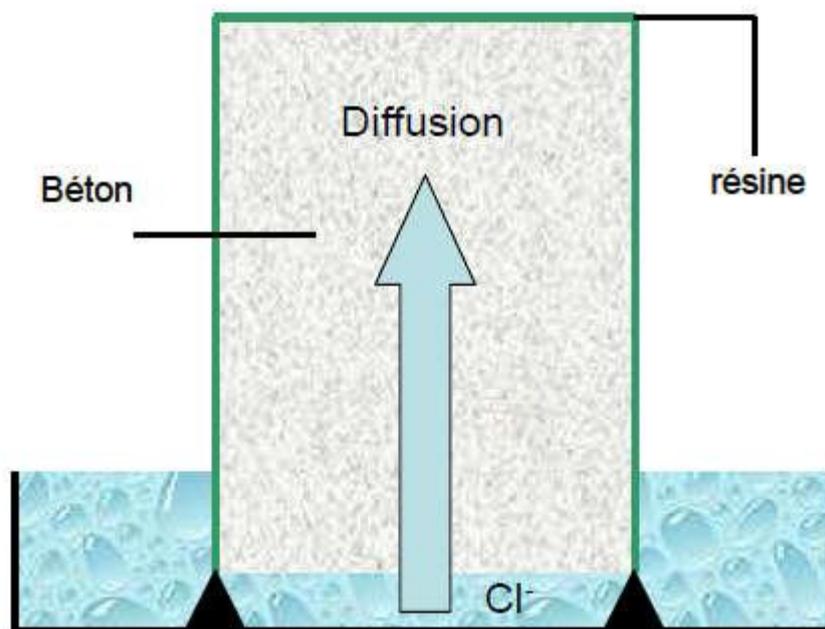


Figure 3.9. Schéma de Principe de l'essai d'immersion [42].

A une échéance donnée, l'éprouvette est sortie de l'enceinte et des prélèvements (parallèlement à la surface exposée) sont effectués à diverses profondeurs, afin de récolter des échantillons sous forme de poudre pour mesurer après les concentrations. A partir de ce profil, la solution analytique de la seconde loi de Fick en milieu semi-infini est ajustée au profil expérimental (figure 3.9) où trois paramètres de calage sont nécessaires dont le coefficient de diffusion recherché.[42]

Le coefficient de diffusion apparent  $D_{diff}$  (en  $m^2 s^{-1}$ ) est déterminé à partir de l'équation (3.15). Solution particulière de la seconde loi de Fick, cette relation relie « la racine carrée de la concentration en chlorure libres » à la profondeur :

$$C(x, t) = (C_i - C_s) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{diff}t}}\right) \dots 3.15$$

Avec :

$C(x,t)$  : quantité de chlorures totaux (mol/kg de béton) au temps  $t$  (s) et à l'abscisse  $x$  (m),

$C_s$  : concentration en surface de l'échantillon (mol/kg de béton),

$C_i$  : concentration initiale dans l'échantillon (mol/kg de béton),

$D_a$  : coefficient de diffusion apparent ( $m^2/s$ ),

$t$  : durée de l'immersion (s),

$x$  : profondeur de pénétration (m),

erf : fonction erreur.

Du fait que l'équation (3.15) est une solution de la seconde loi de Fick qui caractérise une diffusion pure sans interaction chlorures-matrice, le coefficient de diffusion  $D_{diff}$  doit être préférentiellement déterminée même si les résultats obtenus à partir des deux types de chlorures sont voisins [41].

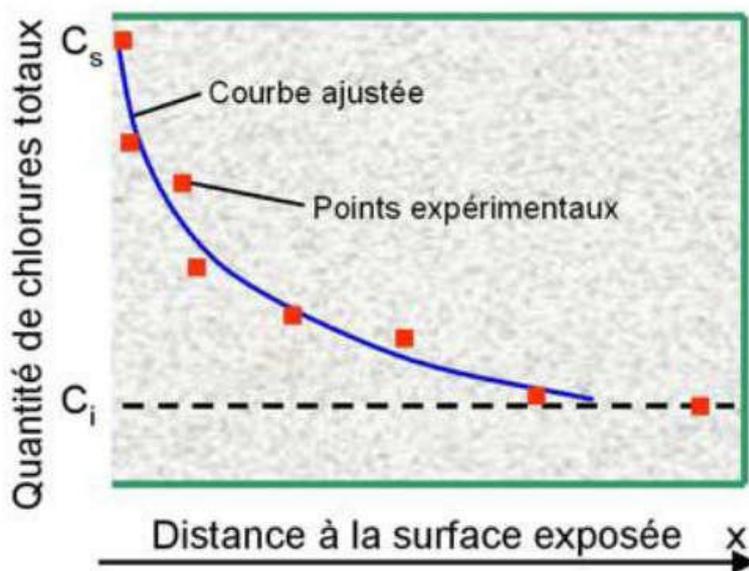


Figure3.10. Profil en chlorures dans le béton après immersion [41].

### 3.11.3 La migration :

La migration désigne le transport des ions sous l'influence d'un champ électrique. Il s'agit aussi d'une généralisation du transport par diffusion.

Dans une solution pure, sous l'action d'un gradient de potentiel électrique, les ions migrent avec une vitesse moyenne  $v_m$  :

$$v_m = u \frac{\partial \phi}{\partial x} \dots\dots 3.16$$

La mobilité de l'ion considéré,  $u$  peut être évaluée selon la relation d'Einstein

$$u = D \frac{ZF}{RT} \dots\dots 3.17$$

Avec :

$D$  : coefficient de diffusion de l'ion considéré dans une solution infiniment diluée,

$Z$  : valence de l'ion considéré,

$F$  : constante de Faraday (96480 j/v.mol).

C'est une hypothèse forte car cette relation est bien respectée pour les solutions très diluées ; ce qui n'est pas le cas pour une solution contenue dans les pores du béton ou par exemple l'eau de mer.

Si  $n$  : densité d'ions chlorures contenues dans la solution,

## Chapitre03 : La diffusion des ions chlorures

$\Delta t$  : intervalle de temps pendant les quelles les ions chlorures passent à travers l'aire S,  
( $Sv_m\Delta t$ ).n : est alors le nombre d'ions passés à travers la section S.

$J_m$  : le flux des ions chlorures passant à travers cette aire S peut s'écrire :

$$J_m = \frac{(Sv_m\Delta t)n}{A\Delta t} = nv_m \quad \left(\frac{\text{nombre } Cl^-}{m^2 \text{ sol.s}}\right) \dots\dots 3.18$$

En mettant les équations (3.16) et (3.17) dans l'équation (3.18), nous avons :

$$J_m = Cf \cdot D \frac{Zf \cdot \partial\phi}{RT\partial x} \quad \left(\frac{\text{Kg } Cl^-}{m^2 \text{ sol.s}}\right) \dots\dots 3.19$$

Supposant que le champ électrique est constant :

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{E}{L} \dots\dots 3.20$$

D'où :

$$J_m = D \frac{ZFE}{RTL} Cf \dots\dots 3.21$$

Le flux d'ions dans la solution contenue dans les pores du béton est :

$$J_{om} = D_x \frac{ZFE}{RTL} Cf \dots\dots 3.22$$

Avec :

$J_{om}$ : flux à travers une unité d'aire de solution.

### 3.11.3.1 Migration en régime stationnaire :

Pour évaluer le coefficient de diffusion en régime stationnaire Demig, la méthode expérimentale est similaire à celle de l'essai de diffusion mais avec application d'un champ électrique. [43] Lors de l'essai de migration la pénétration des ions chlorures s'effectue par deux processus, par diffusion sous l'effet du gradient de concentration décrit par l'équation (3.17) et par migration sous l'effet d'un champ électrique décrit par l'équation (3.18). La relation de Nernst Planck I. présente une combinaison de ces deux processus, dans le cas d'un béton saturé :

$$J = -D \frac{\partial Cf}{\partial x} + VCf \dots\dots 3.23$$

Avec :

$$V = \frac{Z_{Cl}FE}{RTL} D \quad (\text{diffusion due au champ électrique}) \quad 3.24$$

En régime stationnaire, le flux d'ion est constant, l'application d'un champ électrique suffisamment important supérieur à 10V permet de négliger le terme relatif à la diffusion naturelle par rapport aux flux dû au champ électrique. De ce fait, le coefficient de diffusion Demig est déterminée par la relation (3.15), si on considère que la concentration est

indépendante du temps et de l'espace et la concentration contenue dans les pores du béton reste constante et égale à  $C_0$  :

$$D_{emig} = \frac{RLT}{zFEc_0} J \dots\dots 3.25$$

Pour maintenir les conditions aux limites constantes, il faut éviter la diminution de la concentration des ions chlorures dans la solution amont pendant l'essai, soit :

- en augmentant le volume du compartiment amont afin qu'il soit suffisamment grand,
- que le temps d'essai doit être relativement court.

Plusieurs méthodes permettent d'obtenir le flux d'ions chlorures à travers le béton

### 3.11.3.2 Migration en régime transitoire :

Le processus en régime non stationnaire est défini par :

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = - \frac{\partial J_m}{\partial x} = -D_{amig} \frac{zFE}{RTL} \frac{\partial C_f}{\partial x} \dots 3.26$$

En insérant l'équation (I.19) dans (I.35), on obtient :

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = t \frac{D_{amig}}{p+(1-p)\rho_s \frac{\partial c_b}{\partial C_f}} \frac{zFE}{RTL} \frac{\partial C_f}{\partial x} = X D_{amig} \frac{zFE}{RTL} \frac{\partial C_f}{\partial x} \dots\dots\dots 3.27$$

Avec :

$D_{amig}$  : coefficient de diffusion apparent obtenu en régime non stationnaire par essai de migration ( $m^2/s$ ).

Tang et Nilson [43] ont développé un test rapide appelé CTH Rapid Method qui permet d'évaluer le coefficient de diffusion apparent durant l'essai de migration. Le principe consiste à déterminer ce coefficient sur une éprouvette de 50 mm d'épaisseur dont la surface extérieure est recouverte d'une bande scellante de 150 mm de largeur. Cette bande scellante doit dépasser de 100 mm les cotés de l'éprouvette pour retenir 150 ml de solution d'eau saturée en  $Ca(OH)_2$  lors de l'essai. L'éprouvette scellée est d'abord immergée dans une solution contenant 3% de NaCl et saturée en  $Ca(OH)_2$  (Figure 3.11). Une différence de potentiel de 30 V est appliquée à travers le cylindre pour un temps donné, pendant lequel on enregistre la température de la solution et le courant électrique. Après l'essai, le cylindre est scié en deux le long de leur axe longitudinal pour mesurer la profondeur de pénétration des ions à l'aide de la technique de colorimétrie au nitrate d'argent.

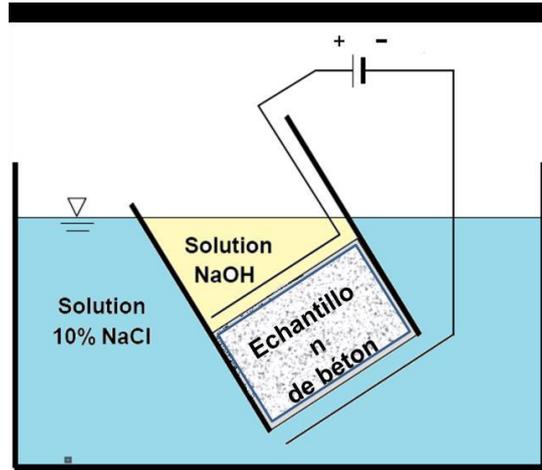


Figure3.11. Schéma de principe de la cellule de migration conçue par Tang et Nilson [43].

En considérant le processus de migration unidirectionnel ; la variation de concentration en fonction de la profondeur  $x$  donne le profil de concentration théorique (figure I.13). Pour chaque profondeur limite des chlorures  $X_d$  et pour un temps donné, le profil de concentration possède un point d'inflexion  $X_f$  dont l'expression est tirée de l'équation suivante :

$$X_f = X_d - X\sqrt{X_d} \dots 3.28$$

Avec :

$x_d$  : concentration limite de l'indice colorimétrique.

$$X = 2 \sqrt{\frac{RLT}{zFE}} \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2cd}{c_0}\right) \dots\dots\dots 3.29$$

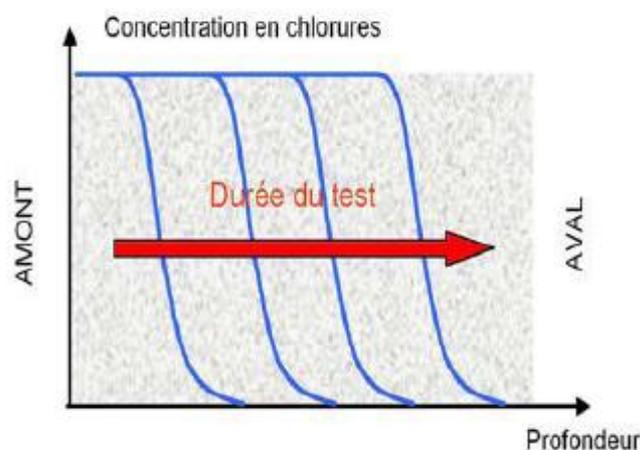


Figure 3.12. Allure du profil de concentration selon Tang et Nilson [43].

Pour une durée de test  $t$ , le front de pénétration des chlorures se déplace jusqu'à une profondeur  $xf$  et la concentration en chlorures libres de ce front ne peut pas dépasser  $C_0$  (concentration de la solution contenue dans les pores du béton). La relation (3.27) devient :

$$D_{amig} = \frac{D_{amig}}{p+(1-p)\rho \frac{\int_0^{cb} dch}{s \int_0^{\gamma bc_0} dcf}} = \frac{RLT \int_0^x dx}{zFE \int_0^t dt} \dots\dots 3.30$$

$$D_{amig} = \frac{D_{amig}}{p(1-p)\rho \frac{cb}{s \gamma bc_0}} = \frac{RLT xF}{zFE t} \dots\dots 3.31$$

### 3.12 Conclusion :

La diffusion des ions chlorures dans le béton, est en effet un phénomène complexe à cerner à cause du comportement aléatoire des ions et de sa dépendance de plusieurs paramètres intrinsèques et extrinsèques. L'étude de ce phénomène de transfert à base de modèle mathématique dans différents régimes soit en mode stationnaire ou transitoire basés sur des phénoménologies observées expérimentalement, nous permet d'une part, de bien comprendre le comportement du béton face aux attaques des ions chlorures et d'autre part de prédire sa durabilité.

### **4.1 Introduction :**

L'objet de ce chapitre est la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des bétons étudiés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimentale.

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures

Nous avons fait plusieurs essais d'identification pour : la masse volumique apparente , la masse volumique absolue , l'analyse granulométrique des granulats, et l'équivalence de sable.

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région d'Aine Témouchent.

### **4.2 Les matériaux utilisés sont :**

- Le sable de mer
- Sable de carrière 0/5
- Gravière 3/8
- Le ciment
- La pouzzolane
- Adjuvant super plastifiant
- Eau de gâchage

#### **4.2.1 Le ciment :**

Le ciment utilisé est de type CPJ CEM II/A 42.5 (norme Algérienne NA 442), conditionné en sac de 50 Kg, de BENI-SAF. La composition chimique, les caractéristiques physiques, et la composition minéralogique du ciment sont portées sur les tableaux ci-dessous.



Figure 4.1 Le ciment utilisé.

Tableau 4.1 Composition chimique du ciment CPJ CEMII /A 42.5

Sio <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Perte au feu	Insolubles	Total
26.65	56.80	5.52	3.22	1.03	2.45	2.42	7.73	99.59

Tableau 4.2 : Composition minéralogie du ciment CPJ CEMII/A42.5

C3S	C2S	C3A	C4AF	CAO Libre
51.74	24.50	8.78	10.51	0.91

#### 4.2.2 Sable :

Le sable utilisé dans la fabrication des bétons hydraulique étudiés est un sable naturel 0/2 (SN) provient du site de Terga, sa nature minéralogique est siliceuse notamment dans ses fractions les plus fines. Ce sable est propre avec des grains généralement isométriques et arrondis. Il est séché et criblé offrant ainsi toutes les garanties de qualité et de régularité.



figure 4.2 sable de mer

#### **4.2.3 Gravier :**

On a utilisé gravier concassé 3/8 et 0/5 provenant de la carrière d'EL MALEH



Figure 4.3 Sable de carrière 0.5



Figure 4.4 gravier 3.8

#### **4.2.4 La Pouzzolane :**

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de couleur rouge pour substituer une proportion du ciment provient du gisement du Bouhamidi (Béni-Saf), Toute la pouzzolane utilisée comme substituant au ciment est homogénéisée, séchée, concassée et réduite en poudre ( $80\mu$ ) à l'aide d'un micro broyeur et calciné à  $720^{\circ}$

La détermination des caractéristiques physiques et chimiques des pouzzolanes naturelles et artificielles a été réalisée en collaboration avec le laboratoire national des travaux publics d'ouest (LTPO).



Figure 4.5 La Pouzzolane

TABLEAU 4.3 LES COMPOSANT DE LA POUZZOLANE (LABORATOIRE DE LA CIMENTERIE DE BENI SAF)

Composante	Symbole	Teneur %
Silice	SiO <sub>2</sub>	45.21
L'aluminate	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.85
L'oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.84
La chaux	CaO	9.99
La magnésie	MgO	4.38
Les sulfates	SO <sub>4</sub>	NULL
Les chlorures	Cl	NULL
Les oxydes de potassium	K <sub>2</sub> O	1.47
Les oxydes de sodium	Na <sub>2</sub> O	3.23
La perte au feu	PF	2.91
L'anhydrite carbonique	CO <sub>2</sub>	1.76
L'eau de combinaison	H <sub>2</sub> O	3.68
		<b>Totale : 99.98%</b>

TABLEAU 4.4. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA POZZOLANE (LABORATOIRE DE LA CIMENTERIE DE BENI SAF)

Caractéristique Physique	Valeur
Surface spécifique Blaine (B.E.T) (cm <sup>2</sup> /g)	5700
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,75
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,81
Porosité (%)	54,2
Absorption (%)	60
Humidité (%)	2,51

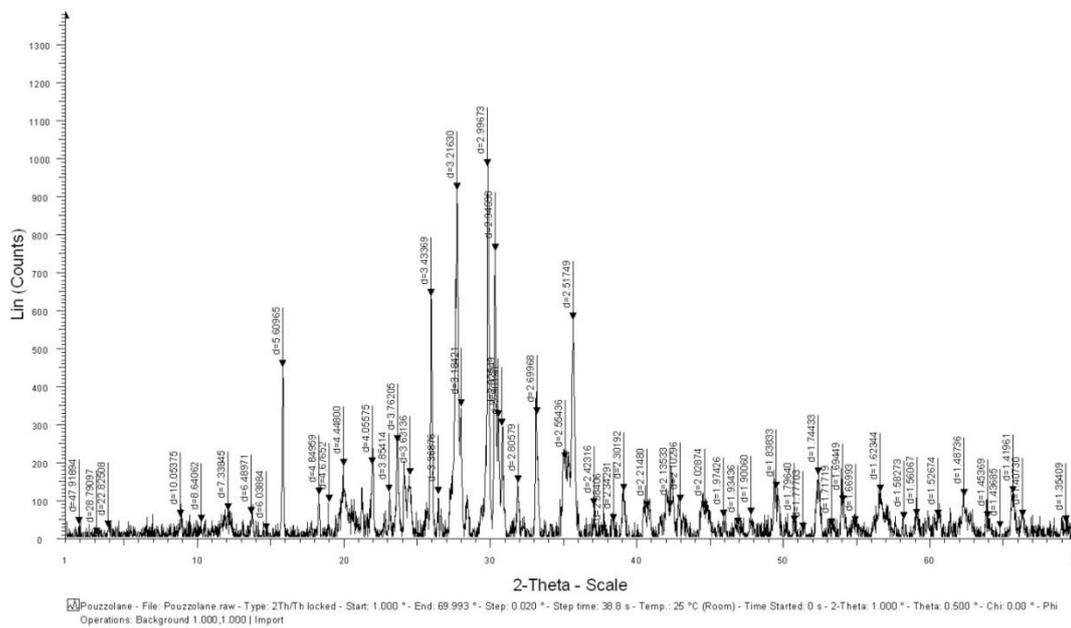


Figure 4.6. Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de la pouzzolane.

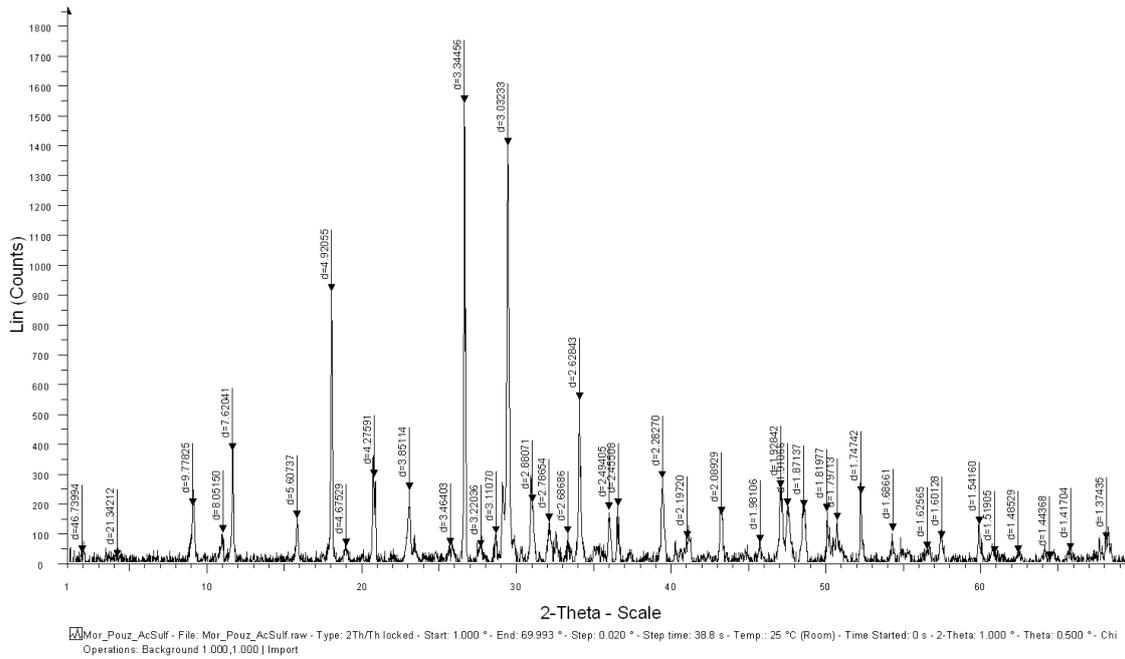


Figure 4.7 Le diagramme diffractométrique de la pouzzolane DRX

#### 4.2.5 L'adjuvant :

L'adjuvant utilisé est **SUPERIOR 9 WG** un super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération .qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits

Il est compatible tous les types de ciment

- **Forme.....Liquide**
- **Couleur.....Brun**
- **PH (20°C).....5.5 (±1)**
- **Densité (g/cm<sup>3</sup>, a20°C)..... 1,10 (± 0.03)**
- **Extrait sec.....33%(±2%)**
- **Teneur en chlorures.....< 0.1%**

#### ➤ **Caractéristiques :**

Le **SUPERIOR 9 WG** est particulièrement recommandé pour la fabrication de béton exigeant :

- Un faible rapport E/C.
- Un long maintien d'ouvrabilité.

- Des performances mécaniques élevées à court et long terme.
- Une diminution du retrait.
- Une imperméabilité.
- Un meilleur parement.
- Une durabilité.

### 4.2.5.1 Domaines d'application :

- Béton à hautes performance.
- Béton pour fondations profondes
- Béton pompé transporté sur de longues distances.

### 4.2.6 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle Permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton.

L'eau utilisée est une eau potable de robinet et prenez garde à ne pas l'ajouter avec excès sous risque les performances de votre béton. En effet, cela pourrait diminuer sa résistance et sa durabilité.

### 4.2.7 Four :

Le type de four utilisé pour le traitement thermique des éprouvettes est Nabertherm modèles N 7/H. les propriétés de cette four est :

- Température maxi: 1280°C
- Volume de la chambre: 7, 11, 17, 31, 41 ou 61 litres
- Régulation et programmeur de température: B 150 mono programme ou C 290 à 9 programmes
- Porte guillotine à ouverture vers le bas.



Figure 4.8 Type de four utilisé

### **4.3 Essai sur matériaux :**

#### **4.3.1 Analyse granulométriques :**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. La distribution en poids suivant la dimension des particules est traduite par une forme numérique ou une courbe granulométrique (une forme graphique). L'analyse granulométrique est réalisée conformément à la norme (EN 933-2).

Les résultats des refus sont exprimés en pourcentage de la masse sèche  $M$  de départ. Ils peuvent être présentés selon l'exemple suivant :

$$R \% = (R_i/M) \times 100 \quad T\% = 100 - R\%$$

- **R** : masse du refus cumulés
- **M** : masse de l'échantillon
- **T** : masse du tamisât cumulés.

**Module de finesse :** Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, c'est le centième de la somme des refus exprimé en pourcentage de poids des tamis de 0.125- 0.25- 0.5- 1-2-4 mm selon la norme Européenne EN 12620.



Figure 4.9 Tamiseuse électrique du laboratoire

#### 4.3.1.1 Analyse granulométrique de sable de mer :

Poids initial d'échantillon Sec : 1000 g

Tableau 4.5 Résultat d'analyse granulométrique du sable de mer

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât %	Module de finesse
2	1	1	0.1	99.9	2.35
1	18	19	1.9	98.1	
0.5	358	377	37.7	62.30	
0.25	584	961	96.1	3.9	
0.125	35	996	99.6	0.4	
0.063	3.6	999.6	99.96	0.04	
Fond	0.2	999.8	99.98	0.02	

Donc : notre sable est un sable préférentielle .

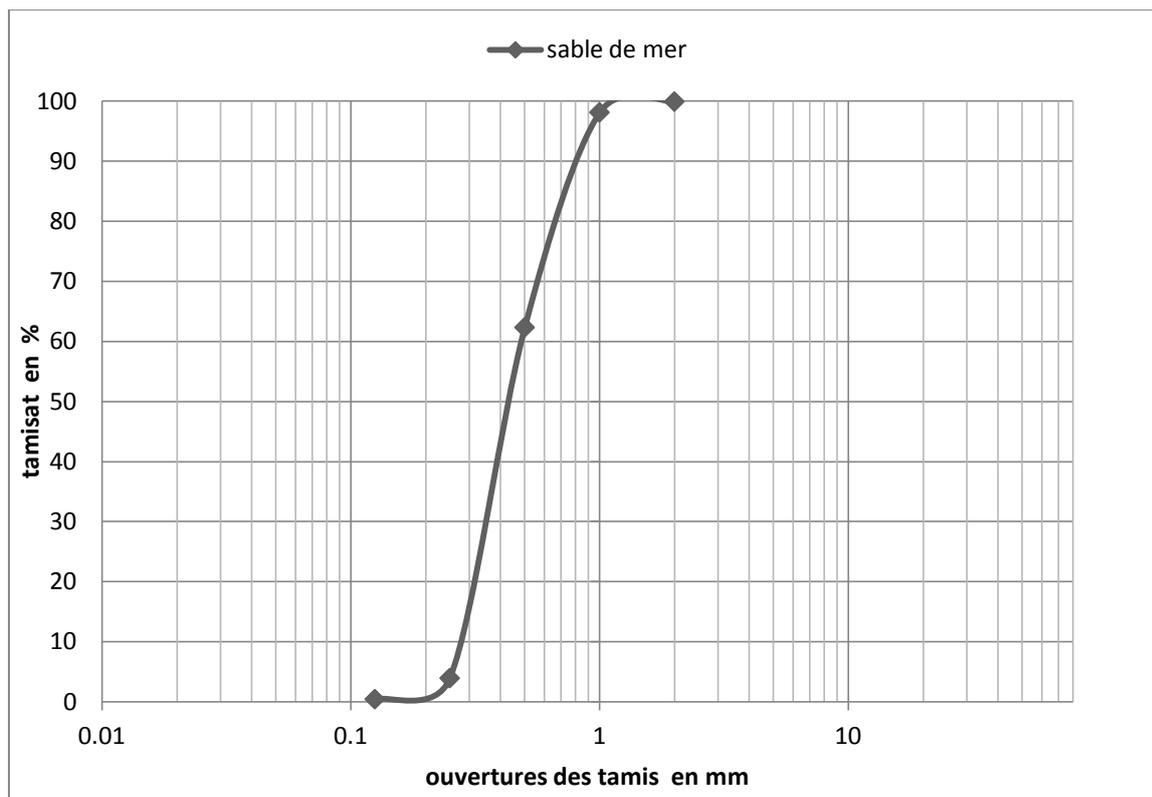


Figure 4.10 Analyse granulométrique du sable de mer

#### 4.3.1.2 Analyse granulométrique de sable carrière 0/5

Poids initial d'échantillon sec : 1000 g

Tableau 4.6. Résultats de l'analyse granulométrique du sable carrière 0/5

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât %	Module de finesse 2.27
4	6.56	6.56	0.656	99.344	
2.5	14.65	21.21	2.121	97.788	
2	30.97	52.18	5.218	94.782	
1	123.27	175.45	17.545	82.455	
0.5	234.38	409.83	40.983	59.017	
0.25	284.33	694.16	69.416	30.584	
0.125	220.53	914.69	91.469	8.531	
0.08	65.28	979.97	97.997	2.003	
Fond	13.35	993.32	99.332	0.668	

Donc notre sable est un sable préférentiel

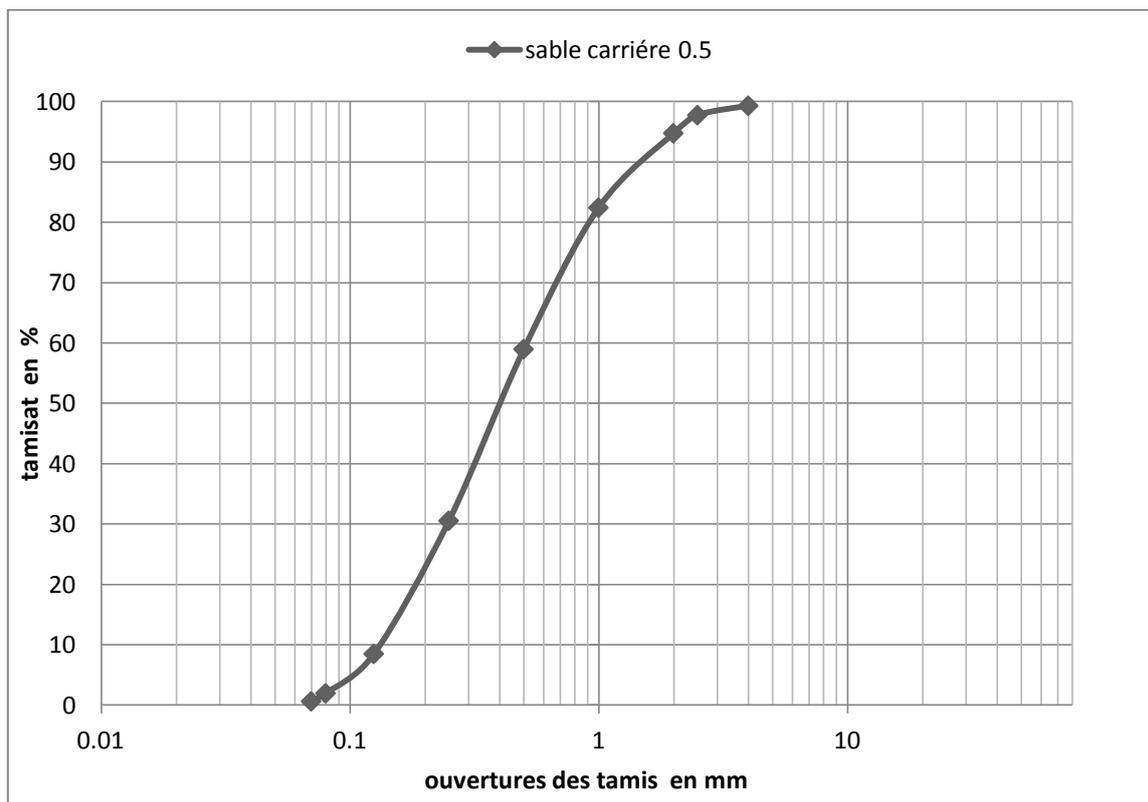


Figure 4.11 Analyse granulométrique du sable 0/5

#### 4.3.1.3 Analyse granulométrique de gravier 3/8 :

Le poids d'échantillon sec : 1000

Tableau 4.7 résultats de l'analyse granulométrique 3/8

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât(%)
8	2	2	0.1	99.9
5	878	880	44	56
4	517	1397	69.85	30.15
2.5	560	1957	97.85	2.15

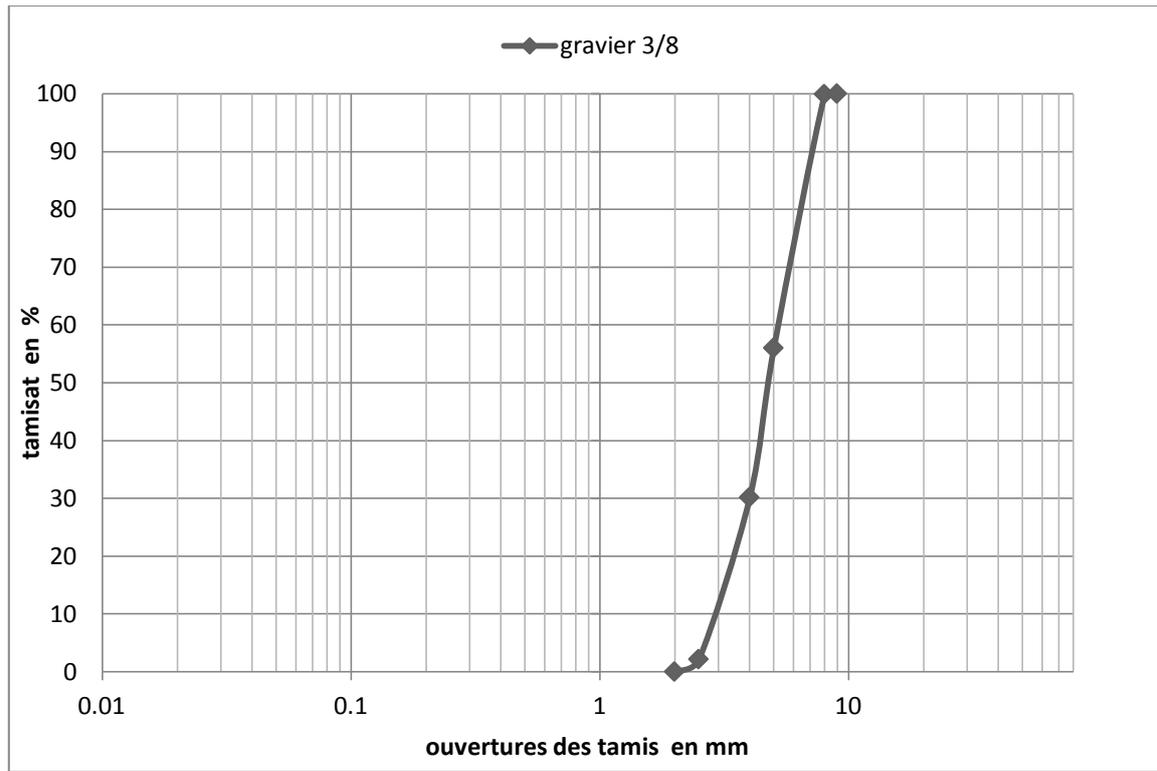


Figure 4.12 : Analyse granulométrique de gravier 3/8

#### 4.3.2 Masse volumique apparente :

Cet essai a pour but de déterminer la masse volumique des granulats utilisés dans la confection de béton avec la méthode d'un récipient jaugé. et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite.

La masse volumique apparente de granulat sera calculé avec cette formule :

$$\rho_{app} = \left( \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \right) \times \frac{1}{V}$$

La mesure de la masse volumique des granulats utilisés dans la confection de notre béton, nous permet d'évaluer la masse volumique théorique de béton.

- -Mettre une quantité suffisante le sable dans l'appareil P.DETE
- Placer le récipient dessous l'ouverture de cône
- Laisser le matériau tomber, jusqu'à la saturation du récipient.
- Araser à la règle, et peser le contenu



Figure 4.13 Entonnoir et récipient de mesure

Tableau 4.8 : résultats de l'essai masse volumiques apparentes

Classe granulaire	Masse volumique apparente g /cm <sup>3</sup>
Sable de mer	1.41
Sable carrière 0 /3	1.5
Gravier 3/8	1,32
Ciment	0.98

### 4.3.3 Masse volumique absolue :

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique des granulats utilisés dans la confection du béton avec la méthode de l'éprouvette graduée. Et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite.

La masse volumique absolue de granulat sera calculé avec cette formule (4.2) :

$$\rho \text{ absolue} = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (4.2)$$

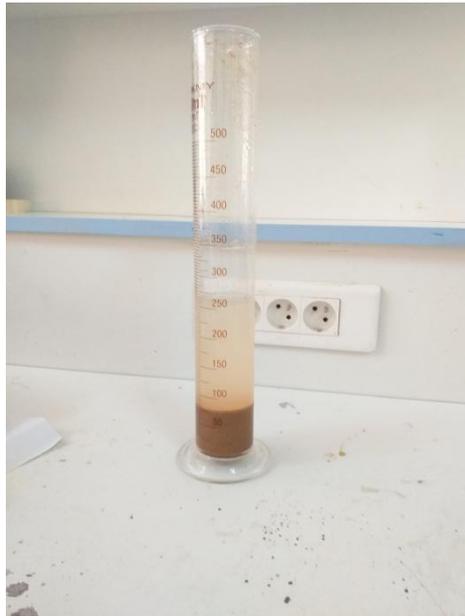


Figure 4.14 la masse volumique absolue

Tableau 4.9 : résultats de l'essai masse volumiques absolue

Classe granulaire	Masse volumique absolue
Sable de mer	2.5
Gravier 0/5	2.64
Gravier 3/8	2.3

**4.3.4 Equivalent de sable (ES) :**

L'essai d'équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière nuisible et d'éléments fins argileux contenus dans le matériau, ainsi de mesurer le taux de propreté des sables.

Il existe deux types de mesures en fonction du degré d'argilosité du matériau, l'essai de l'équivalent de sable visuel (EVS) et l'essai au piston (ESP).

$$ESV = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots 4.3 \qquad \qquad \qquad ESV = 3.76/4.07 \times 100 = 92.38$$

$$ESP = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots 4.4$$

ESP : équivalent de sable mesuré au piston

Esv : équivalent de sable mesuré visuellement

h1 : hauteur de sable propre et élément fins

h2 : hauteur de sable propre seulement

h2 ' : hauteur du sable propre seulement au piston

Tableau 4.10. Résultat d'équivalent sable

Type de sable	ESV(%)	Nature et qualité de sable
Sable de mer	92.38	Selon la norme NF P18 541, on a un sable propre a faible pourcentage de fine

**4.3.5 Coefficient d'absorption :**

Cet essai est normalisé essai selon la norme NFP18-55

Le coefficient d'absorption est définir comme le rapport d'augmentation de la masse d'un échantillon imbibé par l'eau, à la masse de cet échantillon. Elle est définir par la relation suivant :

$$Ab (\%) = (Mh - Ms) / Ms \times 100 \dots\dots\dots 4.5$$

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

Mh : masse de l'échantillon imbibé par Léau.



Figure 4.15 Coefficient d'absorption de gravier 3/8

Tableau 4.11 Les résultats de Le coefficient d'absorption

	Ms	Mh	Ab(%)
Gravier 3/8	1000	1012	1.2

### 4.4 Techniques expérimentales :

Tableau 4.12 Formulation du béton pouzzolanique et béton ordinaire

	Béton ordinaire (kg/m <sup>3</sup> )	Béton pouzzolanique (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	400	400
Gravier 3/8	423	800
Sable de mère 0.3	535	409
Sable de carrière 0.5	248	204
Pouzzolane nature	-	60
Eau	200	163
Adjuvant	-	3.8
E/C	0.5	0.4
Masse volumique	1806	2040

#### 4.4.1 Mode opératoire de cette formulation :

Premièrement tout le malaxage qui on a fait est manuel et cet présenté par les étapes suivant :

- Préparation des moules (nettoyage et graissage).
- Préparé et pesée chaque composant utilisé (ciment, granulats ; pouzzolane, , adjuvant, eau de gâchage)
- Verser l'eau et l'adjuvant dans le récipient.
- Malaxage à sec des constituants solides (ciment , pouzzolane ,sable fin, gravier 3/8, sable 0/5 ).
- Ajout de 1/3 du mélange eau/adjuvant
- Malaxage
- Ajout des 2/3 restants du mélange eau/adjuvant.
- Fin du malaxage.



Figure 4.16 préparation du béton.

### 4.4.2 Préparation et confection des échantillons :

les éprouvettes de (7x7x7cm<sup>3</sup>) ont été préparé au laboratoire du matériau de construction, Le béton ont été confectionnés conformément aux prescriptions de la norme NF P18- 404. A la fin du malaxage manuel, le béton préparé est versé dans un moule carré de dimensions 7 x 7 x 7 cm<sup>3</sup> en trois couche et la mise en place est réalisée par vibration de 25 coups pour chaque couches



figure 4.17 la table vibrante et les moules pour éprouvette de 7\*7\*7cm<sup>3</sup>.

Toutes les éprouvettes ont subies la même cure conformément à la norme NFP18-404 et aux recommandations de l'AFPC-AFREM (1997). Après 24 heures, ils ont été démoulés et émergées dans l'eau à 20° C pendant 7 jours 28 jours.60 jour et 90 jours.



Figure 4.18 conservation des éprouvettes dans Léau a  $20 \pm 2$  °C.

#### 4.4.3 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

L'essai de l'affaissement au cône d'Abrams sert à mesurer la fluidité des bétons après gâchage. La mesure de l'affaissement conformément à la norme NF EN 12350-2 consiste à :

- Introduire le béton frais dès la fin de sa confection, en trois couches recevant chacune 25 coups de picage.
- Araser le moule en évitant le compactage local du béton.
- Démoulé immédiatement en soulevant le moule à l'aide des poignées.
- Mesurer l'affaissement après une minute du démoulage.



Figure 4.19 Mesure de L'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau 4.13 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement.

Classe de consistance	Affaissement (cm)
Ferme(f)	0 à 4

Plastique(p)	5 à9
Très plastique (tp)	10 à 15
Fluide(Fl)	>16

Tableau 4.14 : Résultats de consistance de différents gâchés utilisés.

Gâchés	Affaissement (cm)	Classe de consistance
BO	4	Ferme
BPZ	8	Plastique(p)

### 4.5 Choix des températures des essais :

Les températures d'essai choisies seront entre **200°C**, **400°C**, **600°C** et **900°C**, plus la température ambiante.

La température **200°C** a été choisie pour encadrer la température de l'évaporation de l'eau dans le béton car à **105°C** l'eau est complètement éliminée.

Les essais à **400°C** et **600°C** et **900°C** ont été choisis pour mieux connaître les multiples transformations physico-chimiques qui peuvent apparaître dans le béton, ainsi que pour pouvoir comparer avec les résultats des autres auteurs.



Figure 4.20 les fissures du béton pz pour un chargement thermique de 900°C.

### 4.5.1 Chargement thermique :

Les échantillons ont été chauffé a différentes températures **200°C, 400°C,600°C et 900°**, par palier de **20 mn** tous les **100 °C** en suivant la courbe de montée en température pour les essais de chauffage à une vitesse de **5 °C / mn** .L'échantillon est pesé avant et après chauffage afin de déterminer la perte de masse à laide d'une balance électronique de précision égale à **1%**.

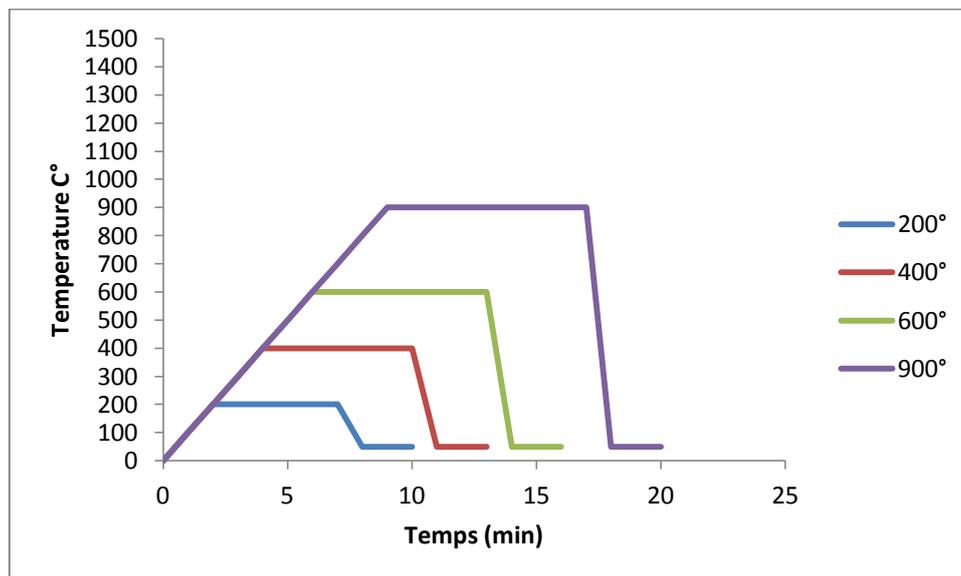


Figure 4.21 Cycle thermique pour bétons.

### 4.6 Essai de résistance mécanique en compression :

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété, car elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

La résistance à la compression a été déterminée à l'aide d'une machine de compression (2000 KN), sur des éprouvettes de béton ordinaire et pouzzolanique  $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$  âgée de (j) jours dans une presse de béton jusqu'à la rupture, conformément à la norme NF EN 206-1.



Figure 4.22 Ecrasement des éprouvette ( $7*7*7 \text{ cm}^3$ )

L'éprouvette est placée, face d'écrasement vers le haut et centrée (l'erreur de centrage doit être inférieure à 0.06)

#### 4.7 Absorption capillaire :

Dans ce travail de recherche, un essai complémentaire a été effectué déterminant l'absorption capillaire des bétons étudiés. Ceci est dans le but d'étudier l'influence de la poudre de pouzzolane sur cette propriété physique. Le principe de cet essai est de quantifier la masse d'eau absorbée par les bétons au cours du temps. Cet essai a été effectué sur des échantillons à différents âges (7, 28, 60 et 90 jours). À l'issue de cette période de cure, les échantillons sont prélevés puis séchés pendant 24h dans une étuve à  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les éprouvettes sont laissées refroidir par la suite dans un dessiccateur pendant 24h pour une stabilisation thermique. Afin d'éviter tout échange hydrique latéral des échantillons pendant l'essai, cinq faces de chaque éprouvette ont été recouvertes avec deux couches de la résine époxy laissant une seule face de  $(7 \times 7) \text{ cm}^2$  sans la résine (non recouverte). L'essai d'absorption capillaire est lancé après cette dernière précaution. Pour cela, les éprouvettes testées sont initialement pesées (soit  $M_0$  en g), puis on met les éprouvettes dans un dessiccateur rempli d'eau distillée dont la surface non recouverte des échantillons sont immergées dans l'eau sur une hauteur de 5 mm (cf. Fig. II-21). Aux échéances données et après avoir épongé chaque échantillon, l'évolution de la masse est suivie par pesée ( $M_i$ ) après 5, 10, 15, 30 et 60 min de l'immersion dans de l'eau.

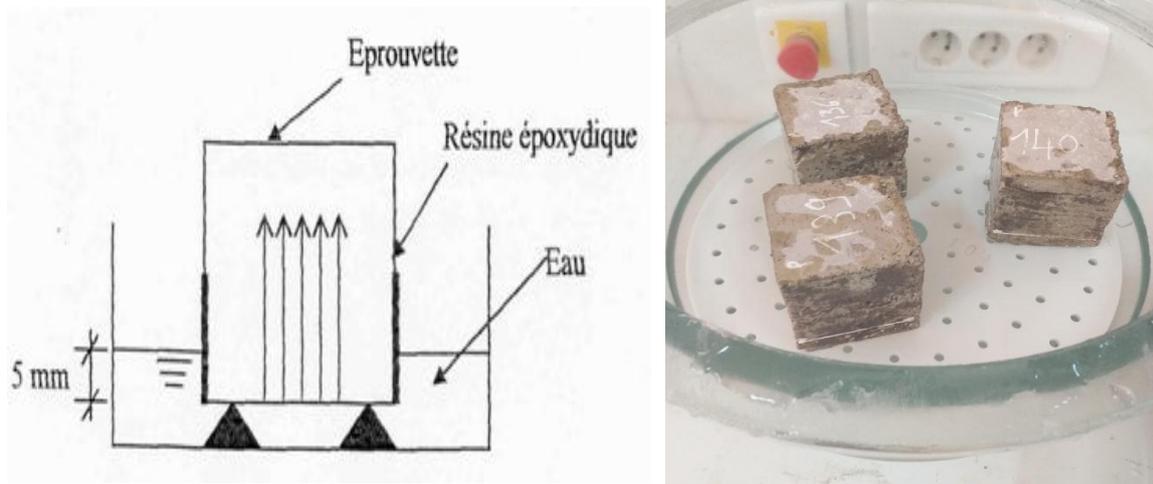


Figure 4.23 l'essai d'absorption d'eau

. Le coefficient d'absorption capillaire à chaque échéance est calculé selon la formule ci-après:

$$C = (m_x - m_0) / A \dots \dots \dots 4.6$$

Où

C : coefficient d'absorption capillaire (kg/m<sup>2</sup>)

m<sub>x</sub> : masse de l'éprouvette à l'instant x (kg) ;

m<sub>0</sub> : masse initiale de l'éprouvette (kg) ;

A : section de l'éprouvette (m<sup>2</sup>).

#### 4.8 L'effet de la température sur les essais de durabilité :

##### 4.8.1 Porosité :

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de durabilité au sens du document publié par l'AFGC en 2004. Parmi les méthodes à disposition, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique selon le mode opératoire AFPC-AFREM qui est une mesure simple et praticable sur une large variété de matériaux. La masse volumique apparente est généralement déterminée par cette technique.



Figure 4.24 L'essai de porosité.

Le principe de cette essai consiste à placer des éprouvettes traitées sous différents température dans un dessiccateur étanche en le surélevant par des cales afin d'optimiser la surface de contact. Une fois le dessiccateur fermé, le vide est réalisé à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression constante de 25 mbars, le vide est maintenu pendant au moins 4h.

On déconnecte le récipient de la pompe à vide et on introduit l'eau d'immersion jusqu'à ce que le corps soit recouvert d'environ 2 cm d'eau. Les temps d'immersion pour chaque procédure de saturation sont détaillés sur la figure III.3.

- ✓ Etuvage à  $T = 105 \pm 5$  °C jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0,05 %.

La porosité accessible à l'eau  $p$  est déterminée à partir de la formule suivante

$$p = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})} \dots\dots\dots 4.7$$

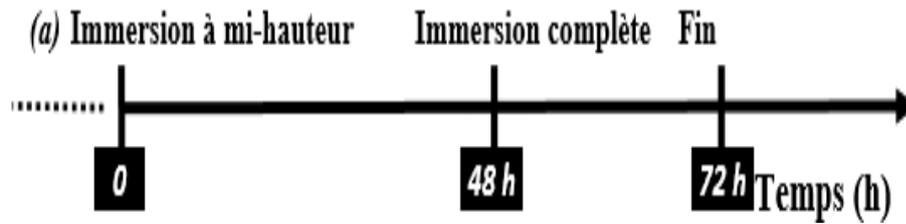


Figure 4.25 Procédure de saturation selon AFPC-AFREM modifiée.

#### 4.8.1.1 Pesée hydrostatique :

Peser le corps d'épreuve complètement immergé à l'aide d'une balance hydrostatique. On obtient ainsi la masse  $M_{eau}$  du corps d'épreuve immergé. La pesée a été effectuée à l'aide d'une balance de 0,01g de précision.



Figure 4.26 Principe de la pesée hydrostatique

### 4.8.1.2 Pesée à l'air :

Extraire le corps d'épreuve de l'eau et l'essuyer rapidement et soigneusement, avec un chiffon sec pour en ôter la solution superficielle sans toutefois retirer l'eau des pores. Peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à 0,01g près. On obtient de cette manière, la masse M<sub>air</sub> du corps d'épreuve imbibé.

### 4.8.2 Diffusion des ions chlorure :

#### 4.8.2.1 Diffusion normale (méthode NT Build 443)

➤ **Mesure de la profondeur de diffusion aux ions chlorure :**

Le coefficient de diffusion aux ions chlorures peut être mesuré par plusieurs méthodes. Les méthodes choisies pour quantifier ce paramètre sont présentées dans le paragraphe suivant.

Les corps d'épreuve sont des cubes de 7\*7\*7cm<sup>3</sup>. Le protocole de l'essai est décrit par les étapes suivantes

Pour chaque béton et pour chaque échéance d'exposition, trois éprouvettes de chaque température de chaque type de béton.

Les surfaces des éprouvettes ont été ensuite couvertes par une résine époxy pour ne laisser que la face inférieure exposée au milieu extérieur. Après la mise en œuvre de la résine époxy, les éprouvettes ont été séchées pendant environ 6 heures. Les éprouvettes ont été mises en contact avec une solution de NaCl à 165 g/l. La durée de l'essai peut varier selon les propriétés des bétons et la concentration des solutions de contact.

Les éprouvettes reposaient sur des appuis dans les bacs de solution. En effet il ne fallait pas que la surface de contact repose au fond du bac. La surface exposée est ainsi immergée complètement dans la solution de contact.

Les solutions de contact ont été renouvelées toutes les deux semaines.



figure 4.27 préparation de NaCl

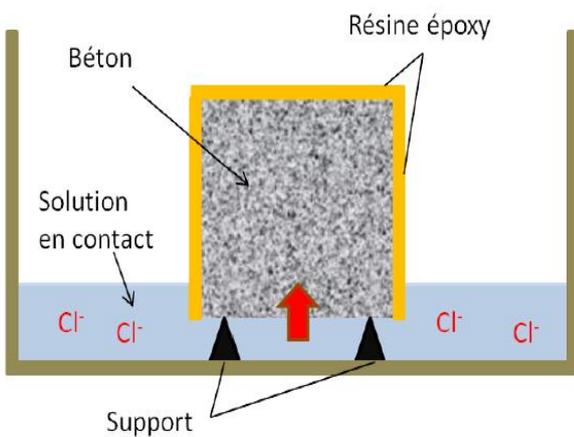


Figure 4.28 Essai de diffusion. Immersion de la face inférieure dans la solution de contact de NaCl.

Nous avons effectué cette essai de diffusion sur deux échantillons de béton, dont deux sont issus de la formulation d'un béton ordinaire et béton pouzzolanique pour voir l'effet de la pouzzolane et de l'âge sur le coefficient de diffusion.

➤ **Matériel**

Le matériel nécessaire pour déterminer la profondeur de pénétration des chlorures est :

- un dispositif permettant de fendre l'éprouvette perpendiculairement à la surface exposée ou chlorure

- des vaporisateurs,
- une règle ou un pied à coulisse.

### 4.8.2.1.1 Préparation des solutions :

on a dissoudre 8.4935g de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) dans un 1L d'eau distillée, Homogénéiser et conserver en flacon teinté.



Figure 4.29 Préparation de solution ( $\text{AgNO}_3$ )

### 4.8.2.1.2 Principe de la mesure :

A la fin de la phase d'exposition, une des trois éprouvettes est fendue pour mesurer la profondeur de pénétration des ions chlorure à l'aide d'une projection d'une solution de  $\text{AgNO}_3$  à  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$



Figure 4.30 machine de Scie a béton.



Figure 4.31 vaporisation  $\text{AgNO}_3$ .

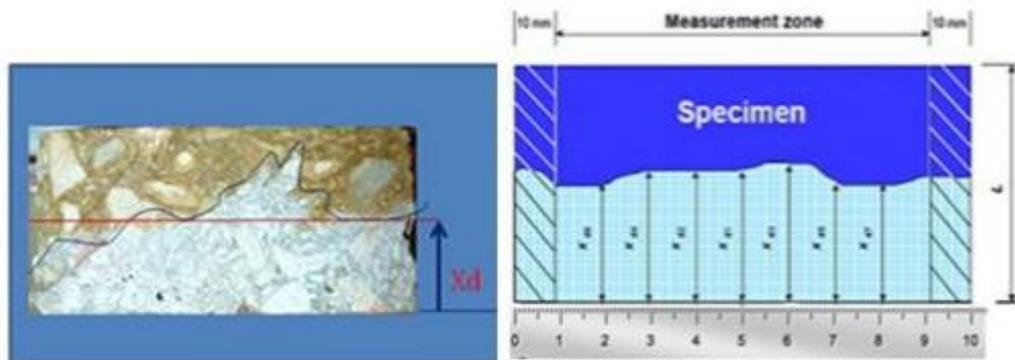


Figure 4.32 Principe de la mesure de profondeur.



Figure 4.33 Mesure de la profondeur de pénétration des ions chlorures.

#### 4.8.2.2 Essais de migration :

##### 4.8.2.2.1 Préparation des échantillons :

Avant de commencer l'essai de migration, les échantillons doivent être complètement saturés. Le principe consiste à placer un échantillon dans un dessiccateur étanche en le surélevant par des cales afin d'optimiser la surface de contact.

Une fois le dessiccateur fermé, le vide est réalisé à l'aide d'une pompe à vide selon la procédure AFPC-AFREM [AFR 1997]. On procède au dégazage du disque pendant 24 heures, ensuite, on introduit une solution basique (NaOH) à mi-hauteur de l'échantillon pendant 24 heures ; enfin et afin d'assurer une saturation complète de l'échantillon, le corps d'épreuve est immergé environ 2 cm sur sa génératrice supérieure pendant 48 heures.



Figure 4.34 Saturation de l'échantillon.

### 4.8.2.2.2 Protocole de l'essai migration des ions chlore :

L'essai défini par la norme NT BUILD 492 [BUI, 99] est connu pour sa rapidité et sa représentativité, ou essai Tang Luping et Nilsson [TAN, 96]. Cette méthode a également fait l'objet de recommandations dans la synthèse de plusieurs travaux de recherches. Il permet de déterminer un coefficient de diffusion effectif en régime transitoire.

Après avoir procédé à la préparation du corps d'épreuve, ce dernier est mis en place entre deux compartiments amont et aval où sont plongées deux électrodes en acier inoxydable, disposées sur chaque face de l'échantillon en béton.

Le compartiment amont contient du chlorure de sodium 30g/l et hydroxyde de sodium 1g/l ( $\text{NaCl} + \text{NaOH}$ ) et en aval la solution d'hydroxyde de sodium 1g/l ( $\text{NaOH}$ ). Sous l'influence du champ électrique créé, les chlorures se déplacent par migration de la cathode vers l'anode en traversant le corps d'épreuve.

### 4.8.2.2.3 Tension appliquée

Dans le générateur, on applique une tension de 20V pour avoir un potentiel de 12V imposé à l'échantillon. Cette tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre en utilisant une électrode de référence, elle ne peut pas être constante durant tout l'essai, donc on doit la régler à chaque fois.

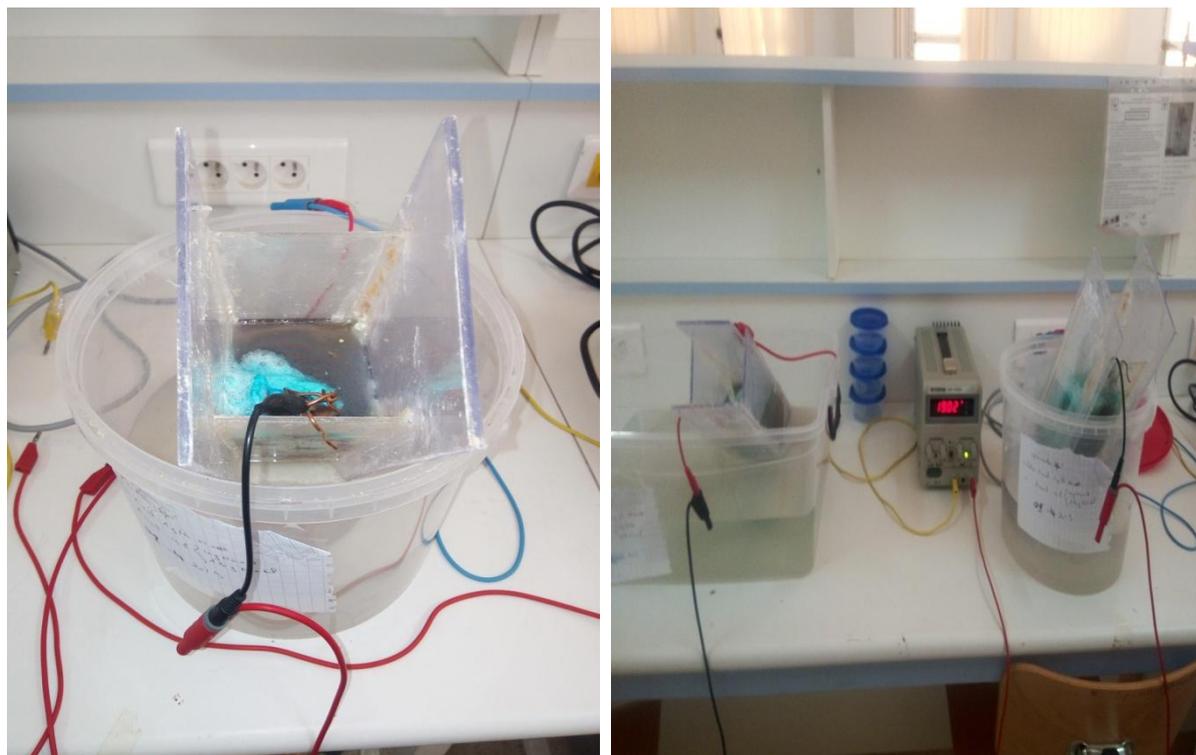


Figure 4.35 principe de l'essai de migration.

#### 4.8.2.2.4 Préparation des solutions

Solution de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) à 0.05 M : dissoudre 8.4935 g de nitrate d'argent dans 1 litre d'eau distillée ou déminéralisée. Homogénéiser et conserver en flacon teinté;  
Chromate de Potassium ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) à 10 % : dissoudre 10 g de Chromate de potassium dans 100 ml d'eau distillée ou déminéralisée. Homogénéiser et conserver en flacon.



Figure 4.36 solution ( $\text{AgNO}_3$ ) et ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ )

### 4.8.2.2.5 Titration :

A chaque échéance, trois échantillons (par prélèvement) d'environ 5 ml sont dosés à chaque fois afin de déterminer la concentration en chlorures. Les prélèvements sont stockés dans des flacons en polyéthylène fermés et placés à la température de  $20 \pm 5^\circ \text{C}$  avant dosage. La solution prélevée est pesée pour déterminer son volume exact.

A l'issu du prélèvement effectué de la solution chlorurée en  $\text{Cl}^-$  incolore et de concentration molaire  $C_{\text{Cl}^-}$ , (exprimé en mol/l), on note son volume  $V_{\text{pCl}}$  (exprimé en ml), et on ajoute 2 ou 3 gouttes de solution de chromate neutre de potassium de couleur jaunâtre servant d'indicateur de fin de réaction.

Pour doser notre solution, on commence à ajouter progressivement la solution de nitrate d'argent (incolore) contenant l'ion  $\text{Ag}^+$  de concentration molaire  $C_{\text{Ag}}$  (exprimé en mmol/l). Le dosage se termine lorsque la solution à titrer, vire vers une couleur rouge brique (point d'équivalence), on note le volume  $V_{\text{eq}}$  (exprimé en ml).



Figure 4.37 Les prélèvement.



Figure 4.38 Titration des solutions.

Le calcul de la concentration en chlorures s'appuie sur l'équation suivante :

$$C_{Cl^-} = \frac{C_{Ag}V_{eq}}{V_{pCl^-}} 1000 \text{ (mol/m}^3\text{)} \dots\dots\dots 4.8$$

Où

$C_{Cl^-}$  est la concentration en chlorure de la solution,

$V_{eq}$  est le volume équivalent,

$C_{Ag}$  est la concentration de nitrate d'argent

$V_{pCl}$  le volume de prélèvement de la solution à doser.

Cette expérience, nous permet de déterminer  $J$ , le flux d'ions chlorures passant à travers les échantillons de béton. Connaissant  $J$ , il est ensuite possible de calculer  $D_{mig}$ , le coefficient de diffusion des ions  $Cl^-$

**4.8.2.2.6 Calcul du coefficient de diffusion :**

Lorsque la vitesse de déplacement des ions chlore est constante diffusion de ces ions dans le béton est sous régime stationnaire.

Le coefficient de diffusion est obtenu en régime stationnaire à l'aide de l'équation 4.9 de Nernst Planck simplifié :

$$D_{mig} = \frac{RTL}{zFEc_0} J \dots\dots\dots 4.9$$

Avec :

$J$  : Le flux des ions chlorures (mol/m<sup>2</sup>.s)

$z$  : Valence de l'ion chlore égale à 1

$E$  : Champs électrique mesuré (12 ± 1) V

$L$  : Epaisseur de l'échantillon 0,48 ± 0,02 m

$C_0$ : La concentration du compartiment amont (0,513 mol/m<sup>3</sup>)

$D_{mig}$  : le coefficient de diffusion de l'espèce ionique

$F$  la constante de Faraday (96480 J/V.mol)

$R$  la constante des gaz parfaits (8,314J/ (mol.K)),

$T$  la température thermodynamique (293,15 ± 2) K

Le flux des ions chlorures est calculé à partir de l'équation suivante :

$$J = \frac{(\Delta c)V}{St} \dots\dots\dots 4.10$$

Avec :

( $\Delta c$ ) : La différence de concentration dans le compartiment aval (mol/m<sup>3</sup>) pendant un temps t (s).

V : Le volume du compartiment aval (1.82 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>).

S : La section de l'échantillon (49 10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>).

#### **4.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté tout le programme expérimental que nous avons réalisé au niveau de notre laboratoire notamment les essais de l'absorption, la porosité accessible et la diffusion des chlorures au sein du béton.

.D'après ces essais, les résultats obtenus sont affichés d'une façon très claire dans le chapitre suivant ainsi que leurs interprétations.

### 5.1 Introduction :

En vue de prédire la durabilité du béton, sujet de notre étude nous avons choisi dans le cadre de notre programme expérimental de déterminer, au laboratoire, le coefficient de diffusion des chlorures en régime stationnaire et d'étudier à la fois, l'effet de la durée de cure du béton et l'impact de la pouzzolane comme addition au ciment sur la migration des chlorures.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats des essais effectués ainsi que leurs interprétations. On abordera, dans un premier temps, les résultats relatifs à porosité ouverte des différents bétons étudiés et nous discuterons ensuite, des résultats des essais de migration obtenus.

### 5.2 Résultat et interprétation :

#### 5.2.1 Résultats d'essai de résistance à la compression :

La résistance en compression est une donnée importante pour la conception d'un matériau cimentaire

Tableau 5.1: Résistance à la compression des bétons

Type de béton Duré de cure	B0 (MPa)	BPZ(MPa)
7J	20,72	29,34
28J	30,06	33,88
60J	41,75	51,02
90J	50,76	61,87

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression  $\sigma_c = \frac{P}{A}$

P : la charge appliquée

A : la section de l'éprouvette

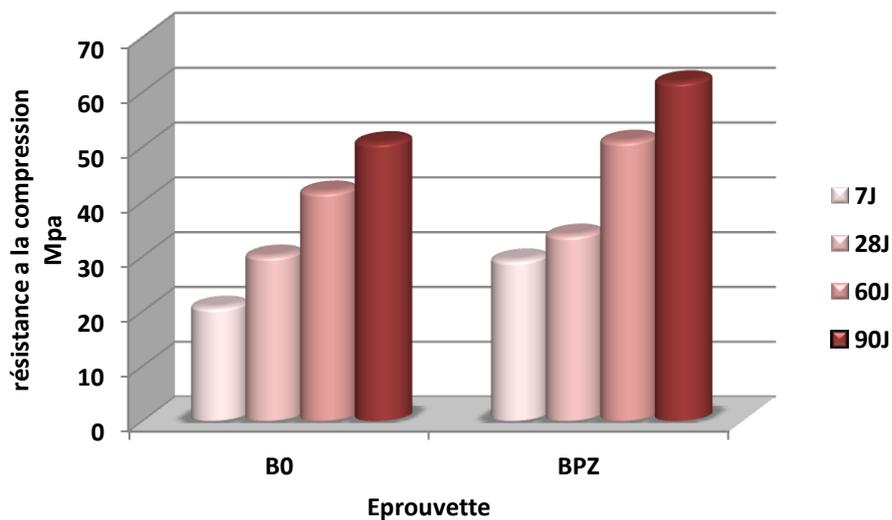


Figure 5.1 résistance a la compression.

On remarque sur la figure 5.1 que les bétons qui contiennent la poudre de pouzzolane affichent de bons résultats de résistance que le béton témoin et on remarque aussi qu'il y a une évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge, cela est remarquable pour les deux bétons étudiés sauf que pour le béton pouzzolanique la résistance en compression est nettement supérieure de plus de 22.20%. On remarque aussi que la résistance du béton pouzzolanique est importante à partir de l'âge de 60 jours, cela est dû à l'utilisation de la poudre de pouzzolane, des résultats confirmés par plusieurs chercheurs dans la littérature.

### 5.2.2 L'absorption capillaire :

#### 5.2.2.1 Mesure d'Absorption capillaire :

L'absorption capillaire est la tendance du béton à prendre de l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel. L'eau liquide est tirée dans ces pores grâce à la tension superficielle. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le béton sec ou partiellement sec prend l'eau. Nous rappelons ici que les mesures de l'eau absorbée ont été enregistrées par pesées effectuées à 5, 10, 15, 30 et 60 minutes.

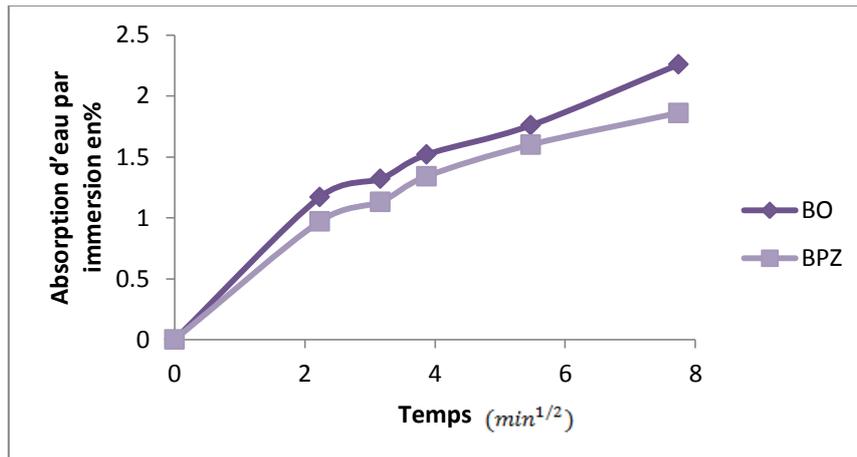


Figure 5.2 Evolution de la masse d'eau absorbée d'un béton de 7j en fonction de la racine Carrée du temps.

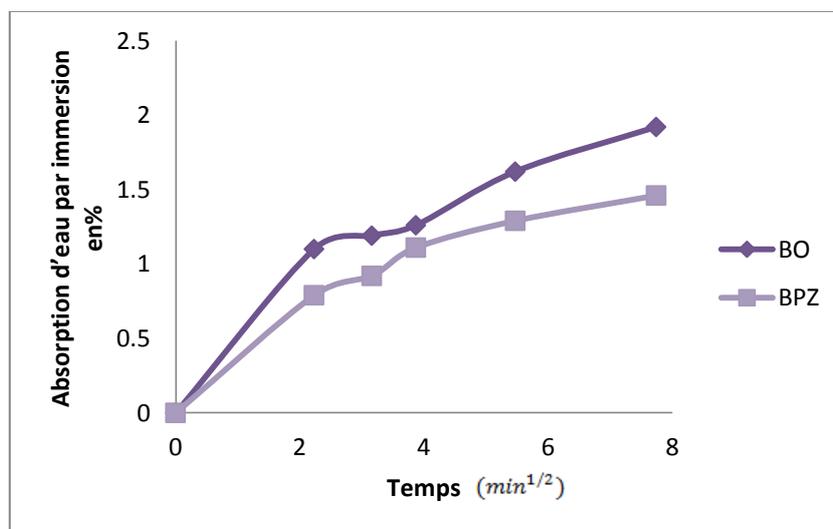


Figure 5.3 Evolution de la masse d'eau absorbée d'un béton de 28j en fonction de la racine Carrée du temps.

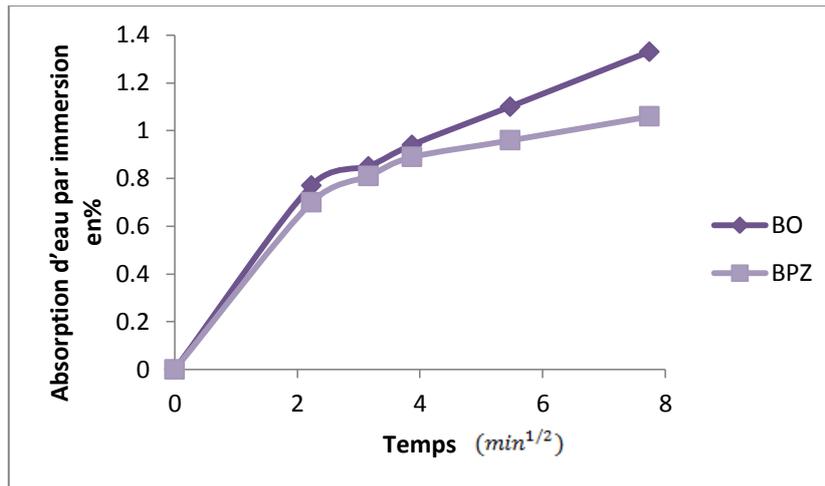


Figure 5.4 Evolution de la masse d'eau absorbée d'un béton de 60j en fonction de la racine Carrée du temps.

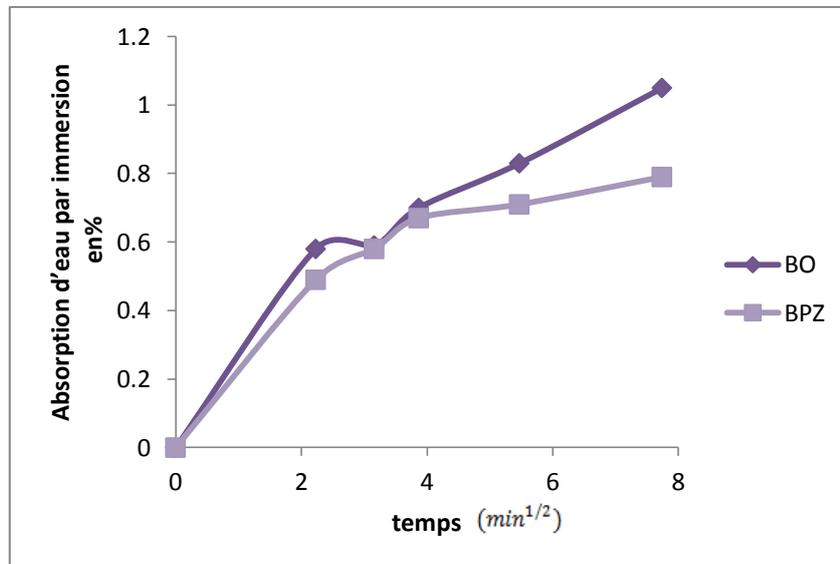


Figure 5.5 Evolution de la masse d'eau absorbée d'un béton de 90 j en fonction de la racine Carrée du temps.

On constate à partir de ces résultats, indiqués sur les Figures (5.2 ;5.3 ;5.4 ;5.5), que l'absorption des béton témoin est nettement supérieure à celle des bétons qui contiennent un pourcentage de la poudre de pouzzolane. Alors, la masse d'eau absorbée diminue pour les bétons pouzzolanique par rapport aux bétons témoins (sans poudre de pouzzolane). Ceci est expliqué par la grande finesse de la poudre de pouzzolane (supérieure à celle du ciment), qui peut augmenter la compacité du béton et donc de minimiser sa porosité capillaire. L'absorption capillaire est essentiellement concernée par les pores capillaires, de ce fait, la courte durée de l'essai (60minutes) ne permet pas un remplissage des pores d'eau qui ont un

## Chapitre 0 5: Résultat et interprétation

faible diamètre. La présence de la poudre de pouzzolane dans les bétons favorise le ralentissement de la vitesse d'absorption d'eau

### 5.2.2.2 Détermination de coefficient d'absorption capillaire :

Le coefficient d'absorption caractérise la capacité d'absorption des deux types de bétons dans le temps.

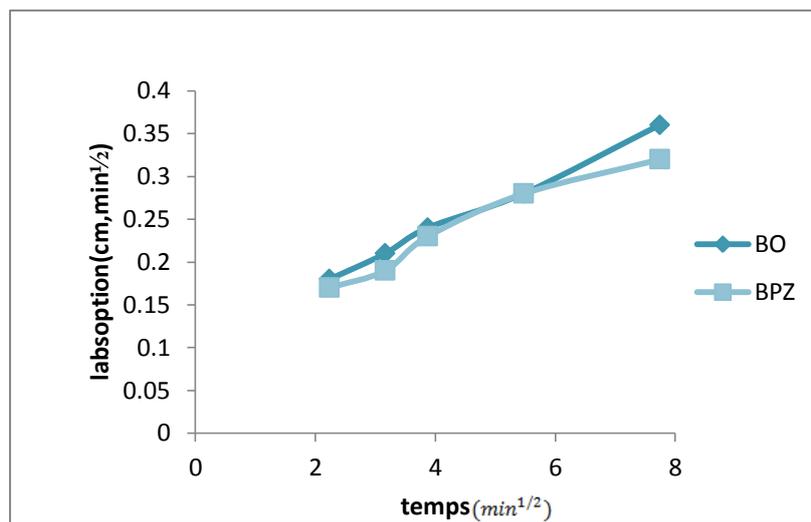


Figure 5.6 Coefficient d'absorption d'eau pour une durée de cure de 7 jours en fonction de la racine Carrée du temps.

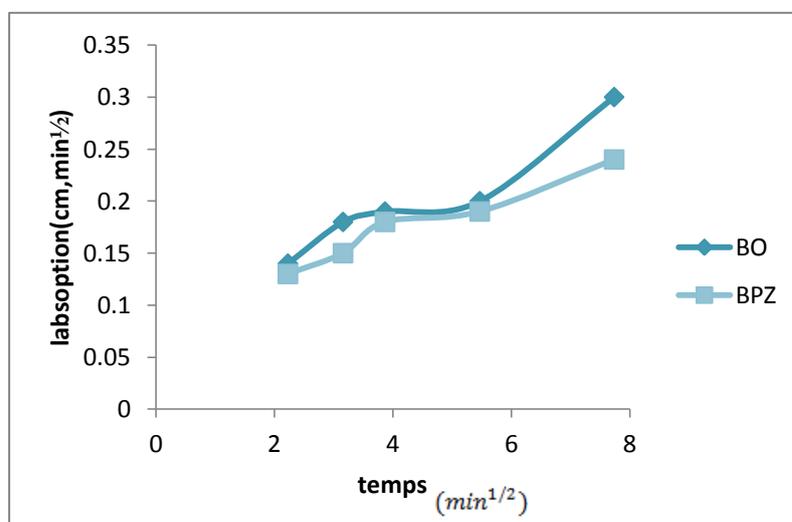


Figure 5.7 Coefficient d'absorption d'eau pour une durée de cure de 28 jours en fonction de la racine Carrée du temps.

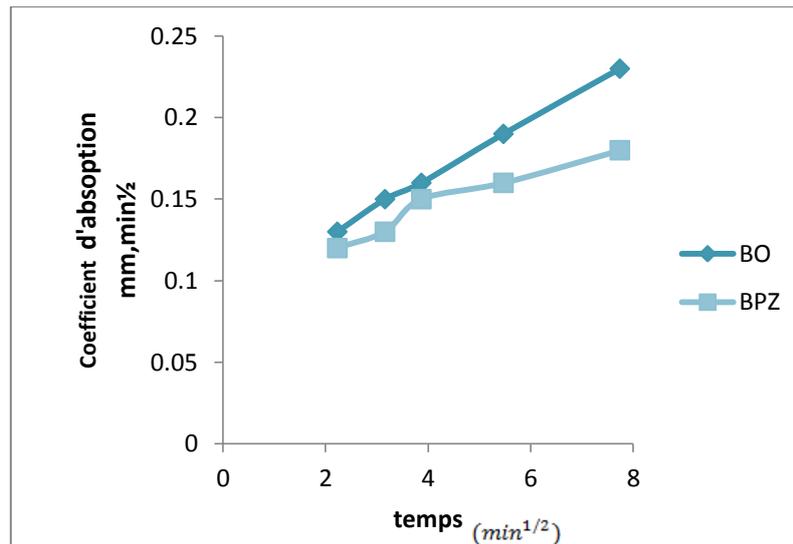


Figure 5.8 Coefficient d'absorption d'eau pour une durée de cure de 60 jours en fonction de la racine Carrée du temps.

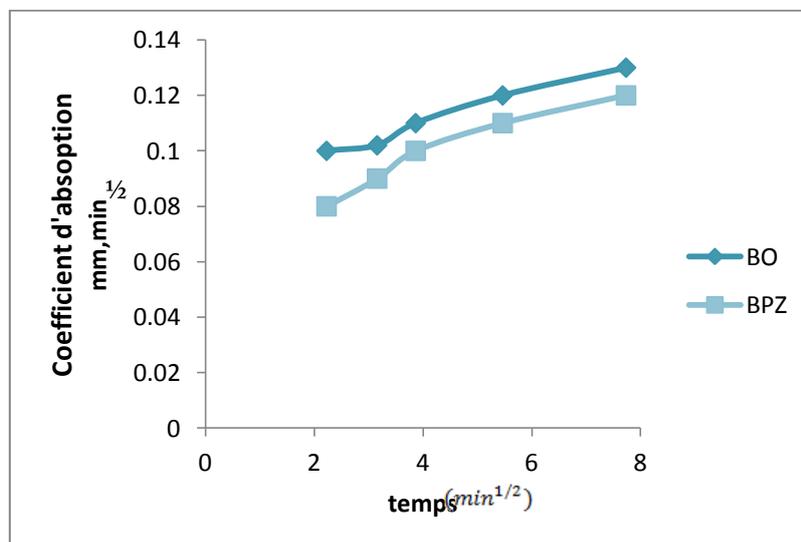


Figure 5.9 Coefficient d'absorption d'eau pour une durée de cure de 90 jours en fonction de la racine Carrée du temps.

On distingue quatre figures qui montrent l'évolution du coefficient d'absorption en fonction du temps, Les bétons témoins représentent les coefficients d'absorptions les plus élevés. L'absorption se poursuit dans les pores de plus en plus fins et de ce fait, la cinétique d'absorption des bétons contenant de la poudre de pouzzolane est ralentie, ce qui explique la diminution des coefficients en parallèle avec l'ajout de la poudre de pouzzolane. Ce comportement est attribué au fait que la poudre de pouzzolane résiduelle pourrait remplir les

## Chapitre 0 5: Résultat et interprétation

Micro fissures et les pores dans le béton conduisant à la diminution des vides étant par ailleurs occupé avec de l'eau.

### 5.2.3 Evolution de la perte de masse :

Le Tableau 5.2 présente les résultats de la perte de masse moyenne de bétons témoin(BT) et béton pouzzolanique(BZ), suite à la pesée de trois éprouvettes pour chaque type du béton et pour chaque température avant et après le chauffage. L'analyse des résultats a mis en évidence la diminution de masse suite à la sollicitation thermique

Tableau 5.2 Pertes de masse moyenne des bétons.

Température °C	avant passage au four				après passage au four				perte de masse en(%)BO	perte de masse en(%) BPz
	Bpz		Bo		Bpz		Bo			
200	167	802,6	175	800,6	167	801,7	175	798,5	0.26	0,11
400	178	797,4	170	838,1	178	785,6	170	824,9	1.57	1,47
600	153	794,2	172	809,9	153	777,05	172	782	3.44	2.15
900	160	791,25	196	845	160	706,8	196	642,7	23.94	10.67

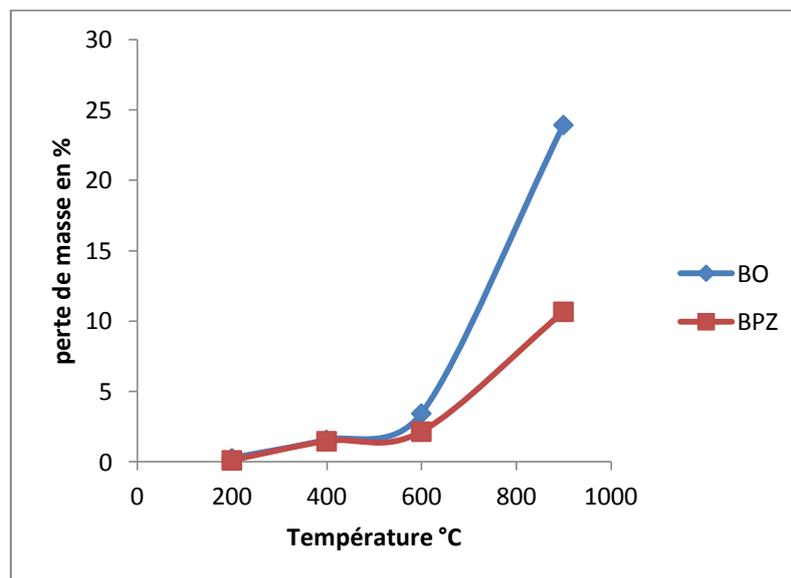


Figure 5.10 Evolution de la perte de masse moyenne des bétons BT et BPZ de 60 Jour en fonction de la température.

La Figure 5.10 présente les variations de perte de masse des éprouvettes 7\*7\*7 cm à l'issue du chauffage puis refroidissement. On constate une évolution de la per de masse en fonction de la température et cela coïncide parfaitement avec ce que nous avons trouvé dans la

## Chapitre 0 5: Résultat et interprétation

littératures, a 200 °C il ya le départ de l'eau libre et combiné a 400°C Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre :  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  ;a 600°C Il y a décomposition des phases de C-S-H a 900°C on a remarqué une grande perte de masse dus à la détérioration de la squelettes du béton et des granulats avec apparition des fissures importante suivie d'un effondre complet de l'éprouvette après refroidissement.

### 5.2.4 Porosité accessible à l'eau :

La porosité mesure l'indice de vide et fournit une indication de la qualité du béton et donc de sa résistance et sa pérennité.

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité.

Tableau 5.3 Les résultats de la porosité accessible à l'eau pour les deux bétons

Température (°C)	Porosité (%)							
	béton témoin (BT)				béton Pouzzolanique (BZ)			
	7j	28j	60j	90J	7j	28j	60j	90j
20°	16,72	16,29	13,86	12,24	13,12	12,37	10,01	8,1
200°	17,64	17,08	15,93	13,64	15,61	14,4	11,92	10,65
400°	19	18,21	16,59	16,13	16,71	17,5	15,84	15,77
600°	22,03	21,57	20,88	20,44	19,88	18,79	17,04	15,44

D'après ce tableau, la porosité accessible à l'eau de béton a base de pouzzolane est plus petite que celle de béton témoin

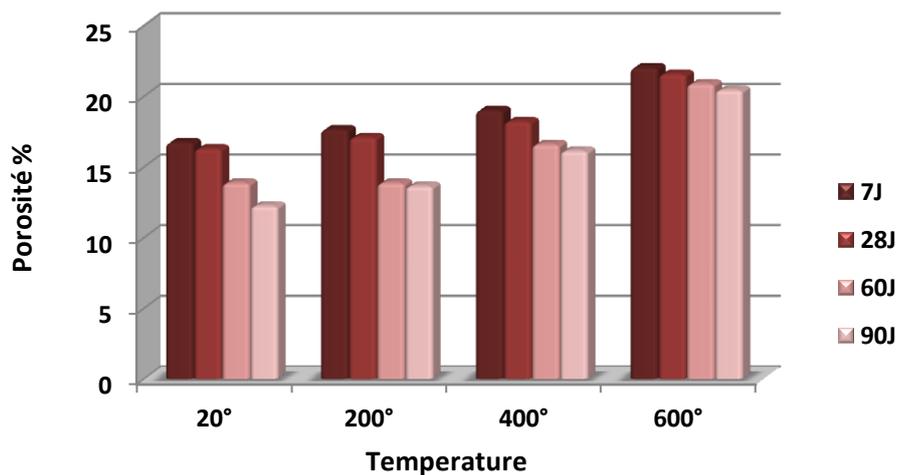


Figure 5.11 Variation de la porosité accessible à l'eau de BT en fonction de la température a différent âge.

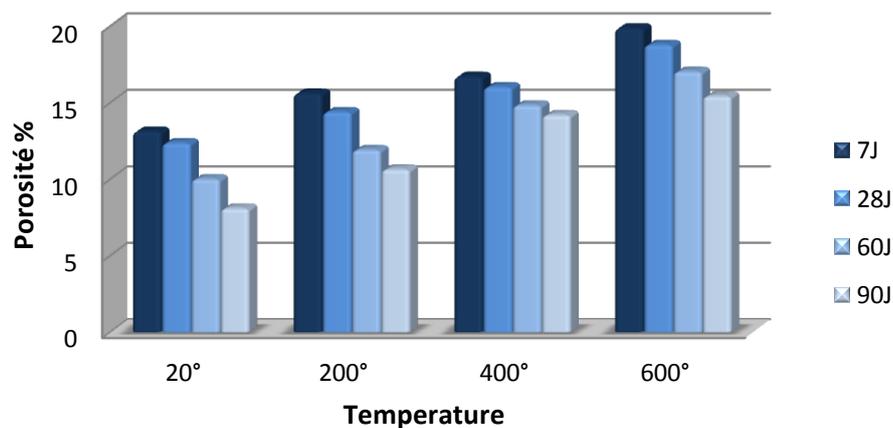


Figure 5.12 Variation de la porosité accessible à l'eau de BPZ en fonction de la température a différent âge.

Les figures 5.11 et 5.12 présente l'évolution de la porosité à l'eau des bétons étudié (BT et Bpz) en fonction de la température. Pour les deux bétons on a une augmentation de la porosité accessible à l'eau en fonction de l'augmentation de température. Nous observons une diminution de la porosité du béton pouzzolanique par rapport au béton témoin.

Des fissures sont observées sur nos échantillons après le chauffage à 600°C, ce qui peut se corrélérer à l'augmentation de la porosité.

## Chapitre 0 5: Résultat et interprétation

On peut aussi attribuer l'augmentation de la porosité pour le béton témoin au-delà de 400°C, à la décomposition de l'hydroxyde de calcium qui commence à partir de cette températures et que les débris de décomposition on bouché les pores.au delà de 600°C on a une grande porosité qui peut atteindre 22.53% cela est dû à la dégradation presque totale de la microstructure de notre béton ;

Il faut notée que l'utilisation de l'eau comme liquide d'immersion sur des éprouvettes traitées thermiquement peut être discutée. L'eau réagit avec la portlandite et avec les CSH déshydratés durant le traitement thermique .donc une quantité d'eau rentre dans les réactions chimique et par la suite la réhydratation du béton.

### 5.2.5 Les essais de diffusion :

#### 5.2.5.1 Effet de la température sur la profondeur de pénétration (Méthode NT Build 443)

Suite aux essais de diffusion par immersion (Méthode NT Build 443), les résultats de la profondeur de pénétration des ions chlorures obtenus sont présentés sur les figure 5.13 et 5.14

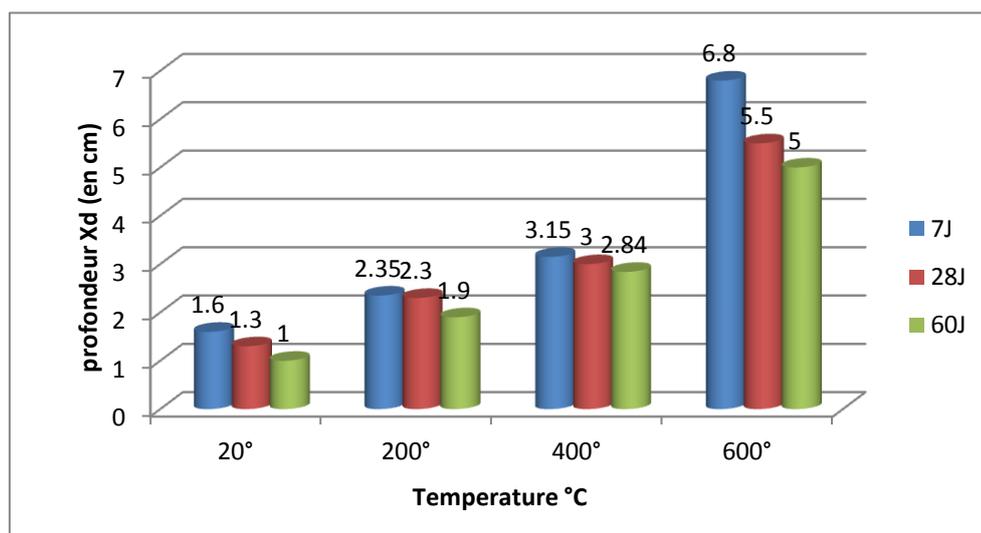


figure 5.13 Variation de la profondeur de pénétration des ions chlorures à travers l'échantillon de béton témoin sous l'effet de la température.

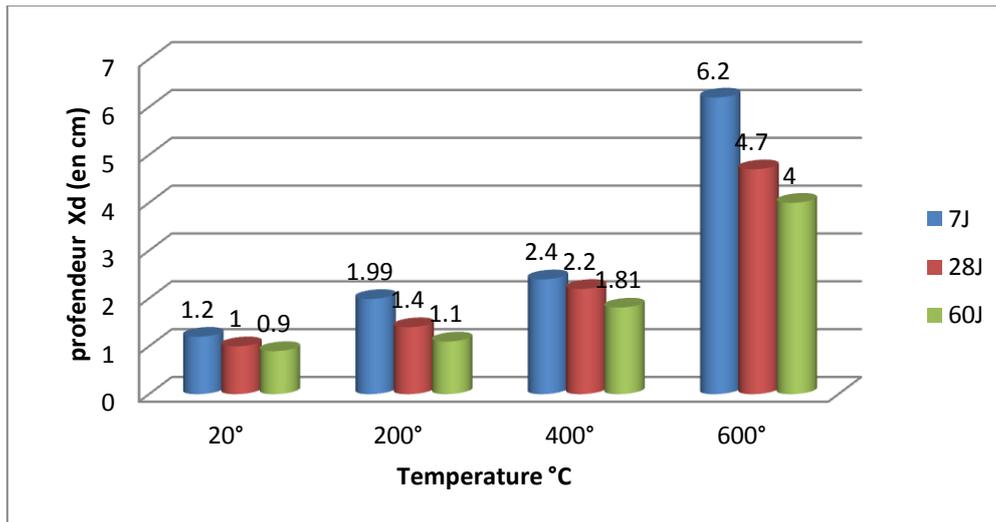


Figure 5.14 Variation de la profondeur de pénétration des ions chlorures à travers l'échantillon de béton pouzzolanique sous l'effet de la température.

On peut voir qu'il y a une évolution de la profondeur en fonction de la température en comparant les deux bétons au même âge et cela est observé pour les deux bétons, on constate aussi que les valeurs de la profondeur de pénétration des ions chlorures est légèrement supérieure pour le béton ordinaire que celle du béton pouzzolanique.

On remarque qu'en fonction de l'âge la profondeur de pénétration des ions chlorures qu'il y a une diminution constatée à partir de 28 jours jusqu'à l'âge de 60 jours. Cette variation est plus importante pour la température 600°C qu'aux autres températures.

### 5.2.5.2 Concentration des chlorures cumulés :

L'évolution de la concentration cumulée des ions chlorures est mesurée en fonction du temps à différentes températures. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.14

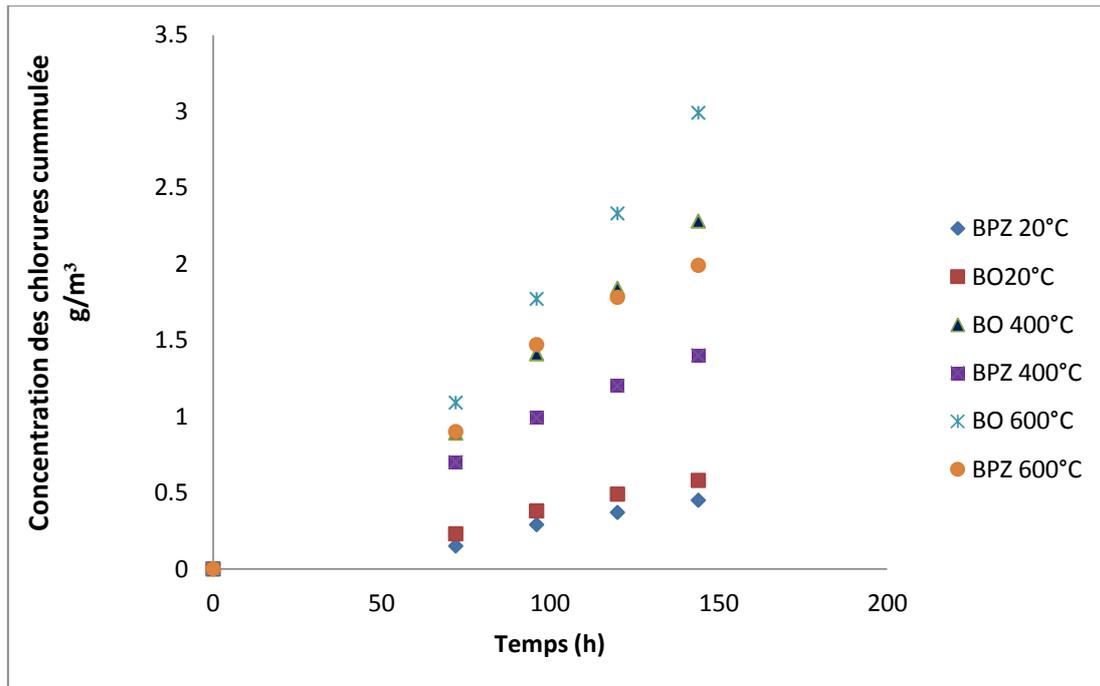


Figure 5.15 Evolution de la concentration des ions chlorures en fonction du temps dans le compartiment aval pour les deux types de bétons à différentes températures °C.

On remarque qu'il y a une augmentation de la concentration des ions chlorures en fonction de la température pour les deux bétons, on constate aussi que la concentration est plus importante à la température 600°C ou on affiche une valeur de 0.5 g/m<sup>3</sup> à 20°C contre une valeur de 3 g/m<sup>3</sup> à 600°C. Peu de chercheurs dans la littérature ont travaillé sur l'effet de hautes températures sur la diffusion des ions chlorures choses qui n'était pas facile pour nous pour interpréter ces résultats et comprendre ce comportement. L'utilisation de la pouzzolane pour le deuxième béton explique que les valeurs de la concentration des ions chlorures est inférieure par rapport au béton ordinaire.

### 5.2.5.3 Effet de la température sur le coefficient de diffusion (essai de migration)

Le coefficient de diffusion par migration est mesuré pour les deux bétons ordinaire et pouzzolanique. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.15

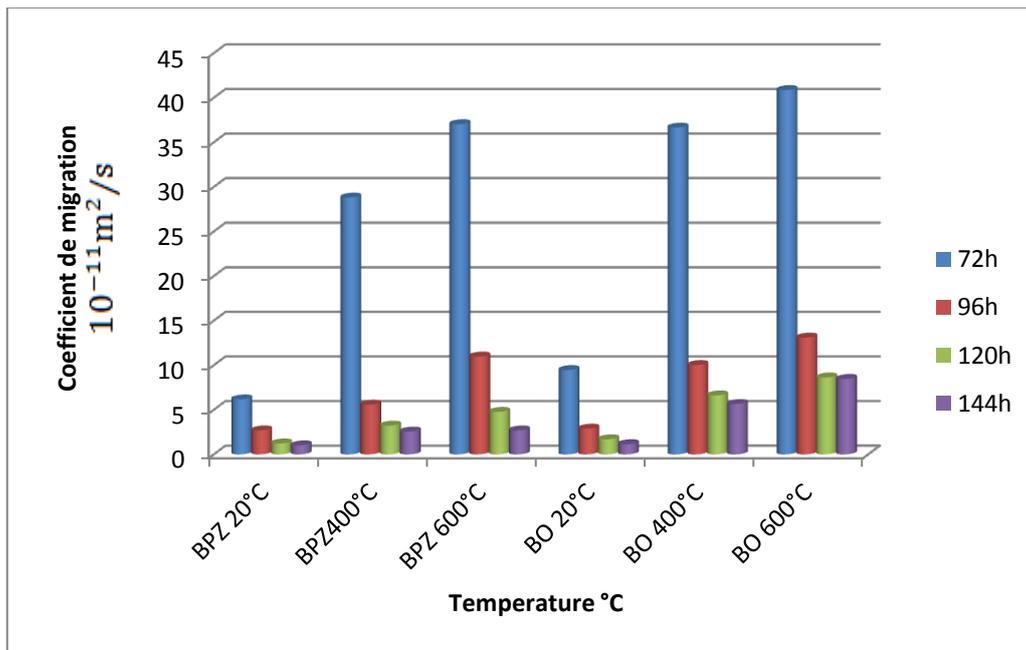


Figure 5.16 Coefficient de diffusion en fonction de la température .

Sur la figure 5.16 on constate une que le coefficient de diffusion diminue en fonction du temps cela s'explique par la saturation en ions chlorures et fixation de ces ions avec les particule du bétons les mêmes résultats éliant trouvé par  $D_c$  touil .mais par contre on observe une augmentation des ions chlorures en fonction de la températures due au vide qui se forme suite au départ de l'eau libre dans les pores.

#### 5.2.5.4 Relation coefficient de migration –temps de retard :

Comme indiqué dans La figure 5.17 et 5.18 le temps de retard ( $T_r$ ) varie en fonction du coefficient de diffusion. Pour la même température.

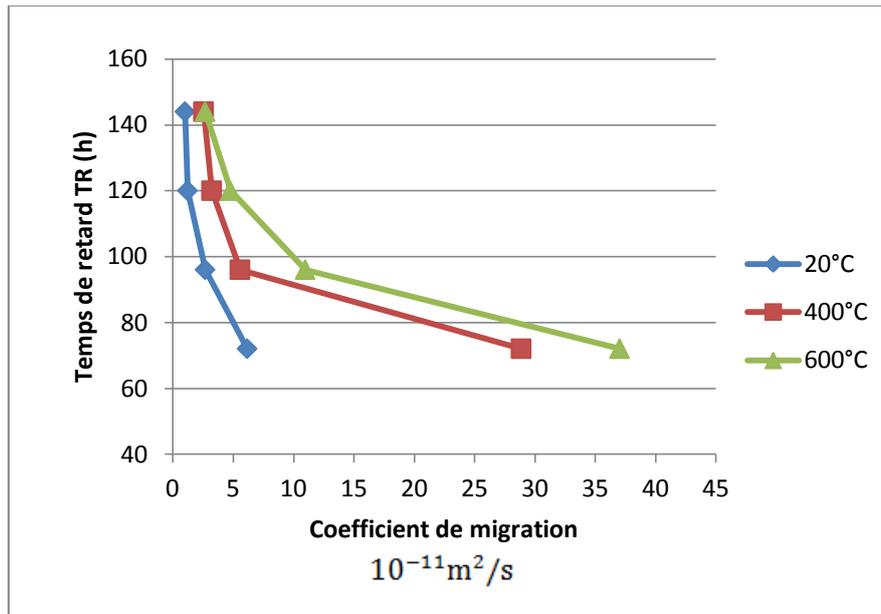


Figure 5.17 Relation entre le coefficient de migration et le temps de retard pour le béton pouzzolanique a différentes températures .

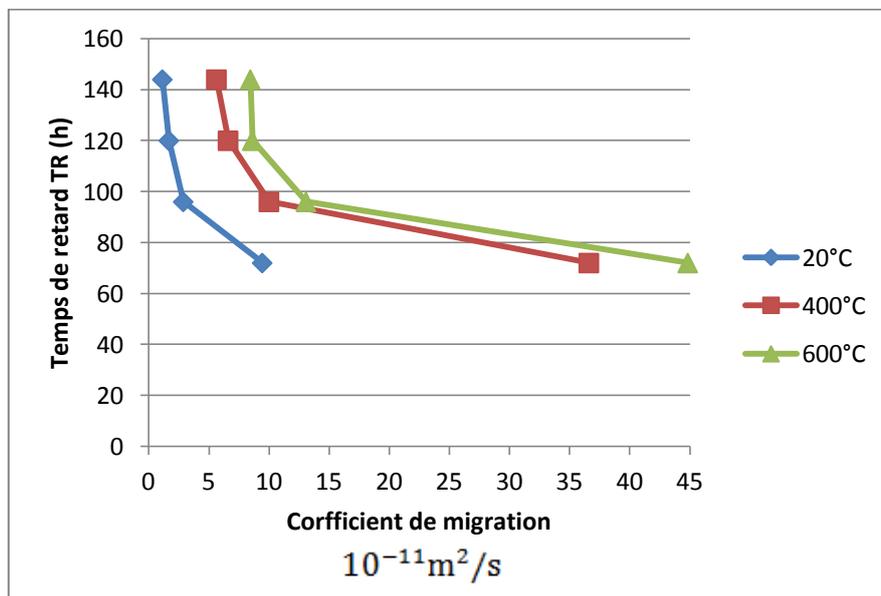


Figure 5.18 Relation entre le coefficient de migration et le temps de retard pour le béton témoin a différentes températures.

Comme indiqué dans les figures 5.17 et 5.18 le temps de retard ( $T_r$ ) varie en fonction du coefficient de diffusion. Pour la même température, Il faut préciser qu'un temps de retard plus grand peut résulter d'une porosité plus faible.

La libération des chlorures fixés et l'augmentation de la concentration des chlorures libres dans la solution interstitielle, l'accroissement de la cinétique de diffusion des chlorures dans

## **Chapitre 0 5: Résultat et interprétation**

---

le béton, résultat de l'effet catalyseur de la température qui permet aux chlorures d'atteindre plus rapidement la partie aval du matériau.

En outre, comme le montrent les résultats expérimentaux illustrés en Figure on peut conclure qu'il existe une relation entre le coefficient de diffusion et le temps de retard. Cette variation ne dépend pas nécessairement de la température et elle est spécifique pour chaque type de béton

### **5.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a élaborés différents résultats issus des essais qu'on a effectués sur le béton ordinaire et sur le béton pouzzolanique.

On trouve aussi les résultats des essais de diffusion des ions chlorures et de la porosité à l'eau et on a pu faire une comparaison avec les deux bétons.

Le traitement thermique nous a permis de faire une mise au point du comportement des bétons lors d'une élévation de température.

## ***Chapitre 0 5: Résultat et interprétation***

---

## **Conclusion général :**

Notre recherche expérimentale s'est focalisée sur l'étude du comportement mécanique sous l'effets des hautes températures et l'évaluation de la durabilité sous les mêmes conditions d'un béton ordinaire et un béton pouzzolanique. Pour cela on opté pour la résistance en compression pour le comportement mécanique et la diffusion des ions chlorures et la porosité accessible à l'eau pour l'évaluation de la durabilité.

Suite à notre campagne expérimentale on a obtenu les résultats suivants :

La porosité gouverne de nombreuses propriétés du béton: les caractéristiques mécaniques (résistances à la compression), les phénomènes de diffusion (ions) et par conséquent la durabilité. Plus la porosité diminue, plus la diffusion des ions chlorure diminue et plus la résistance à la compression augmente.

Le traitement thermique qu'on a effectué nous à permet de voir le comportement mécanique des bétons et d'évaluer la porosité ainsi que la diffusion après traitement thermiques. Températures utilisées sont de très hautes températures allant de 200°C 400°C 600°C et 900°C.

Nos résultats ont montré que le béton ordinaire testé présente une durabilité plutôt moyenne et par rapport au béton pouzzolanique qui peut être préconisé dans la réalisation d'ouvrages marins, vu sa porosité relativement faible.

L'ajout de la pouzzolane dans le béton améliore les résistances en compression mécanique.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle dans le béton non seulement contribue à l'amélioration de sa durabilité et on plus on valorisant ce produit naturelle on peut diminuer les quantités du ciment dans le béton et par la suite contribué à la protection de l'environnement.

## Références bibliographiques :

- [1] [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle by lucien pliskin1992](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/by%20lucien%20pliskin/1992)
- [2] jean –michel torrenti « BÉTON » Histoire du béton
- [3] site web (Google)
- [4] belhocine Aida, Nagoudi Nadjat, << Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux >>, mémoire master en génie civil, université Kasdi Merbah-Ouargla, année 2013/2014.
- [5] simon bernard - Grenoble Ecole de Management. [www.guidebéton.com](http://www.guidebéton.com).
- [6] Adel abderrahmane, Keddou adel <Etude de la durabilité d'un béton léger renforcé par des fibres> Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
- [7] Chafi, Nardjes. Thèse de Magistère. MATRICE CIMENTAIRE RENFORCEE DE FIBRES. Université de Constantine. Mars 2005. Granulat
- [8] Boudieb Fatima Zohra Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Recherche bibliographique sur l'étude de la durabilité des bétons Cas de la perméabilité et la diffusion des ions chlores
- [9] Concrete structure, properties, and materials, Prentice-Hall, p. 450, 1986.
- [10] malaxeur pour béton employé sur les chantiers du Métropolitain de laplace St-Michel à Paris en 1907. Extrait de la Nature, 1907.
- [11] Thèse DURABILITÉ DES BÉTONS Influence des paramètres de composition et de traitement, Melle BOUKERROUCHE Nedjoudja 2009 Université Mentouri Constantin.
- [12] Guide pratique du béton. Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables. Holcim. Suisse <http://www.guidebeton.com/differents-types-beton>
- [13] <http://jevaisconstruire.levif.be/construire-renovation/gros-oeuvre/quels-sont-les-avantages-et-les-inconvenients-d-une-construction-en-beton-prefabrique/article-normal-321029.html>
- [14].Benaissa Rahel asma, Bouhania Imen, << durabilité d'un mortier léger (Granulat pouzzolanique)>>, mémoire de master ,Centre université d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib, année 2015

[15] <https://www.memoireonline.com/11/12/6476/Etude-de-l-influence-de-l-ajout-de-la-pouzzolane-sur-les-caracteristiques-physico-chimiques-des-ci.html>

[16] ].AOUIDIDI Lwiza, «Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane», mémoire master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, année 2015/2016

[17] CASTELLOTEA M., ALONSOA, C., ANDRADEA, C., TURRILLASA, X., CAMPOC, J., 'Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction', Cement and Concrete Research 34 (2004) 1633–1644

[18]Stefano Dal Pont, (2004) « Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température » Thèse de doctorat Ecole nationale des ponts et chaussées (LAMI), France, , p. 222

[19]D.W. HOBBS, deleterious alkali- silica reactivity in the laboratory and under field conditions, Mag. Concret. RES., 103-12 (1993).

[20]BAZANT, Z.P et KAPLAN, M. Concrete at high temperature: material behaviour and mathematical modelling. London Lonman concrete design and construction series, 1996.

[21]ALONSO C, FERNANDEZ L., Deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. Journal of materials sciences.2004

[22] HARMATHY, T.Z. „Effect of moisture on the fire endurance of building element“. National Research Council, Ottawa 1965. Canada

[23] Bensafi boucif Belkacem oussama Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température (Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent)

[24] GAWESKA I., « comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques ». Thèse de l'école nationale des ponts et chaussées et de l'école polytechnique de Cracovie, 2004

[25] AFGC, Association Française de Génie Civil, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Documents scientifiques et techniques, 2004

[26] Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03), Rapport intermédiaire Comportement de structures soumises à un incendie. Premières réflexions Direction des Risques Accidentels MAI 2001

[27]Joos M. and Reinhardt H.W., Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, Cement and Concrete Research 32 (2002) 1497-1504.

- [28] Tsimbrovska M., Dégénération des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées. Evolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure, Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, 1998
- [29] Mémoire de Magistère Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien 2009
- [30] KAYYALI O.A. and HAQUE M.N. (1995) « The Cl-/OH- ratio in chloride contaminated concrete: a most important criterion » Magazine of Concrete Research, Septembre, 47, No 172, pp. 235-242.
- [31] NGUYEN, T. S., (2006), « Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, p. 220
- [32] Mr Belarouci Abdelghani « INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE TRANSFERT DES IONS CHLORES DANS LES BÉTONS » UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN
- [33] Mahmoud Ismail (2006) « étude des transferts et de leurs interactions Avec la cicatrisation dans les fissures pour Prolonger la durée de service des Infrastructures (ponts, centrales nucléaires) » Thèse de doctorat de l'INSA l'institut national des sciences appliquées de Toulouse -France, Avril 2006, p. 225
- [34] WANG, X., (2012), « Modélisation du transport multi-espèces dans les matériaux cimentaires saturés ou non saturés et éventuellement carbonatés », Thèse de doctorat, Université de Paris, 227p.
- [35] MEHTA, P.K., (1986), « Concrete: structure, properties and materials», Prentice-Hall, pp. 105-169.
- [36] Jonathan MAI-NHU Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
- [37] TUTTI K., (1990) « Corrosion of steel in concrete », swedish cement and concrete research institute, Ed. Stockholm, 469 p.
- [38] Boudieb Fatima Zohra « Recherche bibliographique sur l'étude de la durabilité des bétons Cas de la perméabilité et la diffusion des ions chlores » Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Institut de Technologie
- [39] ARLIGUIE G., HORNAIN H., (2007) « Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France,

- [40] QUANG, T.N., (2007) « Modélisations physico-chimiques de la pénétration des ions chlorures dans les matériaux cimentaires », Thèse de doctorat LCPC Paris, France. p. 232.
- [41] Djerbi. A., (2007), « Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité au gaz et sur la diffusion des ions chlorures », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, p. 195
- [42] DEBY Fabrice, (2008) « approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, France, , p. 202.
- [43] TANG L., (1996), « Chloride transport in concrete-measurement and predictions », Thèse de doctorat, publication 6, dept. of building materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, p. 96.