

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

BOUDINA FAHIMA

TERDJEMANE KAHINA

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie Civil

Option : Ingénierie des Matériaux de Construction

Thème :

**La durabilité chimique des mortiers à base de poudre de verre et ciment
CPA**

Devant le jury composé de :

Kennouche Salim
Arab Bahia
Saoudi Nacira
Hami Brahim

UAMOB
UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examinateur
Examinateur

Année Universitaire 2016/2017

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu notre seigneur dieu qui nous a donné la force d'achever ce travail

Nous remercions vivement notre promoteur Madame Arab Bahia pour l'aide précieuse qu'elle nous a offert dans l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement YAHIATEN DJAZIA

Et tous les travailleurs au niveau du laboratoire de cimenterie sour -Ghozlane

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants et chef de

Département de génie civil M^r Kennouche Salim et de qui ont contribué à notre formation.

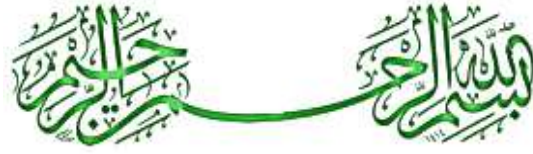
Aussi remercie nos chers parents et nos amis pour leur soutien moral.

Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés, conseillés et encouragés

TERDJEMANE Kahina

BOUDINA Fahima

DEDICACE



Je tiens à dédier ce modeste travail à toi maman Merci pour avoir veillé sur moi ; à toi mon père, rien qu'en regardant dans tes yeux je devine l'amour sans limite que tu me réserves merci aussi.

Sans oublier

A ma chère sœur Karima et son mari Ahmed et leurs filles ; Imane ; Souad ; Lilia et Aya

A Mes chers frères Arab, Aghilas et sa femme Sabrina et leur fils Anis

A mon consort Kahina et sa famille.

et sans oublier mon groupe

*Enfin pour Tous les gens qui m'estiment espérant bien
Que je n'ai oublier Personne dans cette courte page.*

fahima

Dédicaces



*Je dédie ce modeste travail à mon père à ma mère
A mes frere et à mes sœur, à ma famille, anisi qu'à
tous mes amis.*

Kahina

RESUME

Résumé :

Le recyclage du verre pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable. Ceci explique la recherche d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges. L'une des applications envisageables est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons. Néanmoins, il est nécessaire de gérer les deux principaux comportements que peut avoir ce verre lorsqu'il est mis en contact avec une matrice cimentaire, à savoir :

- un comportement néfaste associé à la réaction alcali-silice, si le verre est utilisé sous la forme de grosses particules ;
- un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique, si le verre est utilisé sous la forme de fines particules.

Par ailleurs, il ne faut pas négliger la teneur importante en alcalins que contient ce type de verre (de l'ordre de 13% en masse), puisque ces alcalins sont susceptibles d'activer la réaction alcali-silice.

Summerising :

Recycling composite glass in order to be manufactured into new glass products is at present not economically viable. Therefore, the search for new issues other than stockpile areas or dumping sites could be a serious opportunity. To a certain extent, one of the possible solutions is to use the recycled glass in manufacturing cements and in the preparation of concrete mixtures. However, it is essential to manage the two main behaviours that the glass can have when used in cement-based materials:

- the use of glass as coarse aggregates reveals harmful behaviour related to alkalisilica reaction;
- on the other hand, it can result in useful behaviour related to pozzolanic reaction if used as fine particles.

Furthermore, the significant alkali content should not be overlooked as their mass corresponds to about 13% of the total mass of the glass and as they may activate the alkali-silica reaction.

RESUME

ملخص

في الوقت الراهن، تُعد إعادة استعمال الزجاج في صناعة الزجاج نفسه أمرا ليس مجددا اقتصاديا في أغلب دول العالم، ومصير بقايا الزجاج يكون إما التخزين أو الدفن وكلاهما يضر بالاقتصاد والمحيط. لذا جرى البحث عن سبل جديدة لإعادة استعمال الزجاج. نظرا لتركيبه الغنيه بأكسيد السيلسيوم المتفاعل، فإن استعمال الزجاج كإضافة اسمنتية في الخرسانة يعتبر بديلا لائقا.

دراستنا كان الهدف منها صياغة خرسانة ذات المميزات السامية باستبدال 30% من وزن الإسمنت بنفس الوزن من الزجاج المسحوق. تمت الدراسة على خصائص الخرسانة الجديدة والمتصلية وكذا استدامة الخرسانة في مختلف الأوساط البيئية ذات العالبة.

SOMMAIRE

Sommaire :

INTRODUCTION GENERALE	1
Historique	5
Chapitre I	
I.1.Introduction.....	6
I.3. le verre.....	6
I.3.1 .Comportement du verre dans un milieu cimentaire	7
I.3.2. structure et composition	7
I.3.3.Le verre dans les bétons	9
I.3.4. Ouvrabilité	9
I.3.5. Influence de la finesse	9
I.4.Poudre de verre	10
I.5.La réaction alcali-silice et pouzzolanique	11
I.5.1.La réaction alcali-silice.....	11
I.5.2.Facteurs affectant la réaction alcali-silice.....	12
I.5.3.Mécanismes de la réaction alcali-silice	13
I.5.4.Réaction alcali-silice du verre	15
I.6.La réaction pouzzolanique	15
I.6.1.Facteurs affectant la réaction pouzzolanique.....	16
I.6.2.Réaction pouzzolanique du verre	16
I.7. Le ciment	17
I.7.1.Définition.....	17
I.7.2.Ciment Portland, fabrication et consommation d'énergie	17
I.7.3.La composition des ciments courants	19
I.7.4.Constituants principaux	19
I.7.5.Clincker portland (k)	19
I.7.6. Les proportions moyennes de ces différentes phases.....	20
I.7.6.1.Laitier granulé de haut fourneau	20
I.7.6.2.Cendres volantes (v et w)	20
I.7.6.3.Schistes calcinée.....	21
I.7.6.4.Calcaire.....	21
I.7.6.5.Fumés de silice.....	21
I.7.7.Réactions et déroulement de l'hydratation.....	21

SOMMAIRE

I.7.7.1. Equations bilans des réactions d'hydratation.....	22
I.7.7.2. Structure poreuse	22
I.8. Les adjuvants.....	24
I.8.1. Définition.....	24
I.8.2. Classification et utilisation.....	24
I.9. Conclusion.....	26
Chapitre 2	
II.1. Introduction	27
II.2. Définition de la durabilité	27
II.3. La durabilité des bétons dans la norme NF EN 206-1.....	27
II.4. Durabilité et économie.....	28
II.5. Facteurs influant sur la durabilité.....	28
II.6. Mécanismes responsables de la durabilité.....	30
II.7. Mécanisme de dégradation des bétons	30
II.7.1. Le phénomène de carbonatation	30
II.7.2. Mécanismes de la carbonatation	31
II.7.2.1. Réactions chimiques.....	31
II.7.2.2. Mise en évidence expérimentale.....	33
II.7.2.3. Méthodes d'investigation de la zone dégradée.....	33
II.7.2.4. Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté.....	34
II.7.3. Mécanismes de corrosion des armatures dans le béton.....	35
II.7.4. Actions des chlorures Cl^-	36
II.7.4.1. Les mécanismes de pénétration des chlorures dans le béton.....	37
II.7.4.1.1. La convection	37
II.7.4.1.2. La diffusion	38
II.7.4.2. Les ions chlorures dans le béton	38
II.7.5. Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage.....	38
II.7.4.1. Actions des sels de déverglaçage.....	40
II.7.4.2. Actions des eaux agressives	40
II.7.6. Actions de l'eau de mer	40
II.7.7. Résistance aux agents agressifs.....	41
II.8. Les attaques chimiques des bétons.....	41
II.8.1. Actions des acides	42
II.8.1.1. Les acides minéraux	42

SOMMAIRE

II.8.1.2. Les acides organiques	42
II.8.1.3. Source des acides	44
II.8.1.4. mécanisme d'attaque	44
II.8.1.5. Influence des ajouts cimentaires sur la durabilité des bétons en milieux acides	45
II.8.1.6. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides	46
II.9. Actions des sulfates	48
II.9.1. Attaque externe et attaque interne	49
II.9.2. Sources des sulfates	49
II.9.3. Mécanisme d'attaque du béton par les sulfates	50
II.9.4. Origine et nature des sulfates	51
II.9.5. Les mécanismes de dégradation par les sulfates	52
II.9.6. Exemples de l'attaque par les sulfates	53
II.9.7. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatiques	56
II.10. CONCLUSION	58
Chapitre 3	
III.1. Introduction	59
III.2. Présentation des matériaux	59
III.2.1. Les mortiers	59
III.2.3. Le liant	60
III.2.4. L'eau de gâchage	61
III.2.5. L'adjuvant	62
III.2.6. La poudre de verre	63
III.3. Confection des éprouvettes	64
III.4. Les différentes étapes de confection	64
III.4.1. Pesé des constituants	64
III.4.1.1 Rapport E/L=0.35	64
III.4.1.2. Dosage E/C=0.35	65
III.5. Incorporation de la poudre de verre.....	65
III.6. Malaxage d'un mélange type	65
III.7. Confection des éprouvettes.....	66
III.8. Elaboration des essais.....	68

SOMMAIRE

III.8.1. Les essais physiques	68
III.8.1.1. Essai d'étalement	68
III.8.1.2. Essai de prise.....	68
III.8.1.2.1.Mode opératoire	71
III.8.1.2.2. Prise d'essai à l'aiguille de Vicat	72
III.8.2. Les essais mécaniques.....	74
III.8.2.1. Résistance en flexion.....	74
III.8.2.2. Essai de compression	75
III.8.3. Les essais chimiques	75
III.8.3.1. Essai de durabilité chimique	75
III.8.3.3.Mesure de PH	77
III.8.3.4. Les éprouvettes immergées avec un dosage E/L=0,35.....	78
III.8.3.5. Les éprouvettes immergées avec un dosag E/C=0.35	78
III.8.3.2.. Essai à la phénolphtaléine	78
III.9.Conclusion	79
Chapitre 4	
IV.1. Introduction	80
IV.3.Résultats des essais mécaniques sur mortiers	80
IV.4.Les caractéristiques mécaniques des mortiers à l'état durci	81
IV.4.1. Eau de robinet.....	81
IV.4.1.1. La masse des différents types des mortiers à l'état durci	81
IV.4.1.2.Les résistances mécaniques.....	83
IV.4.1.2.1.La résistance mécanique à la flexion.....	83
IV.4.1.2.2.La résistance à la compression.....	85
IV.4.2.Effet d'étuvage et l'air libre	87
IV.4.2.1.:Effet d'étuvage sur l'évolution de la masse	87
IV.4.2.2.La résistance mécanique à la flexion.....	90
IV.4.2.3.La résistance à la compression.....	92
IV.5.Les Résultats de la durabilité chimique.....	94
IV.5.1.L'attaque des éprouvettes par l'acide chlorhydrique (Hcl)	94
IV.5.1.1.La perte de masse.....	95
IV.5.1.2.La résistance à la flexion.....	96

SOMMAIRE

IV.5.1.3.La résistance à la compression.....	97
IV.5.2.Attaque des mortiers par les sulfates (MgSO ₄).....	100
IV.5.2.1.La perte de masse	100
IV.5.2.2.La résistance à la flexion	101
IV.5.2.3.La résistance à la compression	103
IV.5.3.Attaque des mortiers par l'eau de mer	105
IV.5.3.1.La perte de masse	105
IV.5.3.2.La résistance à la flexion.....	106
IV.5.3.3.La résistance à la compression	108
IV.6.Evolution ou diminution en volume	110
IV.7.La Profondeur de dégradation	111
IV.8.La résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers des différents milieux	113
IV.9.Conclusion	115

Liste des tableaux	page
Chapitre I :	
Tableau I.1: Composition typiques du verre	09
Tableau I.2: Catégories de pores dans un mortier	23
Chapitre II :	
Tableau II.1: Formule chimique des acides organiques présents dans les effluents d'élevage	43
Chapitre III :	
Tableau III.1: Composition chimique du CEMI	61
Tableau III.2: Composition minéralogique du CEM I	61
Tableau III.3: Composition chimique du verre	64
Tableau III.4 : Les constituants du mortier pour dosage E/L=0.35.	64
Tableau III.5: Les constituants du mortier pour rapport E/C.	65
Tableau III.6 : : Résultats obtenus pour l'essai d'étalement.	70
Tableau III.7 : Les résultats de l'essai de prise.	73
Tableau III.8: Le nombre des éprouvettes immergées dans les différents milieux avec E/L=0.35	78
Tableau III.9 : Le nombre des éprouvettes immergées dans les différents milieux avec E/C=0.35	78
Chapitre IV :	
Tableau IV.1 : Les noms recommandés pour la présentation des résultats.	80
Tableau IV.2 : La masse des différents types des mortiers à l'état durci des deux dosages E/L et E/C.	82
Tableau IV.3 : La Résistance à la flexion des différents types des mortiers	83
Tableau IV.4: La Résistance à la compression des différents types des mortiers.	85
Tableau IV.5 : La masse des différents types des mortiers avant l'étuvage.	87
Tableau IV.6 : Les masses des différents types des mortiers après l'étuvage.	87
Tableau IV.7 : La masse des différents types des mortiers à l'air libre.	88
Tableau IV.8 : La masse des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage.	89

Liste des tableaux	page
Tableau IV.9 : La Résistance à la flexion des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage de dosage E/L.	90
Tableau IV.10 : Les résultats de résistance mécanique en flexion des différents types des mortiers conservés à l'air libre.	90
Tableau IV.11 : La résistance à la compression des différents types des mortiers de l'étuvage.	92
Tableau IV.12 : La résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers conservés à l'air libre	92
Tableau IV.13. Perte de masse en fonction de temps dans l'acide chlorhydrique (HCl)	95
Tableau IV.14. La résistance mécanique à la flexion des différents types des mortiers dans la solution Hcl.	96
Tableau IV.15. La résistance à la compression des différents types des mortiers dans la solution Hcl	87
Tableau IV.16. Perte de masse en fonction de temps dans l'acide sulfatique	100
Tableau IV.17. Les résultats de résistance mécanique à la flexion des différents types des mortiers dans la solution MgSO ₄ .	101
Tableau IV.18. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers dans la solution MgSO ₄	103
Tableau IV.19. Perte de masse des éprouvettes dans l'eau de mer	105
Tableau IV.20. Les résultats de résistance à la flexion des différents types des mortiers des deux rapports E/L et E/C dans l'eau de mer.	106
Tableau IV.21. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers dans l'eau de mer.	108
Tableau IV.22. Les résultats de l'évolution en volume des différents milieux.	110
Tableau IV.23. Les résultats de mesure de profondeur de dégradation des différents types des mortiers.	112
Tableau IV.24. La résistance mécanique à la compression des différents milieux des deux dosages E/L et E/C à 60 jours.	113

Liste des Figures	page
Chapitre I :	
Figure I.1 : évolution de la production des mortiers en France (a) et en Europe (b)	02
Figure I.2: Répartitions des différents mortiers en France et en Europe en 2007	02
Figure I.3 : Verre de bouteille : recyclage en conteneurs et nécessité d'un recyclage alternatif.	03
Figure I.4 : déchets de verre.	07
Figure I.5: Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite) (b) structure vitreuse réseau amorphe	08
Figure I.6 : Influence des particules de verre sur l'expansion et le développement de la résistance en compression	10
Figure I.7 : Poudre de verre	10
Figure I.8: Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-silice et pouzzolanique	11
Figure I.9 : Exemples de dommages occasionnés par RAS	12
Figure I. 10 : Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice	14
Figure I.11 : indices d'activité pouzzolanique du verre utilisés dans des conditions différentes	16

Figure I.12. La fabrication du ciment	18
Figure I.13 : Image de clinker par microscope optique	19
Chapitre II :	
Figure II.1: Eclatement du béton d'enrobage dû à la carbonatation Château d'eau	31
Figure II.2 : Mécanisme de carbonatation de $Ca(OH)_2$	33
Figure II.3 : Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone dégradée (incolore) par la phénolphthaléine. Béton B4 48H,	34
Figure II.4 : Section d'éprouvette $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Mise en évidence du front de carbonatation par la phénolphthaléine et principe de la mesure de l'épaisseur de béton carbonaté	35
Figure II.5. Mécanisme de corrosion des armatures	36
Figure II.6 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures	37
Figure II.7 : Actions des sels de déverglaçage	39
Figure II.8: Formation de l'ettringite	40
Figure II.9 : Observation au MEB de la surface des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de mer	41
Figure II.10: Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique	47
Figure II.11: Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique	48
Figure II.12: Etapes d'attaque du Béton par les sulfates	51
Figure II.13: Représentation schématique de la progression de l'attaque sulfatique externe dans une éprouvette en mortier immergée dans une solution de sulfate de sodium	52
Figure II.14 : Cristaux d'ettringite dans la porosité du mortier M9. Photo MEB	54
Figure II.15 : Photos microscopiques de C3A et d'ettringite	54
Figure II.16 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium	55
Figure II.17: Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium	56
Figure II.18: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa)	57
Figure II.19 : Expansions linéaires mesurées sur des éprouvettes de bétons d'ouvrages	57

Chapitre III :	
Figure III 1. Sable de carrière 0/4.	60
Figure III.2. Ciment portland CPA (CEMI 52.5)	60
Figure III.3. L'eau de gâchage.	61
Figure III.4. Super plastifiant TEMPO 12.	62
Figure III.5. Analyse granulométrique de la poudre de verre (annexe 2).	63
Figure III.6. La poudre de verre.	63
Figure III.7. Mortier après le malaxage.	66
Figure III.8. la table a choc.	66
Figure III.9: Mortier après les secousses	67
Figure III.10: Chambre de conservation	67
Figure III.11: L'effet d'étuvage	68
Figure III.12 : Les éprouvettes après le démoulage	68
Figure III.13 : Essai d'étalement.	69
Figure III.14 : Mesure de diamètre d'étalement	69
Figure III.15 : les résultats d'essai d'étalement	70
Figure III.16 : L'appareil de Vicat.	71
Figure III.17 : La pate sur une plaque de verre..	72
Figure III.18 : Lancement de début et fin de prise (l'appareil de Vicat automatique.	73
Figure III.19 : Les résultats d'essai de prise.	74
Figure III.20 : Essai de traction par flexion.	74
Figure III.21 : Essai de compression.	75
Figure III.22 : Les éprouvettes dans les solutions (Hcl, MgSO ₄ et l'eau de mer).	76
Figure III.23 : Préparation de la solution Hcl.	76
Figure III.24 : Préparation de la solution de sulfate de magnésium.	76
Figure III.25 : Le PH-mètre.	77
Figure III.26 : Principe de mesure de la profondeur de carbonatation : a) [Villain, 2006] et b) [Atis, 2003] .	78

Chapitre IV :	
Figure IV.1: (a) Dispositif pour l'essai de résistance à la compression, (b) flexion.	81
Figure IV.2: Pesée des éprouvettes	81
Figure IV.3: Masses des éprouvettes des différents types des mortiers.	82
Figure IV.4 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents types des mortiers. .	85
Figure IV.5 : La résistance à la flexion des différents types des mortiers.	85
Figure IV.6 : Les résultats de résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers.	
Figure IV .7: La résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers.	
Figure IV.8 : Masses des éprouvettes des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage.	
Figure IV.9 : La masse des éprouvettes conservées à l'air libre et des éprouvettes étuvées.	127 129
Figure IV.10 : Les résultats de résistance mécanique à la flexion de l'effet d'étuvage.	130
Figure IV.11 : La résistance à la flexion des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage et l'air libre.	91
Figure IV.12 : La résistance à la compression des différents types des mortiers étuvés en fonction de temps.	93
Figure IV.13: Les résistances mécaniques à la compression des différents types des mortiers de l'étuvage et l'air libre.	93
Figure IV.14 : Les éprouvettes dans la solution Hcl, a) à 28 jours, b) après 60 jours.	94
Figure IV.15 : La perte de masse des différents types des mortiers dans la solution Hcl.	95
Figure IV.16: Les courbes de résistance mécanique à la flexion de solution Hcl	96
Figure IV.17 : La résistance à la flexion des différents types des mortiers dans la solution Hcl.	97
Figure IV.18 : Les courbes de résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers de la solution Hcl.	98
Figure IV.19 : Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers dans la solution Hcl.	99
Figure IV.20 : Les éprouvettes dans la solution de MgSO ₄ .	100
Figure IV.21 : La perte de masse des différents types des mortiers dans la solution	100

Figure IV.22: Les résultats de résistance mécanique à la flexion des différents types des mortiers dans la solution MgSO ₄	101
Figure IV.23: Les résultats de résistance à la flexion des différents types des mortiers de la solution MgSO ₄	102
Figure IV.24: Les résultats de résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers dans la solution MgSO ₄	103
Figure IV.25 : Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers de la solution MgSO ₄ .	103
Figure IV.26 : Les éprouvette dans l'eau de mer.	104
Figure IV.27 : La perte de masse des différents mortiers dans l'eau de mer.	105
Figure IV.28. Les courbes de résistance à la flexion des différents types des mortiers dans l'eau de mer.	106
Figure IV.29. Les résultats de résistance à la flexion des différents types des mortiers de l'eau de mer.	106
Figure IV.30. Les courbes de résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers dans l'eau de mer.	107
Figure IV.31. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers de l'eau de mer.	108
Figure IV.32. L'évolution et diminution de volume des différents milieux (a) Hcl, (b) MgSO ₄ , (c) Eau de mer.	109
Figure IV.33. Perte en volume des éprouvettes conservées dans les différents milieux a 60 Jours	110
Figure IV.34. Mesure la profondeur de dégradation.	111
Figure IV.35. Mesure de la profondeur de dégradation.	111
Figure IV.36. La résistance à la compression des différents milieux à 60 jours.	112

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Etant considéré comme un matériau de construction moderne, le béton est utilisé depuis des décennies, il est obtenu par agrégation de granulats naturels (sable, gravier, etc.) et aggloméré par un liant.

Le béton est le matériau le plus utilisé, notamment en matière de construction (bâtiments, hôpitaux, routes, ponts...etc.)

Cela signifie qu'il serait incapable aujourd'hui de satisfaire les besoins en matière de construction sans le béton. Tout béton doit répondre à certaines exigences essentielles c'est-à-dire garder sa résistance désirée et sa fonctionnalité durant la durée de vie en service spécifié.

La durabilité des matériaux de construction est remise par le vieillissement physico-chimique de ces matériaux.

Au cours des 40 dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes. Aujourd'hui, ils associent des liants hydrauliques et de multiples adjuvants. En France, leur utilisation n'a fait qu'augmenter depuis 1970, pour arriver à une production proche de quatre millions de tonnes en 2007 (Figure 1.1 (a)) [1]. Par ailleurs, du fait de cette complexité, la part des mortiers fabriqués sur chantier n'a fait que diminuer au profit des mélanges réalisés en usine. En Europe, la production des mortiers préformulés atteint 70 millions de tonnes contre 5 millions de tonnes pour les mortiers réalisés sur chantier (Figure 1.1 (b)) [1]. La fabrication en usine permet de doser, de façon précise et régulière, les dizaines de composants qui entrent dans la formulation des mortiers industriels et d'assurer un contrôle permanent de leurs caractéristiques. Les mortiers industriels sont présents dans tous les secteurs d'activité du bâtiment et des travaux publics. A chaque domaine d'application correspond un type de mortier pouvant être dédié à :

- la protection et la décoration (sous-enduits, enduits de parement colorés, enduits monocouche),
- la pose des carrelages (mortiers colles et mortiers de joints),
- la préparation des sols (chapes, ragréages, enduits de lissage, d'égalisation),
- les assemblages (éléments de maçonnerie, fixation des éléments de cloisons et de doublage),
- l'isolation et l'étanchéité (systèmes d'isolation thermique par l'extérieur, d'imperméabilisation, d'étanchéité, d'isolation phonique, d'ignifugation),
- les travaux spéciaux (gunitage, réparations d'ouvrages d'art et de génie civil, scellement et calages, coulis d'injection, cuvelages).

INTRODUCTION GENERALE

En France, pour l'année 2007, 120 millions de m² de façades ont été enduits, 32 millions de m² de sols ont été égalisés et lissés, 132 millions de m² de carrelage ont été posés et 210 millions de m² de murs et cloisons ont été montés. Chaque français a consommé environ 60 Kg de mortier [1].

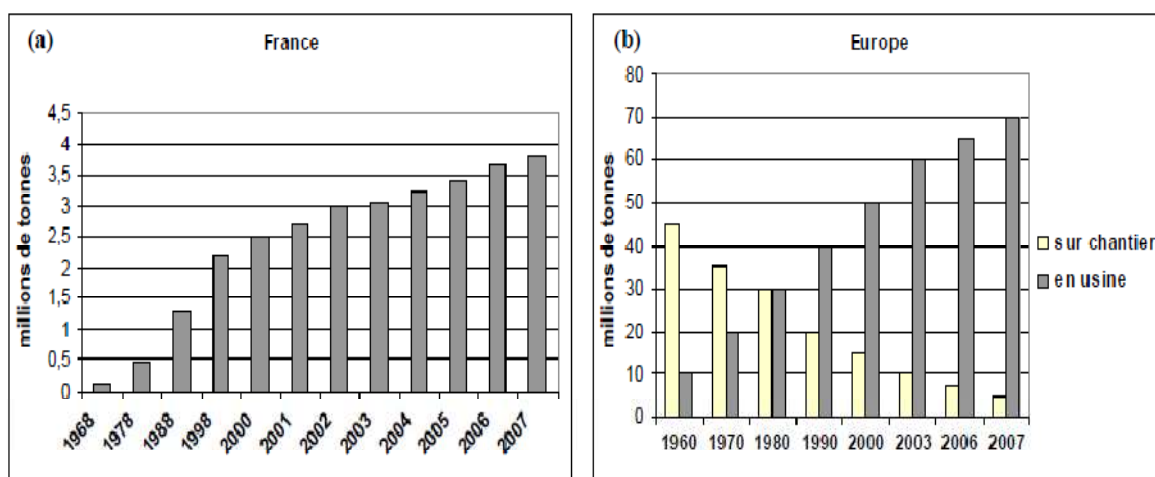


Figure I.1 : évolution de la production des mortiers en France (a) et en Europe (b)

Les mortiers d'enduit, les colles à carrelages et les mortiers de réparation représentent en termes de ventes et de quantités produites, les postes les plus importants de tous les mortiers utilisés (Figure I.2).

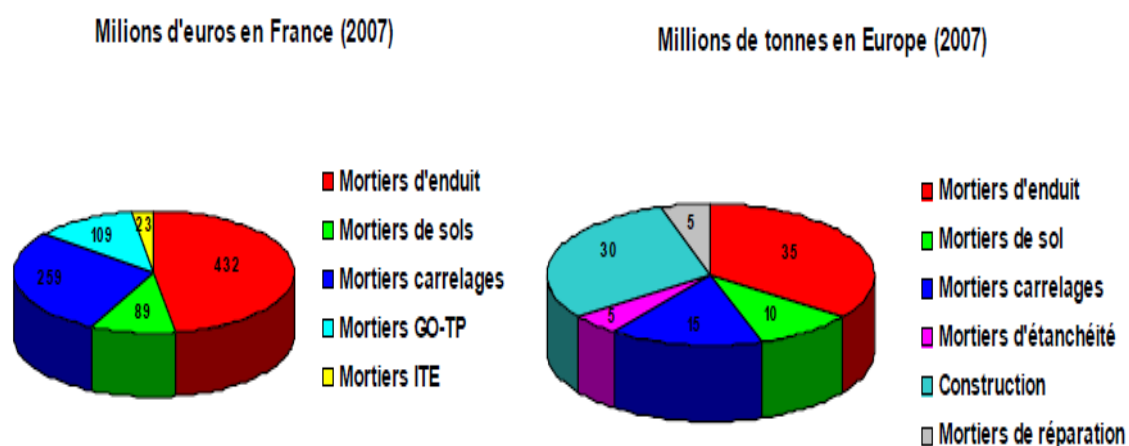


Figure I.2 : répartitions des différents mortiers en France et en Europe en 2007 [2].

INTRODUCTION GENERALE

Le verre un des matériaux fabriqué par les humains, est connu depuis plus de 9000 ans. A cause de sa disponibilité, de ses propriétés mécaniques uniques et de ses propriétés chimiques, thermiques et optiques il a beaucoup d'applications bénéfiques. Théoriquement, est un matériau 100% [2] recyclable et il peut être recyclé plusieurs fois sans aucune perte de qualité.

Le recyclage et l'utilisation de verre est notoire dans le processus manufacturiers. Les applications les plus courantes du verre recyclé sont comme matériaux décoratifs, comme granulats dans la fabrication de l'asphalte, comme granulats fins dans la fabrication de béton, etc. l'analyse chimique du verre montre qu'il est principalement composé de silice ainsi, son utilisation dans l'industrie de matériaux de construction très utile. Pour un recyclage efficace dans l'industrie du verre nous avons d'abord besoin d'une composition homogène de verre ainsi, la présence de contaminants comme les métaux, les plastiques, les papiers et les céramiques doit être évités.

Insatisfaisants dus à la réaction alcali-silice .pour éviter ce problème, ont peut le broyer très finement et l'utiliser comme matériau pouzzolanique .En effet le verre ayant une surface spécifique élevés est réactif selon la réaction pouzzolanique et peut diminuer le risque de réaction alcali-silice à long terme.

Le verre peut être recyclé infiniment sans changements des caractéristiques physico-chimiques (figure I.3). Toutefois, une fois le verre de différentes couleurs mélangé (=verre mixte), son recyclage par la voie normale devient coûteux (du fait de la nécessité du tri à la main, de la présence de contamination, etc.). Ainsi, de grandes quantités de verre ne sont pas recyclées et sont, donc, entreposées dans les centres de tri en attente d'un recyclage alternatif.

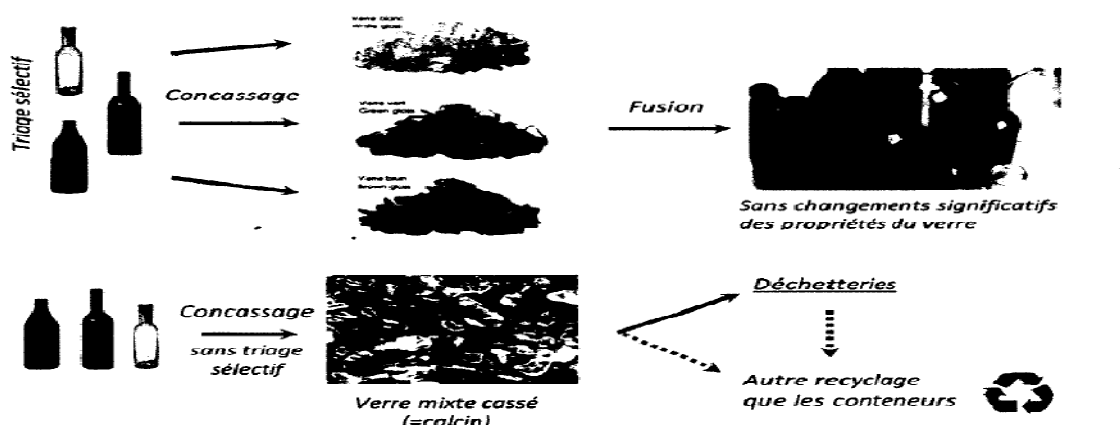


Figure I.3 .Verre de bouteille : recyclage en conteneurs et nécessite d'un recyclage alternatif.

INTRODUCTION GENERALE

Le béton à PV offre un Potentiel à un changement radical de l'économie locale : possibilité d'utiliser le verre en grande quantité dont le prix est négatif (donc possibilité de donner une valeur rajoutée à ce verre) et dont un autre moyen de recyclage demeure quasi-impossible, voire trop cher. Néanmoins, il existe plusieurs obstacles à l'emploi du verre dans le béton, surtout dus au manque de connaissances sur leurs durabilités, ce qui engendre la méfiance des usagers potentiels. Ainsi, pour que la PV soit accepté en tant qu'ajout cimentaire, il est indispensable d'analyser son comportement sous différents angles.

Ces dernières années, un nombre important de recherches sur la PV dans la matrice cimentaire ont été effectuées. La plupart des essais réalisés se concentrent sur deux aspects globaux : L'activité pouzzolanique et la réaction alcali-silice. En même temps, il est possible de trouver dans la littérature les données sur l'effet du verre en substitution sur les différentes propriétés de béton frais et durci [2].

INTRODUCTION GENERALE

Historique :

L'histoire du béton montre que cette technique bien fixée empiriquement par les romains avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement en 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments. L'ingénieur Belidor, autour de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition de béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Luis Vicat en 1817, celle de ciment portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement de béton [3].

A l'origine, le béton est constitué d'un mélange de trois matériaux :

Le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel [3].

Au 20^{ème} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.) [3].

Partie Théorique

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

I.1.Introduction :

Les ajouts minéraux sont largement utilisés en substitution partielle du ciment portland à travers le monde. Ils proviennent de sources naturelles (pouzzolane, calcaire...) ou de sous produits industriels (laitier, cendre volante...), leurs valorisation présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques.

L'utilisation de la poudre de verre broyée en remplacement de clincker présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets. Certains ajouts cimentaires finement broyés ont une influence plus ou moins marquée sur les caractéristiques physicomécaniques des liants en fonction de leur composition minéralogique, leur finesse et leur pourcentage.

Nous traitons à partir de cette étude l'influence de l'adition de la poudre de verre finement broyée sur le comportement physique et mécanique du ciment portland [4]. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraine deux réactions à effet contraire :

La réaction alcali-silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique [5].

I.2. le verre :



Du fait de sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice .Le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment portland dans les bétons [6].

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons .Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent [6].



Figure I.4. Déchets de verre.

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité .En effet ,pour des raisons économiques et environnementales ,l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles –ci ont encouragé de nouvelles études [6].

I.2.1 .Comportement du verre dans un milieu cimentaire :

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement. Essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres .alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique [6].

I.2.2. structure et composition :

La grande majorité du verre produit pour des applications de vitrage ou de conditionnement est de type sodocalcique. Les formulations typiques sont à base de silice, auxquelles sont ajoutés des éléments mineurs permettant d'aider à la mise en œuvre ou d'adapter les propriétés du produit fini [7].

Le verre peut être considéré comme un solide mais aussi comme un liquide surfondu. Il est issu du refroidissement rapide d'un liquide entraînant sa vitrification. D'un point de vue structurel, le verre est généralement comparé à un liquide car il présente une structure désordonnée, comme le montre la figure I.4 [7].

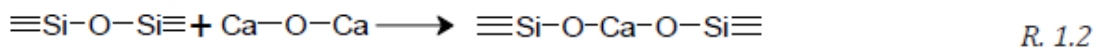
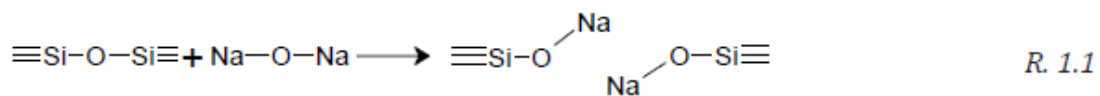
Ce réseau amorphe est basé sur un ou plusieurs éléments « formateurs de réseau », définis comme pouvant former un verre à eux seuls. Ce sont des éléments de valence élevée (4 ou 5) comme le silicium, le bore, le phosphore, formant des polyèdres, dont la structure est désordonnée à grande échelle. Dans le cas des verres sodocalciques, c'est le silicium qui forme le réseau [7].

Chapitre I : Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre



Figure I.5 : Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite) (b) structure vitreuse réseau amorphe [7].

Des « modificateurs de réseau » sont également ajoutés aux verres. Ces éléments alcalins ou alcalino-terreux, typiquement CaO et Na₂O, permettent soit d'équilibrer les charges, soit de modifier le réseau. Les alcalins (M₂O) sont appelés des « fondants ». Ils provoquent des coupures dans le réseau continu de silicium (voir R. 1.1), ce qui facilite la mise œuvre grâce à une diminution de la viscosité et de la température de fusion. L'ajout d'alcalins affecte négativement la durabilité du produit. Des éléments « stabilisants » sont donc ajoutés dans la matrice afin d'améliorer la résistance du verre face aux attaques chimiques. Ces éléments sont des alcalino-terreux (CaO, MgO), qui modifient le réseau en formant des ponts entre les polyèdres (voir R. 1.2). L'ajout d'alumine (Al₂O₃) en faible quantité permet également d'améliorer la durabilité du verre [7].



Enfin, on retrouve divers oxydes métalliques à l'état de trace, comme le fer, le titane, le cobalt ou le chrome. Ce sont soit des impuretés, soit des ajouts permettant d'adapter la couleur du produit fini. Le fer est toujours présent, et il est responsable de la teinte légèrement verte du verre transparent. À plus forte concentration le fer permet de donner la couleur brune au verre. Le chrome est ajouté pour obtenir la couleur verte et le cobalt permet d'obtenir un verre bleu. Les formulations typiques de verre creux, utilisées notamment pour la fabrication de bouteilles, sont présentées dans le tableau I-1.

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

Tableau I-1 : Composition typiques du verre [7].

élément	Min	max	typique
SiO ₂	68,9	75	74
CaO	4,9	13	10,5
Al ₂ O ₃	1,2	3,0	1,3
Fe ₂ O ₃	0,1	0,9	0,4
P ₂ O ₅	-	-	-
MgO	0,3	1,1	0,5
SO ₃	0,07	0,21	0,2
Na ₂ O	10	16	13
K ₂ O	0,2	0,7	0,2

I.2.3. Le verre dans les bétons :

Le verre peut être incorporé dans un béton suivant deux approches. Sous forme de granulats ou en tant qu'addition cimentaire. Incorporer le verre en tant que granulats a l'avantage d'utiliser de grands volumes de matière et ne nécessite pas de concassage fin. Mais la principale préoccupation dans une telle application est le risque de réaction alcali-granat. En ce qui concerne les additions de verre finement broyé, elles ont l'avantage de présenter une activité pouzzolanique et, d'un point de vue environnemental et économique, de limiter la quantité de ciment consommé. La poudre de verre ne présente pas de propriétés liantes, mais une réactivité pouzzolanique ; les auteurs la substituent au ciment dans des proportions allant jusqu'à 40% en masse [7].

I.2.4. Ouvrabilité :

Certains travaux montrent une légère diminution de l'ouvrabilité avec le taux de substitution du ciment par du verre sous forme de fine. Ce comportement est attribué à la géométrie des particules et à la réduction du module de finesse. En revanche, d'autres auteurs ne notent qu'un effet négligeable sur la demande en eau ou en superplastifiant [7].

I.2.5. Influence de la finesse :

La finesse joue un rôle primordial dans la réactivité du verre. Il est reconnu que les fines réagissent de manière pouzzolanique et contribuent au développement des performances du béton, alors que sous forme de granulats, une réaction alcali-silice peut apparaître. La figure 10 montre l'influence du diamètre des particules de verre sur l'expansion d'un mortier [7].

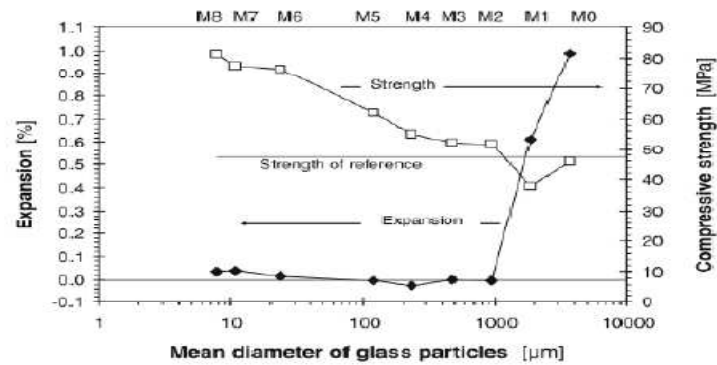


Figure I. 6. Influence des particules de verre sur l'expansion et le développement de la résistance en compression [7].

On peut aussi noter que la finesse a un impact sur le développement de la résistance à la compression. L'activité pouzzolanique augmente ainsi avec la finesse de la poudre, ce qui confirme d'autres études. Shao et al ont ainsi montré qu'un diamètre inférieur à 75 µm est favorable pour le développement des réactions pouzzolaniques [7].

I.3.Poudre de verre :

La poudre de verre est un ajout cimentaire obtenu par broyage du verre mixte (déchets de verre de différentes couleurs) [8].

L'utilisation de la poudre de verre dans un système cimentaire est un moyen de valorisation du verre mis en décharge. Beaucoup de travaux rapportent l'amélioration de l'ouvrabilité des bétons en présence de la poudre de verre. Les principales études menées sur les bétons contenant la poudre de verre ont conduit à l'évaluation des effets de cette dernière sur les propriétés rhéologiques, les propriétés mécaniques et sur certains paramètres de durabilité. Les paramètres de durabilité des bétons contenant la poudre de verre étudiés jusqu'à présent se résument essentiellement à la pénétrabilité des ions chlore, à la mesure des variations dimensionnelles telles que les retraits de séchage et endogènes, à la résistance à la réaction alcalis-granat et à la résistance au gel-dégel et à l'écaillage [8].



Figure I.7. Poudre de verre [9].

I.4.La réaction alcali-silice et pouzzolanique :

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'utilisation du verre broyé comme matériau pouzzolanique dans le cadre de se programme de recherche et d'expliquer son influence sur la rhéologique de la pate, sur le mortier et sur les propriétés du béton frais et durci.

Le verre peut manifester deux types de comportement à conséquences antagonistes : soit une réaction de type alcali-silice (RAS) entraînant des effets néfastes, soit une réaction de type pouzzolanique bénéfique pour la structure (Figure I.8).

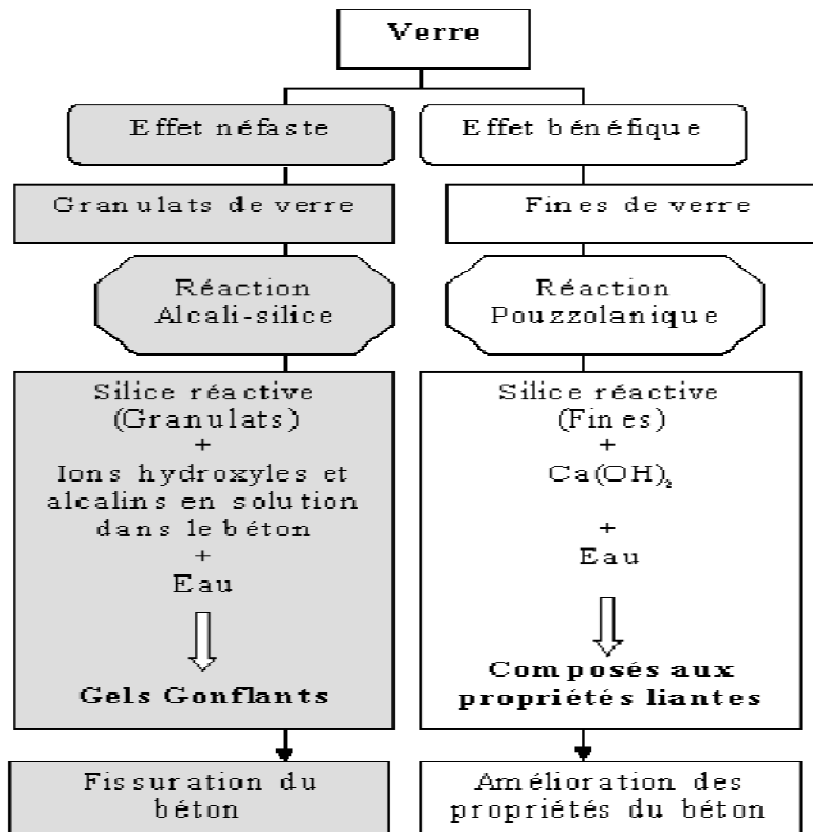


Figure I.8. Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-silice et pouzzolanique [10].

I.4.1.La réaction alcali-silice:

Vers 1940, STANTON à découvert une pathologie, la réaction alcali-granulats (ou alcali-réaction), qui affecte les bétons et que les chercheurs ont surnommée « le cancer des bétons ». Sous ce terme se regroupent toutes les réactions chimiques qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pate de ciment.

Le développement du phénomène de la réaction alcali-granulats dans les bétons nécessite la conjugaison de trois conditions:

- (i) présence d'un granulat potentiellement réactif;
- (ii) humidité relative supérieure à 80-85% [10];
- (iii) concentration en alcalins au-dessus d'un seuil critique.

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

Il existe trois grands types de réaction alcali-granulats: les réactions alcali-carbonate, alcali-silice et alcali-silicate. La réaction la plus fréquemment rencontrée est la réaction alcali-silice. Les désordres occasionnés par l'alcali-réaction se présentent sous forme de faïençage ou d'éclatement du béton. Ces réactions n'apparaissent en général qu'après plusieurs dizaines d'années. Cependant si les trois conditions précédemment citées sont remplies, avec notamment une forte réactivité des granulats et une forte teneur en alcalins, une alcali-réaction peut se développer en quelques années [11] la figure 1.5 illustre trois cas de dommages causés par la RAS [11].



(a) Tablier d'un pont



(b) Déplacement sur appui dû à l'allongement du tablier.



(c) Rupture d'un acier passif

Figure I.9.Exemples de dommages occasionnés par RAS (réaction alcali-silice) [11].

I.4.2.Facteurs affectant la réaction alcali-silice :

Des travaux antérieurs ont permis de montrer que différents paramètres affectent la réaction alcali-silice :

-La taille des granulats réactifs à un impact important sur les gonflements entrainés par la réaction alcali-silice [10].

Cependant la taille des granulats qui provoquerait des gonflements réactifs semble dépendre de la nature des granulats réactifs. Pour certains types de granulats comme les siliceux du nord de l'Allemagne (silex), l'expansion va de pair avec la taille des grains. Pour d'autres granulats, comme le verre de quartz, les gonflements les plus importants sont obtenus avec les grains les plus petits [10]. Même constat retrouvé avec les granulats d'opale [10].

Chapitre I : Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

- Beaucoup d'études ont montré qu'il existe une teneur "pessimum" de granulats réactifs dans le béton qui causerait une expansion maximale. Selon WOOLF [1952], c'est le pessimum du rapport "granulats réactifs/alcalins" dans le béton qui est d'une importance critique. Plus tard, GLASSER et KATAOKA [1981] ont montré que c'est principalement un certain rapport molaire de "SiO₂/alcalins" qui est le facteur essentiel dans l'expansion du béton.

- Comme toute autre réaction, la réaction alcali-silice est sensible à la température [10]. Cependant l'effet de cette dernière est purement cinétique et peut être traduit par une loi d'Arrhenius [10].

- L'eau est un ingrédient important pour la réaction alcali-silice car elle est à la fois le milieu de transport des espèces ioniques et fait partie des produits de la réaction. Sa disponibilité est donc un paramètre essentiel pour la réaction. Il est conclu que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative >80 % est nécessaire un rapport eau/ciment de 0,4 provoquerait aussi des expansions.

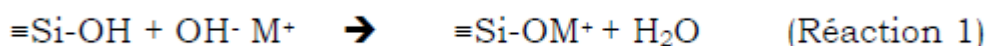
- La teneur en alcalins équivalents est une donnée importante vis à vis des gonflements : plus la teneur initiale en alcalins est forte plus important est le gonflement obtenu [10]. L'utilisation d'un ciment à basse teneur en alcalins (<0,6 % Na₂O_{eq}) est recommandée pour éviter ou réduire l'expansion. Cependant, bien que cela soit rare, on observe des expansions importantes des bétons faits à base de ciments à très basses teneurs en alcalins [10].

Cependant la méthode la plus commune pour réduire (ou pour éviter) l'expansion est d'incorporer des matériaux pouzzolaniques (15-30 % du poids de ciment) [10] ou l'utilisation des ciments de laitiers. Toutefois, des quantités inadéquates peuvent avoir l'effet contraire et entraîner des expansions [10].

Des inhibiteurs chimiques comme les sels lithium sont également utilisés pour contrer cette réaction, probablement en arrêtant la dissolution de la silice. Le nitrate de lithium présente le plus d'avantages, notamment car il ne possède pas l'inconvénient, en cas de sous dosage, d'augmenter l'expansion ce qui est par contre le cas de LiOH et Li₂CO₃.

I.4.3. Mécanismes de la réaction alcali-silice :

La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines d'années après la fabrication du béton. Les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives. Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle :



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situe plus profondément à lieu ensuite :



Avec (M = Na ou K)

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

De façon simplifiée, l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit (Figure 1.5) :

- Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- Migration des ions OH^- , Na^+ et K^+ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.
- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.
- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydrate alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na^+ et K^+ ainsi que l'eau.
- Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.
- Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

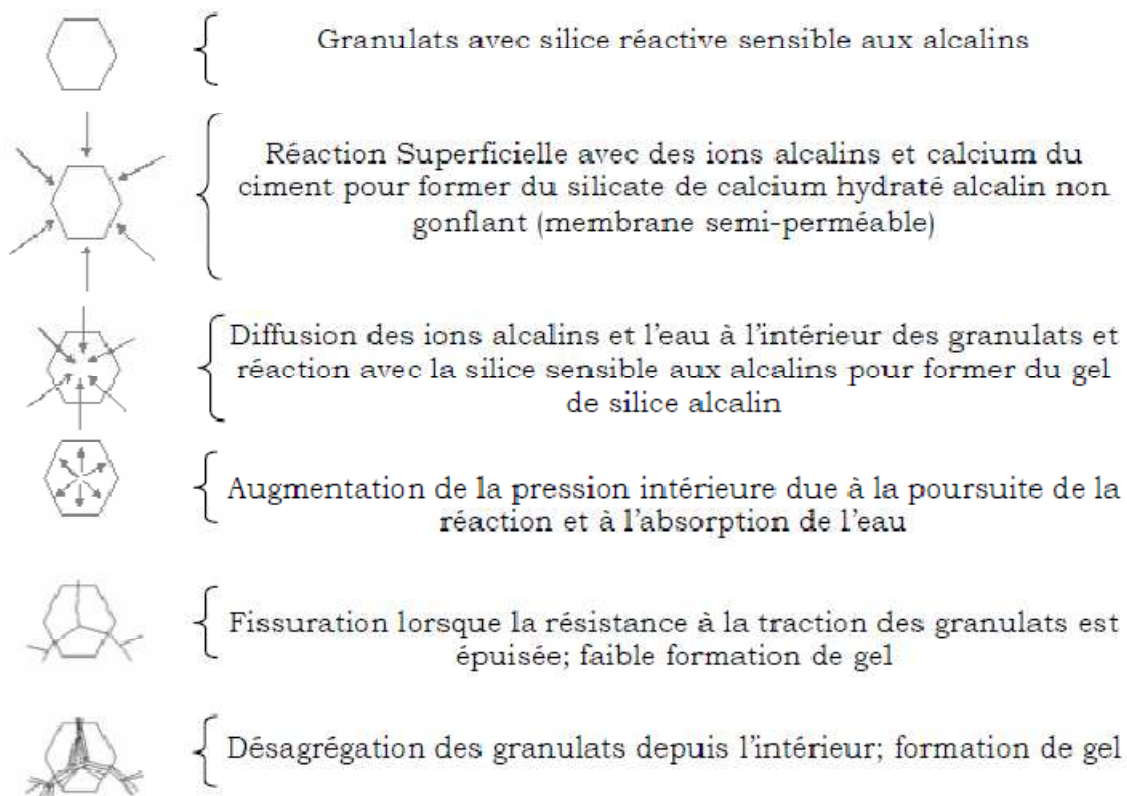


Figure I.10. Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [10].

La présence de gels d'alcali-réaction étant associée, dans le béton, à l'existence d'une fissuration anarchique et évolutive, on leur accorde volontiers des propriétés gonflantes. Différentes théories tentent d'expliquer l'origine de ces gonflements

I.4.4.Réaction alcali-silice du verre :

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau, en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons :

De même que la pouzzolanité, la réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres.

La bibliographie montre que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

I.5.La réaction pouzzolanique :

À l'origine, l'appellation d'une pouzzolane se limitait aux cendres volcaniques qui se forment naturellement ainsi qu'aux argiles calcinées qui peuvent réagir avec la chaux, en présence d'eau et à température ambiante. Ce terme a ensuite été élargi pour couvrir d'autres matériaux artificiels ou naturels, silico-alumineux ou siliceux, qui en présence d'eau réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés qui possèdent des propriétés liantes.

La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + Eau \Rightarrow silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés.

La propriété pouzzolanique se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice amorphe ou dont le réseau cristallin est fortement déficient. L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts : [10].

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer. (Thermodynamique)
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane. (Cinétique) Les produits de la réaction pouzzolanique sont des gels amorphes de type C-S-H, avec des rapports Ca/Si généralement bien inférieurs à ceux des C-S-H du ciment [10].

I.5.1.Facteurs affectant la réaction pouzzolanique :

Pour les mélanges ciment (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité. L'addition de petites quantités de bases tel le NaOH ou une température élevée [10]. S'avèrent de bons accélérateurs de la réaction pouzzolanique. La teneur en chaux, le rapport eau/liant du mélange et le pH de la solution interstitielle sont également considérés comme facteurs influençant la réaction pouzzolanique [10].

I.5.2.Réaction pouzzolanique du verre :

L'activité pouzzolanique du verre a été évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG, DRX. La Figure 1.7 rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre à la résistance du mélange témoin. Il a été difficile, voire impossible, de rassembler des travaux tous faits dans des mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes se dégagent nettement :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique du verre : plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique ;
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente ;
3. Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc ;
4. Pour des résistances optimales, il est plus intéressant de substituer le sable que le ciment par le verre
5. Une température élevée joue un rôle important dans l'activation du verre ;
6. Le verre, comparé à d'autres pouzzolanes notamment la cendre volante, développe rapidement son activité pouzzolanique ;
7. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane en remplacement partiel du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes [10].

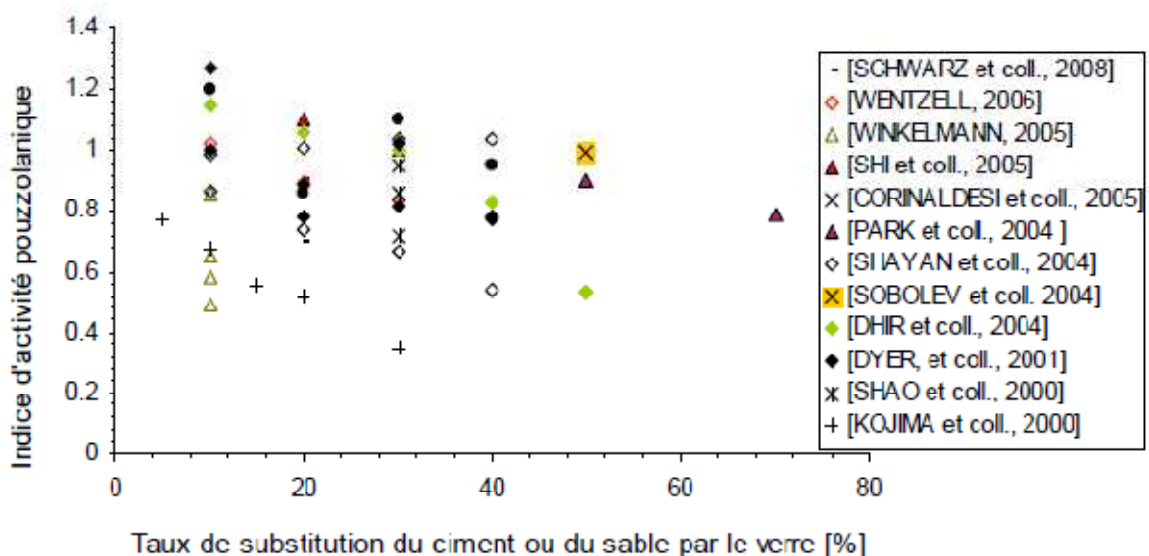


Figure I.11.indices d'activité pouzzolanique du verre utilisés dans des conditions différentes [10].

I.6. Le ciment :

I.6.1.Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine, quand elle se mélange avec l'eau forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, qui sont les silicates, les aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% [12] de la masse de ciment.

Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons puisque ses hydrates apportent la cohésion du squelette granulaire, donc la tenue physique et mécanique du matériau et de la structure en béton. La stabilité des propriétés mécaniques d'un béton repose en grande partie sur la stabilité des hydrates du ciment. De ce fait, il est nécessaire de s'assurer du bon comportement à long terme des hydrates du ciment pour garantir une bonne tenue de la structure en béton.

Ainsi, le ciment Portland est le ciment le plus couramment utilisé dans l'industrie du béton. Il s'agit d'un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite de réactions et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

I.6.2.Ciment Portland, fabrication et consommation d'énergie :

Le ciment Portland est fabriqué à partir d'un mélange de calcaires (CaCO_3) et d'argile ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$). Ces composés réagissent ensemble dans un four pour former une série de phases assez complexes menant à un état d'équilibre chimique. Cet état d'équilibre n'est pas maintenu durant le refroidissement puisque la vitesse de refroidissement affecte le degré de cristallisation et la quantité de matériau amorphe présent dans le clinker refroidi.

Le procédé de fabrication du ciment consiste à broyer un mélange de matières premières (calcaire + argile) puis à les faire cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C . De la carrière aux silos de stockage du ciment (figure I.8), la matière passe par trois étapes principales :

1. Préparation du mélange des matières premières.
2. Clinkérisation (la fabrication du clinker).
3. Production du ciment (le broyage du clinker et l'élaboration du ciment) [13].

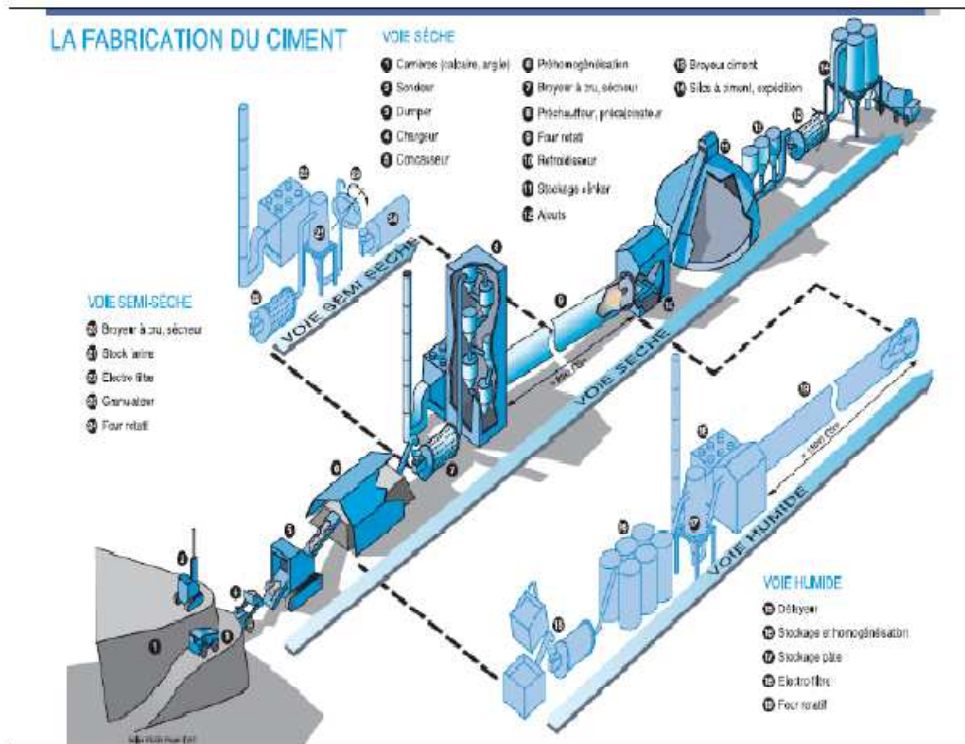


Figure I.12.La fabrication du ciment [13].

Le mélange et le broyage des matières premières peuvent être effectués dans l'eau ou à sec ; d'où les appellations de procédé par « voie humide » et par « voie sèche ». Dans le procédé par voie humide, les matières premières, après pulvérisation et dispersion dans l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, sont introduites dans un broyeur à boulets tandis que dans le procédé par voie sèche, elles sont introduites directement dans un broyeur à boulets [10].

Par voie humide, la pâte est introduite à l'extrémité haute du four alors que le charbon pulvérisé est projeté par un jet d'air à l'extrémité la plus basse du four où la température atteint environ 1450°C. Habituellement, par cette méthode un kg de clinker a besoin d'une énergie de 1200 à 1400 Kcal. Alors que par voie sèche, la farine de cru est évacuée par voie pneumatique vers un silo d'homogénéisation. Après avoir obtenu un mélange homogène, la farine est introduite dans un pré-chauffeur, dans lequel les particules de farine de cru sont en suspension dans des gaz ascendants (température allant de 400°C jusqu'à 900°C) avant d'introduire dans le four. Dans les fours modernes, la farine de cru est acheminée à travers un précalcinateur qui permet d'accélérer la décarbonation du cru. Des réductions importantes de consommation calorifique ont été obtenues durant les vingt à trente dernières années.

I.6.3.La composition des ciments courants :

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire, il fait prise dans l'eau, il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcie progressivement dans le temps. Ce durcissement est du à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice devront être au moins de 50% de la masse de ciment [13].

I.6.4.Constituants principaux :

Les ciments courants ont pour constituants le clinker, il peut être ajouté selon leurs types :

- Du calcaire
- Du laitier de haut fourneau
- Des cendres volantes
- Des fines calcaires
- De la pouzzolane naturelle
- Des schistes calcinés
- Des fumées de silice

I.6.5. Clinker portland (k) :

Le clinker obtenu à la sortie du four à la suite de la cuisson de matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de corrosion, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs constituées essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

Silicates tricalciques C_3S dont la formule $3CaO ; SiO_2$.

Silicates bicalcique C_2S de formule $2CaO, SiO_2$.

Aluminates tricalcique C_3A dont la formule $3CaO, Al_2O_3$.

Alumino-ferrite tetracalcique de formule $4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$

Le ciment alumineux contient au moins 95% de clinker [13].

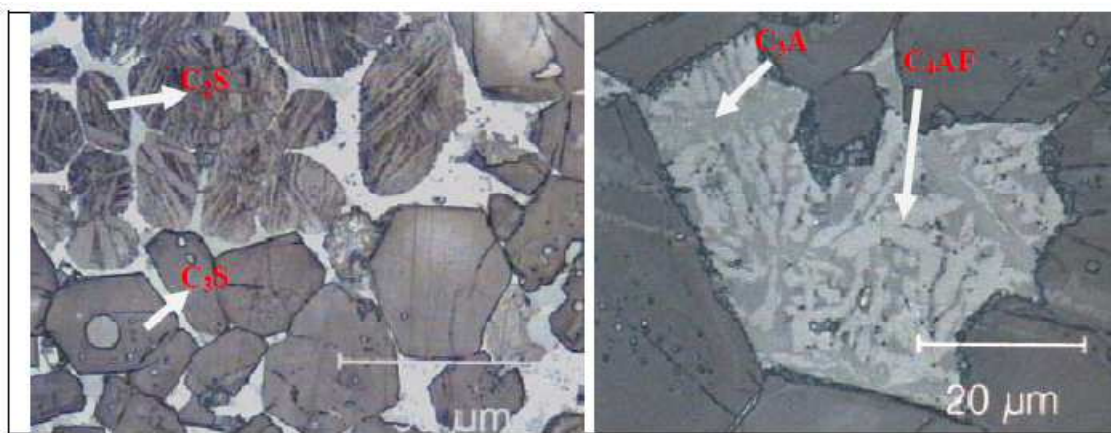


Figure .I.13. Image de clinker par microscope optique [13].

I.6.6. Les proportions moyennes de ces différentes phases sont :

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

50 à 70% pour C₃S

5 à 25% pour C₂S

2 à 12% pour C₃A

0 à 15% pour C₄AF [12].

I.6.6.1.Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le portland craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique [11].

I.6.6.2.Cendres volantes (v et w) :

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse proviennent du dépolluissage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être :

-Siliceuses(v) auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolanique c'est-à-dire qu'elles peuvent fixer la chaux à température ambiante faisant prise par hydratation.

-calciq (w) : outre les propriétés pouzzolanique elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques [12].

Les cendres volantes siliceuses (v) sont constituées de silice réactive entre 40 et 55%, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 20%, la proportion de la chaux réactive doit être inférieure à 5% [12].

-pouzzolane naturel (z) : sont des produits d'origine volcanique ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolanique.

I.6.6.3.Schistes calcinée :

Obtenus à des températures de l'ordre de 800°C, présentent des propriétés pouzzolanique, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyé.

I.6.6.4.Calcaire :

Les calcaires utilisés comme des constituants de ciment et non comme des constituants secondaires, lorsqu'ils présentent une quantité plus de 5% de la masse de ciment, ils doivent présenter une quantité de carbone de calcium plus de 75% en masse [12].

I.6.6.5.Fumés de silice:

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

Constitués de particules 100 fois plus fines que les grains de ciment avec un diamètre moyen de 1/10 micron, présentent des propriétés pouzzolanique en raison de leur forte teneur en silice amorphe [12].

I.6.7.Réactions et déroulement de l'hydratation :

L'hydratation du ciment est complexe et met en jeu plusieurs réactions se déroulant avec des cinétiques différentes. Dans les 24 premières heures, les principales réactions se déroulent dans l'ordre suivant :

- aluminat tricalcique + bassanite + eau → ettringite (première génération se formant autour de l'aluminat tricalcique)
- bassanite + eau → gypse
- anhydrite + eau → gypse
- aluminat tricalcique + gypse + eau → ettringite (seconde génération, sous forme d'aiguilles prismatiques)
- alite ou belite + eau → silicates de calcium hydratés + portlandite

Nous voyons ici les réactions d'hydratation du ciment Portland contenant des sulfates de calcium. En effet, lorsque ces sulfates sont présents, l'aluminat tricalcique (C_3A) réagit très vite avec l'eau et sa prise est alors trop rapide. Il est donc nécessaire de contrôler cette prise en ajoutant au clinker des sulfates de calcium sous forme de bassanite ou d'anhydrite générant ainsi de l'ettringite autour du C_3A lorsque l'eau est ajoutée. L'alite (C_3S) possède une cinétique d'hydratation rapide comparée à celle de la belite (C_2S). Ces deux constituants forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Les C-S-H cristallisent sous forme de feuillets alors que la portlandite cristallise sous forme de plaquettes hexagonales.

A la fin de l'hydratation, elle se retrouve englobée dans les C-S-H, ce qui diminue la résistance mécanique du matériau. L'aluminat tricalcique donne à lui de l'ettringite sous forme d'aiguilles prismatiques, ce qui n'est pas favorable à la résistance mécanique. Le C_3A s'hydrate aussi en monosulfoaluminates de calcium et en aluminates de calcium hydratés, sous forme de plaquettes hexagonales (en solution solide ou en cristaux séparés) [1].

I.6.7.1.Equations bilans des réactions d'hydratation :

Hydratation de C_3S :

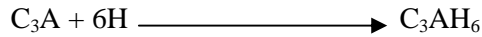
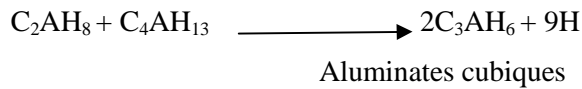
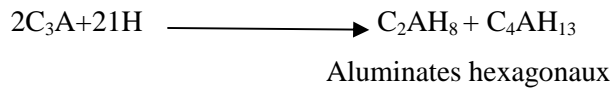


Hydratation de C_2S :

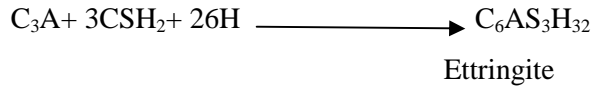


Hydratation de C_3A sans sulfates :

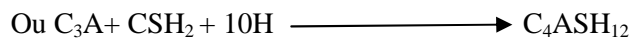
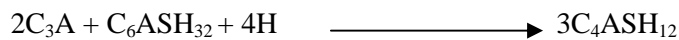
Chapitre I : Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre



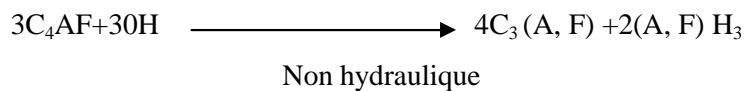
Hydratation du C₃A avec du gypse :



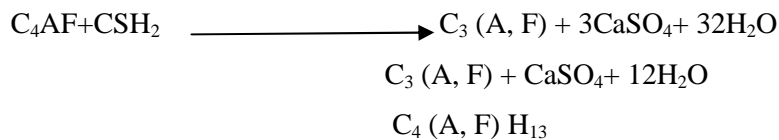
Si la concentration en sulfates est faible, l'ettringite se transforme en monosulfate (C₃A. CaSO₄. 12H₂O) selon la réaction :



Hydratation des aluminoferrites :



Hydratation du C₄AF en présence de C-S-H₂ :



I.6.7.2. Structure poreuse :

La structuration de la pâte de ciment s'accompagne de la création d'un réseau poreux évolutif qui est généralement scindé en deux catégories. On parle tout d'abord de porosité capillaire qui résulte des vides laissés par l'eau consommée par l'hydratation et ensuite de porosité des hydrates qui correspond essentiellement aux vides entre les feuillettes de C-S-H. Les différentes catégories de pores sont regroupées dans le Tableau I.2 [1].

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

Tableau I.2 : catégories de pores dans un mortier [1].

Désignation	Dimensions	Description	Rôle de l'eau	Propriétés influencées
macropores	1000-15 μm	bulles d'air	eau libre	Perméabilité à l'eau liquide Résistances mécaniques Perméabilité à la vapeur d'eau Absorption d'eau par capillarité
pores capillaires	15-0,05 μm	grands capillaires	eau libre	Résistances mécaniques Perméabilité à la vapeur d'eau
	50-10 nm	pores intergels	faible tension de surface	Retrait à forte humidité relative
pores de gel	10-2,5 nm	petits capillaires	faible tension de surface	Retrait à humidité relative moyenne (50 %)
	2,5-0,5 nm	micropores intercrystallins	eau fortement adsorbée	retrait fluage
	< 0,5 nm	micropores interfeuilletts intercrystallins	eau liée	

Deux catégories importantes de pores apparaissent :

- **pores du gel** : ils n'ont pas d'influence défavorable sur la résistance ou la perméabilité. En revanche, l'eau des petits pores du gel C-S-H (18 .10-10 m) retenue par les liaisons hydrogènes peut influencer le retrait d'autodessication, le fluage et le module d'Young [1].
- **Pores capillaires** : l'excès d'eau par rapport à l'eau combinée dans l'hydratation est à l'origine de ces pores. Ces derniers représentent les espaces non remplis par les hydrates solides de la pâte durcie. Le volume total de ces pores est la porosité ; c'est le volume occupé par l'eau évaporable. Les pores de taille supérieure à 50 nm abaissent la résistance et nuisent à l'imperméabilité. De même, ils influent de façon négative sur le retrait et le fluage [1].

I.7.Les adjuvants :

I.7.1.Définition :

Sont des produits chimiques incorporés au béton frais lors de son malaxage ou avant sa mise en œuvre de quantité inférieure à 5% du poids de ciment qui provoquent des modifications des propriétés ou du comportement du béton. Ils diffèrent des ajouts minéraux du béton comme les pigments, les agents de mouture, les cendres volantes et les fumées de silice [12].

I.7.2.Classification et utilisation :

Un adjuvant en général a une propriété ou une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires »

Les normes européennes retiennent la classification suivante :

- plastifiants réducteurs d'eau.
- superplastifiants hautement réducteurs d'eau.
- rétenteurs d'eau.
- entraîneurs d'air.
- accélérateurs de prise.
- accélérateurs de durcissement.
- retardateurs de prise.
- hydrofuges [12].

Certains adjuvants peuvent avoir plusieurs de ces fonctions .on parle alors de fonction principale et de fonction secondaire. exemple :plastifiants réducteurs d'eau (ou superplastifiants hautement réducteurs d'eau) et retardateurs .Il existe également d'autres adjuvants tel que :les raidisseurs pour béton projeté ,les adjuvants pour coulis d'injection ,les adjuvants pour mortier stabilisé ,les colorants ;les inhibiteurs de corrosion ,les générateurs de gaz[12] .

1) plastifiants réducteurs d'eau :

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption a la surface du ciment ils provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pate .ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau soit une réduction du rapport E/C.

2) superplastifiants hautement réducteurs d'eau :

Cette désignation complexe, se rapporte à des produits qu'en France on appelait auparavant « fluidifiants ».leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants mais il se produit avec une intensité plus importante par rapport au béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiants à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12% [12].

3) Rétenteurs d'eau :

Ce sont des produits d'addition généralement en poudre qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons .on utilise généralement des méthyles cellulose qui ont la propriété d'augmenter le volume en fixant l'eau libre du béton .les rétenteurs d'eau sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment.

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

4) Entraîneurs d'air :

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résine de synthèse : résine vinsol.

les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquide ,des sels solubles ou de poudres insolubles a ajouter au moment de malaxage ,ces adjuvants introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage sous forme d'un très grand nombre de microbulles dont 80% [12] d'entre elles ont un diamètre inférieur à 100 μ [12],ils améliorent essentiellement :

-La plasticité et l'ouvrabilité du béton, les bulles agissant comme des grains fins analogues à des petites billes souples et sans frottement.

-La résistance au gel du béton durci, les petites bulles d'air disséminées dans la masse constituant en effet autant de petits vases d'expansion dans le réseau des canalicules internes pour l'eau interstitielles dont le volume augmente avant la prise en glace, cela évite la désagrégation du béton par gel de cette eau [12].

5) accélérateurs :

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment, les accélérateurs seront particulièrement employés pour les bétonnages par temps froid ou pour les travaux urgents, on distingue :

-les accélérateurs de prise : Alcalis, carbonates, et sulfate de soude ou de potasse utilisés surtout par temps froid [12].

Les accélérateurs de durcissement : chlorures et carbonates employés pour réduire certains délais pour décoffrer ou manutentionner les pièces.

En raison des risques de corrosion, les produits à base de chlorure sont interdits pour certains travaux : béton précontraint, réservoirs,...etc. [12].

6) Les retardateurs :

Ils agissent chimiquement comme des accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment. Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer :

-Les sucres et gluconates, les acides citriques et tartriques, l'oxyde de zinc, les phosphates alcalins, ces produits sont employés en particulier :

-pour bétonnage en temps très chaud.

- pour le transport des bétons sur grande distance.

-pour des reprises de bétonnage.

Chapitre I :Généralités sur les mortiers à base de poudre de verre

7) Hydrofuges :

Ce +++- sont des adjuvants introduits dans le béton ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire.

I.8.Conclusion :

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans, de par le monde, pour la construction d'ouvrages de natures diverses dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics (immeubles d'habitation, ponts, tunnels, aéroports, barrages, ports, etc.)[14].

En raison des considérations économiques mais encore plus en raison de la prise de conscience, des aspects environnementaux et de la philosophie de développement durable qui s'introduit dans les activités de Génie Civil, L'utilisation des ajouts minéraux connaît un essor de plus en plus considérable comme le verre [15].

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

II.1.Introduction :

Le béton est un matériau durable. Ce qui est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux agressions auxquelles il peut être exposé.

La durabilité du béton dépend de plusieurs facteurs (actions physiques, chimiques ou mécaniques) qui affectent sa durée de vie. Plus particulièrement le gel, les agents chimiques et l'abrasion. La résistance du béton à ces différents facteurs dépend essentiellement de sa qualité générale et de la qualité de chacun de ses constituants [16]. L'objectif de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons.

La durabilité peut être, donc, définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévues pour l'ouvrage. Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte de ciment. Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieur du matériau solide [17].

II.2.Définition de la durabilité :

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers...etc.) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La durabilité est définie par la norme **NF X 50-501** comme « **l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint** » [9].

II.3.La durabilité des bétons dans la norme NF EN 206-1 :

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives (NF EN 206-1, § 5.3.1).

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

Autrement dit, les exigences relatives aux performances du béton ne se superposent pas à celles relatives à sa composition, mais peuvent les remplacer, pour une même durabilité visée [18].

II.4.Durabilité et économie :

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coup. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

Règle 1 : l'expérience du temps :

Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve de temps.

Règle 2 : La communication des règles de comparaison :

Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées.

De nos jours, l'application de la règle 1 se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements. Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatifs [19].

II.5.Facteurs influant sur la durabilité:

La durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique [17].

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

La perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités mécaniques et protectrices (à l'égard de la corrosion des armatures principalement). La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression, la diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. D'autre part, les trois fluides naturels qui peuvent se déplacer selon les processus mentionnés ci-dessus et remettre en cause la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone [17].

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles. En général, elle est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction) [17].

Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel – dégel, la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures, Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton. Les caractéristiques microstructurales des bétons sont principalement influencées par :

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros).

En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus [17].

II.6.Mécanismes responsables de la durabilité :

Dans le cas des faibles ou des solutions acides faiblement concentrées, la réaction pouzzolanique devient un paramètre important de la résistance des mélanges de béton, mais cette dernière dépend aussi de la réactivité de la pouzzolane elle-même.

La réaction pouzzolanique est régie par la dissolution de la silice amorphe produisant de la silice en solution dans l'eau, qui réagit avec la portlandite pour former le gel de C-S-H. Le taux de dissolution dépend de la surface spécifique, ce qui permet de classer la réactivité des pouzzolanes [20].

II.7.Mécanisme de dégradation des bétons :

La dégradation des structures en bétons est le résultat d'un mécanisme de détérioration, qui peut être sous plusieurs formes.

- Mécanismes de corrosion des armatures dans le béton
- Actions de l'eau de mer
- Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage
- Actions des eaux agressives
- Phénomène de carbonatation

Ses phénomènes de dégradation favorisent d'autres attaques telles que les sulfates, les Chlorures, gel-dégel, [21].

II.7.1.Le phénomène de carbonatation :

La carbonatation résulte de l'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur le béton, et affecte la durabilité des structures en béton, car elle peut entraîner la corrosion des armatures (figure II.1). Elle concerne donc un grand nombre de constructions, dans des environnements très différents, et doit être prise en compte dans la conception d'une approche performantielle de la durabilité.

Le mécanisme de dégradation est relativement bien connu, et des essais de carbonatation accélérée sont susceptibles d'être utilisés comme essais performantiels dans le cadre de la démonstration de l'équivalence de performances, sous réserve de leur représentativité par rapport aux conditions réelles de dégradation. Ce type d'exposition, désigné par les classes XC – corrosion induite par carbonatation- dans la norme NF EN 206-1, a donc constitué la première étape de la construction de méthodologies d'application du concept de performance équivalente [2].



Figure II. 1. Eclatement du béton d'enrobage dû à la carbonatation.
Château d'eau, [18].

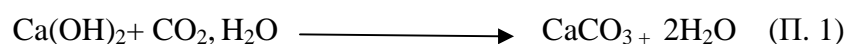
La carbonatation atmosphérique repose sur l'action du gaz carbonique CO_2 de l'atmosphère qui se diffuse à travers le réseau poreux ou fissure du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu induit une dissolution de la portlandite qui constitue la réserve de basicité du béton. Au contact de la solution interstitielle, le gaz carbonique CO_2 provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, comme la portlandite $Ca(OH)_2$ et les C-S-H en carbonates de calcium $CaCO_3$.

La carbonatation entraîne une baisse du pH (initialement entre 12,5 et 13,5) dans la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9 [17]. La solution interstitielle perd sa capacité protectrice envers les armatures subissant alors une initiation de la corrosion (Figure II.1).

II.7.2.Mécanismes de la carbonatation :

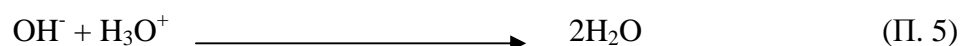
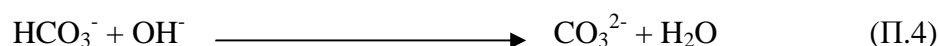
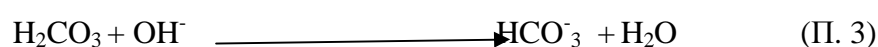
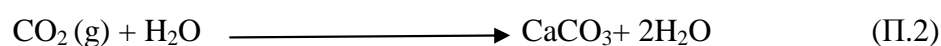
II.7.2.1. Réactions chimiques

Le dioxyde de carbone dissout dans la solution interstitielle du béton peut réagir avec les produits d'hydratation du clinker que sont la portlandite $Ca(OH)_2$ et les silicates de calcium hydratés, pour former du carbonate de calcium $CaCO_3$. La dégradation proviendrait essentiellement de la réaction avec la portlandite selon l'équation bilan suivante :



Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

Il s'agit d'un bilan, mais plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes interviennent dans le processus de carbonatation. En effet la réaction a lieu en phase liquide, en solution aqueuse, mais fait intervenir un gaz et un composé solide. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du CO_2 en phase aqueuse (II.2), des réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates (II.3, II.4) et l'eau (II.5), la dissolution de la portlandite (II.6), et la précipitation du carbonate de calcium (II.7) [18].



L'équation (II.1), indique que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération de l'eau de structure.

Les grandeurs qui peuvent permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le pH de la solution interstitielle du béton. La figure II.2, illustre l'intervention combinée des trois phases gazeuse, aqueuse et solide, au cours du processus de carbonatation de la portlandite. La carbonatation est donc maximale lorsque l'humidité relative a une valeur modérée, c'est-à-dire lorsqu'elle est comprise entre 40 et 60 %, ou entre 40 et 80 % [17], voire entre 84 et 92 % [17]. Ce domaine correspond en moyenne à quelques couches de molécules d'eau adsorbées sur la surface du solide [17]. La carbonatation ne se produit donc pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau.

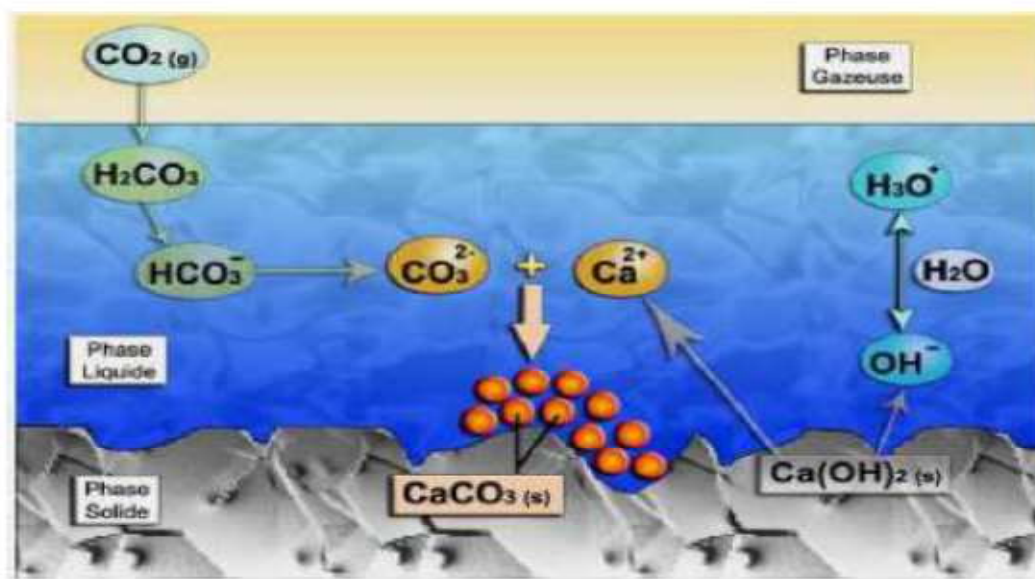


Figure II.2. Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20].

II.7.2.2. Mise en évidence expérimentale :

La durabilité d'une structure exposée à la carbonatation va correspondre à la phase d'initiation de la corrosion, pendant laquelle la carbonatation progresse jusqu'à atteindre les premières armatures. Il est donc nécessaire de pouvoir mesurer cette progression au cours du vieillissement d'un ouvrage, et en phase de conception de comparer les cinétiques de dégradation de matériaux proposés [18].

II.7.2.3. Méthodes d'investigation de la zone dégradée :

La détermination de la résistance d'un béton à la carbonatation passe par la mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée, à une ou plusieurs échéances. Le choix est large à priori entre les méthodes permettant d'estimer l'épaisseur de béton carbonaté. Mais au moins deux problèmes se posent. Le premier est celui de la reproductibilité de la mesure, et il semble avoir été résolu par la mise au point de modes opératoires recommandés basés sur des campagnes d'essais croisés [18]. Le deuxième correspond à la fiabilité de l'indicateur, qui doit mettre en évidence la limite entre la zone où le pH est suffisamment élevé pour que les armatures soient passivées, et la zone où la carbonatation a fait chuter le pH à des valeurs où la corrosion de l'acier devient possible. La phénolphthaléine, indicateur de pH dont l'emploi est préconisé dans les modes opératoires recommandés, semble sous-estimer l'épaisseur de béton carbonaté et donc le risque de corrosion. Sa zone de virage, autour de 9, est située dans un intervalle de pH où l'acier n'est plus passivé par une couche d'oxydes ou d'hydroxydes de fer stables.

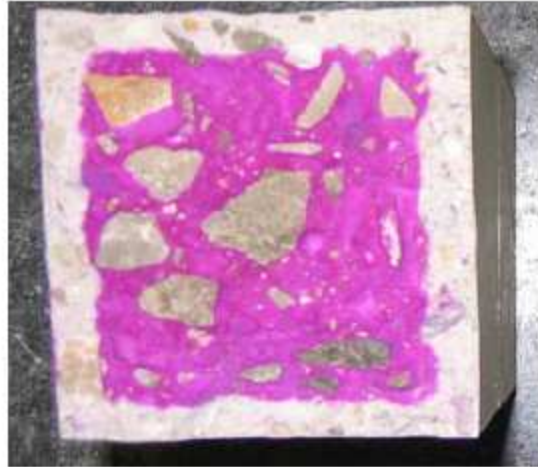


Figure II. 3 .Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone dégradée (incolore) par la phénolphtaléine. Béton B4 48H, [18].

II.7.2.4.Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté :

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine. La solution de phénolphtaléine révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée.

Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration (figure II.4). Elles sont effectuées sur le front de coloration en dehors des zones suivantes :

- dans les coins
- lorsque le front de carbonatation passe par une interface granulat-matrice. Sont concernés les granulats $D > 3$ mm.

Cinq distances sont déterminées pour chaque face. Les valeurs données dans les tableaux sont : la distance la plus faible, la distance la plus importante, la moyenne relative aux trois distances intermédiaires (pour chaque face). La valeur correspondant à une échéance donnée est la moyenne des valeurs moyennes des quatre faces.

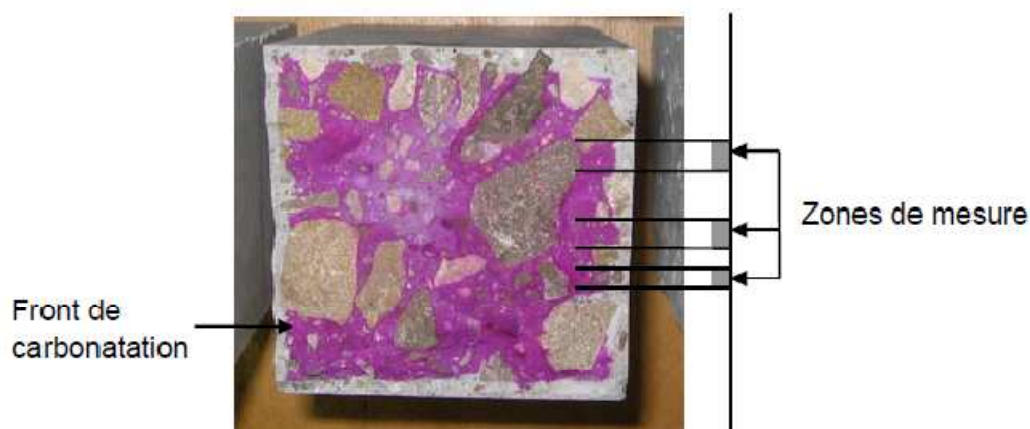


Figure II.4. Section d'éprouvette 7x7x28 cm³. Mise en évidence du front de carbonatation par la phénolphthaléine et principe de la mesure de l'épaisseur de béton carbonaté [16].

II.7.3. Mécanismes de corrosion des armatures dans le béton :

L'association de l'acier et du béton forme un couple : le béton armé, qui a fait ses preuves comme le témoignent les ouvrages construits depuis plus d'un siècle. La corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une certaine durabilité en protégeant physiquement et chimiquement les armatures. En effet, l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé (environ 13) qui confère une stabilité permanente à la couche de rouille adhérente aux armatures noyées dans le béton, plus exactement, sous la rouille, une armature est recouverte d'une fine couche protectrice de produits blancs, à base de ferrite et d'hydroxyde de calcium ($4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$) et $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, phénomène appelé passivation. En outre, la présence de sulfates alcalins en quantité mineure dans le ciment qui réagissent avec la portlandite [21].

Cependant, cette protection disparaît avec le temps et un bon nombre d'ouvrages laisse apparaître des désordres plus ou moins prononcés. Ainsi, la sécurité et l'état de service des structures se trouvent fortement altérées (augmentation volumétrique de l'acier et fissuration du béton).

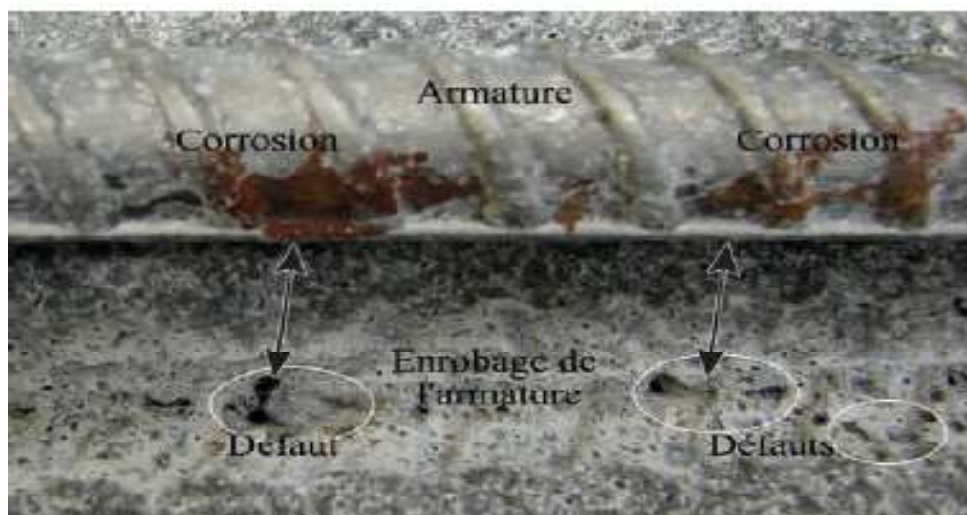
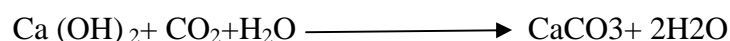


Figure II.5. Mécanisme de corrosion des armatures [21].

Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier :

- 1- la carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère ;
- 2- la pénétration des ions chlorures, jusqu'au niveau des armatures.



II.7.4. Actions des chlorures Cl^- :

La pénétration des chlorures dans un environnement naturel a lieu sous l'effet de deux mécanismes : l'absorption capillaire et la diffusion. L'absorption capillaire se produit lorsque le béton sec ou partiellement saturé est imbibé par la solution saline. La diffusion résulte d'un gradient de concentration en chlorures de la solution porale entre la surface exposée et le cœur sain, elle se produit en milieu saturé. Dans le cas de cycles d'humidification et séchage, les deux mécanismes peuvent coexister. Cela concerne par exemple les zones de marnage des ouvrages partiellement immergés [18].

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns).

La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en chlorure au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassement. Ce seuil est solution interstitielle et de la

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

teneur en oxygène au niveau des armatures ; l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment béton est carbonaté [21].

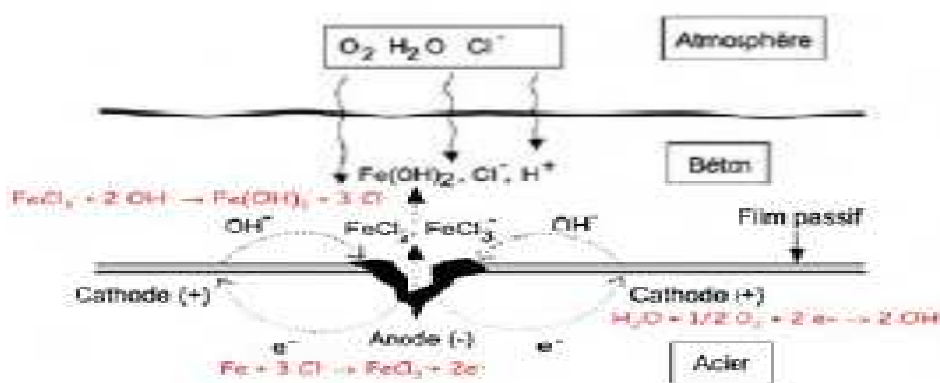


Figure II.6 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures [22].

II.7.4.1. Les mécanismes de pénétration des chlorures dans le béton :

II.7.4.1.1. La convection :

Dans un milieu partiellement saturé ou soumis à des cycles d'humidification et séchage, comme les parties des ouvrages exposées aux marées, embruns et sels de déverglaçage, les chlorures sont susceptibles de migrer avec la phase liquide interstitielle par convection.

L'absorption d'eau par capillarité désigne le mécanisme de transport des liquides dans le milieu poreux dû aux tensions de surface dans les capillaires. Elle ne dépend pas que du réseau poreux, mais aussi du taux de saturation du béton (Basheer et al. 2001). L'absorption d'eau dans le béton sec est représentée à partir de deux paramètres principaux :

- La masse d'eau nécessaire pour saturer complètement le matériau (la porosité)
- La vitesse d'absorption par remontée capillaire ou absorptivité (notée S).

Le comportement des bétons soumis à des essais d'imbibition peut ainsi être décrit par l'équation suivante :

$$A(t) = C + St^{1/2}$$

Où $A(t)$ est le coefficient d'absorption capillaire à une échéance donnée de l'essai, en kg par m² de surface exposée à l'imbibition.

II.7.4.1.2. La diffusion :

Le transport par diffusion :

Le transport par diffusion d'une espèce est lié au gradient de sa concentration. Dans une solution idéale, c'est-à-dire infiniment diluée, il est possible de négliger les interactions électrochimiques, ce qui permet d'exprimer le flux diffusif des ions :

$$\vec{J} = -D \overrightarrow{\text{grad}}(c)$$

Où c est la concentration de l'espèce considérée et D le coefficient de diffusion de l'ion en solution. Dans un volume élémentaire, où la variation de la concentration entre deux instants est égale à la quantité de matière échangée par diffusion, la relation de conservation de la matière s'écrit (en notation différentielle) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(\vec{J}) = \text{div}(D \overrightarrow{\text{grad}}(c))$$

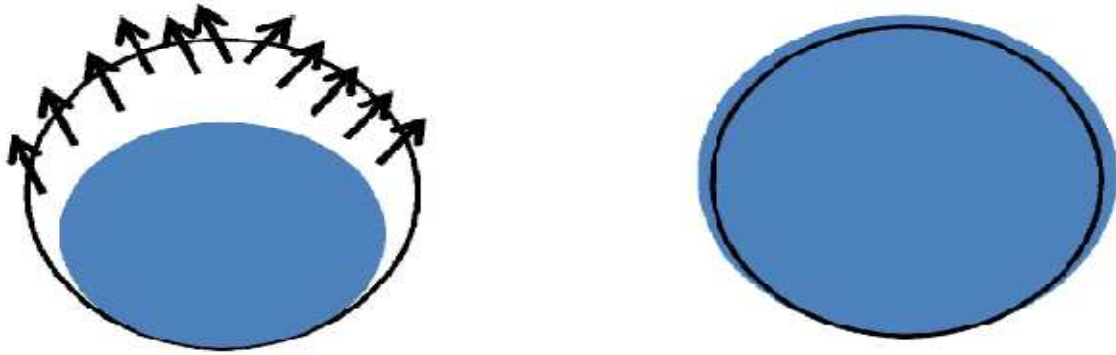
II.7.4.2. Les ions chlorures dans le béton :

Seule une partie des ions chlorures qui pénètrent dans le béton reste en solution. En effet les chlorures peuvent réagir avec les hydrates de la pâte de ciment, et une part non négligeable des ions chlorure se fixe sur la matrice cimentaire. On distingue ainsi :

- les chlorures libres ClF , qui sont présents sous forme ionique dans la solution.
- les chlorures liés ClB , adsorbés sur les CSH ou chimiquement liés sous forme de chloroaluminates de calcium (en particulier le monochloroaluminate de calcium hydraté, ou sel de Friedel, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$).

II.7.5. Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage :

Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel.



L'accroissement de volume de l'ordre 9%, accompagnant la transformation de l'eau en glace.

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
- un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles conjugués des cycles gel -dégel et des sels de déverglaçages.



Figure II.7.Actions des sels de déverglaçage [22].

L'action du gel, et spécialement de l'alternance de cycles de gel-dégel, est une des altérations possibles sur les ouvrages de génie civil qui se présente sous plusieurs formes :

- _ Ecaillage de la surface : due à l'application simultanée de sels de déverglaçage ;
- _ Fissuration dans la masse : due au mécanisme de gel interne.

D'après Pigeon et Chabannet, la dissolution de la Portlandite serait à l'origine de ces altérations, les C-S-H paraissant plus stable vis-à-vis du gel-dégel. En effet, la Portlandite peut être dissoute lors des migrations de la solution interstitielle pour recristalliser dans les zones de plus forte porosité ou dans un endroit où la rétention d'eau est favorisée comme la zone de contact entre la matrice et les granulats. Cette dissolution est, de plus, facilitée par

l'augmentation de la solubilité de la Portlandite à basse température [22]. La pâte de ciment se décalcifie alors et sa porosité augmente [22].

Comme nous l'avons vu précédemment, le métakaolin consomme la Portlandite dans la matrice pour produire des C-S-H. Grâce à la réaction pouzzolanique le métakaolin lutterait donc efficacement contre les effets du gel [22].

II.7.4.1. Actions des sels de déverglaçage :

Il est admis que la cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques [21].

II.7.4.2. Actions des eaux agressives :

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux présentes dans les sols, etc.). Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium). Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment [21].

II.7.6. Actions de l'eau de mer :

L'agressivité de l'eau de mer vis liée aux attaques Combinées de divers ions (chlorures, sulfates, nitrates ...) qui pénètre le béton par capillarité ou par diffusion.

Les divers chlorures dissous dans l'eau de mer ($MgCl_2$) ($CaCl_2$) génèrent des réactions chimiques agressives pour les bétons qui se traduisent par une dissolution de la chaux et d'ettringite (cristallisation de sels expansifs, [21]).

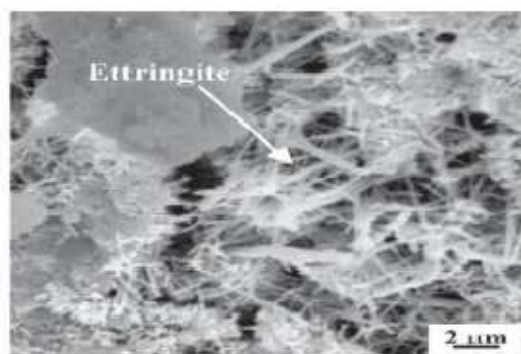


Figure II.8. Formation de l'ettringite [21].

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

La portlandite présente dans les hydrates est attaquée par le sulfate de magnésium pour former dans le béton des gypses gypse secondaire se dissout en partie, ce qui augmente la porosité du béton. Les ions Mg^{2+} réagissent aussi avec les C-S-H [20].

$MgCl_2$ est le chlorure le plus agressif. Il réagit avec la portlandite pour donner du chlorure de calcium $CaCl_2$ en partie soluble, qui l'autre partie réagit avec l'aluminat de chaux hydraté pour former chloroaluminates $3CaO, Al_2O_3, CaCl_2, 10H_2O$ (sel de Friedel). ce sel, également expansif, entraîne la fissuration du béton [21].

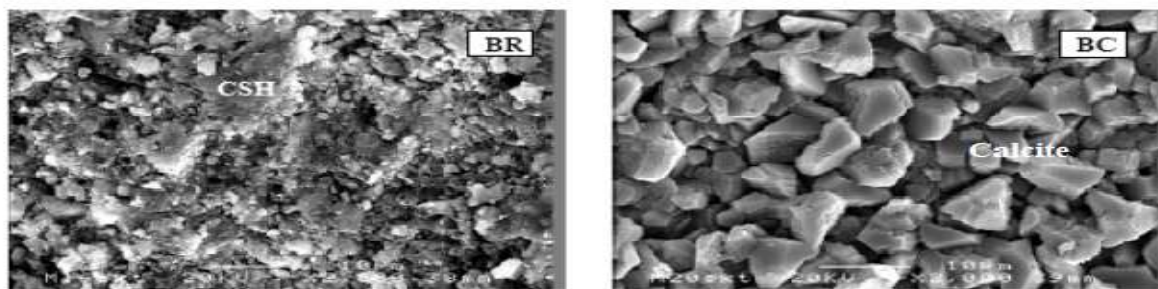


Figure II.9. Observation au MEB de la surface des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de mer [23].

II.7.7. Résistance aux agents agressifs:

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

La résistance à l'agressivité du milieu ambiant est en fonction d'étanchéité d'un béton qui dépend en premier lieu de sa compacité et de la cure humide du béton qui consiste à tenter de limiter l'évaporation d'eau préjudiciable à la compacité [16].

II.8. Les attaques chimiques des bétons:

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De part sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [17]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone [17].

II.8.1. Actions des acides :

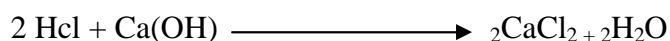
Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium, et neutres ($\text{pH} = 7$) voire acides ($\text{pH} < 7$) [17].

Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique [1], et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- [1]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qui ont permis de confirmer les modélisations du phénomène [17].

La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés solides contenant ces espèces se dissolvent. La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale. La lixiviation commence par la dissolution de la portlandite, puis des monosulfoaluminates, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient [17].

II.8.1.1. Les acides minéraux :

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl_2 et nitrate de calcium $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland l'acide sulfatique H_2SO_4 , formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO_2 atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton milieux très agressifs (sels très solubles) : dissolution [19].



II.8.1.2. Les acides organiques :

Les acides organiques rencontrés majoritairement dans les lisiers et les jus d'ensilage sont principalement les acides acétique, lactique, propionique, butyrique, iso-butyrique et valérique. Le Tableau II.1 présente les formules chimiques et les pKa de l'ensemble des acides organiques présents dans les effluents d'élevage. Différentes études comparatives de

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

l'agressivité des cinq acides organiques principaux présents dans les effluents d'élevage ont été menées :

Kleinlogel et al. (1960) ainsi que De Belie et al. (1997) ont montré que les acides lactique et acétique sont très agressifs à cause de leurs réactions avec la chaux libre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du béton produisant des sels de calcium très solubles. ZIVICA (2006) a comparé l'agressivité des acides organiques à celle des acides inorganiques. Cet auteur a démontré le pouvoir agressif de la solution d'acide acétique qu'il a comparé à celui de l'acide lactique [20].

BERTRON et al. (2004b) ont montré que les quatre acides du lisier testés (acides acétique, propionique, butyrique et iso - butyrique) ont une agressivité équivalente. L'acide lactique présente quant à lui une agressivité supérieure, conformément à la valeur de son pKa, alors que l'acide acétique dans une concentration proportionnée est équivalent à un mélange des différents acides. L'acide lactique est considéré l'agressif parmi les acides organiques [20]

Tableau II. 1 : Formule chimique des acides organiques présents dans les effluents d'élevage [20].

	Acides					
	Acétique	Propionique	Butyrique	Iso-butyrrique	Valérique	Lactique
Formules chimique	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_6$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3$
pKa (25°C)	4.76	4.87	4.81	4.85	4.80	3.86

La présence de la matrice cimentaire dans un milieu acide se traduit par une réaction acido-basique entre l'acide et les hydrates et/ou les anhydres de la pâte de ciment. L'agressivité de l'attaque dépend de la solubilité des sels formés [20].

Lors de l'attaque par les acides organiques, les sels de calcium – acétate et lactate de calcium –très solubles sont à considérer principalement puisque le calcium est l'élément majoritairement lixivié, suite à la dissolution de la portlandite et à la décalcification des phases calciques telles que les hydrates C-S-H et les aluminates de calcium. En contre partie, l'acétate de fer $\text{FeOH}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ est insoluble mais les faibles quantités initiales de fer dans la pâte de ciment rendent négligeables les effets de cette possible précipitation [20]. De même, l'acétate d'aluminium, le butyrate et l'iso-butyrate de calcium sont légèrement solubles à haute température. Lorsque les sels sont lessivés, le pH dans les solutions interstitielles, au niveau des pores, diminue et la solution alcaline interstitielle devient instable.

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

KORIKO et al. (2007) ont étudié la dissolution du phosphate par quelques acides conventionnels; l'exploitation des résultats a permis de constater que le taux de dissolution du minerai est très élevé pour les solutions très acides (pH faible), quelle que soit la nature de l'acide organique ou minéral. Cependant, pour les solutions faiblement acides (pH élevé), la dissolution du minerai se poursuit pour les acides organiques, alors qu'elle est quasi nulle pour les acides minéraux [20].

II.8.1.3. Source des acides :

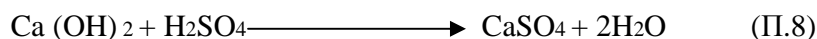
Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 [17] ;
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires ;
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton [17].
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5 [17], peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton [17].

II.8.1.4. mécanisme d'attaque :

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

L'acide sulfurique (formule II.8) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).

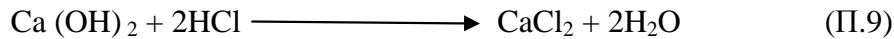


Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule I.3 décrit la réaction entre l'acide chloridrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [17].

II.8.1.5. Influence des ajouts cimentaires sur la durabilité des bétons en milieux acides :

Les ajouts cimentaires sont des résidus industriels dont l'utilisation fait partie des développements les plus récents dans le domaine de la technologie du béton. Les ajouts cimentaires confèrent au béton, à cause de leurs actions hydrauliques ou pouzzolaniques, des propriétés améliorées. L'utilisation des ajouts cimentaires modifie la nature et la texture des hydrates [17].

La réduction de la portlandite s'accompagne d'un raffinement de la porosité capillaire, ce qui favorise la diminution de la perméabilité et de la diffusivité ainsi que l'optimisation de la consistance et de l'ouvrabilité du béton.

D'autre part, l'utilisation des ajouts cimentaires a pour objectif de réduire la consommation de ciment en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement [17].

Les ajouts cimentaires influencent la composition et la minéralogie des hydrates par leurs modes d'hydratation. Les silicates de calcium hydratés produits par la réaction pouzzolanique possèdent une structure semblable à celle des C-S-H d'une pâte de ciment Portland. La quantité de portlandite que l'on retrouve dans les pâtes de ciment durcies contenant des ajouts cimentaires est inférieure à celle des pâtes de ciment Portland, puisque la réaction pouzzolanique consomme de la chaux contrairement à la réaction hydraulique qui en libère [17].

Les ajouts cimentaires interagissent avec la pâte cimentaire, soit par effet filler où les dimensions des particules améliorent la compaction du mélange et minimisent par le fait même le transport de fluide dans la matrice cimentaire, soit par effet pouzzolanique par lequel

un composé siliceux ou alumino-siliceux réagit en présence d'eau avec la portlandite créée lors de l'hydratation du ciment pour former des composés liants (C-S-H).

Ces pouzzolanes influencent la structure des pores, non seulement en raison de la réaction pouzzolanique, mais également parce qu'elles peuvent s'infiltrer entre les grains de ciment et servir de points de nucléation pour la formation d'hydrates. Ceci engendre une densification de la structure, permettant entre autres l'amélioration des propriétés de la pâte de ciment durcie au niveau des résistances mécaniques et chimiques [20].

II.8.1.6. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides :

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des CSH plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [17]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [17]. La littérature est riche en résultats sur l'effet des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires dans les milieux acides, nous citons à titre d'exemple quelques travaux essentiels :

Kostuch et al [17] ont montré qu'en substituant 10% de métakaolin la résistance aux attaques acides est augmentée. Il associe ce phénomène à deux paramètres qu'induit la substitution de métakaolin dans la matrice cimentaire :

- Le métakaolin diminue le coefficient de transfert donc l'avancée de la solution acide.
- La réaction pouzzolanique transforme la Portlandite en CSH qui a un coefficient de solubilité plus bas et donc améliore la résistance du béton envers ces attaques.

Enfin, d'après Roy [17], la résistance aux attaques acides des liants avec métakaolin augmente avec le taux de substitution. La perte de masse diminue de 4,5 % à 2 % lorsque le taux de substitution augmente de 7,5 à 22,5 % [17].

Rahmani et Ramzaniyanpour [17] ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque de l'acide sulfurique. Leurs résultats (Figure II.11), après 6 mois d'immersion, montrent une perte de masse de 62,6 % pour le béton à base de filler (C2), de 56,6 % pour l'addition binaire filler + fumée de silice (C3) de 30,1 % pour le filler + pouzzolane naturelle

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

(C4) et de 40,2 % pour l'addition binaire filler + fines de pierre ponce (C5). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique [17].

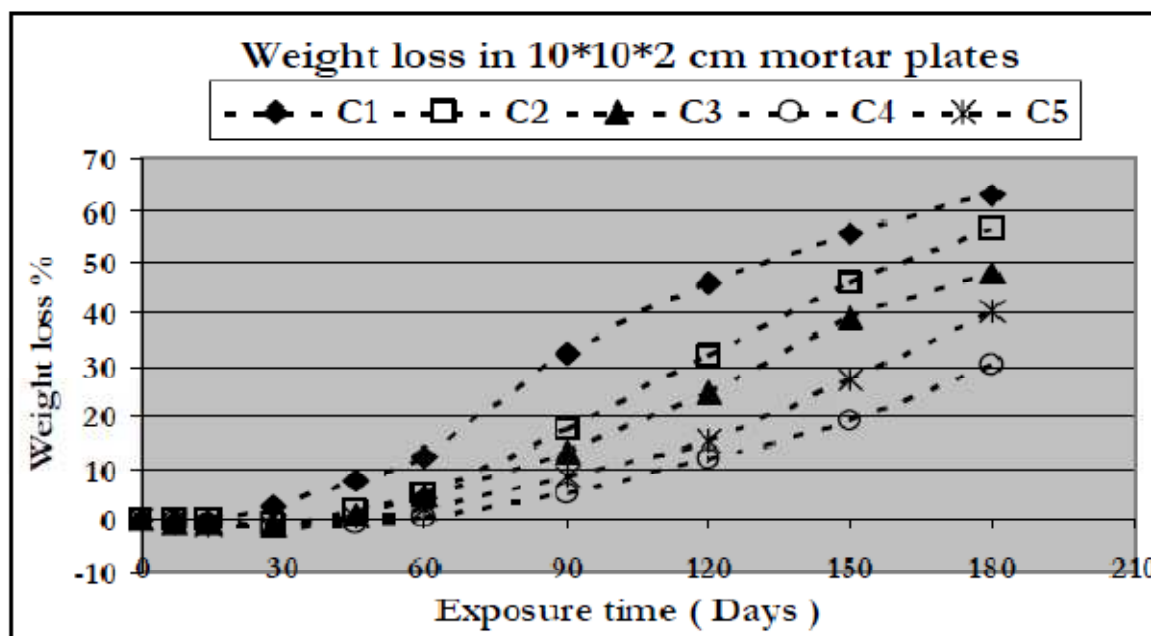


Figure II.10. Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [17].

Ghrici et al. [17] ont trouvé que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d'acide sulfurique que celle avec de l'addition pouzzolane naturelle et l'addition binaire pouzzolane naturelle + filler calcaire. Cependant dans la solution d'acide chlorhydrique le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse.

Tamimi [20] a remarqué que la substitution de ciment par 50 % de cendre volante est très bénéfique en termes de résistance des bétons à haute performance vis-à-vis de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. Avec 60 %, l'effet positif de cendre volante diminue et la perte de masse augmente.

D'après les travaux de Rackel [1] (Figure II.12), les pâtes avec métakaolin sont moins résistantes à l'attaque vis-à-vis de l'acide citrique que celle avec 100% de CEMI [17].

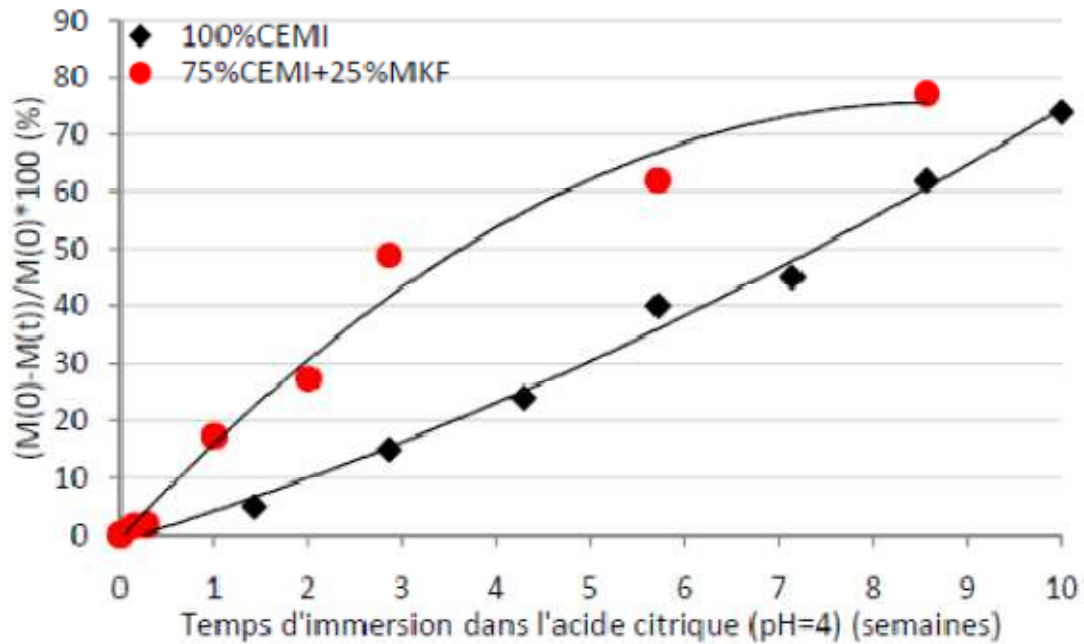


Figure II.11. Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique [17].

D'un point de vue des attaques à l'acide citrique, les matrices avec métakaolin sont, d'après les résultats, moins résistante [17]. La seule hypothèse pour expliquer ce phénomène est la pression des sels d'acide citrique. Les sels se formant dans les pores de la matrice, exercent une pression capable de la fissurer.

Comme les pores sont plus fins dans les matrices avec métakaolins la matrice subit plus rapidement cette pression, ce qui accélère la ruine des éprouvettes, comparée à celles avec 100% de CEMI [18].

II.9.Actions des sulfates :

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition – XA, environnements chimiquement agressifs [17].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les CSH ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée [17].

II.9.1. Attaque externe et attaque interne :

En nous basant sur les différentes sources des ions sulfatiques, l'attaque chimique peut avoir deux origines : l'attaque interne qui correspond aux systèmes "fermés" et l'attaque externe qui correspond aux systèmes "ouverts".

La présence des sulfates dans le mélange de ciment est considérée comme le cas de l'attaque interne et le béton exposé dans un environnement chargé en sulfates (eau de mer, eaux souterraines sulfatées, sols...) comme le cas de l'attaque externe. Mais la réalité est souvent plus complexe : dans la plupart des cas, des facteurs physiques (pression, température, contraintes mécaniques, etc..) agissent et interagissent avec les facteurs chimiques [24].

Quand une structure est exposée à un environnement chargé en sulfates, l'attaque externe est le résultat de trois processus. Le premier, qui est contrôlé principalement par la perméabilité du matériau, est le transfert des ions sulfatiques dans un milieu poreux ; le deuxième fait appel à un processus chimique réactionnel entre les différents composants du ciment et les ions SO_4^{2-} ; le troisième, conséquence des deux processus précédents, est un phénomène d'expansion résultant de l'apparition de nouvelles phases cristallines.

Au contraire, pour l'attaque interne, les sulfates (granulats, gypse, déchets sulfatés, etc.) sont déjà présents dans le système avant l'hydratation du ciment. Ces sulfates peuvent réagir avec le C_3A dès le malaxage des constituants du béton [24].

Les principales différences entre les deux types d'attaque tiennent à la quantité d'ions sulfates et au temps de réaction. Dans le cas de l'attaque externe, les ions sulfates doivent pénétrer dans la matrice et la réaction provoque la dégradation du béton durci par expansion. La présence éventuelle des fissures accélère la pénétration des nouveaux ions sulfates. Le degré de l'attaque est fonction du temps d'exposition [24].

Par contre, dans le cas de l'attaque interne, des ions de sulfate existent déjà dans la matrice et la quantité des ions de sulfate diminue au cours de la réaction chimique. Si tous les sulfates sont consommés au cours de la phase initiale d'hydratation, l'attaque ne doit pas apparaître [23].

II.9.2. Sources des sulfates :

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions (comme l'Afrique du nord, les prairies canadiennes, ..) où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut en rencontrer des concentrations élevées supérieures à 5% [17].

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

En région parisienne ces concentrations sont d'environ : 58g/l pour le Na_2SO_4 , 194g/l pour le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 440g/l pour $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et de 2,1g/l pour le CaSO_4 .

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^- . Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

Les sources de sulfates peuvent aussi être internes:

- ✓ Contamination des granulats par du plâtre.
- ✓ Granulats gypseux.
- ✓ Sulfures dans certains granulats [17].

II.9.3.Mécanisme d'attaque du béton par les sulfates :

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans une période courte (10-15 ans) [58]. Une enquête de l'organisation de coopération et de développement économique réalisée en 1989 indique que l'attaque par les sulfates est la deuxième cause des dégradations relevées sur 800000 ponts de par le monde, après la corrosion des aciers. La dégradation des bétons par les sulfates est principalement due à la formation d'ettringite. Les composés du ciment, qui réagissent lors d'une attaque sulfatique, sont principalement la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), libérée surtout par l'hydratation de C_3A et les aluminates provenant de l'hydratation du C_3A [13].

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

L'expansion et la perte des propriétés liantes des silicates de calcium hydratés C-S-H. Les mécanismes de destruction sont en fonction de la concentration et de la source des ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Trois types de comportements vis à vis du gonflement sont dissociés :

Les gonflements négligeables (l'expansion ne dépasse pas 0.04%) [13], les gonflements faibles (l'expansion est comprise entre 0.04% et 0.2%) et les gonflements importants, qui se traduisent par des expansions sigmoïdes, et dont l'amplitude finale dépasse généralement 0.4%. Ce comportement provoque une chute du module dynamique du matériau.

Le processus théorique de l'attaque sulfatique est très simple. Durant l'hydratation, le C_3A se transforme en monosulfoaluminate qui est très réactif. Au moment de l'ajout d'une quantité de sulfate de source extérieure ou intérieure, le monosulfoaluminate se transforme en ettringite secondaire ou différée, entraînant une augmentation du volume du béton. A la fin de

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

cette transformation, les molécules de monosulfoaluminate augmentent de 55% à 129 % en volume [13].

L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs (figure II.12) ce qui conduit à augmenter la perméabilité (fissures) et à diminuer la résistance du béton. Le gonflement n'a lieu que lorsque les bétons sont immergés dans l'eau [10].

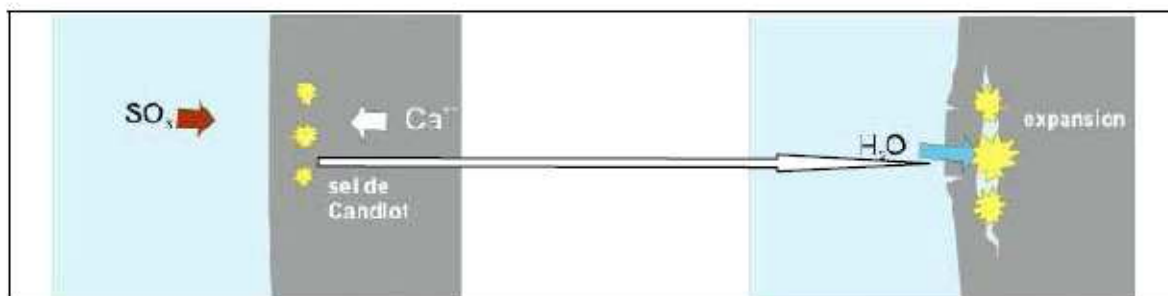


Figure II.12 : Etapes d'attaque du Béton par les sulfates [13].

Une attaque sulfatique interne ne peut avoir lieu que si le béton a été soumis à un cycle thermique. La réaction sulfatique interne peut provenir d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire, consécutivement à un échauffement excessif du béton au jeune âge ; on parle dans ce cas de formation différée de l'ettringite. Un échauffement tardif (un cycle thermique d'un mois à 85°C sur des mortiers âgés d'un an) peut aussi déstabiliser l'ettringite d'hydratation primaire.

Dans le cas d'une attaque externe, les étapes du processus sont :

1. Décalcification de la pâte du ciment et pénétration simultanée des anions SO_4^{2-} par diffusion.
2. Réaction des ions sulfates avec les ions calcium Ca^{2+} pour former du gypse et avec les aluminates anhydres ou hydratés pour former l'ettringite (figure II.13).
3. Fissuration due aux pressions internes engendrées accentuant la pénétration des sulfates et provoquant la destruction progressive du béton [13].

II.9.4. Origine et nature des sulfates :

Les origines des sulfates sont très diverses. Ils sont présents généralement dans tous les sols, les eaux souterraines et les eaux de mer. Peuvent aussi venir d'une dégradation biologique ou d'une pollution industrielle. L'attaque du béton est provoquée soit par contact avec ces environnements, soit par la présence de sulfates dans les constituants du béton.

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

Les sulfates présents dans les sols sont essentiellement des sulfates de sodium, potassium, calcium et magnésium. Aux faibles concentrations, ils ne sont pas dangereux pour le béton.

Cependant, les teneurs peuvent parfois atteindre 5% dans certaines régions de France, où des sols argileux ou alluvionnaires sont riches en gypse et en pyrite contenant FeS_2 qui donne de l'acide sulfurique en présence d'air et d'humidité [24].

Les eaux naturelles contiennent le plus souvent des ions en solution et des particules solides en suspension. Dans les eaux souterraines, la teneur en sulfates dépend non seulement de la présence de gypse, de pyrite ou des sulfates divers présents dans les sols, mais elle dépend également des trois facteurs : l'évaporation à la surface, la vitesse d'infiltration des eaux et la ventilation du sol.

La pollution du réseau hydrographique est importante à considérer. Les concentrations en ions sulfates dues à la pollution des eaux souterraines peuvent atteindre, dans un environnement industriel, 7000 mg par litre, alors que les teneurs dans les conditions naturelles varient habituellement de 30-400 mg par litre [24].

Dans le cas particulier de stockage en surface des déchets radioactifs de faible et moyenne activité, les déchets enrobés peuvent constituer une source de sulfates éventuellement lixiviables [24].

II.9.5. Les mécanismes de dégradation par les sulfates :

Les modes d'action des sulfates dans les bétons sont complexes, nombreux, et n'ont pas encore tous été identifiés. Cependant, la chimie minérale et certaines techniques d'investigation récentes ont permis de reconnaître certains composés, d'expliquer leur formation, et de proposer des scénarios cohérents avec les modes de dégradation observés [18].

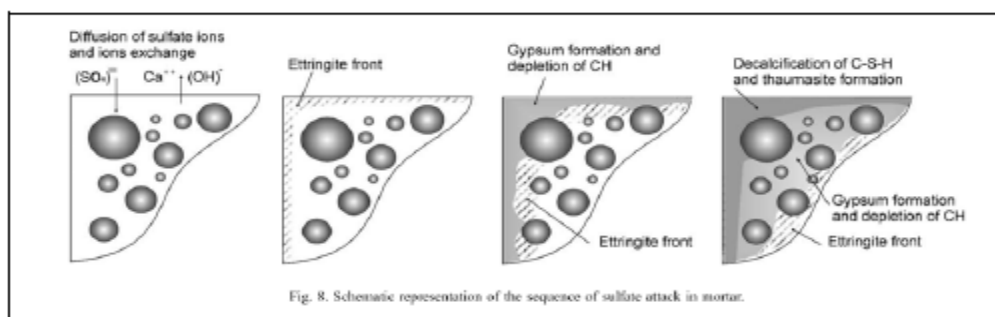
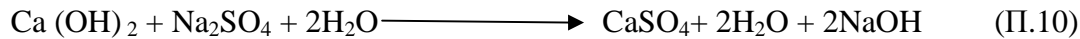


Figure II.13. Représentation schématique de la progression de l'attaque sulfatique externe dans une éprouvette en mortier immergée dans une solution de sulfate de sodium [18].

II.9.6.Exemples de l'attaque par les sulfates :

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [17] :

- **Formation du gypse secondaire** (formule II.10) :



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

CaSO₄.2H₂O : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'y a pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et le gel et la décalcification du C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment.

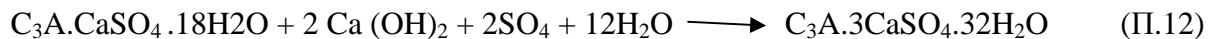
-**Formation d'ettringite secondaire** :

a) À partir du C₃A anhydre résiduel (formule II.11) :



(Ettringite secondaire)

b) À partir des aluminates hydratés (formules II.12, II.13) :



(Ettringite secondaire)



(Ettringite secondaire)

La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur au volume du solide initial.

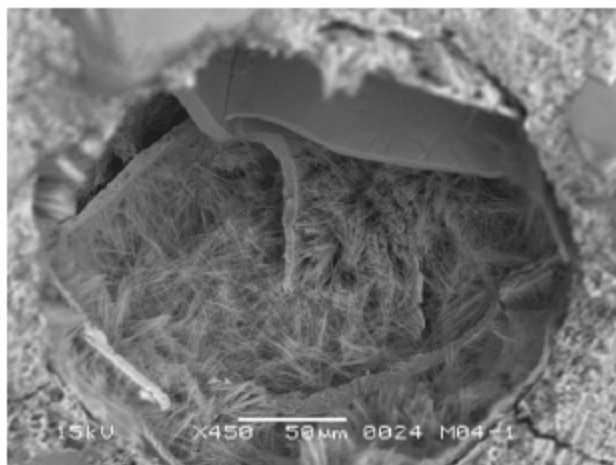


Figure II.14. Cristaux d'ettringite dans la porosité du mortier M9. Photo MEB [18].

La figure II.15, schématise le mécanisme proposé par Santhanam et al [17] dans le cas de l'attaque par les sulfates de sodium. L'étape 1 décrit l'état initial du processus. Dans le cas d'une solution à bas pH (6-8), le temps du déclenchement de l'expansion est réduit [17]. Toutefois, le taux d'expansion après cette initiation (au cours de l'étape 2), n'est pas différente lorsque le pH est faible [17]. Dans l'étape 2, le gypse et l'ettringite commencent à se former à la surface. Ainsi, comme il est décrit dans l'étape 3, une force de compression résultante est produite à la surface. Des fissures à l'intérieur du mortier sont provoquées (étape 4) avec un dépôt de produits au niveau des fissures et même dans la pâte. Le gypse se dépose dans les fissures et dans les vides parce que ceux-ci fournissent les meilleurs sites de nucléation. Il existe trois zones distinctes dans le mortier : zone de surface désintégrée, la zone de dépôt des produits d'attaque, et à l'intérieur la zone de fissures qui est chimiquement inchangée [17].



Figure II.15 .Photos microscopiques de C3A et d'ettringite [5].

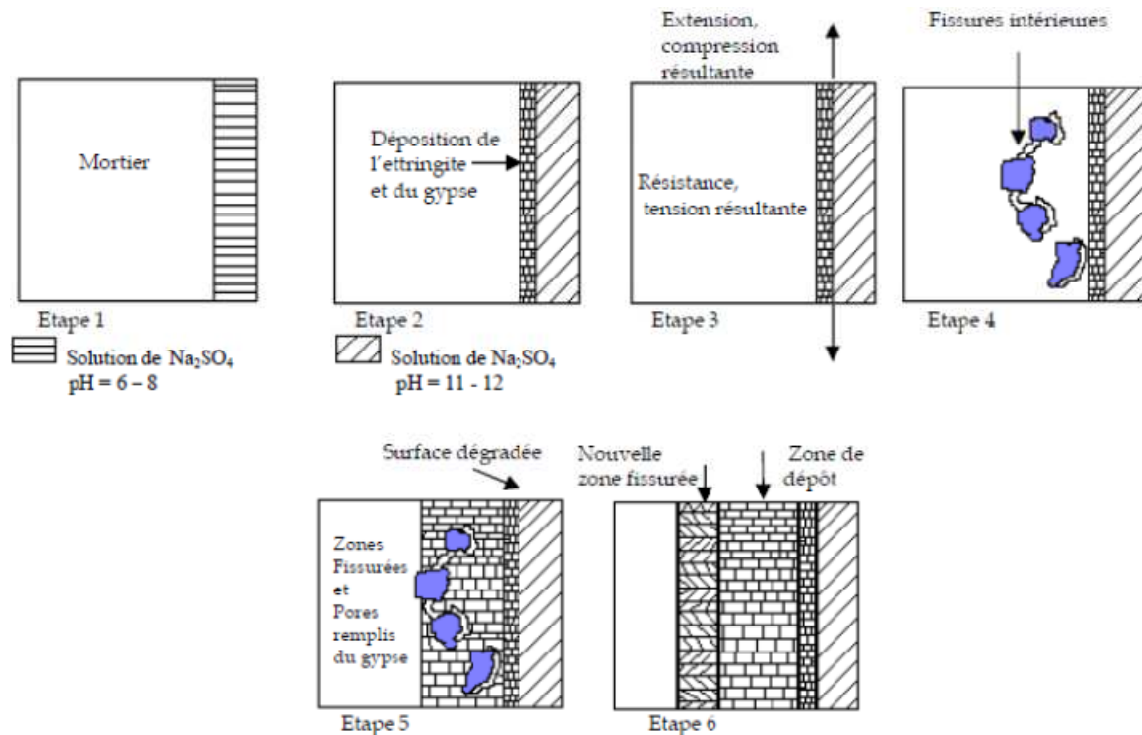


Figure II.16. Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium [17].

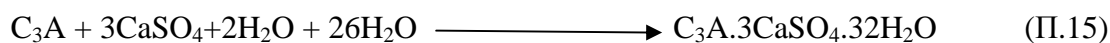
Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium.

Le sulfate de magnésium réagit par double action (formules II.14, II.15 et II.16):

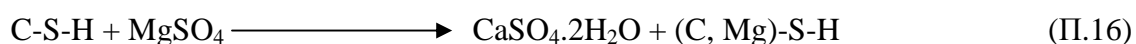
En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite.



$\text{Mg}(\text{OH})_2$: Brucite (faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



(C, Mg)-S-H : gel faiblement cohésif.

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

Le mécanisme proposé dans le cas de l'attaque par les sulfates de magnésium est schématisé dans la figure I.18. Une couche de brucite (hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$) se forme rapidement sur la surface de l'échantillon en raison de la réaction de la portlandite $Ca(OH)_2$ avec la solution. La couche de brucite est souvent complétée par une couche de gypse qui se forme à la suite de la même réaction à l'intérieur de la couche de brucite d'où une augmentation du taux d'expansion [20]. Une fois que les canaux d'écoulement sont établis à travers la surface de la couche de brucite, une attaque directe des $C-S-H$ peut se produire. À la suite de cette attaque, la formation de MSH et de gypse secondaire aura lieu (étape 4). La détérioration finale du mortier est la conséquence de la perte de résistance du fait de la transformation de la pâte en MSH .

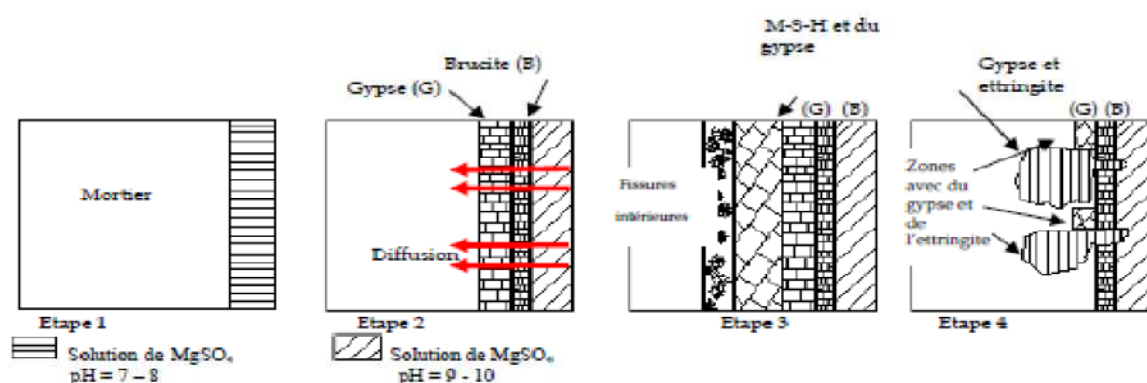


Figure II.17. Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium [17].

Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium ($MgSO_4$). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions SO_4^{2-} réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{2+} peuvent réagir avec les ions OH^- et former de la brucite ($Mg(OH)_2$) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les CSH. Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [17].

II.9.7. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatiques :

Dans une étude de la résistance du béton autoplaçant à l'attaque par des sulfates [15], l'accroissement du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et l'augmentation du rapport Eau/Liant équivalent, a été constaté. En effet, quand le rapport E/C

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc la pénétration des agents agressifs plus difficile (figure I.18).

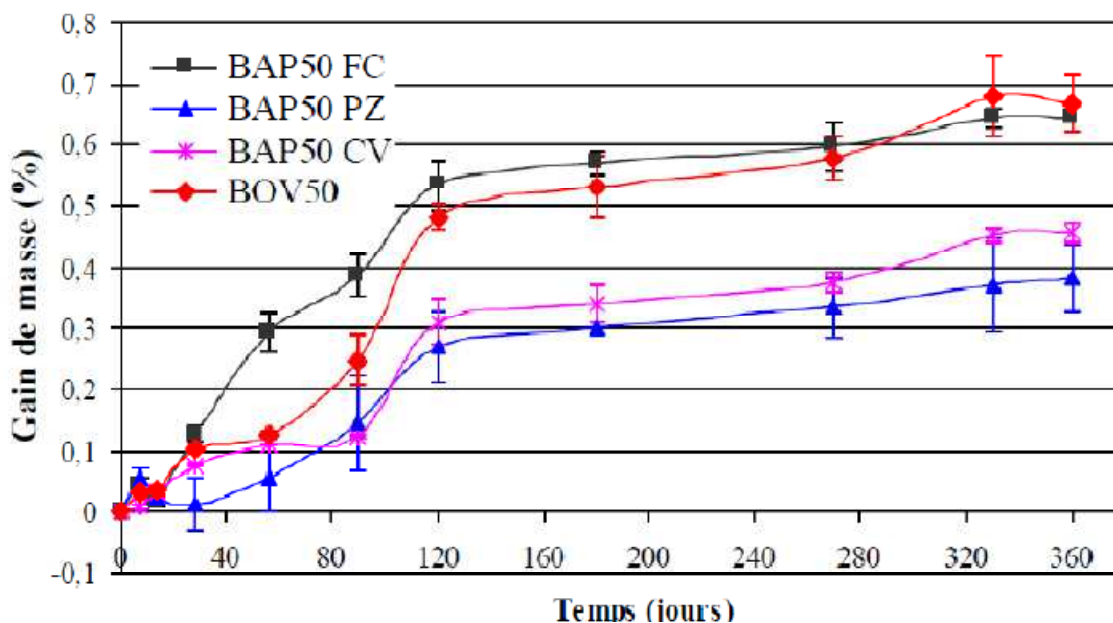


Figure II.18 : variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [17].

Rackel [17] a testé l'effet des attaques sulfatiques externes sur les bétons d'ouvrage d'art (BOA) formulés avec 100% de CEMI et 75%CEMI+25% de MKF, selon le mode opératoire non normalisé développé par Messad [18]. La Figure II.19, présente les résultats des suivis de l'expansion unidirectionnelle des éprouvettes de béton en fonction du temps d'immersion dans une solution de sulfate se sodium de concentration 6g/l de SO_4 maintenue à 25°C et pH 7.

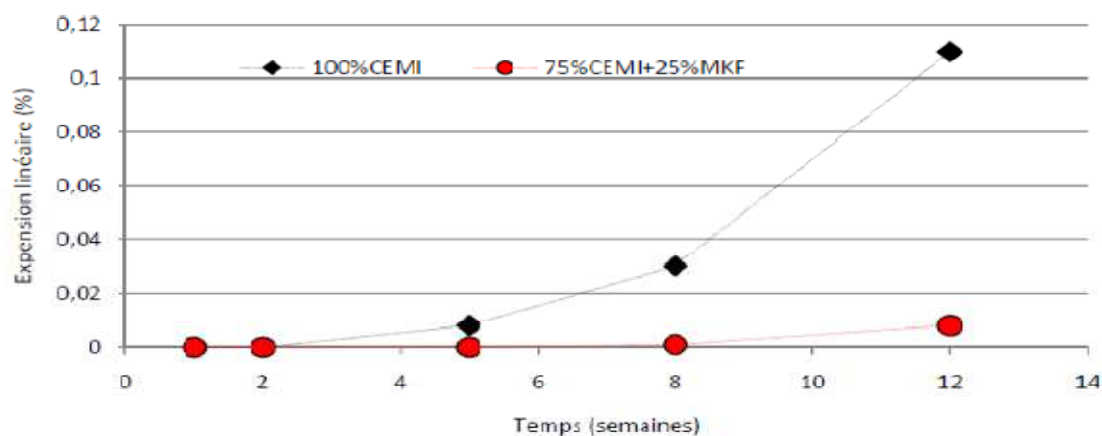


Figure II.19 .Expansions linéaires mesurées sur des éprouvettes de bétons d'ouvrages d'art (BOA) avec ou sans métakaolin flash [17]

Chapitre 2 : La Durabilité chimiques des bétons

L'expansion du béton testé diminue très fortement lorsque 25% du CEMI de métakaolin flash est substitué. Ainsi après 12 semaines de test, l'expansion du béton avec MKF est inférieure à 0.01% alors que celle du béton témoin dépasse 0.1%.

Rackel [17] a vu que lorsque le métakaolin flash est présent dans la matrice cimentaire le pH diminuait légèrement pour atteindre 12, ce pH étant celui de la dissolution de l'ettringite secondaire. Grace à cette légère diminution si une quantité d'ettringite secondaire se formait elle ne serait pas stable à un tel PH, et pourrait donc de nouveau se dissoudre [17].

II.10.CONCLUSION :

A travers les études menées sur la durabilité de différents bétons, nous avons constaté qu'il existe une relation entre le type d'addition et/ou le substitut (dans le cas des ciments composés) utilisé dans la pâte de ciment et les propriétés de résistance chimique (carbonatation, attaque sulfate et attaque acide) de ces matériaux cimentaires [17].

La durabilité constitue l'un des paramètres essentiels dans l'élaboration des ouvrages en béton. Ainsi la formulation des bétons se fait en fonction des sollicitations environnementales auxquelles ils sont soumis. Pour répondre à ces exigences de durabilité, le béton doit être confectionné selon de nouveaux textes normatifs européens qui autorisent deux méthodes de formulation. Selon la nouvelle norme européen EN 206 « Béton : Spécifications et conformité».

Les études et recherches concernant la durabilité du béton connaissent un engouement et un développement accru, notamment à travers les effets résultants de l'exposition des ouvrages en béton aux actions climatiques et environnementales [21].

Un béton est d'autant plus durable qu'il présente :

- un dosage en ciment au moins égal au minimum exigé par la norme.
- un rapport eau-ciment optimal.
- une quantité suffisante d'air entraîné.
- une attention particulière à la cure avant son exposition au milieu agressif.

Et une porosité plus faible [16].

Partie Expérimentale

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

III.1. Introduction :

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

La caractérisation des matériaux de construction telle que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituants sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre.

Nous procéderons successivement à l'identification des matériaux utilisés, à la présentation des essais et la caractérisation des mortiers élaborés.

Pour cela, nous avons confectionné des éprouvettes comme témoin et des éprouvettes substituées avec deux différents pourcentages de poudre de verre avec deux dosages E/L et E/C.

Les éprouvettes ont été confectionnées selon la modalité de la norme EN 196-1 qui explique le mode opératoire correspondant à la préparation du mortier pour mesurer la résistance mécanique à la flexion et à la compression.

Le travail est divisé en trois étapes :

Etape1 : la caractérisation du ciment et de sable est effectuée au niveau de laboratoire matériaux.

Broyage du verre et caractérisation de la poudre de verre au niveau de laboratoire de l'université de Boumerdes.

Etape2 : préparation des mélanges et confection des éprouvettes au niveau de la cimenterie de Sour el-ghozlane.

Etape3 : Un essai rhéologique (détermination du point de saturation du ciment portland) effectué au niveau de laboratoire matériaux.

Les essais mécaniques (compression, flexion) effectués à la cimenterie de Sour el-Ghozlane.

Les essais de durabilité chimiques effectués au niveau de laboratoire de génie des procédés.

III.2. Présentation des matériaux :

III.2.1. Les mortiers :

Les mortiers sont des matériaux de construction qui contiennent du ciment, du sable, de la poudre de verre et éventuellement l'adjuvant.

Notre travail consiste à la formulation d'un mortier substitué d'un certain pourcentage de poudre de verre qui commence par l'influence de la poudre de verre sur la résistance mécanique et la durabilité chimiques des mortiers à l'état frais et à l'état durci.

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

Et les matériaux utilisés pour cette étude sont :

III.2.2.Le sable : le sable que nous avons utilisé est un sable de carrière 0/4, concassé et tamisé dans un tamis de 0.2 cm (≤ 2 mm).



Figure III 1. Sable de carrière 0/4.

III.2.3.Le liant :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale pulvérisée, s'hydratant en présence de l'eau. Il forme une pâte qui fait prise et durcie progressivement dans le temps sous l'eau et à l'air libre. C'est le constituant fondamental du mortier puisque c'est lui qui joue le rôle de cohésion des différents constituants.

Le ciment utilisé pour la préparation du notre mortier est commercialisé par la cimenterie de Sour El-ghozlane CEMI 52.5 avec une finesse égale $2530 \text{ cm}^2/\text{g}$.

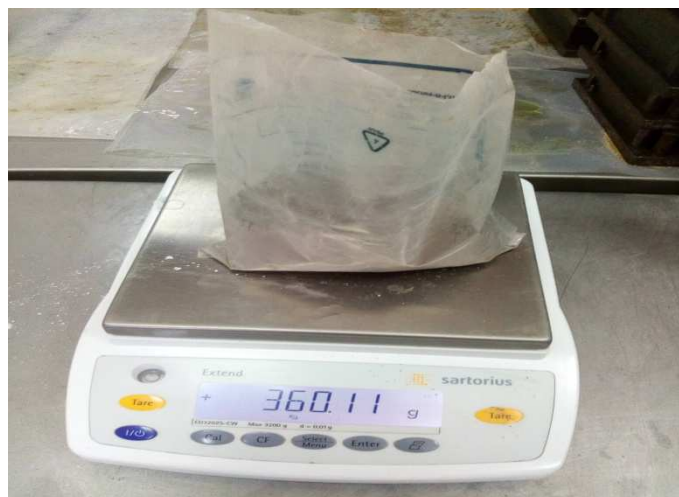


Figure III.2. Ciment portland CPA (CEMI 52.5).

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

L'analyse thermique gravimétrique permet de déterminer qualitativement et quantitativement la composition des oxydes contenus dans le ciment y compris la fraction des pertes au feu, comme indique le tableau suivant :

Tableau III.1. Composition chimique du CEMI

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Pourcentage (%)	21.29	4.72	3.49	64.68
Oxydes	MgO	Na ₂ O	SO ₃	PAF
Pourcentage (%)	0.44	0.17	2.06	1.93

A partir du microscope optique polarisé, la détermination des différentes phases minéralogiques s'effectue par la différence de coloration entre les composants de clinker, à partir des calculs des surfaces de chaque phase cristalline, on peut déterminer la teneur de chacun de ces derniers comme l'indique le tableau suivant :

Tableau III.2. Composition minéralogique du CEM I

Constituants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gypse
Pourcentage (%)	60.61	15.36	6.6	10.61	5

III.2.4. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage, est l'eau de robinet qui provient de Bouira.



Figure III.3. L'eau de gâchage.

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

III.2.5. L'adjuvant :

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (inférieurs à 5%). Il améliore les propriétés physicomécaniques des mortiers auxquels ils sont ajoutés.

Au cours de la préparation de notre mortier on a incorporé un superplastifiant **SIKA VISCOCRETE TEMPO 12** permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.

Dans les bétons autoplaçants, **SIKA VISCOCRETE TEMPO 12** améliore la, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.



Figure III.4. Superplastifiant TEMPO 12.

La fiche technique de ce produit fourni par le producteur donne ses caractéristiques générales suivantes :

Forme.....liquide

Couleurbrun clair

PH $5,5 \pm 1,0$

Densité $1,060 \pm 0,020$

Teneur en chlore..... $\leq 1 \%$

Extrait sec.... $29,5\% \pm 1,4\%$ (méthode halogène selon NF 085) $29,5\% \pm 1,4\%$ (NF EN 480-8)

La fourchette de dosage recommandée est de 2% de poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé par (UR-MPE) en fonction du type de ciment et des effets recherchés (voir l'annexe 1).

III.2.6. La poudre de verre :

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible. Il est constitué le plus souvent d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse.

La poudre de verre est un ajout cimentaire obtenu par broyage du verre (Déchets de verre de bouteilles vertes) avec une finesse de $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$ (voir annexe 2), les résultats de l'analyse granulométrique de la poudre de verre sont présentés dans la figure ci-dessous :

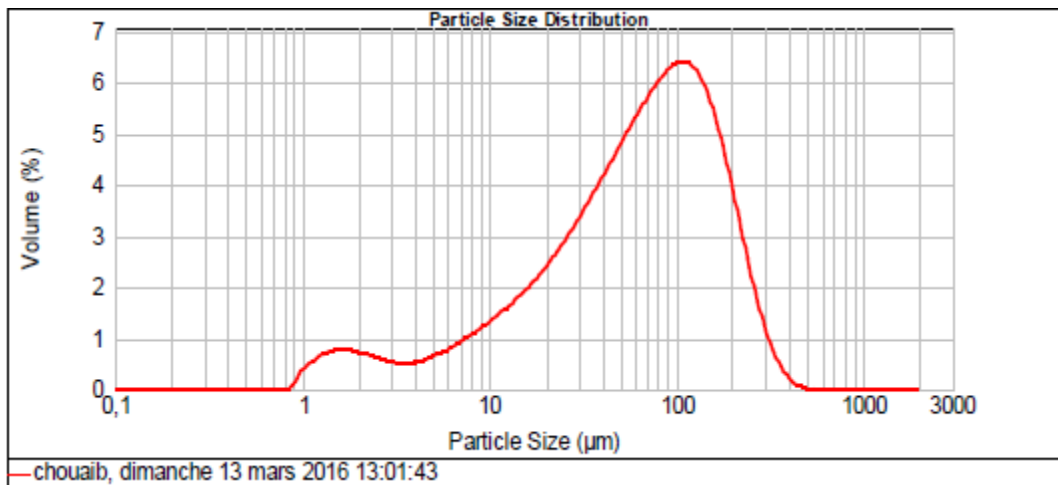


Figure III.5. Analyse granulométrique de la poudre de verre (annexe 2).



Figure III.6. La poudre de verre.

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de verre sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Composition chimique du verre.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃
Pourcentage (%)	70.50	1.42	0.10	8.43	4.01	15.28	0.25

III.3. Confection des éprouvettes :

Le mortier est préparé selon la modalité de la norme NF P15-403, qui prend en considération une partie du liant, poudre de verre et trois parties de sable avec un dosage E/C= 0.35 on a varié les quantités d'eau et les quantités d'adjuvant pour les trois pourcentages.

Pour le dosage E/L=0.35 on a fixé la quantité d'eau et la quantité d'adjuvant pour les trois pourcentages.

Cette norme fait l'objet d'une caractérisation mécanique à la flexion 3 points et à la compression simple à 7,14 et 28 jours, des éprouvettes prismatiques 4×4×16, suivant le protocole nous avons confectionné.

III.4. Les différentes étapes de confection :

III.4.1. Pesé des constituants :

La masse des constituants nécessaire aux essais est déterminée en fonction des éprouvettes à préparer ; elle est pesée avec une précision de 0.5%.

Dans le cas de la préparation de trois éprouvettes 4×4×16, les quantités sont représentées dans les tableaux suivant :

III.4.1.1 Rapport E/L=0.35 :

Tableau III.4. Les constituants du mortier pour dosage E/L=0.35.

Matériaux	0% PV	10% PV	20% PV
Sable	1350g	1350g	1350g
Ciment	450g	405g	360g
Eau	157.5g	157.5g	157.5g
Poudre de verre	/	45g	90g
Adjuvant	9g	9g	9g

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

III.4.1.2. Dosage E/C=0.35 :

Tableau III.5. Les constituants du mortier pour dosage E/C.

Matériaux	10%	20%
Sable	1350g	1350g
Ciment	405g	360g
Adjuvant	8.1g	7.2g
Eau	141.7	126
Poudre de verre	45g	90g

III.5. Incorporation de la poudre de verre :

La poudre de verre est incorporée dans le mortier en substitution de la quantité de ciment avec deux différents pourcentages (10% et 20%) selon la méthode suivante :

Masse de ciment \longrightarrow 100%

X (masse de PV) \longrightarrow 10%

X= masse de PV (10%, 20%) par rapport a la masse totale de ciment.

III.6. Malaxage d'un mélange type :

Le malaxage est effectué au moyen d'un malaxeur spécifié par la norme. Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

a) Mettre 157.5g d'eau.

b) Mettre 450g de ciment.

c) mettre 1350g de sable.

d) mettre 2% de masse de ciment d'adjuvant.

e) malaxer pendant 30 secondes à vitesse lente, introduire la poudre de verre d'une manière aléatoire, puis malaxer pendant 2 mn à vitesse rapide.

f) arrêtez le mouvement avec le batteur démonté de son axe, raclez les parois et le fond de récipient de façon qu'aucune partie du mortier s'échappe au malaxage.

Après remontage de batteur, reprendre le malaxage pendant 2mn à vitesse rapide.



Figure III.7. Mortier après le malaxage.

III.7. Confection des éprouvettes :

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs (tonitechnic) conformément au mode opératoire suivant :

- a) Le malaxage étant terminé, forme une galette rectangulaire.
- b) partager le mortier en 06 fractions égales, le moule ayant été fixé sur la table à chocs muni de sa hausse.
- c) introduire dans chacun des trois compartiments une fraction de la galette, égaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticalement, déplacer dans un double aller et retour.



Figure III.8. la table aux chocs.

- d) recommencer les mêmes opérations pour la 2^{ème} couche après 60 nouveaux chocs.

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

e) le moule étant tiré de la machine et débarrassé de la hausse, araser le mortier avec l'arrêt de la règle métallique plate, maintenue verticalement et déplacée par un mouvement de scie de faible amplitude et sur la longueur des éprouvettes.



Figure III.9. Mortier après les secousses.

Après un temps estimé à 24 heures du malaxage, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau à $20\text{ C}^\circ \pm 1\text{ C}^\circ$.



Figure III.10. Chambre de conservation.

Après démoulage des éprouvettes qui comportent (0%,10%,20%) de la poudre de verre de dosage $E/L=0.35$, on a étuvé 3 éprouvettes pour chaque cas pendant 2h à une température de 40 C° puis on a augmenté la température jusqu'à 60 C° pendant 14h pour faire les écrasements à (2,28,60 jours) , Pour les éprouvettes conservés à l'air libre on a laissé trois avec un dosage E/L et deux avec un dosage E/C pour les écrasements .



Figure III.11. L'effet d'étuvage.

Et 5 éprouvettes conservées à l'eau de robinet (7, 14, 28, 60 jours).

Le reste d'éprouvettes sont conservées pour la durabilité chimique.

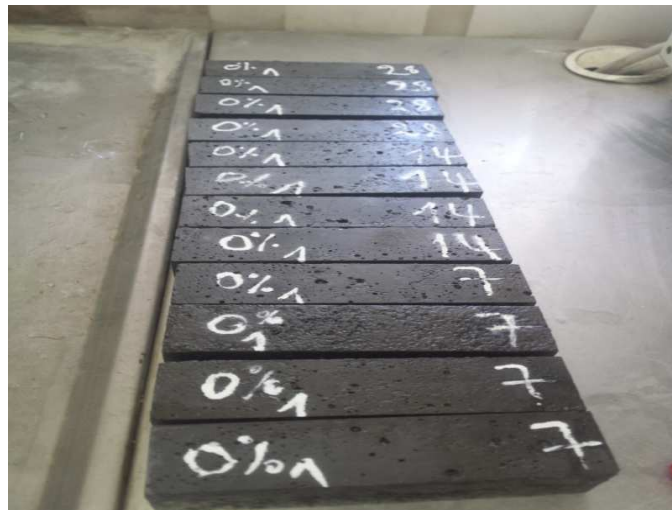


Figure III.12. Les éprouvettes après le démoulage.

III.8. Réalisation des essais :

III.8.1. Les essais physiques :

III.8.1.1. Essai d'étalement :

Afin de déterminer le point de saturation du ciment portland en adjuvant on a effectué un essai d'étalement qui a pour but de mesurer le diamètre d'étalement d'un certain volume de mortier placé dans un mini cône sur une plaque en plexiglas [25].



Figure III.13. Essai d'étalement.

L'essai a été effectué en malaxant 250g de ciment avec de l'eau ($E/C=0.35$) avec une quantité d'adjuvant sachant que cette dernière change en commençant par un pourcentage de 1.5% jusqu'à ce que le point de saturation soit atteint. Après avoir versé le mélange ciment+ eau + adjuvant dans le mini cône se forme une pâte d'une forme d'un cercle sur la plaque en plexiglas, puis on mesure les deux diamètres du cercle pour prendre leur moyenne telle que

$$D = \left(\frac{D1 + D2}{2} \right).$$



Figure III.14. Mesure de diamètre d'étalement.

Exemple : pour dosage de superplastifiant (SP=1.7%) :

250g —————> 100%

X —————> 1.7%

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

$$X = \frac{250 \times 1.7}{100} \longrightarrow x = 4.25g$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : résultats obtenus pour l'essai d'étalement.

Teneur en SP(%)	SP en(g)	D ₁	D ₂	D' = $\frac{D_1+D_2}{2}$
1.5	6	21.5	21	21.25
1.6	4	22	22.5	22.25
1.7	4.25	22.6	23	22.8
1.8	4.5	23.5	23.9	23.7
1.9	4.75	23.7	24	23.85
2	5	27	26.5	26.75
2.1	5.25	25	25.5	25.25

Les résultats représentés schématiquement sous forme d'histogramme dans la figure ci-dessous :

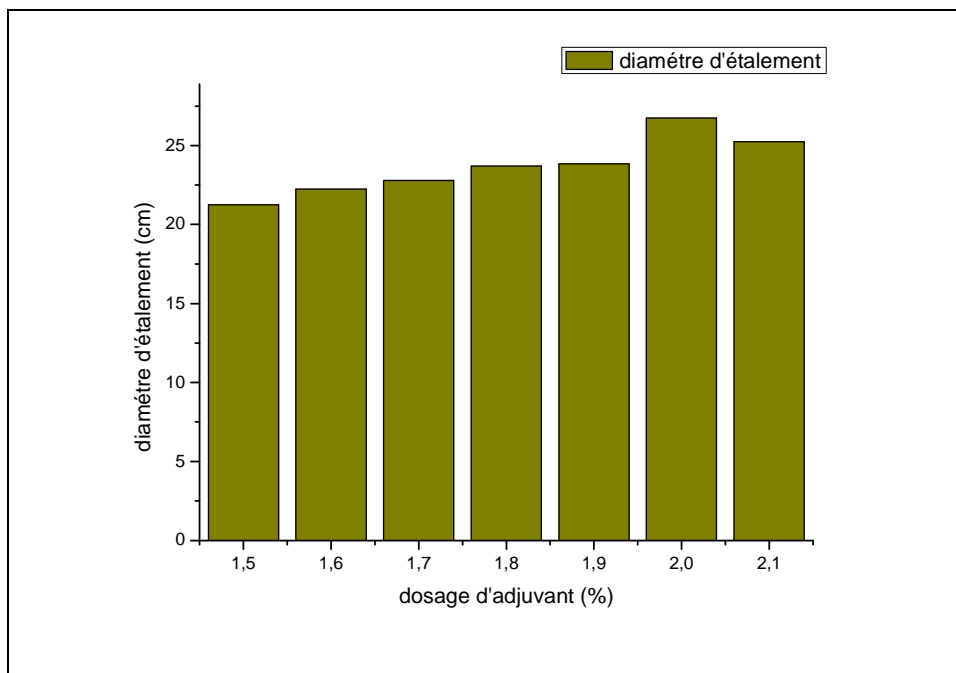


Figure III.15. les résultats d'essai d'étalement.

Commentaire :

On remarque que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la quantité d'adjuvant jusqu'au pourcentage de 2.1 ou il a subi une diminution.

D'après le principe de l'essai d'étalement : le point de saturation est le pourcentage qu'il a le plus grand diamètre d'étalement. Donc 2% est le point de saturation de notre ciment compatible avec le résultat d'essai fait au laboratoire de Boumerdes.

III.8.1.2. Essai de prise :

L'essai de prise est un essai en laboratoire qui consiste à déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons.

L'essai se fait à l'aide de l'appareil de Vicat qui donne deux repères pratiques : le début de prise et la fin de prise, autrement dit, le temps qu'il faut pour solidifier. Pour cela, on mesurera l'enfoncement de l'aiguille dans le ciment, de temps de gâchage, et le temps de début de prise.



Figure III.16. L'appareil de Vicat.

III.8.1.2.1. Mode opératoire :

L'essai de prise est réalisé suivant le mode opératoire suivant :

- préparer 0,5 kg de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,26, verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment ;
- mettre le malaxeur en marche et déclencher le chronomètre ;
- la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs.



Figure III.17. La pâte sur une plaque de verre.

- Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.
- la sonde est fixée sur la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- la pâte sera à consistance normale si $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$:
 - si $d > 7\text{mm}$: il n'y a pas assez d'eau,
 - si $d < 5\text{mm}$: il y a trop d'eau.

III.8.1.2.2. Prise d'essai à l'aiguille de Vicat :

On dispose une aiguille verticale coulissante (figure III.18) de 1mm^2 de section et pesant 300 grammes au-dessus d'un récipient, qui est le moule, contenant une pâte préparé, on appelle durée du début de prise le temps qui s'écoule entre l'instant du contact de l'eau avec le liant et celui où l'aiguille, descendue normalement c'est-à-dire 4mm, pour les ciments courants, la coupelle de l'appareil de Vicat étant maintenue dans l'eau.



Figure III.18. Lancement de début et fin de prise (l'appareil de Vicat automatique).

On refait le même essai en substituant la quantité de ciment avec la poudre de verre (10% et 20%)

Les résultats obtenus sur les délais de prise sur les différentes pâtes cimentaires étudiées sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau III.7. Les résultats de l'essai de prise.

Pourcentage (%)	Début de prise(s)	Fin de prise(s)
0%	2h08 min	5h13 min
10%	2h35min	5h28min
20%	2h50min	5h35min

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme de courbe dans la figure ci-dessous :

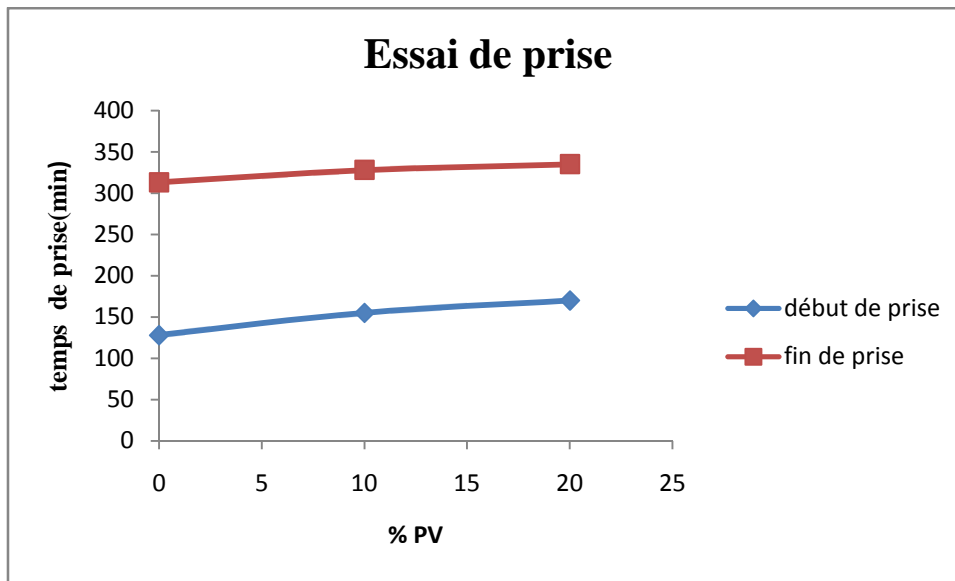


Figure III.19. Les résultats d'essai de prise.

Commentaire :

On remarque, que les délais de prise augmentent légèrement en augmentant la teneur en verre dans le ciment portland, la surface spécifique du verre a affecté les délais de prise. Donc l'incorporation de la poudre de verre retarde la prise.

III.8.2. Les essais mécaniques :

III.8.2.1. Resistance en flexion :

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur $4a$, reposant sur deux appuis sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre)

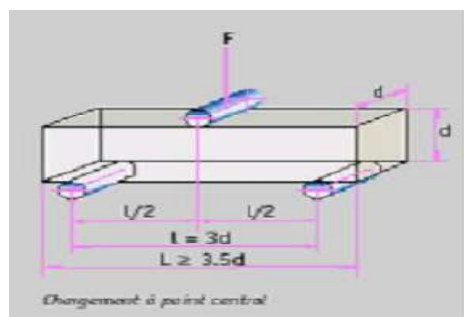


Figure III.20. Essai de traction par flexion.

III.8.2.2. Essai de compression :

Les demi-échantillons provenant de l'essai de flexion vont subir l'essai de compression sur leurs faces de moulage, sous une section de 40×40 mm, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10± 1mm d'épaisseur, de 40±1mm de largeur et de longueur et dont la tolérance de planéité est de 0.01mm.

Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm.



Figure III.21. Essai de compression.

III.8.3. Les essais chimiques :

III.8.3.1. Essai de durabilité chimique :

Pour la caractérisation de la résistance chimique l'évolution de la masse des échantillons prismatiques de mortier substitué avec une quantité de poudre de verre, confectionnés et démoulés après 24h les au séchage des échantillons par étuvage jusqu'à l'élimination de l'eau libre pour avoir une masse constante des différentes échantillons, ces échantillons sont alors immergés dans des solutions acides (HCl, MgSO₄) et eau de mer qui ont une même concentration de 05% .

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais



Figure III.22. Les éprouvettes dans les solutions (HCl, MgSO₄ et l'eau de mer).



Figure III.23. Préparation de la solution HCl.



Figure III.24. Préparation de la solution de sulfate de magnésium.

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

III.8.3.3.Mesure de PH :

Les solutions sont mesurés a l'aide de PH-mètre avant l'immersion des éprouvettes et à chaque semaine après immersion des éprouvettes (7, 14,28 jours,...etc.).

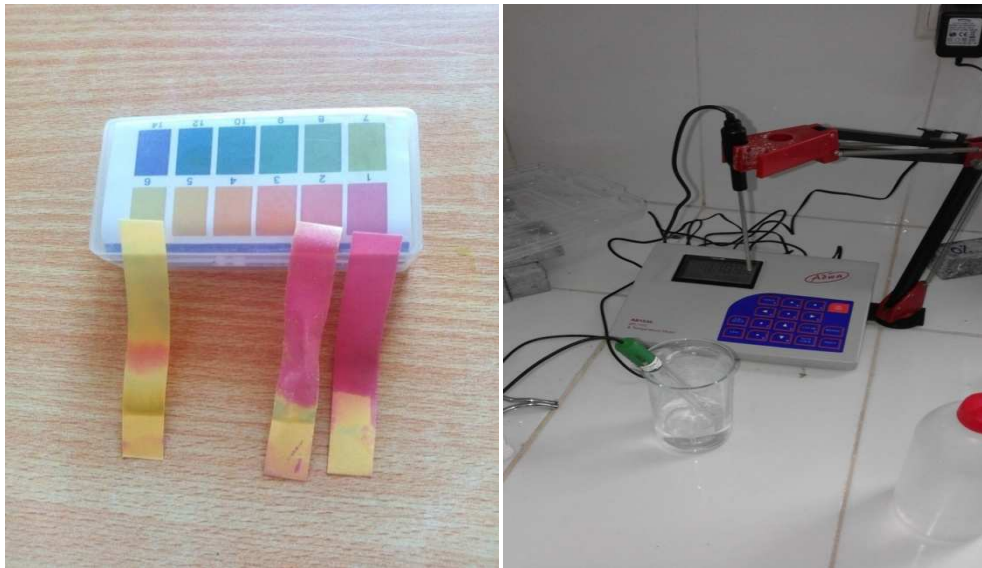


Figure III.25. Le PH-mètre

Afin d'évaluer le degré de dégradation par le calcul de la perte de masse des éprouvettes immergées dans les différents milieux agressifs en fonction de temps, Nous avons adopté le mode opératoire ci-dessous.

Chaque 7 jours d'attaque et pour une durée de 28 jours, les éprouvettes sont retirées, nettoyées avec l'eau de robinet pour éliminer les mortiers altérés, séchés jusqu'à l'élimination totale de l'humidité absorbée (la masse doit être constante).

Le degré de dégradation est évalué par la formule de perte de masse suivante :

$$\text{Perte de masse(\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

M_1 : masse sèche des éprouvettes avant immersion.

M_2 : masse sèche des éprouvettes après immersion.

Avant l'immersion :

PH= 5.870 \longrightarrow $MgSO_4$

$MgSO_4$ hydraté + H_2O (5%).

La répartition des éprouvettes dans les différents milieux était comme suit :

Chapitre III: Présentation des matériaux et élaboration des essais

III.8.3.4. Les éprouvettes immergées avec un dosage E/L=0,35 :

Tableau III.8. Le nombre des éprouvettes immergées dans les différents milieux avec E/L=0.35

Pourcentage de la poudre de verre	Milieux		
	Hcl	MgSo ₄	Eau de mer
0% PV	7 éprouvettes	7 éprouvettes	6 éprouvettes
10% PV	7 éprouvettes	7 éprouvettes	6 éprouvettes
20% PV	4 éprouvettes	4 éprouvettes	3 éprouvettes

III.8.3.5. Les éprouvettes immergées avec un dosage E/C=0.35 :

Tableau III.9. Le nombre des éprouvettes immergées dans les différents milieux avec E/C=0.35

Pourcentage de la poudre de verre	Milieux		
	Hcl	MgSo ₄	Eau de mer
10% PV	5 éprouvettes	5 éprouvettes	3 éprouvettes
20% PV	5 éprouvettes	5 éprouvettes	3éprouvettes

III.8.3.2.. Essai à la phénolphthaléine :

Cet essai consiste à pulvériser un échantillon fraîchement fendillé d'une solution de phénolphthaléine. Les parties carbonatées restent incolores alors que les parties saines se colorent en rose, figure III.26. La profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide d'une règle graduée et correspond à la distance moyenne entre la surface externe et le front de coloration. Un suivi de la profondeur de carbonatation dans le temps, sert à déterminer la vitesse ou la cinétique de carbonatation. La profondeur est obtenue par $X_c = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ avec X_c moyenne des X_i mesures élémentaires sur un échantillon et n, nombre de mesures [8].

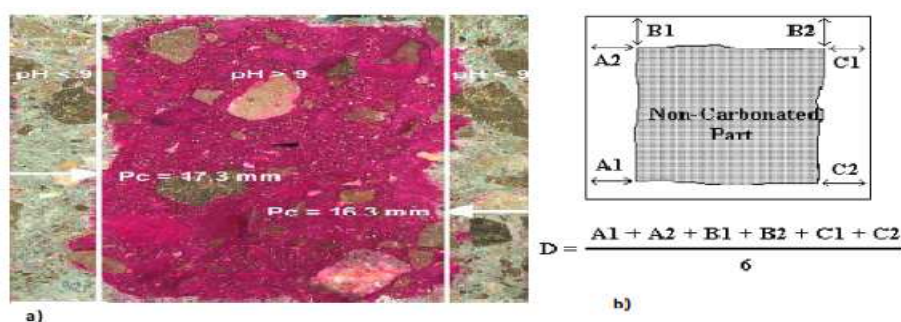


Figure III.26. Principe de mesure de la profondeur de carbonatation : a) [Villain, 2006] et b) [Atis, 2003] [8].

III.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers. C'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces mortiers et les essais normalisés préconisés dans notre étude. Ces essais (physiques, mécaniques, chimiques) sont relatifs à l'étude des propriétés des matériaux cimentaires (pâtes, mortiers) à base de poudre de verre, ainsi que des formulations témoins pour le besoin de comparaison. Le début des investigations a été sur pâtes normalisées par des essais de mesure de temps de prise puis sur mortiers par des mesures de résistance à la compression, et enfin sur des essais de durabilité chimique (Essai à la phénolphtaléine).

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction :

Cette partie présente, les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre recherche, ainsi que leur interprétations. Il s'agit des essais mécaniques (compression, flexion) effectués aux différents âges avec les deux dosages E/L et E/C. Et Comme La durabilité du béton dépend de plusieurs facteurs (actions physiques, chimiques ou mécaniques) qui affectent sa durée de vie. La résistance du béton à ces différents facteurs dépend essentiellement de sa qualité générale et de la qualité de chacun de ses constituants, on s'est intéressées durant ce projet aux résultats obtenus après l'immersion des éprouvettes dans les milieux chimiques (durabilité chimique) préparés dans le but de caractériser l'effet des différentes agressions chimiques qui sur la résistance de notre mortier. Et on va essayer de faire une comparaison entre les résultats obtenus avec les différents pourcentages de la poudre de verre et aussi la discussion de la variation de la résistance mécanique avant et après l'immersion des éprouvettes dans les différents milieux.

IV.2.Présentation des résultats :

Pour la présentation des résultats on a recommandés les noms suivants :

Tableau IV.1. Les noms recommandés pour la présentation des résultats.

Abréviations	Noms
MT	Mortier témoin
M 10% E/L	Mortier avec 10% de substitution de poudre de verre avec un dosage E/L
M 20% E/L	Mortier avec 20% de substitution de poudre de verre avec un dosage E/L
M 10% E/C	Mortier avec 10% de substitution de poudre de verre avec un dosage E/C
M 20% E/C	Mortier avec 10% de substitution de poudre de verre avec un dosage E/C

IV.3.Résultats des essais mécaniques sur mortiers :

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression comme le montre la figure suivante :

Chapitre IV : Résultats et discussion

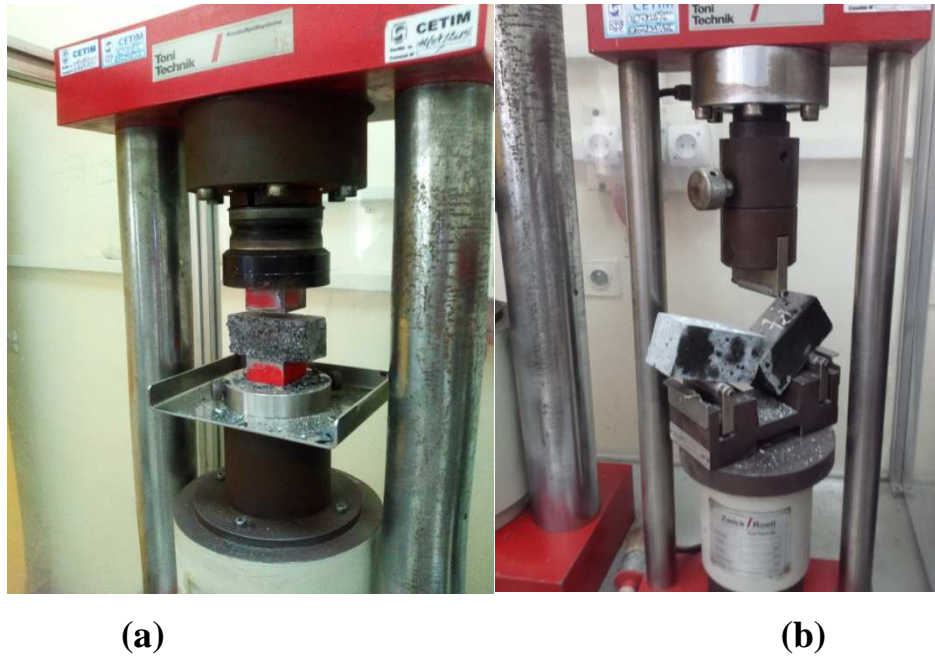


Figure IV.1. (a) Dispositif pour l'essai de résistance à la compression, (b) flexion.

IV.4. Les caractéristiques mécaniques des mortiers à l'état durci :

IV.4.1. Eau de robinet :

IV.4.1.1. La masse des différents types des mortiers à l'état durci :



Figure IV.2. Pesée des éprouvettes

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.2. La masse des différents types des mortiers à l'état durci des deux dosages E/L et E/C.

<i>La masse des éprouvettes (g)</i>				
Caractéristiques				
Age	07 Jours	14 Jours	28 Jours	60 Jours
MT	598	599.3	600.12	602
M 10% E/L	607	605.21	606	608.5
M 20% E/L	607.85	601.85	602	610
M 10% E/C	602.6	602.9	603	592.6
M 20% E/C	496.49	498.1	505	557.09

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

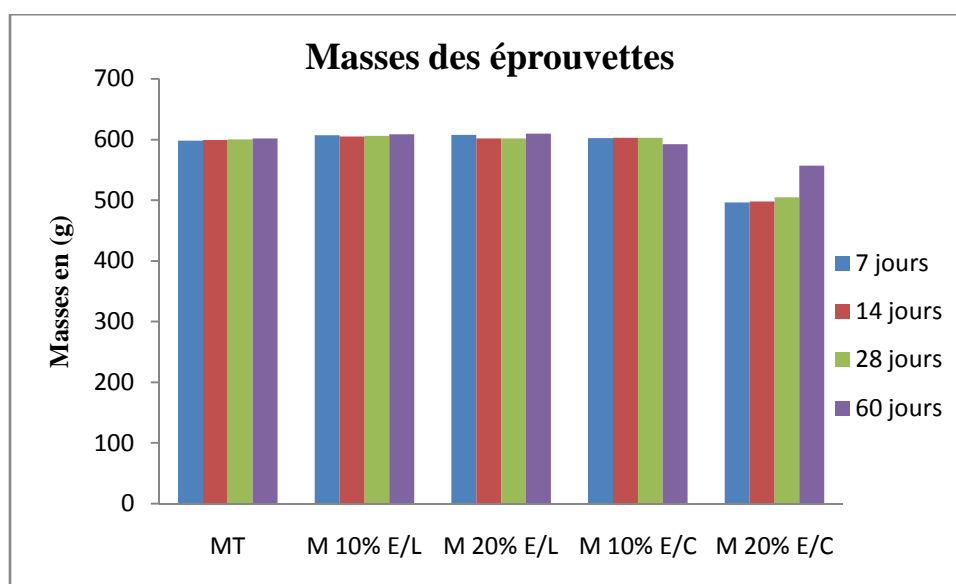


Figure IV.3. Masses des éprouvettes des différents types des mortiers.

- L'histogramme de la figure IV.3, représente les masses en fonction des différents types des mortiers.
- On remarque que les masses des éprouvettes augmentent en augmentant le pourcentage de la poudre de verre pour les éprouvettes confectionnées avec un dosage E/L. Et diminuent avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre pour les éprouvettes confectionnées avec un dosage E/C.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.4.1.2. Les résistances mécaniques :

A partir de ces essais (flexion, compression) aux différents âges (7, 14, 28 et 60 jours) des deux dosages E/L et E/C on a eu les résultats suivants :

IV.4.1.2.1. La résistance mécanique à la flexion :

Les résultats de la résistance mécanique en flexion des différents pourcentages de poudre de verre aux différents âges (7, 14, 28 jours) des deux dosages E/L et E/C sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 .La Résistance à la flexion des différents types des mortiers.

Caractéristiques	Résistance mécanique en (MPa)			
	résistance à la flexion			
Age MT	7 Jours	14 Jours	28 Jours	60 Jours
M 10% E/L	6,1	10,6	10,41	3,94
M 20% E/L	6,26	9,3	8,27	4,31
M 20% E/L	9,42	10,1	8,33	4,34
M 10% E/C	7,06	5,57	10,4	3,44
M 20% E/C	3,53	3,8	3,8	3,44

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme de courbes sur la figure ci-dessous:

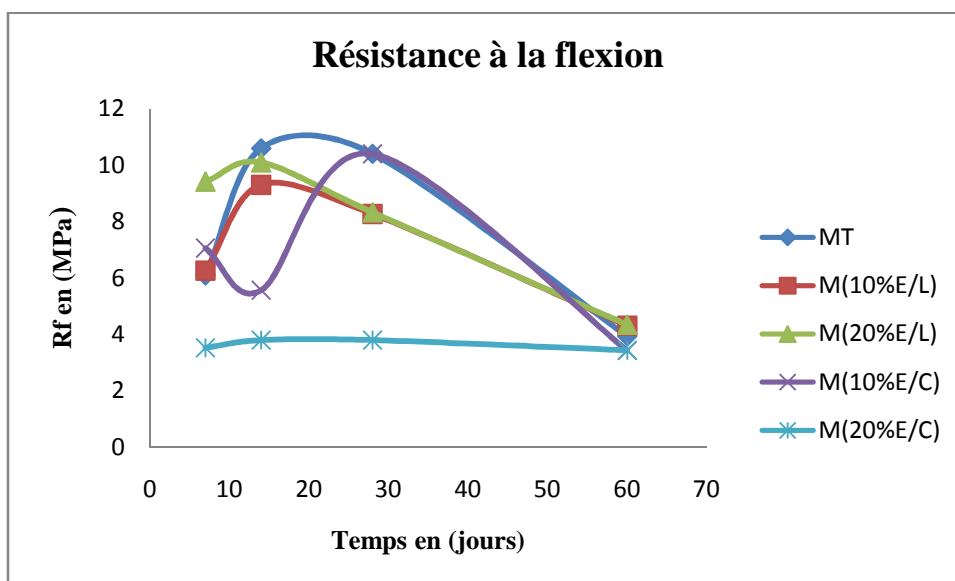


Figure IV.4. Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents types des mortiers.

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'historgramme de la figure ci-dessous :

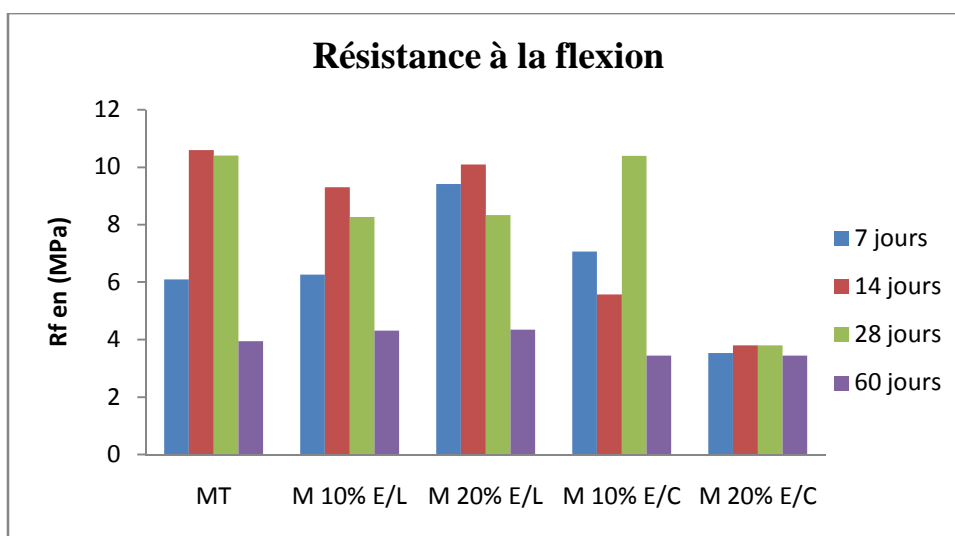


Figure IV.5. La résistance à la flexion des différents types des mortiers.

IV.4.1.2.2. La résistance à la compression :

Tableau IV.4. La Résistance à la compression des différents types des mortiers.

Caractéristiques	Résistance mécanique en (MPa)			
	résistance à la compression			
Age	7 jours	14 jours	28 jours	60Jours
MT	63.9	68	71.2	72.55
M 10% E/L	54.3	56.65	63.45	78.4
M 20% E/L	57	62.05	65.05	83.16
M 10% E/C	46	57.5	63.3	58.88
M 20% E/C	18.16	16.78	26.85	28.4

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous.

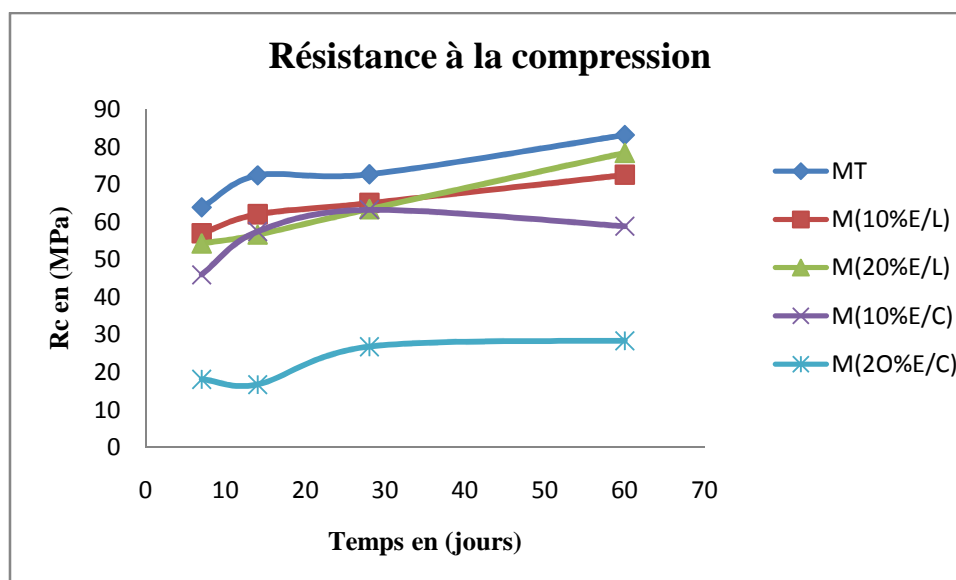


Figure IV.6. Les résultats de résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers.

- Les graphes de la figure IV.6, représentent l'évolution de résistance mécanique des différents mortiers en fonction de temps.

Chapitre IV : Résultats et discussion

- On remarque que la résistance mécanique des mortiers (témoin, 10%E/L et 20% E/L) augmente durant l'intervalle de temps [7 ; 60 jours]. et pour les mortiers (10%E/C et 20%E/C), la résistance augmente de 7 à 28 jours puis elle s'est stabilisée.



Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

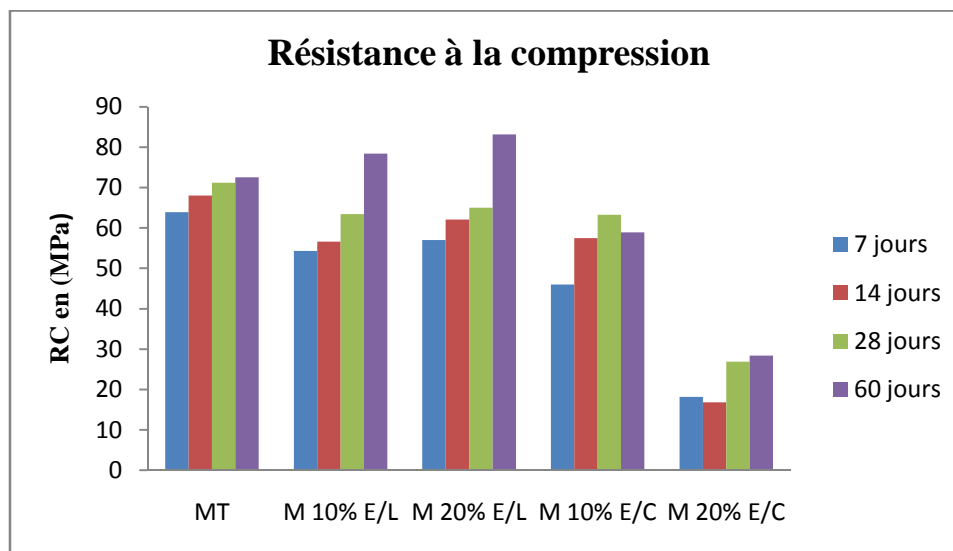


Figure IV.7. Résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers.

- L'histogramme de la figure IV.7, représentent la variation de résistance à la compression en fonction des différents types des mortiers.
- On remarque que la résistance mécanique (compression, flexion) augmente avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre pour les éprouvettes préparées avec le rapport E/L. cela est dû à l'effet de la poudre de verre broyée ayant une finesse de $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$ qui peut jouer deux rôles : Rôle physique qui consiste au remplissage des vides et le rôle chimique qui consiste à la formulation de nouveaux C-S-H selon la réaction pouzzolanique ($\text{CH} + \text{S} \rightarrow \text{C-S-H}$).
- Et diminue avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre pour les éprouvettes préparées avec le dosage E/C à cause de la diminution de la quantité d'eau et d'adjuvant.
- La résistance mécanique des mortiers formulés avec le dosage E/C est inférieure à celle des mortiers formulés avec le dosage E/L et à celle du mortier témoin, cela peut être dû à la substitution des quantités d'eau et d'adjuvant ainsi que le ciment, qui a induit en quelque sorte à la diminution des performances de ces mortiers.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.4.2.Effet d'étuvage et l'air libre :

IV.4.2.1.: Effet d'étuvage sur l'évolution de la masse :

Les masses des éprouvettes étuvées et les éprouvettes conservées à l'air libre des différents types des mortiers aux différents âges (2, 28 ,60 jours) sont représentées sur les tableaux suivants :

Tableau IV.5. La masse des différents types des mortiers avant l'étuvage.

<i>Caractéristiques</i>	Masses en (g)		
	Masse avant l'étuvage		
	2 jours	28 jours	60 jours
Age MT	604	607	608
M 10% E/L	605	603	597
M 20% E/L	598	600	600

Tableau IV.6. Les masses des différents types des mortiers après l'étuvage.

<i>Caractéristiques</i>	Masses en (g)		
	Masse après l'étuvage		
	2 jours	28 jours	60 jours
Age MT	584	581	585
M 10% E/L	587	582	577
M 20% E/L	579	581	582

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

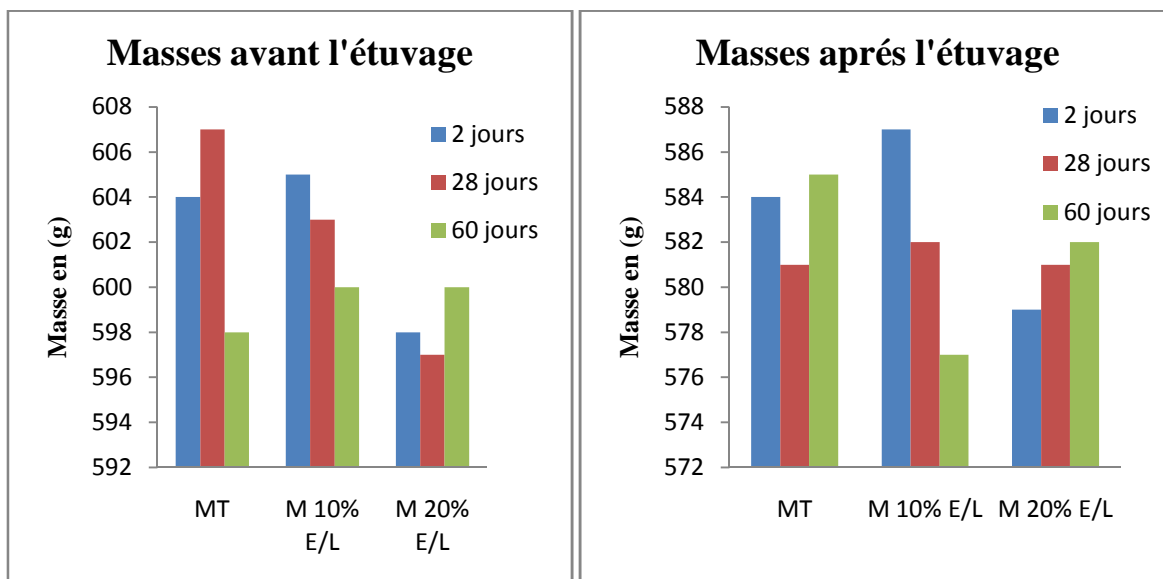


Figure IV.8. Masses des éprouvettes des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage.

- Les histogrammes de la figure IV.8, représentent les masses avant et après l'étuvage en fonction des différents types des mortiers.
- On remarque que les masses des différents mortiers ont subi une diminution après l'étuvage, Donc le durcissement à températures élevées influe négativement sur le mortier.

Tableau IV.7. La masse des différents types des mortiers à l'air libre.

<i>La masse des éprouvettes (g)</i>		
Caractéristiques		
Age	28 Jours	60 Jours
MT	598.02	591
M 10% E/L	603.79	602
M 20% E/L	581.81	580
M 10% E/C	576	577.75
M 20% E/C	535	536.51

*

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.8. La masse des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage.

<i>La masse des éprouvettes (g)</i>		
Caractéristiques	28 Jours	60 Jours
Age MT	583	582
M 10% E/L	582.4	576
M 20% E/L	580.66	579

Les résultats sont représentés schématiquement sur les histogrammes des figures ci-dessous :

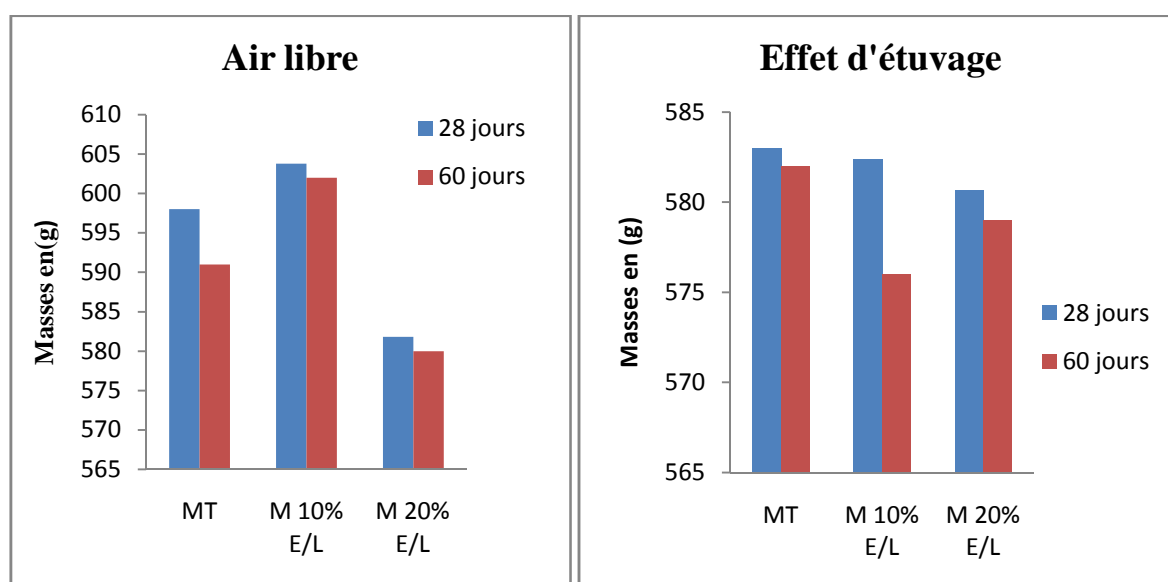


Figure IV.9. La masse des éprouvettes conservées à l'air libre et des éprouvettes étuvées.

- Les histogrammes de la figure IV.9, représentent la masse des éprouvettes conservées à l'air libre et des éprouvettes étuvées en fonction des différents types des mortiers.
- on remarque que les masses des éprouvettes conservées à l'air libre sont élevées par rapport aux éprouvettes étuvées, sauf pour le mortier avec 20% de substitution en poudre de verre qui a la même masse avec le mortier conservé à l'air libre, on peut déduire qu'à une certaine température de durcissement, notre mortier peut être influencé négativement sur ses performances physiques.
- La poudre de verre à un pourcentage bien défini peut être favorable à hautes températures.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.4.2.2.La résistance mécanique à la flexion :

Les résultats de la résistance mécanique en flexion de l'étuvage et l'air libre des différents pourcentages de poudre de verre aux différents âges (2, 28, 60 jours) sont présentés dans les tableaux qui viennent :

Tableau IV.9. La Résistance à la flexion des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage de dosage E/L.

<i>Caractéristiques</i>	Résistance mécanique en (MPa)		
	résistance à la flexion		
	2 jours	28 jours	60 jours
Age			
MT	6.75	8,77	9.2
M 10% E/L	5.4	9.52	10
M 20% E/L	5.0	9.66	10.23

Tableau IV.10. Les résultats de résistance mécanique en flexion des différents types des mortiers conservés à l'air libre.

<i>Caractéristiques</i>	Résistance mécanique en (MPa)	
	résistance à la flexion	
	28 jours	60 jours
Age		
MT	11.14	12.82
M 10% E/L	13.34	14.40
M 20% E/L	10.81	11.28
M 10% E/C	11	11.58
M 20% E/C	9.30	9.52

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats d'effet d'étuvage sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur les figures ci- dessous :

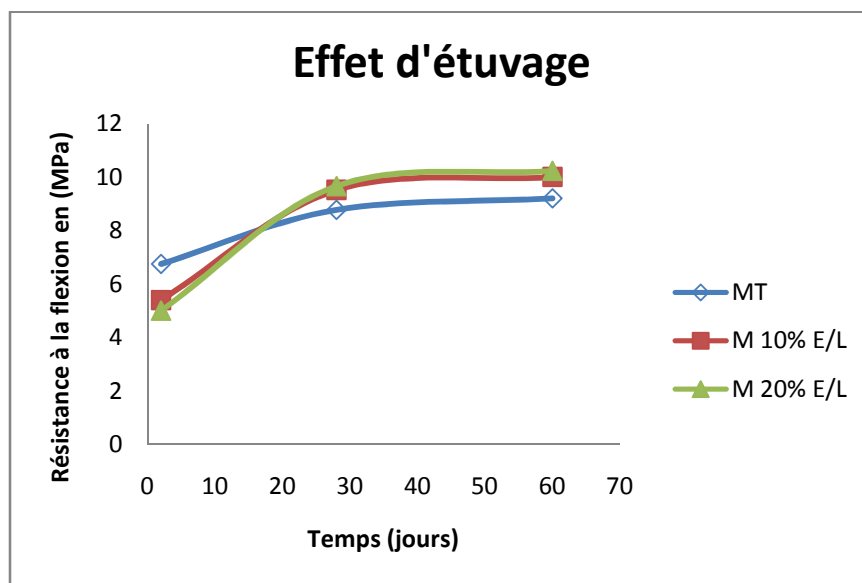


Figure IV.10. Les résultats de résistance mécanique à la flexion de l'effet d'étuvage.

Les résultats sont représentés schématiquement sur les histogrammes des figures ci-dessous :

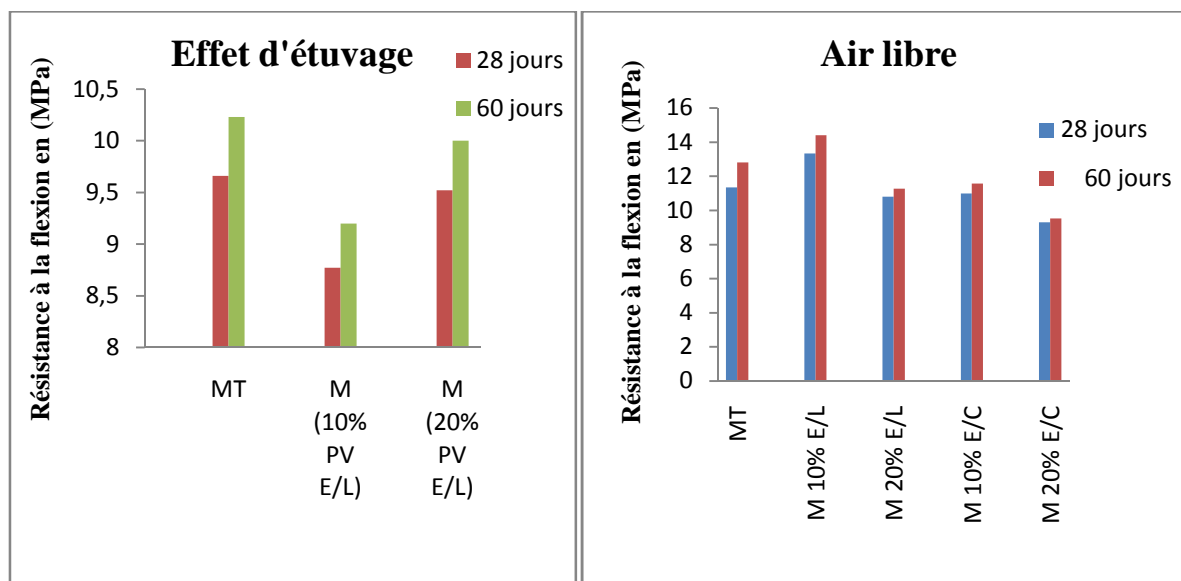


Figure IV.11. La résistance à la flexion des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage et l'air libre.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.4.2.3. La résistance à la compression :

Les résultats de la résistance mécanique à la compression de l'effet d'étuvage et l'air libre des différents types des mortiers sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.11. La résistance à la compression des différents types des mortiers de l'étuvage.

Caractéristiques	Résistance mécanique en (MPa)		
	résistance à la compression		
	2 jours	28 jours	60 jours
Age			
MT	35.5	50.5	50.83
M 10% E/L	50.0	51.6	53.4
M 20% E/L	51	55.45	58.45

Tableau IV.12. La résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers conservés à l'air libre.

Caractéristiques	Résistance mécanique en (MPa)	
	résistance à la compression	
	28 jours	60 jours
Age		
MT	74.35	72.33
M 10% E/L	75.55	81.85
M 20% E/L	71.15	78.55
M 10% E/C	45	46.5
M 20% E/C	37	38.9

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur les figures ci-dessous :

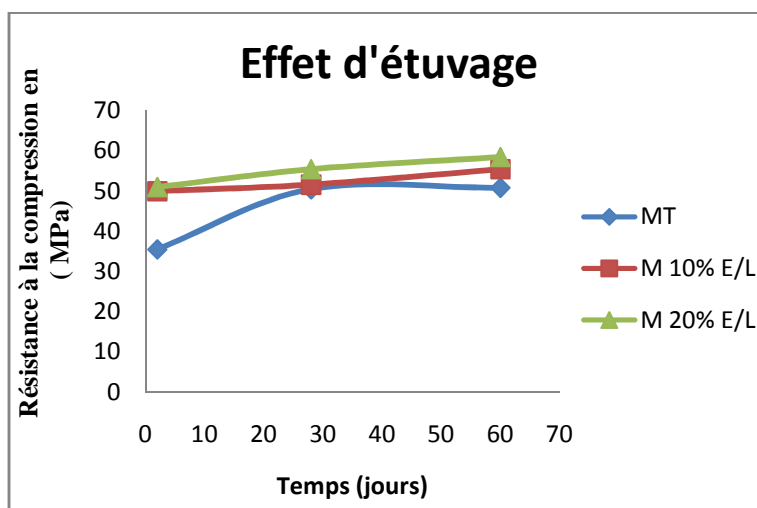


Figure IV.12. La résistance à la compression des différents types des mortiers à l'air libre.

- On remarque une légère augmentation de résistance mécanique à la compression en fonction de temps pour les mortiers avec 10% et 20% E/L de substitution en poudre de verre et une augmentation de résistance considérable pour le mortier témoin de 2 à 28 jours.

Les résultats sont représentés schématiquement sur les histogrammes des figures ci-dessous :

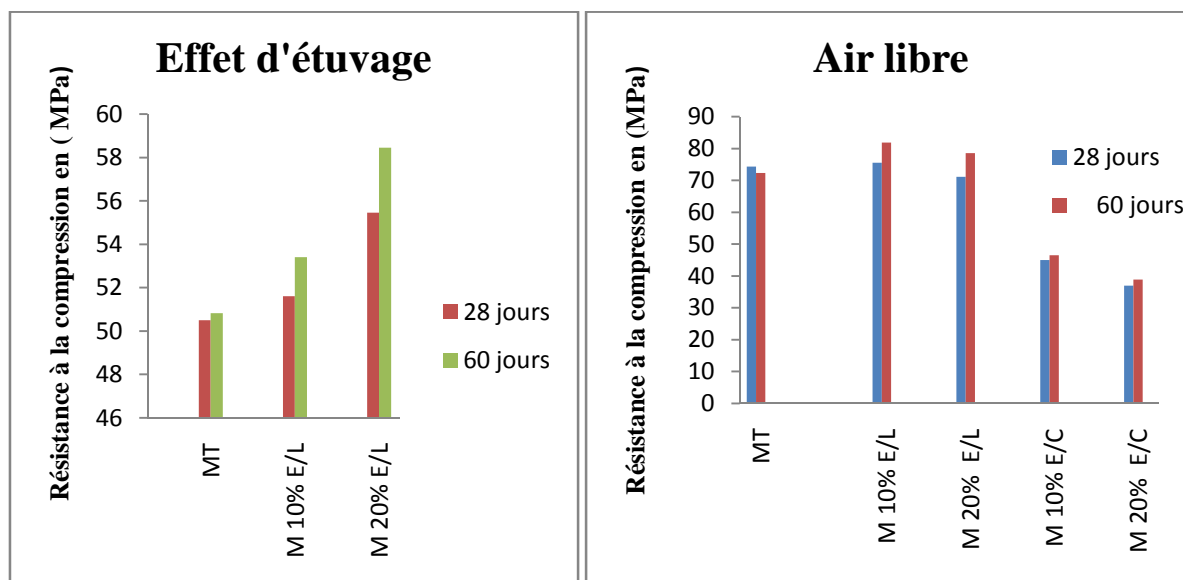


Figure IV.13. Les résistances mécaniques à la compression des différents types des mortiers de l'étuvage et l'air libre.

- Les histogrammes de la figure IV.13, représentent la variation de résistance à la compression des différents types des mortiers de l'effet d'étuvage et l'air libre.

Chapitre IV : Résultats et discussion

- Pour les éprouvettes étuvées on remarque une amélioration de la résistance mécanique pour les additions 10 et 20% de la poudre de verre. Pour une teneur de 20%, la résistance atteint une valeur maximale ce qui peut s'expliquer par le rôle de la poudre qui comble les interstices granulaires et rend le mélange plus compact ; donc la poudre de verre a un bon comportement vis-à-vis de la température.
- En ce qui concerne les éprouvettes conservées à l'air libre, on remarque qu'avec la substitution de la masse de ciment avec la poudre de verre, la résistance mécanique augmente par rapport au mortier témoin pour le dosage E/L, et diminue avec les substitutions (10% et 20%) E/C.
- Cette différence en résistance entre les deux dosages peut être justifiée par la diminution des quantités d'eau et d'adjuvant pour le dosage E/C qui a rendu notre mortier moins compact.

IV.5. Les Résultats de la durabilité chimique :

IV.5.1. L'attaque des éprouvettes par l'acide chlorhydrique (HCl) :

Nous avons utilisé une solution de 05% d'acide chlorhydrique avec un PH= 1.1.



a) à 28 jours.

b) après 60 jours.

Figure IV.14. Les éprouvettes dans la solution Hcl, a) à 28 jours, b) après 60 jours.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.5.1.1. La perte de masse :

Le pourcentage de perte de masse des différents mortiers pendant une durée de 28 jours est donné dans le tableau suivant :

Tableau IV.13. Perte de masse en fonction de temps dans l'acide chlorhydrique (HCl)

Caractéristiques	La perte de masse		
	07 Jours	14 Jours	28 Jours
Age			
MT	0.97	1.13	2.1
M 10% E/L	0.81	1.30	1.9
M 20% E/L	0.66	1	1.67
M 10% E/C	0.32	0.85	1.25
M 20% E/C	0.19	0.35	3.23

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme de courbe sur la figure suivant :

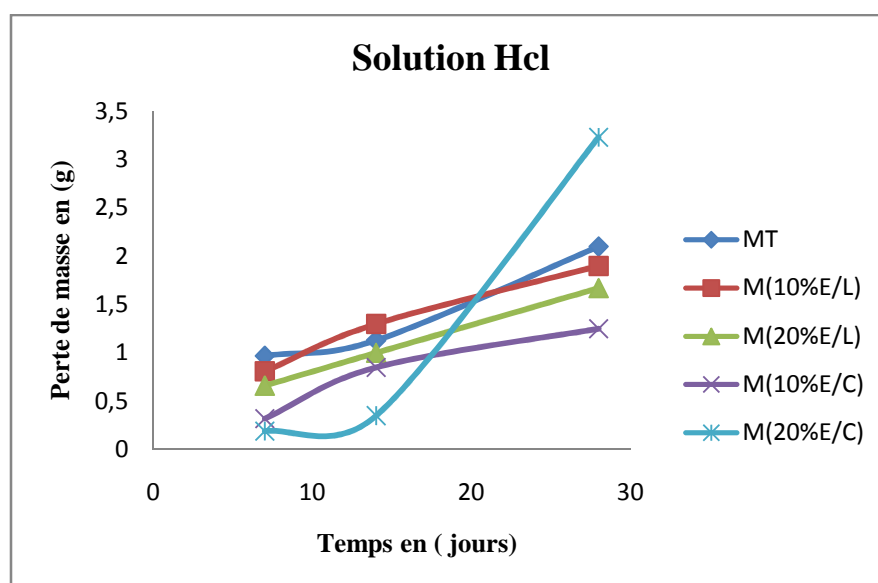


Figure IV.15. La perte de masse des différents types des mortiers dans la solution HCl.

- les graphes de la figure IV.15, représente la perte de masse des différents types des mortiers dans la solution HCl en fonction de temps.
- On remarque que la masse des éprouvettes diminue en fonction du temps après leurs immersion dans l'acide chlorhydrique (HCl) ; après 28 jours les éprouvettes ont subi une perte de masse maximale due à l'attaque par l'acide.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.5.1.2. La résistance à la flexion :

Les résultats de la résistance à la flexion sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.14. La résistance chimique à la flexion des différents types des mortiers dans la solution Hcl.

Caractéristiques	Solution Hcl		
	Résistance chimique en (MPa)		
	résistance à la flexion		
Age	7 jours	14 jours	28 jours
MT	6.07	5.42	8.18
M 10% E/L	4.92	7.3	6.17
M 20% E/L	6.80	5	5.28
M 10% E/C	6.87	6.40	6.32
M 20% E/C	5.64	5.15	4.64

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

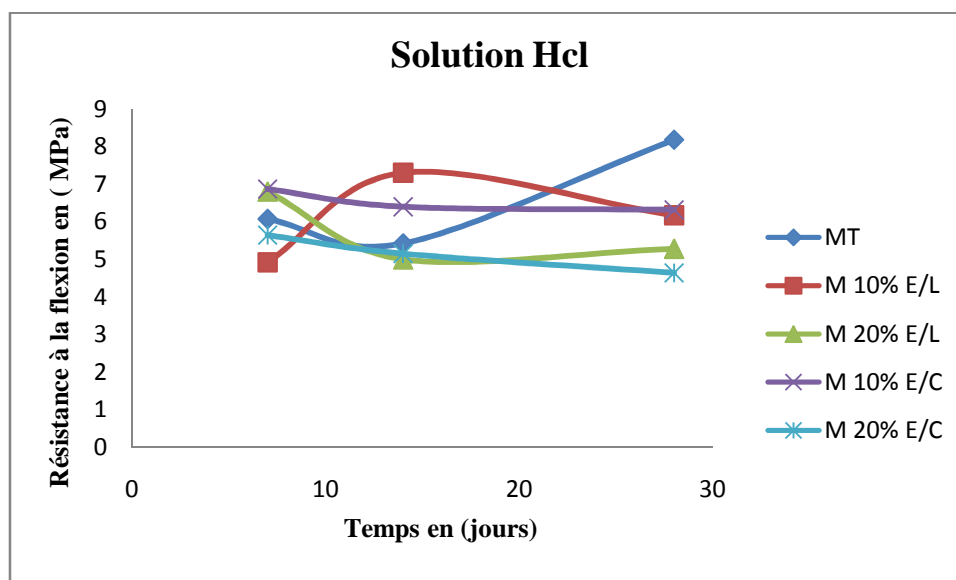


Figure IV.16. Les courbes de résistance chimique à la flexion de solution Hcl

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

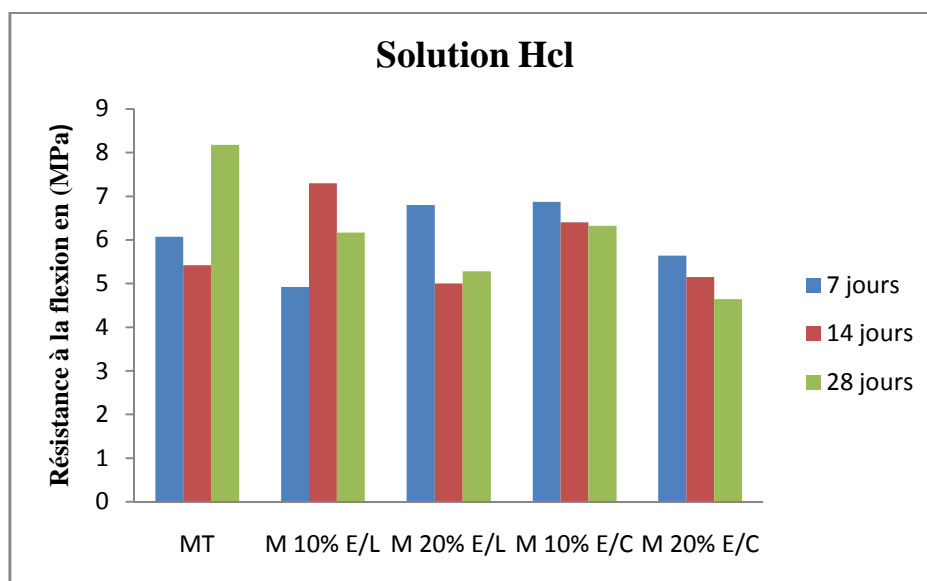


Figure IV.17. La résistance à la flexion des différents types des mortiers dans la solution HCl.

IV.5.1.3. La résistance à la compression :

Les résultats de résistance chimique à la compression des éprouvettes conservés dans la solution HCl sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.15. La résistance à la compression des différents types des mortiers dans la solution HCl.

		<i>Solution Hcl</i>		
		Résistance mécanique en (MPa)		
<i>Caractéristiques</i>		résistance à la compression		
<i>Age</i>		7 jours	14 jours	28 jours
	MT	45.85	60	67.85
	M 10% E/L	72.35	75.85	79.3
	M 20% E/L	54.7	60	69.3
	M 10% E/C	75.65	76	75.3
	M 20% E/C	31.25	25	21.92

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

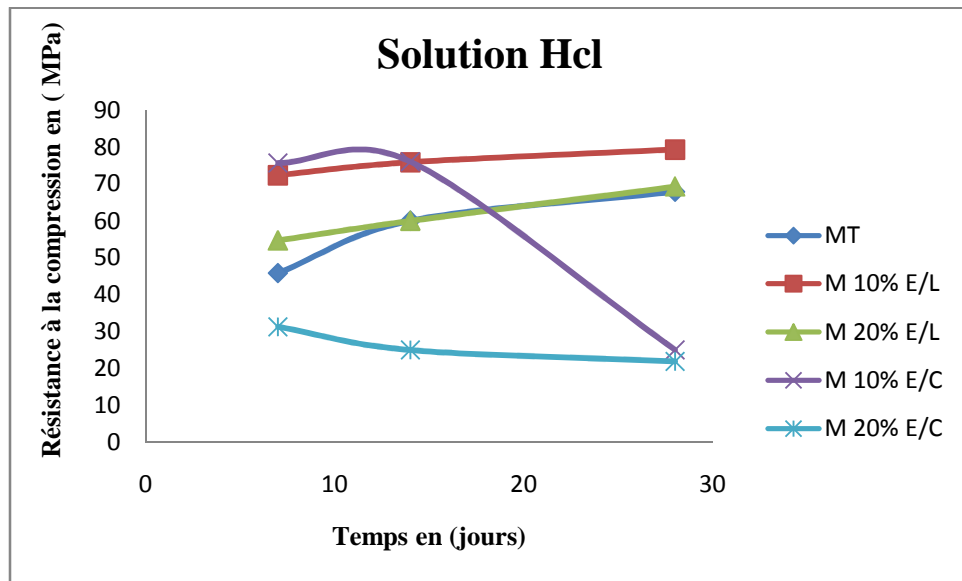


Figure IV.18. Les courbes de résistance chimique à la compression des différents types des mortiers de la solution Hcl.

- Les graphes de la figure IV.18, représentent l'évolution de résistance mécanique des différents mortiers après l'immersion dans la solution Hcl.
- On remarque que la résistance des mortiers (témoin, 10% et 20% E/L) augmente avec le temps, donc l'acide chlorhydrique n'a pas influencé sur les performances mécaniques de notre mortier, cela veut dire que la poudre de verre et le ciment portland réagit positivement dans les milieux acides, et que la résistance à 60 jours a atteint une valeur importante, donc l'effet bénéfique de la poudre de verre apparait à long terme.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

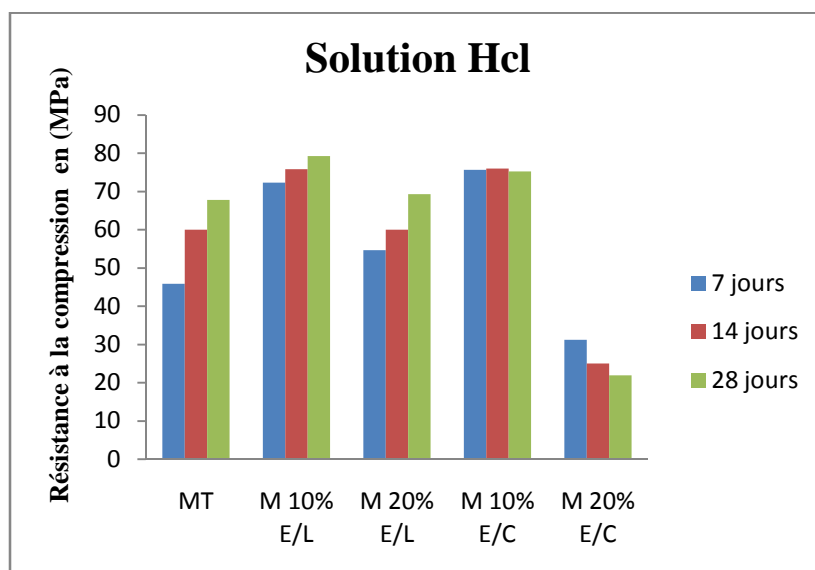


Figure IV.19. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers dans la solution Hcl.

- L'histogramme de la figure IV.19, représente la variation de résistance à la compression en fonction des différents types des mortiers. On remarque que la résistance mécanique du mortier témoin augmente durant les 28 jours de conservation dans l'acide chlorhydrique cela est peut être justifié par le bon comportement du ciment portland dans les milieux acides car elle ne contient pas d'ajouts. La résistance a atteint la plus grande valeur pour les mortiers de 10% de substitution en poudre de verre pour les deux cas (10% et 20%).
- La poudre de verre réagit de la même façon que le ciment portland dans les milieux acides.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.5.2. Attaque des mortiers par les sulfates ($MgSO_4$) :

Nous avons utilisé une solution d'acide sulfatique dilué avec une concentration de 05% et un $PH=5.87$.



a) à 28 jours.

b) après 60 jours

Figure IV.20. Les éprouvettes dans la solution de $MgSO_4$, a) à 28 jours) après 60 jours.

IV.5.2.1. La perte de masse :

Les valeurs proportionnelles de perte de masse des différents mortiers sont représentées dans le tableau qui vient :

Tableau IV.16. Perte de masse en fonction de temps dans l'acide sulfatique.

Caractéristiques	La perte de masse		
	07 Jours	14 Jours	28 Jours
Age MT	0.96	1.77	2.25
M 10% E/L	1.64	2.07	2.89
M 20% E/L	1.14	1.50	2.2
M 10% E/C	0.33	0.69	1.8
M 20% E/C	0.17	1.5	3.55

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

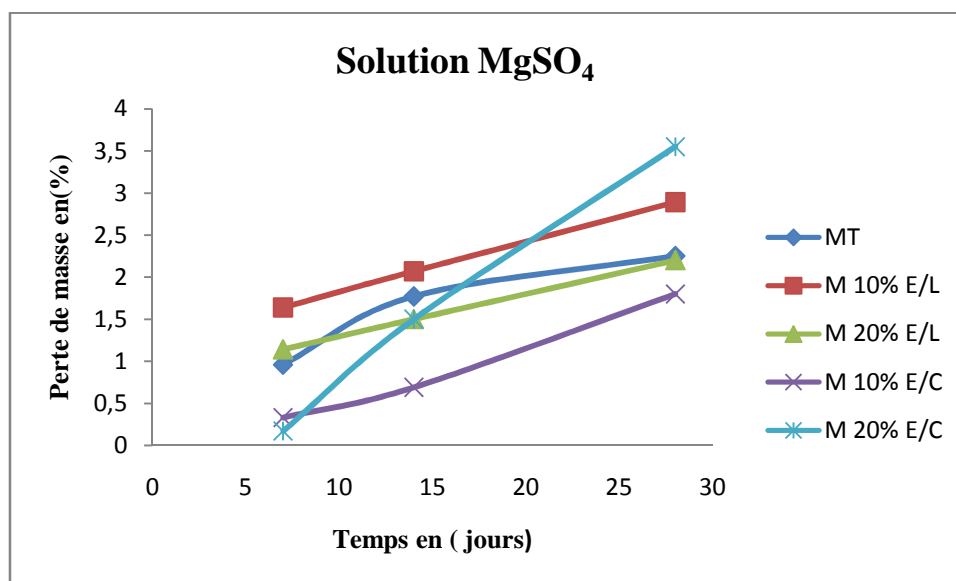


Figure IV.21. La perte de masse des différents types des mortiers de la solution MgSO₄.

- Les graphes de la figure IV.21, représentent la perte de masse en fonction
- On remarque que les mortiers qui ont subit une faible perte de masse sont les mortiers incorporant 10% de poudre de verre pour le dosage E/C et 20% pour le dosage E/L.

IV.5.2.2.La résistance à la flexion :

Tableau IV.17. Les résultats de résistance c à la flexion des différents types des mortiers dans la solution MgSO₄.

		<i>Solution MgSO₄</i>		
<i>Caractéristiques</i>		Résistance chimique en (MPa)		
		résistance à la flexion		
<i>Age</i>		7 jours	14 jours	28 jours
mortier témoin		3.76	8.27	4.69
M 10% E/L		5.02	8.5	5.10
M 20% E/L		6.57	6.30	5.22
M 10% E/C		8.29	8	5.83
M 20% E/C		7.60	7.10	5.68

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

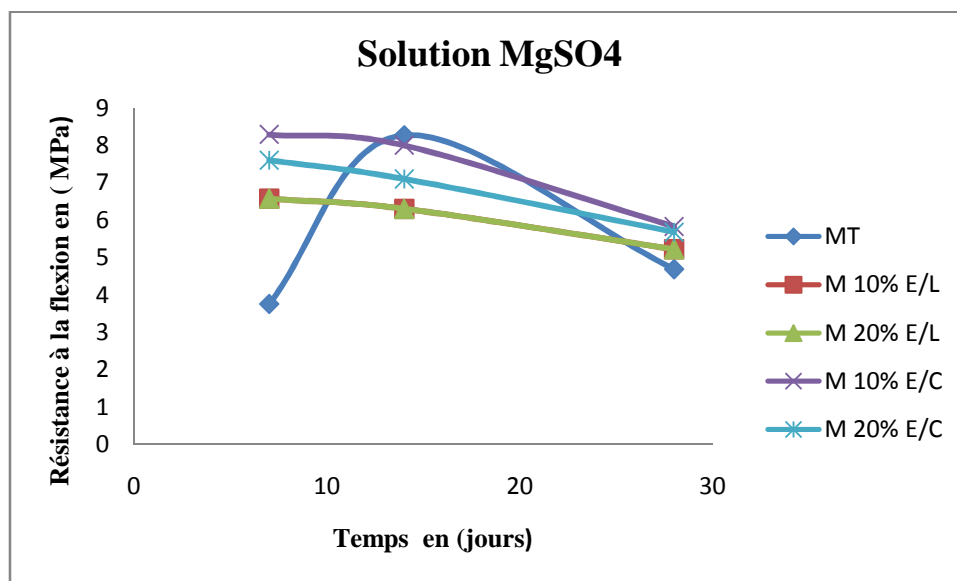


Figure IV.22. Les résultats de résistance chimique à la flexion des différents types des mortiers dans la solution MgSO₄

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

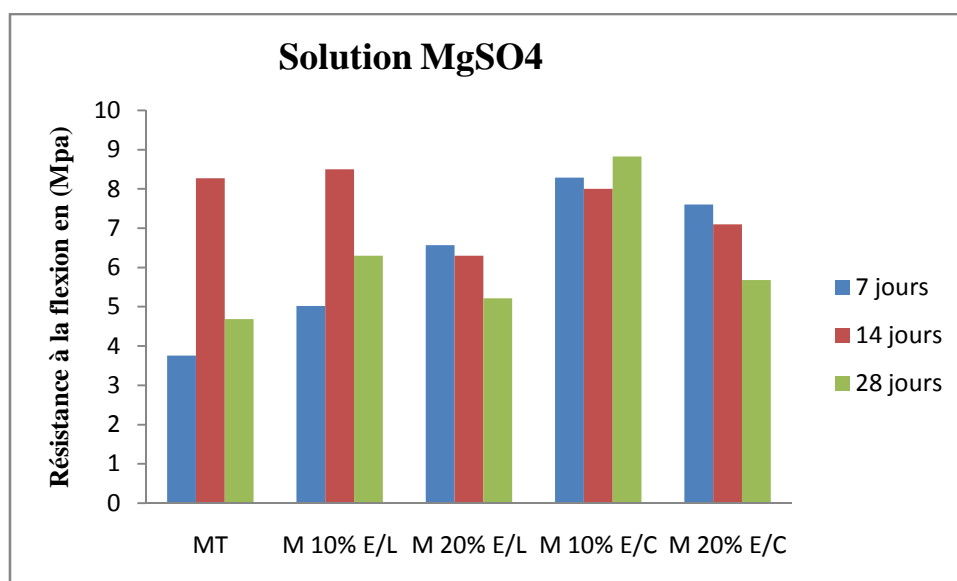


Figure IV.23. Les résultats de résistance chimique à la flexion des différents types des mortiers de la solution MgSO₄.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.5.2.3. La résistance à la compression :

Tableau IV.18. Les résultats de la résistance à la compression des différents types des mortiers dans la solution $MgSO_4$.

<i>Solution $MgSO_4$</i>			
<i>Caractéristiques</i>	Résistance mécanique en (MPa)		
	résistance à la compression		
	7 jours	14 jours	28 jours
Age MT	61.1	77.8	71.45
M 10% E/L	65.7	38.4	71.05
M 20% E/L	57	52	41.4
M 10% E/C	65.3	65.25	69.1
M 20% E/C	28.5	27	24.95

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

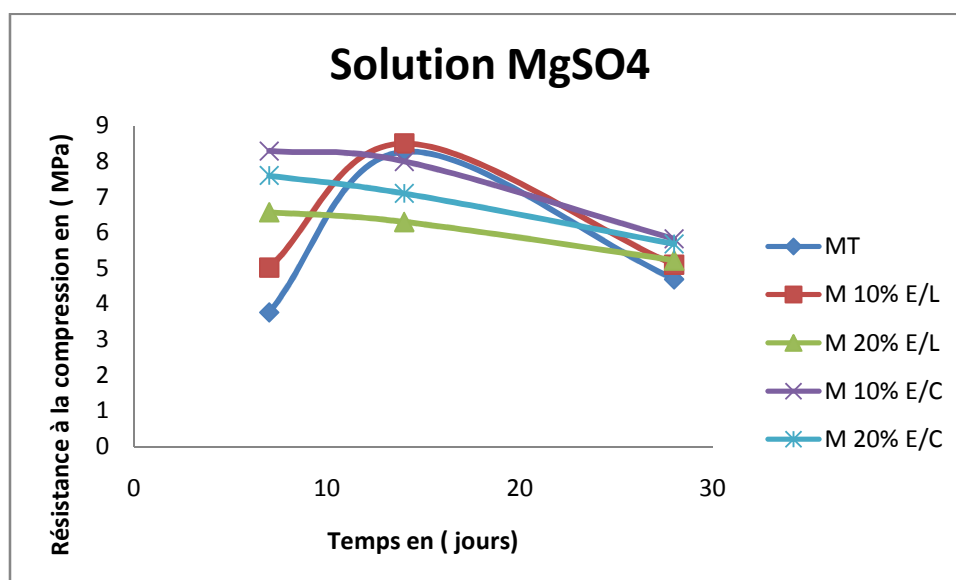


Figure IV.24. Les résultats de résistance chimique à la compression des différents types des mortiers dans la solution $MgSO_4$

- Les graphes de la figure IV.24, représentent l'évolution de résistance mécanique en fonction de temps.

Chapitre IV : Résultats et discussion

- La résistance chimique des mortiers (témoin et 10%E/L) augmente après 7 jours de l'immersion, puis diminue de 7 à 28 jours, cela peut être dû au PH de la solution qui a augmenté après l'immersion des mortiers ; le milieu est devenu basique, après 7 jours de l'immersion on a ajusté le PH à 6 cela peut justifier la diminution de la résistance, tandis que la résistance des autres mortiers (20%E/C, 10%E/C et 20%E/C) diminue juste après l'immersion et continue à décroître jusqu'à 28 jours.

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

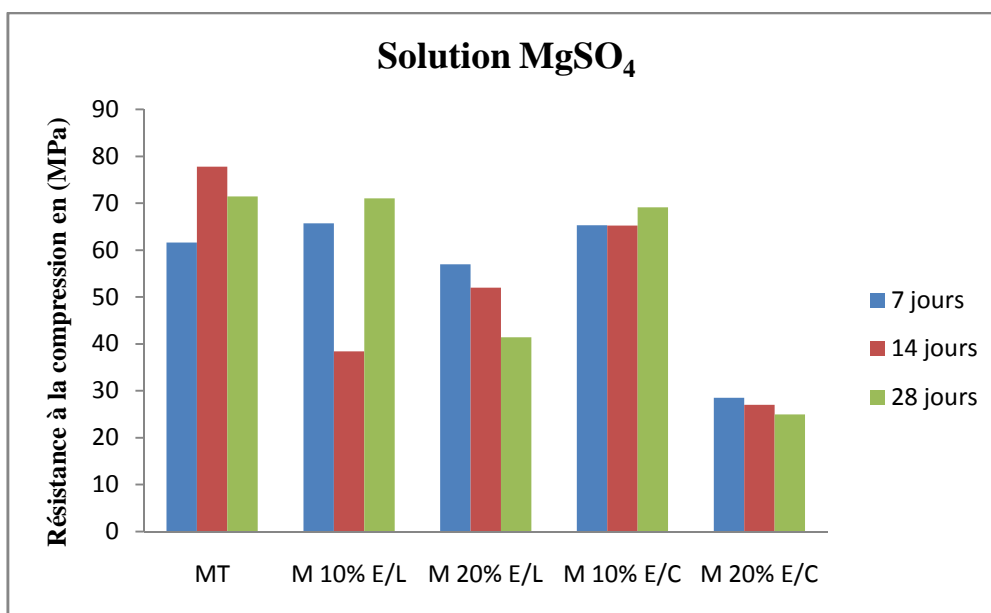


Figure IV.25. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers de la solution MgSO₄.

- L'histogramme de la figure IV.25, représente la résistance chimique des différents mortiers en fonction de leurs pourcentages de la poudre de verre. On remarque que la résistance la plus élevée correspond aux mortiers (témoin, 10% E/L, 10% E/C), cela peut être dû à l'effet du ciment portland et à la poudre de verre qui résistent aux attaques sulfatiques. Et on a obtenu de mauvais résultats avec 20% de substitution pour les deux dosages. Donc 10% de substitution reste le pourcentage le plus favorable pour les mortiers destinés aux milieux sulfatiques.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.5.3. Attaque des mortiers par l'eau de mer :

Nous avons immergé les éprouvettes dans l'eau de mer et on a calculé la perte de masse à 7, 14 et 28 jours.



a) à 28 jours.

b) après 60 jours.

Figure IV.26. Les éprouvettes dans l'eau de mer.

IV.5.3.1. La perte de masse :

Les résultats des deux dosages E/L et E/C sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.19. Perte de masse des éprouvettes dans l'eau de mer.

Caractéristiques	La perte de masse en (%)		
	07 Jours	14 Jours	28 Jours
Age			
MT	2.95	3.22	3.89
M 10% E/L	0.32	0.96	1.95
M 20% E/L	0.16	0.45	2
M 10% E/C	1	1.25	2.25
M 20% E/C	0.19	0.63	3.41

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

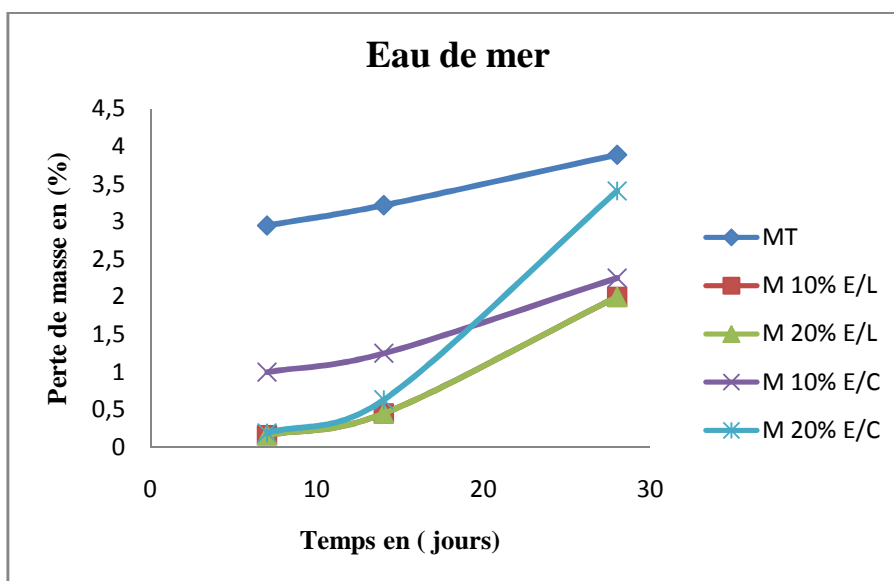


Figure IV.27. La perte de masse des différents mortiers dans l'eau de mer.

- Les graphes de la figure IV.27, représentent la perte de masse en fonction de temps dans l'eau de mer.
- On remarque que le mortier témoin subit une grande perte de masse par rapport aux autres mortiers.

IV.5.3.2. La résistance à la flexion :

Tableau IV.20. Les résultats de résistance à la flexion des différents types des mortiers des deux dosages E/L et E/C dans l'eau de mer.

<i>L'eau de mer</i>			
Résistance chimique en (MPa)			
résistance à la flexion			
Age	7 jours	14 jours	28 jours
MT	6.25	7.78	5.40
M 10% E/L	7.30	10.5	6.59
M 20% E/L	5.35	6.80	6.14
M 10% E/C	7.75	7.90	6.78
M 20% E/C	5.66	5.70	4.17

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

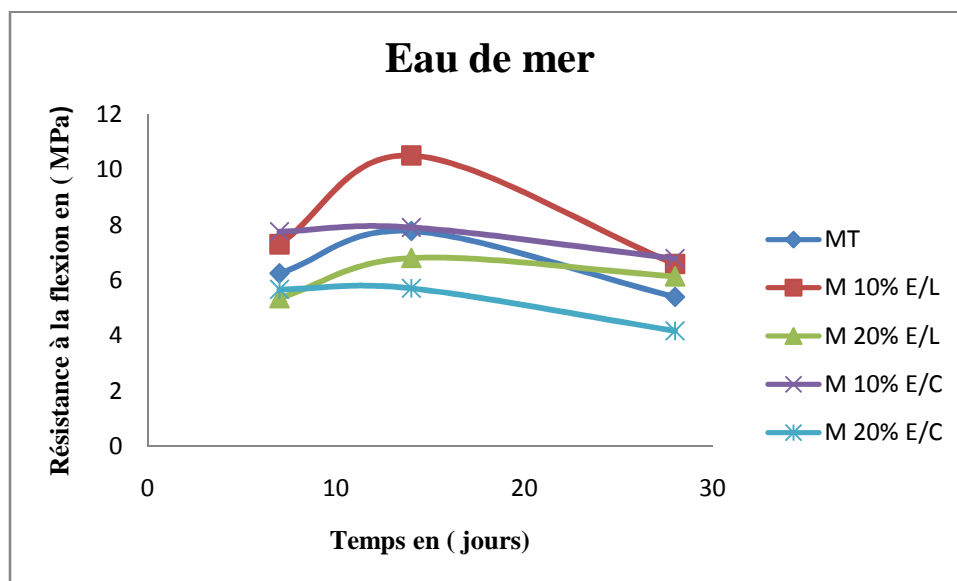


Figure IV.28. Les courbes de résistance à la flexion des différents types des mortiers dans l'eau de mer.

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

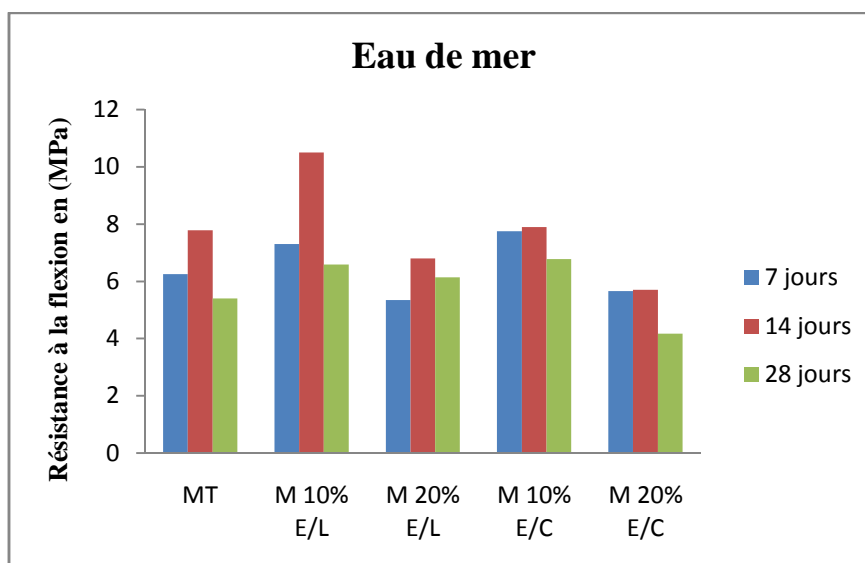


Figure IV.29. Les résultats de résistance à la flexion des différents types des mortiers de l'eau de mer.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.5.3.3. La résistance à la compression :

Tableau IV.21. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers dans l'eau de mer.

<i>L'eau de mer</i>			
<i>Caractéristiques</i>	Résistance chimique en (MPa)		
	résistance à la compression		
	7 jours	14 jours	28 jours
<i>Age</i>			
MT	91.3	55.75	79.4
M 10% E/L	70.8	62.8	84.1
M 20% E/L	67.85	50	51.4
M 10% E/C	46.6	45	71
M 20% E/C	26.8	20	10.97

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

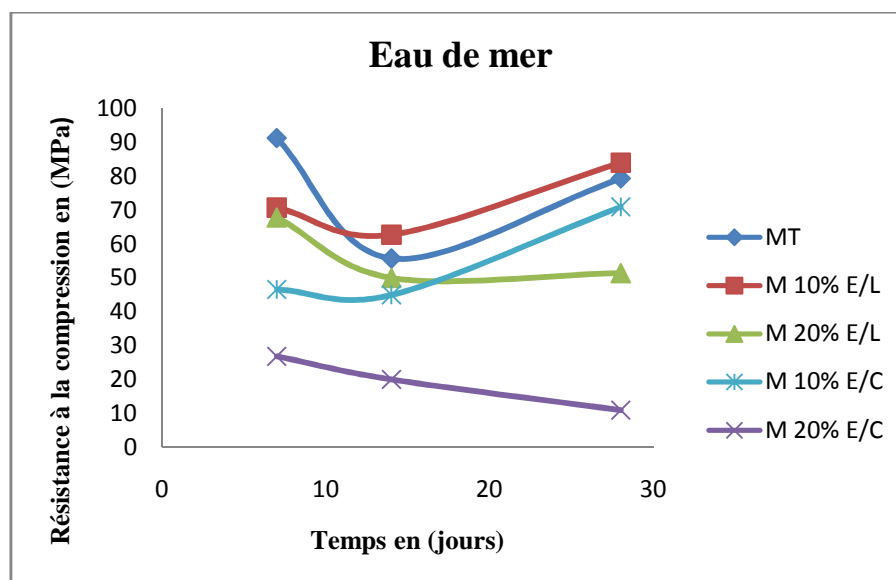


Figure IV.30. Les courbes de résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers dans l'eau de mer.

- La résistance mécanique des mortiers (témoin, 10% E/C et 10% E/L) immergés dans l'eau de mer diminue après 7 jours de l'immersion dans l'eau de mer puis, augmente

Chapitre IV : Résultats et discussion

pour atteindre sa valeur initiale à 28 jours. mais la résistance des autres mortiers avec 20% de substitution en poudre de verre décroît le long des 28 jours de l'immersion.

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

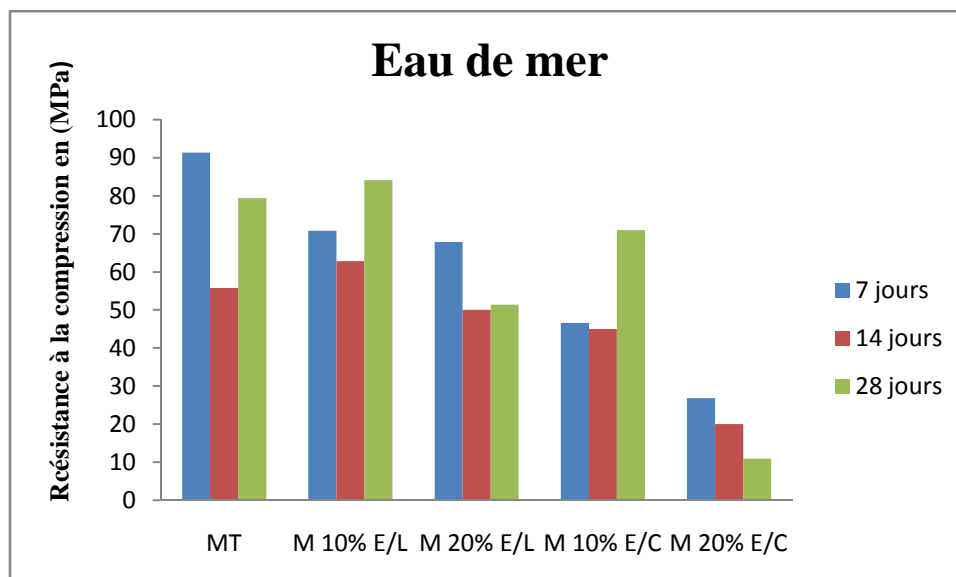


Figure IV.31. Les résultats de résistance à la compression des différents types des mortiers de l'eau de mer.

- L'histogramme de la figure IV.31, représente la variation de résistance mécanique à la compression en fonction des différents types des mortiers dans l'eau de mer.
- On remarque que la résistance chimique de mortier augmente en incorporant 10% de poudre de verre comme substitution de poids de ciment, puis chute avec l'incorporation de 20% de poudre de verre pour le mortier confectionné avec un rapport E/L donc on peut dire que le mortier avec 10% de substitution en poudre de verre développe une meilleure résistance. Cela s'explique par le déclenchement de la réaction pouzzolanique, l'effet de remplissage et densification de la matrice cimentaire a aussi apporté un gain de résistance, en utilisant le verre de bouteilles qui contient des éléments qui stop la réaction alcali-silice comme le lithium et l'oxyde de fer.
- Pour le mortier confectionné un rapport E/C, on a noté pour le mortier avec 20% de poudre de verre une faible résistance mécanique par rapport aux autres mortiers, donc le dosage recommandé en poudre de verre pour les constructions aux milieux marins est 10%.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.6. Evolution ou diminution en volume :

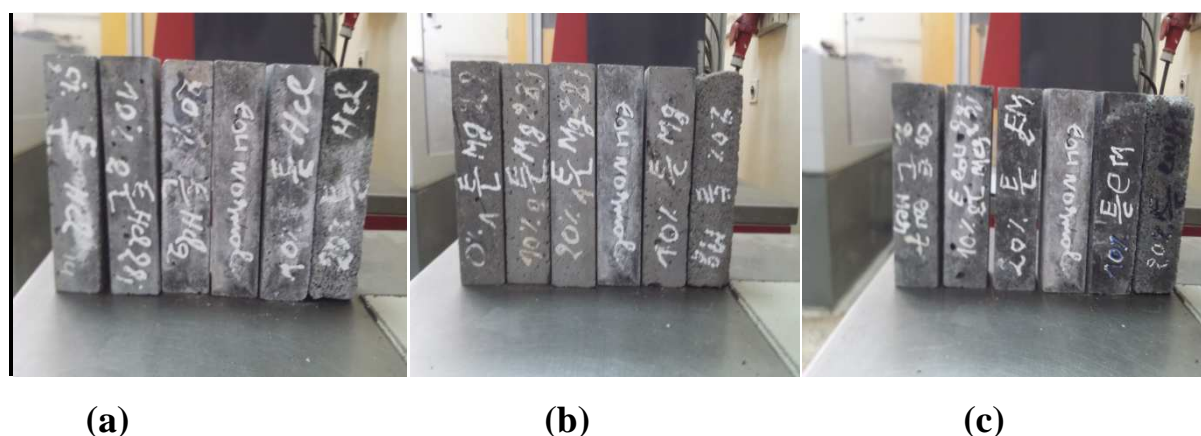


Figure IV.32. L'évolution et diminution de volume des différents milieux (a) Hcl, (b) MgSO₄, (c) Eau de mer.

Les résultats de l'évolution de volume des éprouvettes conservés dans les différents milieux sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.22. Les résultats de l'évolution en volume des différents milieux.

Evolution ou diminution en volume (cm ³)				
<i>Les différents milieux</i>				
Age	Eau de robinet	Hcl	MgSO ₄	Eau de mer
MT	256	237.12	256	243.36
M 10% E/L	256	256	229.596	237.12
M 20% E/L	256	216.14	229.596	243.2
M 10% E/C	256	223.82	230.88	235.32
M 20% E/C	256	210.14	198.135	228.152

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont présentés schématiquement sur l'histogramme sur la figure ci- dessous :

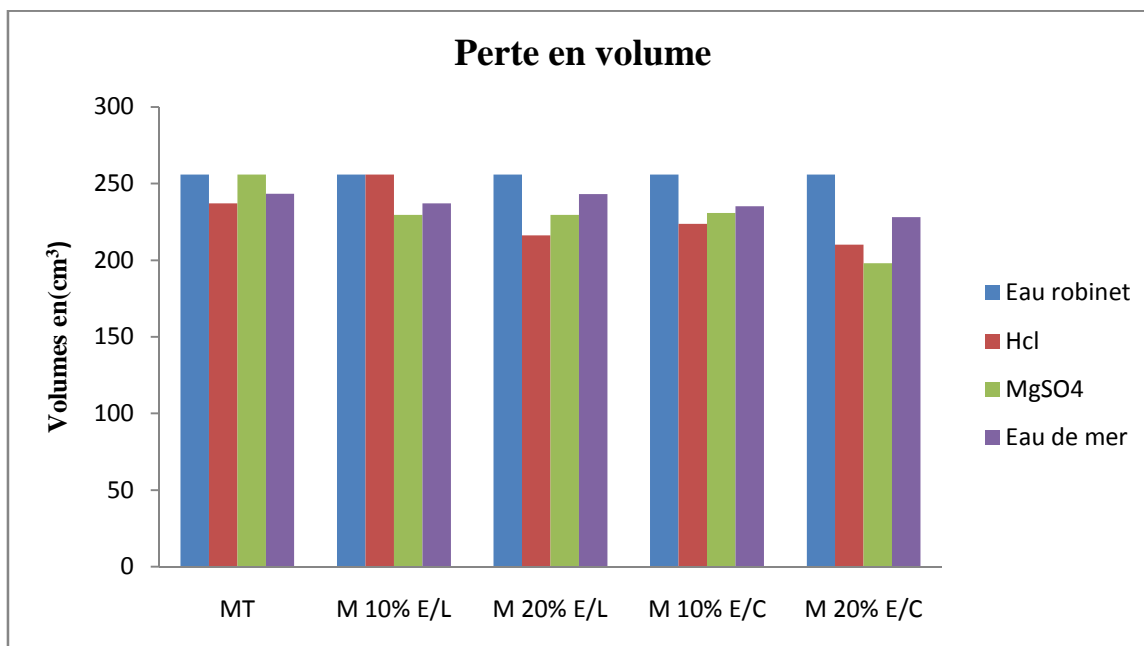


Figure IV.33. Perte en volume des éprouvettes conservées dans les différents milieux a 60 Jours

- L'histogramme de la figure IV.33, représente la perte en volume des différents types des mortiers dans les différents milieux.
- On remarque que le volume subit une diminution pour les éprouvettes immergés dans les différents solutions (Hcl, MgSO₄ et l'eau de mer) par rapport aux l'éprouvettes conservées dans l'eau de robinet à cause des attaques chimiques des différentes solutions subites par ces éprouvettes.

IV.7.La Profondeur de dégradation :



Figure IV.34. Mesure la profondeur de dégradation.

- Exemples de calcul de profondeur :
- Pour Hcl

$$D = \frac{A1 + A2 + A3 + A4}{4}$$

Chapitre IV : Résultats et discussion

$$D1 = \frac{0.3+0.1+0.3+0.3}{4} = 0.25 \text{ cm}$$

•

- Pour MgSO_4 :

$$D2 = \frac{0.2+0.2+0.1+0.2}{4} = 0.175 \text{ cm}$$

- Pour l'eau de mer :

$$D3 = \frac{0.2+0.2+0.1+0.2}{4} = 0.175 \text{ cm}$$

Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.23. Les résultats de mesure de profondeur de dégradation des différents types des mortiers.

Caractéristiques	Profondeur de dégradation (mm)		
Age	Hcl	MgSO ₄	Eau de mer
MT	2.5	1.75	1.75
M 10% E/L	3.25	2.5	3.5
M 20% E/L	2.25	3	2.5

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

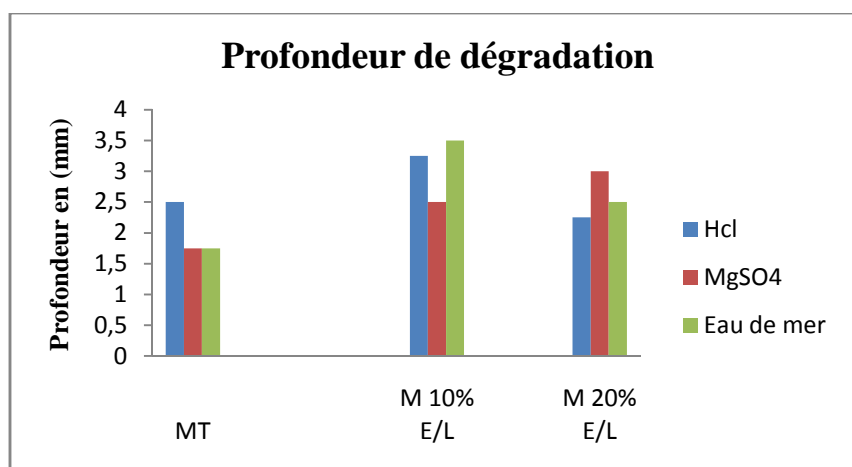


Figure IV.35. Mesure de la profondeur de dégradation.

Chapitre IV : Résultats et discussion

- L'histogramme de la figure IV.35, représente la profondeur de dégradation en fonction des différents types des mortiers dans les différents milieux.
- On remarque que le mortier témoin a subit la plus faible profondeur de dégradation par rapport aux mortiers avec 10% et 20% poudre de verre, le mortier avec 10% en poudre de verre à eu une grande profondeur de dégradation après l'immersion dans les milieux chimiques et que les éprouvettes conservées dans l'eau de mer subit la plus grand dégradation par rapport aux autres milieux (Hcl et MgSO₄) pour 10% de substitution de poudre de verre.

IV.8.La résistance mécanique à la compression des différents types des mortiers des différents milieux :

Le tableau IV. Résume toutes les résistances à la compression des différents milieux des rapports E/L et E/C à 60 jours.

Tableau IV.24. La résistance à la compression des différents milieux des deux dosages E/L et E/C à 60 jours.

La Résistance à la compression à 60 jours						
<i>Les différents milieux</i>						
<i>Mortier</i>	Eau de robinet	Air libre	Etuvage	Hcl	MgSO ₄	Eau de mer
MT	81.85	72.33	50.83	79.3	71.45	79.4
M 10% E/L	72.33	81.85	53.4	69.3	71.05	84.1
M 20% E/L	78.55	78.55	58.45	75.3	41.4	51.4
M 10% E/C	58.88	46.5	/	75.3	69.1	71
M 20% E/C	28.4	38.9	/	21.92	24.95	10.97

Chapitre IV : Résultats et discussion

Les résultats sont présentés schématiquement sur l'histogramme ci-dessous :

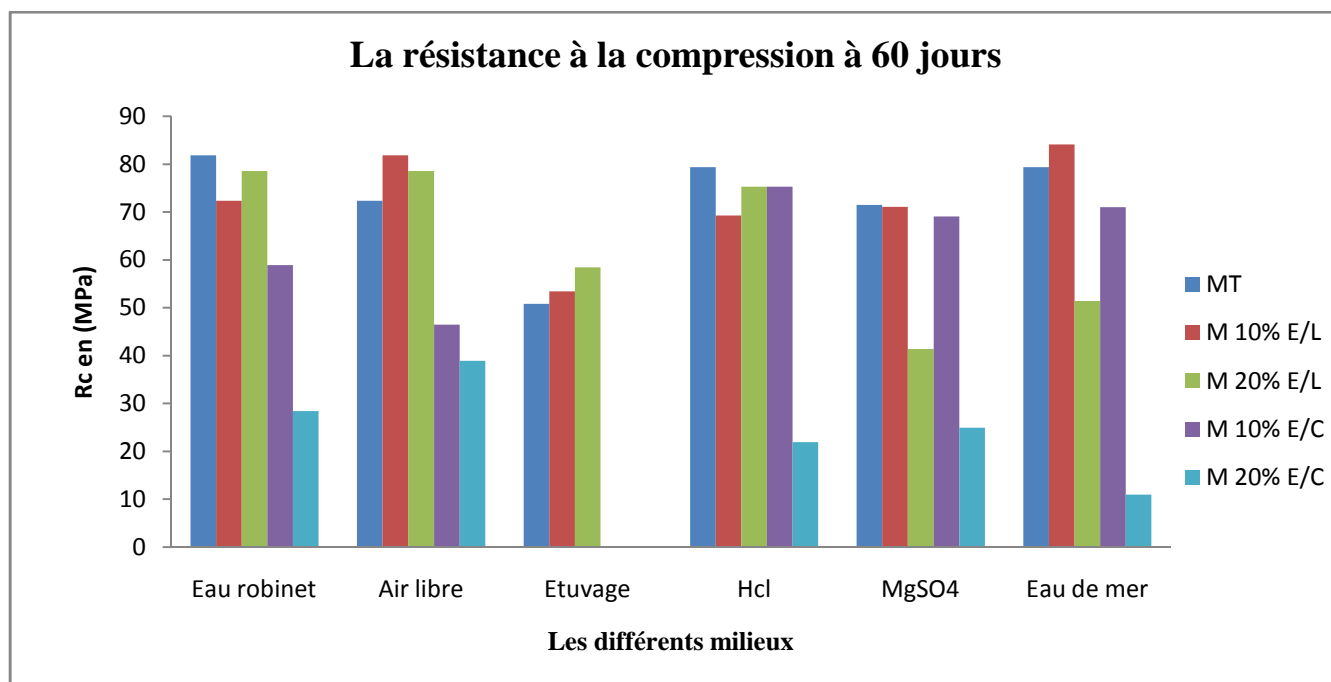


Figure IV.36. La résistance à la compression des différents milieux à 60 jours.

- Les histogrammes de la figure IV.36, représentent la résistance à la compression des différents mortiers à 60 jours.
- On remarque que les mortiers (témoin, 10%E/L 20% E/L) conservés à l'air libre et à l'eau de robinet ont atteint une résistance supérieure à 75MPa, tandis que les mortiers confectionnés avec le dosage E /C ont une faible résistance par rapport aux mortiers cités précédemment.
- Pour les échantillons (témoin 10%E/L) conservés dans les solutions (HCl, MgSO₄ et eau de mer) ont subi une diminution négligeable en résistance où le mortier (10% E/C) conservé dans l'eau de mer a connu une amélioration de résistance après 28 jours de l'immersion.
- Les éprouvettes étuvées et (10% E/C, 20%E/C) conservées dans les milieux chimiques ont connu une chute de résistance mécanique.
- D'après ces résultats, on peut déduire que :
- Le ciment portland et la poudre de verre ont un bon comportement dans les différents milieux de conservation avec des pourcentages de substitution en poudre de verre et des quantités d'eau et d'adjuvant bien définis.

Chapitre IV : Résultats et discussion

- Dans l'eau de mer, le ciment portland et la poudre de verre ont un bon comportement et une bonne résistance à la compression donc ils sont recommandés pour la construction en milieux marins.
- Le pourcentage en poudre de verre les plus favorables pour les milieux sulfatiques, acides et marins est 10% comme substitution de la masse du ciment portland.

IV.9.Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de comparer l'effet de l'incorporation de la poudre de verre en fixant la quantité d'eau et d'adjuvant puis on varie ces derniers. Ainsi que l'étude de la durabilité des mortiers en l'immergeant dans des différents milieux chimiques.

Les conclusions qui peuvent être tirées sont :

- ✓ L'incorporation de la poudre de verre améliore la résistance mécanique de notre mortier en fixant la quantité d'eau et d'adjuvant mais diminue quand on varie la quantité d'eau et de l'adjuvant (formulation avec dosage E/C).
- ✓ La résistance des mortiers après l'immersion dans HCl, $MgSO_4$ atteint son maximum pour les pourcentages 10% (E/C et E/L). donc Le taux d'ajout efficace pour améliorer les résistances mécanique est de 10% par rapport au poids du ciment,

Conclusion générale :

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, il fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects.

Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton.

L'objectif de notre travail concerne l'utilisation de la poudre de verre finement broyée comme ajout cimentaire pour formuler un mortier.

L'étude s'est articulée autour des axes suivants :

- Etude de l'influence de la poudre de verre sur le mortier élaboré.
- Caractérisation du mortier à travers des essais mécaniques.
- Etude de la durabilité de ces mortiers et leur comportement dans des différents milieux agressifs.

Étapes de formulation de notre mortier :

1. En a fixé le rapport E/L à 0.35 (L= ciment + poudre de verre) , puis avec un rapport E/C= 0.35 en changeant la quantité d'eau et d'adjuvant.
2. la teneur en adjuvant est de 2% par rapport à la masse du liant (ciment portland + poudre de verre) pour le dosage E/L. et 2% de la masse du ciment pour le dosage de E/C.
3. Sable de carrière (0-4mm).
4. Poudre de verre avec une finesse de $3600\text{cm}^2/\text{g}$.
5. Teneur de la poudre de verre 10% et 20% du poids de ciment (substitution).
6. On a fait l'étuvage pour les éprouvettes confectionnées avec le rapport E/L pour tous les pourcentages de substitution en poudre de verre. Et on a laissé des éprouvettes à l'air libre pour faire des écrasements à 28 et à 60 jours pour tous les cas de substitution en poudre de verre et pour le mortier témoin.
7. On a fait des écrasements à 7 à 14 à 28 et à 60 jours.

Après 28 jours de confection des éprouvettes on a immergé quelques éprouvettes dans des milieux chimiques (HCl, MgSO_4 et eau de mer) pour faire des écrasements à 7, à 14 et à 28 jours après l'immersion.

Les résultats obtenus au cours de ce travail mènent aux conclusions suivantes

CONCLUSION GENERALE

Evolution et dégradation de la masse :

Les masses des éprouvettes conservées dans l'eau de mer augmentent en augmentant le pourcentage de la poudre de verre pour le dosage E/L, et diminuent en augmentant le pourcentage de la poudre de verre pour le dosage E/C.

Pour les mortiers conservés dans les milieux chimiques :

- On remarque que le mortier témoin a subi la plus faible profondeur de dégradation par rapport aux mortiers avec 10% et 20% de poudre de verre, le mortier avec 10% en poudre de verre a eu une grande profondeur de dégradation après l'immersion dans les milieux chimiques et que les éprouvettes conservées dans l'eau de mer subit la plus grande dégradation par rapport aux autres milieux (HCl et MgSO₄) pour 10% de substitution de poudre de verre.
- Pour les mortiers confectionnés avec le rapport E/L on a noté une résistance élevée pour 20% de substitution en poudre de verre à 28 jours.
- On a eu de mauvais résultats pour les mortiers confectionnés avec le rapport E/C.
- La meilleure résistance mécanique est notée pour le mortier témoin conservé à l'air libre et pour le mortier avec 20%(E/L) de substitution en poudre de verre.

Les résultats des autres mortiers restent favorables sauf pour le mortier avec 20% de substitution en poudre de verre pour le rapport E/C qui a eu une résistance faible.

La durabilité chimique :

Les mortiers (témoin, 10%E/L 20% E/L) conservés à l'air libre et à l'eau de robinet ont atteint une résistance supérieure à 75MPa, tandis que les mortiers confectionnés avec le rapport E /C ont une faible résistance par rapport aux mortiers cités précédemment.

- Pour les échantillons (témoin 10%E/L) conservés dans les solutions (HCl, MgSO₄ et eau de mer) ont subi une diminution négligeable en résistance où le mortier (10% E/C) conservé dans l'eau de mer a connu une amélioration de résistance après 28 jours de l'immersion.
- Les éprouvettes étuvées et (10% E/C, 20%E/C) conservées dans les milieux chimiques ont connu une chute de résistance mécanique.
- D'après ces résultats, on peut déduire que :
- Le ciment portland et la poudre de verre ont un bon comportement dans les différents milieux de conservation avec des pourcentages de substitution en poudre de verre et des quantités d'eau et d'adjuvant bien définis.
- Dans l'eau de mer, le ciment portland et la poudre de verre ont un bon comportement et une bonne résistance à la compression donc ils sont recommandés pour la construction en milieux marins.
- Le pourcentage en poudre de verre les plus favorables pour les milieux sulfatiques, acides et marins est 10% comme substitution de la masse du ciment portland. La valorisation du verre

CONCLUSION GENERALE

dans la fabrication des bétons engendre un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique si le verre est utilisé sous forme de poudre fine.

La valorisation du verre dans le béton se présente comme une issue importante dans la préservation de l'environnement. En effet, en substituant jusqu'à 20% du poids de ciment, on diminue considérablement le taux de CO₂ dégagé dans l'air par les cimenteries.

Références bibliographiques

- [1]. NICOT PIERRE « Interaction mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier » thèse de doctorat, université de Toulouse III, le 7 octobre 2008.
- [2]. MARYAM SARGOLZAHY « optimisation du verre mixte dans le béton de qualité » université de Sherbrooke, juillet 2015.
- [3]. SIDI MOHAMED ELAMINE BOUKLI HACENE « contribution à l'étude caractéristique des bétons de la région de Tlemcen » thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2009.
- [4] ZEGHICHI. L, MEZGHICHE. B, BENGHAZI. Z « contributions à l'étude de ciment blanc et composé » Communication Science & Technologie, Janvier 2012.
- [5]. BOUHNIK BRAHIM « contribution à la valorisation du sable de dune dans la formulation du béton destiné aux ouvrages hydrauliques an milieux sahariens » mémoire de magister, université de Ouargla le 14 février 2007.
- [6]. ZEROUB HAMID « valorisation du verre dans l'élaboration du béton durable » thèse de magister, université M'Hamed BOUGARA de BOUMERDES, 2012.
- [7]. FABIEN FROHARD « durabilité des éco-bétons : impact des additions cimentaires alternative sur la corrosion des armatures dans les bétons armés » thèse de doctorat, université paris-est, le 15 décembre 2014.
- [8]. ABLAM ZIDOL « durabilité en milieu agressif des bétons incorporant de la poudre de verre » thèse de doctorat, université de Sherbrooke, décembre 2014.
- [9]. RACHIDA IDIR, 2010 « Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Etude des propriétés des bétons de verre » VOL.16 N°5/6 •
- [10]. RACHIDA IDIR « mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique » thèse de doctorat, l'INSA de TOULOUSE en cotutelle avec l'UNIVERSITE DE SHERBROOKE (CANADA), 10 juillet 2009.
- [11]. GEORGE DREUX, JEANFESTA, nouveau guide de béton et de ses constituants, Edition Eyrolle 1998, pp, 8 :20.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [12]. MOISSON MARC « contribution à la maîtrise de la réaction alcali-silice par ajout de fine de granulats réactifs dans le béton » thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Toulouse, le 28 octobre 2005.
- [13]. SAYED HORKOSS « influence de SO_3 du clinker sur la durabilité des bétons : attaque sulfatique » thèse de doctorat, université Saint JOSEPH de Beyrouth, le 21 juin 2011.
- [14] Rachida IDIR Martin CYR, Arezki TAGNIT-HAMOU, « Potential pozzolanicity of glass cule finesand aggregates » février 2011,page 33.
- [15] ABLAM ZIDOL « optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires » thèse de doctorat, université Sherbrooke, canada, mars 2009.
- [16]. BARKAT ABDERAZZAK « valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton » mémoire de Magister, université de Ouargla, le 5 novembre 2011.
- [17]. BELARIBI OMAR « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de Pouzzolane » thèse de doctorat, université de MOSTAGANEM, université de CERGY-PONTOISE, 2014/ 2015.
- [18]. EMMANUEL ROSIERE « étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle » thèse de doctorat, université de Nantes, école centrale de Nantes, le 29 novembre 2007.
- [19]. BELKACEM TURKIA-SAMAH, BOUKAMOUM WAHIBA « l'étude de l'influence des argiles sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité chimique des mortiers » mémoire de fin d'études, université de Bouira ; 2016.
- [20]. OLFA OUESLATI « durabilité des matériaux cimentaires soumis aux acides organiques » thèse de doctorat, université Laval Québec 2011.
- [21]. cours durabilité des bétons- université de Bouira 2016/2017
- [22]. RACKEL SAN NICOLAS « approche performantielle des bétons avec métakaolin obtenus par calcination flash » thèse de doctorat, université de Toulouse- Paul Sabatier, le 25mai 2011.
- [23]. R.CHAID, R. JAUBERTHIE ET A.BOUKHALED « l'effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons » lebanese science journal, vol. 11 NO.1, 2010.
- [24]. GUANSHU LI « étude du phénomène de l'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfatés » thèse de doctorat, école nationale des ponts et des chaussées, 27 septembre 2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[25]. NF EN 206-1, 2002 « spécification, performance, production et conformité » norme française : P 18-325.

[26]. NF EN 196-1, 1995 « méthodes d'essais des ciments » norme française P 15-471.

[27] NF EN 480-8, 1996 « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis » norme française P18-317.

,

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.



Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

Présentation	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère polycarboxylate-polyacrylate.
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés. ■ Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants. ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).
Caractères généraux	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ■ longue rhéologie (>2h), ■ robustesse à la ségrégation, ■ qualité de parement.
Caractéristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,060 ± 0,020
pH	5,5 ± 1,0
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	29,5% ± 1,4% (méthode halogène selon NF 085) 29,5% ± 1,4% (NF EN 480-8)

Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage de dosage : 0,1 à 5,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Annexe 2

Result Analysis Report

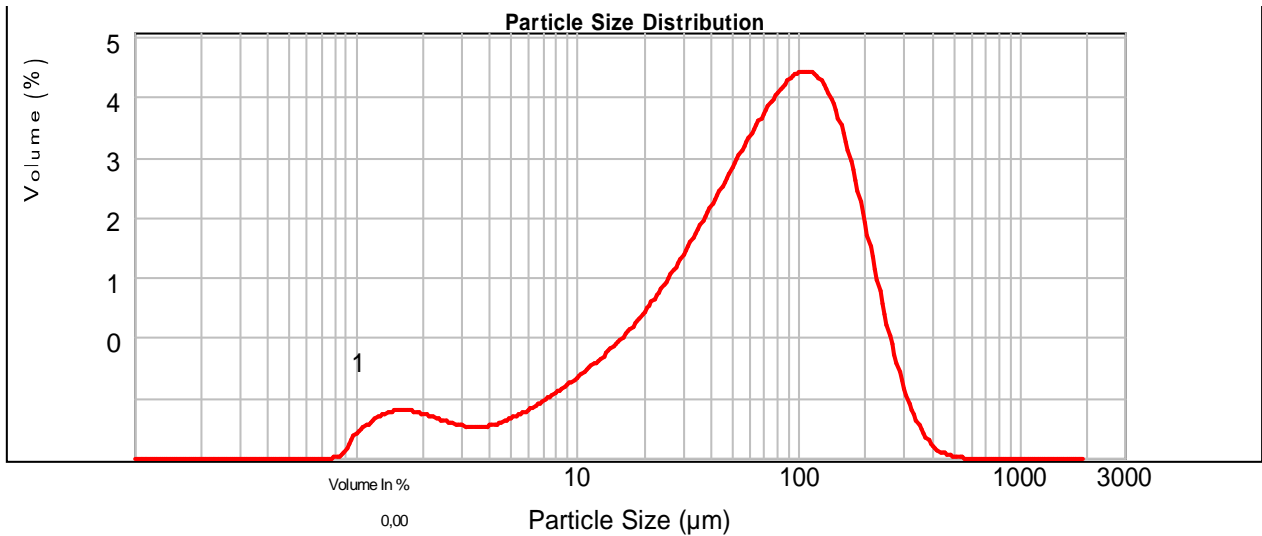
Sample Name: chouaib	SOP Name:	Measured: dimanche 13 mars 2016 13:01:43
Sample Source & type:	Measured by: Immc	Analysed: dimanche 13 mars 2016 13:01:44
Sample bulk lot ref: 13/03/2016	Result Source: Measurement	

Particle Name: DEFAULT	Accessory Name: Scirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1,520	Absorption: 1	Size range: 0,020 to 2000,000 um	Obscuration: 9,30 %
Dispersant Name: Dry dispersion	Dispersant RI: 1,000	Weighted Residual: 2,673 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0,0047 %Vol	Span : 2,666	Uniformity: 0,836	Result units: Volume
--------------------------------------	------------------------	-----------------------------	--------------------------------

Surface Area: 0,36 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 16,675 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 84,322 um
--	---	--

7
6 **um** **d(0.5): 66,153 um** **d(0.9): 185,018 um**



— chouaib, dimanche 13 mars 2016 13:01:43

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0,010	0,00	1,096	0,54	11,482	1,44	120,226	0,00
0,011	0,00	1,259	0,66	13,183	1,62	138,038	5,23
0,013	0,00	1,445	0,71	15,136	1,82	158,489	4,58
0,015	0,00	1,660	0,71	17,378	2,04	181,970	3,72
0,017	0,00	1,905	0,66	19,953	2,29	208,930	2,80
0,020	0,00	2,188	0,59	22,909	2,57	239,883	1,89
0,023	0,00	2,512	0,52	26,303	2,87	275,423	1,14
0,026	0,00	2,884	0,48	30,200	3,20	316,228	0,58
0,030	0,00	3,311	0,46	34,674	3,55	363,078	0,26
0,035	0,00	3,802	0,49	39,811	3,91	416,869	0,08
0,040	0,00	4,365	0,54	45,709	4,27	478,630	0,02
0,046	0,09	5,012	0,63	52,481	4,63	549,541	0,00
0,052	0,39	5,754	0,74	60,256	4,98	630,957	0,00
0,060	0,00	6,607	0,86	69,183	5,30	724,436	0,00
0,069	0,00	7,586	0,99	79,433	5,57	831,764	0,00
0,079	0,00	8,710	1,13	91,201	5,75	954,993	0,00
0,091	0,00	10,000	1,28	104,713	5,80	1096,478	0,00
0,105	0,00	11,482	1,44	120,226	5,80	1258,925	0,00

Operator notes: