

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Mohamed Boudiaf - M'SILA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie-Civil**



**THESE**

Présentée en vue de l'Obtention du Diplôme de  
**Doctorat en Sciences**  
(Spécialité : Génie-Civil – Option : Matériaux)

Présentée par :  
**TEBBAL Nadia**

**THEME**

---

**Effet de la nature des granulats sur les propriétés physico-mécaniques et durabilité d'un béton à haute performance**

---

Soutenue Publiquement le 26 /04 /2017.

Devant le jury :

KHEMISSA Mohamed : Professeur / Université de M'sila / Président de jury

RAHMOUNI Zine-El-Abidine : Professeur /Université de M'sila / Rapporteur

BOUDAUD Zine-Eddine : Professeur / Université d'Oum-El-Bouaghi / Examineur

MESSAOUDENE Ibrahim : Maitre de Conférences A /Université de BBA / Examineur

## Remerciements

*Je voudrais avant tout remercier le tous puissant et le miséricordieux Allah qui ma donner la volonté et le courage de mener à bien et d'achever ce modeste travail .*

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire du Génie Civil de l'Université de M'sila , sous la direction du Professeur RAHMOUNI Zine-El-Abidine qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet. Je lui suis très reconnaissant de l'opportunité qu'il m'a donnée. Ses remarques pertinentes et son esprit de synthèse m'ont permis d'avoir une autre vision sur la problématique. Je le remercie pour l'intérêt et le suivi qu'il a porté à ma thèse.*

*J'estime avoir énormément appris à son contact. Son dévouement et sa rigueur scientifique resteront pour moi des modèles. Je voudrais également saluer ses qualités "humaines" de directeur de thèse, son humour mais aussi sa compréhension et son soutien dans les moments difficiles.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ceux qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail, à savoir Messieurs KHEMISSA Mohamed, Professeur à l'Université de M'sila, pour avoir bien voulu accepter de présider mon jury de soutenance, ainsi que l'intérêt qu'il a porté sur le sujet de cette thèse. Egalement mes remerciements vont à Monsieur BOUDAUD Zine - Eddine, Professeur à l'Université d'Oum-El-Bouaghi et à Monsieur MESSAOUDENE Ibrahim, Maître de Conférences à l'Université de BBA, qui ont accepté de porter un regard critique à ce mémoire en tant que rapporteurs.*

*Mes plus sincères remerciements vont aussi à Monsieur Samar Madjid, Docteur à l'Université de Boumerdès (LMMC ) à Monsieur Lounis, Ingénieur de labo (Université de M'sila ) pour leurs conseils précieux .*

*J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel technique et administratif de L'université de M'sila et celle de Bordj Bou Arreridj pour leur disponibilité, gentillesse et à tous ceux qui ont indirectement participé à l'élaboration de cette thèse pour qu'elle soit terminée dans un climat de convivialité.*

*Enfin, Je réserve le meilleur remerciement à ma famille, qui m'a beaucoup aidé mais surtout qui m'a supporté et soutenu dans les moments difficiles et pour m'avoir permis d'arriver à ce niveau de compétences..*

# Effet de la nature des granulats sur les propriétés physico- mécaniques et durabilité d'un béton à haute performance

## Résumé

L'objectif principal de ce travail est de développer l'effet de la nature des granulats sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton à haute performance. Les bétons sont confectionnés à partir de mélanges comportant des teneurs variables en fumée de silice, poudre de marbre et laitier granulé et un super plastifiant. Les ajouts cimentaires sont introduits en substituant une part de ciment, avec un rapport Eau /Liant constant (0.30) et un affaissement variant dans l'intervalle (7 et 14 cm). Les BHP testés sont soumis à des milieux agressifs variables (eau sulfatée, solution NaCl et solution de  $MgSO_4$ ). Dans cette investigation, deux sables ont été utilisés: un sable de dune (SD) et un sable concassé (SC) avec des proportions différentes. Les effets de la distribution de la qualité et la taille des grains de granulats fins naturels sur les propriétés physiques du sable binaire (module de finesse, densités absolue et apparente, de la porosité, la distribution de taille des particules et l'absorption d'eau) sont étudiées. Les propriétés des bétons frais et durci ont été également analysées. Les résultats obtenus ont montré que le comportement physico – mécanique du BHP dépend de la nature et de la distribution granulométrique du sable étudié et de type d'ajouts cimentaire. Cette étude montre aussi, que le bon comportement des bétons aux milieux agressifs est obtenu avec du sable binaire (sable de dune et sable concassé). L'augmentation de la quantité d'eau du mélange généré par l'addition de déchets de carrière a été modifié par l'ajout d'un super plastifiant ou adjuvant réducteur d'eau (Medaplast SP 40) ce qui a conduit à l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du béton. Le remplacement de (5% de fumée silice +10 % de laitier granulé ou 5% de fumée silice +10 % marbre) au ciment donne une bonne résistance mécanique et physique au BHP. L'analyse par diffraction de rayons X des bétons avec et sans ajouts hydraté pendant 365 jours dans les milieux est réalisée.

**Mots- clés :** Propriétés physiques et mécaniques, granulats, sable de dune, sable concassé, adjuvant, BHP, durabilité, milieu agressifs.

# **Effect of the nature of aggregates on the physic- mechanical properties and durability of a high-performance concrete**

## **Abstract**

The research project aims to develop the effect of the nature of aggregates on the physico - mechanical properties and durability of high performance concrete. It comprises two parts: bibliographic synthesis on BHP and an experimental study. The concretes are made from a mixture having variable grades of silica, marble powder and granulated slag and a super plasticizer. The cementations' additions are added in cement substitutions with ratios: water on binder is almost constant (0.30) and a subsidence varies between (7 and 14 cm). The HPC tested are subjected to variable aggressive environments (sea water, sulphate water, Nacl solution and MgSO<sub>4</sub> solution).

For this study, two sands were used: dune sand (SD) and crushed sand (CS) with different proportions. The effects of the quality distribution and grain size of natural fine aggregates on the physical properties of binary sand (modulus of fineness, absolute or apparent density, porosity, particle size distribution, Water) are studied. The properties of fresh and hardened concretes were also analyzed. The results obtained showed that the physic - mechanical behavior of the HPC depends on the nature and the particle size distribution of the sand studied and on the type of cement additions added to the concrete. This study shows that the good behavior of concretes with aggressive media is obtained with binary sand (dune sand and crushed sand). The increase in the water quantity of the mixture generated by the addition of quarry waste was modified by the addition of a super plasticizer or water-reducing additive (Medaplast SP 40) improvement of physical and mechanical properties of concrete. Replacing (5% silica fume + 10% granulated slag or 5% silica fume + 10% marble) with cement gives good mechanical and physical resistance to HPC. X-ray diffraction analysis of concretes with and without additions hydrated for 365 days in media was tested.

**Keywords:** Physical and mechanical properties, aggregates, sand dune, crushed sand, chemical admixture , HPC, Durability, aggressive environments.

# تأثير طبيعة الحصى على الخواص الفيزيائية- الميكانيكية ومتانة الخرسانة عالية الأداء

## ملخص

تحلل و تقدم هذه الأطروحة تأثير نوعية الحصى على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية و متانة الخرسانة عالية الاداء . فهي تنقسم الي قسمين قسم مرجعي حول الخرسانة عالية الاداء ودراسة تجريبية .

الخرسانات التي اعتمدت للدراسة تتكون من خليط يحتوي علي مقادير مختلفة من السليكا ومسحوق الرخام وكذا خبث الافران المنصهرة مع اضافة الملدنات .الاضافات الاسمنتية اضيفت للإسمنت بمعدل ثابت يتمثل في الماء / الرابط = 0.3 مع معدل الهبوط المقدر بين 7 الي 14 سم الخرسانات عالية الاداء التي تمت عليها الدراسة وضعت في محاليل ضارة مختلفة( ماء جيري ، محلول كلور الصوديوم ومحلول سلفات المغنيزيوم).

في هذه الدراسة استعملنا نوعين من الحصى ( حصى الكثبان الرملية وحصى المكاسر ) مع مقادير مختلفة للخرسانة . تأثير التوزيع الحبيبي ونوعية وحجم الحصى الطبيعية علي الخصائص الفيزيائية للحصى الثنائي قد درست من ناحية ( معامل الرقائق،الكتلة الحجمية المطلقة ، المسامية ، التوزيع الحبيبي وقدرة الامتصاص ).  
خصائص الخرسانة الطازجة والمتصلبة قد حللت. النتائج المتحصل عليها تثبت ان الهيكل الفيزيائي والميكانيكي للخرسانة عالية الاداء تتعلق بنوعية الحصى المستعملة وكذا التوزيع الحبيبي للرمل المستعمل مع نوعية الاضافة الاسمنتية .

هذه الدراسة برهنت علي قوة الهيكل للخرسانات في الوسط الضار والتي تتكون من مزيج من الرمل الكثباني ورمل المكاسر . اما زيادة الماء التي سببها اضافة رمل المكاسر للخرسانة فقد عولجت بإضافة الملدنات (ميدا بلاست س ب 40) والذي حسن بدوره الخصائص الفيزيائية ومقاومة الخرسانة . تعويض جزء من الاسمنت بمقادير 5 بالمئة من السليكا مع 10 بالمئة من خبث الافران المنصهرة او 5 بالمئة من السليكا مع 10 بالمئة رقائق الرخام ) قد حسنت كذلك من خصائص الخرسانة و متانتها. التحليل بواسطة اشعة اكس قد تمت علي جميع العينات المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ، الحصى ، كثبان الرمل ، الرمل المكسر،المدن،الخرسانة عالية الاداء الوسط الضار،المتانة .

## Table des matières

Résumé	i
Sommaire	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vi
Introduction générale	1

### 1<sup>ère</sup> partie : Synthèse bibliographique

#### *Chapitre 1. Généralités sur les bétons à haute performance*

I. Introduction	4	4
I.1. Définition d'un béton à haute performance		4
I.2. Historique		5
I.3. Composition des bétons à hautes performances		6
I.3.1. Le ciment		7
I.3.1.1 Hydratation d'un ciment		8
I.3.1.2 Principaux hydrates de la pâte de ciment durcie		10
I.3.1.2.1. La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$		10
I.3.1.2.2. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)		11
I.3.1.2.3. Les aluminates de calcium hydratés		13
I.3.1.2.4. L'ettringite		13
I.3.2 Les granulats		13
I.3.3. Additions minérales		15
I.3.3.1. Pouzzolanes naturelles		15
I.3.3.2. Les cendres volantes		16
I.3.3.3. Filler calcaire		17
I.3.3. 4. Laitier granulé de haut fourneau		17
I.3.3. 5. Fumées de silice		18
I.3.4. Les adjuvants		19
I.4. Rhéologie des bétons à hautes performances		20
I.4. 1.Comportement à l'état frais		20
I.4.2. Comportement à l'état durcis		22
Conclusion		30

#### *Chapitre II. Effets des ajouts minéraux sur les performances mécaniques et la durabilité des bétons*

II. Introduction	32	32
II.1. Facteurs affectant la durabilité du béton		32
II.1. Influence des ajouts sur les performances mécaniques		33
II.2. La perméabilité du béton		34
II.3. Diffusion		36
II.4. Absorption		37
II.5. Les attaques chimiques des bétons		37
II.6. La carbonatation		45
II.7. Cycles de gel-dégel		46
		46

<i>II.8. L'alcali réaction</i>	47
<i>II.9. Résistance à l'abrasion</i>	47
<i>II.10. Résistance au feu</i>	47
Conclusion	

### ***Chapitre III. État de connaissances sur les granulats et les ajouts cimentaires***

#### ***A : Etat de connaissances actuel sur les granulats***

Introduction	49	49
III.1. Définition des granulats		49
<i>III.1.1. Origine des granulats</i>		50
III.2. Différents types de granulats	51	
III.3. Caractéristiques des granulats	52	
III.4. Les caractéristiques géométriques et mécaniques des granulats	55	
III.5. Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés du béton	57	

#### ***B : Etat de connaissances actuel sur les ajouts cimentaires***

a. Rappel sur le laitier de haut fourneau	59
a.1. Rôle de l'activant	62
<i>a.2.1. Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus</i>	63
<i>a.2.2. Les facteurs d'activation</i>	63
b. Fumée de silice	66
b.1. Mode d'action	67
b.2. Avantages de la fumée de silice	68
b.2. 1. Performance à l'état frais	68
b.2. 2. Performances à l'état durci	68
c. Les fillers inertes (fillers de calcaire et de marbre)	71
c.1. Fillers Calcaires	71
c.2. Fillers de Marbre	72
c.3. Recyclage et valorisation les déchets	72
d. Propriétés des bétons avec ajouts	73
d.1. Bétons avec ajouts de laitier	73
d.2. Bétons avec ajouts de pouzzolane	77
d.3. Bétons avec ajout de calcaire	79

#### ***C : Valorisation des granulats fins naturels (les sables) dans la formulation des bétons***

e. Sable de dune	
f. Sable concassé	
g. Les travaux antérieurs sur les utilisations du sable de dune dans la formulation des BHP	81
h. Méthodes de formulations	82
	85

## 2<sup>ème</sup> partie : Etude expérimentale

### *Chapitre IV. Matériaux et procédures expérimentales*

IV. Introduction	90
IV.1. Description du programme expérimental	90
IV.2. Caractéristiques et sélection des matériaux utilisés	91
<i>IV.2.1. Ciment</i>	91
<i>IV.2.2. les granulats</i>	93
<i>IV.2.2.1. Gravier et gravillon</i>	93
<i>IV.2.2.2. Sable</i>	94
<i>IV.2.3. La fumée silice</i>	97
<i>IV.2.4. Laitier granulé</i>	98
<i>IV.2.5. La poudre de marbre</i>	99
<i>IV.2.6. L'eau de gâchage</i>	100
<i>IV.2.7. Les adjuvants</i>	100
IV.3. Caractérisation rhéologique de la matrice cimentaire	101
IV.4. Préparation et conditionnement des échantillons de béton	103
<i>IV.4.1. Formulation et composition des bétons</i>	103
IV.5. Essais à l'état frais	106
IV.6. Essais de la durabilité	107
Conclusion	113

### *Chapitre V. Étude du comportement physico-mécanique des bétons*

V. Introduction	115
V.1. Effet combiné de laitier granulé et la fumée de silice sur les caractéristiques du béton à haute performance	116
<i>V.1.1. Optimisation de formulation</i>	116
<i>V.1.2. L'effet de la fumée silice sur le temps de prise</i>	117
<i>V.1.3. L'effet de la FS sur l'ouvrabilité du béton</i>	118
<i>V.1.4. La densité</i>	118
<i>V.1.5. Caractérisation mécaniques</i>	119
<i>V.1.6. L'effet de l'adjuvant</i>	121
<i>V.1.7. Analyse au rayon X de la structure interne</i>	121
V.2. Effet des fillers de marbre et leur combinaison avec la fumée silice sur la durabilité des bétons et bétons à haute performance	123
<i>V.3.1. La densité</i>	124
<i>V.2.2. La résistance mécanique</i>	125
<i>V.3.3. Peau du béton</i>	127
<i>V.2.4. Analyse au rayon X de la structure interne</i>	127
Conclusion	129

### *Chapitre VI. Effet de la nature des granulats (fins) sur la durabilité d'un béton à haute performance*

VI. Introduction	131
------------------	-----

VI.1. Choix des granulats fins	132
VI.2. Les essais sur bétons frais	132
VI.3. Les essais à l'état durci	134
VI. 3.1. <i>Propriétés physiques</i>	134
VI.3.1.1. <i>Effet du sable concassé sur la porosité</i>	134
VI.3.1.2. <i>Effet de sable concassé sur l'absorption d'eau par capillarité</i>	135
VI. 3.2. <i>Propriétés mécaniques</i>	136
VI. 3.2.1. <i>Effet de sable concassé sur la résistance mécanique</i>	136
VI. 3.2.2. <i>Effet de la porosité du sable binaire sur la résistance mécanique</i>	138
VI.4. La durabilité des BHP en milieux agressifs (NaCl, MgSO <sub>4</sub> )	139
VI.4.1. Introduction	139
VI.4.2. Variation de la masse des bétons conservés dans les milieux agressifs	140
VI.4.2.1. <i>Variation de la masse en fonction de sable combiné</i>	140
VI.4.2.1. <i>La résistance mécanique à l'attaque chimique</i>	142
VI.4.3. Interprétations par DRX	150
VI.4.3.1. <i>Béton formulé avec ajouts et sable binaire (nature silico - calcaire)</i>	155
VI.4.3.2. <i>Béton formulé avec ajouts et sable concassé (nature calcaire)</i>	156
VI.4.4. Analyse thermiques gravimétriques et différentielle	158
Conclusion	160
<i>Conclusion générale et perspective</i>	163
<i>Références bibliographiques</i>	166

*Liste des Tableaux*

<b>Tableau II.1.</b> Résistance à la compression des bétons à différents âges (MPa) [K.Hermann, 1995]	<b>34</b>
<b>Tableau II.2.</b> Résistance à la compression des spécimens [A. Yeginobali ,1995].	<b>45</b>
<b>Tableau III.1.</b> Densité et résistance à la compression mesurée par des essais de laboratoire [Letourneur et Michel, 1971]	<b>56</b>
<b>Tableau III.2.</b> Caractéristiques mécaniques des granulats [Baron et Sauterey, 1982]	<b>57</b>
<b>Tableau III.3.</b> Influence du rapport G/S. [CIMbéton ,1997]	<b>58</b>
<b>Tableau III.4.</b> Composition chimique des différents types des laitiers de haut fourneau.	<b>62</b>
<b>Tableau III. 5.</b> Résistance à la compression sur cube de mortier à différentes échéances et avec différentes températures de cure [A. R. Brough, 2002]	<b>65</b>
<b>Tableau III. 6 :</b> Composition chimique type de certaines fumées de silice [Aitcin, 1983].	<b>66</b>
<b>Tableau V.1.</b> Composition chimique et minéralogique du ciment, en (%)	<b>92</b>
<b>Tableau IV.2.</b> Résistances mécaniques à la compression et à la traction du ciment	<b>92</b>
<b>Tableau IV.3.</b> Module de finesse des sables	<b>95</b>
<b>Tableau IV.4.</b> Caractéristiques mécanique et morphologiques des granulats	<b>96</b>
<b>Tableau IV.5.</b> Caractéristiques physiques des granulats	<b>96</b>
<b>Tableau IV.6.</b> Composition chimique des granulats	<b>97</b>
<b>Tableau IV.7.</b> Composition chimique de la fumée de silice	<b>97</b>
<b>Tableau IV.8.</b> Composition chimique du laitier	<b>98</b>
<b>Tableau IV.9.</b> Composition chimique de la poudre de marbre	<b>99</b>
<b>Tableau IV.10.</b> Caractéristiques physiques et chimiques de l'adjuvant MEDAPLAST SP 40.	<b>101</b>
<b>Tableau IV. 11.</b> Liste récapitulative des types de béton étudiés.	<b>104</b>
<b>Tableau IV.12.</b> Composition des bétons avec les fillers de la fumée de silice, laitier granulé et sable de dune (données pour 1 m <sup>3</sup> )	<b>105</b>
<b>Tableau IV.13.</b> Composition des bétons avec les fillers de la fumée de silice, poudre de marbre et sable de dune (données pour 1 m <sup>3</sup> )	<b>105</b>
<b>Tableau IV. 14.</b> Composition des bétons avec les fillers de la fumée de silice, laitier granulé et trois natures de sable (données pour 1 m <sup>3</sup> )	<b>106</b>
<b>Tableau VI. 1:</b> Température de décomposition des constituants du béton d'après "méthodes d'essai LPC"[ Baroghel-Bouny V.,2002]	<b>158</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> (a) structure cristalline de la portlandite; (b) image au MEB de cristaux de portlandite [Damidot D.1995].	11
<b>Figure I.2.</b> Morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite [Regourd M., Hornain H.1975].	12
<b>Figure I.3.</b> Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une pelote d'ettringite [Brunetaud X, 2005]	13
<b>Figure I.4.</b> Efficacité de différents super plastifiants avec un ciment donné et influence sur la perte d'affaissement du béton dans le temps [J.P. Ollivier, 1988]	22
<b>Figure I.5.</b> Evolution de l'affaissement au cours du temps [Mantegazza, 1994].	22
<b>Figure I.6.</b> Résistance à la résistance à 28 jours, en fonction du rapport E/C pour des bétons à teneurs variées en fumée de silice [Sellevold et Radj , 1983].	23
<b>Figure I.7.</b> Retrait des Bétons à hautes performance [ Khelafi et A.Mokhtari ,1994]	27
<b>Figure I.8.</b> Porosité des bétons ordinaires et BHP [M.Auperin, 1989]	29
<b>Figure II.2.</b> Distributions cumulées et différentielles des tailles d'accès de pores acquis par porosimétrie à mercure pour des pâtes pures de ciment CEM I pour différents rapports E/C (âge 2 ans, conservation sous eau de chaux) [Richet et al. 2004]	34
<b>Figure II.3.</b> Pourcentage de perte en masse en fonction du pourcentage de cendre volante des différents mortiers immergés dans les solutions acides [Roy et al .2001].	36
<b>Figure II.4.</b> Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [Rahmani et Ramzani pour, 2008]	40
<b>Figure II.5.</b> Perte de masse et perte de résistance des bétons.	41
<b>Figure III.1.</b> Différent type des granulats	41
<b>Figure III.2.</b> Forme d'un granulats	50
<b>Figure III.3.</b> Résistance du béton en fonction de l'équivalent de sable (ES) [R. Lanchon, 1993]	52
<b>Figure III.4:</b> Fuseaux préférentiels du sable admissible [Z. Benghazi, site internet]	58
<b>Figure III. 5.</b> Laitier cristallisé et laitier vitrifié (granulé) de haut fourneau	58
<b>Figure III.6.</b> Granulation du laitier de haut fourneau d'EL HADJAR	60
<b>Figure III.7 :</b> Diagramme triangulaire de Keil : système $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 100$ [J.alexandare , 1988 ]	61
<b>Figure III. 8.</b> Résistance en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium : $\text{Na}_2\text{O} = 5.5\%$ , $M_s = 1$ ; sable/laitier = 2[S. D Wang ,1994].	64
<b>Figure III. 9.</b> Observation au MEB d'une pâte de ciment au laitier AAS conservée 4 heures à température ambiante, puis 12 heures à 80°C [A. R. Brough, 2002].	65
<b>Figure III. 10.</b> Résistance à la compression à 3 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours, 180 jours de ciments au laitier à 25°C et 45°C a) laitier de finesse 450 m <sup>2</sup> /kg ; b) laitier de finesse 900 m <sup>2</sup> /kg [A. Fernandez-Jimenez ,1999]	65
<b>Figure III. 11.</b> Principe de la pouzzolanique [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]	67

<b>Figure III. 12.</b> Courbe granulométrique laser comparative ciment /fumée de silice[PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]	<b>67</b>
<b>Figure III. 13.</b> Résistance des bétons aux attaques chimiques [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]	<b>68</b>
<b>Figure III. 14.</b> Résistance des bétons à l'alcali – réaction [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]	<b>69</b>
<b>Figure III. 15.</b> Résistance des bétons à la réaction sulfatique interne [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]	<b>70</b>
<b>Figure III.16 .</b> Résistance des bétons aux cycles gel/dégel [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]	<b>70</b>
<b>Figure III. 17.</b> Illustration de l'effet filler [S.P.Jiang et al ,1989].	<b>71</b>
<b>Figure III.18 .</b> Courbe de calorimétrie isotherme de mélange Ciment /Laitier à 23 et 60°C	<b>74</b>
<b>Figure III. 19 .</b> Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression COL0 : liants avec 0% de laitier avec 100% ciment CEMI, COL10 : liants avec 10% de laitier, COL20: liants avec 20% de laitier, COL30: liants avec 30% de laitier, COL40 [A.Toufik Boubekeur, 2010]	<b>75</b>
<b>Figure III.20.</b> Evolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation. [B.Chaid et al , 2012]	<b>75</b>
<b>Figure III. 21.</b> Evolution du dégagement de chaleur de réaction et du retrait chimique des liants étudiés en fonction du temps (au jeune âge) . PC0L0F : liants avec 0% de laitier, PC30L0F : liants avec 30% de laitier, PC50L0F : liants avec 50% de laitier, PC80L0F : liants avec 80% de laitier [N.E. Khalifa et al ,2011]	<b>76</b>
<b>Figure III.22.</b> Effet de d'incorporation du laitier dans le CPA sur le retrait [I.Suroka et al ,1993]	<b>76</b>
<b>Figure III.23.</b> Evolution du module d'Young des liants en fonction du temps PC0L0F : liants avec 0% de laitier , PC30L0F : liants avec 30% de laitier , PC50L0F : liants avec 50% de laitier, PC80L0F : liants avec 80% de laitier[N.E. Khalifa et al ,2012].	<b>77</b>
<b>Figure III.24.</b> Effet d'incorporation des cendres volantes dans les CPA sur la perte du béton [I.Soroka ,1993]	<b>77</b>
<b>Figure III. 25 .</b> Chaleur d'hydratation dégagée durant 5 jours d'hydratation[M .N.Oudjit ,2011].	<b>78</b>
<b>Figure III. 26 .</b> Chaleur d'hydratation dégagée durant 5 jours d'hydratation[M .N.Oudjit ,2011].	<b>78</b>
<b>Figure III.27.</b> Retrait de béton pour différentes teneurs en pouzzolane [I.Suroka et al ,1993]	<b>79</b>
<b>Figure III.28.</b> Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires [M.Tougy, 1997].	<b>80</b>
<b>Figure III .29 .</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire. [T.Boubekeur et al ,2012] .	<b>80</b>
<b>Figure III .30 :</b> Résistance des ciments aux fines calcaires [J. L.Ramires, J.M,Barcena ,1990]	<b>81</b>
<b>Figure III .31.</b> Retrait des ciments aux fines calcaires [ M.Tougy, 1997]	<b>81</b>
<b>Figure III.32.</b> Résistance à la compression des bétons. BO : CPJ - 42.5 , BC : CPJ - 42.5 + 10% Calcaire , BDPC :CPJ - 42.5 + 15% Déchet de polissage de carrelage, BSD : CPJ - 42.5 + 15% Sable de dune ,[D. Benamara,2010].	<b>83</b>
<b>Figure III.33.</b> Évolution de la résistance à la compression à l'âge270j [D. Benamara, 2010]	<b>83</b>
<b>Figure III.34.</b> Variation de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers à 28 jours en fonction de sable concassé substitué, [M. Maza et al, 2016].	<b>85</b>
<b>Figure III.35:</b> Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [P.C. Aitcin ,2001]	<b>86</b>
<b>Figure III.36:</b> relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression [P.C. Aitcin ,2001]	<b>87</b>
<b>Figure III.37:</b> Détermination du dosage en eau, [P.C. Aitcin ,2001].	<b>88</b>

<b>Figure III.38:</b> Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant [P.C. Aitcin ,2001].	<b>88</b>
<b>Figure III.39 :</b> Dosage en gros granulat [P.C. Aitcin ,2001]	<b>89</b>
<b>Figure IV.1.</b> La courbe granulométrique du ciment C <sub>2</sub>	<b>93</b>
<b>Figure IV.2.</b> Courbes granulométriques des granulats	<b>93</b>
<b>Figure IV.3.</b> Courbes granulométriques des sables (SD, SC, 1/3SD et 2/3SD).	<b>95</b>
<b>Figure IV.4.</b> Courbe granulométrique de la fumée de silice	<b>97</b>
<b>Figure IV.5.</b> Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé	<b>99</b>
<b>Figure IV.6.</b> Courbe granulométrique du laitier granulé	<b>99</b>
<b>Figure IV.7.</b> Courbe granulométrique de la poudre de marbre	<b>100</b>
<b>Figure IV.8.</b> Viscosimètre VT550	<b>101</b>
<b>Figure IV.9.</b> Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du % en superplastifiant SP 4	<b>102</b>
<b>Figure IV.10.</b> Structure du Poly Naphtalène Sulfonate	<b>103</b>
<b>Figure IV. 11.</b> Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité.	<b>108</b>
<b>Figure IV.12.</b> Appareil de mise en ébullition des éprouvettes ( essais de porosité )	<b>109</b>
<b>Figure IV. 13.</b> Pesé hydrostatique des éprouvettes pour calcul de la porosité	<b>109</b>
<b>Figure IV. 14.</b> Section d'éprouvette 10x10x10 cm <sup>3</sup> . Mise en évidence du front de carbonatation par la Phénolphthaléine.	<b>110</b>
<b>Figure IV. 15.</b> Les échantillons du béton immergés dans les solutions agressifs (MgSO <sub>4</sub> ) et (NaCl)	<b>112</b>
<b>Figure IV. 16.</b> Diffractométrie X'PERT	<b>113</b>
<b>Figure IV. 17.</b> Thermogravimétrie (ATG)	<b>113</b>
<b>Figure V.1.</b> Effet de la fumée de silice et l'eau de consistance sur le temps de prise pour les différents mélanges	<b>117</b>
<b>Figure V.2.</b> L'affaissement des bétons formulés	<b>118</b>
<b>Figure V. 3.</b> La variation de la densité des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours)	<b>119</b>
<b>Figure V. 4.</b> Evolution de la résistance à la compression des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours)	<b>120</b>
<b>Figure V. 5.</b> Evolution de la résistance à la flexion par traction des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours)	<b>120</b>
<b>Figure V. 6.</b> Diagramme de diffraction X du béton sans ajouts à 365 jours	<b>122</b>
<b>Figure V. 7.</b> Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de laitier à 365 jours	<b>122</b>
<b>Figure V. 8.</b> Diagramme de diffraction X du béton avec ajouts de la fumée de silice et de laitier à 365 jours.	<b>123</b>
<b>Figure V.9.</b> Evolution de la masse volumique moyenne des différentes compositions en fonction de l'âge (28, 90,270 et 365 jours)	<b>124</b>
<b>Figure V.10.</b> Evolution de la résistance à la compression des différentes compositions en fonction de l'âge.	<b>125</b>
<b>Figure V.11.</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion par des différentes compositions en fonction de l'âge	<b>126</b>
<b>Figure V.12.</b> Observation visuelle de la surface des échantillons.	<b>127</b>
<b>Figure V.13.</b> Diagramme de diffraction X du béton sans ajout à 365 jours	<b>128</b>
<b>Figure V. 14.</b> Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de marbre à 365 jours	<b>128</b>

<b>Figure V. 15.</b> Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de marbre et fumé de silice à 365 jours	129
<b>Figure VI.1.</b> Ouvrabilité des différentes compositions	132
<b>Figure VI.2.</b> Air occlus dans les différentes compositions	133
<b>Figure VI.3.</b> Masse volumique des différentes compositions (Milieu : l'eau du robinet)	133
<b>Figure VI.4.</b> Évolution de la porosité des BHP avec différents pourcentages de SC à l'âge de 28j et 365j (Milieu : l'eau du robinet)	135
<b>Figure. VI.5.</b> Coefficient d'absorption par capillarité des BHP	136
<b>Figure VI.6.</b> Variation de la résistance à la compression des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : l'eau du robinet)	137
<b>Figure VI.7.</b> Variation de la flexion par traction des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : l'eau du robinet)	137
<b>Figure VI.8.</b> Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité (Milieu : l'eau du robinet)	138
<b>Figure VI.9.</b> Masse volumique des différentes compositions (Milieu : l'eau du robinet)	140
<b>Figure VI. 10.</b> Evolution de la variation de la masse des bétons immergés dans la solution de $MgSO_4$ .	141
<b>Figure VI.11.</b> Evolution de la variation de la masse des bétons immergés dans la solution de $NaCl$ .	142
<b>Figure VI.12.</b> Variation de la porosité des BHP avec différents pourcentages de SC à l'âge de 28j et 365j (Milieu : $MgSO_4$ )	143
<b>Figure VI.13.</b> Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité (Milieu : $MgSO_4$ ) à 28 jours	143
<b>Figure VI.14.</b> Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité (Milieu : $MgSO_4$ ) à 365 jours.	144
<b>Figure VI.15.</b> Variation de la porosité des BHP avec différents pourcentages de SC à l'âge de 28j et 365j (Milieu : $NaCl$ )	144
<b>Figure VI.16.</b> Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité (Milieu : $NaCl$ ) à 28 jours	146
<b>Figure VI.17.</b> Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité (Milieu : $NaCl$ ) à 365 jours.	145
<b>Figure VI.18.</b> Différence entre la variation de la masse des BHP (1/3SD) conservés dans les solutions sulfatés et ceux conservés dans l'eau douce	146
<b>Figure VI.19.</b> Différence entre la variation de la masse des BHP (SC) conservés dans les solutions sulfatés et ceux conservés dans l'eau douce	147
<b>Figure VI.20.</b> Variation de la résistance à la compression des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : $MgSO_4$ ).	148
<b>Figure VIII.21.</b> Variation de la résistance à la traction des différents pourcentages de SC (Milieu : $MgSO_4$ ).	148
<b>Figure VI.22.</b> Variation de la résistance à la compression des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : $NaCl$ ).	149
<b>Figure VI.23.</b> Variation de la résistance à la traction par flexion des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : $NaCl$ ).	149

<b>Figure VI. 24.</b> Evolution du pH du BHP	<b>150</b>
<b>Figure VI. 25.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (SD) à 365j dans l'eau douce	<b>152</b>
<b>Figure VI. 26.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (1/3SD) à 365j dans l'eau douce	<b>152</b>
<b>Figure VI. 27.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (SD) à 365j dans la solution MgSO <sub>4</sub>	<b>153</b>
<b>Figure VI. 28.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (1/3 SD) à 365j dans la solution MgSO <sub>4</sub>	<b>154</b>
<b>Figure VIII.29.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (1/3SD) à 365j dans la solution NaCl	<b>154</b>
<b>Figure VI. 30.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (1/3SD) à 365j dans la solution NaCl	<b>155</b>
<b>Figure VI. 31.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (SC) à 365j à l'eau douce	<b>156</b>
<b>Figure VI. 32.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (SC) à 365j dans la solution MgSO <sub>4</sub>	<b>157</b>
<b>Figure VI. 33.</b> Diagramme de diffraction X du béton BHP (SC) à 365j dans la solution NaCl	<b>157</b>
<b>Figure VI. 34.</b> ATG & ATD de poudre du béton BHP (SD)	<b>159</b>
<b>Figure VI. 35.</b> ATG & ATD de poudre du béton BHP (SC)	<b>159</b>
<b>Figure VI. 36.</b> ATG & ATD de poudre du béton BHP (1/3SD)	<b>160</b>

# Introduction générale

Même si son progrès spectaculaires remonte à la fin des années 80, le béton à haute performance (BHP) reste une catégorie relativement nouvelle dans la gamme des bétons de construction. Cette innovation constitue une des avancées les plus exceptionnelles pendant la dernière décennie. Le BHP peut contribuer à une amélioration significative de la qualité des structures et ouvrir des nouveaux champs pour l'application du béton. Il est caractérisé par sa porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc...)[Source, [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)].

Les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc...) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien. Les clefs de ces performances sont :

- La réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de super plastifiants ;
- L'optimisation de la répartition granulométrique des composants.

Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité [source, [artoiscg.free.fr/wp-content/uploads/BHP.pdf](http://artoiscg.free.fr/wp-content/uploads/BHP.pdf)].

Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides inter granulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques. Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.

L'emploi des super plastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les super plastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans

les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

Bien que la qualité du liant et la nature des agrégats soient des facteurs très importants pour avoir un béton de qualité, construire avec des matériaux peu coûteux et disponible en grande quantité est le but recherché par de nombreux pays en voie de développement. En Algérie, des agrégats fins naturels ont été traditionnellement utilisés dans les bétons. Toutefois, les restrictions environnementales croissantes concernant l'exploitation du sable des lits de rivière ont donné lieu à une recherche de matériaux alternatifs pour produire des granulats fins. Les granulats fins manufacturés (sable de carrière concassée) sont alors apparus comme une alternative intéressante aux agrégats fins naturels (sable des dunes) pour le béton [Source, *www.techno-science.net*]. La majorité des sables naturels utilisés (sable de rivière, sable de dunes et sable de mer) sont choisis pour des raisons de prix et de disponibilité. Les propriétés du sable affectent la durabilité et la performance du béton. Les agrégats fins sont une composante essentielle des bétons à haute performance. La forme et la texture des particules de sable broyées pourraient conduire à l'amélioration de la résistance du béton grâce à une meilleure interaction entre les particules.

De nombreuses recherches affirment que, les agrégats ont une influence significative sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons. Leur poids spécifique, la distribution de taille des particules et la texture de surface influencent nettement sur les propriétés des bétons à l'état frais. D'autre part, la composition minéralogique, la ténacité et le degré d'altération des agrégats affectent aussi les propriétés des bétons à l'état durci [M. Haque, 2012].

Cependant la région de sud de l'Algérie présente des réserves très importantes en matériaux (sable de dune) en abondance et dont la technique d'exploitation et de mise en œuvre peuvent être maîtriser par des études assez poussées. Des recherches récentes montrent que l'utilisation des déchets industriels et les sables de carrière pour limiter l'utilisation de granulats naturels et de valoriser les déchets est une solution précieuse pour la protection de l'environnement. Pour trouver de nouvelles solutions économiques s'ajoutant aux solutions techniques, des recherches sur les BHP économiques ont été conduites au cours des dernières années. Vu l'importance des super plastifiants dans la formulation des BHP, les méthodes utilisées ont été basées sur le développement d'un produit de viscosité rentable. Cependant, la quantité très importante de l'addition minérale dans la formulation des BHP, nous laisse penser que l'utilisation des ajouts minéraux naturels et économiques semble être l'une des solutions envisageables pour l'avenir des BHP.

Le présent travail étudie les performances des bétons confectionnés à base de granulats fins obtenus à partir des différentes carrières en les comparant aux bétons confectionnés à base d'agrégats fins naturels. Ces bétons sont analysés dans trois milieux (eau potable et deux milieux agressifs).

Les principaux objectifs de ce travail expérimental ont été d'étudier les points suivants:

- La possibilité de réutilisation des déchets de carrière dans la formulation des BHP par remplacement partiel afin de réduire l'impact sur l'environnement résultant de l'élimination de déchets industriels.
- L'impact de la nature du sable concassé ou binaire sur les propriétés physiques mécaniques des bétons à haute performances confectionnés à base de matériaux locaux.

La première partie de ce travail est consacrée à l'étude bibliographique. Cette étude est composée de trois chapitres. Dans le premier, nous présentons les méthodes de caractérisation des différentes propriétés des BHP ainsi que le rôle des ajouts minéraux sur les propriétés de ces bétons à l'état frais et sur leurs caractéristiques physico-mécaniques.

Dans le deuxième chapitre nous avons abordé les facteurs affectant la durabilité des matériaux cimentaires et l'effet des ajouts minéraux sur les différentes propriétés des bétons. Nous présentons aussi une synthèse des travaux publiés sur ce thème.

Nous présentons aussi dans le troisième chapitre un état de l'art concernant le laitier granulé d'El hadjar " Annaba" et sa valorisation dans le béton en général et dans le BHP en particulier.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des caractéristiques des matériaux utilisés et la formulation des bétons ; BHP et ordinaire. Dans ce cadre nous avons utilisé plusieurs formulations qui couvrent différentes classes de résistances (plus de 60 MPa) et quatre types de bétons adjuvés. Pour la même classe de résistance mécanique, les bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport  $E/L_{\text{équi}}$  identique.

Les chapitres cinq et six, présentent les méthodes d'essai qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs physico-mécaniques et la durabilité à partir desquelles nous avons analysé l'effet du type d'addition minérale( laitier granulé, fumée de silice et poudre de marbre ) et la nature des granulats fins (sable de dune et sable concassé) dans les BHP.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés sous forme de graphes et de tableaux. Ensuite une analyse des résultats est faite dans le dernier chapitre, avec (discussions et commentaires).

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur l'étude élaborée, en donnant des recommandations à prendre en considération dans les prochaines recherches pour arriver à des meilleurs résultats.

## *Généralités sur les bétons à haute performance*

*Depuis longtemps, l'industrie et les concepteurs du béton sont contents de prescrire et de mettre sur le marché un béton universel dont la résistance en compression variant entre 15 et 25 MPa. Ces bétons leur étaient bien connus, ils étaient économiques, compétitifs et permettaient de construire des structures de façon sécuritaire. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa. Et cette évolution n'est pas terminée, des résistances à la compression supérieures à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes. [Source, Le béton à haute performance-[www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/dossier-ciment-94](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossier-ciment-94)].*

*Dans ce chapitre, on présente une revue générale en ce qui concerne l'historique et les propriétés principales des bétons à haute performances, notamment les ciments, les granulats fins (sable), les particules fines (les fillers), les adjuvants chimiques et quelques notions sur les bétons dans lesquels les sables et les adjuvants sont souvent utilisés.*

### **I.1. Définition d'un béton à haute performance**

Par convention on appelle béton à haute performance (BHP), un béton dont la résistance mécanique moyenne à la compression à l'âge de 28 jours est supérieure à 50MPa sur cylindre et un rapport (Eau efficace/liant équivalent) inférieur à 0,4. Le BHP contient les constituants suivants : des granulats ordinaires, du ciment portland ordinaire, de la fumée de silice, parfois d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes et des adjuvants (fluidifiants) [Source, <http://fr.slideshare.net/Saamysaami/bton-a-haute-performance>].

Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Elle est de l'ordre plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa) pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP. Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs [Source, BHP DGM09/UMBB/2011-2012].

## I.2. Historique

Le béton est devenu, grâce à des progrès scientifiques qui ont mobilisé les principales disciplines de la science des matériaux, d'une extraordinaire diversité. Il est toujours le matériau de construction le plus simple à fabriquer et à mettre en œuvre, avec des matières premières courantes et un matériel rudimentaire, il est aussi capable, aujourd'hui, grâce à une technologie de formulation sophistiquée, d'approcher les performances mécaniques de l'acier, de présenter une résistance exceptionnelle aux attaques physiques et chimiques, d'offrir aux architectes une qualité de surface et des possibilités architectoniques encore plus étendues [P. Acker, 2000].

Le béton est un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction. Ceci s'explique par les faits suivants :

- ✓ Possibilité de varier les propriétés du béton ;
- ✓ Facilité de traitement mécanique des mélanges de béton ;
- ✓ Possibilité de mécanisation totale des travaux ;
- ✓ Qualité économique du béton.

Les caractéristiques les plus importantes des bétons sont la résistance mécanique et la durabilité. Selon ces caractéristiques et ses propriétés, les bétons se différencient entre eux. Il y'a les bétons ordinaires (courant) et les bétons spéciaux (les bétons de granulats légers, les bétons cellulaires, les bétons réfractaires, les bétons à hautes performances,...etc.) qui chacun a une propriété spéciale. Actuellement, après une sélection de matériaux et l'utilisation des super plastifiants, on arrive à fabriquer de bons bétons maniables, et très résistants à coût raisonnable.

Au début des années 1960 dans la région Chicago, les bétons à hautes résistances ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures (Freedman 1971).

En 1962, un béton de 40MPa est mis en place lors de la construction de l'édifice 1000 en Lake Shore Plaza.

En 1965, c'est un béton de 50MPa qui est coulé lors de la construction de l'édifice en Lake Point.

En 1972, la résistance à la compression maximale du béton atteint 60MPa lors de la construction de Mid-Continental Plaza Building.

En 1976, un béton de 75MPa est utilisé pour construire deux colonnes instrumentées dans le River Plaza Projet.

En 1986, un béton de 100MPa a été utilisé dans des projets spéciaux à CHICAGO.

En 1988-1989, un béton de 120MPa a été utilisé dans la réalisation du Tow-Union Square Building aux USA.

Selon Pierre – Claude Aïtcin, il est possible de fabriquer des bétons de chantier de 150MPa, à condition de pouvoir disposer d'un ciment spécialement conçu à cet effet, de fumée de silice, de granulats particulièrement performants et d'un super plastifiant amélioré qui n'entraîne pas d'air piégé lorsqu'il utilise un très fort dosage.

Avec quelques ciments Portlands très peu réactifs additionnés de fumée de silice et quelques fluidifiants particulièrement efficaces couplés à des granulats particulièrement performants qu'il est possible de réduire le rapport (E/C) entre 0.20 et 0.25 de bétons à hautes

performances ayant un affaissement de 200mm lors de leurs livraisons en chantier. La résistance moyenne en compression de tels bétons peut atteindre 150MPa [Aïtcin, 2001].

Les premiers ciments utilisés pour fabriquer des bétons à hautes résistance étaient des ciments de Type I ou de Type II ASTM ou des ciments qualifiés comme Type II modifiés. De façon à minimiser les problèmes de perte d'affaissement, les producteurs de béton substituaient déjà une certaine qualité de ciment Portland par une cendre volante de haute qualité. La demande en eau de béton était ainsi réduire quelque peu et le contrôle de la perte d'affaissement plus aisé, permettant ainsi de diminuer encore un tout petit peu le rapport eau /liant. , ce qui de toute façon permettait de compenser dans une certaine mesure les pertes de résistance à court terme causées par la substitution du ciment par cendre volante [Aïtcin, 2001].

Mehta et Aïtcin (1990) ont déclaré que le terme BHP devrait être appliqué aux mélanges des bétons possédants les trois caractéristiques suivantes : haute maniabilité, de haute résistance, et durabilité élevé (P.Kumar Mehta). L'utilisation des ultrafines dans la fabrication des BHP est devenu alternative indispensable pour l'amélioration de la microstructure et la résistance mécanique, ainsi que la durabilité de ces bétons. L'utilisation des ultrafines (fumée de silice, laitier granulé, cendre volante,..., etc.) dans la fabrication des BHP est devenue choix indispensable pour l'amélioration de la microstructure et de la résistance mécanique, ainsi que la durabilité de ces bétons.

Bache (1981), a utilisé de la fumée de silice pour fabriquer ses bétons à très faible rapport E/L. L'industrie du béton prêt à l'emploi a pris avantage de ce nouveau matériau cimentaire dès qu'il a pu être disponible sous une forme pratique et à un prix acceptable. Bien que la première utilisation de ce produit de la fabrication du silicium et du Ferro silicium remonte à 1952 [Bernhardt, 1952], ce n'est que vers la fin des années 1970 la fumée de silice a commencé à être utilisée en Scandinavie comme ajout cimentaire dans le béton. Au début des années 1980, la fumée de silice a commencé à être utilisée en Amérique du Nord [Aïtcin, 1983 ; Malhotra et Coll., 1987] et ailleurs en Europe et dans le monde. Les fumées de silices condensées sont des sphères de petites dimensions (granularités entre 0.02 et 1µm, diamètre moyen d'environ 0.4 µm) comparées à celles des grains de ciment (granularité entre 1 et 80 µm, diamètre moyen d'environ 15 µm). En raison de son extrême finesse et sa haute teneur en silice, la fumée de silice est un matériau pouzzolanique très efficace. Il est utilisé dans le béton pour améliorer ses propriétés (améliore la résistance à la compression, la force de liaison, réduit la perméabilité; et contribue donc à protéger l'acier d'armature contre la corrosion [MI. Khan, R . Siddique, 2011].

### I.3. Composition des bétons à hautes performances

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint [S.P. Shah; S.H. Ahmad. 1994].

Un Béton à Hautes Performances (BHP) peut être défini comme étant un béton qui a une porosité réduite. Cette minimisation de la porosité est généralement obtenue en utilisant des rapports Eau/Liant plus faibles que dans le cas des Bétons Ordinaires « BO », associé à l'ajout d'adjuvants afin d'assurer une ouvrabilité satisfaisante. Ainsi, plus le béton est compact et meilleures sont ses résistances. La rupture d'un béton se développe dans la partie la plus vulnérable des trois régions suivantes : la pâte de ciment, les granulats, ou la zone de transition entre la pâte-granulats appelé ITZ [Maso ,1980]. Pour confectionner un béton résistant et performant, il faut par conséquent renforcer chacune de ces trois parties [Aïtcin et Mehta , 1990].

Pour parvenir à réduire la porosité d'une pâte de ciment hydratée, il faut réduire la quantité d'eau de gâchage. Cela n'est possible qu'avec l'utilisation d'adjuvants. L'utilisation d'additions minérales (fumée de silice par exemple) va également dans ce sens. Une pâte de ciment compacte permet une bonne transmission des contraintes aux granulats. Concernant ces derniers, le choix de leur nature minéralogique, de leur forme, de la dimension du plus gros granulats ainsi que l'optimisation de la distribution du squelette granulaire sont nécessaires. La réduction du rapport eau/ciment de la pâte et le choix de la nature minéralogique des granulats sont des paramètres qui permettent également d'améliorer la résistance de la zone de transition.

### I.3.1. Le ciment

La pâte de ciment représente 25 à 40% du volume total du béton. C'est la pâte qui assure le rôle de matrice au sein du béton en liant les granulats. Elle est constituée par le gâchage de ciment et d'eau. Le ciment généralement utilisé dans le génie civil est le ciment « Portland » qui est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise et durcissement avec l'eau. Pendant le gâchage, ce liant hydraulique réagit chimiquement avec l'eau, c'est l'hydratation.

Le choix du ciment fait intervenir à la fois des critères rhéologiques et des critères de résistance mécanique. Les performances des ciments commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seuls quelques-uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques.

D'après les recherches de (Paillère et al ,1990) et (Boubakir, 1999) ont constaté que le ciment ayant le plus faible pourcentage d'aluminate tricalcite donne la meilleure maniabilité. (Torrenti ,1992) rapport aussi que les ciments ayant le plus grand pourcentage de  $C_2S$ ,  $C_3S$  donnent la plus grande résistance au béton. Aïtcin (2001) affirme que, les BHP de la gamme 50-75 MPa peuvent être composés avec la plupart des ciments Portland commerciaux, alors que les BHP de résistance 75-100 MPa ne peuvent l'être qu'avec certains ciments, et rares sont les ciments Portland qui peuvent permettre d'obtenir tels quels des BHP de classe supérieure (BTHP de 100 à 125 MPa).

Le ciment doit permettre au BHP d'atteindre une classe de résistance donnée, tout en assurant une bonne maniabilité et une finition de qualité. A titre d'exemple, les BHP de la gamme 50-75 MPa peuvent être composés avec la plupart des ciments Portland commerciaux, alors que les BHP de résistance 75-100 MPa ne peuvent l'être qu'avec certains ciments, et rares sont les ciments Portland qui peuvent permettre d'obtenir tels quels des BHP de classe supérieure (BTHP de 100 à 125 MPa) [Aïtcin, 2001]. Les performances des ciments

commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seuls quelques-uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques. Il existe bien évidemment, comme nous le verrons par la suite, des solutions qui permettent de pallier aux manques de performances des ciments commerciaux, (utilisation de super plastifiants réducteurs d'eau, additions minérales, ...etc.). Les principales caractéristiques d'un ciment sont rappelées ci-dessous :

- ✓ **La finesse du ciment** : la recherche de la finesse optimale est une des exigences pour réaliser un BHP. La finesse régit de façon directe la résistance du béton. Plus le broyage est fin, plus les phases silicatées entourant les particules sont nombreuses, ce qui est bénéfique pour la résistance. Cependant, une finesse élevée rend les ciments réactifs et conduit à une formation rapide d'ettringite et de C-S-H lors de l'hydratation, impactant négativement la rhéologie [Nawa et al. 1991]. L'autre inconvénient d'une finesse importante est lié aux risques de fissuration dus à un fort retrait.
- ✓ **La teneur en  $C_3S$**  : les ciments à teneur élevée en  $C_3S$  présentent un intérêt pour la fabrication de BHP de forte résistance au jeune âge. En effet, le  $C_3S$  présente une meilleure réactivité par rapport au  $C_2S$ , ce dernier agissant plutôt sur les résistances à moyen et long terme.
- ✓ **Composition de la phase interstitielle** : elle régit la durabilité du béton en termes d'attaques chimiques. D'une façon générale, les ciments présentant un pH de la solution interstitielle faible sont plus résistants aux altérations chimiques (attaques acides en particulier). Ceci en raison de la meilleure stabilité chimique des phases solides qu'ils contiennent et de la diminution des gradients ioniques avec le milieu agressif qui en découlent. Un béton contenant peu de Portlandite sera en particulier plus stable qu'un béton qui en contiendrait beaucoup [Camps, 2008].
- ✓ **La teneur et morphologie du  $C_3A$**  : pour la formulation des BHP, l'utilisation d'un ciment contenant une faible teneur en  $C_3A$  permet de faciliter le contrôle de la rhéologie. Une morphologie du  $C_3A$  à dominante cubique est préférable à celle orthorhombique. En effet, la rhéologie d'un ciment à base de  $C_3A$  cubique est facile à contrôler [Vernet et Noworyta, 1992]. En outre, la limitation de la teneur en  $C_3A$  améliore la durabilité du béton en permettant une meilleure résistance aux milieux agressifs, en particulier aux attaques sulfatiques externes en raison de la limitation du risque de formation d'ettringite secondaire.

### 1.3.1.1. Hydratation d'un ciment

#### 1. Hydratation des silicates

Lorsqu'il est mis en contact avec de l'eau, le ciment s'hydrate selon des réactions complexes. L'étude des mécanismes d'hydratation de chaque phase pure permet une première approche de la compréhension de l'hydratation du ciment Portland.

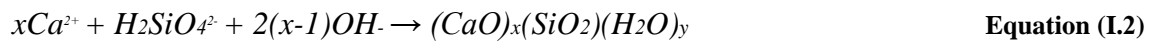
### - Le silicate tricalcique

Plusieurs études effectuées au laboratoire ont permis de décrire le mécanisme d'hydratation des phases silicates qui sont les composantes majoritaires du ciment Portland. Il existe trois réactions chimiques simultanées liées à l'hydratation du C<sub>3</sub>S.

- dissolution congruente du C<sub>3</sub>S suivant la réaction chimique suivante:



- précipitation des hydrosilicates de calcium notés C-S-H:



- précipitation de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>, appelé portlandite :



La première réaction est très rapide générant des espèces ioniques en solution, laquelle atteint rapidement la saturation par rapport aux hydrosilicates de calcium. Il y a alors formation de germes de C-S-H essentiellement sur la surface du silicate tricalcique. La stoechiométrie des C-S-H, caractérisée par son rapport molaire C/S (CaO/SiO<sub>2</sub>), n'excède jamais 2. La solution continue donc de s'enrichir en ions calcium jusqu'à atteindre la saturation par rapport à l'hydroxyde de calcium qui précipite à son tour (Equation I.3).

### - Le silicate bicalcique

Le C<sub>2</sub>S s'hydrate de la même façon que le C<sub>3</sub>S, cependant avec une activité moindre. La Réaction peut être décrite par l'équation I.4:



Les produits d'hydratation sont identiques à ceux de C<sub>3</sub>S, mais il y a comparativement une plus forte proportion de C-S-H. L'hydratation et le développement de la microstructure sont environ 90 fois plus lents que pour C<sub>3</sub>S. La naissance des cristaux de Ca(OH)<sub>2</sub> est également plus lente qu'avec C<sub>3</sub>S [F. Adenot, 1992].

## 2. Les phases aluminates

**Aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)** : sa proportion dans le Clinker varie d'un minéral à l'autre entre 8 à 12%. L'hydratation des aluminates de calcium au contact de l'eau se produit de façon similaire à celle des silicates de calcium, selon les mêmes processus de dissolution et d'hydrolyse, mais avec un dégagement de chaleur plus important. En l'absence de sulfate de calcium, une rigidification se produit par formation du C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>. C'est afin d'éviter une prise rapide de la pâte que l'on ajoute du sulfate de calcium au clinker sous forme de gypse

(CaSO<sub>4</sub>,2H<sub>2</sub>O), de plâtre ou hémihydrate (CaSO<sub>4</sub>,0.5H<sub>2</sub>O) ou d'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>). Tant que la concentration en sulfate est suffisante, le trisulfoaluminate de calcium hydraté (Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub>,26H<sub>2</sub>O) ou ettringite (C<sub>6</sub>AS<sub>3</sub>H<sub>32</sub> en notation cimentaire) se forme préférentiellement car il s'agit de la phase la moins soluble.



A l'épuisement des sulfates, ce sont les hydroaluminates de calcium tel que C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> et ses homologues mono-substitués (monosulfoaluminate de calcium, monocarboaluminate de calcium...) qui précipitent.



**Alumino ferrite tétracalcique C<sub>4</sub>AF (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>10</sub>Fe<sub>2</sub>)** : avec une proportion de 8 à 10%, il s'hydrate de façon analogue à celle du C<sub>3</sub>A avec une vitesse ralentie, un faible dégagement de chaleur et des hydrates formés contenant de l'oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### - La phase ferrite

Les études récentes confirment que l'hydratation de la phase ferrite des ciments Portland est semblable à celle de C<sub>3</sub>A, aussi bien en présence qu'en l'absence de gypse. Toutefois, sa vitesse d'hydratation est beaucoup plus lente. La spectrométrie permet de montrer que, à température et pression normale, l'hydratation de C<sub>4</sub>AF donne une série d'isomorphes hydratés et Fe(OH) [I.Teoreanu, 1979].

Lorsqu'on ajoute du gypse, la séquence d'hydratation de la phase ferrite est la même que pour C<sub>3</sub>A: il se forme de l'ettringite où Fe est substitué à Al et Fe(OH). Colleparidi et al. [Colleparidi et al, 1979] trouvent que l'ettringite obtenue par hydratation de C<sub>4</sub>AF en présence de gypse est plus stable que celle produite par C<sub>3</sub>A dans les mêmes conditions. L'hydratation de la ferrite de calcium, C<sub>2</sub>F, conduit à la formation de C<sub>4</sub>FH<sub>13</sub> et Fe(OH)<sub>3</sub>.

#### I.3.1.2. Principaux hydrates de la pâte de ciment durcie

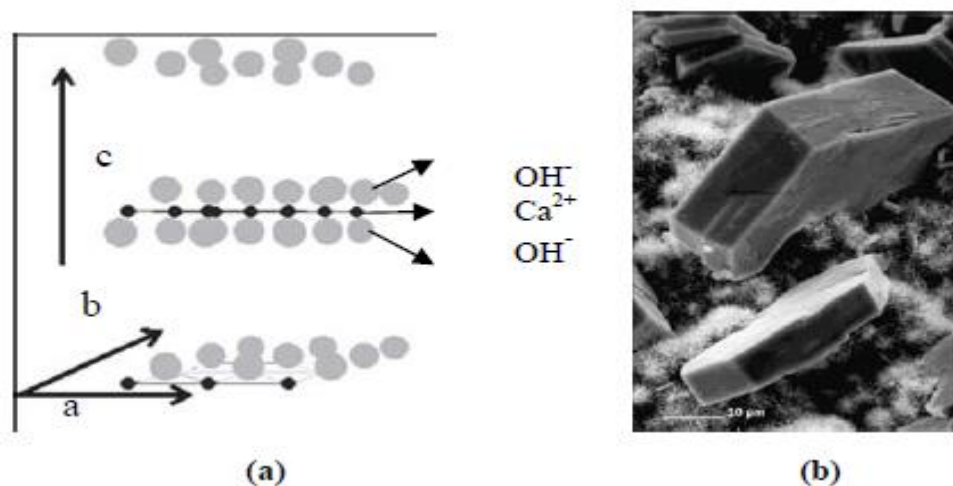
Nous présentons les principaux hydrates issus de l'hydratation du clinker portland qui composent à 90% la pâte de ciment durcie.

##### I.3.1.2.1. La portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>

La portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Sa solubilité dans l'eau est de l'ordre de 22 mol/L à 25 °C, soit environ 1,6 g/L [J-P.Ollivier, 2008], ce qui correspond à un pH d'équilibre de 13. Sa présence dans la pâte de ciment, par son équilibre de solubilité, maintient le pH de la solution interstitielle élevé. Sa solubilité diminue avec la température. C'est également une des phases les mieux cristallisées. Elle cristallise sous forme de cristaux hexagonaux plus ou moins développés dans la pâte de ciment, ces cristaux sont bien orientés sous forme de couche dans

l'auréole de transition, ou en bordure des bulles d'air. Sa structure cristalline est de type hexagonal. Elle est constituée de plans d'ions calcium (plan ab) en environnement octaédrique assuré par 3 ions OH<sup>-</sup> de part et d'autre du plan, ce qui constitue un feuillet d'hydroxyde qui est répété selon l'axe c (Figure I. 1).

En raison de la grande taille de ses cristaux, Ca (OH)<sub>2</sub> présente une faible surface spécifique. La portlandite peut aussi se trouver à l'état amorphe lorsqu'elle ne trouve pas assez d'espace pour cristalliser. Le Ca (OH)<sub>2</sub> n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique mais, par contre, cet hydrate joue un rôle notable pour des questions de durabilité [J-Ollivier, 2008], [V-B. Baroghel, 1994], car il opère un effet tampon en maintenant un pH basique. La teneur initiale en portlandite est une donnée d'entrée de la plupart des modèles de carbonatation des bétons.



**Figure I. 1.** (a) structure cristalline de la portlandite; (b) image au MEB de cristaux de portlandite [D.Damidot , 1995]

### 1.3.1.2.2. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Les C-S-H constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment. On parle souvent de gel de C-S-H en se référant à des composés amorphes. Ce sont en fait des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes aux autres (Figure I.2). Les dimensions typiques de ces particules sont de l'ordre de  $60 \times 30 \times 5 \text{ nm}^3$  [Gauffinet S., 1998]. Ces nano cristallites de forme lamellaire sont constitués de deux ou trois feuillets avec une étendue d'environ 5 nm comme le décrit le modèle de Feldman-Sereda [A.Plassais ,2003].

La famille des C-S-H est formée d'une grande variété de silicates de calcium hydratés. Une des caractéristiques importantes qui différencie ces espèces est le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport Ca/Si). Trois phases de C-S-H sont distinguées : C-S-H- $\alpha$  correspondant à  $0,66 < \text{Ca/Si} < 1$ , C-S-H-  $\beta$  correspondant à  $1 < \text{Ca/Si} < 1,5$ , C-S-H-  $\gamma$  correspondant à  $1,5 < \text{Ca/Si} < 2$  [J-P.Ollivier, 2008].

On distingue souvent également les C-S-H par leur morphologie [Y.F.Houst, 1992], en particulier les C-S-H externes (*outer product*) de morphologie plutôt fibrillaire, qui se développent à partir de la surface des grains anhydres dans les pores de la pâte et les C-S-H internes (*inner product*) de morphologie plus compacte, qui occupent l'espace libéré par le grain d'alite qui se dissout (Figure I.2).

Type I: il se présente en feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux [S.Diamond, 1986] et rayonnent autour du grain de ciment. Cette cristallisation aciculaire recouvre progressivement les grains anhydres et leur donne un aspect dit «en hérisson». Cette morphologie fibreuse est surtout visible aux premiers âges de l'hydratation.

Type II: il se présente sous forme alvéolaire (nid d'abeilles).

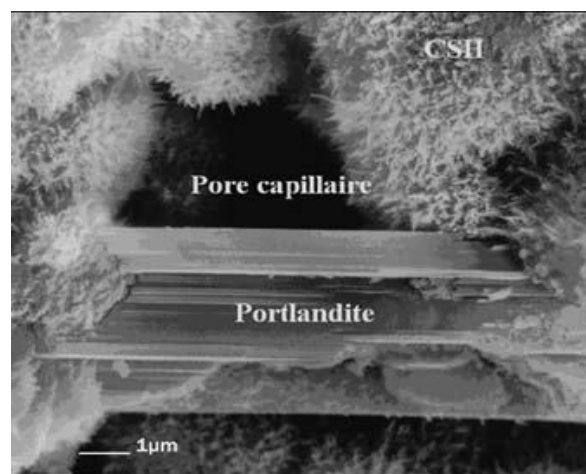
Type III: il apparaît souvent comme de petits disques ou des sphères (0,2  $\mu\text{m}$ ) assemblés pour former des particules plus massives sans forme particulière. On le trouve dans les pâtes matures.

Type IV: il s'agit d'une structure particulièrement dense et amorphe.

Les types I et II cristallisent en début de prise dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Par contre, les types III et IV seraient plutôt des hydrates tardifs qui occuperaient la place des grains anhydres d'origine; pour cela, ils sont appelés hydrates internes [V-B.Baroghel, 1994]. Du fait de la petite taille des particules qui le composent, la surface spécifique du C-S-H est très élevée (de l'ordre de 250  $\text{m}^2/\text{g}$ ) [D.L.Kantro, 1961].

Le C-S-H est très peu soluble dans une solution saturée par rapport à la portlandite (quelques  $\mu\text{mol}/\text{L}$ , soit de l'ordre de 1  $\text{mg}/\text{L}$ ). Sa solubilité augmente quand la concentration en hydroxyde de calcium en solution diminue. Si le pH descend en dessous de 10, il se dissout au profit de la silice qui devient moins soluble [J.A.Greenberg, 1960]. Les silicates de calcium hydratés restent des corps mal définis et mal cristallisés non identifiables par DRX. C'est pour cela que cette phase est souvent appelée «gel», en rapport avec son faible degré de cristallinité et le fait qu'elle soit gorgée d'eau.

L'espace inter feuillet peut être qualifié de première classe de porosité. Les autres classes de porosité naissent de l'agencement des lamelles [A.Plassais, 2003].



**Figure I.2.** Morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite [M. Regourd, H.Hornain, 1975]

### I.3.1.2.3. Les aluminates de calcium hydratés

On distingue les phases hexagonales ( $C_2AH_8 - C_4AH_{13}$ ) et la phase cubique  $C_3AH_6$ .

#### - Le $C_3AH_6$ ou hydrogrenat

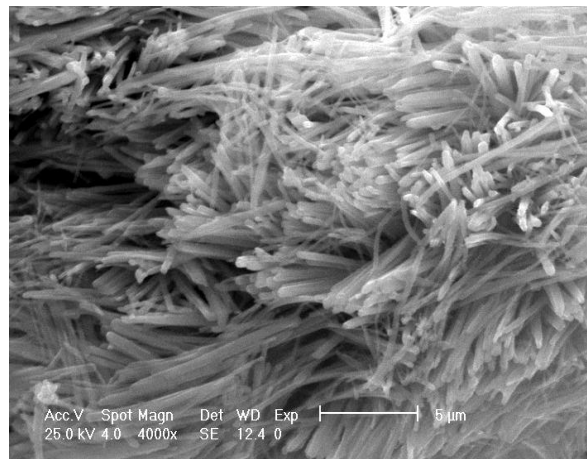
Le  $C_3AH_6$ ,  $Ca_3Al_2(OH)_{12}$  est la forme la moins soluble des aluminates de calcium hydratés et la plus stable. Il présente la même structure cristalline que le grenat  $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$  (Katoite) [X.Brunetaud, 2005]. L'hydrogrenat est le produit de l'hydratation des ciments alumineux, on le trouve rarement dans les ciments Portland hydratés à des températures normales.

#### - Les phases hexagonales

Les hydrates les plus stables sont les carboaluminates de calcium qui se forment dans les ciments contenant des ajouts calcaires ou simplement à partir des carbonates dissous dans la solution interstitielle du fait du contact avec le  $CO_2$  atmosphérique.

### I.3.1.2.4. L'ettringite

L'ettringite ( $C_3A_3CSH_{32}$ ) cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (Figure I.3), souvent rayonnantes (oursins) autour des grains de ciment anhydres dans une pâte de ciment âgée. Ces aiguilles se retrouvent parsemées dans les fibres de C-S-H [V-B. Baroghel, 1994]. Le nombre molécules  $H_2O$  de la formule de l'ettringite est mal connu, il peut être 30, 31, ou 32  $H_2O$  de suivant la température et la pression partielle de vapeur d'eau du milieu.



**Figure I.3.** Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une pelote d'ettringite [X.Brunetaud, 2005]

## I.3.2. Les granulats

Les granulats constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière [site internet, [fr.scribd.com/doc/297077668/Les-granulats](http://fr.scribd.com/doc/297077668/Les-granulats)].

Si on veut fabriquer un béton à haute performance le choix des granulats devient de plus en plus critique au fur et à mesure que ces granulats répondus aux critères dans la forme, la dimension maximale, la résistance mécanique, la raideur et enfin la minéralogie.

### ***La nature minéralogique***

Les granulats calcaires offrent en particulier une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment. Ils limitent les risques d'alcali réaction et possèdent des modules de compressibilité plus proche de la pâte de ciment que les granulats siliceux. En revanche, ils peuvent être sensibles à certaines altérations chimiques acides. Les granulats concassés ont une rugosité supérieure à celle des granulats roulés, ce qui favorise l'adhérence entre la pâte de ciment et le granulat et ainsi il donne une meilleure résistance ; le grain en compacité de forme arrondie étant contrecarré par la mauvaise adhérence des granulats roulés (sphériques).

Cependant les formes très anguleuses chez les granulats concassés, la pâte de ciment en présence de chargement externe et les granulats roulés sont préférables de ce point de vue. Une angularité accentuée demande aussi beaucoup d'eau pour être maniable.

Selon Dreux et al (1998), le granulat idéal doit être concassé, propre, de forme cubique, à angularité réduite et contenant le moins possible de particule plates ou allongées du fait de la faible résistance au plan de fissuration de ces dernières.

### ***Dimensions, volume et forme des granulats***

La taille des granulats a une influence sur les propriétés de résistance et de durabilité des bétons [Gonilho Pereira et al. 2008]. Bien que l'utilisation de gros granulats permette de diminuer la demande en eau (faible surface à mouiller par unité de masse), ce qui va dans le sens de l'augmentation de la résistance, il n'est pas recommandé d'en utiliser dans les BHP, car ils se comportent comme des inclusions rigides de grandes dimensions, induisant des systèmes d'autocontraintes importants. Ils altèrent également les capacités de déformations différées et les propriétés thermiques. Il est admis que ces risques sont limités tant que la dimension maximale est inférieure à 10 ou 12 mm [Neville, 2000]. Nichols (1982) a établi que, pour chaque résistance de béton et donc pour chaque rapport eau/ciment, il existe une dimension maximale optimale pour le granulat.

De même, le volume des granulats possède un effet sur les propriétés mécaniques du béton. D'après Stocks et al (1979), les propriétés mécaniques (résistance en compression et module d'élasticité) augmentent avec la proportion de granulats, du moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulats (60-75% en volume). Le même constat a été fait sur les déformations différées. Le fluage est d'autant plus faible que le volume relatif des granulats est conséquent. Il a été observé que le passage de la teneur volumique en granulat de 65 à 75% entraîne une diminution du fluage de 10 % [Pons et Torrenti ,2008]. Quant à la forme, l'utilisation de granulats concassés ou semi-concassés permet d'obtenir des meilleurs comportements mécaniques comparativement aux formes roulées [Mallier, 1992].

### ***L'optimisation de la distribution granulaire***

Elle permet d'augmenter la densité du squelette granulaire final et par conséquent d'obtenir un béton compact ayant de bonnes propriétés mécaniques. Parmi les méthodes d'optimisation de la répartition granulaire d'un béton, on peut citer Powers (1968), Bolomey (1935), Caquot (1937), Faury (1953) et plus récemment le modèle d'empilement compressible (MEC) [Larrard 1999 ; 2000] mis au point au LCPC.

Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Des mélanges optimums de grains (s'appuyant généralement sur quatre niveaux de taille de grain) permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire. Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micro-vides inter-granulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment-granat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques. Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.

### **I.3.3. Additions minérales**

Les ajouts cimentaires sont des contributeurs aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique où pouzzolanique où les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice en sont des exemples courants. Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis où de béton pour différentes raisons:

- Améliorer Les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité) ;
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité ;  
Réduire le coût de la matière liante: ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante ;
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines: certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice).

#### ***I.3.3.1. Pouzzolanes naturelles***

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre [F. Norman, 2005]. Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées comme ajout cimentaire sont [R. Dupain ,2000] :

- Substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée ;
- Argiles et schistes activés thermiquement (calcination).

Les pouzzolanes doivent leurs nom aux cendre volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les romains pour la confection du ciment [R. Dupain, 2000].

Elles sont composées essentiellement de silice, alumine et oxyde ferrique. Selon la norme ASTM C 618 la somme des trois oxydes doit être supérieure à 70 % [ASTM C618-03].

L'oxyde de fer peut être retenu comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puisqu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées [N. Kaid, 2000]. Les pouzzolanes naturelles sont employées en cimenteries pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est-à-dire une attitude à fixer la chaux à la température ambiante et former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation [G. Dreux, 1995].

### ***1.3.3.2. Les cendres volantes***

Les cendres volantes sont obtenues par des dépoussiérages électrostatiques ou mécaniques de particules pulvérulentes provenant du courant des gaz de chaudière, alimentées au charbon pulvérisé. La composition chimique des cendres volantes dépend de l'origine du combustible brûlé dans les centrales thermiques et dès lors diffère d'une centrale à l'autre, voire peut évoluer dans le temps sur un même site. La somme des teneurs en silice ( $SiO_2$ ), alumine ( $Al_2O_3$ ) et oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ) ne doit pas être inférieure à 70%. La proportion en  $SiO_2$  réactive doit constituer au moins 25% de la masse [NF EN 450-1 2005]. Les CV peuvent être classés en trois classes principales :

- CV silico-alumineuses (classe F ASTM) avec une teneur en silice ( $SiO_2$ ) qui varie de 47 à 59%, une teneur en alumine ( $Al_2O_3$ ) d'environ 22%, et une teneur en oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ) variant de 6 à 9%.
- CV silico-calciques (classe C ASTM) avec une teneur en silice aux alentours de 36%, une teneur en alumine de 17% et environ 6% d'oxyde de fer.
- CV sulfo-calciques qui contiennent 13 à 24% de silice, une forte teneur en calcium et soufre (59% de  $CaO$  et 15%  $SO_3$ ), 5 à 18% de  $Al_2O_3$  et enfin 3 à 17% de  $Fe_2O_3$ .

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes à un faible influence sur le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [Park, Noh, 2005]. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al. [Ferraris, 2001] montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1  $\mu m$ ). Associées à un super plastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité, mais le Rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon Témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement. L'effet le plus notable de ces additions est l'augmentation de la résistance à long terme par réaction pouzzolanique [Hassan et al. 2000].

Hassan (2000) a observé une amélioration significative à long terme de la résistance à la compression de la porosité et des propriétés de transport (diffusion et perméabilité) des BHP contenant 30% de cendres volantes [Patel et al. 2004]. Cependant, leur effet sur la résistance en compression de BHP semble très tributaire du rapport E/L utilisé [Hui-sheng et al. 2009].

### 1.3.3.3. Filler calcaire

Sont des matières minérales naturelles ou artificielles, qui après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques (ouvrabilité et pouvoir de rétention d'eau). Ils peuvent être inerte ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques. Zhu et Gibbs [Zhu et al, 2005], ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement et ce pour deux super plastifiants différents. En revanche, leur étude sur bétons montre que le type de filler a une forte influence sur la demande en super plastifiant (choisit dans leur étude) pour obtenir un étalement donné. Les fillers à base de craie nécessitent plus d'adjuvant que les fillers calcaires et ceci sont particulièrement remarquables dans le cas où le taux de remplacement est important.

Les causes possibles de différences entre les comportements des fillers sont la présence d'impuretés, les différences entre les compacités et les possibles différences d'adsorption entre les matériaux. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de super plastifiant pour atteindre un étalement donné.

### 1.3.3. 4. Laitier granulé de haut fourneau

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir de minerai et du coke métallurgique [G.Dreux ,1995]. La fusion du minerai dans les hauts fourneaux provoque la séparation gravitaire de la fonte liquide (en partie inférieure) et un résidu surnageant, également liquide, appelé laitier en raison de sa couleur claire (lorsqu'il est à température ambiante) [F.Larrard, 2002]. Il sort du trou de coulée à une température, de l'ordre de 1500 C° [G.Dreux ,1995]. À sa sortie du haut fourneau, il est trempé brutalement par déversement dans des bassins remplis d'eau où il se disperse en grains poreux de diamètre 1 à 5 mm : c'est le laitier granulé. Il se trouve donc dans un état thermodynamiquement instable (vitreux) et manifeste des propriétés hydrauliques [A.Brahma, 1992]. Sans la trempe, les minéraux cristallisent et deviennent presque insolubles dans l'eau [F.Larrard, 2002].

Le laitier contient de la chaux (45 à 50 %), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine (15 à 20 %) et 10% environ de magnésie oxydes divers et manganèse [G.Dreux, 1995]. Ce laitier constitue par lui-même un véritable liant. Toutefois la prise est trop lente ; aussi pour remédier à cet inconvénient on lui ajoute une base en guise de catalyseur (ex : chaux). Or le ciment Portland libère de la chaux en s'hydratant ce qui montre bien l'intérêt de l'utilisation du laitier comme ajout au ciment Portland [A. Brahma, 1992].

La norme ASTM C 989 classe le laitier selon une échelle ascendante de degrés de réactivité (degrés 80, 100 ou 120). Le degré d'un LGHF est fonction de son indice d'activité, soit le rapport entre la résistance à la compression de cubes de mortier composés d'un mélange à 50 % de LGHF et celle de cubes de mortier incorporant un ciment de référence [ASTM C989-04].

La pâte de ciment au laitier durcie présente une moindre quantité de chaux (portlandite), par rapport à celle issue de l'hydratation du ciment Portland seul [F.Larrard ,2002]. Son hydratation, qui se traduit par le développement de résistances mécaniques est moins rapide que

celle du Portland surtout dans sa période initiale. Elle dégage parallèlement moins de chaleur et retient moins bien l'eau de gâchage [G.Dreux , 1995].

### **I.3.3. 5. Fumées de silice**

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines (environ 1µm) présentant une très forte teneur en silice (SiO<sub>2</sub>) amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferroélectrique. Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques. L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Pour certains auteurs [PARK, NOH ,2005- SHI et al, 1998], elles augmentent les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, Alors que pour Carlsward (2003), par exemple, les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al. (2001), montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en super plastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

#### **a) Rôle des additions minérales**

Les super plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BHP. La fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis de la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un BHP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature [M .Behim, 2006]. L'activité d'une addition minérale peut avoir trois effets différents :

#### **✓ Effet filler ou effet de remplissage**

Une addition minérale incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet filler.

#### **✓ Effet chimique ou pouzzolanique**

L'activité chimique est le résultat de réactions chimie entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. Par exemple les cendres volantes donnent lieu à la réaction pouzzolanique. La réaction pouzzolanique est une réaction chimie entre la silice et la

portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumé de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, hydrate sous-produit de la formation du CSH du clinker.

#### ✓ Effet physique ou de surface

L'incorporation dans les liants hydraulique d'une addition minérale, même inerte est favorable au développement de la résistance à court terme. Cet effet est observé par de nombreux auteurs, aussi bien sur des pâtes de ciment que des mortiers. Sans que les processus mis en jeu soient clairement précisés et quantifiés, l'action de l'addition est généralement désignée sous le terme de germination hétérogène. Les hydrates nouvellement formés par l'hydratation du ciment pourraient précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrate qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

Ce processus d'hydratation différentielle entraîne une apparente accélération d'hydratation la germination hétérogène reposant sur des phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance des mortiers augmente avec l'augmentation de la finesse des additions. Mais, en fait, plus que la surface spécifique, c'est vraisemblablement le nombre de particules d'addition par unité de volume de pâte qui est le paramètre essentiel de ce phénomène.

### I.3.4. Les adjuvants

Les grains de ciment Portland présentent un grand nombre de charges électriques sur leurs surfaces, si bien que lorsqu'ils rentrent en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, ils ont tendance à flocculer [G.Villain, 2007]. L'action mécanique des malaxeurs et des gros granulats durant le malaxage du béton n'est pas suffisante pour éliminer complètement ce phénomène de floculation des grains de ciment. Cette formation de floccs stables empêche la dispersion uniforme des grains de ciment et emprisonne à l'intérieur des floccs une certaine quantité d'eau qui n'est plus disponible pour lubrifier le mélange.

Pour obtenir une bonne ouvrabilité, il faut ajouter beaucoup plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater les grains de ciment. L'addition de cette eau de maniabilité produit une pâte de ciment hydratée poreuse. Deux effets néfastes peuvent alors apparaître: une perte de résistance et une augmentation de la perméabilité. Ces effets diminuent donc la durabilité du béton [M. Thiery, 2007].

D'un point de vue technologique, un ciment idéal serait donc un ciment où la seule quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des grains de ciment suffirait, dans un premier temps, pour obtenir un mélange suffisamment maniable pour se mettre facilement en place. Une fois la mise en place terminée, l'eau de gâchage remplirait alors son rôle chimique, c'est-à-dire celui d'hydrater les grains de ciment en une masse de porosité minimale puisque la moindre goutte d'eau introduite initialement dans le béton se trouverait finalement liée chimiquement aux grains de ciment.

Comme il est impossible d'avoir un ciment qui ne flocule pas, la solution est de lutter contre cette tendance qu'ont les grains de ciment à floculer. Ainsi, pour diminuer la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter, les fabricants d'adjuvants ont développé des molécules déjà bien connues pour leurs propriétés dispersantes.

Les adjuvants des bétons sont des produits organiques ou minéraux ajoutés en faible teneur (à la dose du pour cent environ). Certains d'entre eux permettent de modifier le temps de prise (accélérateurs et retardateurs). D'autre la fluidité du béton (tensioactifs, plastifiants, fluidifiants), ou encore permettent de réduire la proportion d'eau de gâchage (réducteur d'eau). Les adjuvants sont donc une grande utilité pratique. Les adjuvants sont des produits utilisés dans les bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les bétons peuvent comporter différents types d'adjuvants: les plastifiants (réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs), les hydrofuges. Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

L'utilisation d'adjuvants chimiques capables de diminuer la tendance de floculation des particules de ciment est la solution pour parvenir à réduire le rapport E/L tout en gardant une maniabilité convenable du béton à l'état frais. Il s'agit d'adjuvants réducteurs d'eau ou super plastifiants haut réducteurs d'eau. De par leur fort pouvoir dispersant [Hewelt et Rixom 1977; Hattori 1979 ; Meyer 1979], les super plastifiants rendent possible la confection de bétons fluides avec des rapports E/L inférieur à 0,30. La taille et le volume des pores sont ainsi réduits, rendant les pâtes de ciments plus denses, ce qui améliore considérablement la résistance à la compression et la durabilité du béton.

En revanche, une attention particulière doit être apportée à la compatibilité ciment super plastifiant, car les différents ciments Portland ne se comportent pas de la même façon avec tous les supers plastifiants.

## **I.4. Rhéologie des bétons à hautes performances**

### ***I.4.1. Comportement à l'état frais***

D'après Aitcin (1992), la rhéologie des bétons à hautes performances est donc grandement influencée, d'une part , par la vitesse avec laquelle les différentes phases minérales qui constituent le ciment Portland vont fixer les molécules d'eau , les soustrayant ainsi à leur rôle initial d'agent fluidifiant , et d'autre part , par la vitesse avec laquelle certaines des molécules de fluidifiants pourront être fixées par les nouveaux composés qui se forment dans les tous premiers instants qui suivent le contact de l'eau et du ciment portland .

L'affaissement au cône de ce type de bétons est en générale supérieur à 15cm. La spécificité la plus importante de la formulation de ces bétons est sans doute l'utilisation de super plastifiants .Ceci conduit à un rapport E/C très faible, variant de 0.20 à 0.40, parfois moins, Struble (1991).Par ailleurs, on emploie fréquemment un ajout minéral : la fumée de silice. Malgré l'affaissement élevé des BHP, ces derniers présentent un aspect visqueux, qui provoque parfois de mauvaises performances au pompage sur chantier.

Par rhéologie, on distingue habituellement le comportement d'un matériau présentant une certaine viscosité sous l'effet de diverses sollicitations mécaniques. L'évaluation de ce comportement et sa traduction en données quantitatives exploitables, permet dans le cas du béton : De contrôler le matériau avant sa mise en place in situ ; d'ajuster les propriétés du produit lors de fabrication et de veiller au respect du cahier des charges, d'aider à la formulation en fonction des besoins des utilisateurs et de déterminer les causes des comportements rhéologiques en fonction des constituants des diverses compositions.

D'après Khalife (1991), les facteurs qui conditionnent la rhéologie des bétons en présence de super plastifiant sont : La teneur du ciment Portland en  $C_3A$ , la réactivité de  $C_3A$ , la finesse de mouture de ciment et la forme du gypse en fin de broyage. Un béton dont l'affaissement initial est de 23cm peut passer à un affaissement inférieur à 10 cm en moins de 30 min, Collepardi (1994).

D'après Ramachandran (1987), plusieurs facteurs déterminent cette perte de fluidité. Ce sont : la valeur initiale de l'affaissement du béton, le type et la qualité de super plastifiant introduit, l'humidité, La température, le malaxage du béton et la présence d'autres adjuvants.

Palier (1990), a proposé les solutions suivantes pour maintenir la fluidité des bétons dans le temps : Introduire le super plastifiant à l'arrivée du béton sur le chantier et contrôler la perte de fluidité en ajoutant le fluidifiant à différents intervalles.

L'efficacité des super plastifiants dépend du produit utilisé et, pour obtenir une même consistance, on doit utiliser des dosages variables en super plastifiant. La figure I.4 montre trois courbes correspondant à trois bétons de même composition, mais dont la nature et la quantité de super plastifiant varient.

D'après Malhotra (1979), pour maintenir la fluidité des bétons il faut augmenter le dosage du superplastifiant au - delà des dosages prescrits. L'augmentation de la quantité de ciment diminue également la perte de fluidité au cours du temps, Mailvaganam (1979), et pour Ramachandran (1981), maintenir la fluidité c'est combiner l'effet d'un fluidifiant avec celui d'un retardateur comme le gluconate de sodium. Mantegazza (1994) a étudié l'effet de combinaisons de polysaccharides avec un naphthalène ou une mélamine sur la perte d'affaissement d'un béton au cours du temps. Le béton de référence sans adjuvant a un rapport  $E/C = 0.50$ , par contre les bétons fluidifiés,  $E/C$  est égal à 0.45.

Les fluidifiants sont constitués de 80% de mélamine ou de naphthalène sulfoné et de 20% de sirop de polysaccharide, ils sont dosés à 2% de produit commercial par rapport au poids de ciment. La figure I. 5 montre que les bétons fluidifiés permettent d'avoir un affaissement initial supérieur à celui du béton non adjuvanté avec moins d'eau. Mais la perte de l'affaissement au cours du temps a lieu à la même vitesse. Le naphthalène donne des résultats meilleurs que la mélamine.

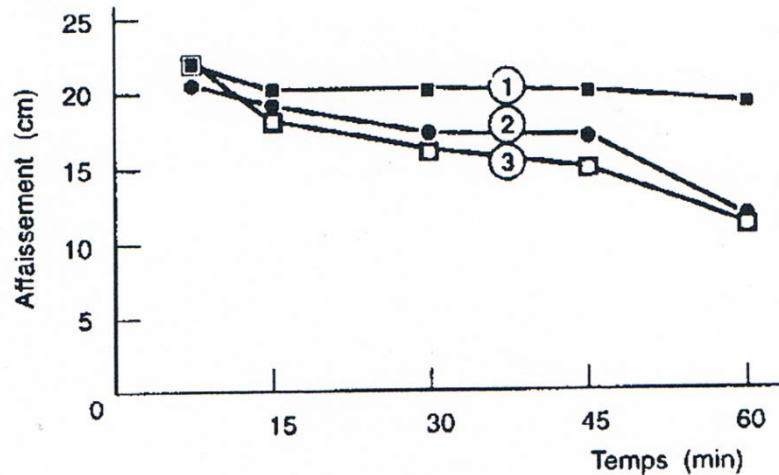


Figure I.4. Efficacité de différents super plastifiants avec un ciment donné et influence sur la perte d'affaissement du béton dans le temps [J.P. Ollivier, 1988]

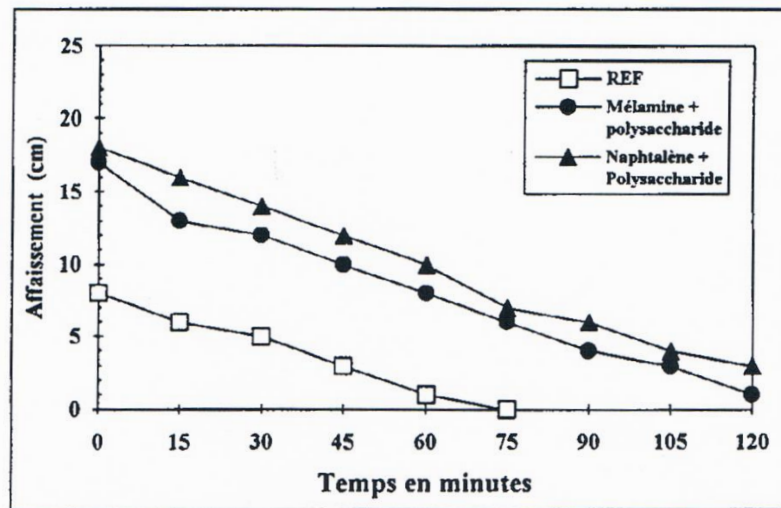


Figure I.5. Evolution de l'affaissement au cours du temps [Mantegazza, 1994]

## 1.4.2. Comportement à l'état durci

### 1. Résistances mécaniques

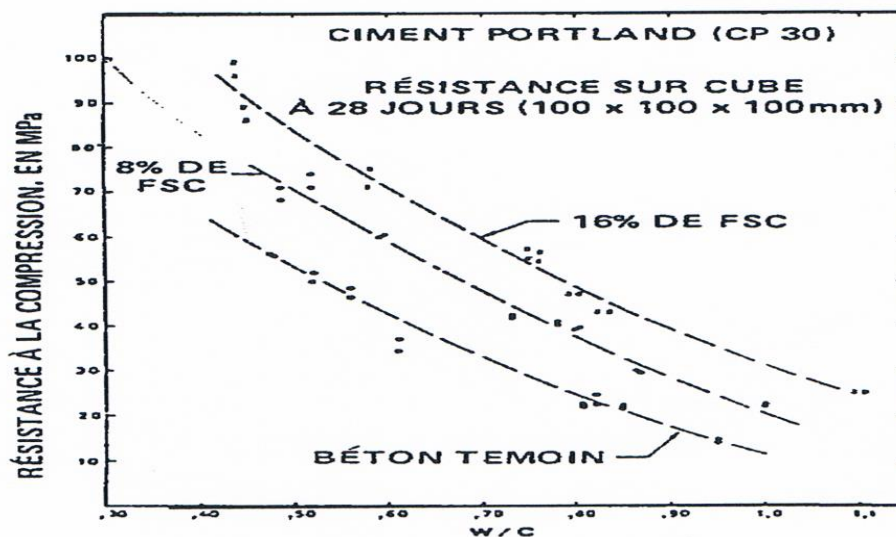
La résistance à la compression est la plus importante des propriétés d'usage du matériau et celle dont l'amélioration est la plus spectaculaire. Elle traduit directement les effets de la fumée de silice sur la microstructure du matériau. Si l'on cherche à fabriquer des BHP maniables avec des granulats ordinaires, on doit se limiter, dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 MPa et 120 MPa en résistance moyenne à 28 jours (mesurée sur cylindre), ce qui représente un progrès certain par rapport aux bétons usuels.

La précocité des résistances dépendra dans la pratique dans la nature (teneur en aluminates, finesse de mouture), du dosage en ciment et de la teneur éventuelle en retardateur de prise, ainsi que, bien sûr, de la température du béton.

Sellevold et Radjy (1983) montrent que l'augmentation de la résistance en compression en fonction du rapport E/C reste à peu près semblable, mais atteint un niveau plus élevé quand la fumée de silice (FS) est ajoutée au béton ce que montre la figure I.6.

Carette et Malhotra (1983) font état de la résistance à la compression de béton présentant un rapport E/(C + FS) de 0.40 dans lesquels ils sont remplacé entre 0 et 30% du ciment par la fumée de silice. Ils ont utilisé une quantité variable de super plastifiant pour en conserver l'ouvrabilité. La résistance à la compression à 28 jours est restée la même dans les mélanges renferment entre 5 et 20% de fumée de silice.

Les travaux de Sellevold et Radjy (1983) ont porté sur l'augmentation de la résistance à la compression de béton aux fumée de silice ayant subi une cure dans l'eau et de blocs témoins exposée à l'air du laboratoire immédiatement après le décoffrage. Les éprouvettes de bétons subissent une perte de résistance lorsqu'ils sont soumis à un séchage précoce. Cette perte est de l'ordre de 10 à 20% si on la compare à celle qui a été observée dans le cas d'échantillons semblables ayant subi une cure dans l'eau. La perte de résistance en fonction du rapport E/C est un peu plus grande (résistance inférieures à 30 MPa) dans les bétons avec fumée de silice que dans les bétons témoins correspondants.



**Figure I.6.** Evolution à la résistance à 28 jours, en fonction du rapport E/C pour des bétons à teneurs variées en fumée de silice [Sellevold et Radjy, 1983]

### Prévision de la résistance à la compression des BHP

Balbakri (1990) a développé à partir des données expérimentales une formule permettant de prédire la résistance à la compression  $f'_c$  des BHP :

$$f'_c = 0.348 f'_m{}^{0.946} C_0{}^{0.301} V^{0.07} \quad \text{Equation (I.8)}$$

$f'_m$  : Résistance à la compression du mortier ;

$C_0$  : Résistance à la compression du gros granulat ;

$V$  : coefficient de poisson.

De Larrand (1990) a proposé un modèle qui repose sur l'utilisation la loi de Féret :

$$f_{C28} = K / [1 + (E+V)/C]^2 \quad \text{Equation (I.9)}$$

$f_{C28}$  : Résistance à la compression du béton à 28 jours.

$K$  : est une constante dépendant de la nature du ciment et des granulats

$E, C, V$ : sont les volumes respectifs d'eau, ciment et air.

Le modèle proposé valable pour  $E/C < 0.40$  s'écrit alors :

$$f_{C28} = KR_{C28} / [1 + 3.1(E/C)/1.4 - 0.4 \exp(-11fs/C)]^2 \quad \text{Equation (I.10)}$$

$K$  : est un paramètre qui dépend des granulats ;

$R_{C28}$ : est la résistance à la compression à 28 jours du ciment mesurée sur mortier normal ;

$E$  : volume d'eau ;

$C$  : masse de ciment ;

$F_s$ : masse de la fume de silice.

Par suite de Larrand (1995) a proposé un nouveau modèle reposant toujours sur la loi de Féret. Ce modèle intégré le concept d'épaisseur maximum de la pâte (EMP), qui permet d'obtenir la résistance en compression à une échéance  $t$  quelconque :

$$f_{C(t)} = KgR_{C28} EMP^{-0.13} / [b(t) + (1 + pc(E+v)/c)^{-2}] \quad \text{Equation (I.11)}$$

$f_{C(t)}$  : la résistance en compression du béton à l'âge  $t$  (en jours)

$Kg$  : est un paramètre qui dépend des granulats

$R_{C28}$  : la résistance en compression à 28 jours du ciment mesurée sur mortier normal

$Pc$  : la densité du ciment ;  $E$  : volume d'eau ;  $v$  : le volume de vides ;  $C$  : masse de ciment

$EMP$  : est l'épaisseur maximale de pâte.

$$EMP = D \left[ \sqrt[3]{\frac{\check{g}}{g}} - 1 \right] \quad \text{Equation (I.12)}$$

$D$  : est le diamètre maximum des granulats (en mm) ;

$G$  : la proportion volumique de granulats ;

$\check{g}$  : la compacité des granulats.

$$\check{g} = 0.47 \sqrt[5]{\frac{d}{D}} \quad \text{Equation (I.13)}$$

$D$  : est le diamètre minimum des granulats ;

$b(t)$  : est en fonction de cinétique caractéristique du ciment.

## 2. Module d'élasticité

Hanchin (1999), a proposé des expressions mathématiques issue des théories de l'homogénéisation, qui montrent le rôle des trois paramètres essentiels : volume des granulats ( $g$ ), module de la pâte ( $E_p$ ) et le module des granulats ( $E_g$ ) sur le module du béton ( $E$ ) :

$$E = \frac{E_p[(1-g)E_p+(1+g)E_g]}{[(1+g)E_p+(1-g)E_g]} \quad \text{Equation (I.14)}$$

Le module de la pâte sera conditionné par sa compacité les termes  $g$  et  $E_g$  sont peu variable quand on passe d'un béton classique à un béton BHP, d'où une croissance assez modérée du module, qui variera de 40GPa.

Le module élastique est d'autant plus élevé que le béton est plus résistant.

Avec :

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{1/3} \quad \text{Equation (I.15)}$$

$f_{cj}$  : désignant la résistance caractéristique à la compression à jours.

## 3. Coefficient de poisson

En compression comme en traction, la déformation longitudinale (dans le sens de l'effort) est accompagnée d'une déformation transversale : le coefficient de poisson est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale en valeurs relatives. Sa valeur varie de 0.15 à 0.30 : il est d'autant plus élevé que le béton est plus jeune ou moins résistant. On le prend en générale égale à 0.20 (sauf cas particuliers) [G. Dreux, 1998].

## 4. Module de rupture

Le module de rupture d'un béton à haute performance, peut se calculer à partir de la formule suivante :

$$F_r = 1.4 (f_c)^{1/2} - 2.3 \quad \text{Equation (I.16)}$$

$F_r$  : le module de rupture en MPa ;

$F_c$  : La résistance à la compression à 28j en MPa

## 5. Résistance à la traction par flexion

Celle-ci croit sensiblement par rapport à la résistance en compression ; la relation entre les résistances à la compression et à la traction est de l'ordre de 1/10 à 1/13, soit 0.10 à 0.077

mais lorsque la résistance à la compression est de l'ordre de 100 MPa, la valeur du rapport ( $f_t/f_c$ ) est beaucoup plus petite, de l'ordre de 1/20. La densification de la matrice et de l'interface pâte – granulats est à l'origine due à l'amélioration de la résistance en traction. Lors des essais de fendage, le faciès de rupture est systématiquement transgranulaire (même avec des granulats siliceux), ce qui montre l'homogénéité mécanique du matériau [J.XIE, 1995].

### 6. Résistance à la traction par fendage

Certains investigateurs ont étudié la relation entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression des BHP. Ils concluent que pour les faibles résistances, la résistance à la traction par fendage est de 10% de celle de la compression tandis que pour les résistances élevées, elle est d'environ 5% [J.XIE, 1995].

### 7. Retrait

Les déformations libres du béton (retraits ou gonflements) sont des propriétés de première importance pour le constructeur. Le contrôle géométrique de l'ouvrage exige leur prise en compte.

Le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau du béton, au contact de l'atmosphère. De façon général ; l'eau existe dans le béton dans les états suivants :

- En combinaison chimique,
- Sous forme de gel dans les sels hydratés,
- Enfermée dans les petits interstices sous forme capillaires,
- Libre dans les vides les plus importants entre les granulats et la pâte.

Le processus du séchage de l'eau dans le béton est le suivant : lorsque le béton sèche, l'eau s'évapore d'abord à la surface des tubes capillaires ; il en résulte un accroissement de la courbure du ménisque de capillarité, et une tension qui attire l'eau des vides les plus importants ; celle-ci se déplace vers les capillaires, [S. Seki, 1985]. Ce processus se répétant, le béton se dessèche de plus en plus au voisinage de la surface. Au fur et à mesure du recul des ménisques intérieurs, les gels d'hydratation arrivent au contact direct avec l'atmosphère.

Apriori, on pourrait penser que pour un béton qui contient une grande quantité de pâte de ciment et d'eau, les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré. Dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  avec la silice  $\text{SiO}_2$  donne naissance à un silicate de calcium  $\text{CaSiO}_3, n \text{H}_2\text{O}$ . Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels.

En conséquence, la déformation du retrait est réduite et la tendance à la fissuration des bétons diminue aussi, cela même dans le cas du ciment riche en  $\text{C}_3\text{A}$ .

Le retrait des BHP avec fumée de silice est globalement identique à celui des bétons ordinaires, avec toutes fois des valeurs légèrement supérieures aux jeunes âges, notamment dans les premiers jours, et ceci approximativement jusqu'à l'âge de 28 jours, après quoi la courbe s'aplatit de sorte qu'à long terme le retrait est identique, voir la figure I.7

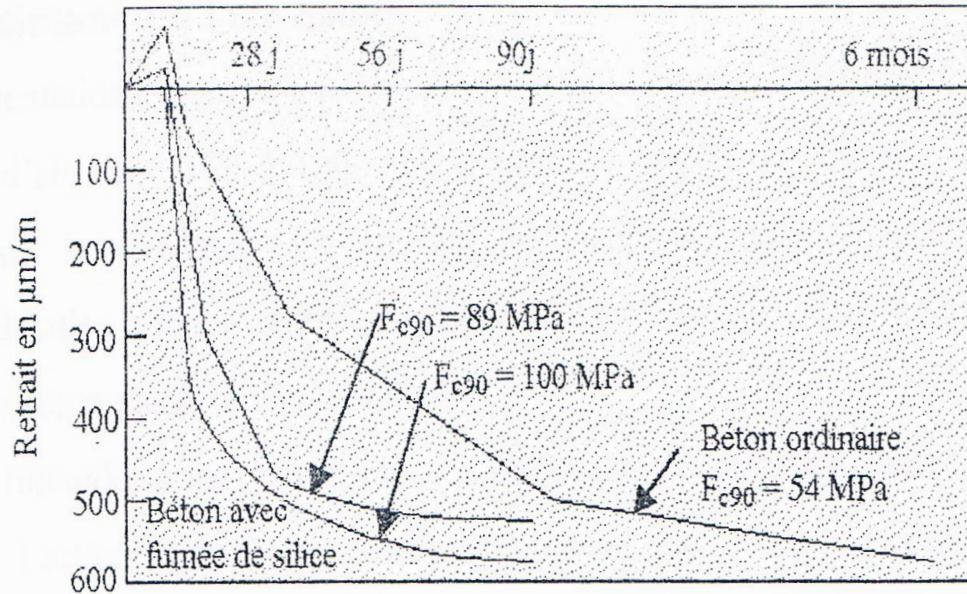


Figure I. 7. Retrait des Bétons à haute performance [ *Khelafi et A.Mokhtari, 1994* ]

### Différents types de retrait:

Il existe les retraits suivants:

#### **Retrait avant prise (retrait plastique)**

Après mise en œuvre, le béton frais est susceptible de perdre une partie de son eau par évaporation [Haouas, 2007].

#### **Retrait Pendant la prise et le durcissement :** (phénomènes thermiques et retrait endogène)

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'autodessiccation ou retrait d'hydratation. (La quantité totale de chaleur dégagée pendant la prise augmente avec le dosage en ciment) [Sellier et Buffo-Lacarrière, 2009].

#### **Retrait à long terme:(retrait exogène)**

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par l'évaporation de l'eau libre ; on dit aussi retrait de dessiccation ou retrait de séchage. A partir du décoffrage, et lorsque l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne dans la porosité du béton, des migrations d'eau se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de la structure [Acker et al. 1990].

## 8. Le fluage

Par définition, le fluage est la faculté du béton à se déformer lorsqu'il est soumis à un chargement mécanique maintenu constant dans le temps. L'appellation fluage correspond aux déformations différées mesurées après l'application de la charge. De la même façon que pour le retrait, on définit deux types de fluage suivant le mode de conservation du béton durant le chargement. Le fluage est dit endogène ou propre si la surface du matériau est isolée

hydriquement de l'environnement. On parle de fluage total ou en dessiccation lorsque les échanges hydriques en surface sont permis [F. De larrard. et LE ROY R., 1992].

Le fluage reste proportionnel à la contrainte appliquée (donc à la déformation initiale) pour des chargements au même âge du béton. Pour un béton avec fumées de silice, le fluage augmente rapidement immédiatement après le chargement; il peut atteindre dans la première journée de 25 à 30 % du fluage totale. Tout en restant inférieur à celui d'un béton classique. Le fluage total est par contre inférieur d'environ 40 à 50 % de celui des bétons usuels, ceci en fonction du pourcentage de fumée de silice incorporé, des pourcentages élevés donnant de moins bons résultats que des pourcentage limités à 6 % pour lesquels on observe les fluages les plus faible.

Le coefficient  $\phi$ , rapport entre la déformation finale de fluage et la déformation réelle instantanée, habituellement égale à:

$$\text{Coefficient de fluage } \phi = (\text{déformation différée} / \text{déformation instantanée})$$

Dans les règles BAEL, le coefficient de fluage à prendre en compte est fonction de la présence de fumées de silice. Il est égal à :

- 0,8 pour les BHP avec fumée de silice ;
- 1,5 pour les BHP sans fumée de silice.

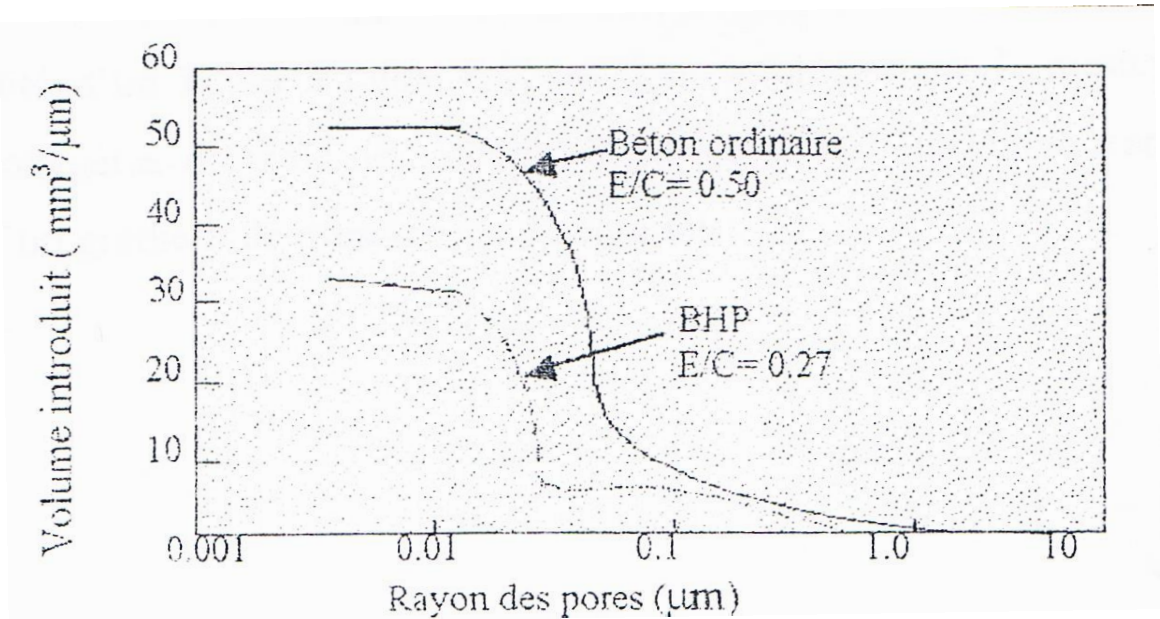
Ce coefficient de fluage est égal à 2 pour les bétons traditionnels.

### 9. Porosité et porométrie

Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les propriétés physiques et mécaniques du béton.

La porosité est essentiellement en fonction du rapport E/C du béton. Il a été démontré que pour un béton donné, la seule réduction du rapport E/C de 0.5 à 0.22 réduit d'un facteur 3 le volume total des pores capillaires. L'ajout de laitier ou de cendres volantes ne modifie pas la porosité totale mais conduit à une diminution générale de la dimension des pores, [M.Auperin et al, 1989].

L'adjonction d'ultrafins et en particulier de fumée de silice se traduit parfois par une réduction de la porosité et par une diminution caractéristique des pores. On note que la porosité totale des BHP est moindre que celle des bétons ordinaires et que la courbe porométrique des BHP qui mesure la distribution des dimensions des pores, se situe sous celle des bétons ordinaires (Figure I. 8).



**Figure I. 8.** Porosité des bétons ordinaires et BHP [M.Auperin, 1989]

### 10. Fragilité et la ductilité

La fragilité du béton caractérise sa capacité à atteindre la rupture en ne subissant qu'un minimum de déformation. A chaque fois la résistance d'un BHP augmente, le caractère de ce matériau sera fragile.

La surface de rupture des BHP et les bétons THP montre que les fissures traversent indifféremment la pâte et les granulats, il y a donc une certaine parenté avec le caractère des matériaux fragiles.

Ce caractère fragile, pourrait être préoccupant, car les méthodes de dimensionnement modernes reposent entre autres sur les théories de la plasticité des matériaux et prennent en compte leur comportement non linéaire. Ceci est particulièrement vrai pour les structures soumises aux séismes, aux chocs ou à des déformations imposées.

Les essais de rupture en flexion d'éléments en BHP armé, confirment le fait que la ductilité réelle de ces éléments est équivalente à celle d'éléments en béton armé ordinaire.

Le caractère fragile des bétons sous compression est éliminé par la présence :

- D'armatures longitudinales, qui permettent un report de l'effort sur l'acier évitant ainsi une rupture quasi – instantanée de l'élément.
- D'armatures transversales, qui empêchent ou retardent le flambement des armatures longitudinales lorsque la résistance du béton est épuisée, (A. Ghreib et al ,1999).

### 11. Perméabilité

La perméabilité est caractérisé par la valeur de débit de transport de fluides et des gaz (eau, chlorures, sulfates, oxygène,...) à travers des pores capillaires et des fissures du béton.

A cause de leur très grande compacité, les BHP sont imperméable. On peut s'en rendre compte de ce fait lorsqu'on brise des échantillons de béton conservés pendant un an dans l'eau,

on constate que le cœur de l'éprouvette est absolument sec. Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées avides d'eau qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieurs du béton tout en le rendant encore plus imperméable .

La perméabilité et s'exprimé au moyen de la relation de DARCY, valable en régime d'écoulement laminaire et s'exprime en  $m^2$  dans le système international:

$$Q = (K.A/M). dP/dZ \quad \text{Equation (I. 17)}$$

Q : Débit volumique du fluide ;

M: Viscosité de fluide ;

K : Perméabilité ;

A : Aire apparente du matériau.

## Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée dans le but de faire le point sur les principales propriétés des BHP. Ainsi, nous sommes intéressés aussi à l'influence du type de granulats et d'ajout minéral sur les caractéristiques des BHP à l'état frais et en particulier à l'état durci (propriétés physico-mécaniques et de durabilité).

Le BHP est un béton très plastique. Son utilisation nécessite des essais spécifiques à l'état frais et leur composition se caractérise par un volume élevé des granulats fins. A travers quelques études présentes dans la littérature, donc on peut dire dans ce chapitre que :

- Les bétons (BHP) présentent une micro texture très dense et une faible porosité ils sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs ;
- Une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.
- L'emploi des super plastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange. Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les super plastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

- Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité. Des mélanges optimums de grains permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire.
- L'ajout de particules ultrafines peut augmenter les performances des BHP par l'optimisation du mélange granulaire .Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides inter granulaires et en densifiant l'interface pâte de

ciment-granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais.

- Ciments: conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).

# *Effets des ajouts minéraux sur les performances mécaniques et la durabilité des bétons*

*Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton est l'un des facteurs les plus importants dans les domaines du génie civil et du génie industriel. Elle est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais aussi par l'environnement (marin, gel - dégel, pluie...). Ces influences deviennent plus importantes quand on doit garantir une durée de service pendant une grande période. Par exemple, les ponts, les tunnels, les réseaux d'assainissement ou le patrimoine bâti doivent avoir une longue durée de vie. La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton [Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton].*

*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 physicochimiques 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. 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 prévus 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, CO<sub>2</sub> ...) se trouvant à l'intérieure du matériau solide [Guillon, 2004, Richet, 2004].*

### **II.1. Facteurs affectant la durabilité du béton**

Pour évaluer la durabilité d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption. 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 [Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton].

La durabilité des ouvrages en béton, qui peut être définie comme étant leur capacité d'assurer la tenue en service prévue, est une caractéristique très importante, surtout pour les ouvrages importants de génie civil (ponts, silos, réservoirs, barrages, enceintes nucléaires...), car en cas de dégradations de tels ouvrages, les conséquences seront multiples et graves, surcoûts de réparation, limitation de la durée de vie de l'ouvrage, et dans des cas extrême la ruine partielle ou totale de l'ouvrage. Donc, la prise en compte préventive des facteurs qui peuvent affecter la durabilité des ouvrages, leur économie et leur sécurité, est impérative lors de la conception et de l'élaboration de ces ouvrages.

### **II.1.1. Influence des ajouts sur les performances mécaniques**

Tan et Pu [K.Hermann, 1995] ont étudié l'effet des cendres volantes finement broyées (FGFA), du laitier de hauts fourneaux (FGGBS) et de leur combinaison sur la résistance à la compression. Ils ont trouvé que l'incorporation de 20% FGFA ou de FGGBS peut de manière significative augmenter la résistance à la compression du béton après 3 jours. Ils ont constaté aussi que la résistance à la compression du béton incorporant la combinaison de 10% FGFA et 10% FGGBS est plus élevée que celle du béton de FGFA et du béton de FGGBS (Tableau II.1).

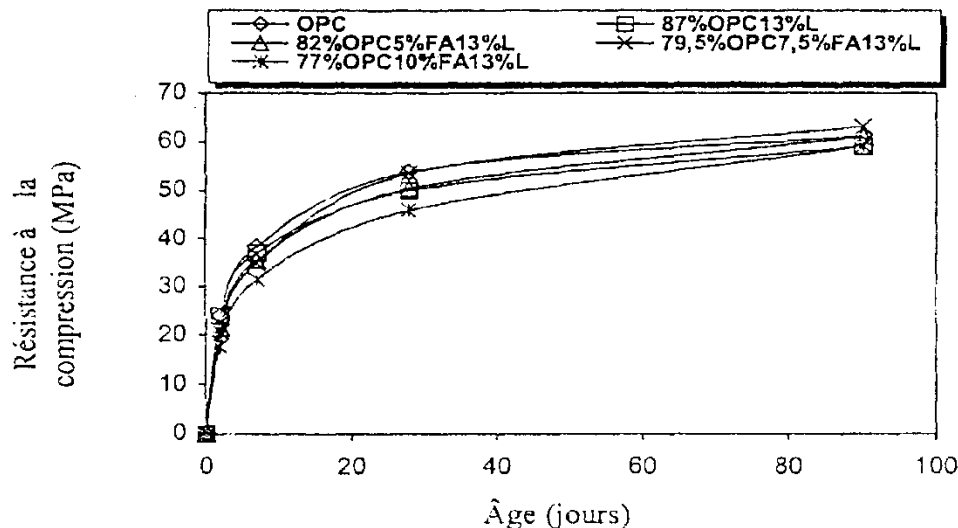
Menendez et Al. [G.Menendez et al, 2003] ont étudié le développement de la résistance des liants ternaires contenant des fillers calcaires et du laitier. Ils ont trouvé que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire. Les fillers calcaire améliorent la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme par la réaction pouzzolanique qui raffine les systèmes de pores. Ils ont montré que le mélange de ciment ternaire offre un avantage par rapport aux ciments binaires et aux ciments Portland sans ajouts. Ces auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment Portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire.

L'étude expérimentale faite par S.Bhanja et B.Sengupta de l'université de Kolkata à l'Inde sur l'influence de la fumée de silice sur les performances mécaniques des bétons à haute performance (B.H.P) [S. Bhanja and B.Sengupta, 2005] a révélé que la résistance optimale à 28 jours pour la compression a été détectée à un taux de substitution variant de 15 à 25% avec un rapport E/L = 0.26. El-Khadiri et al. [I.El Khadiri, 2002] ont étudié le comportement mécanique des mortiers contenant à la fois des cendres volantes et du calcaire (ajout inerte). Ils ont trouvé que la substitution du clinker par le calcaire a donné des meilleures résistances mécaniques que celles des mortiers contenant des cendres volantes au jeune âge. Après 28 jours, le ciment contenant des cendres volantes a donné des résistances importantes. Du point de vue mécanique, ces auteurs ont opté pour un dosage optimal composé de 77.5% de clinker, 2% de gypse, 7.5% de cendres volantes et 13% de calcaire (figure II.1).

**Tableau II.1.** Résistance à la compression des bétons à différents âges (MPa)  
[K.Hermann, 1995]

	Age (jours)			
	1	3	28	56
Ciment	39.0	53.8	60.6	73.8
Ciment + 20% FGFA	37.3	51.4	79.3	81.1
Ciment + 20% FGGBS	37.7	57.4	79.9	82.3
Ciment + 10% FGFA+10% FGGBS	41.6	60.7	80.7	86.0
Ciment + 6,6% fumée de silice	44.7	60.8	81.2	86.4

Bai et Al [J.Bai, BB.Sabir, 2000] ont étudié le développement de la résistance du béton contenant les cendres volantes pulvérisées (PFA) et le méta kaolin (MK). Ces auteurs ont trouvé que les rôles joués par PFA et MK dans le développement de résistance, en particulier au jeune âge, peuvent être combinés pour produire des mélanges efficaces pour le ciment. Aux courtes périodes de cure, seulement les mélanges avec les faibles niveaux de substituant de ciment Portland et les rapports élevés de MK/PFA donnent des résistances au-dessus du contrôle. Cependant, après 90 jours de cure, les mélanges avec les niveaux élevés de substituant de ciment Portland et les rapports faibles de MK/PFA donnent également des résistances au-dessus du contrôle.



**Figure. II.1.** Développement de la résistance en fonction de l'âge [I.El Khadiri, 2002]

### II.1.2. La perméabilité du béton

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité représente le premier indicateur de la durabilité de béton. Elle dépend fortement du réseau poreux et de sa connectivité [Ismail, 2006]. Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont : l'eau pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique

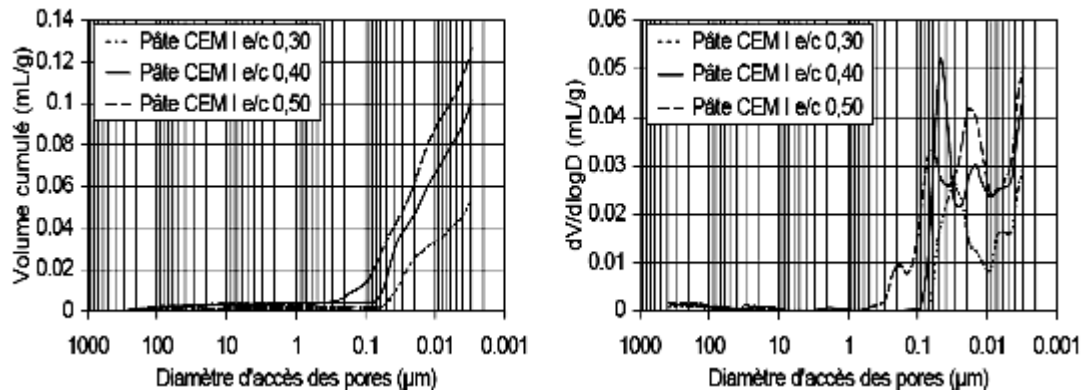
et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différentes manières, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte. Comme nous l'avons vu précédemment, la durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquides et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton; c'est ce que l'on appelle communément la perméabilité du béton.

Selon Ho et al. [HO, 87], la perméabilité a été définie comme la propriété qui permet le passage d'un liquide à travers le matériau et elle se distingue de la pénétration de l'humidité par absorption due à l'action des capillaires. Dans les structures, l'eau est absorbée par capillarité, la mesure du taux d'absorption donne souvent une indication sur la structure des pores du béton ou du mortier. La pénétration de l'eau à travers le réseau poreux entraîne des ions sulfates et chlorures, substances néfastes pour la durabilité du béton [HO, 87], [Ernesto et al. 2003].

Plusieurs paramètres entrant en jeu lors de l'écoulement d'un gaz à travers un milieu poreux ont une influence sur la perméabilité. Ainsi, la teneur en eau du béton a un effet marqué sur la majorité de ses propriétés dont la perméabilité aux gaz, qui est très affectée par la quantité d'eau interstitielle. Il faut alors drainer l'eau interne, partiellement ou entièrement, avant qu'une mesure de perméabilité aux gaz ne puisse être réalisée [Assié, 2004]. Mais la perméabilité peut aussi dépendre des caractéristiques propres du matériau, notamment de sa microstructure. En effet, La dimension des pores dans le béton est directement liée au rapport E/C de la formulation étudiée. Lorsque le rapport E/C augmente, la porosité devient plus élevée et la structure poreuse plus grossière. Les transferts de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie [Perraton, 99]. La Figure II.2 montre les courbes de la distribution cumulée et différentielle des tailles d'accès de pores pour les pâtes de E/C 0,30 ; 0,4 et 0,50 en particulier [Richet et al. 2004].

Un autre paramètre important qui influe sur la perméabilité des bétons est celui du type d'ajout minéral. En effet, les fumées de silice utilisées en les substituant à une partie du ciment permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'air et à l'eau. Cet effet s'explique par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l'hydratation des sphères de fumée de silice. Le taux de remplacement optimal se situe aux environs de 10 % [Bui, 92]. La comparaison entre le ciment Portland et le ciment aux fillers calcaires montre que la résistance à la compression à 28 jours, la quantité d'hydrates, la porosité et la distribution de la porosité sont les mêmes et par conséquent l'addition de fillers calcaires ne modifie pas les propriétés de transfert par rapport au ciment Portland.

La mesure de la perméabilité aux gaz permet donc de quantifier la mobilité d'un fluide à travers un béton dans sa globalité. Cependant, le béton est un matériau dont les propriétés évoluent dans le temps et pour lequel la dessiccation a pour effet de modifier le réseau poreux.



**Figure II.2.** Distributions cumulées et différentielles des tailles d'accès de pores acquis par porosimétrie à mercure pour des pâtes pures de ciment CEM I pour différents rapports E/C (âge 2 ans, conservation sous eau de chaux) [Richet et al. 2004]

### II.1.3. Diffusion

L'agent agressif extérieur dont la diffusion à travers le béton est particulièrement intéressante est celle des ions chlorures qui peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque les ions chlorures se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton, ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer.

Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même). Le paramètre le plus influent semble cependant être la nature du liant. Ainsi, dans le cadre d'essais croisés du projet GrandDuBé (2007), il est apparu que le remplacement du ciment Portland CEM I 52,5 N par un ciment composé CEM III/C 32,5 N (à 85 % de laitier), à résistance égale (30 MPa) permettait une réduction des coefficients de diffusion apparents et effectifs dans un rapport supérieur à celui résultant d'une augmentation de résistance (de 30 à 60 MPa), avec le ciment CEM I. La substitution du ciment Portland par des cendres volantes semble également être très efficace, en laboratoire [Tange Jepsen, 2001] et sur site (Baroghel- Bouny et al.).

Deux types d'explications sont proposés : la fixation possible des chlorures, et la réaction pouzzolanique qui cloisonnerait le réseau poreux. Cette dernière explication semble la plus vraisemblable [Roziere, 2007]. Ainsi, l'effet de fortes proportions de cendres n'est pas significatif à 28 jours mais apparaît après plusieurs mois. La qualification des compositions à 28 jours ne rend pas compte de tels comportements. Ainsi la norme canadienne CSA A23.1-04 spécifie des valeurs limites à 56 jours, pour tenir compte des liants avec laitier ou cendres.

L'effet positif de la fumée de silice a été montré par les mêmes auteurs. Cependant, la fumée de silice semble principalement agir avant 28 jours, et non sur la cinétique à plus long terme. Par ailleurs ce type d'addition limiterait la sensibilité à la dessiccation précoce, parfois

gênante pour les liants avec cendres ou laitier, dont le coefficient d'activité reste faible pendant les premiers jours [Alexander, 1999]. D'après ces données, l'intérêt des liants ternaires cendres ou laitier + fumée de silice paraît donc triple : sensibilité réduite au mode de cure, qualification de la composition à 28 jours, efficacité accrue à long terme.

#### **II.1.4. Absorption**

Le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert est lié simultanément à la structure poreuse et à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton. L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C et le type d'ajout minéral utilisé dans les compositions des bétons.

Tasdemir [Tasdemir et al ,2003] a étudié les effets combinés des additions et des conditions de cure sur la sorptivité et la résistance à la compression du béton de CEM II 42.5. Il a évalué le coefficient de sorptivité pour des bétons contenant des ciments avec les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et de la fumée de silice (SF). Il a étudié aussi le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression des bétons avec un CEM II 32.5. Il a prouvé que les additions minérales sont bénéfiques pour l'augmentation et la réduction de l'absorption capillaire du béton.

Tsivilis et al. (2003) ont étudié l'effet de l'addition du calcaire sur la sorptivité des bétons. Ils ont constaté que le béton contenant du ciment au calcaire a donné des valeurs de sorptivité légèrement plus basses, comparées au béton contenant du ciment sans ajouts [S.Tsivilis et al ,2003]. Ils ont trouvé que la sorptivité du béton contenant le ciment au calcaire a varié de 0.220 à 0.238 mm/min<sup>0.5</sup> avec l'augmentation du niveau de substitution du calcaire de 10 à 20%, alors que le béton contenant le ciment sans ajout a présenté une sorptivité de 0.237 mm/min<sup>0.5</sup>. Ces auteurs ont conclu que l'addition de calcaire affecte d'une manière positive l'absorption de l'eau du béton. Ils ont noté que le coefficient de sorptivité estimé évalue seulement les grands pores capillaires, en raison de la valeur élevée du rapport E/C des bétons étudiés.

#### **II.1.5. Les attaques chimiques des bétons**

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par 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 [Guillon, 2004]. Parmi une multitude de causes de

dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par la carbonatation.

### - 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 (pH= 7) voire acides (pH <7).

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, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et hydroxyde  $\text{OH}^-$  [Adenot et Buil, 1992]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qu'ont permis de confirmer les modélisations du phénomène [Kamali, 2003, Nguyen et al, 2006].

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 [Adenot, 1992], [Carde, 1996], [Kamali, 2003], [Roziere, 2007].

### A- Sources des acides :

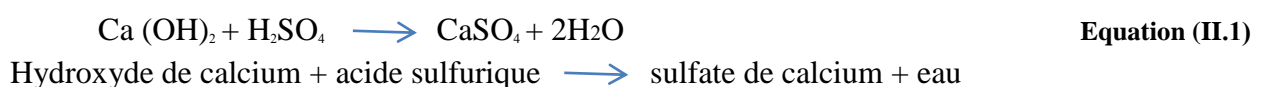
Les milieux acides les plus fréquents sont :

- les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- 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.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

### B - Mécanisme d'attaque

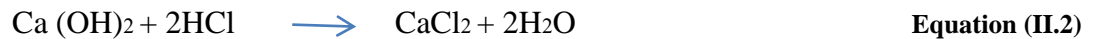
En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

L'acide sulfurique (formule II.1) 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).



L'acide sulfurique donc réagit 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 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) moins soluble de produit de réaction.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique  $\longrightarrow$  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) [Lauer, 1990].

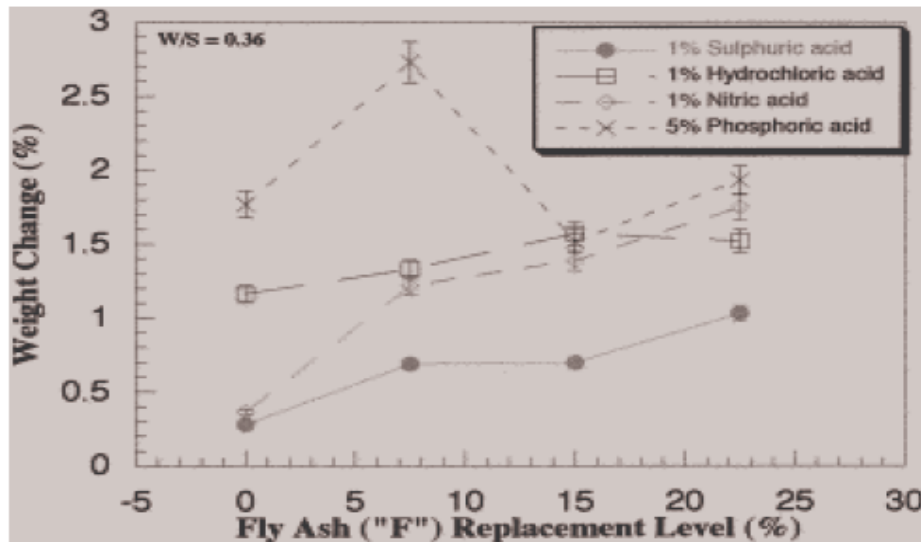
### C- Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons vis-à-vis de l'attaque acide

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 CS- H 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 [Kamali et al, 2003]. 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 [Carde et al, 1996, 1997], [Badoz et al, 2006]. 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 :

Roy et al. (2001) ont étudié l'effet de fumée de silice, méta kaolin, et cendres volantes sur la résistance des mortiers aux agressions acides (Figure II.3). Ils ont trouvé que les mortiers ont été relativement peu affectés par les environnements de 1% d'acide chlorhydrique, de 1% d'acide sulfurique et de 1% d'acide nitrique, mais ces mortiers ont montré une résistance faible à des concentrations acides plus élevées : environnements de 5% d'acide sulfurique, de 5% d'acide acétique et de 5% d'acide phosphorique. La résistance chimique se trouve nettement plus améliorée avec la fumée de silice qu'avec le méta kaolin. A son tour, ce dernier, donne une meilleure résistance qu'avec les cendres volantes et diminue au fur et à mesure que le niveau de substitution augmente du niveau 0 – 10% au niveau 15 – 30%.

Rahmani et Ramzianpour (2008) ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque sulfurique. Leurs résultats (Figure II.4), après 6 mois d'immersion, montrent

une perte de masse de 17,8 % pour le béton à base de filler siliceux, de 18,6% pour l'addition binaire (filler siliceux + fumée de silice) et de 10 % pour le filler siliceux + pouzzolane naturelle. Pour les mortiers, la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire (filler + pouzzolane naturelle) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique.



**Figure II.3.** Pourcentage de perte en masse en fonction du pourcentage de cendre volante des différents mortiers immergés dans les solutions acides [Roy et al. 2001].

Ghrici et al. (2007) 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 (1997) a remarqué que la substitution de ciment par 50 % de cendre volante est très bénéfique en terme la 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.

Serdar et al. (2005) dans son étude sur l'effet d'un grand volume de cendre volante (70 %) sur la résistance des bétons à l'acide sulfurique (Figure II.5) trouvent que, pour les échantillons conservés dans l'eau (WC-WL), la perte de masse a diminué de 5% et de 3,3 % respectivement pour 0 % et 70 % de cendre volante. Pour les échantillons traités par la vapeur d'eau (SC-WL), la perte de masse a diminué de 8.3 % et 1,1% respectivement pour 0 % et 70% de cendre volante.

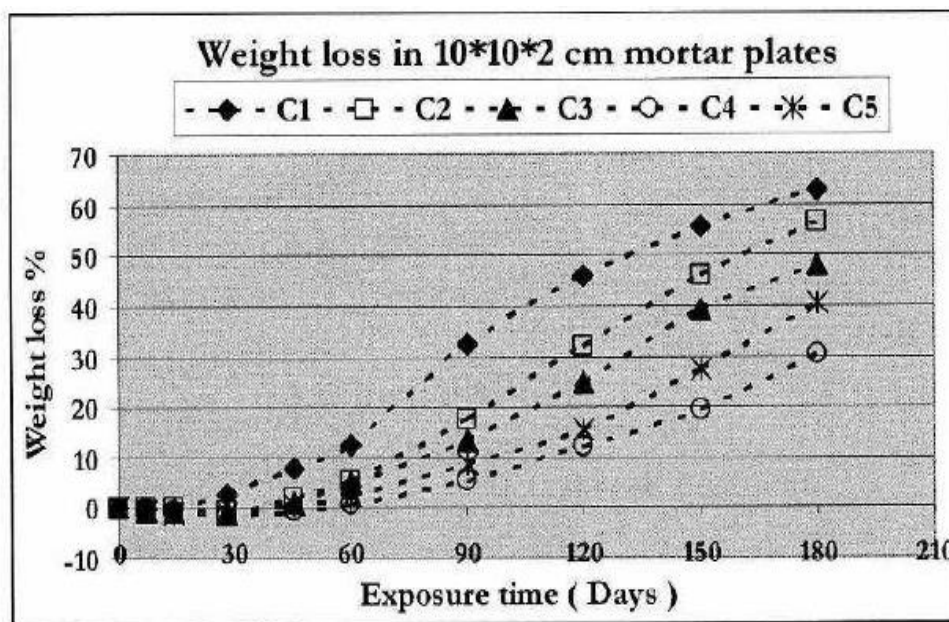


Figure II.4. Perte de masse en fonction de temps d’immersion dans l’acide sulfurique [Rahmani et Ramzaniyanpour, 2008].

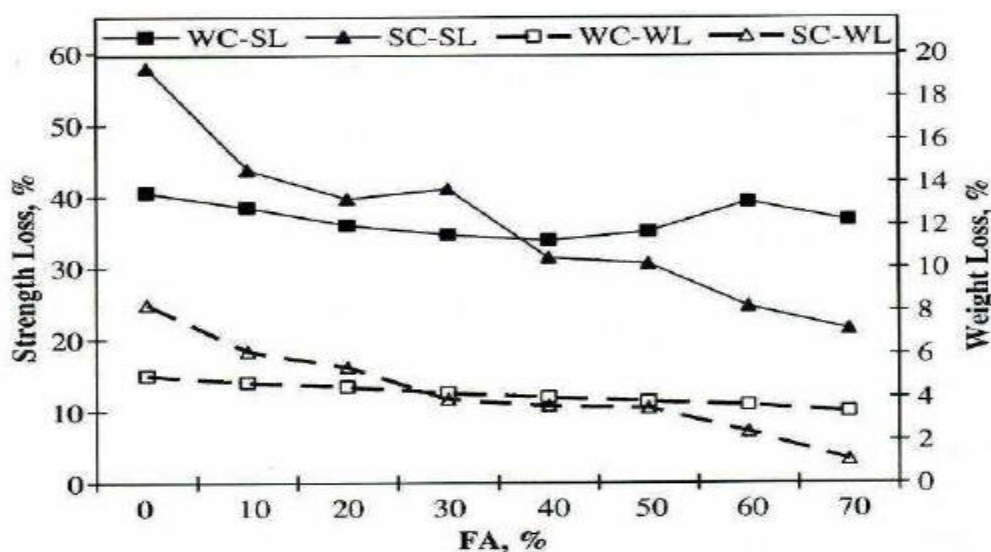


Figure II.5. Perte de masse et perte de résistance des bétons [Serdar et al, 2005]

**- 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 équivalente [Roziere, 2007].

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 C-S-H 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.

### A. Sources des sulfates :

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), on peut rencontrer des concentrations élevées (>5%).

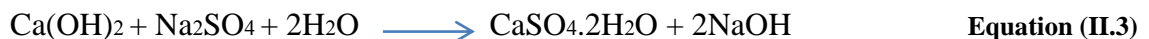
- Afrique du Nord
- Prairies Canadiennes
- Région parisienne :  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (58g/l),  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (194g/l),  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (440g/l) et  $\text{CaSO}_4$  (2,1g/l)

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions  $\text{SO}_4^{-2}$ . 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).

### B. Mécanisme d'attaque

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et anhydrite  $\text{CaSO}_4$ ), et des sulfates de magnésium (epsomite  $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure. Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [GCI, 2009] :

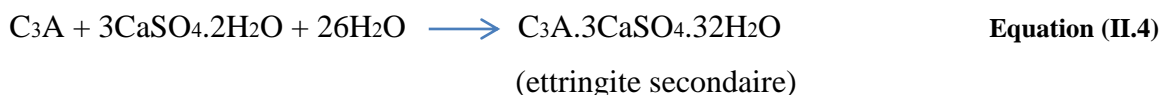
#### -Formation du gypse secondaire:



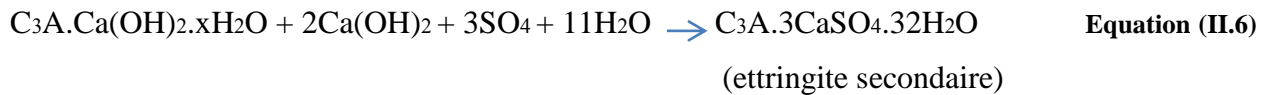
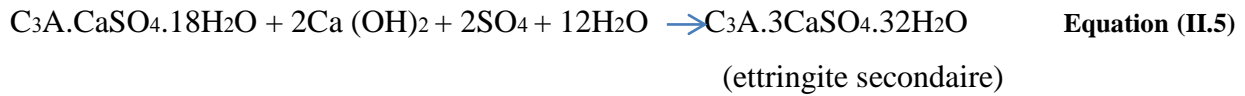
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'ya pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et la décalcification du C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment [Mehta, 93].

#### - Formation d'ettringite secondaire :

a) À partir du  $\text{C}_3\text{A}$  anhydre résiduel:



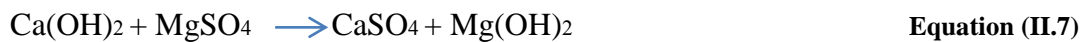
b) À partir des aluminates hydratés:



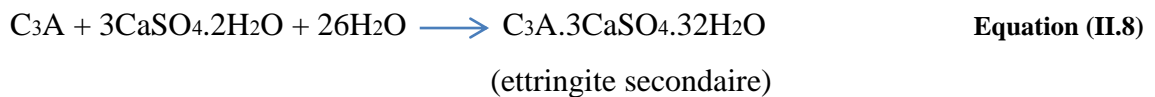
Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium [Golp et Taylor, 1995].

Le sulfate de magnésium réagit par double action :

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  $\text{Ca}^{++}$  par les ions  $\text{Mg}^{++}$  dans les C-S-H :



Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions  $\text{Mg}^{2+}$  peuvent réagir avec les ions  $\text{OH}^-$  et former de la brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les C-S-H. Le silicate de magnésium hydraté (M-S-H) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [Tagnit-Hamou et Petrov, 2000].

### C. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons vis-à-vis des attaques sulfates

Les fillers calcaires, dans les environnements sulfatiques, les normes sur les ciments n'autorisent que l'introduction de petites quantités (moins de 5 %) de constituants secondaires, tels que le carbonate de calcium (composant principal du calcaire), dans les ciments. En effet, Tosun et al. (2009) ont étudié l'influence de substitution de ciment par le filler calcaire sur la

résistance des mortiers dans un environnement sulfaté  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{MgSO}_4$ . Ils ont montré que la substitution de ciment par le filler calcaire affecte négativement la résistance des mortiers vis-à-vis de l'attaque de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium, particulièrement à des pourcentages élevés de substitution.

Mulanga et al. (2003) ont substitué le ciment Portland par des cendres volantes et ils ont suivi l'effet de cet ajout sur la résistance des mortiers aux attaques chimiques sulfatiques. Ils ont trouvé après 84 jours d'immersion que le gonflement des échantillons de mortiers contenant 30%, 40% et 50% de cendres volantes est inférieur à celui du mortier témoin (sans cendre volante). Selon les résultats de Mary-Dippe (2006), les cendres volantes dans les bétons améliorent souvent sensiblement la résistance aux sulfates à partir d'un taux de substitution de 30 %.

Mangat et Khatib (1995) ont étudié l'influence de la cendre volante, de la fumée de silice et du laitier sur la résistance des bétons aux sulfates. Ils ont remarqué une amélioration significative dans le cas d'une substitution d'une partie de ciment Portland ordinaire par 22 et 32% de cendres volantes, par 5 à 15% de fumée de silice et par 80% de laitier granulé de haut fourneau [Mangat et Khatib, 1995].

Yeginobali et Dilek ont évalué la résistance aux deux types de fumées de silice, des fours de ferrosilicium ( $\text{FeSi}$ ) et de silicoferrochromium ( $\text{FeSiCr}$ ) en utilisant deux méthodes d'essais ASTM C452 (mesure de l'expansion des barres de mortier) et ASTM C1012 (mesure de changement de longueur des barres de mortier). Ils ont utilisé des spécimens de mortier qui ont été immergés séparément dans des solutions de 10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et 8.4%  $\text{MgSO}_4$  [A. Yeginobali, 1995]. Après avoir été soumis au changement de masse périodique, ces spécimens ont été testés à la compression à l'âge de 60 semaines pour évaluer leur détérioration relative vis-à-vis des spécimens gardés dans l'eau. Ils ont trouvé que les spécimens contenant la fumée de silice ont eu un plus petit changement de masse. Pour les spécimens immergés dans la solution 8.4%  $\text{MgSO}_4$  la perte de masse s'est produite presque au début.

L'addition de fumée de silice a augmenté l'importance des pertes masse. Ils ont trouvé aussi, selon les valeurs de la résistance à 60 semaines (tableau II.2), que les spécimens immergés dans l'eau et dans les solutions de sulfate, la fumée de silice a encore eu un effet bénéfique dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et un effet néfaste dans la solution  $\text{MgSO}_4$ .

S.A. Hartshorn et coll. [S. A. Hartshorn, 2002], identifient la présence de thaumasite après 126 jours d'exposition dans 1.8% de solution de  $\text{MgSO}_4$  d'un mortier de ciment Portland avec ajout de 35% de calcaire. En plus de la thaumasite ils trouvent aussi le gypse et la brucite sur la couche de surface ceci est révélé par les images électroniques, les rayons X et la DSC (analyse calorimétrique différentielle).

Tableau II.2 : Résistance à la compression des spécimens [A. Yeginobali ,1995]

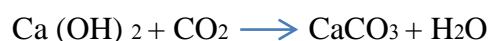
Type de Ciments +FS	Rc <sub>28j</sub> (MPa)	Rc (60 semaines) (MPa)		
		Dans l'eau	10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	8.4% MgSO <sub>4</sub>
NPC1+0%	36.5	64.8	52.5	57.3
NPC1+8%	42.5	66.7	60.8	40.9
NPC1+15%	53.5	73.2	66.9	30.1
NPC1+8%	38.3	56.9	49.2	40.8
NPC2+15%	38.3	74.1	64.4	40.6

Selon l'étude de Torres et coll [D.M.Mulenga, 2003], l'incorporation des fillers calcaires comme substitution au ciment sans ajout a affecté négativement la résistance au sulfate de magnésium des éprouvettes de mortiers. En augmentant le pourcentage de substitution, le prisme de mortier est plus affecté par rapport au prisme contenant du ciment sans ajout. Selon Torres, ce comportement est dû à la formation de la thaumasite qui est très importante dans les ciments contenant des fines calcaires. Les analyses aux rayons X ont montré l'accroissement du taux de la thaumasite en fonction de la quantité de fillers calcaire introduite.

Une étude expérimentale de S.T. Lee et coll. [S. T. Lee et al ,2005] a montré que la fumée de silice substituée à une partie de ciment a un effet bénéfique sur la perte de résistance due à l'attaque par les sulfates. L'incorporation de 5 à 10% de la fumée de silice comme substitution au ciment donne de meilleurs résultats de la résistance de la pâte de ciment durcie dus à l'attaque des sulfates. Ils ont traité l'effet de l'ajout de la fumée de silice sur la résistance des mortiers dans des environnements sulfatiques ; le sulfate de sodium et le sulfate de magnésium. Les différentes compositions des ciments sont : OPC (ciment Portland ordinaire) sans ajout et OPC avec 5%, 10%et 15% de fumée de silice. Ils ont conclu que le ciment avec la fumée de silice comme ajout présente moins de perte de résistance que le ciment sans ajout.

### II.1.6. La carbonatation

C'est une réaction entre le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) existant soit en phase gazeuse, soit par suite de solubilité dans l'eau (eaux pluviales) avec la chaux (Ca(OH)<sub>2</sub>) libérée lors de l'hydratation des silicates bicalcique (C<sub>2</sub>S) et tricalcique (C<sub>3</sub>S) pour former le carbonate du calcium(CaCO<sub>3</sub>) (appelé aussi calcite).



Equation (II.10)

Cette réaction n'est pas en elle-même pathologique et doit être considérée comme une évolution normale du béton. Cependant, elle consomme peu à peu la réserve d'alcalinité du milieu saturé par la chaux, qui a un PH initial compris entre 12 et 13, et évolue vers la neutralité (PH ~ 9). Conséquence, l'alcalinité n'est plus capable de maintenir la passivité du film d'oxyde. Une telle situation augmente considérablement la vulnérabilité des armatures aux phénomènes de corrosion, en particulier si des facteurs aggravants (sels, chlorures, eaux etc.) se trouvent présents. La carbonatation atmosphérique dégrade les bétons armés et est surtout responsable de la mise à nu de ses armatures en acier. La carbonatation du béton entraîne des problèmes de résistance sur les structures en béton armé. Les barres d'acier, censées garantir cette résistance, gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage, les aciers sont alors mis à nu.

### **II.1.7. Cycles de gel-dégel**

Les bétons à hautes performances correctement formulés, résistant aux cycles gel- dégel grâce à leur résistance mécanique élevée. La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage en présence de sels de déverglaçage. Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel /dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air. Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraîneur d'air est généralement nécessaire si E/C est supérieur à 0.32 [Source, *Les Bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre 'CIM béton', France 2003*].

### **II.1.8. L'alcali réaction**

La réaction alcali silice est une pathologie des bétons qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement d'ouvrages atteints qui entraînent la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux [A. M. Boddy et al ,2003], [M. H. Shehata, 2000].

Il existe trois types de réactions alcali granulats : La réaction alcali carbonate: elle implique des granulats contenant des inclusions argileuses, le mécanisme de gonflement est lié à l'absorption d'eau des argiles, La réaction alcali silicate: elle est semblable à la réaction alcali silice mais de cinétique plus lente, elle est très rare et la réaction alcali silice: il s'agit de la plus courante, surtout si l'environnement est fortement humide et la teneur en alcalis du béton est élevée.

### II.1.9. Résistance à l'abrasion

Très bonne, non seulement en raison de la grande résistance du béton, mais aussi de la bonne adhérence entre les gros granulats et la matrice cimentaire, ce qui préserve la surface du béton d'une usure différentielle.

### II.1.10. Résistance au feu

Le BHP a une moins bonne résistance au feu que les bétons usuels parce que sa très faible perméabilité ne permet pas la sortie de la vapeur provenant de l'eau de la pâte de ciment hydratée. Plusieurs solutions ont été mises en avant pour améliorer la résistance au feu d'un BHP [Phan, 1997]. Une option particulièrement astucieuse consiste à ajouter des fibres de polypropylène dans un BHP de façon que ces fibres fondent lorsque la température de béton s'élève et qui peut créer des canaux par où la vapeur d'eau qui s'y développe puisse être éliminée (Jansen et al, 1996). La pression de la vapeur d'eau qui s'établit juste derrière la surface du béton exposée au feu peut aussi être réduite de façon significative par la tendance des BHP à écailler sous l'effet de feu, en effet la disparition des fibres de plastique augmente la porosité d'un BHP.

## Conclusion

La durabilité du béton peut être définie, dans le cas le plus général, comme la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et ses performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisante pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de service existantes.

Les principaux mécanismes de dégradation du béton sont :

- Les altérations chimiques purement externes (solution acide, eaux contenant des ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , eau de mer, ...etc.) qui sont étroitement liées aux actions physico-chimiques et mécaniques. En pratique, il n'est pas possible de séparer ces actions qui agissent simultanément ou successivement et de ne tenir compte que de l'une d'entre elles en négligeant les autres. La durabilité soulève donc des problèmes d'une grande complexité.

D'après l'étude de Grandet (1990), le comportement global du BHP vis-à-vis des ions agressifs, lorsqu'il n'est pas fissuré devrait être satisfaisante grâce à une faible teneur en chaux et sa faible perméabilité.

- Les altérations internes, dues à la formulation de gel de silicate expansif au cours des réactions d'hydratations des alcalins ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ).

La nature et la qualité du liant jouant un rôle très important dans la durabilité. Dans ce sens de nombreuses recherches ont montré qu'il y'a une amélioration de la résistance des bétons à hautes performances aux agressions dues à la réaction alcalis – granulats.

Cette amélioration est liée à :

- ✓ Une structure poreuses fine et discontinue qui réduit la diffusion ionique au travers la matrice et de l'interface pâte du ciment – granulats.
- ✓ Une réduction de la teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  par l'effet pouzzolanique des ultrafins.
- ✓ Une réduction des ions  $\text{OH}^-$  dans la solution interstitielle [C. Lévy, 1990].
- ✓ Les altérations dues à la carbonatation du béton qui peut avoir soit un effet bénéfique par l'augmentation de la résistance en compression (couche superficielle dense de microcristaux de calcite) soit un effet néfaste par la diminution de PH de la solution interstitielle et la dépassivation des armatures.

# *État de connaissances sur les granulats et les ajouts cimentaires*

*Les déchets minéraux (sable de carrière, laitier de haut fourneau et les déchets de briques) représentent les résidus qui pourraient être utilisés avec un traitement minimal, en grande partie en tant que matériau de construction, minéraux industriels de faible valeur. L'utilisation des déchets solides industriels tels que le sable de carrière, il est possible d'augmenter la fabrication de matériaux de construction, de limiter l'utilisation de granulats naturels et de valoriser les déchets produits offrant une solution précieuse de la protection de l'environnement [B. Demirel,2010],[ SA. Abo-El-Enein, 2014]. Les déchets de carrière algérienne à de nombreux problèmes environnementaux (déchets minéraux) ainsi que des considérations économiques. En utilisant du sable concassé comme un remplacement partiel des agrégats naturels fins de mortier ou de béton est très bénéfique. Deux types de granulats fins (concassé et sables dunaires) différents, ont été utilisés dans cette enquête.*

### *A : Etat de connaissances actuel sur les granulats*

#### **III.1. Définition des granulats**

Les granulats occupent une grande partie du volume du béton (60 à 75%) et sont la source de sa résistance mécanique [Dreux, 2002]. C'est un matériau inerte à température ambiante (sauf cas pathologiques, e.g. réaction alcali-granat). Les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus possible de vides dans le béton. C'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs classes granulaires dans un même béton qui sont les sables, les gravillons et les graviers. Les granulats sont généralement d'origine naturelle. Ils proviennent essentiellement de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzites, ou de roches magmatiques telles que les basaltes, les granites ou les porphyres. Indépendamment de leur nature, les granulats peuvent être alluvionnaires (dits granulats roulés) ou de carrière (dits granulats concassés). L'origine des granulats peut être également artificielle (d'origine minérale, transformée, e.g. le schiste expansé ou les granulats de laitier) ou issue de recyclage (e.g. béton concassé...).

Pour obtenir un béton ayant de bonnes caractéristiques, plusieurs paramètres entrent en jeu dans le choix des granulats comme la qualité (e.g. mécanique, physico-chimique, propreté et etc.), la minéralogie, la forme des granulats et une granulométrie appropriée associée. Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m<sup>3</sup>

et léger si elle est inférieure à  $2 \text{ t/m}^3$ . Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration. Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques. Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple : la masse volumique réelle ; l'absorption d'eau et la porosité ; la sensibilité au gel ; la résistance à la fragmentation et au polissage et la gélivité [Source, [www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.30-41.pdf](http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.30-41.pdf)].

Des caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier : la granularité ; la forme (aplatissement) et la propreté des sables. Les caractéristiques des granulats sont fonction de leurs familles (gravillons, sables, fillers) et font l'objet de méthode de détermination adaptée.



**Figure III.1.** Différent type des granulats  
[Source : [www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.30-41.pdf](http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.30-41.pdf)]

### **III.1.1. Origine des granulats**

Les granulats destinés au béton proviennent de trois sources, soit par les carrières de roches massives ou les gisements alluvionnaires ou bien par les productions de granulats artificiels légers (laitier expansé, argile expansée, schiste expansé, etc.).

Comme les procédés d'identification peuvent varier suivant la source dont les granulats proviennent, on examinera successivement ces trois sources. Trois grandes catégories de roches existent dans la nature :

- ✓ Les roches éruptives qui proviennent des profondeurs de l'écorce terrestre ;
- ✓ Les roches métamorphiques qui sont partiellement ou complètement recristallisées sous l'effet de pression et de température élevées, ces transformations leur donnant souvent une structure orientée ;
- ✓ Les roches sédimentaires qui proviennent de la consolidation de sédiments ou de la précipitation de minéraux en solution. Elles ont une origine détritique chimique ou organique.

De même que la composition minéralogique, la structure des roches est un élément important dans leur classification, puisqu'elle constitue une indication sur la manière dont les assemblages de minéraux sont réalisés dans la roche (par exemple, la composition minéralogique d'un gneiss est à peu près la même que celle du granite, mais sa structure est en lit alors que le granite est grenu). On peut distinguer cinq structures de base suivant l'ordre de grandeur de la

dimension de cristaux :

- Macrogrenue.....10 mm
- Microgrenue.....0,1 mm
- Vitreuse.....<1 µm.
- Grenue.....1 mm
- Cryptocristalline.....0,01 mm

Quelques termes supplémentaires sont nécessaires pour préciser certaines particularités de la structure; on dira qu'une structure est :

**Porphyrique** lorsqu'elle est composée de cristaux millimétriques ou centimétriques enrobés dans une matrice plus fine ;

**Orientée** lorsqu'elle est anisotrope à cause de l'orientation préférentielle des cristaux ;

**Schisteuse** si elle est très orientée ;

**Litée** si elle présente des alternances de couches minéralogiquement différentes ;

**Fissurée** si un réseau de fissures parcourt la roche.

Lors de la sélection des granulats, il est nécessaire de connaître la texture et la classe chimique de la roche. Un granulat à texture vitreuse, issu d'une roche magmatique acide, peut favoriser le développement des réactions alcalis-silice. De même, la surface de contact entre les minéraux dans une roche constitue une surface de faiblesse où peut se développer une microfissure interne. Habituellement, cette microfissuration influence considérablement le comportement mécanique de cette roche.

### III.2. Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être naturel, artificiel ou recyclé.

**Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

**Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

**Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments [source : [www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire)].

### III.3. Caractéristiques des granulats

#### 1. Texture et forme des granulats

Les caractéristiques d'aspect des granulats sont important plus particulièrement les formes du grain et l'état de leur surface. Dans le béton les grains d'un granulat sont liés par la pâte de ciment qui constitue une matrice pour ces derniers. L'adhérence pâte granulat est alors un facteur important du point de vue résistances mécaniques du béton. On conçoit donc que l'état de surface des granulats, surtout du sable est un paramètre qui influe beaucoup sur les performances physicochimiques des bétons. Par ailleurs l'état de surface d'un granulat n'influe pas uniquement sur l'adhérence, mais également il y a une incidence sur la maniabilité du béton.

*Forme des granulats:* La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques:

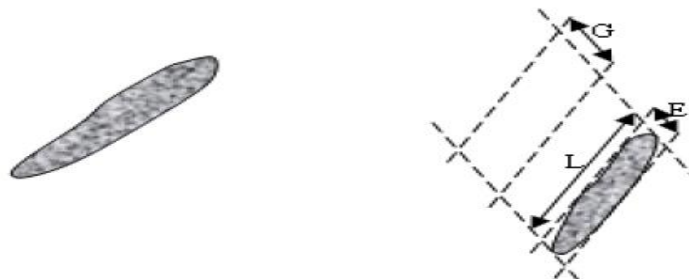
- La longueur L, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat [Source, [http:// www.la.refer.org/materiaux/default.html](http://www.la.refer.org/materiaux/default.html)].

*Coefficient d'aplatissement:* Est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation:

$$\frac{G}{E} > 1.58 \quad \text{Equation (III.1)}$$

Dans les mêmes conditions  $L \leq G \leq E$ , on peut déterminer aussi:

- L'indice d'allongement  $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$  Equation (III.2)
- L'indice d'aplatissement  $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$  Equation (III.3)



**Figure III.2.** Forme d'un granulat

[Source, [http:// www.la.refer.org/materiaux/default.html](http://www.la.refer.org/materiaux/default.html)]

En générale la texture et la forme géométrique des granulats se distinguent par deux catégories essentielles :

- *Granulats roulés*: ils sont plus faciles à mettre en place, ne nécessitent pas de moyens de serrage importants. Glissent bien entre les armatures et conviennent particulièrement au béton armé.
- *Granulats concassés*: ils donnent lieu à des bétons raides à mise en place difficile. Par contre, ils adhèrent bien à la pâte de ciment et procurent au béton une plus grande résistance notamment à la traction.

## 2. Granularité

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant. Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains). La mesure de la granularité se nomme granulométrie, on déduit sa classe granulaire en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimée par la dénomination d/D, des dimensions exprimées en millimètre [Source, <http://www.la.refer.org/materiaux/default.html>].

## 3. Caractéristiques physico-chimiques

### ✓ Propreté des granulats

Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats- pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.

Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau). Dans le cas des sables, la propreté (ES) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau.

Il faut souligner l'importance de la propreté des granulats sur la qualité du béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant à la mise en œuvre du béton qu'à ses performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats. D'autres impuretés telles que les particules organiques sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement. Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. On peut classer les impuretés en deux catégories [Source, [fr.scribd.com/doc/297077668/Les-granulats](http://fr.scribd.com/doc/297077668/Les-granulats)] :

### ✓ Impuretés prohibées

- Particules de carbone, de bois, ou de leurs résidus (coke, cendre,.....etc.)

- Pour les gravillons et pierres cassées: une pellicule adhérente d'argile ou d'un corps (farineux) analogue isolerait le granulat du liant : cette pellicule est donc prohibée. [R. Lanchon, 1993].

✓ **Impuretés tolérées:**

Éléments très fins et/ou solubles: Ne peuvent être tolérés que s'ils sont en grains de moins de  $0.5 \text{ cm}^3$  et régulièrement répartis dans la masse du granulat. Les quantités limitées sont déterminées par deux voies:

- pour les sables: l'essai d'Equivalent de sable

- pour tous les granulats: par lavage et décantation, du pourcentage en masse de ces éléments fins, qui ne doit pas dépasser 5 %.

Matières organiques: Ce sont des matières très fines. On emploie une méthode indirecte, l'essai colorimétrique.

Sulfates et sulfures: Les sulfates (le gypse) et les sulfures (pyrites) provoquent la désagrégation du béton par augmentation du volume des parties qui les contiennent. La teneur qui ne doit pas dépasser 1%.en masse.

Les quantités limitées sont déterminées par: l'essai d'Equivalent de sable, et la détermination du pourcentage d'éléments fins par lavage et décantation et l'essai colorimétrique.

#### 4. Caractéristiques physiques et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées par des essais visant à reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats. Elles sont donc spécifiées en fonction de leur emploi.

✓ **Résistance à l'usure des gravillons**

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval  $M_{DE}$  qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient  $M_{DE}$  est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

✓ **Porosité**

La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.

✓ **Résistance à la fragmentation des gravillons**

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient  $L_A$  est faible, plus la résistance des gravillons est élevé.

✓ **Coefficient d'absorption d'eau**

Le coefficient d'absorption d'eau  $A_b$  représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

✓ **Masse volumique en vrac ou apparente**

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre  $1400 \text{ kg/m}^3$  et  $1600 \text{ kg/m}^3$  pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée: de  $2500$  à  $2600 \text{ kg/m}^3$ .

✓ **Résistance des gravillons au gel-dégel**

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné).

### 5. Caractéristiques chimiques

✓ **Teneur en ions chlorures**

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

✓ **Réactivités aux alcalis**

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).

✓ **Teneur en soufre et en sulfates**

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates ( $\text{SO}_3$ ) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %. Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton [Source, [www.academia.edu/7065092/Chapitre\\_002\\_-\\_Les\\_Granulats](http://www.academia.edu/7065092/Chapitre_002_-_Les_Granulats)]

## III.4. Les caractéristiques géométriques et mécaniques des granulats

### - les caractéristiques géométriques

Généralement, l'usage des granulats roulés dans la technologie classique du béton est préféré à celui des granulats concassés, car ils sont supposés conférer une meilleure ouvrabilité au béton. En revanche, les granulats concassés sont réputés développer une meilleure liaison avec la pâte de ciment [Akçaoglu et al. 2002], [Munoz et al, 2010].

La forme et l'étendue granulaire des granulats vont influencer la compacité du mélange granulaire. La forme peut être définie par les indices d'allongement et d'aplatissement dépendant des dimensions géométriques d'un granulat. Ainsi les granulats peuvent être plus ou moins ronds, sous forme de plaquettes ou d'aiguilles, anguleux ...etc.).

L'étendue granulaire va être caractérisée par la granulométrie qui représente la distribution de taille des granulats utilisés dans un béton donné. Cette distribution doit permettre une réduction du volume des vides afin d'améliorer la compacité du béton. Dans cette optique, cette granulométrie doit donc être optimisée en utilisant par exemple la méthode de Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1995] ou d'autres approches plus récentes [F. Larrard, 2000].

La rugosité des granulats va également influencer la compacité du mélange granulaire, ainsi que l'adhérence du granulat à la pâte de ciment (de par l'auréole de transition).

#### - *Caractéristiques mécaniques des granulats*

Des valeurs indicatives de densité et de résistances à la compression mesurées sur éprouvettes cylindriques ou cubiques de différents types de roches sont présentées dans le Tableau III.1 [Letourneur et Michel, 1971]. Cependant, les valeurs citées peuvent varier, pour une même nature minéralogique, en fonction du degré d'altération de la roche, de la porosité du granulat, de la forme et de l'angularité des grains constitutifs, etc.

Par ailleurs, la plupart des caractéristiques mécaniques des granulats présentées dans la littérature ne sont pas déterminées à partir des essais usuels de traction ou de compression que l'on effectue sur des éprouvettes de béton. Il existe des essais spécifiques tentant de reproduire certaines sollicitations propres à l'utilisation des granulats. Ainsi, l'essai Micro-Deval consiste à reproduire, dans un cylindre de rotation, des phénomènes d'usure. L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Des valeurs faibles de coefficient de Micro-Deval et de Los Angeles sont révélatrices de résistances élevées à l'usure.

Le Tableau III.1 permet de comparer les caractéristiques mécaniques des granulats calcaires, granites et basaltes. Les coefficients Micro-Deval et Los Angeles du basalte et du granite traduisent une grande résistance à l'usure et à la fragmentation en liaison avec leur forte densité. Au contraire, les calcaires qui présentent des valeurs importantes du coefficient de Los Angeles se caractérisent par une forte sensibilité à l'usure.

**Tableau III.1:** Densité et résistance à la compression mesurée par des essais de laboratoire [Letourneur et Michel, 1971]

Nature	Coefficient Micro-Deval	Coefficient Los Angeles
Granite	10-15	15-20
Basalte	5-25	18-28
Calcaire	15-80	20-80

--	--	--

La résistance mécanique des granulats n'intervient pas directement sur la porosité et la performance mécanique du béton, mais elle peut influencer indirectement : un gravillon provenant d'un calcaire tendre contient toujours des fines dues au concassage et aux opérations de

Nature	Densité	Résistance à l'écrasement (MPa)
<b>Roches éruptives</b>		
Granites, syénites	2,62-2,85	160-250
Diorites, gabbros	2,85-3,05	170-300
Porphyres	2,58-2,83	130-240
Basaltes	3,00-3,15	180-400
<b>Roches sédimentaires</b>		
Quartzites	2,64	225-360
Grès, quartzeux	2,64-2,72	60,8-102,5

chargement, transport, déchargement et parfois au malaxage lorsqu'on utilise un malaxeur à pâles mobiles [Baron et Sauterey, 1982]. Les roches tendres (ou mi-dures) concernées, les calcaires, sont d'autant plus poreuses qu'elles sont plus tendres et, souvent, la dureté et la porosité varient fortement d'un point à l'autre de la carrière. Enfin, on peut également estimer que les granulats de mauvaise qualité, de module d'élasticité faible, de porosité importante, peuvent entraîner des déformations différées.

**Tableau III.2:** Caractéristiques mécaniques des granulats [Baron et Sauterey, 1982]

Calcaires compacts, dolomies	2,70-2,90	70-180
Schistes	1,80-2,70	20-80
<b>Roches métamorphiques</b>		35-110
Micaschistes	2,70-3,03	
Gneiss	2,59-3,06	160-280
Amphibolites	2,75-3,15	170-280
Serpentines	2,62-2,78	140-250

### III.5. Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés du béton

**Influence de la granulométrie du sable :** La granulométrie du sable à une grande importance sur les qualités du béton. Une bonne granulométrie permet d'économiser le liant sans réduire la résistance. La distribution granulométrique et la surface spécifique sont liées l'une de l'autre; si la taille de grains augmente, la surface spécifique globale et la demande en eau diminue. Donc plus le sable est riche en élément grossiers, plus la maniabilité s'améliore.

**Influence de la propreté des sables :** La présence d'éléments fins dans un granulat améliore la maniabilité du béton. Un Equivalent de sable très élevé correspond donc à un sable donnant un béton «raid". Auquel il faudra ajouter de l'eau pour obtenir une maniabilité satisfaisante; d'où une valeur faible de C/E, et une résistance mécanique diminuée. La perte de résistance due à l'eau ajoutée pour la maniabilité est plus grande que le gain résultant de l'absence d'éléments fins. Et une valeur maximale de  $E_s$  n'est pas la condition optimale. [R. Lanchon, 1993].

**Influence de rapport G/S (gravier/sable) :** (G/S) exprime le rapport volumique entre le dosage en gravier (G) et le dosage en sable(S). Au cours des nombreuses études réalisées sur la composition des bétons, ce qui surprend, c'est l'influence relativement faible de la composition granulométrique du béton, tant en ce qui concerne les proportions relatives de sable et de gravier (G/S) que la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique. Les appréciations concernant cette influence sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le Tableau III.3.

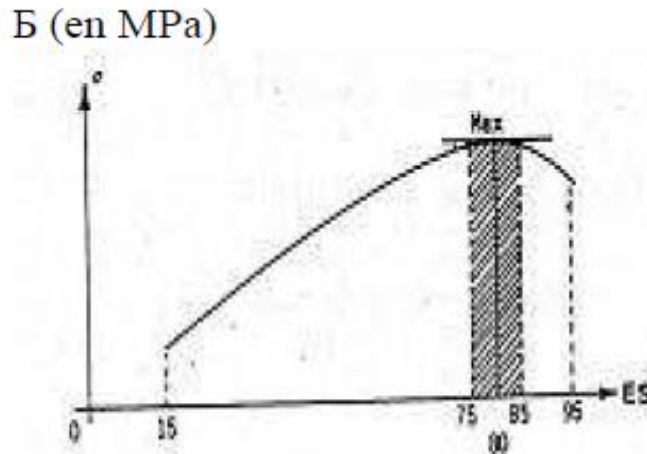


Figure III.3. Résistance du béton en fonction de l'équivalent de sable (ES) [R. Lanchon, 1993].

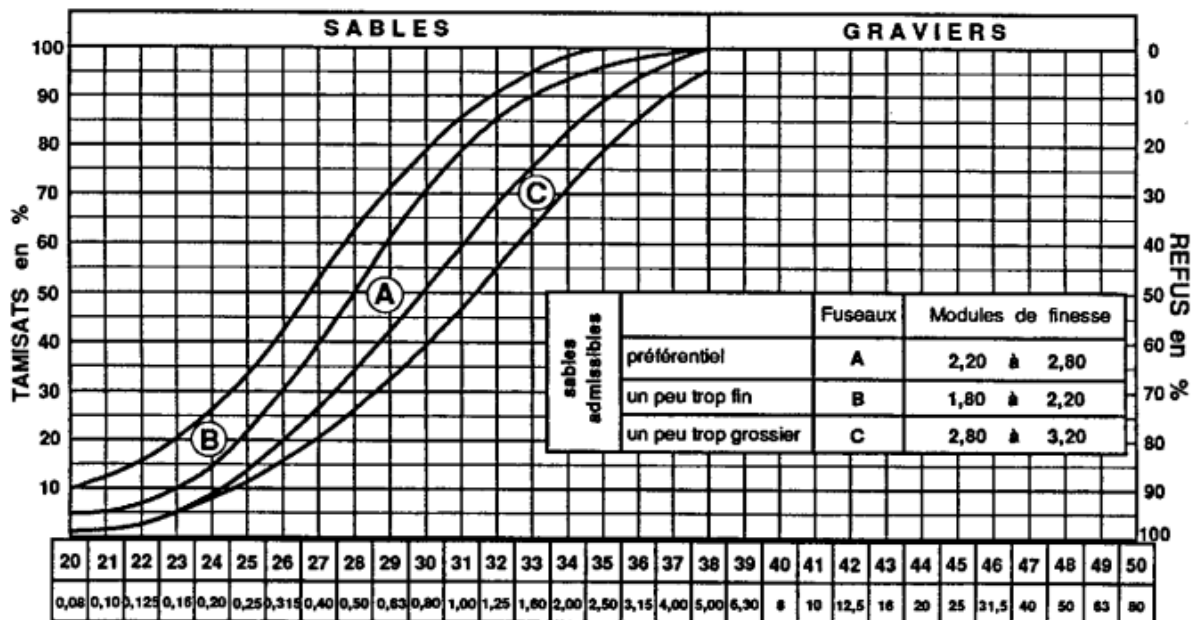


Figure III.4. Fuseaux préférentiels du sable admissible [Source, Z. Benghazi]

**Influence du module de finesse du sable :** Le module de finesse  $M_f$  est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse  $M_f$  compris entre 2,2 et 2,8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Fuseau A : Pour  $2.2 < M_f < 2.8$  le sable est utilisé si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Fuseau B : Pour  $1.8 < M_f < 2.2$  le sable est utilisé si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

Fuseau C : Pour  $2.8 < M_f < 3.2$  le sable est utilisé si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.

- Pour  $M_f > 3.2$  le sable est à rejeter.

**Tableau III.3:** Influence du rapport G/S. [CIMbéton ,1997]

Principales qualités	Constatations	
	G/S élevé par rapport à G/S faible	Granularité continue par rapport à granularité discontinue
Ouvrabilité	Un peu moins bonne si : G/S >2.2	moins bonne si : G/S >2.2
Résistance à la compression	Meilleures si G/S >2.2	Légèrement supérieure
compacité	Légèrement plus élevé si G/S>2.2	Un peu plus élevé

Pour des raisons d'ouvrabilité, le rapport G/S ne doit pas dépasser 2.00 à 2.2 pour les bétons courants.

### **B : Etat de connaissances actuel sur les ajouts cimentaires**

#### **a. Rappel sur le laitier de haut fourneau**

Vers 1818, L. Vicat avait déjà mentionné la possibilité d'utiliser du laitier en cimenterie, mais il faut attendre 1862 pour qu'Emil Langen démontre qu'un mélange de laitier broyé et de chaux donnait naissance à un liant hydraulique. La fabrication industrielle du ciment de laitier commença en Allemagne en 1882, grâce à G. Prussing, ce n'est que beaucoup plus tard et vers 1928 que ces ciments apparaissent en France.

Cependant, bien avant cette date, les ciments portlands additionnés de laitier et les ciments de laitiers à la chaux furent employés. Comme par exemple en 1900 pour la construction du métro à paris [Venuat, 1984]. Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques contenant des teneurs variées en laitier (ciments normalisés où des ciments spéciaux).

Les laitiers ont des propriétés très différentes suivant la composition chimique, et l'état plus au moins cristallisé, où plus au moins vitreux (teneur en verre) résultant du traitement effectué, et suivant la vitesse de refroidissement les laitiers de haut fourneau acquièrent des propriétés très différentes.

Le laitier granulé de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable. Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [Shi et al, 1998]. Shi et al. (1998) montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le super plastifiant. Il est donc possible que la demande en super plastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil de cisaillement.

**Le laitier** : Le laitier du haut fourneau est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke se trouvent dans le laitier de haut fourneau. On ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie du diagramme  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Zone où la température de fusion de ces trois oxydes est parmi les plus basses.

Le laitier de haut fourneau est composé essentiellement de quatre composants : Chaux ( $\text{CaO}$ ), magnésie ( $\text{MgO}$ ), silice ( $\text{SiO}_2$ ) et alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), selon le mode de refroidissement adopté, on distingue deux formes minéralogiques différentes de laitier :

- **le laitier vitrifié** (granulé) obtenu par refroidissement rapide par trempe : possède une structure vitreuse riche en énergie lui conférant une hydraulicité latente (figure III.5).

- **le laitier cristallisé** obtenu par refroidissement lent : lui à une structure minéralogique cristalline stable et son hydraulicité si elle existe n'est que modeste. Son utilisation découle de ses propriétés, c'est un granulat. Cette différence, du point de vue cristallographique et chimique conditionne les propriétés des matériaux obtenus et donc leur utilisation. Ce refroidissement rapide ou trempe, est obtenu par granulation on boulettage. Ce fût en 1853 que commença la granulation du laitier de haut fourneau, afin de produire un matériel facile à transporter. On formait un sable plus ou moins vitreux [L. Alexandre ,1988]

En 1862, Emile Langen découvrit que ce produit avait certaines propriétés hydrauliques. Par la suite, les procédés de granulation furent améliorés en vue d'obtenir des laitiers de haut fourneau granulés à haute teneur en verre dessinés à la préparation des ciments de laitiers. Cette teneur en verre, dans les laitiers modernes pour cimenterie est de 90% en poids et même davantage. Le laitier ainsi vitrifié, présente une structure vitreuse, irrégulière et riche en énergie.



**Figure III. 5.** Laitier cristallisé et laitier vitrifié (granulé) de haut fourneau



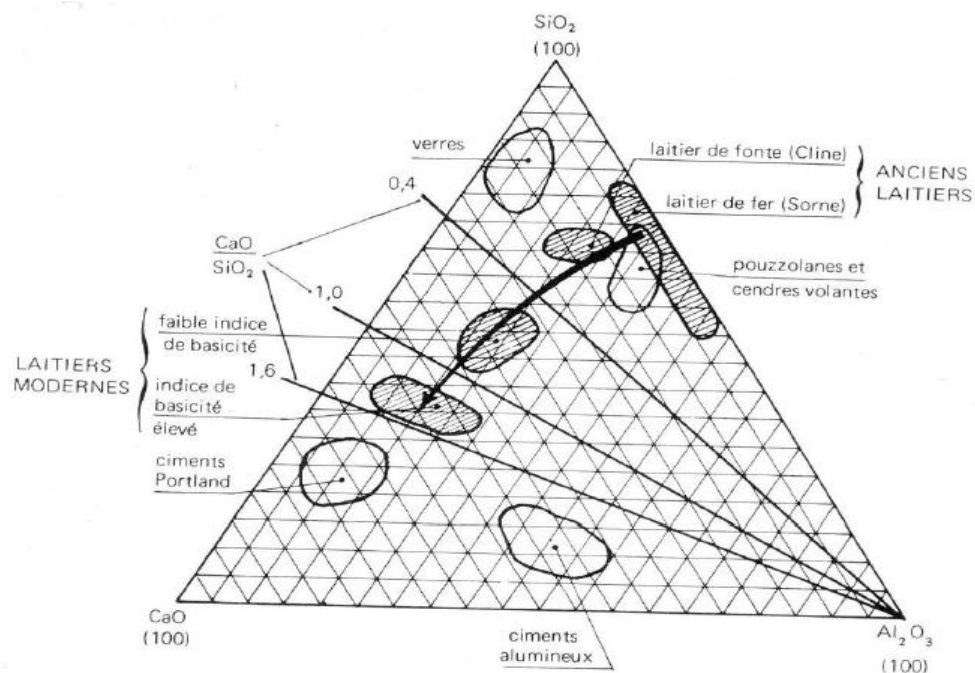
**Figure III.6.** Granulation du laitier de haut fourneau d'El hadjar

La réactivité et les propriétés hydrauliques du laitier vitrifié dépendent des aspects suivants :

- l'hydraulicité du laitier ou sa réactivité hydraulique, est liée à son taux de vitrification, c'est à dire à l'importance de la partie vitreuse par rapport à la partie cristallisée. Ce taux est d'autant plus grand que le laitier est actif.

- Le laitier vitreux possède une structure riche en énergie. Du fait de la trempe, le liquide suspendu conserve une énergie de cristallisation non dissipée qui va lui permettre d'être hydraulique.

Le laitier vitrifié par trempe est donc un liant hydraulique. La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la qualité du fondant, la nature du combustible et le procédé employé. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux (CaO) de 30 à 50 %. La silice (SiO<sub>2</sub>) de 28 à 38 %, l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de 8 à 24 %, le soufre (S) de 1 à 2.5 % et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MnO de 1 à 3 %. Cette composition peut être rapprochée de celle du ciment Portland et schématisée dans le diagramme triangulaire de Keil (figure III.7).



**Figure III.7.** Diagramme triangulaire de Keil : système  $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 100$   
[ J.alexandare , 1988 ]

La zone des laitiers est située entre les verres (seulement siliceux : ils ne sont pas hydrauliques) et les ciments Portland (leur forte teneur en chaux leur confère un pouvoir hydraulique important).

Lors de la fabrication du laitier, le mode de refroidissement, lent ou rapide, va influencer sur la nature du laitier obtenu et sur son utilisation. La composition chimique du laitier varie en fonction de la nature des produits de base, des combustibles et du procédé de fabrication de la fonte. Elle peut aussi varier dans le temps avec l'altération des sources de minerais. Le tableau III.4 présente la variation de la teneur des oxydes majeurs et mineurs dans le laitier suivant ses types [Behim, 2003], [Aïtcin, 2001].

**Tableau III.4 :** Composition chimique des différents types de laitiers de haut fourneau.  
[Behim, 2003]

Constituants	Laitier français	Laitier nord américain	Laitier Algérien	
			1995	2000
SiO <sub>2</sub>	29 à 36	33 à 42	39.3	40.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 à 19	10 à 16	8.20	6.00
CaO	40 à 43	36 à 45	39.40	42.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 4%	0.3 à 20	0.00	2.03
MgO	< 6%	3 à 12	6.00	4.68
S	< 1.5%	-	0.07	0.15
TiO <sub>2</sub>	-	-	2.35	2.64
MnO	-	-	-	1.07
K <sub>2</sub> O	-	-	-	1.15

Les laitiers comme les ciments portland sont des produits à très forte hydraulité ; mais si pour le ciment portland l'hydraulité est déclenchée par simple addition d'eau, pour le laitier, elle doit être déclenchée et stimulée par un activant basique.

### a.1. Rôle de l'activant

La nécessité d'un agent basique ou activant pour déclencher la prise du laitier, résulte selon Roger Dron (1981), du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes où la chaux intervient.

- ✓ Le premier est le passage en solution dans l'eau interstitielle des éléments aluminium, silicium et calcium. Cette solubilisation intervient par les sites aluminium et l'attaque à lieu par les hydroxydes OH de la solution .Elle devient notable à pH = 12.
- ✓ Le second est la cristallisation, à partir de la phase aqueuse, des composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que l'est le laitier. Un apport de calcium est donc nécessaire, à défaut duquel le milieu liquide s'appauvrirait en chaux et verrait son pH baisser en dessous du seuil d'attaque.

Le rôle de l'activant est double. Il doit :

- Répondre à une condition de pH, en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la phase aqueuse en chaux pour atteindre le pH de 12,6 correspondant à cette saturation .
- Contribuer à la formation des hydrates, il participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé.

#### a .1.1. Les différents modes d'activation et la nature des hydrates obtenus

**Activation alcaline :** Elle peut être sodique ou calcique. Le laitier est activé à la chaux, c'est l'activation calcique. Il se forme en présence d'eau comme produit d'hydratation du silicate de calcium CSH, de l'aluminate tétracalcique C<sub>4</sub>AH<sub>8</sub> [J. J. Chang ,2005] . Les adjuvants à base

de soude sont très efficaces pour activer les laitiers. On utilise principalement : la soude caustique ; Le carbonate de sodium ; l'aluminat de sodium, le silicate de sodium, le chlorure de sodium et le métasilicate de sodium.

**Activation sulfatique** Le laitier est activé par les sulfates de calcium. La réaction est assez lente, et il se forme les composés hydratés suivants : CHS, C<sub>3</sub>A, 3CaSO<sub>4</sub>. 32 H<sub>2</sub>O et AL(OH)<sub>3</sub>. Les sulfates de calcium utilisés principalement sont les suivants : le gypse naturel : CaSO<sub>4</sub> . 2H<sub>2</sub>O ; le semi hydrate : CaSO<sub>4</sub> . ½ H<sub>2</sub>O ; l'anhydrite : CaSO<sub>4</sub> et le phosphogypse . Lors de l'activation sulfatique par le gypse, l'hydratation est lente .L'action accélératrice sur le laitier du sulfate de chaux, aidé de quelques pour cents de Ca (OH)<sub>2</sub> ou de clinker portland est à la base de la prise et du durcissement des ciments sursulfatés, c'est à dire des ciments constitués essentiellement de laitier et d'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>) [M. Daimon, 1980].

**Activation calcio - sulfatique** : Elle est obtenue pour un mélange de gypse et de la chaux et conduit aussi à la formation de CSH mais C<sub>4</sub> AH<sub>13</sub> et alumine sont remplacés par de l'étringite, dont la texture en aiguille disposées en touffes est plus favorable à la réticulation en réseau. [M. Daimon, 1980].

**Activation par le Clinker du ciment portland** : C'est la portlandite libérée par l'hydratation des minéraux du ciment qui active le laitier [M. Daimon, 1980].

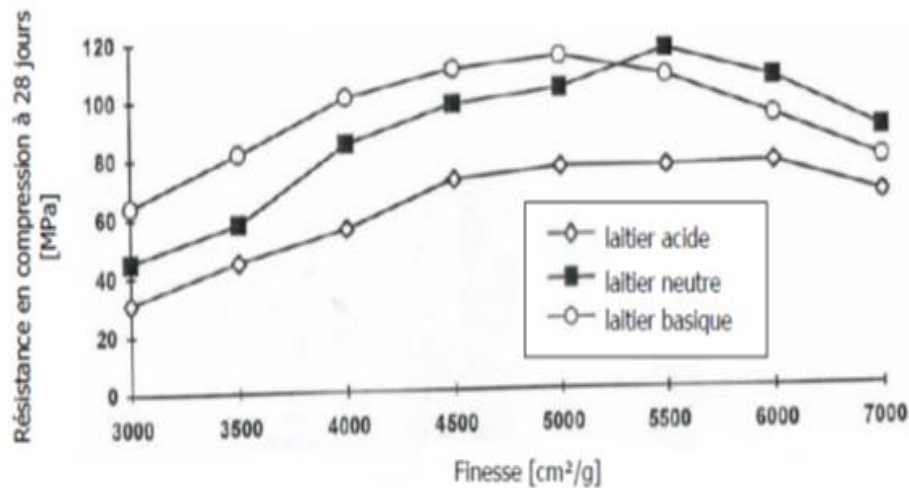
### a.1.2. Les facteurs d'activation

#### ➤ La finesse

La surface spécifique du laitier est un facteur influençant sa réactivité. L'effet est significatif seulement dans les trois premiers jours : plus la finesse du laitier est grande, plus la résistance à la compression augmente [A. Fernandez-Jimenez ,1999], [S. D Wang ,1994]. Avec un taux de gâchage égal et une maniabilité suffisante pour les différents laitiers testés, la Figure III.8 donne les résistances à 28 jours. L'optimum de finesse est compris entre 4500 et 6500 cm<sup>2</sup>/g pour les laitiers acides et neutres et entre 4000 et 5500 cm<sup>2</sup>/g pour les laitiers basiques. [S. D Wang ,1994].

Malhotra et Metha précisent que les particules de laitier dont le diamètre est inférieur à 10 µm contribuent au développement des résistances avant 28 jours, celles dont le diamètre est compris entre 10 et 45 µm contribuent aux résistances ultérieures, les particules dont le diamètre est supérieur à 45 µm présentent une faible réactivité. Mais il faut préciser que même si une plus grande finesse améliore la réactivité, elle entraîne aussi une plus grande consommation d'eau pour avoir des conditions de plasticité similaires, ce qui fait chuter les résistances finales.

De plus, l'influence de la surface spécifique sur les résistances mécaniques dépend de la nature de l'activateur alcalin : avec de la soude NaOH ou du carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, l'augmentation de la surface spécifique de 450 à 900 m<sup>2</sup>/kg permet l'augmentation des résistances à 3 jours alors qu'avec une solution de silicate de sodium Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. n H<sub>2</sub>O + NaOH, les résistances diminuent avec l'augmentation de la surface spécifique [S. D Wang ,1994].



**Figure III. 8.** Résistance en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium :  $\text{Na}_2\text{O} = 5.5\%$ ,  $M_s = 1$  ; sable/laitier = 2) [S. D Wang ,1994]

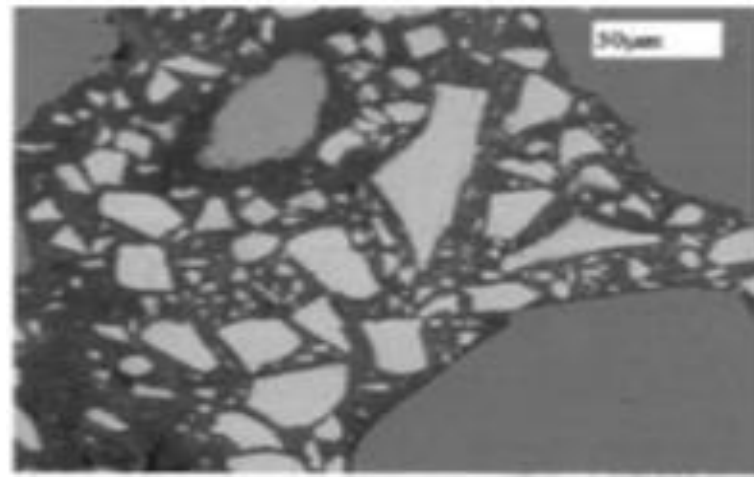
### ➤ La température de cure

Brough et Atkinson [Brough, 2002] ont étudié l'influence de la température de cure sur le développement des résistances de mortiers à base de laitier activé avec des silicates de sodium ("waterglass"  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot m \text{H}_2\text{O}$ ). Lorsque la température de malaxage et de cure est seulement de  $5^\circ\text{C}$ , le laitier activé par des silicates de sodium voit le développement de sa résistance fortement retardé : le démoulage ne peut avoir lieu à un jour car l'échantillon est trop mou. Par contre à 28 jours, la résistance est correcte (Tableau III. 5). L'élévation de la température à  $40^\circ\text{C}$  et à  $80^\circ\text{C}$  a un effet stimulateur : l'accélération des résistances est très forte et les résistances à moyen terme sont nettement améliorées. Précisons qu'avec une température de  $80^\circ\text{C}$ , le développement des résistances est extrêmement rapide puisque dès 12 heures, la résistance atteint déjà 70 MPa, résistance similaire à la résistance obtenue par le mélange conservé à  $20^\circ\text{C}$  pendant 28 jours. Les analyses des échantillons dont la cure est de  $80^\circ\text{C}$  indiquent que la microstructure à 1 jour est similaire à celle des échantillons conservés à  $20^\circ\text{C}$  à des échéances plus longues (1 mois à 1 an) (Figure III. 9). La composition des hydrates est similaire : il y a formation dans les deux cas d'une phase hydrocalcite ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) et d'un gel de C-S-H.

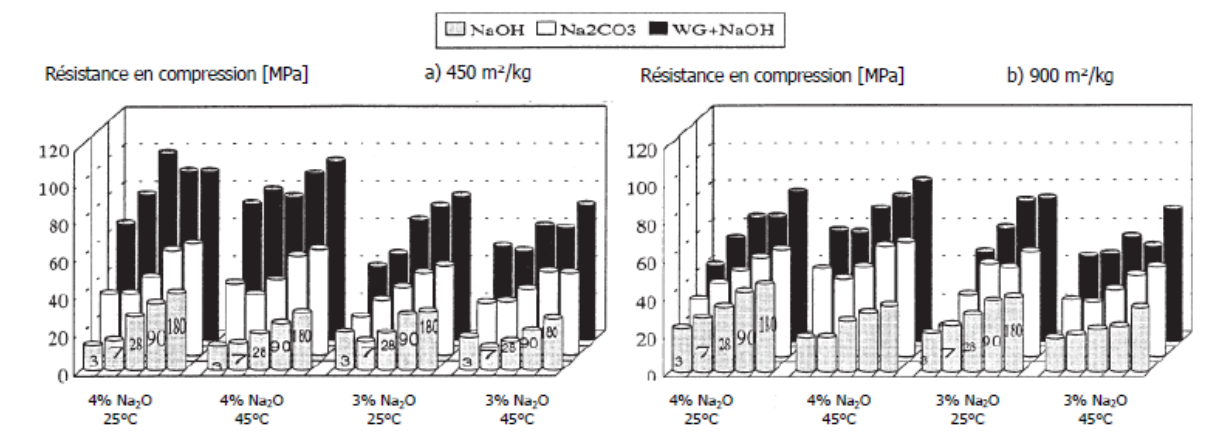
Fernández-Jiménez et al. [ F. Jiménez,1999 ] ont précisé que l'augmentation de la température de cure ( $45^\circ\text{C}$ ) a des effets différents suivant le type d'activateur utilisé : les résistances au jeune âge sont améliorées par l'augmentation de la température avec des carbonates de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  comme activateur, par contre, à tous les âges, les résistances sont moins bonnes avec de la soude  $\text{NaOH}$  ou des silicates de sodium  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOH}$  comme activateurs lorsque la température augmente (Figure III. 10). L'explication de ce phénomène est basée sur la formation d'une grande quantité de produits d'hydratation dont la distribution est très hétérogène au jeune âge, ce qui entraîne une densification conséquente de la matrice et une modification de la microstructure. Donc avec le temps, les processus de diffusion sont plus difficiles et les réactions suivantes sont ralenties [A. Fernandez, 1999].

**Tableau III. 5.** Résistance à la compression sur cube de mortier à différentes échéances et avec différentes températures de cure [A. R. Brough, 2002]

Température d'hydratation (°C)	Résistance en compression (MPa)			
	1 jour	3 jours	7 jours	28 jours
5	-	2	7	41
20	7	44	55	78
40	52	65	79	99
80	72	-	-	-



**Figure III. 9.** Observation au MEB d'une pâte de ciment au laitier AAS conservée 4 heures à température ambiante, puis 12 heures à 80°C [A. R. Brough, 2002]



**Figure III. 10.** Résistance à la compression à 3 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours, 180 jours de ciments au laitier à 25°C et 45°C a) laitier de finesse 450 m<sup>2</sup>/kg ; b) laitier de finesse 900 m<sup>2</sup>/kg [A. Fernandez-Jimenez ,1999]

**b . Fumée de silice**

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircon. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se

forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice  $\text{SiO}_2$  [N. Kaid, 2000]. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau III.6). La teneur en  $\text{SiO}_2$  de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en  $\text{SiO}_2$  de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de  $\text{SiO}_2$ . [J. Behmanesh, 2009].

**Tableau III. 6 :** Composition chimique type de certaines fumées de silice [Aitcin, 1983].

Composés (%)	Silicium (grise)	Ferre silicium (grise)	Blanche
$\text{SiO}_2$	93.7	87.3	90.0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.6	1.0	1
CaO	0.2	0.4	0.1
$\text{FeO}_3$	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
$\text{Na}_2\text{O}$	0.2	0.2	0.9
$\text{K}_2\text{O}$	0.5	0.6	.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe –Si à 75% à une teneur en silice généralement supérieure à 85%. Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre  $0.03\mu\text{m}$  et  $0.3\mu\text{m}$  (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de  $0.1\mu\text{m}$ ), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron [H A .Toutanji, 1999].

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. [P.C.Aitcin, 2001]. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3.1.

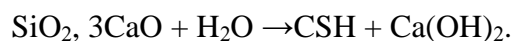
Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes : Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie ; Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

### b.1. Mode d'action

La fumée de silice est utilisée dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité [Source, [http://www.condensil.com/fre\\_FR/caracteristiques-techniques](http://www.condensil.com/fre_FR/caracteristiques-techniques)].

#### - Réaction pouzzolanique

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte. Sa finesse et ses propriétés pouzzolaniques confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les  $\text{Ca(OH)}_2$  produits durant l'hydratation du béton :



Equation (III.4)



Equation (III.5)

Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton (voir figure III.11).

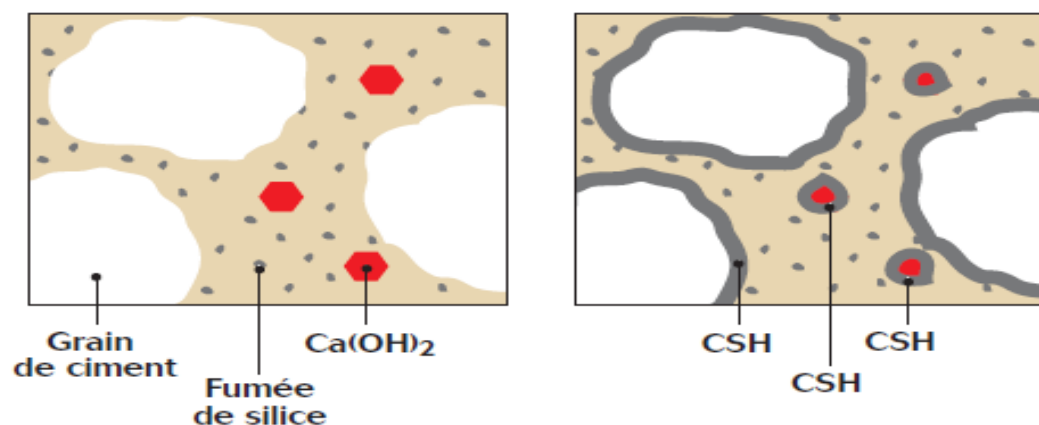
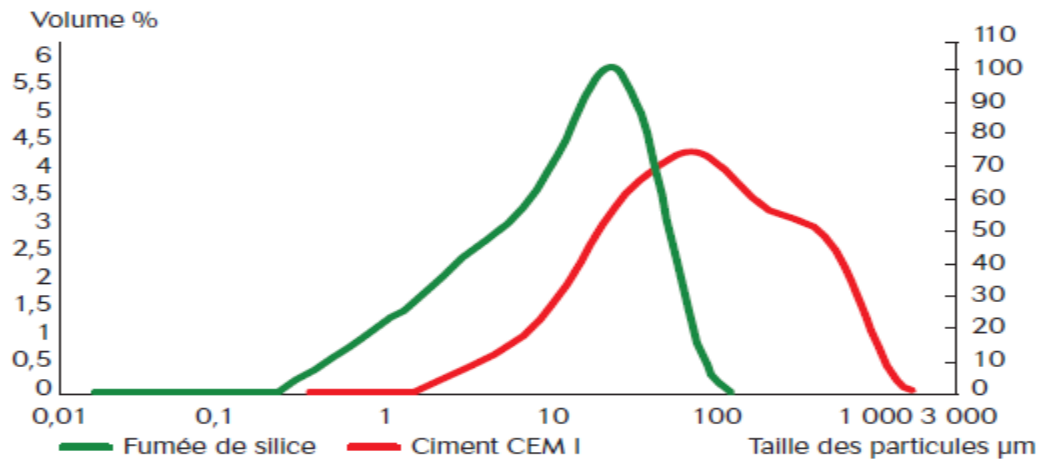


Figure III. 11. Principe de la pouzzolanique [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011].

#### - Effet d'optimisation de l'empilement granulaire

La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton (figure III.12).



**Figure III. 12.** Courbe granulométrique laser comparative ciment /fumée de silice  
[PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]

## b.2. Avantages de la fumée de silice

### b.2. 1. Performance à l'état frais

#### ✓ *Maniabilité*

Les bétons formulés avec la fumée de silice ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux et compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression. Cette particularité offre en particulier les avantages suivants :

- Moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage) ;
- Transfert par pompage sous pression possible sur de grandes distances ;
- Projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton

### b.2. 2. Performances à l'état durci

#### ✓ *Performances mécaniques*

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression.

Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

#### ✓ *Durabilité*

L'utilisation de fumée de silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins.

L'utilisation de la fumée de silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant: ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer (figure III.13).

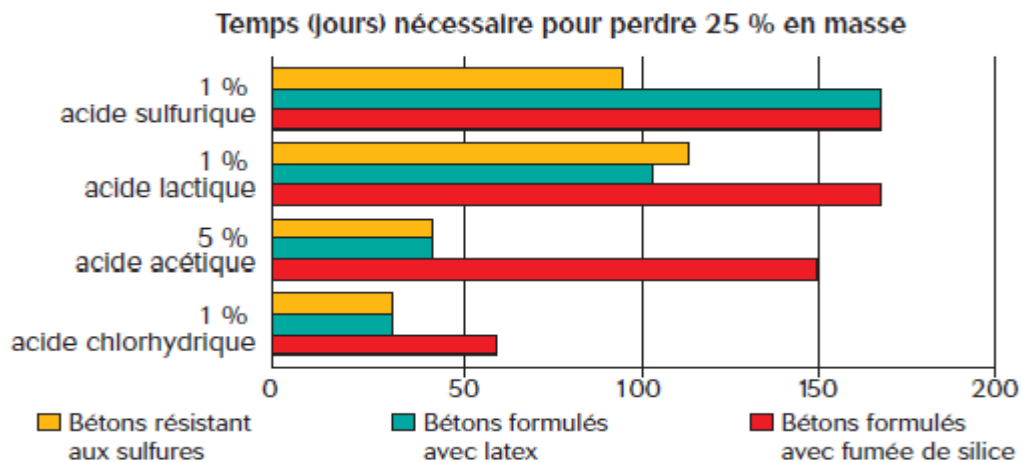


Figure III. 13. Résistance des bétons aux attaques chimiques [T.Patricia Bredy et al ,2011]

✓ *Alcali-réaction*

La fumée de silice a un effet favorable vis-à-vis du phénomène d'alcali réaction (figure III.14). Les particules fines et amorphes de la fumée de silice réagissent avec les alcalins du ciment et réduisent ainsi leur teneur dans le béton avant son durcissement.

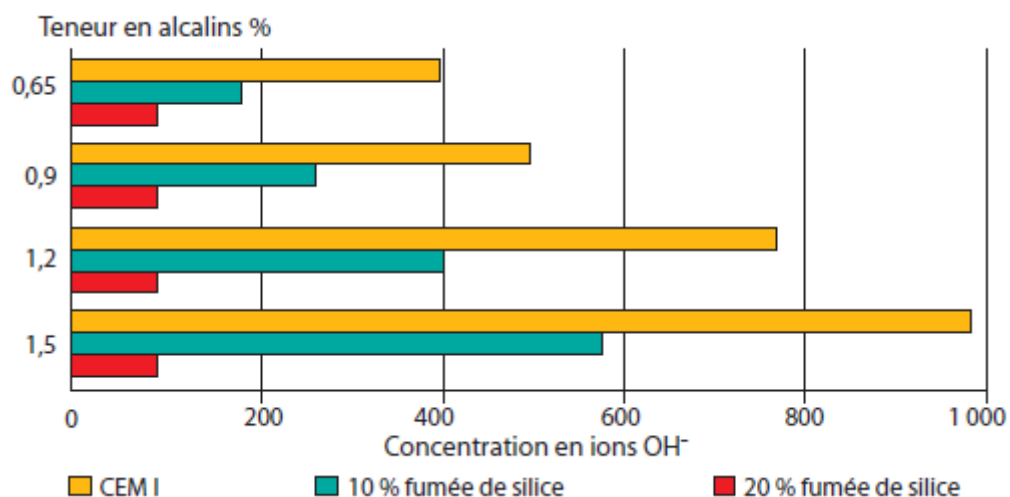
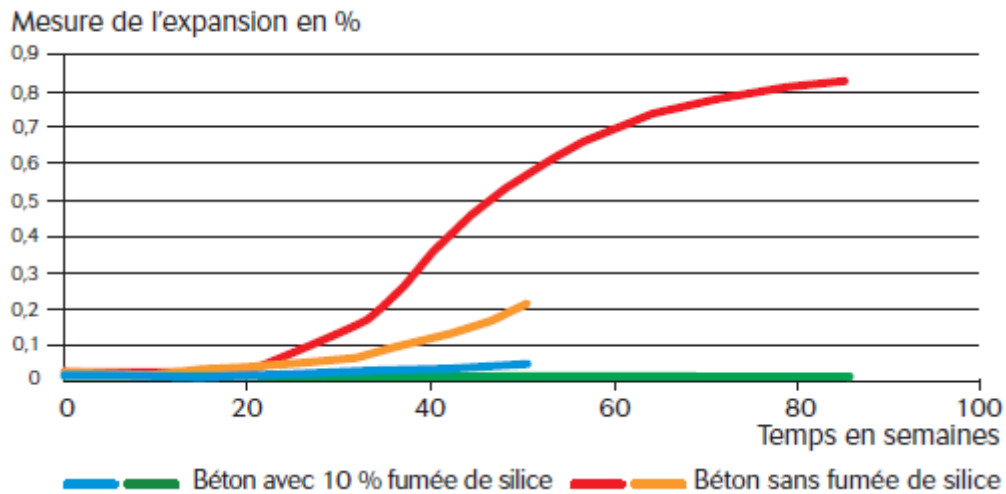


Figure III. 14. Résistance des bétons à l'alcali – réaction [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]

✓ *Réaction sulfatique interne*

La réaction sulfatique interne (RSI) est une cause de désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement les ouvrages en béton. L'influence de la fumée de silice à des

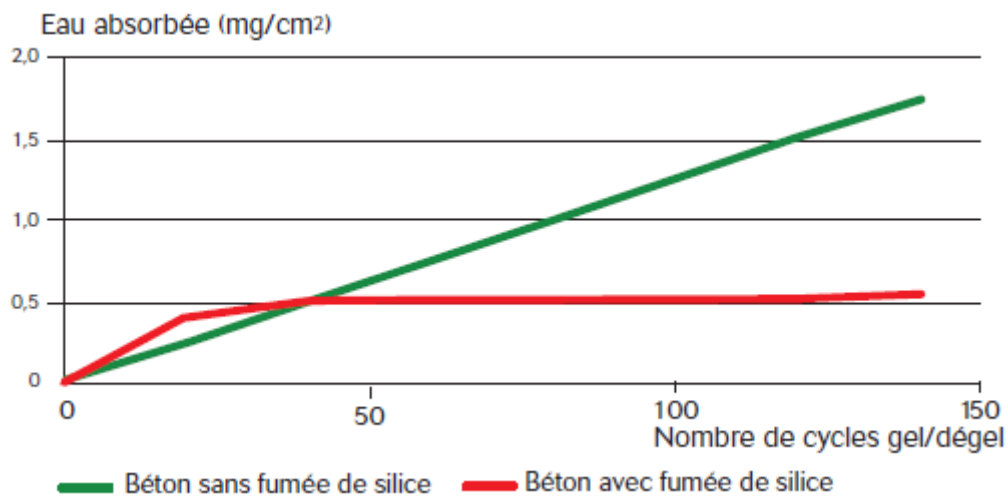
teneurs optimisées de 10 % en taux de substitution est très significative en prévention de cette pathologie (figure III.15).



**Figure III. 15.** Résistance des bétons à la réaction sulfatique interne [T.Patricia Bredy et al ,2011]

#### ✓ Résistance au cycle gel/dégel

En diminuant la perméabilité du béton, la fumée de silice réduit les mouvements d'eau et les pressions internes dans le béton qui sont source de pathologies. Un béton contenant de la fumée de silice supporte un plus grand nombre de cycles gel/dégel (figure III.16).



**Figure III.16** . Résistance des bétons aux cycles gel/dégel [PatriciaBredy Tuffe et al ,2011]

#### c. Les fillers inertes (fillers de calcaire et de marbre)

Les ajouts cimentaires sont incorporés au clinker afin de produire un ciment mélangé ou incorporées au mélange de béton comme agent complémentaire. Les ajouts cimentaires sont des produits résiduels d'autres industries destinés aux sites d'enfouissement [Source, <http://www.cement.ca/fr/Augmenter-l-utilisation-des-ajouts-cimentaires.html>]. Au Algérie, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, calcaire et la fumée de silice sont parmi les matières les plus couramment utilisées comme ajouts cimentaires.

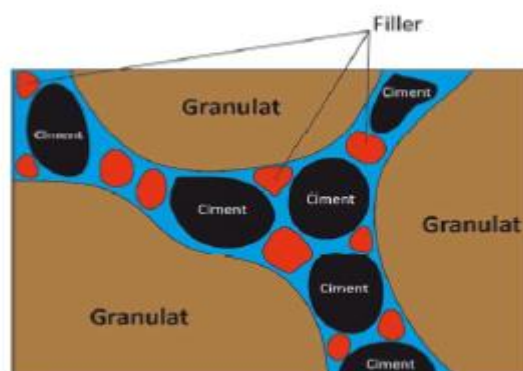
Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60  $\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes. En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière [A.Komar, 1978].

### c.1. Fillers Calcaires

Sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation des roches carbonatées (calcite, aragonite, dolomite) qui sont composées principalement de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et de la dolomite ( $\text{Mg.Ca}(\text{CO}_3)_2$ ) [R.Chaid, 2008].

Les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ce qui explique qu'ils aient un effet sur la résistance du béton. En effet, outre un effet de remplissage, ils accélèrent l'hydratation de  $\text{C}_3\text{S}$ , car ils constituent des sites de germination des hydrates. Mais il y a aussi un effet liant dû à une réaction entre le carbonate de calcium et le  $\text{C}_3\text{A}$ . Cet effet sera particulièrement sensible dans le cas des ciments contenant une part importante de ce constituant [S.P.Jiang et al, 1989].

Selon la norme algérienne NA 442, pour utiliser ce produit comme ajout cimentaire, sa teneur en carbonate de calcium doit être supérieure à 75 % en masse.



**Figure III. 17.** Illustration de l'effet filler [S.P.Jiang et al, 1989].

La norme EN permet de substituer jusqu'à 35% de filler calcaire au ciment portland. Aitcin et al, 1983, estiment qu'en plus de son rôle principal, qui est de densifier la matrice de

mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique qui contribuait à augmenter les résistances en compression par la formation de carboaluminates.

Raniachandran et al 1986 ont observé que l'ajout de  $\text{CaCO}_3$  au  $\text{C}_3\text{S}$  accéléré l'hydratation du ciment. Jiang et al 1993 estiment aussi que les fillers fins comme le calcaire, accélèrent les premières réactions d'hydratation. Ces dernières études confirment l'effet non négligeable des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment au jeune âge, [Kessal et al, 1996], [chaid et al, 2005].

Les calcaires se composent principalement de carbonates de calcium  $\text{CaCO}_3$ , dans les proportions suivantes de 56.03% de  $\text{CaO}$  et de 43.97% de  $\text{CO}_2$ . Le calcaire contient aussi  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou le minéral accessoire qui est la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  [54.27%  $\text{CaCO}_3$  et 45.73%  $\text{Mg}(\text{CO}_3)$  ou 30.41%  $\text{MgO}$  et 47.72%  $\text{CaO}$ ] (figure III.17).

### c. 2. Fillers de Marbre :

Le marbre est une roche calcaire de texture assez dense, a tissu compact ou cristallin. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Ces couleurs proviennent essentiellement d'oxydes métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il est provient uniquement composée de calcite.

### c. 3. Recyclage et valorisation les déchets

L'épuisement des gisements naturels et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent d'autres sources d'approvisionnement [H. Hebhoub et al, 2011]. Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil. Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets.

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Les déchets sont considéré comme toutes substances mise en rebut, ou tout produit qui doit être jeté car il est usé, contaminé ou abîmé [L.Azzouz et al, 2000].

En Europe, plus de 25% des déchets proviennent de la démolition ou de la rénovation d'immeubles et de ces rebuts qui encombrant les décharges publiques. On estime que seulement 30% des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables [Jan Desmyter, 2004]. En Belgique, la confédération de construction wallonne cite déjà en 1997 le chiffre (estimé) considérable de 2.3 millions de tonnes de déchets produits dans le secteur pour l'année 1994 [Y.Senhadji 2012].

La valorisation des déchets de démolition connaît un développement aussi important et le taux de recyclage a atteint dans certains pays comme les Pays-Bas 73%. Au Québec l'importante hausse du taux de recyclage (18 % à 42 % entre 1988 et 2002) est allée de pair une augmentation

de la quantité de déchets à éliminer par avec habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 Kg. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne [PNAE-DD, 2002].

Au Portugal, il s'estime que, annuellement, à peu près 4 à 20 millions de tonnes de résidus sont créés, en comptant ceux qui se reportent aux excavations et construction de routes [Dados do INE, 2008].

L'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment. Face à la gravité des problèmes environnementaux dû à la surexploitation des ressources, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 million de dinars, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) [Plan National d'Actions, 2000] [Z. Rahmouni, 2012].

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité. Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis. Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales) et leurs actions sur les propriétés des bétons. [R.Gagné, 1993].

Récemment, l'utilisation de la poudre de marbre comme matériau de remplacement a été étudiée. Agarwal and Gulati (2006) ont démontré que la présence de poudre de marbre dans la matrice cimentaire améliore la résistance à la compression au jeune âge [I.Messaoudene, 2011]. Topçu et al. (2009) ont précisé l'effet filler de la poudre de marbre. La maniabilité des bétons n'est pas affectée mais la résistance mécanique diminue pour une grande quantité de poudre de marbre ( $200 \text{ kg/m}^3$ ) [N.Tebbal, 2012]. Les recherches de Messaoudene et al. (2011) montrer que, la substitution du ciment Portland par 10% de filler de marbre donne des bétons avec une résistance mécanique en compression à 28 jours supérieure à 50MPa.

## **d. Propriétés des bétons avec ajouts**

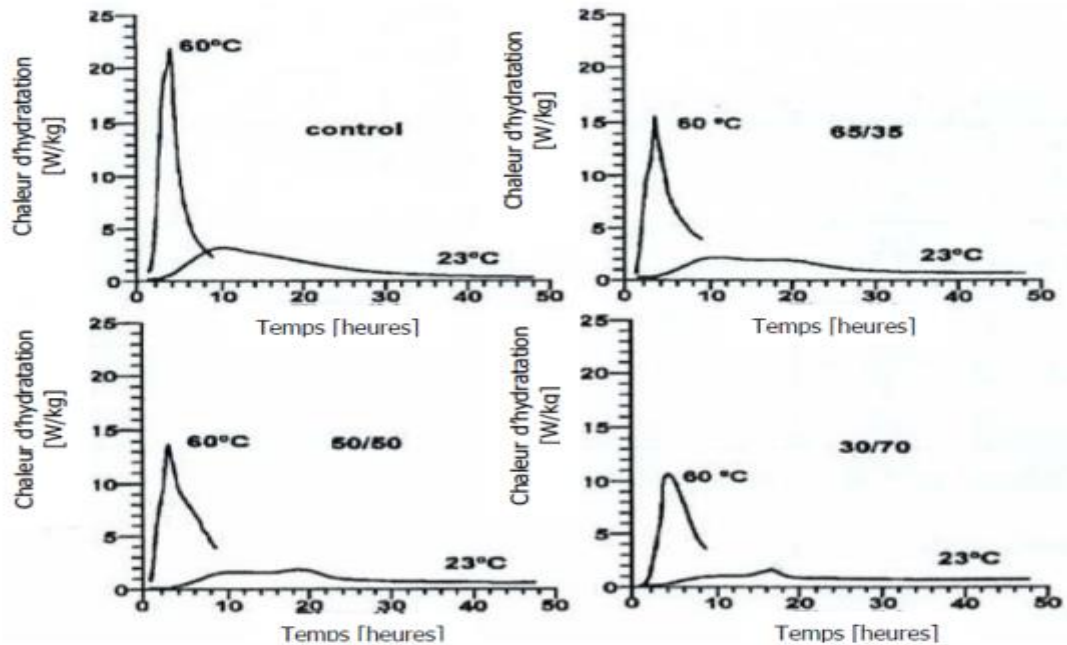
### **d. 1. Bétons avec ajouts de laitier**

- ***L'ouvrabilité***

Plusieurs recherches confirment que l'ouvrabilité des bétons avec laitier granulée est plus grande que celle des bétons ordinaires. Cette amélioration est due à la surface caractéristique des particules de laitier qui sont en fait dense, lisse et n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale d'hydratation.

- ***Chaleur d'hydratation***

Plusieurs chercheurs ont montré que les bétons contenant un pourcentage en laitier de 70%, ont une chaleur d'hydratation inférieure à celle des bétons ordinaires, (figure III.18). Pour cette raison, les ciments à hautes teneur en laitier peuvent être convenablement utilisés dans les bétons de masse [I.Soroka ,1993].

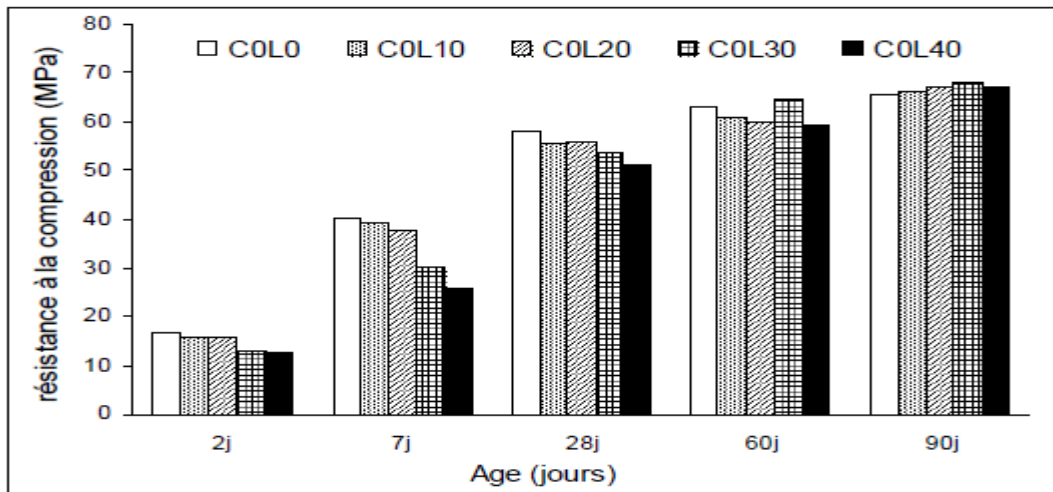


**Figure III.18** . Courbe de calorimétrie isotherme de mélange Ciment /Laitier à 23 et 60°C.  
[I.Soroka ,1993].

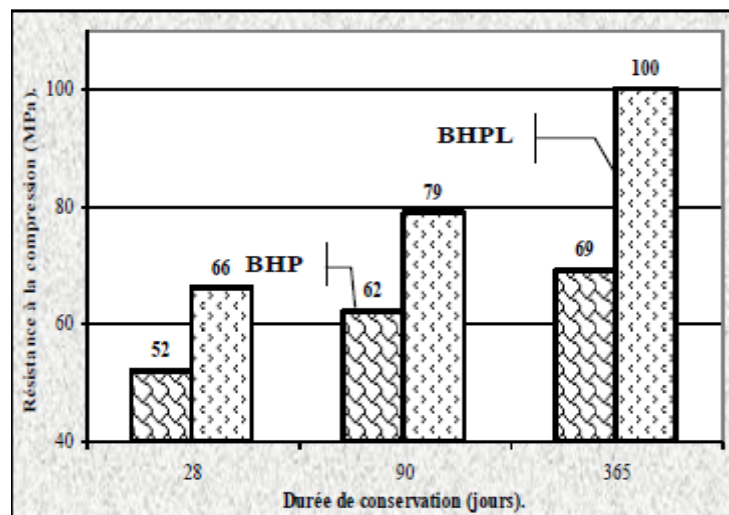
- **Résistance mécanique**

Plusieurs études ont été entreprises afin de déterminer l'influence du laitier sur la résistance mécanique du ciment et du béton durci. A.S Boldyrev , Z.B. Entine ( 1980) et A.Toufik Boubekour ( 2010), rapportent qu'un avec l'addition de laitier, la résistance du ciment diminue au début, toute fois au bout de 28 jours et plus, les ciments contenant 15% de laitier ne cèdent en rien au ciment de contrôle sans constituants secondaires (voir la figure III. 19).

L'addition du laitier pour 30% abaisse la résistance de 10% par rapport au ciment de contrôle, également à des délais avancés, mais même dans ce cas l'effet pouzzolanique de laitier se manifeste de façon évidente (figure III.20).



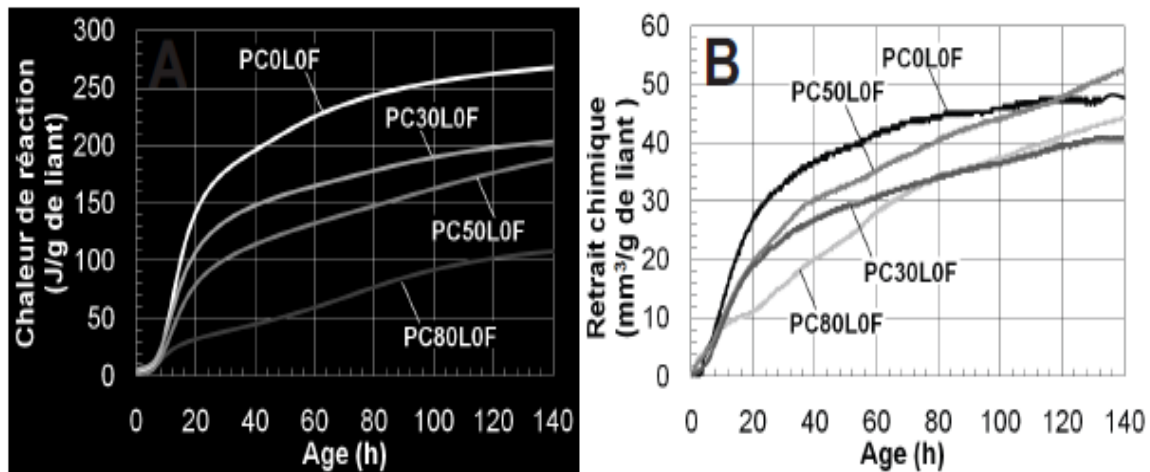
**Figure III. 19 .** Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression COL0 : liants avec 0% de laitier avec 100% ciment CEMI, COL10 : liants avec 10% de laitier, COL20: liants avec 20% de laitier, COL30: liants avec 30% de laitier, COL40 [A.Toufik Boubekour, 2010].



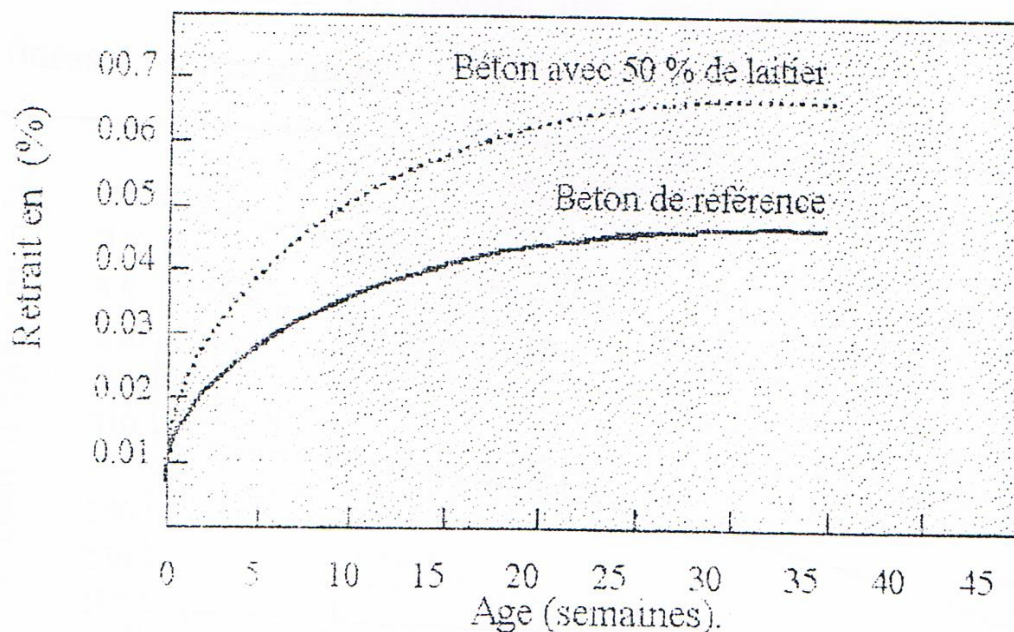
**Figure III. 20 .** Evolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation [B.Chaid et al , 2012].

- **Retrait**

Plusieurs auteurs rapportent qu'à court terme, les bétons au laitier présentent un retrait inférieur à celui du béton ordinaire. Alors qu'à long terme l'inverse se produit, Figure III. 21. Ce phénomène a une relation directe avec la finesse du liant, le rapport E/C, l'environnement et la durée de cure [N.E. Khalifa et al ,2011], [I.Suroka et al ,1993].



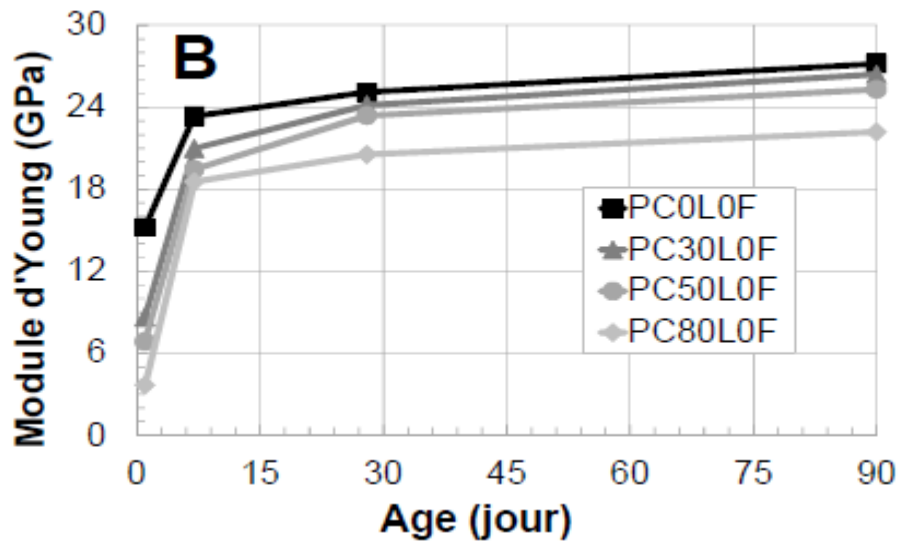
**Figure III. 21.** Evolution du dégagement de chaleur de réaction et du retrait chimique des liants étudiés en fonction du temps (au jeune âge). PC0L0F : liants avec 0% de laitier, PC30L0F : liants avec 30% de laitier, PC50L0F : liants avec 50% de laitier, PC80L0F : liants avec 80% de laitier [N.E. Khalifa et al ,2011]



**Figure III.22.** Effet de d'incorporation du laitier dans le CPA sur le retrait [I.Soroka et al ,1993]

- **Module d'élasticité**

Dans leur étude [RN.Swamly et a1990],[ N.E. Khalifa et al ,2012] , ont conclu qu'il n'y a pas une différence significative entre le module d'élasticité d'un béton au laitier et celui d'un béton ordinaire , mais ils apportent que cette différence peut atteindre 10%,dans les milieux humides ou saturé ( dans l'eau ) , et 15% dans les milieu secs .

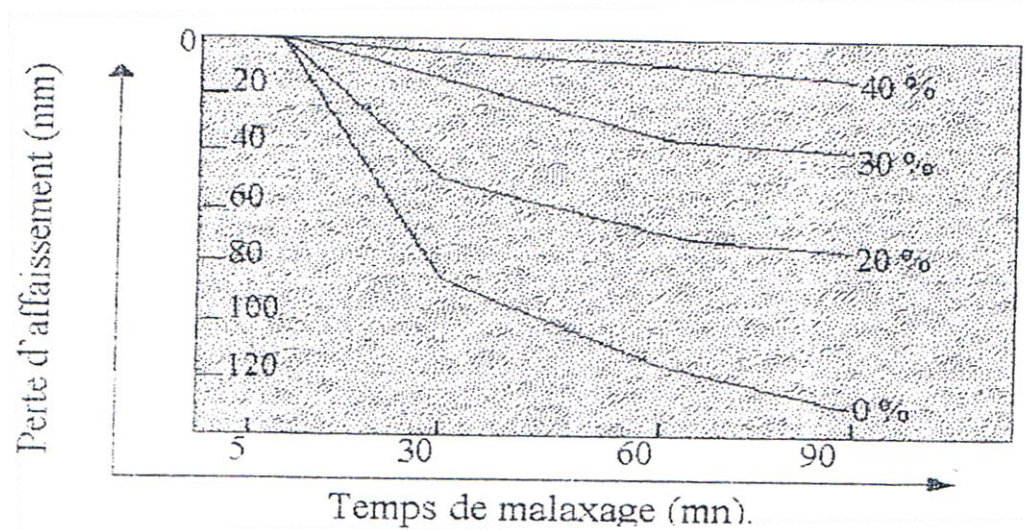


**Figure III.23.** Evolution du module d'Young des liants en fonction du temps PC0L0F : liants avec 0% de laitier, PC30L0F : liants avec 30% de laitier, PC50L0F: liants avec 50% de laitier, PC80L0F : liants avec 80% de laitier [N.E. Khalifa *et al*, 2012]

#### d .2. Bétons avec ajouts de pouzzolane

- *L'ouvrabilité*

D'après I.Soroka (1993), l'ajout pouzzolanique réduit la perte de l'ouvrabilité. Cette réduction est proportionnelle au pourcentage d'incorporation de l'ajout minérale, figure III.24



**Figure III.24.** Effet d'incorporation des cendres volantes dans les CPA sur la perte du béton [I.Soroka, 1993]

On remarque qu'un béton ordinaire perd presque totalement son ouvrabilité après 90 minutes de son gâchage, par contre le béton pouzzolanique, garde sa maniabilité avec le temps de malaxage.

- **Chaleur d'hydratation**

Plusieurs travaux de recherches, ont montré que les bétons contenant de la pouzzolane ont une chaleur d'hydratation moins élevée que celle d'un béton ordinaire. La Figure (III. 25), montre que la réduction de la chaleur est proportionnelle au pourcentage d'incorporation de la pouzzolane dans le béton. L'incorporation de l'ajout pouzzolanique au ciment ordinaire, réduit sa chaleur d'hydratation. Ce résultat doit être pris en précaution lorsque la surface spécifique (la finesse) est très grande [M.N.Oudjit, 2011].

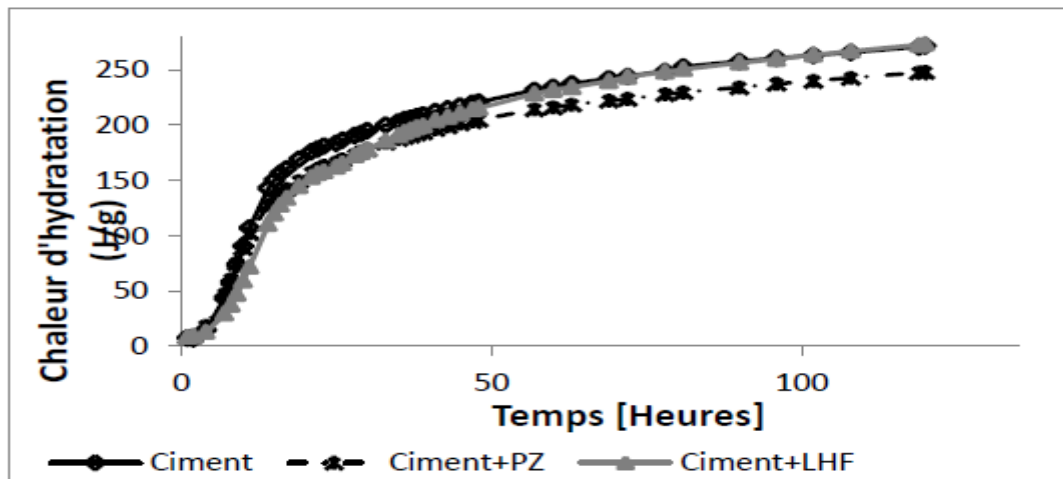


Figure III. 25 .Chaleur d'hydratation dégagée durant 5 jours d'hydratation [M.N.Oudjit, 2011].

- **Résistance mécanique**

I.Soroka (1993) et M.N.Oudjit (2011); rapportent que l'évolution de la résistance mécanique des bétons pouzzolaniques est plus lente que celle des bétons ordinaires ; car l'hydratation du ciment pouzzolanique est un peu plus lente par rapport à celle du ciment ordinaire, Figure III. 26.

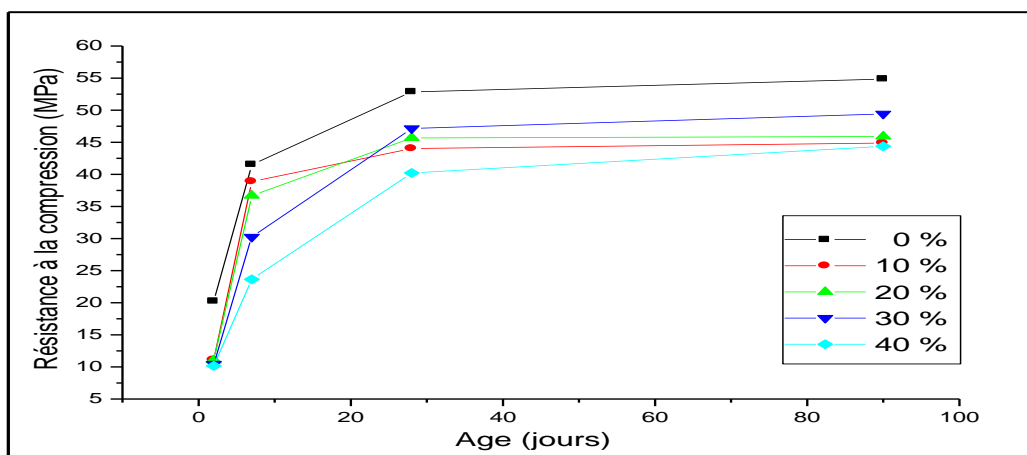
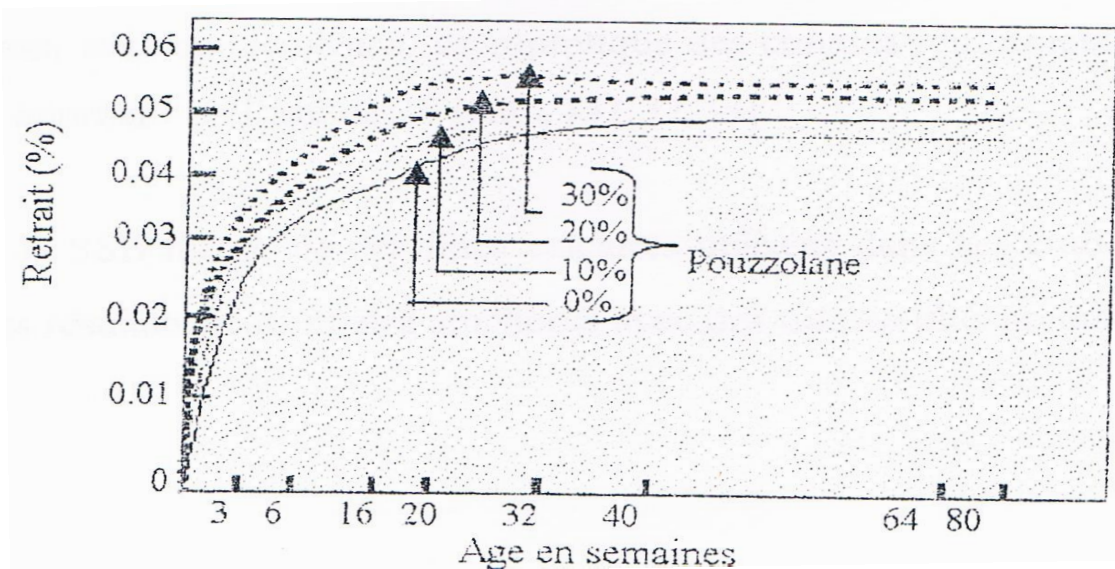


Figure III. 26 .Chaleur d'hydratation dégagée durant 5 jours d'hydratation [M.N.Oudjit, 2011].

- **Retrait**

Les ajouts pouzzolaniques ont un effet remarquable sur le phénomène de retrait des bétons. Ces ajouts minéraux agissent par leur surface spécifique sur la structure poreuse de la pâte liante. En effet, cette structure est plus fine que celle d'une pâte ordinaire, [I.Soroka, 1993], [P.K Mehta , 1981]. La structure poreuse fine des bétons aux pouzzolanes est accompagnée par un retrait plus élevé pour des teneurs supérieures à 10% en ajouts. Cette augmentation de retrait est plus remarquable à partir de 28 jours. Figure III. 27.

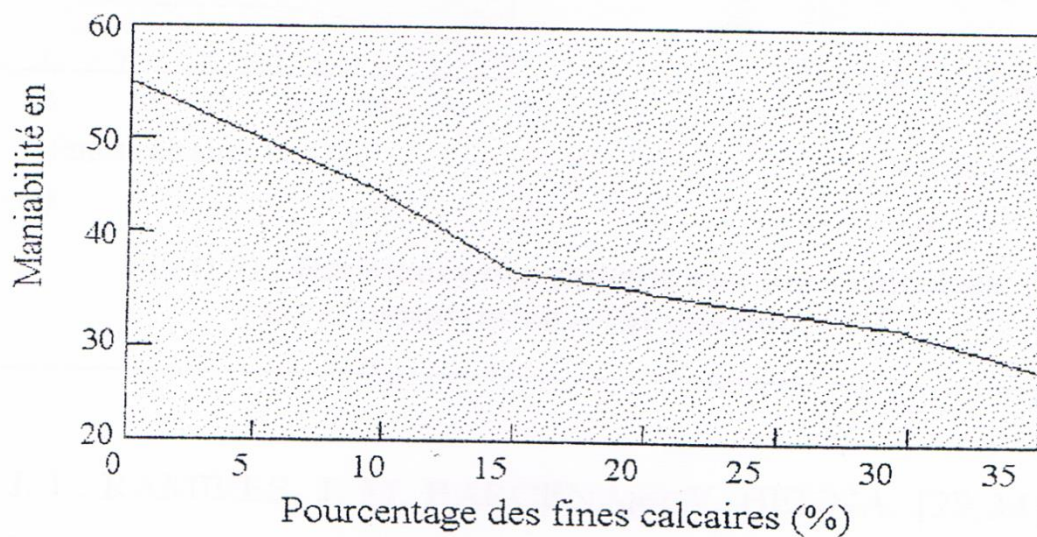


**Figure III.27.** Retrait de béton pour différentes teneurs en pouzzolane [I.Suroka et al ,1993].

### d. 3. Bétons avec ajout de calcaire

- **Maniabilité**

Plusieurs travaux de recherches ; ont constaté que la maniabilité des ciments et des mortiers contenant des fines calcaires est affectée d'une manière très sensible, elle passe de 55% pour le béton de contrôle (0% d'ajout calcaire) à 45 % pour une teneur de 10%, et atteint 36% pour 20% de fines (figure III. 28) [M.Touguy, 1997].

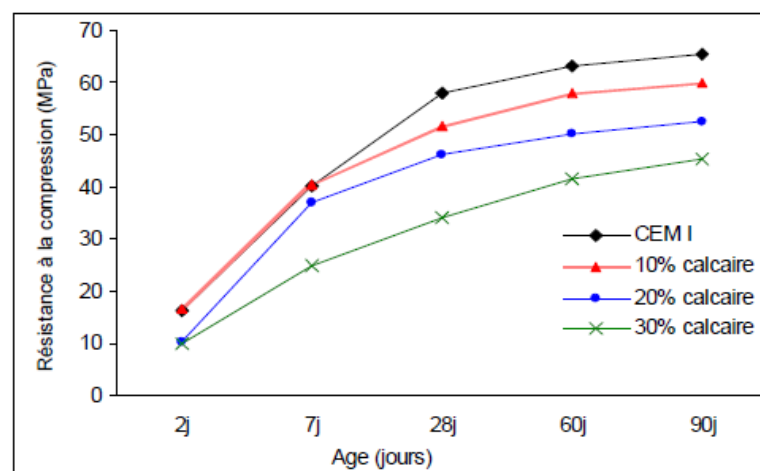


**Figure III.28.** Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires, [M.Tougy, 1997].

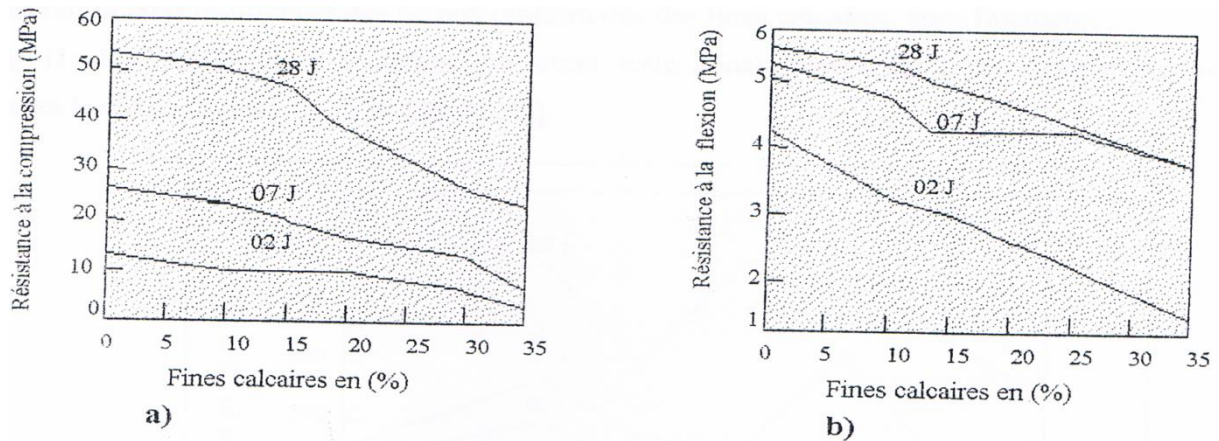
- **Résistance mécanique**

Plusieurs auteurs ont conclu que l'ajout des fines aux mortiers et aux bétons, engendre une chute des résistances qui n'est pas très importante lorsque la teneur en fine n'excède pas 20%, figure III.29; On note également que la cinétique d'évolution de la résistance à la flexion aux jeune âges des ciments avec calcaires est plus élevée que celle du ciment témoin, avec une tendance asymptotique des ciments renfermant plus de 20% des fines lorsqu'on approche de la l'âge de 28 jours [J. L.Ramires,1990] , [A.M.Paillère ,1977].

D'un notre côté J. L.Ramires, J.M,Barcena (1990 ) et T.Boubekeur et al (2012) , ont abouti à une amélioration de la résistance mécanique en substituant des fines argileuses du sable par des fines calcaires , Figures III. 30 .cette amélioration peuvent atteindre 57% par rapport à celle du témoin.



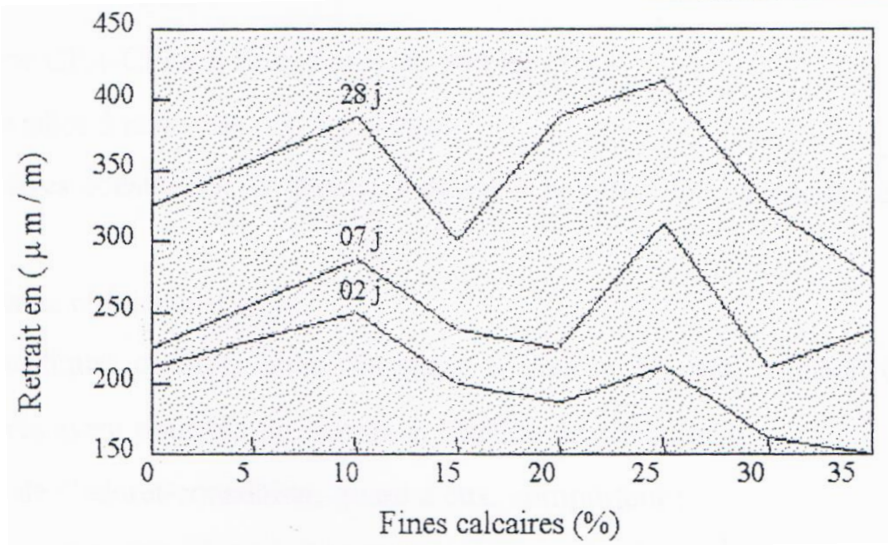
**Figure III .29 .** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire [T.Boubekeur et al ,2012]



**Figure III .30** : Résistance des ciments aux fines calcaires(a) : Compression – (b) : flexion [J. L.Ramires, J.M,Barcena ,1990]

- **Retrait**

Les retraits des mortiers et des bétons renfermant des fines calcaires, sont fluctueux ; (figure III.31) .Toutefois, la variation du retrait reste généralement faible et comparable pour toutes les teneurs jusqu'à 35%. [A.M.Paillère ,1977]. [ M.Tougy, 1997].



**Figure III .31.**Retrait des ciments aux fines calcaires [ M.Tougy, 1997].

### **C : Valorisation des granulats fins naturels (les sables) dans la formulation des bétons**

#### **e. Sable de dune**

On définit comme « sable » un matériau granulaire composé de petites particules de roche décomposées par le gel, ou l'érosion. D'après O. OSSERA ; le sable de dune c'est un

ensemble de grains fins de différentes compositions, gypseuse, quartzreuse, et carbonées avec des proportions très faibles d'argile [Source, [fr.wikipedia.org/wiki/Sable](http://fr.wikipedia.org/wiki/Sable)] .

Ces grains subissent une déflagration éolienne, et sont caractérisés par une granulométrie fine, la grosseur entre 0 et 0.63 mm, et une granulométrie arrondie et bien serré.

#### f. Sable concassé

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, des roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites, ou des roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

Les sables concassés sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage,...etc. La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

#### g . Les travaux antérieurs sur les utilisations du sable de dune dans la formulation des BHP

Les recherches de D. Benamara et B.Mezghiche (2010), consiste à étudier la durabilité et le comportement mécanique des bétons HP à base des différents types d'ajouts (sable de dune broyé, déchet de polissage de carrelage et calcaire). Le sable utilisé c'est le sable de dune de la région de Djelfa (sa masse volumique réelle  $2.43\text{g/cm}^3$ ). L'analyse chimique montre que leur nature est siliceuse (94,51% de silice  $\text{SiO}_2$ ). Les fines utilisées se sont les déchets de polissage de carrelage dans le but de recycler ce déchet polluant. Ce matériau est constitué par un ciment gris (23%) et un concassée de calcaire (77%). Ce filler est caractérisé par une très faible présence d'éléments nocifs avec une surface spécifique de l'ordre  $9000\text{ cm}^2/\text{g}$ .

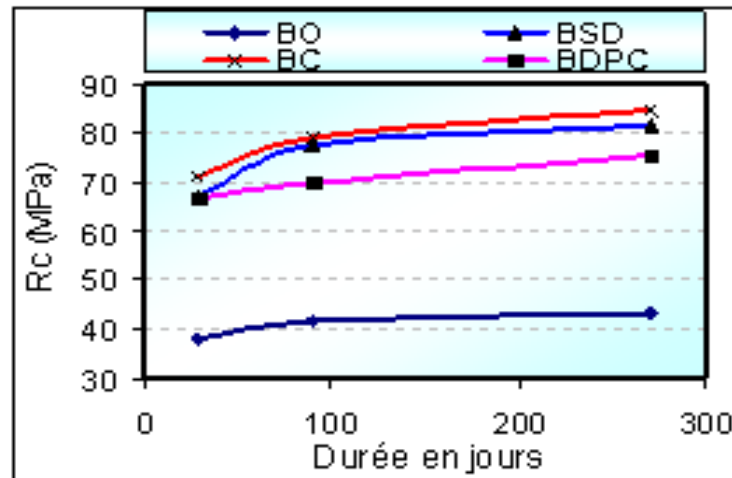
Le calcaire utilisé est fourni par la cimenterie de Chlef, c'est une roche concassée sous forme de cailloux de granulométrie (20/100 mm), avec une surface spécifique Blaine de  $11.000\text{ cm}^2/\text{g}$  (après le broyage), constituée essentiellement de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ).

Les résultats obtenus à température ambiante à des âges respectifs 28j, 90j et 270j ; pour un rapport E/C égale à 0.26 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ-42.5 et l'ajout de 15% du sable de dune présentent des propriétés performantes. La résistance des bétons avec ajouts présente des valeurs doubles que celle du béton ordinaire. Cette augmentation de résistance était prévisible et concorde parfaitement avec la littérature (Djaknoun et al. 2005) (Figure III.32).

Les résistances aux sulfates (Figure III.33), sont déterminées à partir des éprouvettes dont le durcissement était aux conditions naturelles pendant 28 jours (temps zéro), puis les éprouvettes sont immergés dans la solution du sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de concentration 5%.

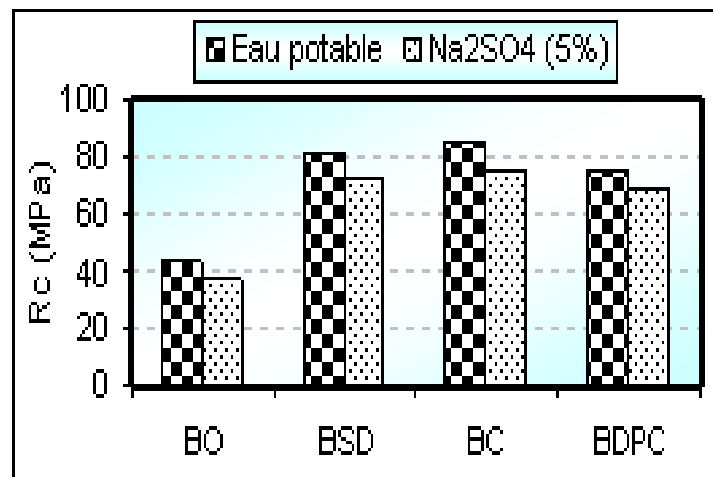
La confection d'un BHP à base de matériaux localement disponibles en Algérie et judicieusement étudiés est possible. Cela a permis d'aboutir à des bétons de 71 MPa en 28 jours

et 85 MPa en 270 jours. L'incorporation de 15% de sable de dune broyé conduit à une augmentation des performances mécaniques et de la durabilité des bétons.



**Figure III.32.** Résistance à la compression des bétons.

BO : CPJ - 42.5 , BC : CPJ - 42.5 + 10% Calcaire , BDPC : CPJ - 42.5 + 15% Déchet de polissage de carrelage, BSD : CPJ - 42.5 + 15% Sable de dune ,[D. Benamara,2010].



**Figure III.33.** Évolution de la résistance à la compression à l'âge 270j [D. Benamara, 2010].

L'étude d'A.Tafroui (2009), consiste à formuler un Béton à Ultra Hautes Performances (BUHP). Ce type de béton utilise en grande quantité de la fumée de silice, addition ultrafine qui lui confère ses performances très élevées, mais qui est aussi relativement rare et chère. L'objectif de cette étude est donc à la fois de valoriser le sable de dune de l'erg occidental du sud-ouest de l'Algérie mais aussi de diminuer les coûts de fabrication des Bétons à Ultra Hautes Performances en y incorporant du métakaolin à la place de la fumée de silice. Les performances à déterminer sont des performances mécaniques instantanées, en compression et en flexion, et différées, sous forme de retrait et de fluage, ainsi que des propriétés de durabilité.

L'étude consiste en première phase à une recherche d'une formule à dosage optimum en ciment pour le sable utilisé. Puis, ils ont procédé à la recherche d'une formulation de BUHP, adéquate en terme de mise en œuvre et permettant de remplacer la fumée de silice par le métakaolin et étudié la valorisation proprement dite du sable de dune. Les bétons obtenus présentent des performances mécaniques très élevées, allant jusqu'à une résistance en compression de 250 MPa, une résistance en traction par flexion de 45 MPa et une résistance à la traction directe d'environ 20 MPa, avec le mode de traitement thermique approprié. Ils présentent aussi un très bon comportement différé, y compris sous charge, ainsi que d'excellents indicateurs de durabilité. Cette étude montre que la valorisation du sable de dune étudié est tout à fait possible dans les BUHP, et en particulier les BUHP fibrés, et que le remplacement de la fumée de silice par le métakaolin n'altère pas les propriétés de ces bétons.

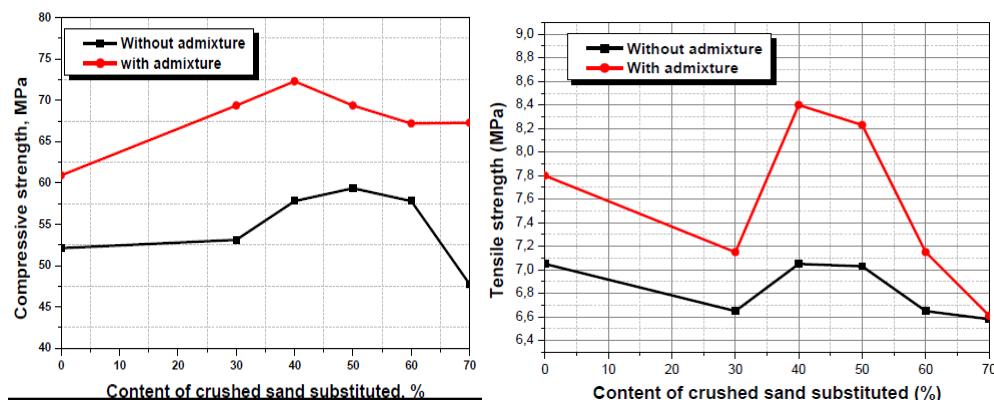
L'étude expérimentale de R'mili A., M. Ben Ouezdou (2012), montre que les paramètres d'ouvrabilité des BAP sont améliorés lorsque le sable concassé est partiellement remplacé par le sable de dune (< 30%). Cependant, à une teneur élevée en SD (> 30%), des quantités supplémentaires en eau et en super plastifiant sont nécessaires, pour répondre aux performances du béton. Les résistances mécaniques diminuent en ajoutant le SD au SC, mais elles atteignent des valeurs acceptables pour des dosages modérés en SD. Les performances des BAP sont nettement meilleures que celles des BO confectionnées avec les mêmes granulats. Les essais de spécification de la durabilité montrent que les coefficients d'absorption d'eau par capillarité et par immersion augmentent en ajoutant le SD au SC alors que le coefficient de perméabilité diminue.

L'étude apportée par M. Maza et al (2016), vise principalement, d'évaluer les caractéristiques de mortier de ciment à l'aide de déchets de carrière comme agrégat fin et sa comparaison avec les mortiers confectionnés avec le sable des dunes. L'objectif de cette étude est de montrer l'effet de l'utilisation du sable concassé comme remplacement partiel du sable de dune avec divers pourcentages (0%, 30%, 40%, 50%, 60% et 70%), sur les propriétés de mortier telles que la compression, à la flexion et à la traction, la maniabilité, etc., et aussi de déterminer le dosage optimal des granulats fins (sable concassé) dans le mortier ayant une résistance maximale à la compression.

Les principaux objectifs de ce travail expérimental étaient d'étudier les points suivants:

- La possibilité de réutilisation des déchets de carrière dans le mortier en remplacement partiel les granulats fins dans le mélange afin de réduire l'impact sur l'environnement résultant de l'élimination de déchets industrielle.
- L'impact des déchets solides (sable concassé) sur les propriétés physiques du sable binaire préparé (par exemple, la densité, la porosité, le module de finesse, la distribution des tailles de particules et d'absorption d'eau) et de la réponse mécanique (par exemple, la flexion, à la traction et à la compression) des mortiers fabriqués avec des mélanges de sable binaires.

Les résultats obtenus précisent de façon claire que la substitution du sable de dune par le sable concassé avec des pourcentages (30%, 40% et 50%) améliore les résistances mécaniques (compression, flexion par traction) des mortiers testés (Figure III.34).



**Figure III.34.** Variation de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers à 28 jours en fonction de sable concassé substitué, [M. Maza et al, 2016].

O.J.Uzomaka (1977), à analyser l'effet de la dimension des particules du sable qui affecte la résistance des blocs. Il a utilisé deux sables différents, un sable de dune très fin, et autre grossier, les résultats obtenus montrent que la résistance augmente avec le sable grossier, ce qui n'est pas le cas pour le sable de dune. Il apparaît évident, quand il s'agit de sable de dune pour obtenir une résistance égale à celle du matériau coulé avec du sable grossier, on est obligé d'utiliser une grande quantité de ciment.

La Russie parmi les premiers pays qu'a connu la technique de béton de sable, ceci peut être expliqué par le fait que ce pays est très pauvre en gros granulats, et ses ressources sont mal réparties. Dans certaines régions de ce pays, le sable a des caractéristiques presque similaires à celle du sable de dune particulièrement, la propreté et la granulométrie. La plupart des articles de Russie ne donnent pas assez d'information sur les compositions choisies. Ils sont très peu les documents qui traitent sur le comportement de béton de sable.

#### h. Méthodes de formulations

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible, [P.C. Aitcin, 2001].

Pour formuler des bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaité. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable / gravillons sur une courbe de référence. [P.Turery.2004].

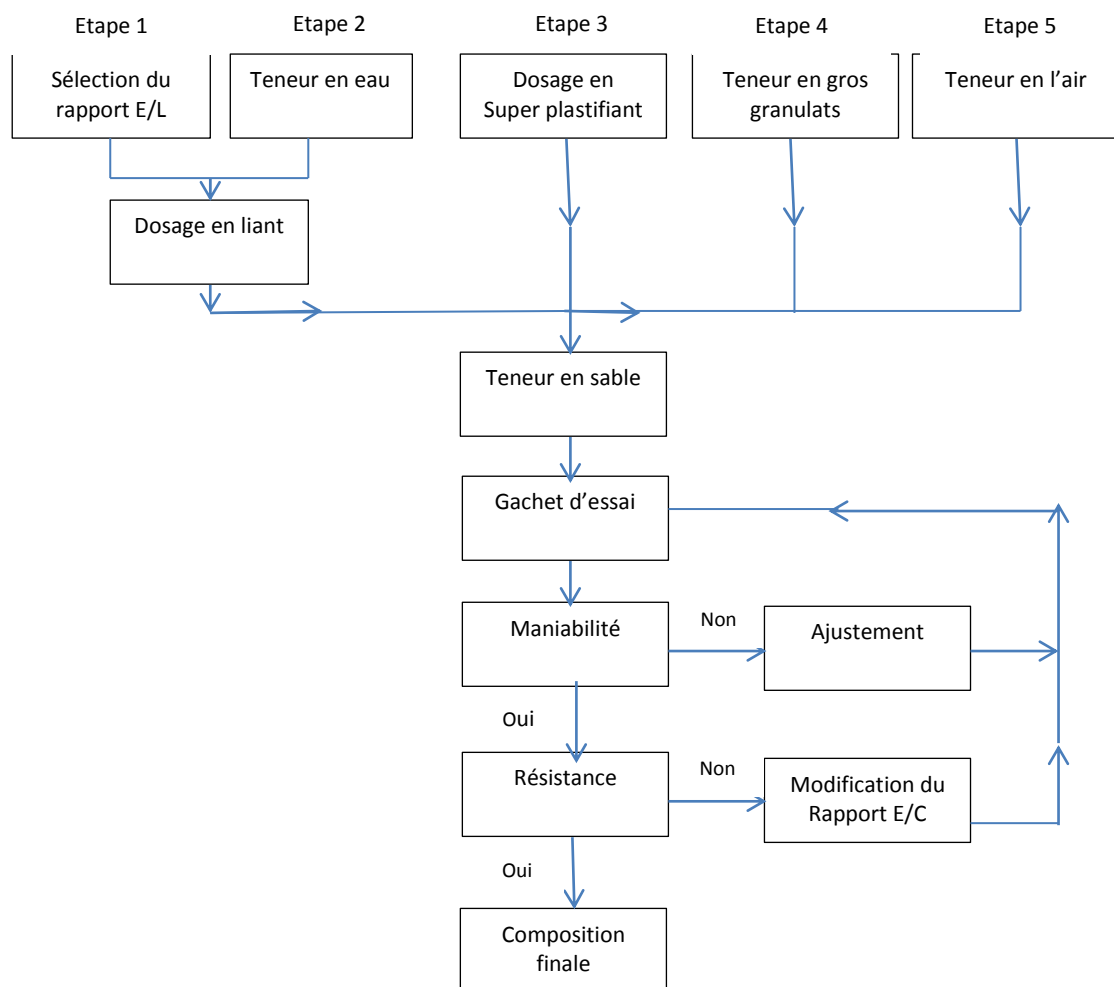
En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Bien que les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton [P.C. Aitcin, 2001]. A ce titre il y a lieu de

présenter quelques méthodes de formulation :

- 1) Méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993).
- 2) Méthode proposée par de Larrard (dite des coulis du LCPC en 1990).
- 3) Méthode présentée par Mehta et Aitcin(1990).
- 4) Méthode de Pedeches (1988)
- 5) La méthode de L'Université de Sherbrooke.

### La méthode de L'Université de Sherbrooke:

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton. [P.C. Aitcin ,2001]. Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous.

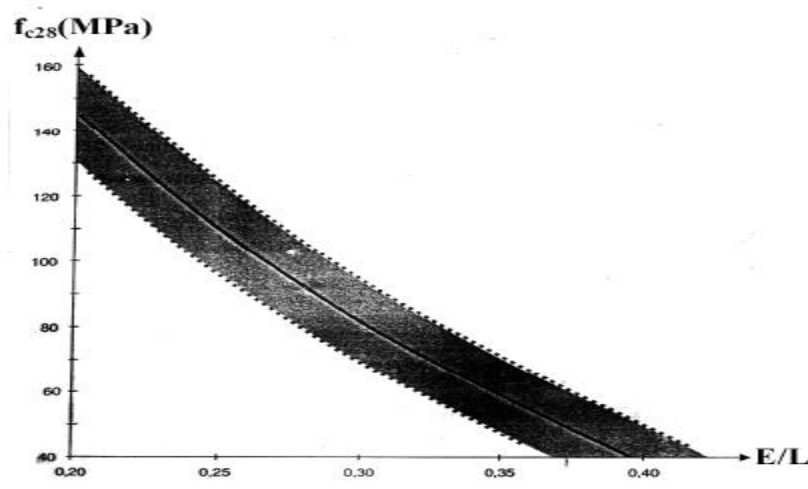


**Figure III.35.** Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP[P.C. Aitcin ,2001]

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés: le rapport eau / liant; le dosage en eau ; le dosage en super plastifiant; le dosage en gros granulat; la teneur en air et la teneur en air.

### Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la figure III.36 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la figure III.36 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau [P.C. Aitcin ,2001].



**Figure III.36.** Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression

[P.C. Aitcin ,2001]

### Dosage en eau:

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier [P.C. Aitcin ,2001].

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience (Rougeron et Aitcin, 1994). La figure III.37 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter  $5\text{L}/\text{m}^3$  à toutes les valeurs présentées à la figure V-29. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à  $145\text{L}/\text{m}^3$  [P.C. Aitcin ,2001].

Point de saturation	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	%
Dosage en eau	120 à 125	125 à 135	135 à 145	145 à 155	155 à 165	$\text{l/m}^3$

Figure III.37. Détermination du dosage en eau, [P.C. Aitcin ,2001].

### Dosage en super plastifiant:

Le dosage en super plastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en super plastifiant égale à 1.0%.

### Point de saturation:

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en super plastifiant à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le super plastifiant par rapport à la masse de ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la figure III.38. Cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes. L'intersection de ces deux parties linéaire est ce que l'on appelle le " point de saturation ", c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en super plastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en super plastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

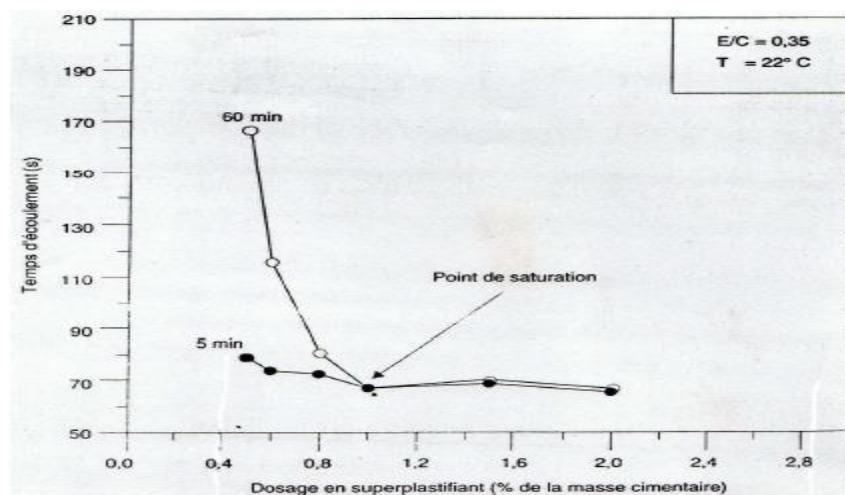


Figure III.38. Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant [P.C. Aitcin ,2001].

### Dosage en gros granulat:

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la (figure III.39) en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

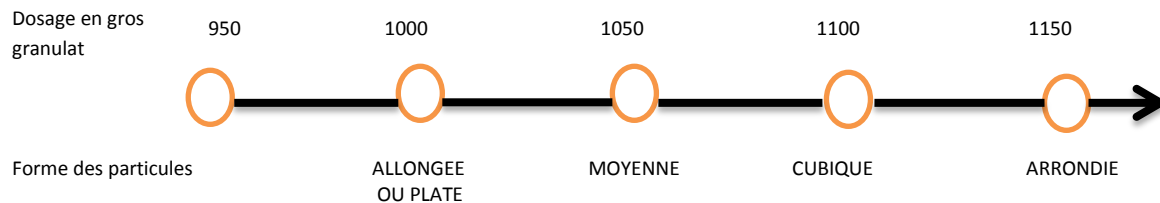


Figure III.39 .Dosage en gros granulat [P.C. Aitcin ,2001]

### Teneur en air :

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel-dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP [P.C. Aitcin ,2001]. L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé [P.C. Aitcin ,2001].

### Conclusion

La formulation d'un BHP est tout autant un art qu'une science à l'heure actuelle. Il est en effet difficile de formuler un BHP en ne connaissant pas la fiche technique des matériaux qui le composent. En effet plusieurs combinaisons des mêmes matériaux permettent d'obtenir une résistance à 28 jours donnés.

Cependant la formulation d'un BHP ne relève pas uniquement du plus pur empirisme elle s'appuie plutôt sur un certain nombre de résultats de l'expérience et sur la méthode de calcul dite des volumes absolus. Plusieurs approches ont été proposées par différents chercheurs, ils choisissent la méthode de L'Université de Sherbrooke parce que c'est celle que nous utilisons tous les jours. Cette méthode est simple, facilement comprise par les étudiants et les chercheurs. Quelle que soit la méthode de calcul qui aura été utilisée, il faudra bien finir par faire des gâchés d'essais, mais si on peut limiter ce nombre au strict minimum, c'est autant du gagné.

# *Matériaux et procédures expérimentales*

*Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux utilisés, les formulations de bétons, les compositions des granulats, la démarche méthodologique et les dispositifs expérimentaux mis en place pour caractériser les propriétés des bétons et des granulats. Deux formulations de béton sont étudiés : béton ordinaire et béton à haute performance ( $E/C = 0.3$ ). Des essais de traction par flexion et de compression sont menés afin d'analyser les différences de propriétés mécaniques résiduelles des bétons selon la nature des granulats. La durabilité des bétons et leur évolution en fonction du temps sont étudiées également. L'évolution de la porosité et de la perte de masse des bétons complètent cette caractérisation du comportement des bétons soumis à des agressions chimiques. Tout cela a permis de mieux comprendre l'influence des divers ajouts (poudre de marbre, laitier de haut fourneau et la fumée de silice) et des différentes compositions minéralogiques de granulat sur les caractéristiques physiques et mécaniques à l'état durci et sur le comportement aux milieux agressif.*

### **IV.1. Description du programme expérimental**

Le programme expérimental a été réalisé en quatre phases successives. Dans une première phase, six ciments composés ont été fabriqués en substituant une partie du ciment par un ou deux ajouts cimentaires disponibles localement, naturels ou sous-produit artificiels (laitier granulé de haut fourneau, fumée de silice et poudre de marbre). Les compositions minéralogiques et chimiques des éléments de départ sont étudiées par diffraction X. Des essais sur ciments anhydres (densité absolue, surface spécifique Blaine et granulométrie laser), sur pâte de ciment (consistance et temps de prise).

Dans une deuxième phase, une étude préliminaire a été réalisée en confectionnant un BHP à base de sable de dune en optant pour un rapport eau/liant ( $E/L = 0.30$ ), avec adjuvant et une finesse de mouture des ciments constante. Des pourcentages d'ajouts cimentaires (poudre de marbre, fumée de silice et laitier granulé) sont substitués au ciment.

Pour chaque mélange, des éprouvettes  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  coulées et conservées dans l'eau gypseuse ont été soumis à des essais de compression. Le sable de dune a été caractérisé par diffraction X.

La troisième phase avait pour objet d'évaluer l'influence des nouveaux liants fabriqués sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) des bétons à hautes performances à base de sable de dune et sable concassé (sables locaux) avec un adjuvant.

Afin de bien évaluer le comportement mécanique et la durabilité dans des milieux agressifs (solutions de chlorure sodium (NaCl) et sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ) avec une concentration 5%, la quatrième phase est donc consacrée à l'étude des bétons à hautes performances à base des sables binaires (sable de dune et sable concassé). Les bétons ont été

caractérisés mécaniquement à 28 jours , 9 mois et 1an. La microstructure interne est observée par diffraction X. Les analyses thermiques gravimétriques et différentielles (ATG et ATD) permettent de quantifier la portlandite. Ces techniques sont utilisées pour caractériser les dégradations.

Pour bien axer notre travail de recherche sur l'addition minérale, à l'exception de sa nature, tous les autres matériaux utilisés (ciment, sable, gravier et adjuvant) sont identiques pour toutes les formulations.

Le BHP est caractérisé par des essais spécifiques à l'état frais, pour cela, une étude expérimentale systématique à l'état frais et durci de tous les BHP a été réalisée, Il s'agit des essais suivants :

- L'affaissement,
- Mesure du pourcentage d'air occlus et la masse volumique.
- Résistance à la compression et à la traction

En ce qui concerne les essais de durabilité, nous avons réalisé les essais suivant :

- l'absorption capillaire
- la porosité accessible à l'eau.
- la carbonatation naturelle
- la résistance aux agressions chimiques (Eau sulfaté, NaCl et MgSO<sub>4</sub>)

## IV.2. Caractéristiques et sélection des matériaux utilisés

### IV.2.1.Ciment

Dans cette investigation, nous avons utilisé deux types de ciment de la cimenterie Hammam Dalâa (Wilaya de M'sila). Le premier est un CPA- CEM I 42.5 (C<sub>1</sub>), deuxième est un CPJ-CEM II/A 42.5N (C<sub>2</sub>), conforme à la norme Algérienne NA 442 et Européenne (EN CE 197-1).

L'analyse chimique et minéralogique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire UR/MPE (Unité de recherche) de l'université de Boumerdés. La composition chimique et minéralogique, la résistance mécanique à la compression et à la traction du ciment sont représentées au tableau (IV.1).

**Tableau IV.1.** Composition chimique et minéralogique du ciment, en (%)

<b>Composition chimique</b>		
<b>Element (%)</b>	<b>CPA- CEM I 42.5 (C1)</b>	<b>CPJ-CEM II/A 42.5N (C2)</b>
<b>CaO</b>	63.7	61.04
<b>SiO<sub>2</sub></b>	21.6	18.48
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.09	4.51
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.54	3.21
<b>SO<sub>3</sub></b>	1.9	2.18
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.03	0.13
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	0.56
<b>MgO</b>	1.6	2.16
<b>CL<sup>-</sup></b>	0.02	-
<b>MnO</b>	-	-
<b>Surface spécifique Blaine</b>	4120	4000 - 4200
<b>Composition minéralogique</b>		
<b>C<sub>3</sub>S</b>	55	57
<b>C<sub>2</sub>S</b>	17	18
<b>C<sub>3</sub>A</b>	2.8	07
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	13	11

Le tableau IV.2 présente les résistances, le temps de prise et la fin de prise obtenus sur chacun des deux ciments.

**Tableau IV.2.** Résistances mécaniques à la compression et à la traction du ciment

<b>Résistance (MPa)</b>		<b>C1</b>	<b>C2</b>
<b>2j</b>	<b>Compression</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>7j</b>		<b>29</b>	<b>32</b>
<b>28 j</b>		<b>&gt; 42.5</b>	<b>&gt; 42.5</b>
<b>Début de prise</b>		<b>2h47min</b>	<b>2h30min</b>
<b>Fin de prise</b>		<b>3h50min</b>	<b>3h30min</b>

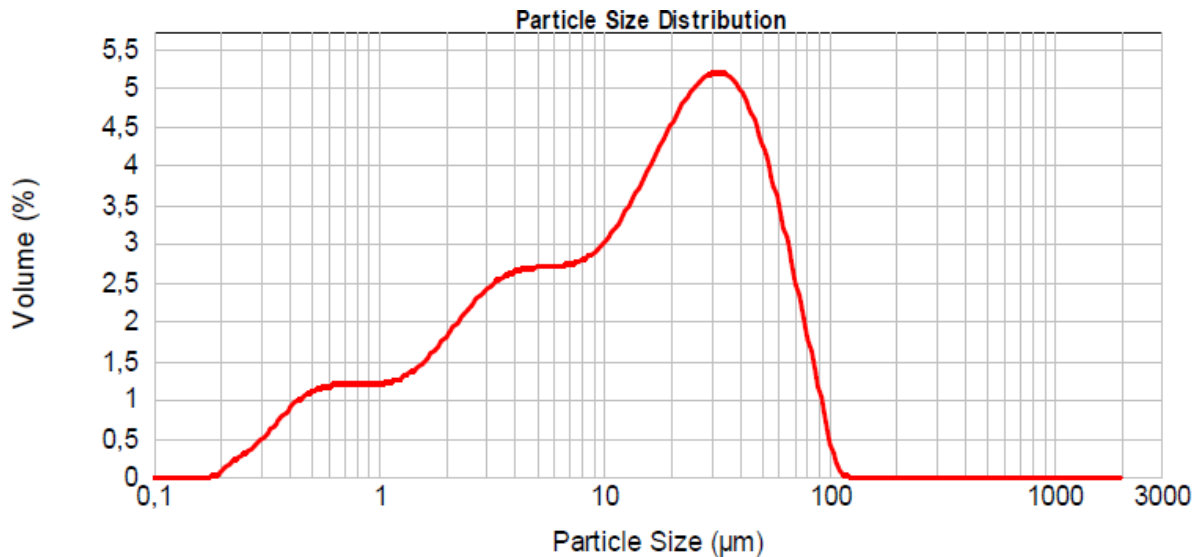


Figure IV.1. La courbe granulométrique du ciment C<sub>2</sub>

IV.2.2. les granulats

IV.2.2.1. Gravier

Nous avons utilisé des granulats calcaires du carrière KHARKHACHE (situé à 30 km de M’sila, en allant vers BBA), un gravier 3/8 et un gravillon 8/15. L’analyse granulométrique, les caractéristiques physiques et chimiques, mécaniques et morphologiques de ces granulats sont représentées dans les tableaux (IV.2,..., IV. 8).

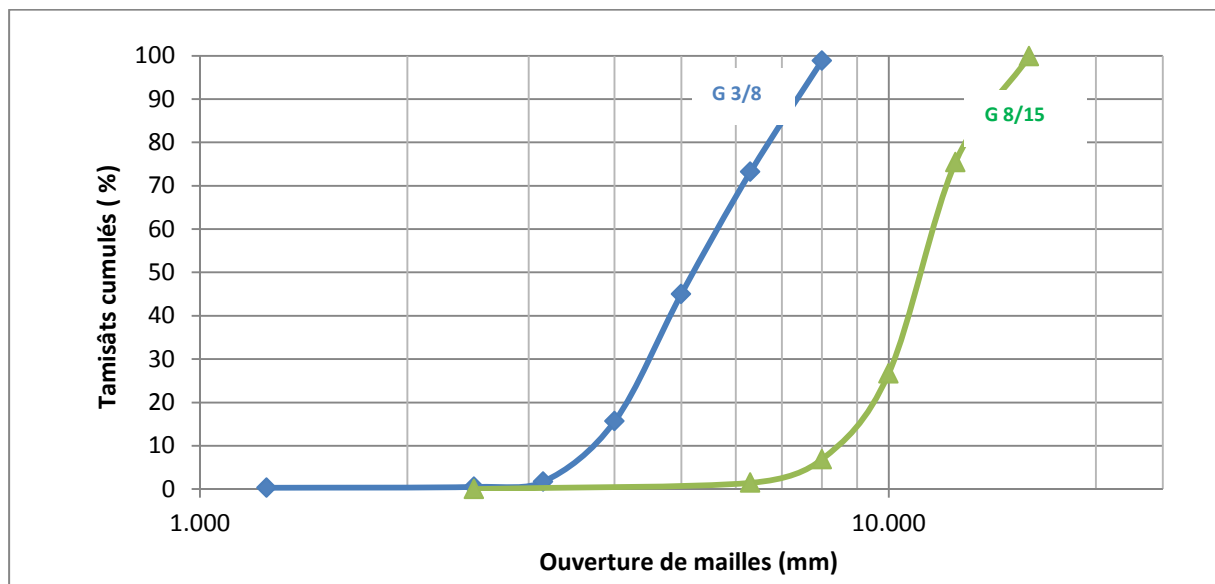


Figure IV.2. Courbes granulométriques des granulats

Constatation sur la courbe granulométrique :

La courbe montre une granularité continue du granulat, est monotone et croissante.



**Photo IV.1.** Les granulats utilisés dans l'étude

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de plusieurs facteurs. L'obtention d'un béton résistant, étanche et durable est le souhait du fabricant. Afin d'atteindre cet objectif, les courbes d'analyse granulométrique sont utilisées pour nous permettre d'acquérir la meilleure compacité dans un mélange de granulats. Les courbes granulométriques des différents granulats ont été déterminées sur des échantillons représentatifs de gravier, de gravillon et de sable selon la norme (NF EN 933-1). Les résultats des analyses granulométriques des granulats sont portés sur la figure IV.2.

#### IV.2.2.2. Sable

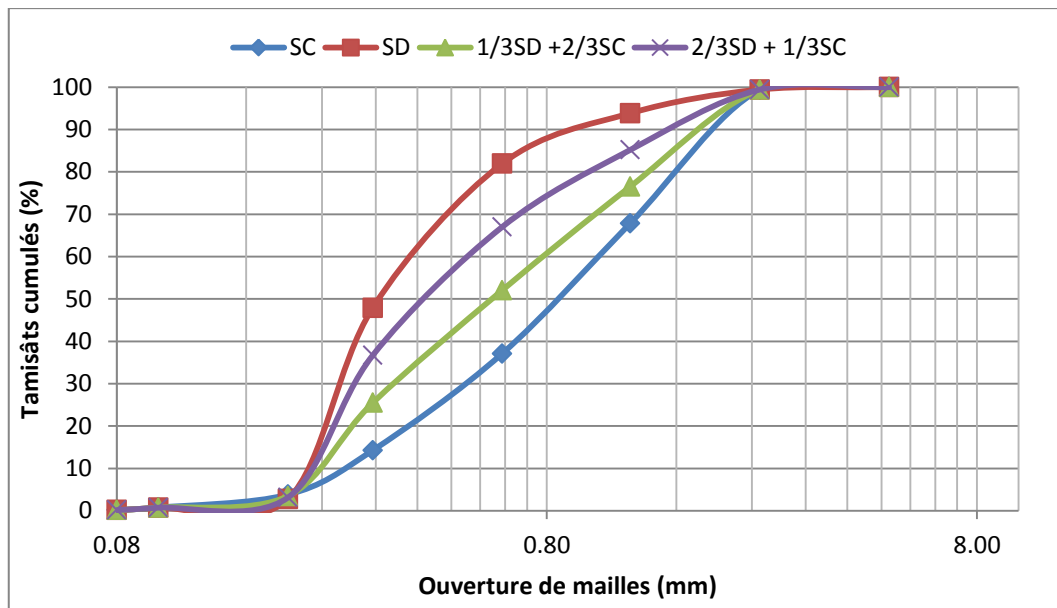
On a utilisé deux types de sable dans cette étude :

- Sable de dune (roulé) provenant de L'oued MAITAR (BOUSAADA) ;

Sable concassé (issu d'une carrière de KHARKHACHE). On a étudié cinq types de mélanges :

- 100% sable de dune noté (SD),
- 100% sable de carrière noté (SC);
- 1/3 sable de dune et 2/3 sable concassé noté (1/3SD) ;
- 2/3 sable de dune et 1/3 sable concassé noté 2/3SD).

**Remarque :** pour éviter les disparités d'échantillonnage, les granulats utilisés durant ces travaux sont issus de la même livraison. Leur stockage s'effectue dans des sacs plastiques conservés à l'abri des intempéries. Quelques jours avant leur utilisation, les granulats sont entreposés dans des bacs et conservés dans le laboratoire pour séchage à l'air libre.



**Figure IV.3.** Courbes granulométriques des sables (SD, SC, 1/3SD et 2/3SD).

Le module de finesse ( $M_f$ ) est un facteur très important qui nous permet de juger la qualité du sable. Le tableau IV.3 représente les modules de finesse des sables utilisées.

**Tableau IV.3.** Module de finesse des sables

Type de sable	Module de finesse " $M_f$ "	Qualité de sable
SD	1.71	fin
SC	3.29	Gros
1/3SD + 2/3SC	2.63	Gros
2/3SD + 1/3SC	2.94	Gros

La masse volumique d'un granulat est une caractéristique physique fondamentale influençant notablement les caractéristiques mécaniques des granulats et par conséquent les performances du béton. Le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat est également un facteur important. Il influence la quantité d'eau de gâchage nécessaire à la fabrication du béton. Les masses volumiques réelles et les coefficients d'absorption d'eau à 24 heures des trois types de granulats utilisés dans cette étude sont mesurés (tableaux IV.4, IV.5) au laboratoire de génie civil (GC) selon la norme NF EN 1097-6.

**Tableau IV.4.** Caractéristiques mécaniques et morphologiques des granulats

Classes granulats	Los Angeles « $L_A$ » (%)	Micro Deval (%)	Coeff D'aplatissement (%)	ES (%)	
				ESV	ESP
3/8	16.14 (< 20) Gravier très dure	16.6	15	-	-
8/15	20.88 (20 < $L_A$ > 25) Gravier dure	17.6	16.5		
SD	-	-	-	91.67	86
SC	-	-	-	95.4	93.42

**Tableau IV.5.** Caractéristiques physiques des granulats

Classes granulats		$M_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$M_{abs}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Degré d'absorption d'eau (%)	Porosité (%)	Compacité (%)	Indice de vide (%)
3/8	Lâche	1.44	2.70	1.137	46.66	53.34	87.47
	Compact	1.63			39.62	60.38	65.62
8/15	Lâche	1.48	2.67	1.465	44.56	55.35	80.37
	Compact	1.65			38.20	61.8	61.81
SD	Lâche	1.75	2.65	2.44	34	66	51.51
	Compact	1.9			28.30	71.7	39.47
SC	Lâche	1.75	2.70	1.1	35	65	53.84
	Compact	1.95			27.77	72.23	38.45
1/3SD	Lâche	1.86	2.64	0.37	30.79	69.21	44.48
	Compact	2.02			23.48	76.52	30.68
2/3SD	Lâche	1.82	2.63	1.02	30.79	69.21	44.48
	Compact	2			23.95	76.05	31.49

Les caractéristiques chimiques principales des granulats (voir le tableau IV.6) ont été établies par le fournisseur. Ces analyses chimiques sont réalisées par fluorescence X et des

mesures de perte au feu sont aussi effectuées. Ces analyses donnent un ordre d'idée de la composition chimique des granulats utilisés dans cette étude.

**Tableau IV.6.** Composition chimique des granulats

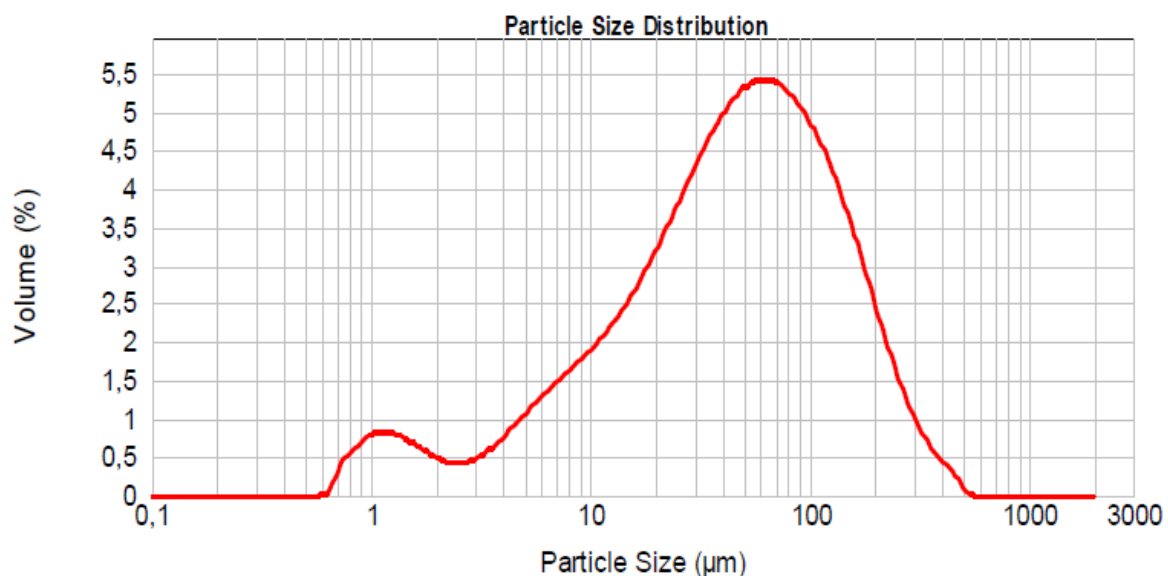
Les granulats (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
SC	03.31	1.17	01.09	51.43	0.91	0.55	0.09	0.01
SD	88.25	0.71	0.96	2.49	0.17	0.08	0.3	0.01

### IV.2.3. La fumée de silice

Dans notre étude, nous avons utilisé une fumée de silice provenant de l'usine Granitex (Algérie). Nous présentons dans le tableau IV.7 sa composition chimique. La fumée de silice contient plus de 85% de silice pur ; sa densité est  $< 0.5$ , la taille de ces particules  $< 0.1$  microns et sa surface spécifique BET  $> 15 \text{ m}^2/\text{gr}$ .

**Tableau IV.7.** Composition chimique de la fumée de silice ( l'usine Granitex)

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Cl
Oxydes (%)	$> 85$	-	-	-	$< 2.5$	-	$< 0.2$



**Figure IV.4.** Courbe granulométrique de la fumée de silice (FS).

## IV.2.4. Laitier granulé

Le laitier granulé de haut fourneau D'El -Hadjar (Annaba), est utilisé en qualité d'ajout, obtenue par refroidissement par trempe dans l'eau et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de sable de couleur gris clair de granulométrie 0 à 5 mm.

Sa composition chimique est donnée au tableau IV. 8, c'est un silico-aluminate de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui sont : (SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO).

**Tableau IV.8.** Composition chimique du laitier D'El -Hadjar (Annaba)

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	MnO
Oxydes ( % )	41.69	7.05	1.41	39.77	5.49	0.15	0.44	0.10	-	-
Surface spécifique	5000 cm <sup>2</sup> /g									

Les indices de basicité « I<sub>b</sub> » indique si ce laitier est basique ou acide .Les indices les plus utilisés sont les suivants :

- $I_{b1} = \frac{CaO \% + MgO \%}{SiO_2 \%} = 1.08$  ,  $I_{b1} < 1.51$
- $I_{b2} = \frac{CaO \%}{SiO_2 \%} = 1$  ,  $I_{b2} \geq 1$
- *Module d'activité* :  $Ma = \frac{Al_2O_3 \%}{SiO_2 \%} = 0.17$  (acceptable).

A partir des résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique, ce qui le rend apte à l'activation alcaline. Le diffractogramme du laitier granulé du haut fourneau d'Annaba présenté à la figure IV.5 est typique de laitier amorphe qui présente cependant deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer.

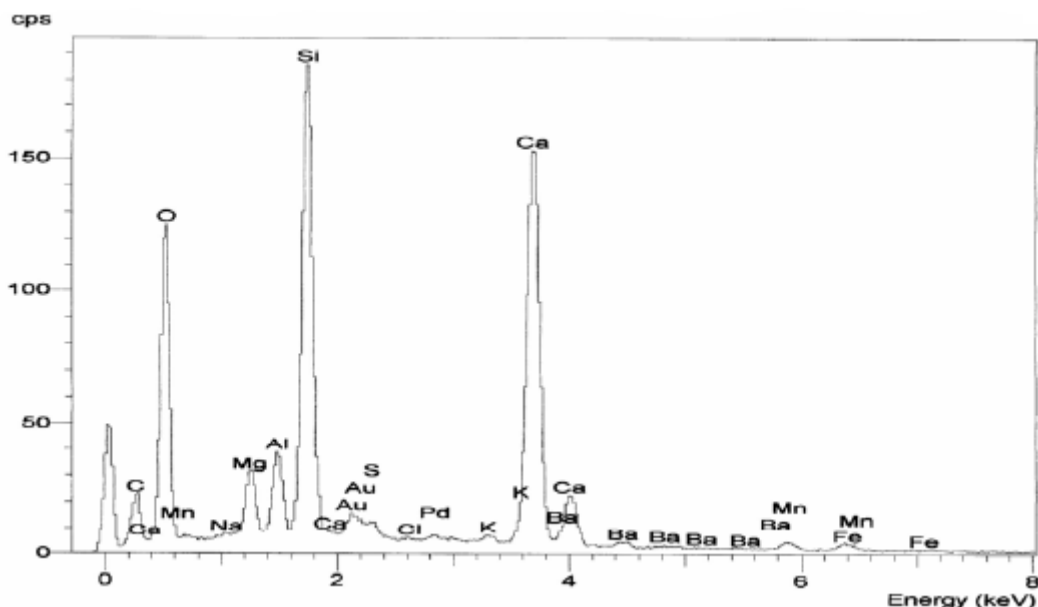


Figure IV.5. Diagramme de diffraction X du laitier granulé

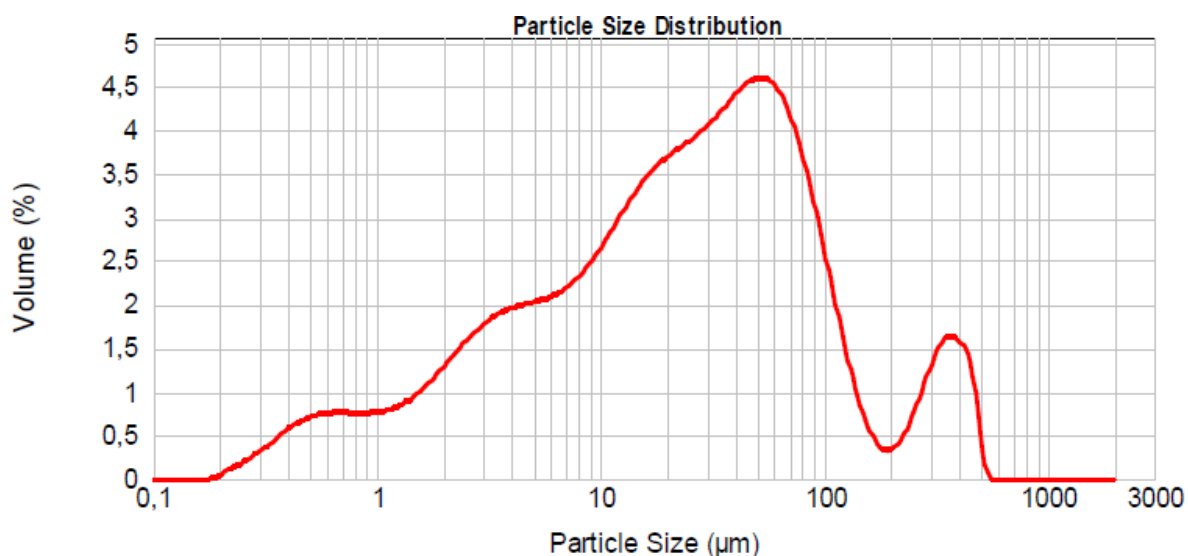


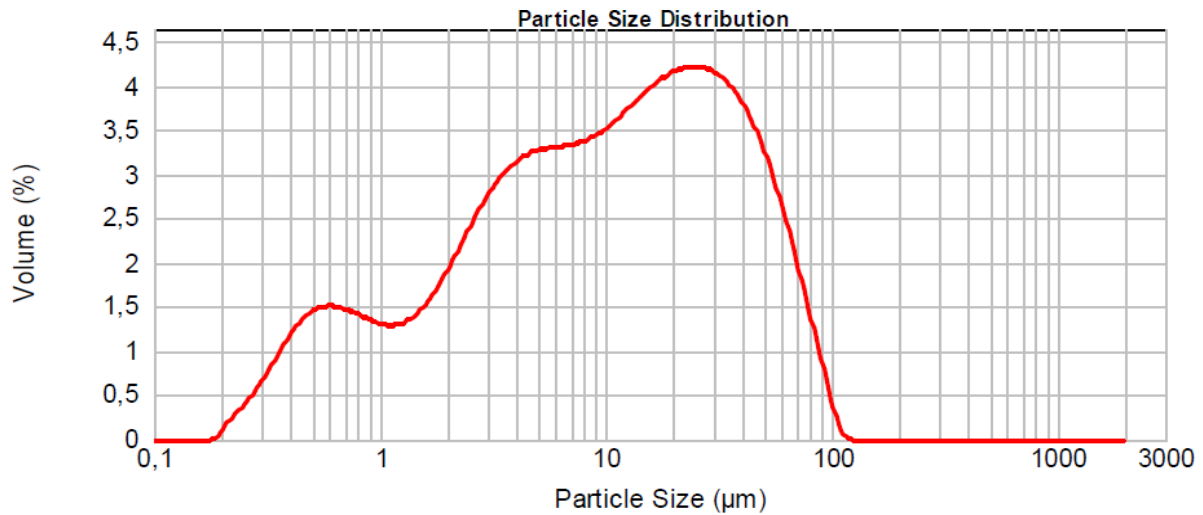
Figure IV.6. Courbe granulométrique du laitier granulé (L)

IV.2.5. Poudre de marbre

La poudre de marbre (PM) utilisée, est un déchet de la fabrication de revêtement de type carrelage issue d'une industrie à Boussaâda (Algérie). La structure de La poudre de marbre est microcristalline, de couleur blanche ; sa masse volumique de 650 kg/m<sup>3</sup> et sa surface spécifique BET de 3448 cm<sup>2</sup>/g. Sa composition chimique est donnée au tableau IV. 9.

Tableau IV.9. Composition chimique de la poudre de marbre

Eléments	P.A.F	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Oxydes (%)	42.56	1.47	0.35	0.14	55.3	0.01	0.01	0.04	0.12



**Figure IV.7.** Courbe granulométrique de la poudre de marbre (PM)



**Photo 2 :**  
Echantillon de la fumée  
de silice



**Photo 3 :**  
Echantillon de laitier  
granulé



**Photo 4 :**  
Echantillon de la  
poudre de marbre

#### IV.2.6. L'eau de gâchage

L'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de béton est une eau potable de robinet. Il s'agit d'une eau potable exempte d'impuretés.

#### IV.2.7. Les adjuvants

L'adjuvant utilisé MEDAPLAST SP 40, est un super plastifiant à base de polymères combinés, fourni par l'entreprise GRANITEX (Alger - Algérie). Il est recommandé dans la réalisation des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il diminue considérablement la teneur en eau du béton.

L'adjuvant MEDAPLAST SP 40 permet d'augmenter les résistances mécaniques à long terme. Il est applicable à tout type de ciment conforme à la norme EN 934-2 NA 774. La plage d'utilisation recommandée entre 0.6% à 2.5% du poids de ciment. Ses caractéristiques physiques et chimiques sont représentées dans le tableau IV.10.

**Tableau IV.10.** Caractéristiques physiques et chimiques de l'adjuvant « MEDAPLAST SP 40 »

Nature	Densité apparente	PH	Teneur en Cl <sup>-</sup>	Extrait sec
Liquide	1.2±0.01	8.2	< 1g/L	40 %

### IV.3. Caractérisation rhéologique de la matrice cimentaire

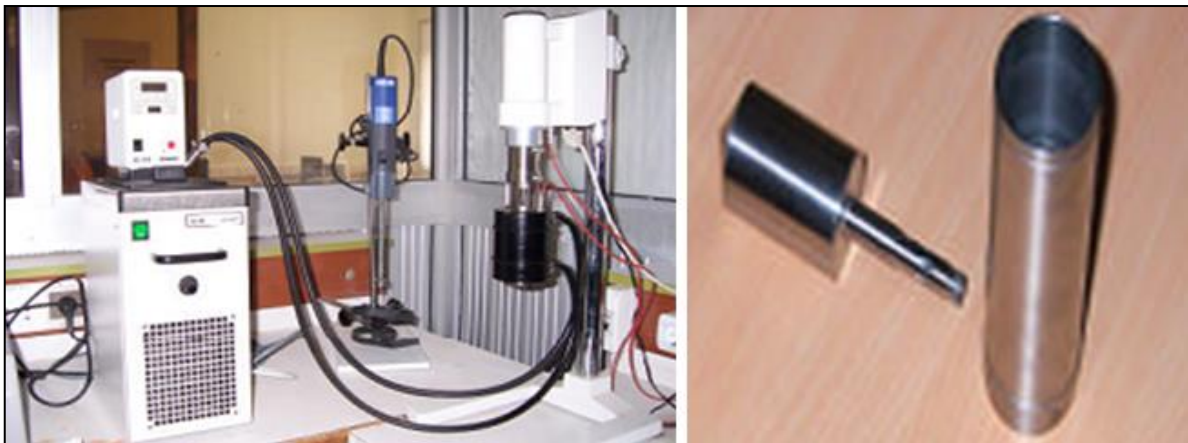
Les essais ont été réalisés au laboratoire UR/MPE (Unité de recherche) de l'université de Boumerdés à l'aide d'un Viscosimètre VT550 (figure IV.8).

Cette partie est consacrée uniquement à l'étude de la pâte cimentaire (ciment + eau + adjuvant) et qui a pour but de comprendre l'influence de ce type d'adjuvant ainsi que sa teneur sur le seuil d'écoulement de la pâte.

Pour mieux comprendre les propriétés rhéologiques de la pâte cimentaire, on a préparé une pâte de même composition que celle du BAP (ciment), en variant uniquement le dosage en super plastifiant de 0,5 % afin d'obtenir le point de saturation de l'adjuvant utiliser.

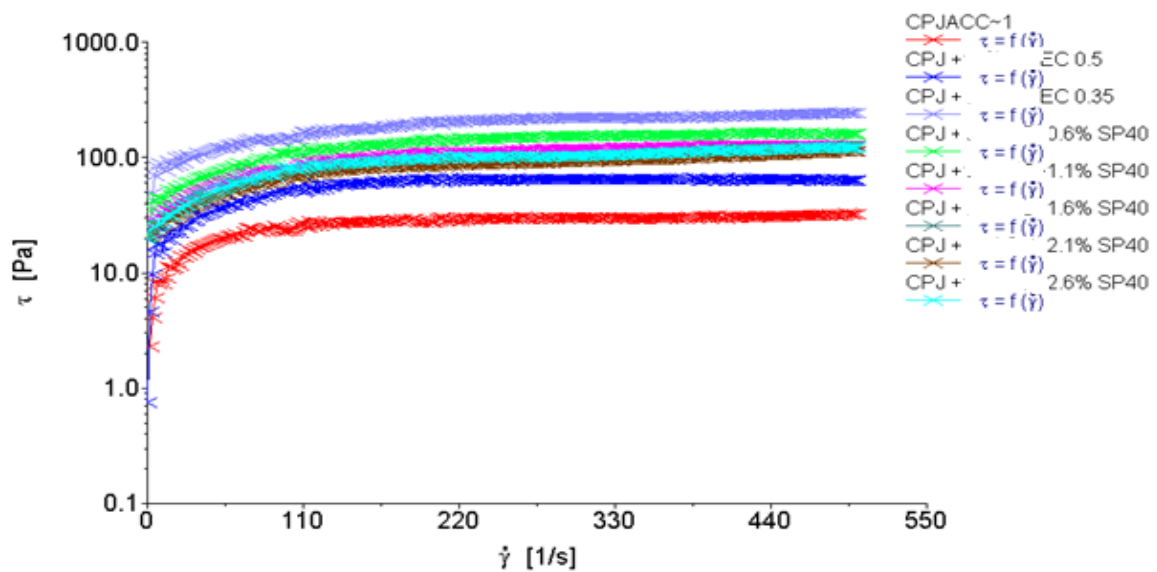
#### Matériaux et matériels utilisés :

- 100g de ciment ;
- 38.5 ml d'eau (E/C =0,35)
- différents teneurs en super plastifiant (variant de 0,5%).
- Viscosimètre VT550



**Figure IV.8.** Viscosimètre VT550

Les différents résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.9.



**Figure IV.9.** Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du % en super plastifiant SP 40

**Résultat : Point de saturation (%) est : 1,5%**

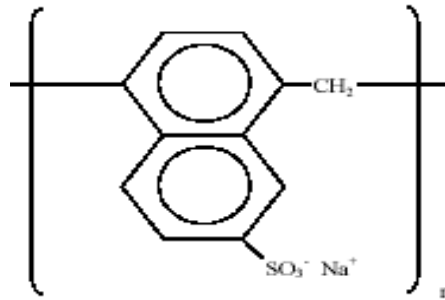
Le point de saturation est la teneur en super plastifiant optimale au-delà de laquelle le super plastifiant n'a plus d'effet et le résultat trouvé est de 1,5%.

On remarque sur tous les rhéogrammes que plus le pourcentage en adjuvant augmente plus l'écoulement se rapproche de l'écoulement Newtonien grâce à l'effet dispersant.

On remarque également qu'à un certain dosage la pâte s'écoule sans le moindre effort, c'est le point de saturation (1.5%, pour le PNS), entraînant la diminution du seuil d'écoulement (contrainte seuil).

De même que plus le pourcentage en super plastifiant augmente plus la viscosité de la pâte diminue jusqu'à ce qu'elle soit constante (écoulement presque newtonien); ceci est dû à l'effet dispersant du super plastifiant qui s'adsorbe à l'interface des grains du ciment créant ainsi des forces répulsives entre les particules, réduisant ou éliminant carrément l'adhésion entre les particules voisines. Le MEDAPLAST SP 40 (Granitex) est un super plastifiant de type polynaphtalène sulfonate (PNS).

**B. Poly Naphtalène Sulfonate (PNS) :** Le PNS est un polymère constitué de la répétition d'un même motif de formule :  $[-CH_2-C_{10}H_5(SO_3-Na^+)-]$ . Celui-ci est composé d'un groupement naphtalène sur lequel est greffée en position  $\beta$  une fonction sulfonate.



**Figure IV.10.** Structure du Poly Naphtalène Sulfonate

Les polycondensats de formaldéhyde et de naphtalène sulfoné (PNS), sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment.

*Medaplast SP 40* : est un superplastifiant haut réducteur d'eau de type polynaphtalène sulfoné (PNS), permettant d'obtenir des bétons et mortiers de haute qualité.

#### IV.4. Préparation et conditionnement des échantillons de béton

Nous avons effectué différents essais de caractérisation des propriétés des bétons et des granulats. Afin d'avoir des résultats comparables, nous devons déterminer les conditions de préparation et de conservation des échantillons de bétons et de granulats.

##### IV.4.1. Formulation et composition des bétons

L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement des bétons à hautes performances aux milieux agressifs en utilisant trois natures minéralogiques différentes de granulat : un granulat calcaire, un granulat silico-calcaire et un granulat siliceux. Nous avons réalisé plusieurs formulations de béton en utilisant les trois granulats et en considérant deux rapports eau/ciment (E/C) différents (0.3 et 0.6).

Pour chaque type de granulat, nous avons confectionné deux bétons de formulations différentes: un béton à matrice ordinaire (BO) et un béton à matrice hautes performances (BHP). Le dosage en ciment de ces bétons est de 450 kg/m<sup>3</sup>.

Les compositions des bétons ordinaires sont obtenues suivant la méthode de formulation de Dreux-Grorisse [Dreux, 2002] et les bétons à hautes performances selon la méthode de formulation des BHP à L'Université de Sherbrooke. La fraction volumique des granulats dans le béton est identique quelle que soit la nature des granulats. La quantité d'adjuvant est déterminée par des essais préliminaires, de manière à obtenir une ouvrabilité comparable pour tous les bétons. Les affaissements au cône d'Abrams des bétons étudiés les positionnent en classe S2 (entre 6 et 9 cm).

Les bétons étudiés dans les essais préliminaires sont composés de ciment (C), de fumée de silice (Fs), laitier granulé (L), marbre (PM), de super plastifiant (sup), des granulats (G) et d'eau (E) et du sable de dune.

Le deuxième objectif de ce travail expérimental est d'évaluer l'influence de l'ajout de la poudre de marbre (PM) et de laitier granulé (L) dans le ciment Portland sur la résistance à l'attaque sulfatique externe.

Pour cela, nous avons réalisé des essais sur des bétons confectionnés à base de deux types de ciment (ciment Portland CEM I 42,5, ciment CPJ CEMII 42,5) et des bétons à base de ciment Portland substitué en poids par différents pourcentages de :

- 5 % et 10 % de la poudre de marbre d'industrie de Boussaâda ;
- 2 %, 5 % et 8 % de la fumée silice de Granitex (Alger) ;
- Combinaisons entre 2% de la fumée silice et 25 % de laitier granulé ;
- Combinaisons entre 5% de la fumée silice et 10 % de laitier granulé ;
- Combinaisons entre 5% de la fumée silice et 5 % de la poudre de marbre ;
- Combinaisons entre 5% de la fumée silice et 10 % de poudre de marbre ;

**Tableau IV. 11.** Liste récapitulative des types de béton étudiés.

Notation	Désignations
BR	Béton de référence sans ajout cimentaire
B (5PM), B (10PM)	Des bétons formulés avec 5% et 10% de la poudre de marbre
BHP (2FS), BHP (5FS), BHP (8FS)	Des BHP formulés avec 2%, 5% et 8% de la fumée de silice
BHP (5FS, 5PM) ou BHP (5PM)	Des BHP formulés avec 5% fumée de silice et 5% de poudre de marbre
BHP (5FS, 10PM) ou BHP (10PM)	Des BHP formulés avec 5% fumée de silice et 10% de poudre de marbre
BHP (2FS, 25L)	Des BHP formulés avec 2% fumée de silice et 25% du laitier granulé
BHP (5FS, 10L)	Des BHP formulés avec 5% fumée de silice et 10% du laitier granulé
BHP(SD)	Des BHP formulés avec 100 % sable de dune
BHP (1/3SD)	Des BHP formulés avec 1/3 sable de dune et 2/3 sable concassé
BHP (2/3SD)	Des BHP formulés avec 2/3 sable de dune et 1/3 sable concassé
BHP (SC)	Des BHP formulés avec 100 % sable concassé

Ces bétons ont été conservés pendant 365 jours dans quatre milieux différents ; à savoir :

- 1<sup>ère</sup> série a été immergée dans une solution gypseuse ;
- 2<sup>ème</sup> série dans une solution de chlore de sodium (5% NaCl),
- 3<sup>ème</sup> série dans la solution de sulfate de magnésium (5% MgSO<sub>4</sub>) ;
- une 4<sup>ème</sup> série immergée dans une eau de robinet.

Durant la période de conservation, ces quatre séries de béton ont subies différents essais physiques, mécaniques et chimiques. Les tableaux IV. 12- IV. 13 et IV.14 donnent la composition des différents bétons étudiés au cours de ce travail de recherche. Les quantités de granulats sont données en masse de matériaux imbibés et les dosages en adjuvants sont présentés.

**Tableau V.12.** Composition des bétons avec les fillers de la fumée de silice, laitier granulé et sable de dune (données pour 1 m<sup>3</sup>)

Référence de béton	BHP (2FS)	BHP (5FS)	BHP (8FS)	BHP (2FS, 25L)	BHP (5FS, 10L)
Nature minéralogique (sable)	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>
Ciment CEM I 42.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	461	447	432	343	400
G (3/8) [kg/m <sup>3</sup> ]	158	158	158	158	158
G (8/15) [kg/m <sup>3</sup> ]	893	893	893	893	893
Sable [kg/m <sup>3</sup> ]	712	707	501	696	701
Eau / L	0.30				
FS [kg/m <sup>3</sup> ]	9	23	38	9	23
L [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	118	47

**Tableau IV.13.** Composition des bétons avec les fillers de la fumée de silice, poudre de marbre et sable de dune (données pour 1 m<sup>3</sup>)

Référence de béton	BR	B (5PM)	B (10PM)	BHP (5FS, 5M)	BHP (5FS, 10M)
Nature minéralogique (sable)	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>	<i>Siliceux</i>
Ciment CEM I 42.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	350.00	332.17	314.78	420.30	397.00
G (3/8) [kg/m <sup>3</sup> ]	427.39	427.39	427.39	104.16	104.16
G (8/16) [kg/m <sup>3</sup> ]	954.34	954.35	954.35	937.44	937.44
Sable [kg/m <sup>3</sup> ]	388.70	388.70	388.70	639.12	626.25
Eau [kg/m <sup>3</sup> ]	201.30	201.30	201.30	123.19	123.14
FS [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	23.35	23.35
PM [kg/m <sup>3</sup> ]	-	17.52	34.78	23.35	46.70
E/Liant	0.60	0.42	0.44	0.30	0.30

**Tableau IV. 14.** Composition des bétons avec les fillers de la fumée de silice, laitier granulé et trois natures de sable (données pour 1 m<sup>3</sup>)

Référence de béton		BHP (SD)	BHP (1/3SD)	BHP (2/3SD)	BHP (SC)
Nature minéralogique de sable		Siliceux	Silico-calcaire	Silico-calcaire	Calcaire
Ciment CEM II CPJ 42.5 [kg/m <sup>3</sup> ]		397			
G (3/8) [kg/m <sup>3</sup> ]		937.44			
G (8/15) [kg/m <sup>3</sup> ]		104.16			
Sable [kg/m <sup>3</sup> ]	SD	701.48	233.83	467.65	701.48
	SC		467.65	233.83	
FS [kg/m <sup>3</sup> ]		23.35			
L [kg/m <sup>3</sup> ]		46.7			
E/Liant		0.30			

### Procédure de fabrication des bétons

De nombreux coulages étant prévus pendant cette étude, il a été très important de s'assurer de la reproductibilité des gâchages pour mettre en place des échantillons à différentes périodes de la journée ou de l'année. Les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams ont permis de s'assurer de la similarité des gâchages de béton. Le protocole des étapes de fabrication de béton est le suivant:

- 1 - Les granulats et le liant (ciment + ajout cimentaire) sont mélangés à sec pendant une minute.
- 2 - L'eau de gâchage est ajoutée à un tiers du volume de super plastifiant et de malaxage se poursuit pendant 2,5 mn.
- 3 - Le super plastifiant restant est ajouté avec un malaxage final d'une minute.

Les échantillons de béton sont conservés dans leur moule dans un endroit humide (20° C, 95% HR) pendant 24 heures. Ensuite immergés dans les milieux préparés à 20°C jusqu'à jour de l'essai.

Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans additions sont comparées.

### IV.5. Essais à l'état frais

Le protocole expérimental de début de prise et fin de prise est compatible avec les recommandations de la norme européenne NF EN (196-3) et NF EN (197-1) [NF EN – (196- 3) EN 196-3,2002], [NF EN (197- 1) EN 197 – 1,2002]. Pour tout le béton fait, la maniabilité a été mesurée par le test cône d'affaissement Abrams selon NF EN 12350-2 [NF EN 12350-2 EN 12350-2, 2009].

La résistance en compression axiale testée après 28 jours, 90 jours et 365 jours de stockage a été réalisée sur trois cubes d'essai (100 x 100 x 100) mm<sup>3</sup> selon la norme NF EN 12390- 4 [NF EN 12390 - 4 EN 12390-5,2009].

### A- Les résistances mécaniques en compression et en traction

Des éprouvettes cubiques ont été utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés. Après le démoulage, les échantillons de bétons ont été conservés dans une salle à 20°C et 95 ± 5% d'humidité relative 24 heures, ensuite ils sont immergés dans les solutions agressives. La résistance a été déterminée pour plusieurs âges de conservation (28, 270 et 360 jours). La mesure de la résistance en traction a été effectuée conformément à la norme NFP 18-408 sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (70 X 70 X 280) mm<sup>3</sup>.

## IV.6. Essais de durabilité

### A- L'absorption capillaire (la sorptivité)

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons moulées ou carottées, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées selon les recommandations de la procédure AFREM [AFPC, 97]. L'essai a été réalisé sur des échantillons moulés de formes cylindriques de diamètre 11cm et de hauteur 22 cm (trois échantillons par formulation). Les échéances de mesure sont les suivantes : 28, 270 et 360 jours de conservation dans la salle humide.

A l'issue de la période de cure, les échantillons sont conservés dans une étuve ventilée à 80 ± 2°C. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à un intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,1%.

Les éprouvettes sont alors placées dans des dessiccateurs pendant 24 heures pour permettre le retour en température. Par la suite, la surface latérale de chaque éprouvette est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai.

L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide de cales (figure V.11). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 et 24 heures. L'essai est terminé après 24 h.

Le coefficient de sorptivité est défini par la relation suivante :

$$S = (Q / A) / t \quad \text{Equation (IV.1)}$$

Avec :

S : le coefficient de sorptivité en (mm/h<sup>0.5</sup>) ;

Q : le volume de l'eau absorbée en mm<sup>3</sup> ;

A : la surface en contact avec l'eau en mm<sup>2</sup> ;

t : le temps écoulé en heure ;

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux.

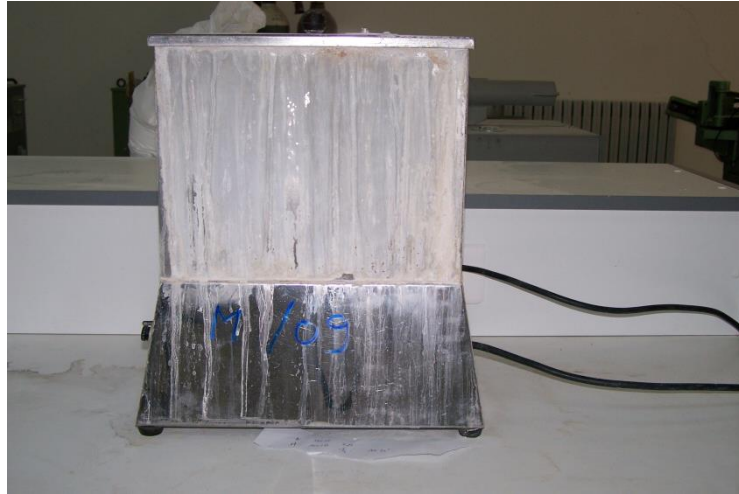


**Figure IV. 11.** Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

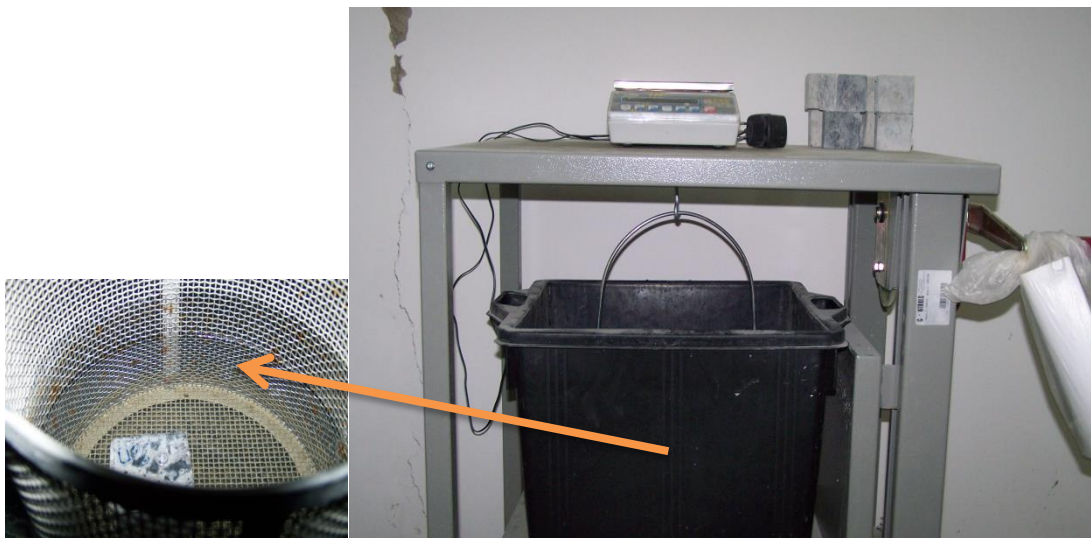
### ***B- La porosité accessible à l'eau***

L'essai de la porosité accessible à l'eau a été réalisé selon le mode opératoire recommandé par le groupe de travail ASTEM C642, son avantage réside dans sa simplicité et le peu de moyens nécessaires à son utilisation. L'essai de la porosité est réalisée sur des éprouvettes de dimensions  $7 \times 7 \times 7\text{cm}^3$ , en appliquant les étapes suivantes :

- 1- Séchage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  de l'échantillon, pendant au moins 24 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante, afin de faire évaporé toute la quantité d'eau évaporable. cette masse est noté « A » ;
- 2- Immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures ;
- 3- Chauffage jusqu'à ébullition pendant 5 heures (figure IV.12), puis pesage de l'échantillon à l'air (soit « C » ce poids) puis pesage à l'eau (pesée hydrostatique, voir la figure IV.13) soit « D » ce poids.



**Figure IV. 12.** Appareil de mise en ébullition des éprouvettes (essais de porosité)



**Figure IV. 13.** Pesé hydrostatique des éprouvettes pour calcul de la porosité

La porosité est calculée par la formule (loi d'ASTEM C642) [D. Whiting, 1988].

$$V_p = \frac{C-A}{C-D} \cdot 100 \quad \text{Equation (IV. 2)}$$

Avec :

- $V_p$  : volume des vides (%)
- $A$  : poids de l'échantillon après étuvage (g)
- $C$  : poids à l'air après immersion et ébullition (g)
- $D$  : poids à l'eau après immersion et ébullition (g).

### C- Test à la carbonatation

Le principe du test à la carbonatation repose sur le fait que le pH du béton carbonaté est plus faible que celui du béton sain. Pour déterminer la zone carbonatée, il est généralement utilisé un indicateur coloré tel que la phénolphtaléine.

La phénolphtaléine est un composé organique de formule  $C_{20}H_{14}O_4$ . L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact. Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage du milieu acide au milieu basique. La couleur que prend la phénolphtaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage.



**Figure IV. 14.** Section d'éprouvette 10x10x10 cm<sup>3</sup> mise en évidence du front de carbonatation par la Phénolphtaléine

Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraîche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphtaléine, si la phénolphtaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphtaléine vire au rose. Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone. Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées.

Notre essai de carbonatation a été réalisé après 365 jours de conservation dans les milieux agressifs. Les éprouvettes utilisées sont de formes cubiques, de dimensions (10x10x10 cm<sup>3</sup>) (Figure IV. 14).

**D- La résistance à l'attaque agressive (MgSO<sub>4</sub> et Na Cl)**

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance mécanique et chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en sels (5% en volume).

Des essais d'immersion dans des solutions de sulfate de magnésium (MgSO<sub>4</sub>) et chlorure de sodium (NaCl) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations de BHP et de BO (Figure IV. 15).

Les échantillons testés sont de forme cubique (10x10x10 cm<sup>3</sup>). Quatre échantillons sont utilisés par formulation. L'essai a été réalisé après 28, 270 jours et 1 an de conservation dans les milieux. A l'échéance souhaitée, les cubes ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de 25°C et de 50% hygrométrie relative pendant 30 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes.

La masse sèche initiale (M<sub>0</sub>) des cubes est déterminée avant leurs immersions dans des solutions agressives. Des solutions ((MgSO<sub>4</sub> et Na Cl) avec des concentrations initiales de 5% en volume ont été préparées dans des récipients résistants aux sels. Ces solutions ont été placées à une température ambiante de 25°C. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouvert d'environ 2 cm de solution agressifs (ASTM C 267, 1997).

Un pH mètre a été utilisé pour surveiller les niveaux du pH tous les deux jours. Le pH maximum mesuré est de 2,0 pour le (MgSO<sub>4</sub>) et de 5,0 pour le (NaCl).

La résistance des échantillons immergés dans les solutions est évaluée physiquement (variation de masse), mécaniquement (variation de résistance à la compression) et chimiquement (analyse DRX et ATD).

- **Variation de masse**

Selon la procédure de la norme ASTM C1012-04 (2004): les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion (ASTM C 267, 1997). Selon les recommandations des normes en vigueur, la solution est renouvelée après chaque nouvelle pesée.

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de la relation suivante:

$$M_{V(\%)} = \left[ \frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100 \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

M<sub>v</sub> : Variation de la masse en (%) ;

M<sub>0</sub> : La masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

M<sub>i</sub> (i=1, 2, 3, ..., n) : la masse après 1, 2, ..., n semaines d'attaque en (gramme).



**Figure IV. 15.** Les échantillons du béton immergés dans les solutions agressifs ( $MgSO_4$ ) et ( $NaCl$ )

#### • Suivi de la résistance à la compression

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cubiques de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ . Six échantillons de chaque formulation sont étudiés en utilisant une presse. Avant l'écrasement, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée avec un tissu sec et laissée pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire.

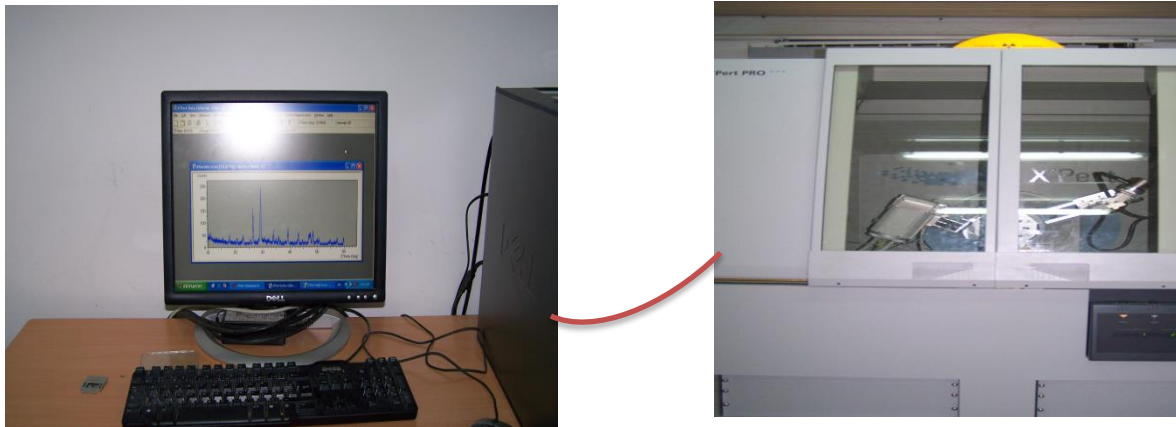
Les échéances prévues pour les échantillons immergés dans les milieux agressifs et dans l'eau de robinet sont 28, 270, et 360 jours.

#### • Analyse DRX et (ATG & ATD)

Après l'essai de compression, des analyses de diffractométrie aux rayons X (DRX) et ATG & ATD ont été conduites sur des échantillons exposés à l'attaque des acides ( $MgSO_4$ ) et ( $NaCl$ ). Ces analyses sont nécessaires pour mieux comprendre le mécanisme de dégradation du béton. Nos analyses DRX ont été faites au laboratoire de physique à l'université de M'sila.

L'appareil utilisé est un diffractométrie X'PERT couplé à un système informatique permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis (figure IV.16). La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fines particules des bétons broyés ( $\phi \leq 80 \mu\text{m}$ ).

Les analyses par thermogravimétrie (ATG) ont été faites au laboratoire de physique à l'université de Boumerdes (figure IV.17). Ce procédé sert à mesurer les variations massiques d'un matériau en fonction de la température et du temps. L'analyse thermogravimétrique (ATG) enregistre la perte de poids d'un échantillon de matière plastique soumis à une hausse de température dans des conditions d'atmosphère prédéfinies.



**Figure IV. 16.** Diffractométrie X'PERT



**Figure IV. 17.** Thermogravimétrie (ATG)

#### • Etude visuelle

Pour évaluer la dégradation de chaque béton, une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) avant et après 360 jours de conservation dans les milieux agressifs.

#### Conclusion

Ce travail expérimental répond à deux objectifs principaux : comparer les performances physico-mécaniques et la durabilité des bétons à haute performance à base d'addition de la poudre du marbre à ceux à base de filler du laitier granulé ou de la fumée de silice.

- d'étudier l'effet de la nature des granulats fins (sable) sur la durabilité des BHP.

Pour cela, plusieurs formulations de BHP à base de laitier granulé, de filler marbre et de fumée de silice, ont été étudiées. Un béton ordinaire (BO) a été utilisé comme un béton de référence.

L'objectif de la deuxième partie de cette étude est d'analyser l'influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement de bétons à hautes performances aux milieux agressifs, en utilisant trois natures minéralogiques différentes de granulat : un granulat calcaire, un granulat silico-calcaire et un granulat siliceux pour formuler des BHP avec une combinaison de filler laitier granulé et la fumée de silice.

Nous avons déterminé des formulations avec la méthode de L'Université de Sherbrooke. Les bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport  $E/L_{\text{équi}}$  identique. La comparaison est ensuite évaluée pour chaque classe de résistance.

Pour qualifier les performances des différents bétons, de nombreux essais ont été définis : certains sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la compression et à la traction et d'autres concernent les propriétés de transfert avec par exemple les essais de porosité (porosité accessible à l'eau) et d'absorption capillaire.

Pour mieux étudier l'influence du temps de cure et l'effet du type (d'addition minérale ou de sable) sur les performances des BHP, les essais de porosité accessible à l'eau, d'absorption capillaire, de diffusion des ions chlore et d'immersions dans les solutions agressifs ont été réalisés après 28, 270 et 360 jours de cure. Ces essais sont nécessaires pour bien évaluer les meilleures performances de durabilité des BHP étudiés dans ce travail.

# *Étude du comportement Physico-mécanique des bétons*

*En 1970, un grand effort de recherche a été fourni sur l'utilisation des ajouts cimentaires comme une substitution partielle dans Le ciment Portland artificielle. Ces additions, soit de source naturelle pouzzolanique (calcaire naturel) ou des produits industriels tels que les cendres volantes, le laitier et les fumées de silice, [ASTM C150-2007].*

*L'utilisation de ces additions cimentaires diminue la quantité de clinker nécessaire, ce qui entraîne une limitation des émissions de gaz de CO<sub>2</sub> et de la poussière dans l'atmosphère. Le remplacement du ciment ne concerne pas seulement de réduire les coûts de production, mais aussi de répondre aux questions environnementales et fournir le renforcement de performances du béton (meilleure maniabilité, la chaleur d'hydratation inférieure et une bonne durabilité).*

*L'objectif de cette enquête expérimentale est d'étudier l'effet de deux combinaisons :*

*- la combinaison d'un laitier granulé (L) de l'usine d'El- hadjar de Annaba (Est de l'Algérie) et la fumée de silice (FS) ;*

*- la combinaison de la poudre de marbre (PM) et de la fumée de silice (FS), sur les caractéristiques physico - mécaniques des bétons à hautes performances formulés, à l'état frais et durci.*

*La durabilité du béton a été évaluée par un suivi régulier de son comportement rhéologique à l'état frais et de la résistance à l'état durci.*

*Le programme de cette investigation comprend les mixtures suivantes :*

- Une combinaison de fumée de silice et du laitier avec des dosages de 10 et 25% de laitier et 2 et 5% de fumée de silice. En plus, deux pourcentages de Fumée de silice 2,5 et 8% ont été utilisés individuellement pour les BHP formulés.*
- Une combinaison de 5% et 10% de poudre de marbre, et 5% de fumée de silice. En plus, deux pourcentages de poudre de marbre 5% et 8% ont été utilisés individuellement pour les BHP formulés.*
- Une formulation de béton de contrôle (BR) sans ajouts s'avère nécessaire pour une comparaison aux mélanges BHP formulés. Les échantillons du béton avec et sans ajout sont conservés dans un milieu agressif à terme moyen (douze mois) à l'eau gypseuse.*

*En fin, des tests d'analyse des diagrammes de DRX du béton à 365 jours dans un environnement agressif (l'eau de gypse) ont été menées.*

## V.1. Effet combiné de laitier granulé et de fumée de silice sur les caractéristiques du béton à haute performance

### V.2.1. Optimisation de formulation

#### 1. Matériels et Méthode

- **Le ciment** : Portland utilisé a une surface spécifique Blaine SSB de  $3\ 200\text{cm}^2/\text{g}$ . C'est un CEM II/A 42,5. IL est commercialisé par l'usine Hammam Dalâa (M'sila).
- **La fumée de silice** : utilisée dans notre étude est un additif de type ferro-silicium pour bétons en milieux agressifs provenant de l'entreprise SIKA.
- **Le laitier** : utilisé est un sous-produit de la fonte, de l'usine d'El-hadjar 'Annaba' (Est de l'Algérie).
- **Les granulats** : l'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par la mise au point de compositions optimales des différents granulats. Les gros granulats sont des graviers concassés de la carrière Karkhache (Algérie), essentiellement calcaire.  
Les granulats fins : Sable de dune (roulé) provenant de L'oued MAITAR (BOUSAADA) ; Sable concassé de la carrière du KHARKHACHE. Pour ce travail, après des essais préliminaires concernant aussi bien la rhéologie des mélanges de béton que la résistance mécanique à 28 jours, le choix s'est porté sur les granulats de classe 3/8 et 8/15.
- **L'adjuvant** : super plastifiant.
- **L'eau de gâchage** : c'est l'eau de robinet du laboratoire de M'sila.

#### 2. Programme expérimental

Les compositions des bétons avec et sans laitier granulé ou fumée de silice retenues pour le programme expérimental sont reportées dans le tableau V.12 ; à noter que les teneurs en ajouts de fumée de silice plus le laitier granulé et de super plastifiant après optimisation sont respectivement: de 5%, 10% et 1.5% du poids de ciment.

Les éprouvettes de béton subissent une cure appropriée selon le type d'essai. Le milieu de conservation est l'eau gypseuse. Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans ajout cimentaire sont comparées.

Pour nos différents essais la légende suivante est adoptée :

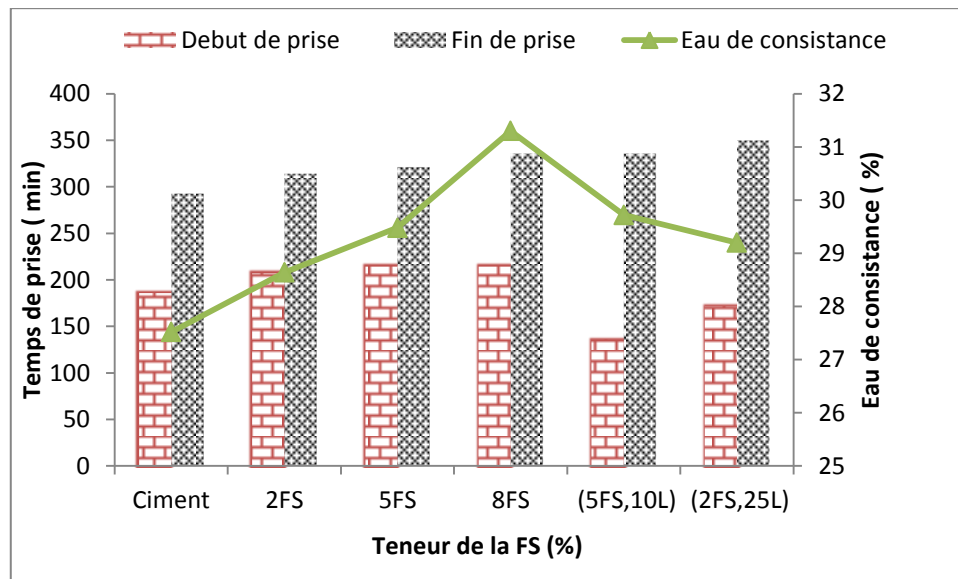
- ✓ BR : Béton de référence sans ajout cimentaire ;
- ✓ BHP (2FS), BHP (5FS), BHP (8FS) : Des BHP formulés avec 2% ,5% et 8% de la fumée de silice ;
- ✓ BHP (2FS, 25L) : Des BHP formulés avec 2% fumée de silice et 25% du laitier granulé ;
- ✓ BHP (5FS, 10L) : Des BHP formulés avec 5% fumée de silice et 10% du laitier granulé.

Les mélanges de béton frais ont été préparés au laboratoire de génie civil (Université de M'sila). Les échantillons de béton ont été conservés dans leur moules dans un endroit humide à une température de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et 95% humidité relative pendant 24 heures. Après démoulage, ils ont

été immergés dans des eaux gypseuses à 20°C jusqu'à l'âge de l'essai. Les caractéristiques physiques et caractéristiques mécaniques des bétons sans addition de laitier sont comparées. Le laitier est ajouté à des doses de 10%, 25% du poids du ciment et la fumée de silice à 2%, 5% et 8%, respectivement.

### V.1.2. L'effet de la fumée silice sur le temps de prise

Le temps de prise initiale et finale, ainsi que l'eau de la cohérence pour les pâtes de ciment sont présentés sur la Figure V. 1.



**Figure V.1.** Effet de la fumée de silice et l'eau de consistance sur le temps de prise pour les différents mélanges

Les résultats montrent que la consistance de l'eau augmente légèrement avec l'ajout. Le temps initial et final des pâtes de ciment est plus important avec l'augmentation des ajouts de fumée de silice. En outre, pour des doses plus élevées de la combinaison de la fumée de silice et laitier granulé, l'eau de consistance est plus grande pour toutes les pâtes de ciment testées. Ceci indique que la présence de fumée de silice et de laitier granulé joue un rôle important dans l'hydratation des pâtes de ciment. On peut conclure que l'addition de la fumée de silice pour les pâtes cimentaires accélère le processus de stade d'hydratation de la mixture de ciment Portland. Cela peut être dû à la précipitation améliorée des produits d'hydratation qui sont attribuées à l'activité pouzzolanique de la SF, qui sert probablement comme site de nucléation, au cours des premières heures. Ainsi, il agit en tant que charge inerte, et en tant que pouzzolane, on fait réagir chimiquement avec CH formé au cours du processus d'hydratation du ciment. Le temps de début des réactions pouzzolaniques varie ensuite avec les propriétés de ce type de telle addition de la pouzzolane utilisé pour la composition de béton [S. Ullah Khan et al, 2014].

On remarque sur la figure ci-dessus que la combinaison de la fumée de silice et du laitier granulé permet d'augmenter légèrement le temps de prise, à titre d'exemple les combinaisons

(5FS, 10 L) et (2FS, 25L) le processus d'hydrations est plus lent pour la pâte de ciment au jeune âge.

Pour le temps de prise final, aucunes valeurs marquées n'ont été enregistrées pour l'ensemble des pâtes avec addition. Cependant, ils ont une plus grande durée de fin de prise par rapport au ciment seul, comme une mixture de référence [O. Eren, 1995].

### V.1. 3. L'effet de la FS sur l'ouvrabilité du béton

L'effet de dosage des fillers sur l'ouvrabilité du béton a été évalué par le cône d'Abrams immédiatement après le malaxage.

Sur la base des résultats expérimentaux présentés sur la figure V. 2, l'incorporation des additions minérales affecte positivement la maniabilité du béton. En effet, la fumée de silice et laitier granulé améliorent la maniabilité du béton est donne un comportement rhéologique très plastique. Il est important d'insister sur l'influence de la finesse de laitier lorsqu'on cherche à fabriquer des bétons plus plastiques.

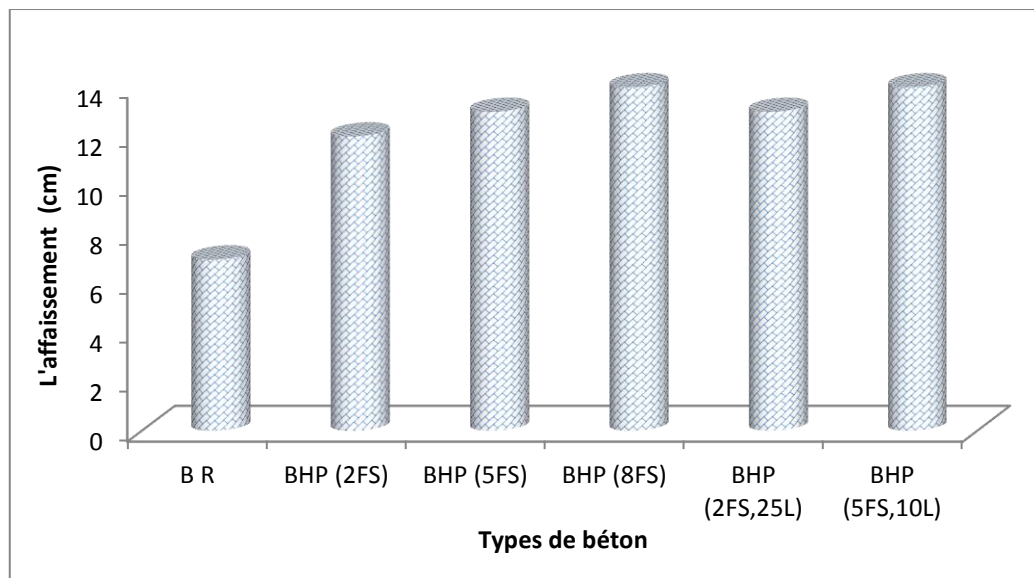


Figure V.2. Evolution de l'affaissement des bétons formulés

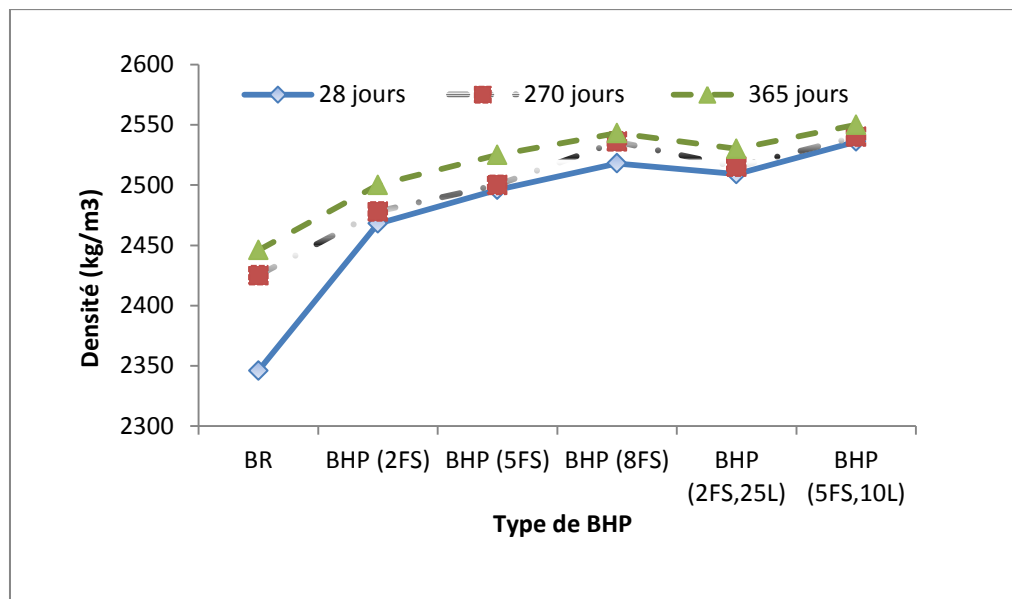
D'après la figure V. 2, on peut observer que tous les formulations de BHP avec ajouts ont donné une meilleure maniabilité par rapport au béton de contrôle au niveau des valeurs allant de 12 à 14 cm d'affaissement pour le premier et 7 cm d'affaissement pour le deuxième. Ceci est en accord avec d'autres résultats sur le sujet trouvé précédemment où il y avait une fluidité améliorée des bétons à l'état frais de ces types avec incorporation de ciment avec les ajouts cimentaires [FOLAGBADE, 2013].

### V.1. 4. La densité

La figure V. 3, présente la variation de la densité des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours). On peut noter l'évolution de la densité des différents bétons conservés

dans l'eau sulfaté, un mélange plus dense du BHP avec les ajouts de laitiers et fumées de silice ont été enregistrées.

En effet, plus la finesse du laitier ou la fumée de silice est élevée, combinée à interaction avec portlandite pour former des calciums hydrosilicates solubles, favorise l'augmentation de la compacité du béton durci. Cela explique l'augmentation de sa densité par rapport au béton de contrôle à des valeurs d'environ  $2500 \text{ kg/m}^3$  pour le béton incorporé avec un mélange de ciment plus ajouts cimentaire et  $2400 \text{ kg/m}^3$  pour référence sans ajout. Deux échantillons de BHP (8FS) et BHP (5FS, 10L), donnent les meilleurs résultats dans les environnements agressifs. Les résultats actuels obtenus sont conformes à des travaux de recherche entrepris par E.A. El-Alfi et al (2011).



**Figure V. 3.** La variation de la densité des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours)

#### V.1.5. Caractérisation mécaniques

La figure V.4 et la figure V.5 Présentent l'évolution mécanique des six séries de bétons en fonction du temps aux échéances 28,270 et 365 jours de conservation dans l'eau gypseuse. Les courbes d'évolution de la résistance mécanique en fonction du temps (de 28 à 365 jours) présente la même allure quel que soit le type de béton.

On peut observer globalement qu'au bout de quelques jours la résistance en compression des bétons à 2 , 5 et 8% de fumée de silice est supérieure à celle du béton de référence sans fumée de silice. Cependant, lorsqu'on examine de plus près les valeurs obtenues aux différentes échéances, on peut noter des écarts significatifs selon la durée de cure humide du béton. Or l'ajout de fumée de silice produit dans les premières heures une accélération des réactions d'hydratation. Il est nettement plus élevé pour le béton (avec ajout de 10% de laitier et de 5% de fumée de silice).

A l'encontre, les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. Cette agression consiste en l'apparition de phases expansives dans le matériau durci, les étapes du processus sont :

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

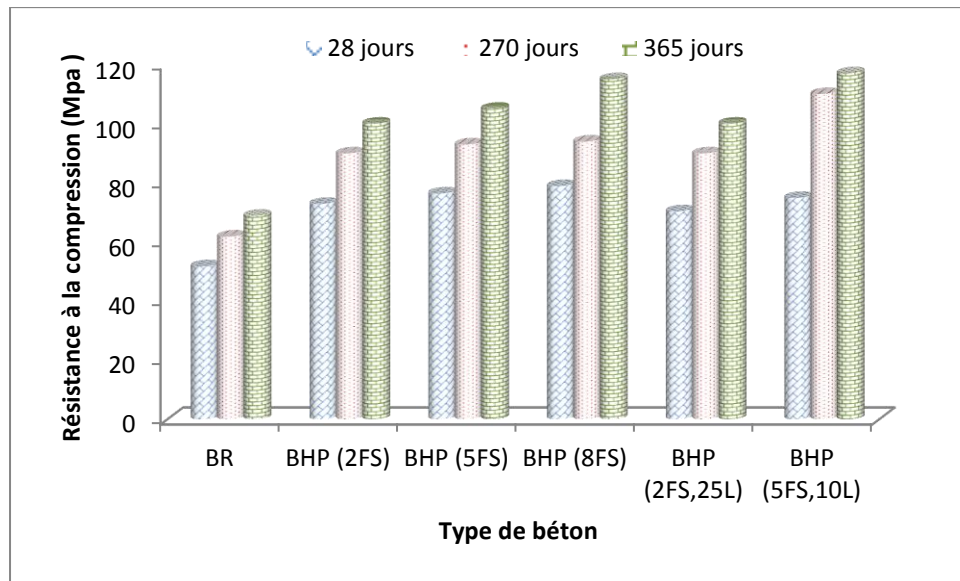


Figure V. 4. Evolution de la résistance à la compression des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours)

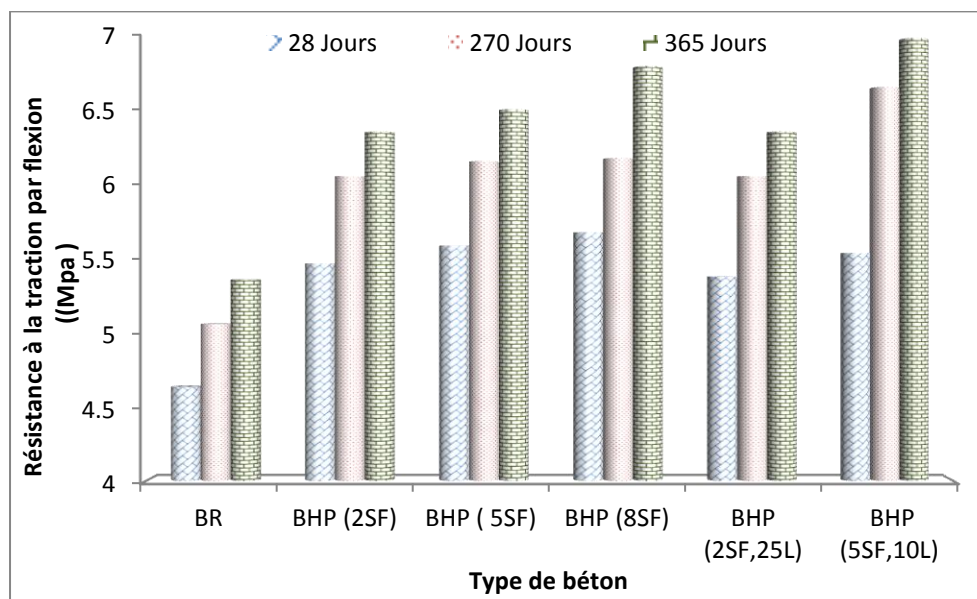


Figure V. 5. Evolution de la résistance à la flexion par traction des différents types de béton à l'âge (28, 270 et 365 jours)

Après 365 jours de conservation, la résistance à la compression atteint d'environ 117 MPa, cependant, pour le béton de contrôle sans ajout (BR) elle n'est que 71 MPa. Ceci est attribué aux effets suivants : le broyage plus fin du laitier a contribué à l'augmentation de la compacité du BHP (5FS, 10 L), ce qui explique l'augmentation de sa densité par rapport BR. Sur le plan physico- mécanique, le laitier réagit par sa finesse et son activité pouzzolanique [M. A. Rasol, 2015], engendrant ainsi un squelette plus cohérent et par conséquent un béton plus résistant et plus durable dans l'eau gypseuse.

La réaction pouzzolanique de la fumée de silice et laitier réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte. Les résultats obtenus en accord avec d'autres travaux de recherche [A.A. Metwally, 2014].

Des études récentes ont confirmé que les bétons à haute performance qui ont un rapport eau / liant compris entre 0,30 et 0,40 sont habituellement plus durable que le béton ordinaire, non seulement parce qu'elles sont moins poreuses, mais aussi parce que leur capillaires et réseaux de pores sont peu déconnectés en raison de développement de l'auto-dessiccation. En béton à haute performance (BHP), la pénétration des ions chimiques agressifs est un peu superficielle.

Cependant, le mode de durcissement peut être très nuisible s'il n'est pas contrôlé au jeune âge du développement de la phase des réactions d'hydratation. Par conséquent, le BHP doit être durci différemment au béton ordinaire [C .P .Aitcin, 2003].

#### ***V.1.6. L'effet de l'adjuvant***

L'effet en super plastifiant fixé à 1.5% du poids de liant, permet de diminuer le rapport E/C et, par voie de conséquence, augmente les résistances à la compression. Le naphthalène sulfoné (PNS) est le super plastifiant utilisé dans les formulations du béton pour l'étude de la résistance à la compression de chapitre VI.

#### ***V.1.7. Analyse aux rayons X de la structure interne***

Les résultats d'analyse par diffraction de rayons X des bétons avec et sans fumée de silice hydraté pendant 365 jours dans l'eau gypseuse sont présentés dans les figures V. 6, 7 et 8.

Les résultats montrent que le pic de  $\text{Ca(OH)}_2$  est de forte intensité dans le béton de référence et disparaît complètement dans les échantillons formulés avec la fumée de silice et du laitier granulé. De plus, les pics d'intensité de  $\text{C}_4\text{AH}_3$  ont été détectés dans tous les échantillons et l'intensité de son pic augmente fortement avec des teneurs plus élevées de la fumée de silice.



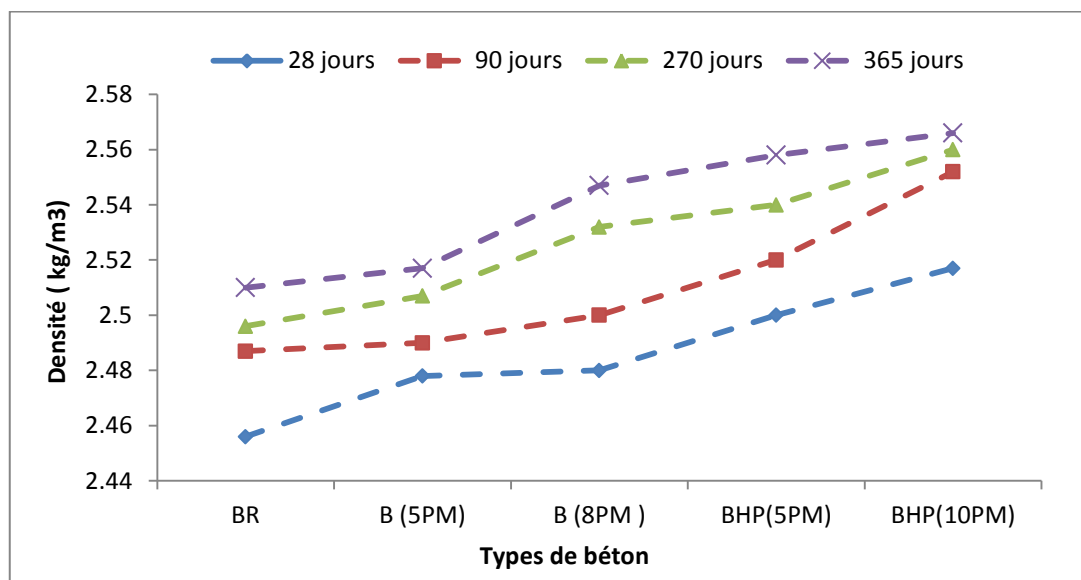


- Filler de marbre ;
- Sable de dune ;
- Les granulats (3 /8) et (8 /15) ;
- L'adjuvant;
- L'eau de gâchage.

Les compositions finales des mélanges des bétons utilisés après optimisation sont reportées sur le tableau (III.11). Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans ajout de marbre sont comparées.

### V.2.1. La densité

Les masses volumiques de différentes compositions du béton dans l'eau gypseux, à différentes échéances : 28, 90, 270 et 365 jours sont représentée dans la figure ci – dessous.



**Figure V.9.** Evolution de la masse volumique moyenne des différentes compositions en fonction de l'âge (28, 90, 270 et 365 jours)

La figure V.9, montre l'augmentation de la masse volumique des différentes compositions en fonction de l'âge du béton ; pour les bétons, le gain en poids varie entre :

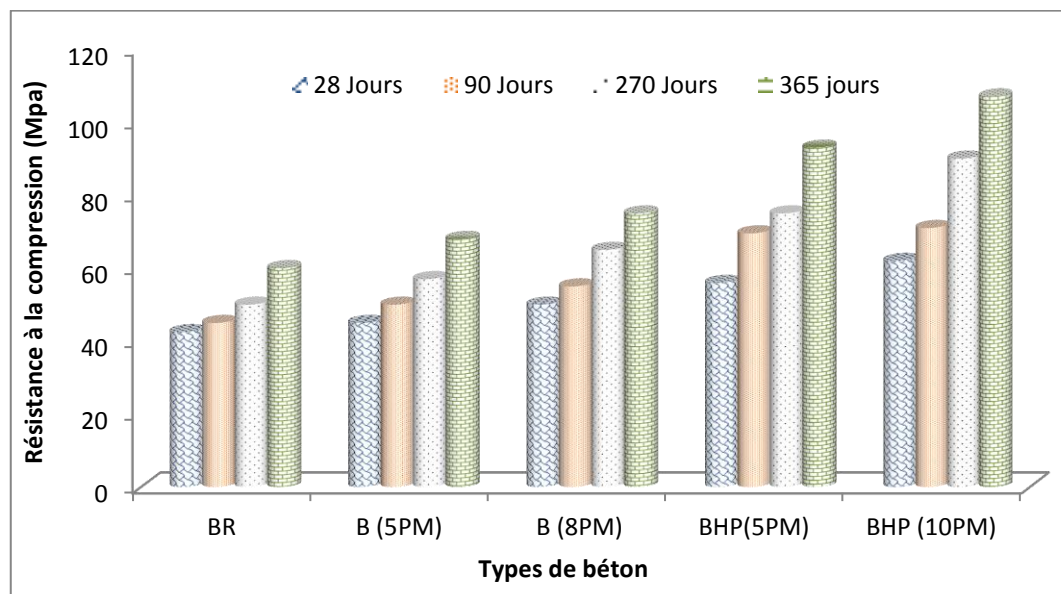
- 2.456 kg/m<sup>3</sup> à 28 jours jusqu'à 2.51 kg/m<sup>3</sup> à 365 jours pour le béton BR,
- 2.48 kg/m<sup>3</sup> à 28 jours jusqu'à 2.547 kg/m<sup>3</sup> à 365 jours pour le béton avec poudre de marbre (8PM) ;
- 2.517 kg/m<sup>3</sup> à 28 jours jusqu'à 2.566 kg/m<sup>3</sup> à 365 jours pour le béton BHP avec 10% PM combiné avec 5% FS.

Les résultats montrent que la masse volumique des bétons avec ajouts est relativement plus élevée par rapport à celle du béton de référence. Cela est dû, d'une part à l'effet physique des ajouts qui réagissent par leur grande finesse remplissant les vides et les pores afin de

densifier la matrice de béton, et d'autre part, les ajouts actifs réagissent avec le  $\text{Ca(OH)}_2$ , donnent une quantité importante d'hydrosilicates de calcium (CSH) remplissant les pores. Deux échantillons de béton (8MP) et BHP (10MP), donnent les meilleurs résultats dans le milieu agressif. Ces résultats confirment les travaux de recherche obtenue par Messaoudene et al. (2011).

### V.2.2. La résistance mécanique

Les figure V.10, V.11 présentent la variation de la résistance mécanique des cinq séries de bétons en fonction de la durée de conservation dans l'eau gypseuse.



**Figure V.10.** Evolution de la résistance à la compression des différentes compositions en fonction de l'âge

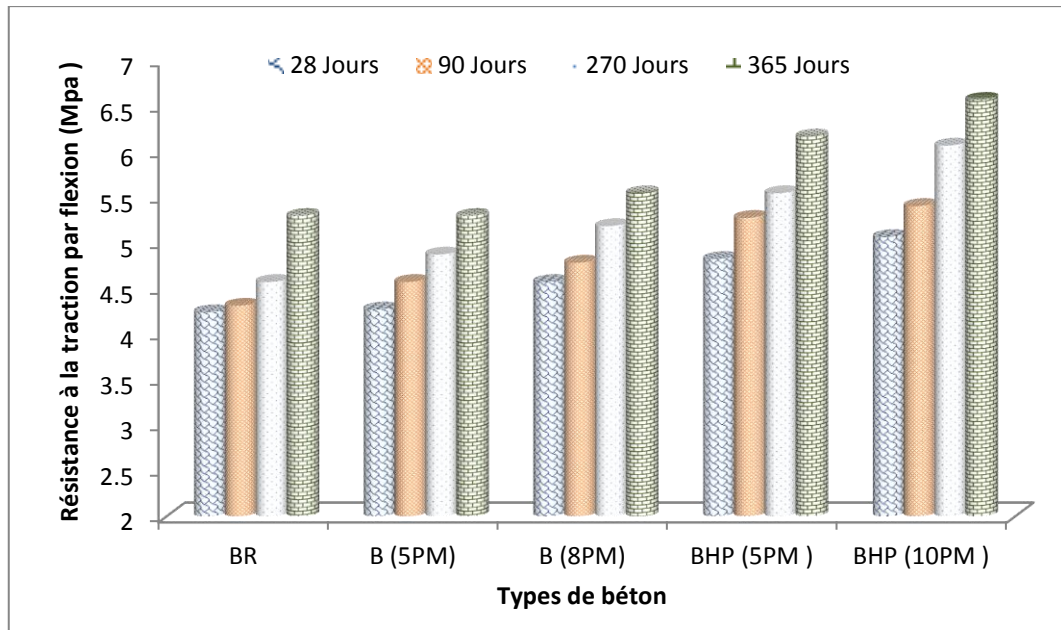
- **Effet de la Poudre de Marbre (PM)**

La présence de la poudre de marbre (PM) dans la composition du ciment modifie considérablement ces propriétés mécaniques. Les résultats de la résistance mécanique des bétons contenant de la poudre de marbre sont présentés dans les figures V.10 et V.11. La substitution du ciment par la poudre de marbre a donné des résistances à la compression ou à la flexion, faible à jeune âge (28 jours). Ceci est dû à la faible activité hydraulique de la (PM) [T. Boubekeur1. 2010].

Les résistances des bétons sont acceptables à 28 jours : entre 45 et 50MPa à la compression et entre 4.28 et 4.58 à la flexion pour les bétons (5PM) et (8PM).

Ces résistances s'améliorent clairement pour atteindre des performances très importantes après 1an : entre 68 et 75MPa à la compression et entre 5.3 et 5.55 à la flexion (amélioration des résistances d'environ 20% entre 28 jours et 1 an). Les hautes performances sont obtenues avec addition (8%) de PM dans le ciment.

On peut constater que l'ajout de 8% de poudre de marbre est plus efficace avec la composition de (CEM II/A 42,5+PM). Les performances obtenues confirment le rôle de la finesse de mouture des ajouts minéraux inertes (poudre de marbre) ou actifs. L'augmentation de la surface spécifique Blaine a pour conséquence l'amélioration de la compacité du béton et par la même sa résistance. L'effet filler consiste à remplir les vides entre les grains de ciment.



**Figure V.11.** Evolution de la résistance à la traction par flexion par des différentes compositions en fonction de l'âge.

- **Effet de la combinaison Poudre de Marbre (PM) /Fumée de Silice (FS)**

Les figures V.10 et V.11 montrent l'influence des deux différentes combinaisons marbre – fumée de silice sur la résistance mécanique.

Nous pouvons constater que l'utilisation des ajouts a donné des résultats satisfaisants par rapport au béton de référence (sans ajout : BR) à tous âges. Les meilleures performances sont obtenues par les mélanges BHP (8PM) et BHP (10PM) avec un pourcentage fixe de 5% de FS.

Cela est dû à l'utilisation des ajouts comme poudre fine et aussi à l'utilisation des adjuvants surtout ceux de la nouvelle génération. L'utilisation de ces ajouts permet aussi d'améliorer la rhéologie des bétons à l'état durci. Notons que la finesse favorise l'effet physique de la poudre de marbre (PM) ou l'effet combiné de la fumée de silice avec la PM. La poudre de marbre est plus efficace avec la composition BHP (10PM) avec 45 % de gain de résistance entre 28 jours et 1 an.

L'incorporation d'ajouts actifs (fumée de silice) dans le ciment diminue le rapport  $\text{CaO/SiO}_2$ , mais augmente les oxydes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{FeO}_3$  (avec un effet significatif de la fumée de silice), d'autre part l'effet de la poudre de marbre (ajout minéral inerte) est faible. Les fillers de marbre servent de germes sur lesquels vont se fixer les calciums libérés lors de l'hydratation des composés anhydre du ciment.

D'après Bessa et *al.*, 2004, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons .

### V.2.3. Peau du béton

L'auscultation visuelle des surfaces des échantillons conservés dans l'eau gypseuse (figure V.12) montre, une surface légèrement corrodée ; elle ne présente aucun signe d'altération une couche dense de cristaux, probablement de gypse, s'est formée. L'échange  $Mg^{2+}$  contenu dans l'eau gypseuse et  $Ca^{2+}$  du ciment conduit à la formation de la brucite  $Mg(OH)_2$ . Dans tous les cas, tous les bétons sont couverts de cristaux aciculaires sous forme d'aiguilles. Généralement la dégradation de la peau augmente avec la porosité.



**Figure V.12.** Observation visuelle de la surface des échantillons.

### V.2.4. Analyse aux rayons X de la structure interne

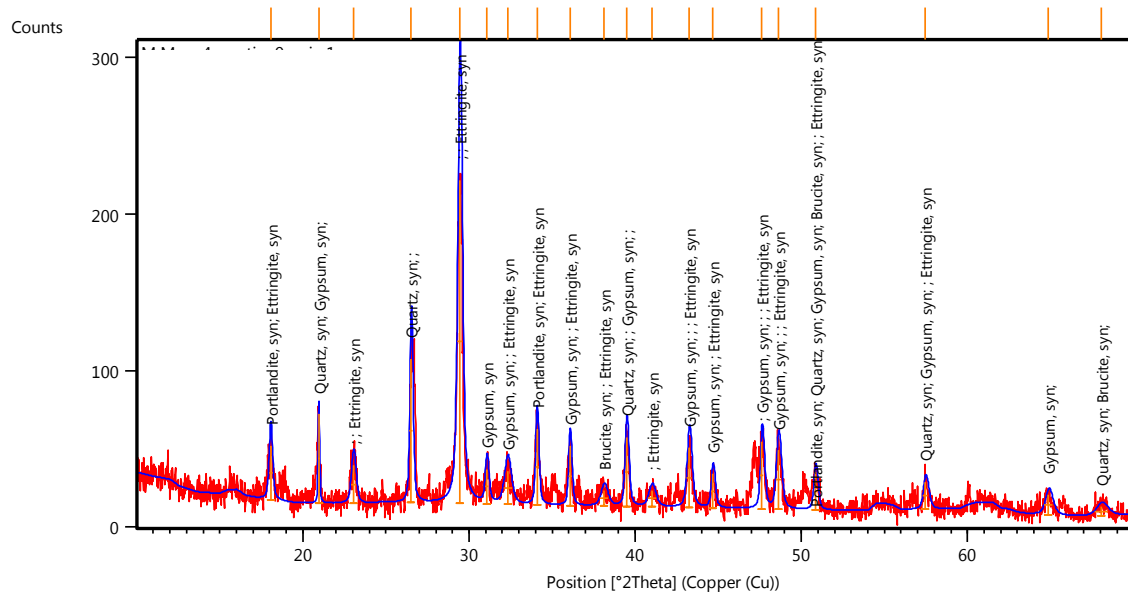
Les résultats d'analyse par diffraction de rayons X des bétons avec et sans fumée de silice hydraté pendant 365 jours dans l'eau gypseux sont présentées dans les figures. 13, 14 et 15.

Les mécanismes d'hydratation de  $C_3S$  et  $C_2S$  donnent principalement des silicates de calcium hydratés accompagnés de Portlandite. Des pics de  $C_4AH_{13}$  ont été détectés dans tous les échantillons et leur intensité de son pic augmente fortement avec des teneurs plus élevées de la fumée de silice.

On note aussi, une teneur de portlandite similaire pour les pâtes de ciment que ce soit avec ou sans poudre de marbre. La présence de l'ettringite est moindre pour la pâte de ciment contenant de la poudre de marbre, cela est certainement dû à la forte compacité de cette dernière comparée à celle de ciment seul.

L'hydratation des mélanges conduit à la formation de portlandite CH et d'un gel silico-hydraté C-S-H pour toutes les compositions étudiées. Le diffractomètre de l'échantillon de pâte ciment indique que l'ettringite  $C_3A.3CaSO_4.31H_2O$  est présente dans la pâte durcie au bout d'une période de trois mois. Ce composé n'apparaît plus de façon significative dans les bétons contenant de la poudre de marbre et la fumée de silice.





**Figure V. 15.** Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de marbre et fumée de silice à 365 jours

## Conclusion

Sur la base des résultats obtenus, on peut tirer les suivants :

- L'eau de consistance est légèrement plus élevée avec le dosage de liant. En plus, le temps de prise initial et final de la pâte de ciment augmente avec l'incorporation de la fumée silice;
- L'ouvrabilité du béton de haute performance est influencée positivement par les additions de laitier granulé et de fumée de silice ;
- La mouture poussée du laitier ou de la fumée de silice ou les deux combinés a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons. Ceci explique l'augmentation de leurs résistances par rapport au béton de référence ;

Lorsqu'on opère une substitution de 5% de ciment par la fumée de silice la résistance à la compression optimale de 170 MPA est obtenue en substituant une partie de ciment par une combinaison de 5% de fumée de silice avec 10% de laitier.

- L'addition de la fumée silice et de laitier granulé avec le ciment Portland accélère le taux d'hydratation de 28 jusqu'à 360 jours ;
- En général, on peut conclure que l'incorporation d'ajouts tels que le laitier combiné avec la fumée de silice pourrait être bénéfique pour produire des liants alternatifs pour formuler un béton de haute performance (BHP).

- Les résultats de diffraction des rayons X ont montrés, que le pic de  $\text{Ca(OH)}_2$  a une haute intensité dans le béton de référence et disparaît complètement dans les échantillons formulés avec la fumée de silice et du laitier granulé. De plus, les pics d'intensité de C4AH13 ont fortement augmentés avec la fumée de silice et le laitier granulé.
- Le remplacement partiel du ciment par la poudre de marbre ne contribue pas à former un volume important de nouveaux produits hydratés capables de réduire la porosité des bétons même si la résistance en compression peut être plus ou moins améliorée. La contribution de la poudre de marbre a donc un rôle structurant traduit en termes de durabilité par une réduction de la porosité et une meilleure des liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique, cette contribution structurante se résistance à l'agression chimique.
- La fumée de silice combinée avec le marbre utilisé présente une cinétique de réaction très correcte et un effet pouzzolanique plus important que la pouzzolane elle-même. Les essais de durabilité de ces matériaux dans eau gypseuse montrent des modifications de la surface par passage en solution de la chaux ou par cristallisation de la calcite ou du gypse. D'autre part, le filler de marbre, joue un rôle important sur la compacité mais son dosage devra être limité entre 5 et 10%.

# *Effet de la nature des granulats (fins) sur la durabilité d'un béton à haute performance*

*L'Algérie est l'un des pays en voie de développement, il adapte le programme de développement durable dans tous les domaines surtout dans le domaine de l'industrie de construction, donc il est nécessaire de fabriquer des bétons durables.*

*Les organismes de contrôle de la qualité du béton de structure exigent à ce que les agrégats sont constitués à partir des sables alluvionnaires ou du gravier concassé. Cependant, certains projets surtout ceux qui sont réalisés au sud, sont éloignés des gisements exploités pour le concassage des agrégats (plus de 600 Km).*

*L'énergie dépensée pour le concassage et le budget réservé pour le transport des agrégats concassé amplifie considérablement le prix de réalisation d'un m<sup>3</sup> du béton. Par conséquent, le coût de réalisation de certains projets devient imaginaire. Les granulats pour bétons sont constitués exclusivement par des sables roulés et des graviers concassés.*

*Le sable de concassage (SC), à granularité étalée, est un sous-produit de concassage des roches massives. Le sable de dune (SD) est un sable extra-fin, caractérisé par une distribution serrée de grosseur des grains. Renfermant des teneurs importantes en fines, ces deux sables peuvent être des composants intéressants des BHP. Beaucoup de régions du pays ont des carrières de roches massives produisent des quantités considérables de sable de concassage (SC) qui sont écartés jusqu'à présent de la composition des bétons. En outre, le sud du pays renferme des quantités inépuisables de sables de désert (SD) qui n'a jamais été exploité sérieusement dans le domaine de la construction. Cependant ces sables (SC et SD) qui renferment naturellement des teneurs élevées en fines peuvent constituer une source intéressante pour la composition des bétons [G. Zhang ,2006].*

*Ce chapitre consiste à l'analyse du comportement des BHP à l'état frais et à l'état durci en substituant le SC par le SD. Différents mélanges de BHP sont confectionnés en utilisant des matériaux et produits fabriqués en Algérie : un ciment Portland ordinaire CEM II/A 42.5N, un super plastifiant MEDAPLAST SP 40, deux fractions de graviers (3/8 ,8/16) et, deux fillers (fumée silice et laitier granulé) et deux sables SC (0/5) et SD (0/5). L'étude comprend aussi l'effet de la combinaison de SD et SC sur les caractéristiques de spécification de la durabilité dans des milieux agressifs.*

## VI.1. Choix des granulats fins

Les granulats utilisés dans cette investigation sont des granulats naturels fins SD (sable de dune) et sable concassé SC. Trois séries de mélanges d'agrégats et un mélange contrôle de référence (100% SD) ont été préparées. Les caractéristiques des mélanges binaires de sable sont donnés dans le chapitre IV et désignés comme suits : (SD) [0% SC + 100% SD], (1/3SD) [1/3 SD + 2/3 SC], (2/3SD) [2 /3 SD+ 1/3 SC], SC (100SC + 0% SD).

La méthode de substitution du sable de dunes par sable concassés a amélioré les propriétés physiques des agrégats mixés (Tableau V.5).

- Une amélioration de la porosité du sable (sable de dune et sable concassée) en utilisant 1/3, 2/3 de sable concassé ;
- Une amélioration dans la distribution granulométrique du sable .

## VI.2. Les essais sur bétons frais

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont les suivants : l'affaissement et le pourcentage d'air occlus dans le béton. Les résultats de ces essais sont présentés sur les figures VI.1et VI. 2.

Avant d'apprécier l'effet de la substitution de sable sur l'ouvrabilité du béton étudié, E / L a été fixé à 0,30 et la concentration de super plastifiant fixé à 1,5%. D'après les résultats obtenus, on remarque que l'ouvrabilité des bétons avec ajouts augmente sensiblement par rapport au béton de référence.

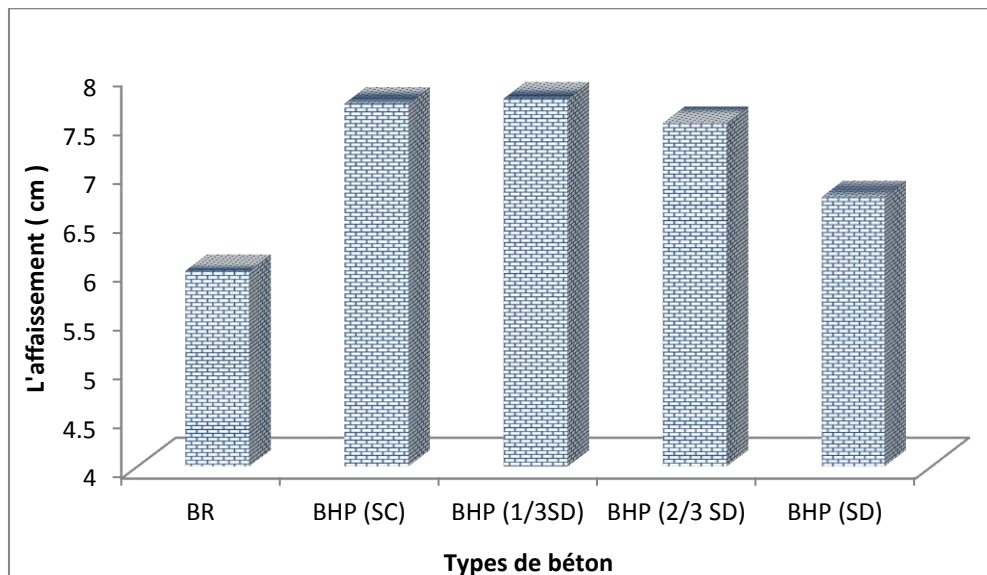
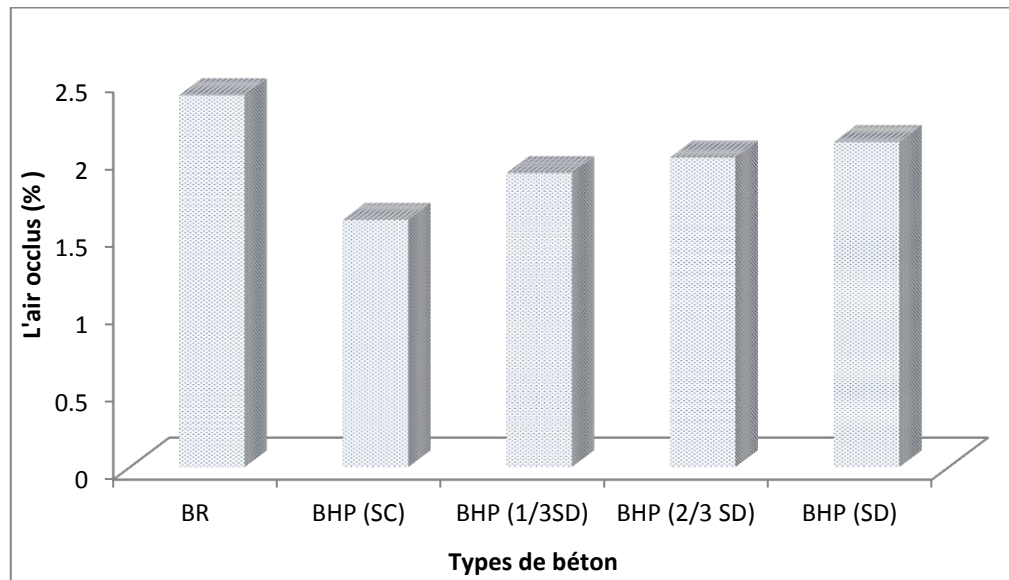


Figure VI.1. L'affaissement des différentes compositions.

L'ouvrabilité des bétons (BHP) augmente sensiblement avec la substitution de sable de dune par sable concassé. Par contre le taux de l'air occlus diminue. Cela est dû d'une part, à la substitution d'une partie de sable du dune (siliceux) par le sable concassé (d'origine calcaire);

c'est-à-dire le fait qu'une quantité d'eau de gâchage est absorbée par le sable calcaire concassé et la présence des ajouts ( 15% du poids de ciment) qui sont finement broyés donc ils remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée , et d'autre part par la frottement généré par ces agrégats fins en raison de leur forme angulaire et leur surface externes rugueuse .



**Figure VI.2.** Air occlus dans les différentes compositions

Le rôle d'adjuvant réducteurs d'eau est non seulement de disperser les particules de ciment pour les rendre plus exposés à la réaction avec les molécules d'eau, mais aussi rendre le mélange plus fluide ( plus d'eau disponible pour infiltrer les agrégats fins). La surface des granulats de carrière ont une porosité supérieure à celle des agrégats fins naturels (SD). Les valeurs d'absorption d'eau de béton contenant les granulats concassés sont plus élevés que ceux des granulats fins dunaires.

### VI.3. Les essais à l'état durci

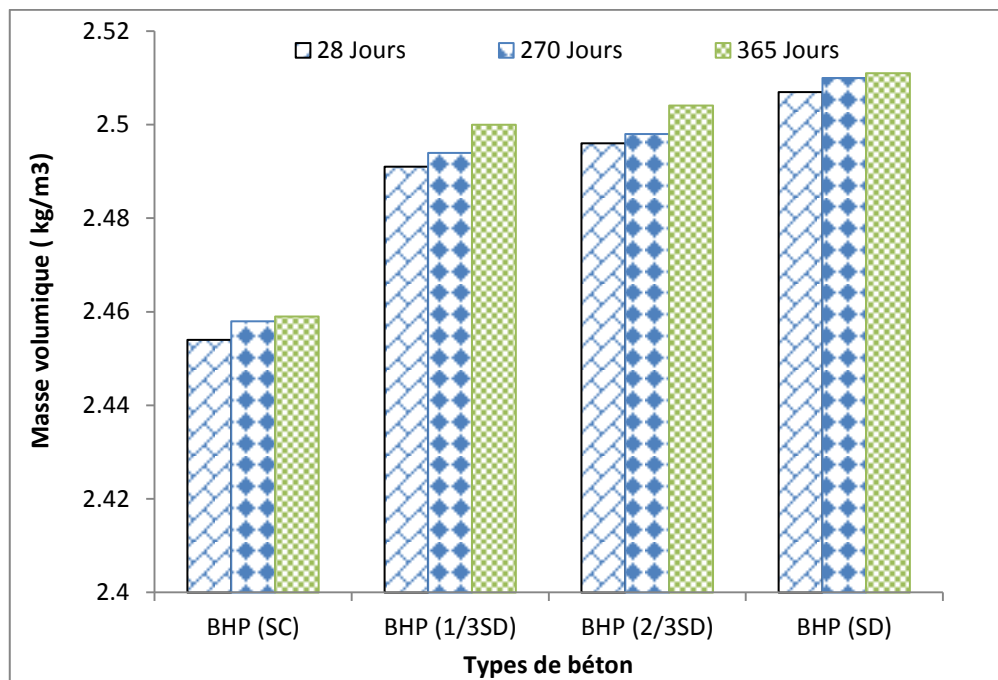
Les essais mécaniques ont été réalisés conformément aux normes AFNOR et les normes Algérienne.

#### VI. 3.1. Propriétés physiques

##### VI.3.1.1. La masse volumique

La masse volumique est relativement élevée pour les bétons formulés avec sable binaire (sable de dune + sable concassé) par rapport au béton à base de sable concassé, ce qui explique le rôle de remplissage de ces granulats (voir la figure VI.3).

En effet, les fillers aussi ayant des finesses plus grandes que celle du ciment utilisé, s'insèrent dans les vides et les pores capillaires ; ils densifient le squelette du béton et par conséquent, il en résulte une amélioration de la masse du béton durci.



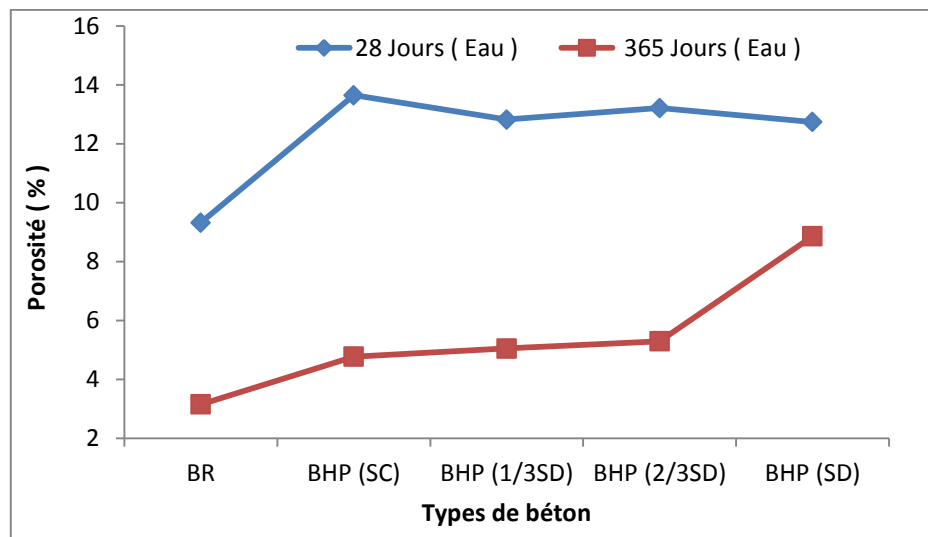
**Figure VI.3.** Masse volumique des différentes compositions  
(Milieu : l'eau du robinet)

### VI.3.1.2. Effet du sable concassé sur la porosité

Le protocole d'essai de la porosité accessible à l'eau est conforme aux recommandations du groupe AFREM [AFREM, 1997]. La porosité ouverte permet d'apprécier l'évolution de l'hydratation et la structuration des produits hydratés, c'est un paramètre primordial pour l'identification des bétons les plus durables [A. Bessa, 2004]. Les résultats de ces essais sont représentés sur la figure VI.4.

À court terme (28 jours), le béton formulé avec le sable binaire (granulats fins naturels et manufacturés) présente une faible porosité (faible amélioration) en comparaison avec le béton BHP avec (SC). Cet écart observé entre la porosité des divers bétons testés, dépend de la variation des propriétés physiques de chaque type de granulats étudiés.

À long terme (365 jours), les résultats montrent que la porosité des bétons de haute performance diminue avec les mêmes constituants. Ceci est dû à la différence de la masse volumique et la porosité entre les différents agrégats fins utilisés (concassé angulaire, sables de dunes rondes et les fillers). En fait, la porosité (vides et les pores) est influencée par les caractéristiques de remplissage du mélange complet qui comprend des granulats fins, de ciment et d'eau.



**Figure VI.4.** Évolution de la porosité des BHP avec différents pourcentages de SC à l'âge de 28j et 365j (Milieu : l'eau du robinet)

On remarque selon la figure VI.4, le remplacement partiel de sable concassé par le sable naturel (SD) (1 / 3SD et 2/3 de SC combinés) se traduit par une faible augmentation de la porosité à 365 jours, mais à 100% sable de dunes il y a une augmentation significative de la porosité (pour le béton BHP (SD) l'augmentation de la porosité est de 8%) qui est due à un phénomène chimique, pas physique. D'autre part, l'utilisation de l'adjuvant réducteur d'eau (1,5% de Medaplast SP40) diminue le rapport de vide, parce que il lubrifie et facilite le réarrangement des particules et par conséquent, le béton devient moins poreux plus compacte. L'incorporation d'une combinaison de SD avec SC dans le BHP conduit à une augmentation de la compacité liée à l'augmentation des propriétés rhéologiques.

### VI.3.1.3. Effet de sable concassé sur l'absorption d'eau par capillarité

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontée capillaire. Cette absorption entraîne un gain de masse du matériau. C'est grâce au suivi de la variation de masse d'éprouvettes préalablement séchées que la capacité d'absorption d'eau des différents bétons est évaluée. L'objectif de ces essais consiste donc à suivre la masse d'eau absorbée par un béton au cours du temps pour mettre en évidence d'éventuelles différences de porosité ouverte dans nos bétons en termes de tailles de pores ouverts notamment. Ces essais sont effectués sur trois échantillons pour chaque conditionnement.

La méthode a été appliquée à des échantillons de béton de forme cylindrique de 10 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur, placés au contact d'une nappe d'eau libre de 1 cm de hauteur maintenue à niveau constant. Les faces latérales sont recouvertes d'une feuille d'aluminium auto-adhésive [G. Arliguie, 2007], [AFREM, 1997] qui force l'eau à adopter un cheminement uni-axial, et évite l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée

est déterminée par pesées successives des échantillons; la seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue à la face inférieure de l'échantillon, avant chaque pesée, à l'aide d'un papier absorbant. La variation de l'absorption d'eau par capillarité du béton pour divers pourcentages de sable concassé est représentée sur la figure. VI.5.

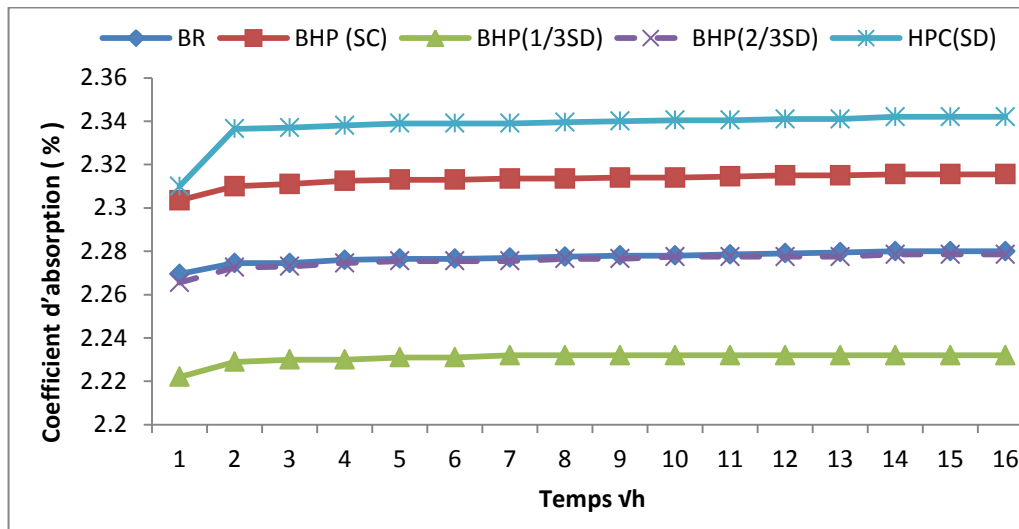


Figure VI.5. Coefficient d'absorption par capillarité des BHP

Les résultats montrent que l'absorption d'eau du béton, diminue avec la substitution des sables concassés au sable de dune, cela est dû à la différence de la densité et la porosité entre les différents agrégats fins utilisés (les sables concassés angulaires et les sables dunaires ronds).

En effet, la porosité est affectée par les caractéristiques de mixture du mélange qui comprend les granulats fins, ciment et eau. En outre, les valeurs d'absorption d'eau du béton à base de mélanges de sable binaires sont plus faibles (2,2 %) que ceux du béton avec des sables de dune SD (2,34%). L'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau (1,5% de Medaplast HP 40) permet de réduire le nombre de vides et les pores existant dans le béton, qui devient par conséquent plus compact, plus résistant. L'absorption d'eau est linéaire par rapport à la porosité totale du béton.

### VI. 3.2. Propriétés mécaniques

#### VI. 3.2.1. Effet de sable concassé sur la résistance mécanique

L'évolution des résistances mécaniques des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet est représentée sur les figures VI.6 et VI.7.

Les résistances de béton (BHP) sont acceptables à 28 jours : entre 60.75 et 76.3 à la compression et entre 5.37 et 5.6 à la flexion. Ces résistances s'améliorent clairement pour atteindre des performances très importantes après un 1 an : entre 76 et 96 MPa à la compression et entre 5.6 et 6.23 MPa à la flexion (amélioration des résistances d'environ 50% entre 28 jours et 1 an). Les hautes performances sont obtenus d'une part par à l'addition de laitier et de la

fumée de silice (respectivement 10% et 5%) et d'autre part par le remplacement partiel du sable naturel (SD) par le sable concassé par 1/3 de sable naturel SD.

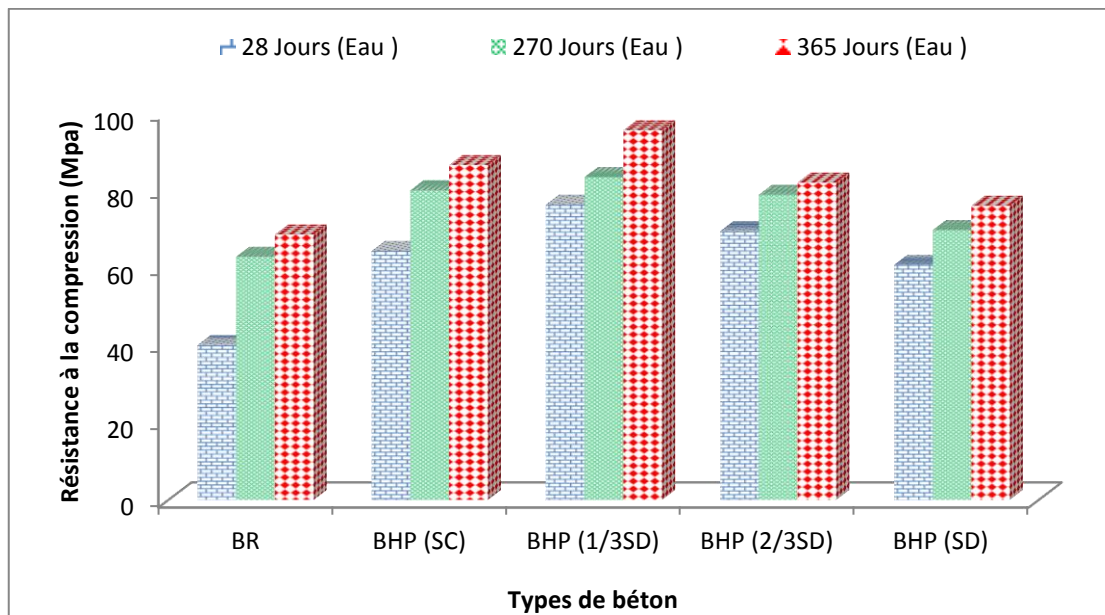


Figure VI.6. Variation de la résistance à la compression des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : l'eau du robinet)

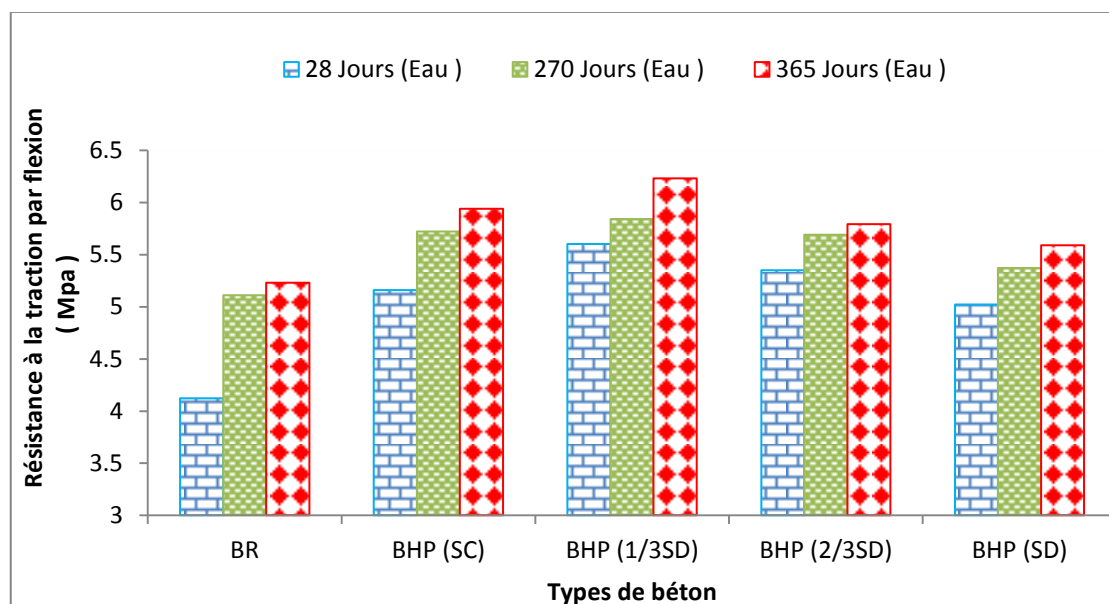


Figure VI.7. Variation de la résistance à la traction par flexion des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : l'eau du robinet)

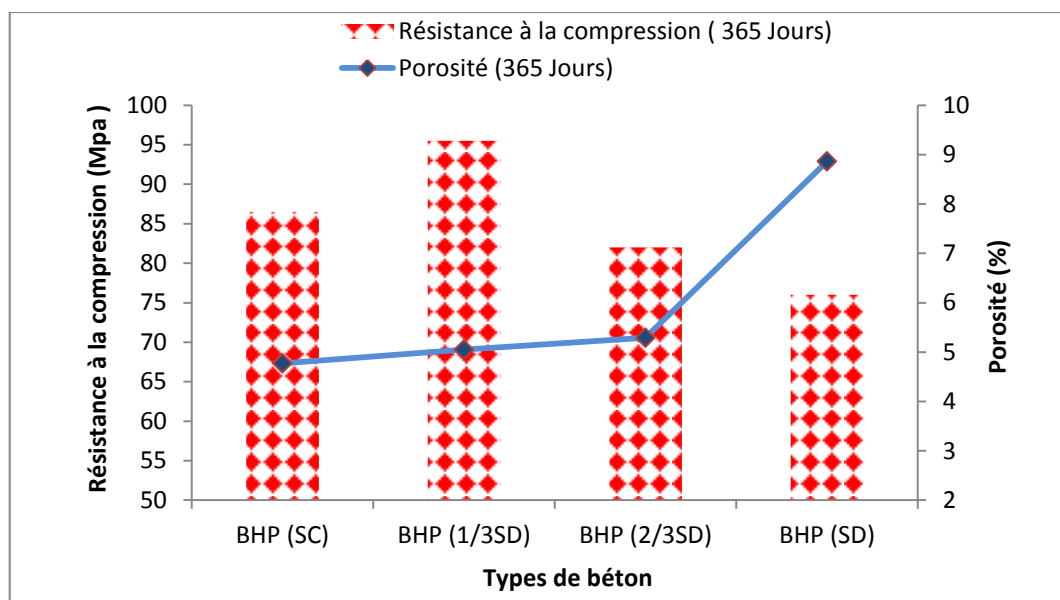
Le remplacement partiel du sable naturel (SC) par le sable de dune (1/3, 2/3 du SD combiné) se traduit par une augmentation de la résistance à la compression des bétons BHP (1 / 3SD), BHP 2 / 3SD) par rapport au béton BHP (SD). La résistance de béton augmente en fonction du pourcentage de sable concassé utilisé.

Les résultats obtenus de 28 à 365 jours confirment clairement que l'incorporation de sable concassé (1/3, 2/3 du SC) avec le sable de dune (SD) améliore la résistance à la compression du béton. Cela peut être expliqué par le fait que la nature et la répartition granulométrique sont les principaux paramètres qui influent sur l'augmentation de comportement mécanique du béton testé. Le gain de résistance du béton contenant du sable binaire (1 / 3SD, 2 / 3SD) sont supérieures à celui du béton avec sable de dune (SD).

En conclusion, on a noté qu'avec 1/3 à 2/3 de sable concassé il y a une amélioration de la résistance à la compression du béton. Nous remarquons aussi que l'utilisation de 2/3 SC augmente les résistances mécaniques du béton de plus de 25% à 365 jours.

### VI. 3.2.2. Effet de la porosité du sable binaire sur la résistance mécanique.

La figure VI.8 présente le rapport entre la porosité de sable binaire et la résistance en compression des bétons étudiés.



**Figure VI.8.** Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité (Milieu : l'eau du robinet)

Les résultats montrent que l'augmentation de la porosité des sables concassés a une influence significative sur les résistances mécaniques du béton testé, mais en particulier cette réduction a été très limitée, pour le béton préparé avec des sables binaires. En général, une augmentation de la porosité des sables binaires aboutit à une diminution de la résistance à la compression. La Porosité et la texture de sable ont un effet important sur la résistance à la compression et la durabilité du béton durci.

La porosité de sable binaire affecte également la résistance mécanique, l'absorption d'eau, et elle a une conséquence sur la performance de l'état frais et durci du béton.

À partir de la figure VIII.8, on peut conclure aussi que les échantillons combinés avec sable concassé BHP (1 / 3SD), (2 / 3SD) ont des faibles pourcentages de porosité par rapport au béton (SD). Cela est dû à la diminution du volume des vides à l'intérieur du sable binaire [Jadhav PA, 2013], [OM .Omar, 2012].

## VI.4. La durabilité des BHP en milieux agressifs (NaCl, MgSO<sub>4</sub>)

### VI.4.1. Introduction

La durabilité des ouvrages en béton n'est pas une caractéristique mesurable dont la maîtrise réglerait une durée d'utilisation. La vocation d'un ouvrage est de servir aussi longtemps que possible, moyennant un minimum d'entretien et une surveillance régulière.

Cette notion de durée de service semble difficile à la fois techniquement mais aussi culturellement à appliquer l'ouvrage dans son intégralité (ce n'est pas un objet consommable) et se restreint en pratique à des considérations sur les matériaux. Ainsi, du matériau, on dira qu'il est durable s'il conserve aussi longtemps qu'il faut, à la fois son intégrité et les caractéristiques nécessaires à son emploi.

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externe ou de phénomènes interne du béton. Les différentes actions peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques. Les attaques chimiques externes sont principalement causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates ou le gaz carbonique ainsi que par des nombreux liquides et gaz d'origine naturelle ou industrielle.

L'action destructrice peut être de nature très variée et peut se manifester de façon directe ou indirecte.

Les causes physiques de détérioration comprennent les effets d'une température élevée ou des différences de dilatation thermique des granulats et de la pâte de ciment durci les cycles répétés de gel-dégel et l'action des sels fondants qui leur sont souvent associés est une cause importante de détérioration, le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais, lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apparaîtront. C'est dans ce sens que cette partie expérimentale étudie la durabilité des bétons (BHP) réalisés avec les liants binaires, composés d'ajouts minéraux locaux : fillers de laitier granulé, fumée de silice et poudre de marbre. Les échantillons ont été exposés pendant un an dans deux milieux

agressifs : chlore de sodium et sulfate de magnésium avec une concentration de 5% pour chaque milieu. La concentration de milieu choisie pour que qu'elle soit supérieure à celle rencontrées dans les eaux usées, dans certains sols, certaines eaux souterraines.

Dans cette partie on va traiter des divers aspects de la durabilité du BHP formulé avec des granulats naturels et artificiels. La taille des éprouvettes retenue est  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  les échantillons sont démoulés après 24h et immergés dans les différentes solutions ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ), des échantillons conservés dans l'eau servent de témoin et ceci pendant 1an. Les échantillons sont ensuite sortis des bains de conservation et mis à nouveau en salle sèche ( $20 \pm 5^\circ \text{C}$ ) jusqu'à la stabilisation des masses.

Les principales techniques de caractérisation des dégradations sont :

- Le cycle d'eau ;
- La porosité,
- L'attaque chimique par différents milieux agressifs : La perte de la masse ; La diffraction X (DRX) et la mesure de la résistance en compression.

## VI.4.2. Variation de la masse des bétons conservés dans les milieux agressifs

### VI.4.2.1. Variation de la masse en fonction de sable combiné

La figure VI.9 montre l'évolution de la variation de la masse des éprouvettes de différents bétons en fonction de la durée d'immersion dans l'eau douce. On constate que tous les bétons présentent un gain en leurs masses respectives. Ce gain évolue d'une manière régulière pour tous les BHP en fonction de la durée d'immersion jusqu'à 365 jours.

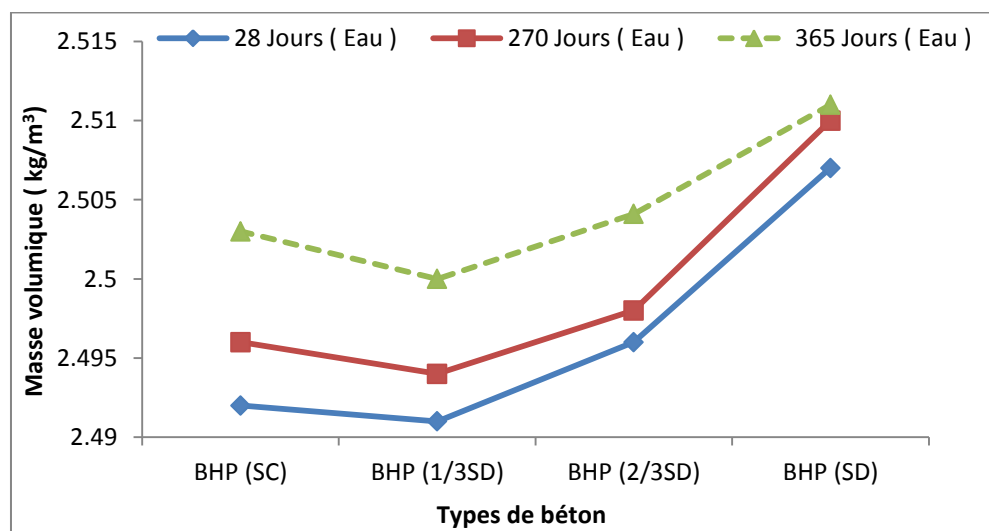
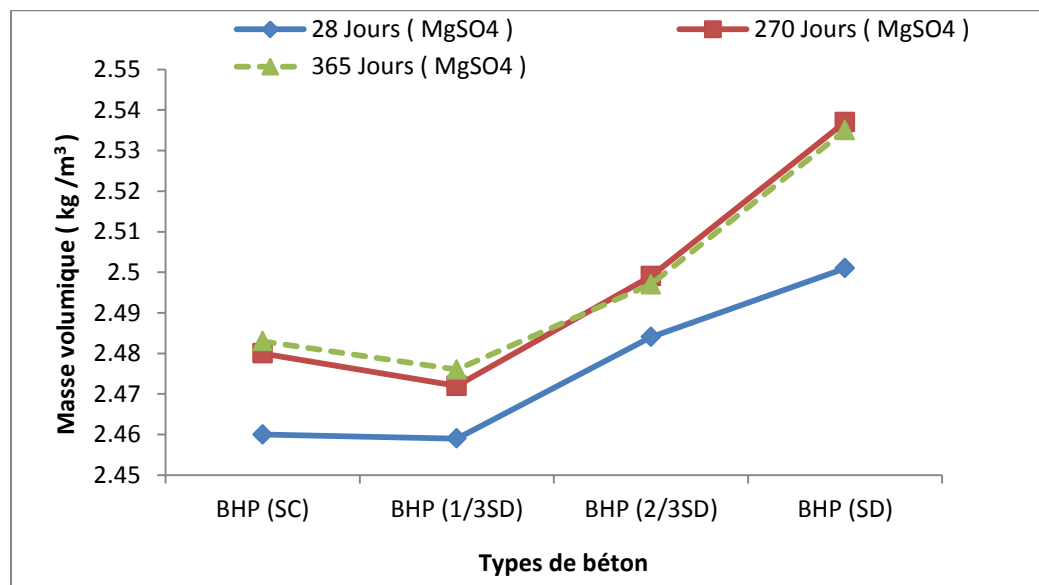


Figure VI.9. Masse volumique des différentes compositions de béton (Milieu : l'eau du robinet)

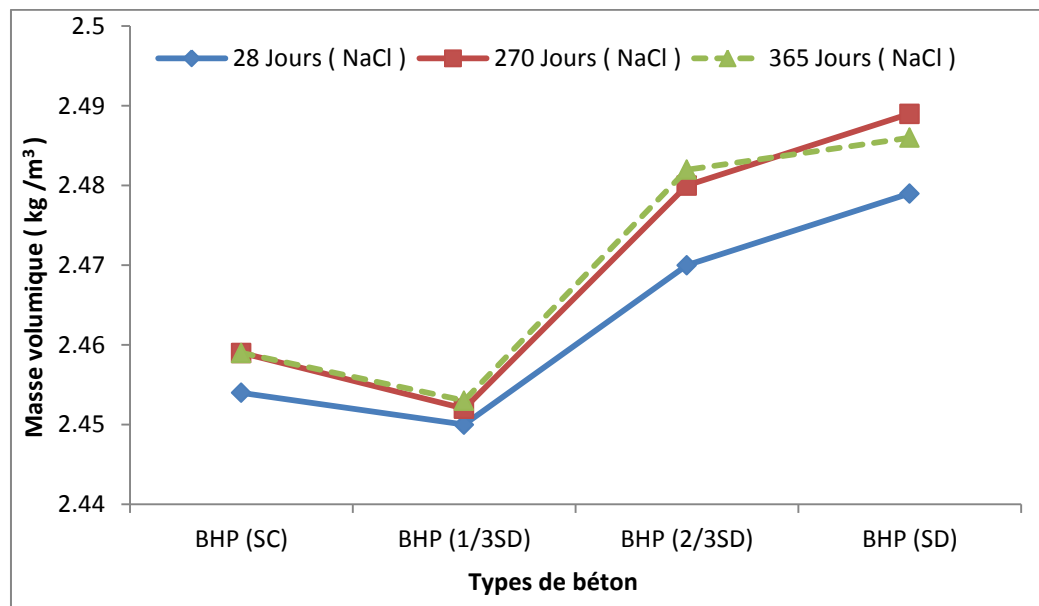
L'accroissement progressif de gain en masse est attribué à la continuité de la formation d'hydrates dans les différents bétons et probablement à la formation de couches denses de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) sur la surface des éprouvettes. Ces couches ont pour origine la présence des ions carbonates qui se combinent aux ions calcium, issus majoritairement de la dissolution de la portlandite mais aussi provenant directement de la solution d'eau douce.

D'après les figures VI.10, VI. 11 on constate une évolution positive de la variation de la masse de tous les BHP en fonction de la durée d'immersion dans les deux solutions agressifs. Cette évolution positive est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents bétons, et à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de la solution. On note, une faible augmentation des masses volumiques des bétons (1/3SD et 2 /3SD) avec ajouts par rapport au béton (SD), qui atteint rapidement une limite de saturation.

D'après S. Guettala (2007), l'incorporation d'ajout de sable finement fin conduit à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issue de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet au béton de diminuer les possibilités des pénétrations des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus dense.



**Figure VI. 10.** Evolution la masse des bétons immergés dans la solution de  $\text{MgSO}_4$ .



**Figure VI.11.** Evolution la masse des bétons immergés dans la solution de NaCl.

#### VI.4.2.1. La résistance mécanique à l'attaque chimique

##### ✓ Effet de la porosité du béton formulé avec sable binaire sur la résistance mécanique

Les figures. VI.12,..., VI.17. Présentent le rapport entre la porosité des BHP et la résistance en compression du béton conservé dans les milieux (, NaCl , MgSO<sub>4</sub>).

A partir des résultats des formulations de BHP, on peut constater que la porosité accessible au milieu agressif des BHP (1/3SD) et des BHP (2/3SD) est plus faible que celle des BHP (SD), surtout pour l'essai réalisé après 360 jours de cure, la différence entre BHP (1/3SD) et BHP (SD) est comprise entre (54.64% en MgSO<sub>4</sub> et 33% à NaCl), tandis qu'entre le BHP (2/3SD) et le BHP (SD), la différence est comprise entre (23.69% en MgSO<sub>4</sub> et 13.4% à NaCl). La comparaison entre les formulations du BHP (1/3SD) et du BHP (2/3SD) montre des résultats équivalents pour les essais réalisés après 28 jours.

Après 365 jours de cure, les formulations de BHP (SC) présentent des porosités légèrement supérieures par rapport à celles des BHP (1/3SD), la différence est de 19.34 % et 2.66 % respectivement pour les milieux (MgSO<sub>4</sub> et NaCl). On note par ailleurs pour les formulations du BHP (1/3SD) des porosités inférieures par rapport à celles des BHP de même milieu de conservation.

La comparaison entre les résultats des différentes classes de résistance et les différents âges de cure permet de conclure que la porosité accessible à l'eau des différents bétons augmente avec l'augmentation de rapport SD/SC et diminue avec l'augmentation du temps de cure. En fait, les effets de la forme et la texture des granulats fins sont beaucoup plus importants que les effets des caractéristiques de béton. Ces résultats sont similaires à celles trouvés dans l'eau douce.

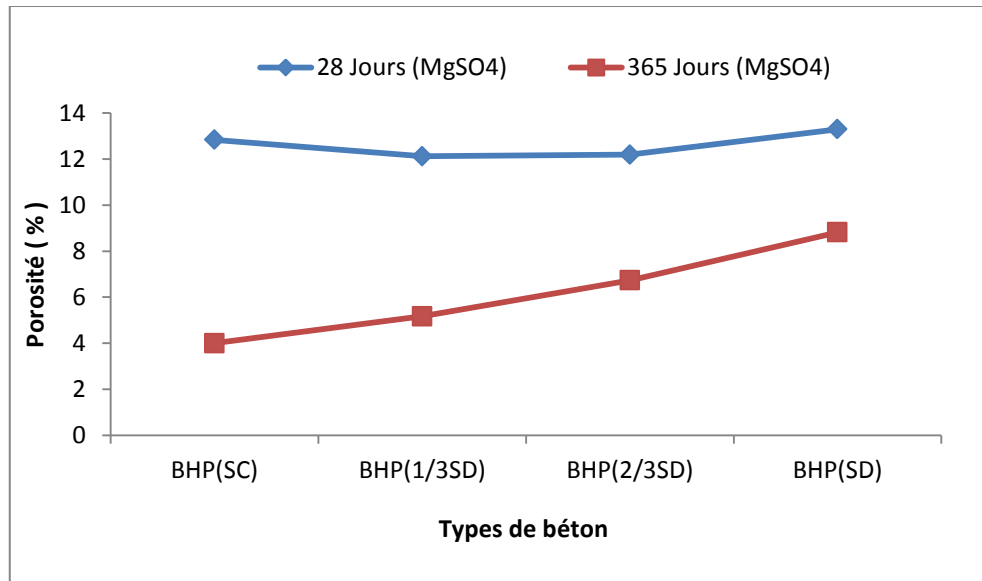


Figure VI.12. Variation de la porosité des BHP avec différents pourcentages de SC à l'âge de 28j et 365j (Milieu : MgSO<sub>4</sub>)

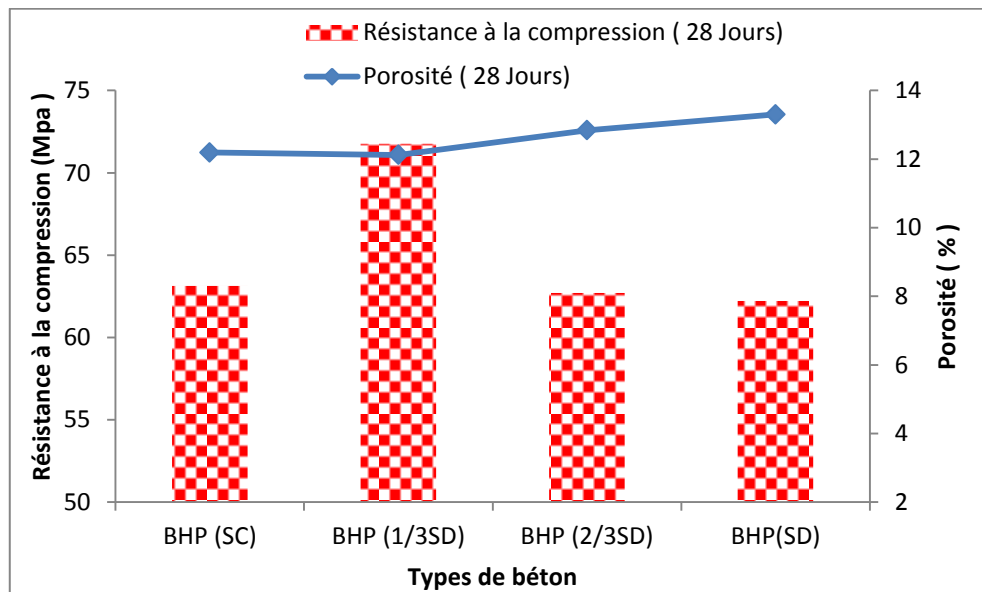


Figure VI.13. Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité à 28 jours (Milieu : MgSO<sub>4</sub>)

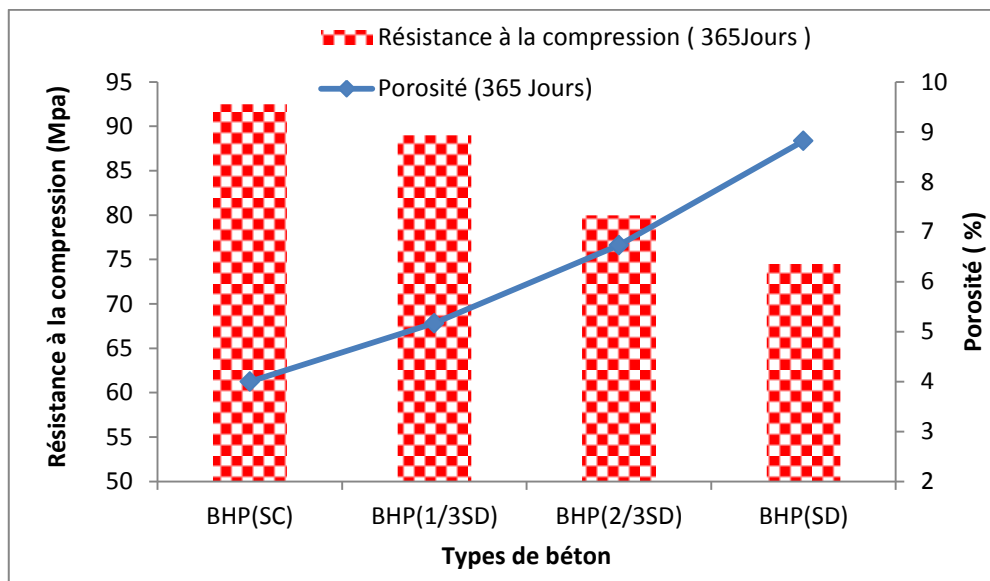


Figure VI.14. Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité à 365 jours (Milieu :  $MgSO_4$ )

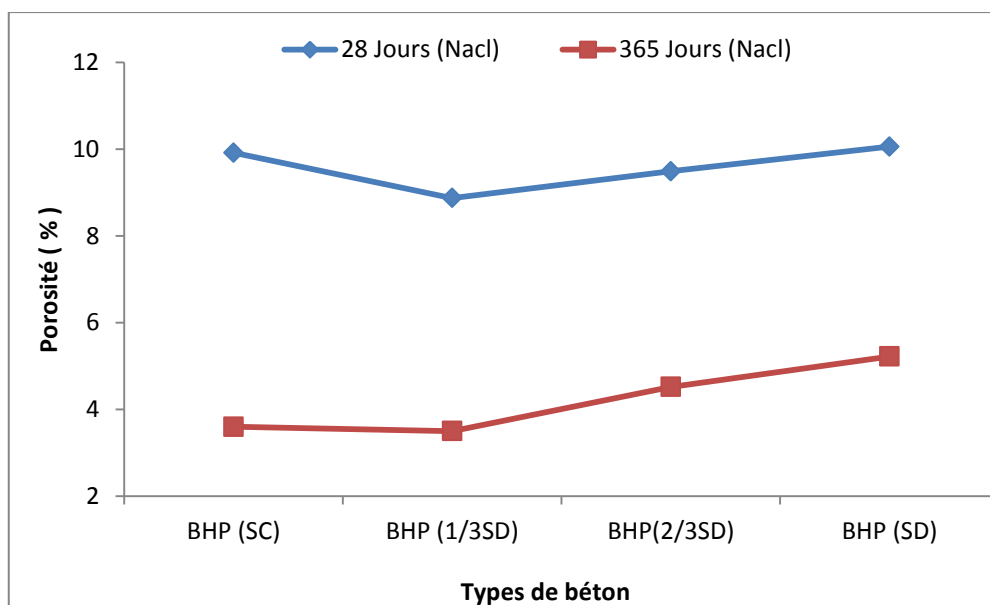


Figure VI.15. Variation de la porosité des BHP avec différents pourcentages de SC à l'âge de 28j et 365j (Milieu :  $NaCl$ )

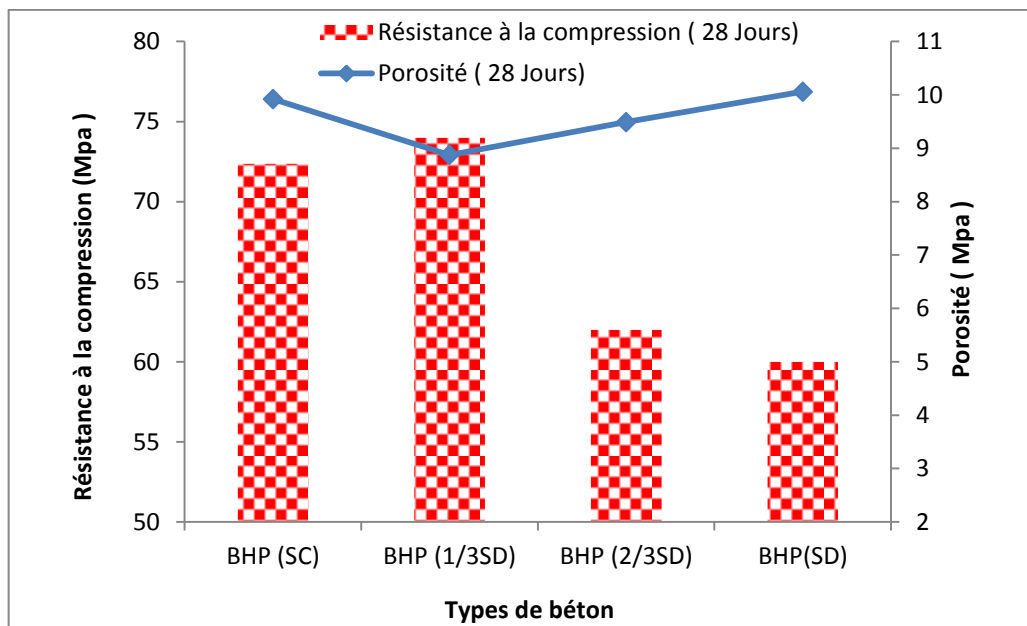


Figure VI.16. Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité à 28 jours (Milieu : NaCl)

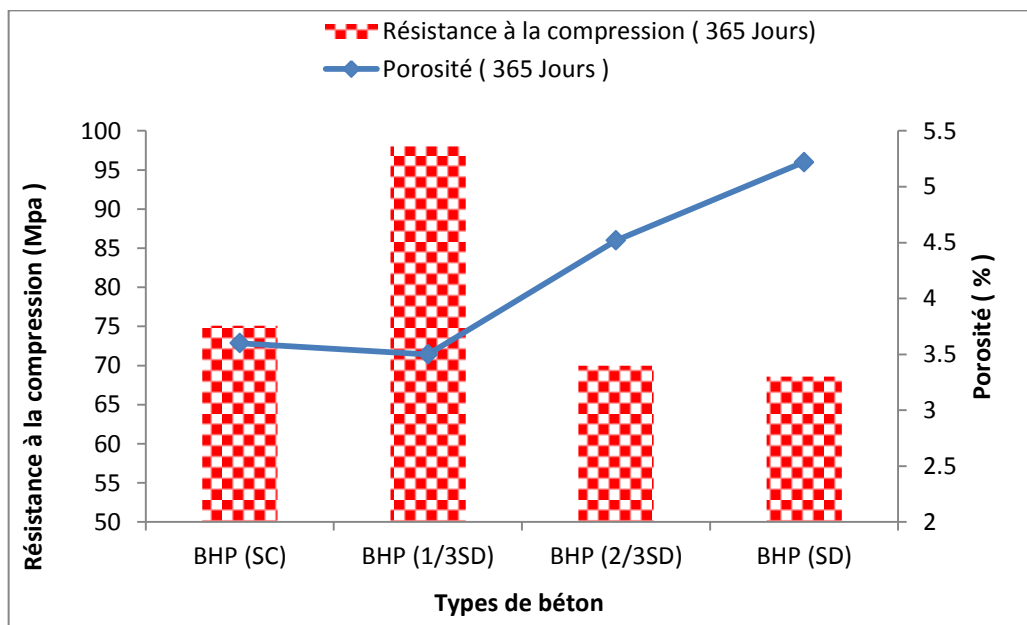


Figure VI.17. Evolution de la résistance à la compression des BHP en fonction de la porosité à 365 jours (Milieu : NaCl)

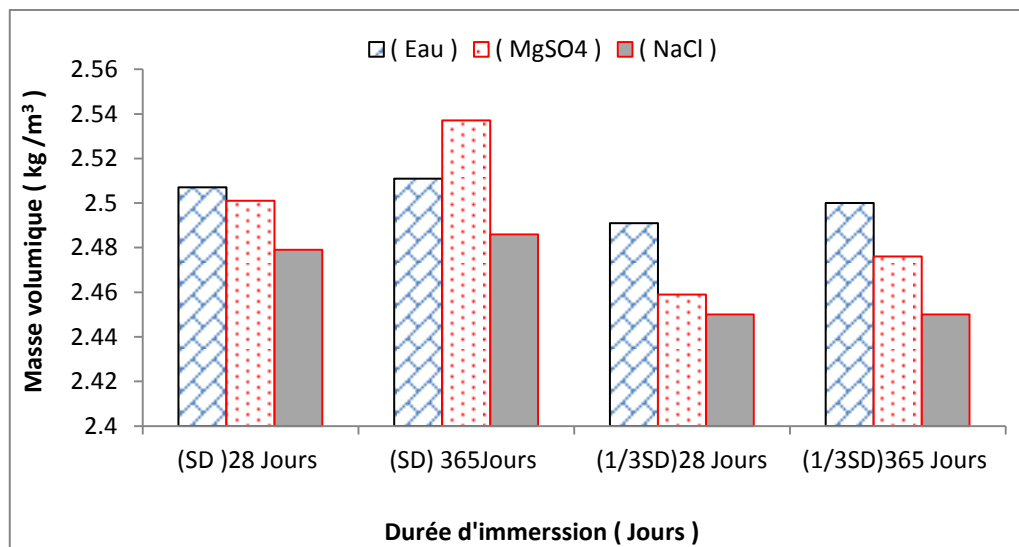
Selon Assié (2004), la première caractéristique qu'il convient de représenter en fonction de la résistance mécanique est la porosité accessible à l'eau. Ce paramètre est donc directement lié à la résistance mécanique du béton [Bessa, 2004].

En effet, dans notre étude, les différences de comportement en fonction de la nature de sable dans les formulations du BHP concordent avec les résultats de la résistance à la compression. Les BHP (BHP 1/3SD et BHP 2/3SD par rapport aux BHP SD) qui montrent le meilleur développement de la résistance à la compression présentent aussi, les faibles valeurs de la porosité accessible à l'eau. Cependant, d'après la figure VIII.9, la résistance à la compression n'est pas le seul paramètre qui régit la porosité accessible à l'eau, puisque Le développement de la porosité accessible à l'eau des BHP (SC) et des BHP(SD) est peut être en relation aussi, avec l'effet chimique de laitier granulé et la fumée de silice.

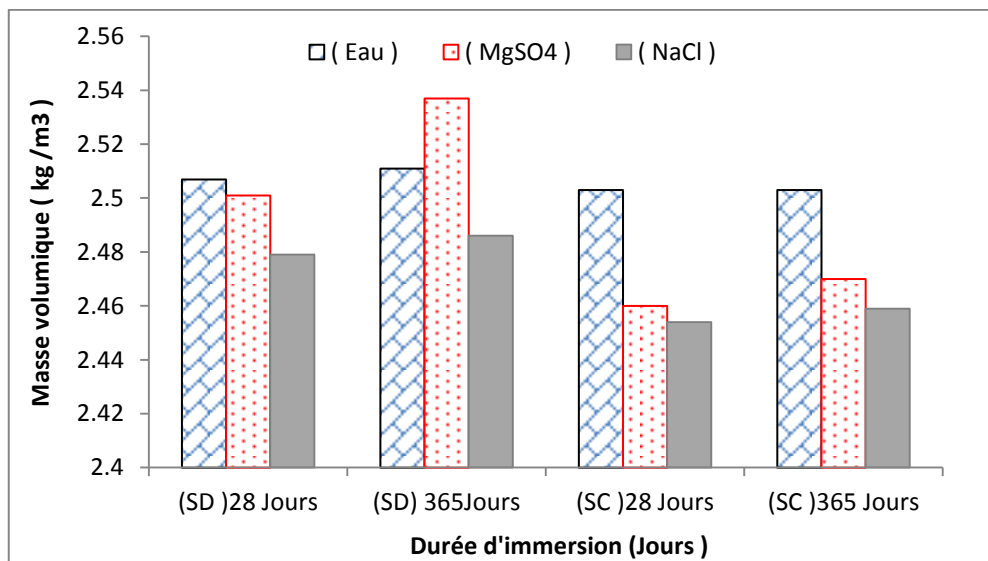
Selon Ghrici et al. (2007), la présence des ajouts pouzzolaniques dans les bétons, produit une quantité significative de nouveaux produits hydratés qui viendraient s'ajouter à ceux issus de l'hydratation du ciment de manière à augmenter la compacité de la pâte du ciment et réduire ainsi la porosité.

#### ✓ Influence du mode de conservation sur la variation de la masse des bétons

L'influence du mode de conservation sur la variation de la masse des bétons a été évaluée en mesurant la différence entre la variation de la masse des bétons conservés dans les solutions agressifs et celles des bétons conservés dans l'eau. Les résultats sont reportés sur les figures VI.18, 19.



**Figure VI.18.** Différence entre la variation de la masse des BHP (1/3SD) conservés dans les solutions sulfatés et ceux conservés dans l'eau douce.



**Figure VI.19.** Différence entre la variation de la masse des BHP (SC) conservés dans les solutions sulfatés et ceux conservés dans l'eau douce.

La variation de la masse volumique des différents bétons conservés dans l'eau courante, elle à la même tendance que celle des résistances mécaniques. Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est supérieure.

D'après les figures VI.18 et 19, on constate une évolution positive de la variation de la masse de tous les bétons en fonction de la durée d'immersion dans la solution de 5 % de chlorure de sodium et sulfate de magnésium. Cette évolution positive est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents BHP, et à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de la solution.

On note une faible augmentation des masses volumiques des bétons avec sable binaires, qui ont atteint rapidement une limite de saturation. Les bétons formulés avec sable calcaire ou sable mixte (silico-calcaire) présentent des gains de masse moins importants que ceux du béton avec sable dunaire. Cela est dû à l'effet pouzzolanique d'une part, qui consomme la portlandite qui réagit avec les sulfates pour former du gypse et de l'ettringite, et d'autre part peut être en relation aussi, avec l'effet chimique entre les ajouts et les caractéristiques des sables utilisés. D'où le gain en masse est réduit dans les bétons avec sable siliceux ou siliceux-calcaire par rapport au béton (SD).

#### ✓ *La résistance mécanique du béton étudié dans les milieux agressifs*

Les résultats des résistances mécaniques à la compression pour différentes compositions de béton à haute performance sont représentés sur les figures VI.20, ..., VI.23.

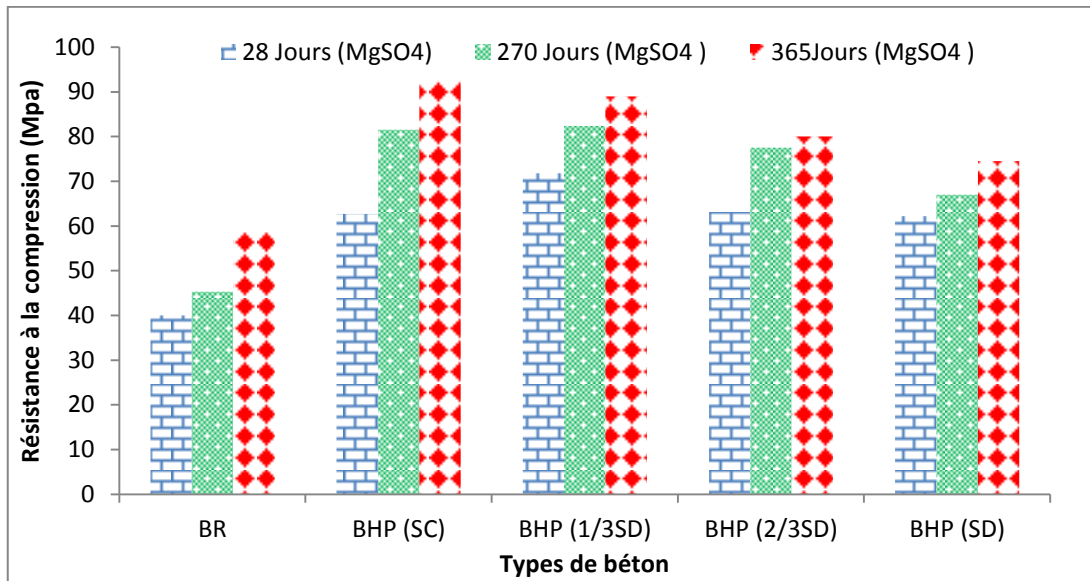


Figure VI.20. Variation de la résistance à la compression des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : MgSO<sub>4</sub>)

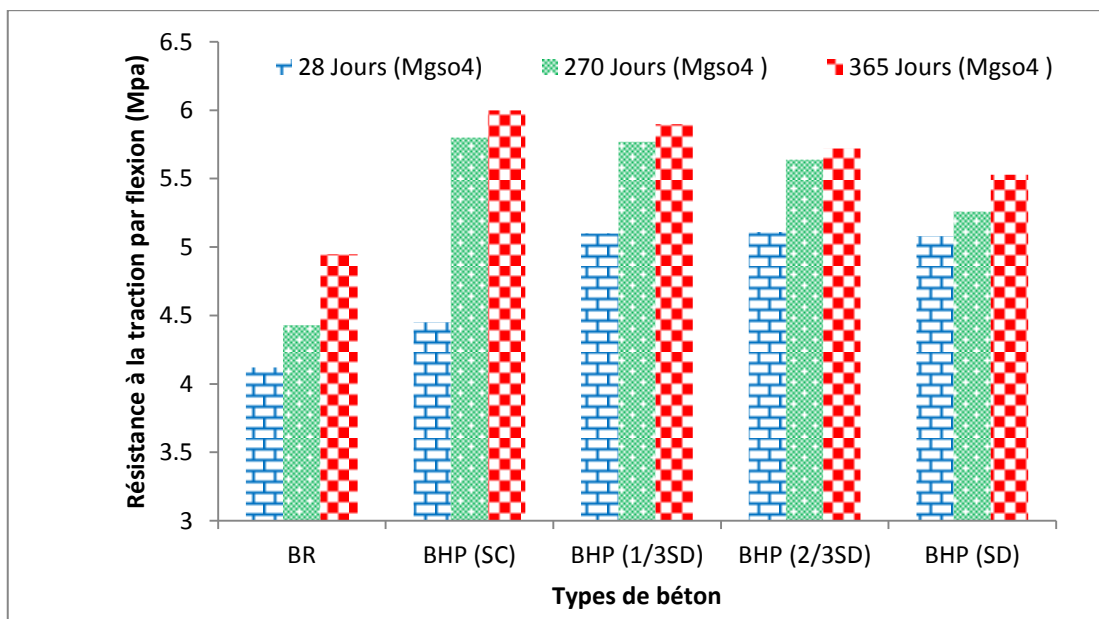


Figure VI.21. Variation de la résistance à la traction des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : MgSO<sub>4</sub>)

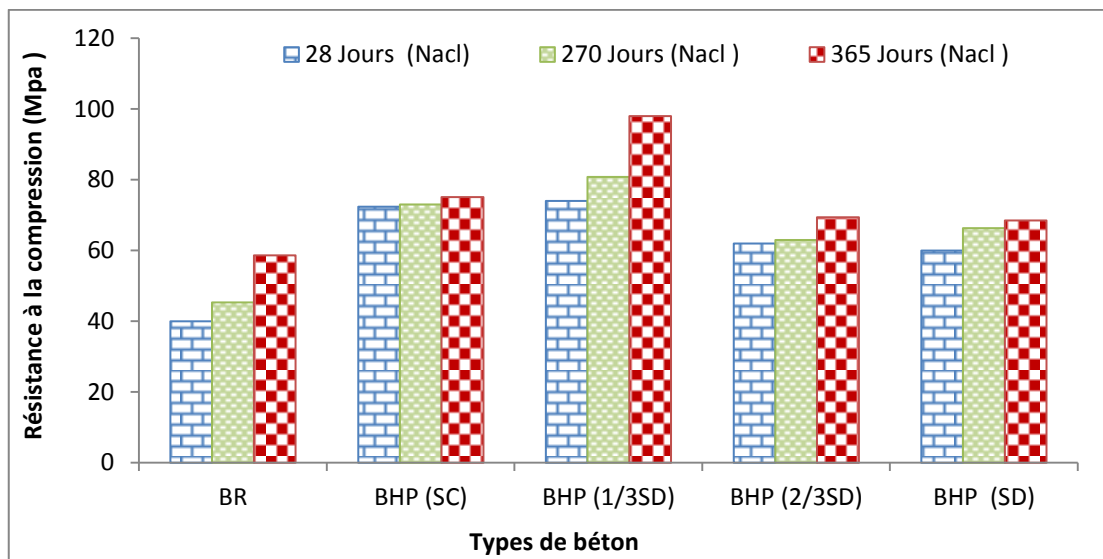


Figure VI.22. Variation de la résistance à la compression des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : NaCl)

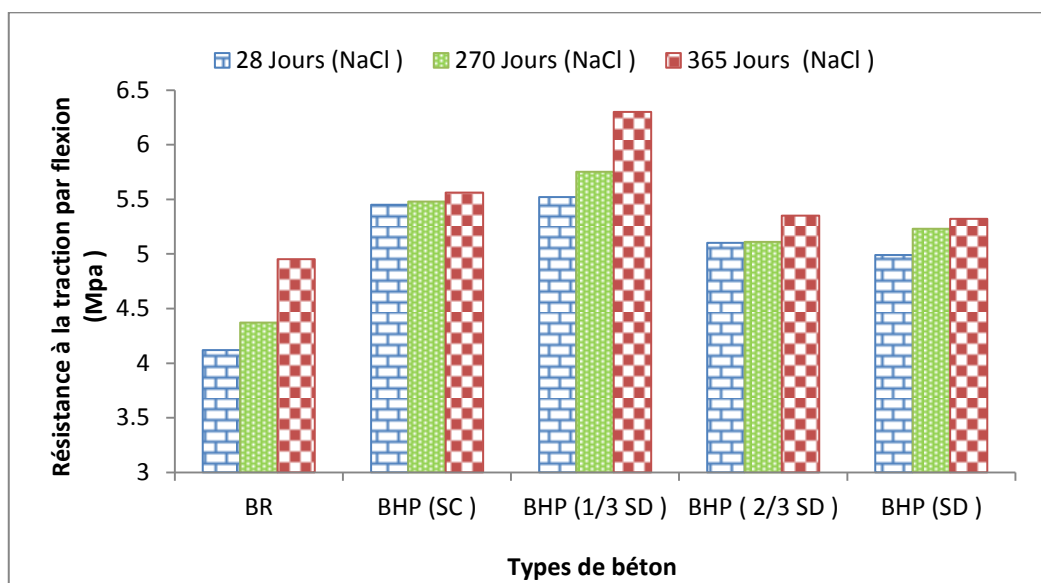


Figure VI.23. Variation de la résistance à la traction par flexion des BHP avec différents pourcentages de SC (Milieu : NaCl)

Pour tous les bétons, nous remarquons une augmentation continue de la résistance mécanique en fonction de l'âge (28, 270 et 365j) ; mais elle dépend du milieu où les éprouvettes sont conservées.

A l'âge de 28 jours les bétons avec ajouts présentent des résistances plus élevées à celles de référence ; mais un écart nettement observé et développé à 270 j et à 365 j ; surtout pour les bétons avec mixture de sable (SD et SC), ajouts de laitier et la fumée de silice (la combinaison entre sable de dune et sable concassé entraîne un accroissement de la résistance à la

compression, ce qui confirme les résultats obtenus précédemment lors de l'étude de la porosité). Ceci peut s'expliquer par la propriété latente de l'hydratation des bétons avec ajouts actifs, car la nécessité de la présence de chaux pour l'hydratation fait que ces derniers ne réagissent que tardivement. La cinétique de développement des produits d'hydratation des ciments avec ajouts est supérieure à celle du ciment sans ajouts, procurant aux bétons avec laitier granulé et la fumée de silice, une résistance mécanique plus élevée que celle des bétons sans ajouts.

Après l'essai de compression, pour illustrer l'ampleur de la dissolution de la portlandite par le milieu sulfatique, on a appliqué de la phénophtaléine à 1% dans l'éthanol sur les parties interne des demi-morceaux du béton conservé dans les milieux agressifs. Les résultats présentés dans la figure VI. 24 ne montrent aucune diminution du pH, donc aucune altération ou perte de matière des bétons.



**Figure VI. 24.** Evolution du pH du BHP

Une étude complémentaire aux R-X, permet de confirmer cette conclusion.

### VI.4.3. Interprétations par (DRX )

#### 1. Introduction

Cette partie est consacrée aux méthodes d'investigations de la carbonatation à caractère microscopique tels que la Diffraction des Rayons X (DRX) qui teste la distribution des intensités du  $\text{Ca(OH)}_2$  et du  $\text{CaCO}_3$ , l'analyse thermogravimétrique (ATG) qui teste la distribution des concentrations en  $\text{Ca(OH)}_2$  et en  $\text{CaCO}_3$ .

#### 2. Objectif de l'étude

L'objectif de cette méthode qualitative est de comparer les phases cristallines de nos matériaux, avant et après carbonatation, et aussi de suivre l'évolution de la carbonatation en fonction du temps.

### 3. Préparation des échantillons

**Protocole de prélèvement de la partie carbonatée pour le béton :** Les échantillons de bétons qui ont servi à cette analyse sont sciés en petites tranches sous alcool pour éviter tout risque de réhydratation de la matrice cimentaire et ensuite broyés dans un broyeur à boulets.

**Protocole de prélèvement de la partie carbonatée pour la pâte de ciment :** Dans le cas de la carbonatation accélérée, l'épaisseur de la partie carbonatée est micrométrique. Un grattage de surface a donc été réalisé systématiquement en vérifiant l'état de carbonatation à l'aide de la phénolphthaléine. Concernant la carbonatation naturelle, l'épaisseur carbonatée est millimétrique. Un sciage a donc été possible. L'échantillon est ensuite broyé avant d'être analysé [Beck K.2006].

Travailler avec une poudre permet de générer un diffractogramme homogène car moyenné sur les intensités diffractées par les différentes cristallites. Il est nécessaire d'analyser une poudre de granulométrie fine afin d'obtenir un nombre de cristallites contribuant à chaque réflexion suffisamment important pour obtenir une statistique correcte [Beck K.2006].

Les figures VI.25, ..., 30 correspondants aux diagrammes de diffraction X sur poudre de béton passant en totalité au tamis de 50 $\mu$ m. Cette poudre est recueillie par broyage des éprouvettes après 1an de conservation dans trois milieux de conservation (l'eau de robinet, solution de NaCl et MgSO<sub>4</sub>). La composition minéralogique est pratiquement identique pour tous les types de bétons à savoir :

- les produits d'hydratation de ciment (CSH et CH)
- et le quartz qui représente le sable.

Une faible quantité de portlandite (CH) est observée pour tous les types de béton BHP. Ceci s'explique par la réaction pouzzolanique des ajouts (laitier et /ou fumée de silice) pour les bétons composée, le rapport eau/ liant et la durée de réaction (1an) [B.Baroghel, 1994].

Les diagrammes des bétons VI. 25,..., 30 montrent des traces de calcite. La figure VIII.25, représente l'intensité du premier pic de diffraction à 4.95 [Å] de la portlandite et celle de calcite sur le pic 4.279 [Å]. Celle-là est fonction du taux de filler de laitier granulé dans le ciment 10%. L'ettringite n'existe qu'à l'état de traces.

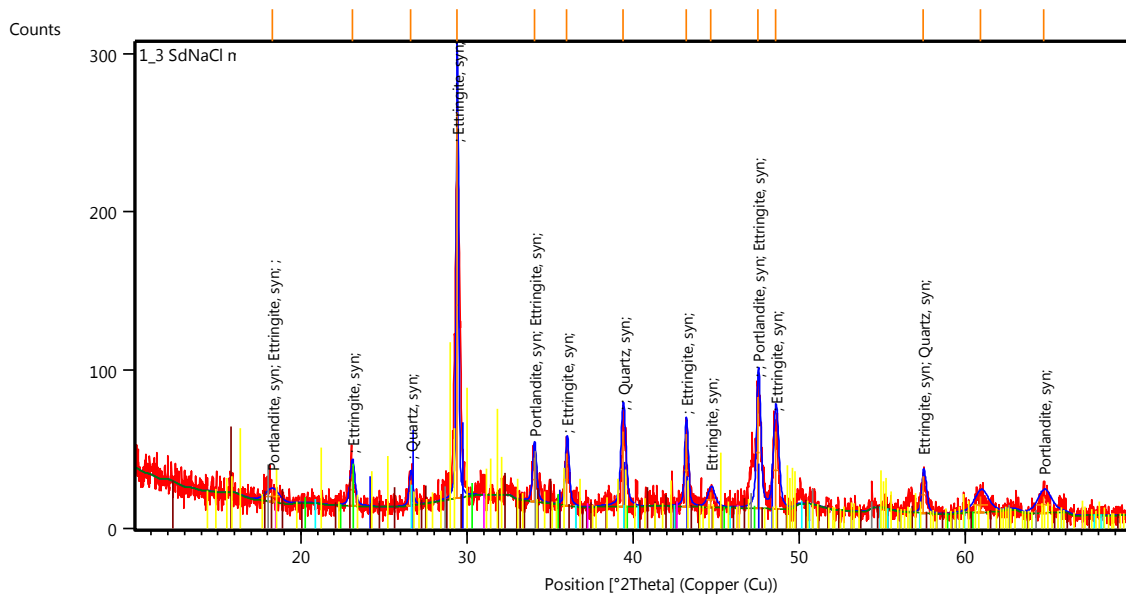
L'étude du diagramme figure VI.26, présente les observations suivantes :

- ✓ Disparition presque totale de la phase ciment (minéraux anhydres) ;
- ✓ Apparition des CHS, dû à l'interaction des minéraux du ciment (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S) avec l'eau caractérisée par les raies de diffraction :  
d = 23 .031°- 3.861 [Å], d = 26.58°- 3.35 [Å], d = 29.37°,3.041 [Å], bauxite  
d = 26.58°- 3.35 [Å], d = 39.41° - 2.286 [Å], Quartz.
- ✓ Apparition de CSH caractérisé par une raie intense de d = 34.07°- 2.63 [Å].









**Figure VI. 30.** Diagramme de diffraction X du béton BHP (1/3SD) à 365j dans la solution NaCl

Les hydrates formés après 28 j jusqu'à 365 jours sont :

- Hydrates de structure ou de renfort CSH (figures VI.27,...,30).
- Hydrates expansifs dégradant la structure Brucite et le gypse secondaire  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (figures VI.27, VI.28).

#### VI.4.3.1. Béton formulé avec ajouts et sable binaire (nature silico - calcaire)

Les éprouvettes conservées dans les solutions ( $\text{MgSO}_4$  et NaCl), permettent aussi d'avoir des résistances proches à celle des bétons conservés dans l'eau. Cette diminution sensible, est due principalement à l'effet nocif des éléments du milieu agressifs, tel que  $\text{MgSO}_4$  et NaCl qui en présence de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , forment des nouveaux composés (brucite qui gonfle de 10 fois plus son volume, aussi le gypse secondaire).

Les figures VI.28, VI.29, VI.30 montrent qu'un béton avec sable binaire 1/3SD (silico-calcaire), est peu influencé par les éléments nocifs de milieu agressifs, ceci explique le rassemblement des figures VI.25,...30, d'où la quantité des composés dégradent la structure est très faible.

On conclut que la combinaison de sable de dune avec sable concassé, confère au béton une bonne et meilleure durabilité, ceci s'explique par les effets des ajouts avec les sables fins silico-calcaire.

- Le laitier est un matériau silico-alumino-calciques qui en présence de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  donne des CSH, ces derniers ne changent pas la nature des produits d'hydratation

responsable de la résistance aux agents agressifs, mais ils modifient leurs proportions et leurs cinétiques d'hydratation (propriété latente du laitier).

- Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dû essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.
- l'incorporation d'ajout de sable finement fin conduisent à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issue de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet au béton de diminuer les possibilités des pénétrations des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus dense.

#### VI.4.3.2. Béton formulé avec ajouts et sable concassé (nature calcaire)

Les résultats par diffraction X des bétons avec sable concassé (nature calcaire) dans les trois milieux de conservation sont représentés dans les figures VI.31, VI.32, VI.33.

Le béton avec ajout de sable concassé (SC) dans les milieux agressifs, présente les même hydrociliate formés que dans BHP avec sable de dune (SD). Cependant, la densification de la matrice cimentaire, par la présence des hydraucarboluminates de calcaim, ainsi que le degré d'hydratation élevé du ciment, fait dimuer la diffusion des élément nocifs, ce qui justifie l'amélioration de la résistance dans ce milieu.

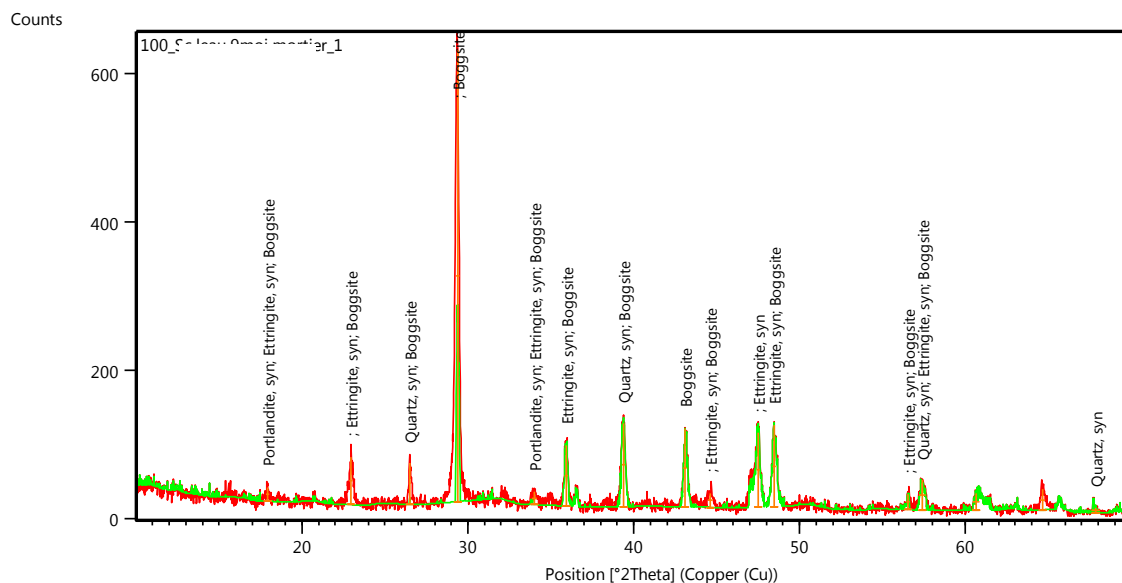


Figure VI. 31. Diagramme de diffraction X du béton BHP (SC)  
à 365j à l'eau douce

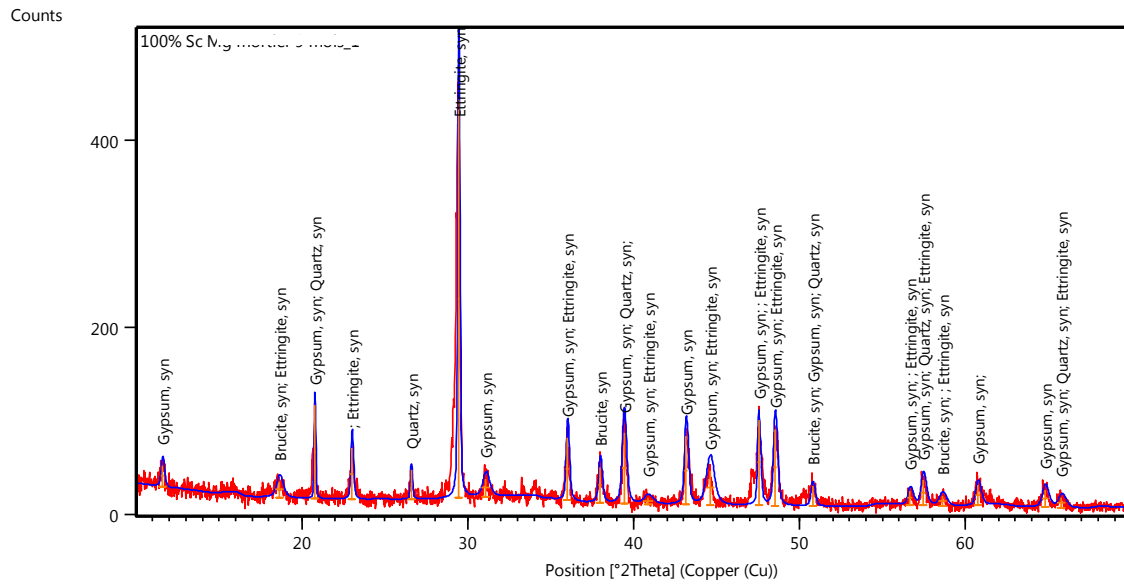


Figure VI. 32. Diagramme de diffraction X du béton BHP (SC) à 365j dans la solution MgSO<sub>4</sub>

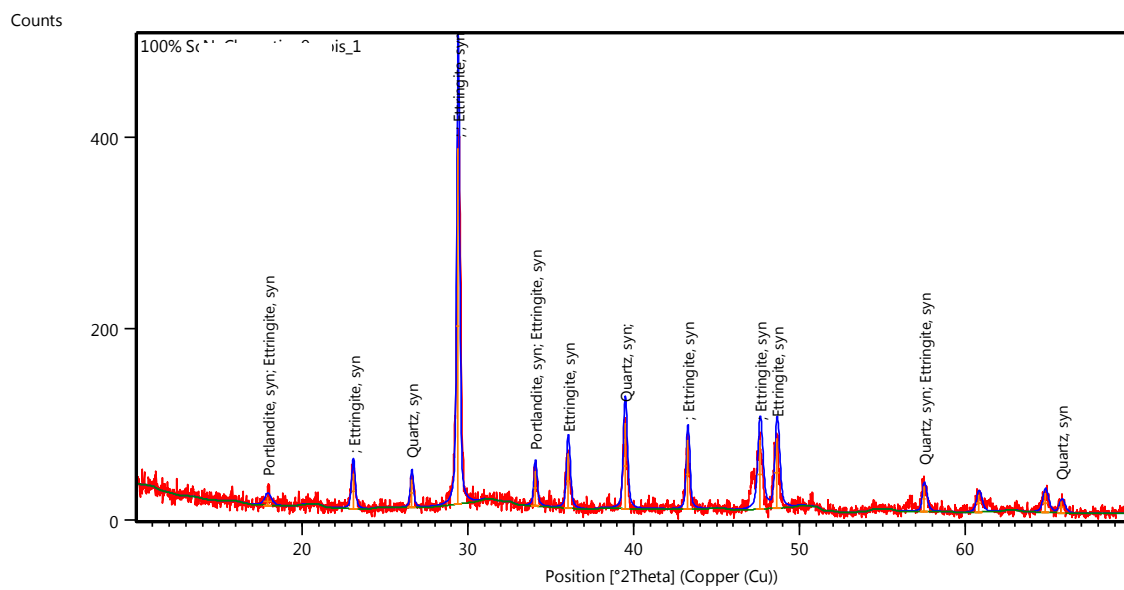


Figure VI. 33. Diagramme de diffraction X du béton BHP (SC) à 365j dans la solution NaCl

On conclut, que le béton avec sable concassé de nature calcaire, a donné de meilleurs résultats à l'âge de (28 j, 270 et 365 jours) dans tous les milieux par rapport au béton avec sable de dune (SD). Cette amélioration est due, d'une part à la substitution des fines argileuses du sable qui absorbent de l'eau lors du gachage par du fillers calcaire (SC), d'autre part à l'interaction de ce dernier avec les minéraux du ciment, probablement le  $C_3S$  et par conséquent, la formation des hydrocarboaluminates de calcium, ce qui rend la matrice du béton plus dense et empêche la pénétration des éléments nocifs vers la structure interne du béton.

Les diagrammes DRX, ont montré que le nombre de rais des CSH est le même que dans le béton de BHP (1/3SD), ce qui donne sur le plan mécanique des résistances plus au moins proches.

#### VI.4.4. Analyse thermiques gravimétriques et différentielle

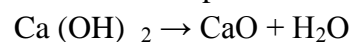
Cette technique, basée sur la mesure continue du poids d'un échantillon maintenu dans une atmosphère déterminée et soumis à une variation régulière de température, peut être utilisée pour évaluer la carbonatation d'un béton [Parrott et Killoh 1989], [Rahman et Glasser 1989]. D'après Thierry (Thierry 2005), cette technique permet même de distinguer la carbonatation de la portlandite et celle des C-S-H.

D'après Platret G et Deloye F.-X [G.Platret, F.X.Deloye, 1994], les constituants du béton se décomposent aux températures référencées dans le tableau suivant :

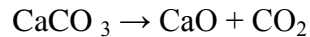
**Tableau VI. 1:** Température de décomposition des constituants du béton d'après "méthodes d'essai LPC" [Baroghel-Bouny V., 2002]

110-130°C	<i>C-S-H et ettringite</i>
175-190°C	<i>Monocarboaluminate de calcium hydraté</i>
230-240°C	<i>Aluminate de calcium hydraté</i>
460-510°C	<i>Portlandite</i>
575-579°C	<i>Quartz</i>
650-750°C	<i>Calcite de carbonatation</i>
850-920°C	<i>Calcite</i>

D'après Thiery (2005), la perte de masse résultante de la perte d'eau libre et de la déshydratation des C-S-H et de l'ettringite débute à 90°C et peut se poursuivre jusque 400°C. La perte entre 450°C et 550°C correspond à la décomposition de la portlandite



et enfin sur une plage de 600°C à 1000°C, la perte de masse est due à la décarbonatation du CaCO<sub>3</sub> (perte de CO<sub>2</sub>) des granulats et /ou produit par carbonatation.



L'une des difficultés de cette technique reste l'interprétation des résultats, c'est-à-dire la distinction entre la décomposition des différentes phases. Il est communément admis [V. Baroghel-Bouny, 2002] qu'il est impossible de distinguer l'eau libre des C-S-H et de l'ettringite. Les échantillons qui ont servi à cette analyse sont préparés de la même manière que pour la DRX pour obtenir des poudres. Les analyses thermiques sont effectuées de 25°C à 1000 °C.

La perte de masse vers 160 °C correspond à la déshydratation des C-S-H et de l'ettringite.

La perte de masse vers 450°C correspond à la décomposition de la portlandite suivant la réaction :  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

La perte de masse vers 870 °C correspond à la décarbonatation de la calcite (CaCO<sub>3</sub>) qui donne naissance à la chaux vive CaO suivant la réaction :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

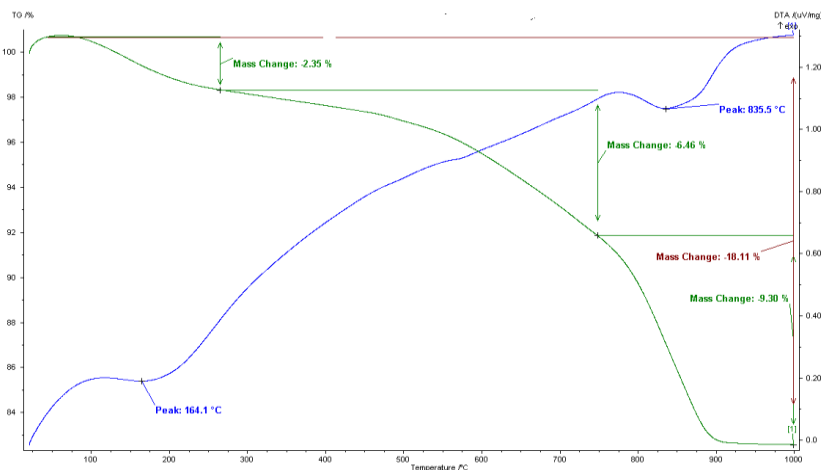


Figure VI. 34. ATG & ATD de poudre du béton BHP (SD)

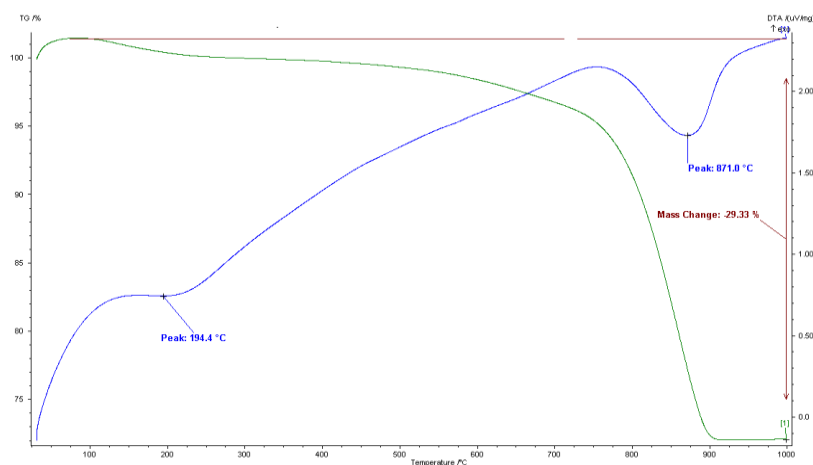


Figure VI. 35. ATG & ATD de poudre du béton BHP (SC)

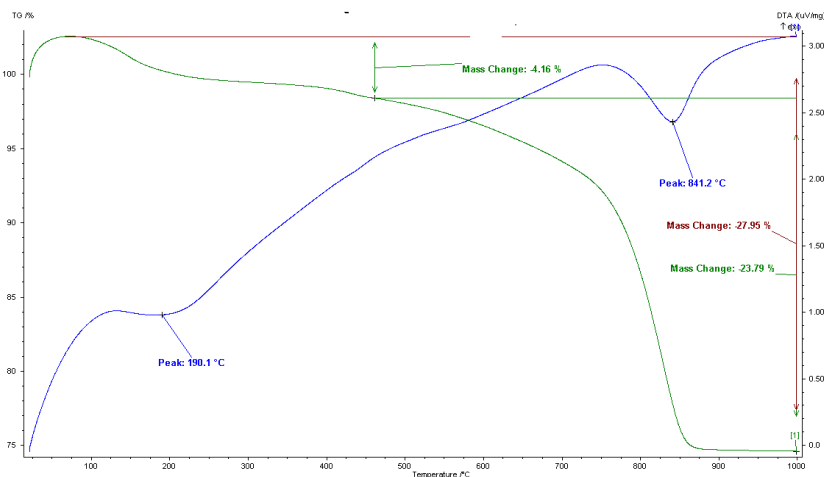


Figure VI. 36. ATG & ATD de poudre du béton BHP (1/3SD)

## Conclusion

Toutes les observations effectuées dans ce présent chapitre , permettent de tirer les conclusions suivantes :

L'effet des sulfates et des chlorures sur les *BHP* : Pour expliquer les résultats obtenus, on peut rappeler le mécanisme de transport des ions agressifs et aussi les facteurs principaux qui influent sur la durabilité des bétons :

- Les chlorures peuvent pénétrer la surface du béton par deux types de mécanismes de transport :
  - **Sorptivité capillaire** : Les chlorures en solution sont d'abord "entraînés" dans la porosité en même temps que l'eau absorbée (lors des cycles de mouillage séchage par exemple).
  - **Diffusion en phase liquide** : Au - delà de la zone d'absorption la pénétration des chlorures s'effectue par diffusion. Une partie des ions peut être "piégée " dans la pâte de ciment.

Il existe deux mécanismes de captage des ions:

- Adsorption sur les surfaces internes des hydrates ou des pores.
- Interactions chimiques avec les aluminates pour former des chloroaluminates de calcium (sel de Freidel  $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ ) qui sont relativement peu dommageables [Jones, M. R 93].

- La présence des fillers est d'une grande influence sur les résistances obtenues par le béton témoin (sans fillers) et les autres bétons. En effet : Les fumées de silice et les laitiers diminuent très significativement le coefficient de diffusion des ions chlore.

Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice peut réduire le coefficient de diffusion par un facteur de 5 à 10, particulièrement si le rapport E/L est relativement élevé, [BAM, P.B. 2000].

- Le deuxième facteur d'influence est le rapport Eau/liant (laitier +fumée de silice), qui est dans notre cas de 0,26, donc très bas. Ce rapport est d'une grande importance, en effet :

- Le coefficient de diffusion augmente d'autant plus vite que le rapport E/C est élevé. L'influence de E/C est particulièrement importante pour les rapports E/C compris entre 0,5 et 0,7. Un mûrissement long (d'une année) permet de fractionner davantage le réseau de pores capillaire. On peut diminuer significativement le coefficient de diffusion en maintenant plus longtemps des conditions de mûrissement favorables. (Influence du rapport E/C et du mûrissement sur le coefficient de diffusion des ions chlore, [DHI, R.K 93].

- La substitution du sable de dune par le sable concassé dans des éprouvettes de béton a pour effet d'améliorer les résistances mécaniques aux milieux agressifs.

Un pourcentage de *SD* de 30 % permet d'obtenir des résistances en compression au milieu sulfaté équivalentes à celles obtenues à l'eau du robinet, . Cependant, une substitution supérieure à 30% engendre une baisse des résistances. En effet, le sable de dune confère une grande porosité au béton , ce qui influe négativement sur les résistances mécaniques. Le *BHP* avec 1/3 de sable de dune a donné les meilleures résistances, ce qui est en relation avec son adsorption capillaire qui est la plus basse.

Les résultats des essais physiques et mécaniques ne montrent aucune altération significative des bétons conservés dans l'eau sulfatée même après une année de mûrissement. Aussi, l'essai à la phénophtaléine ne montre aucune diminution du pH, donc aucune altération (perte de matière) du béton.

- La combinaison du ciment Portland avec ajouts minéraux locaux , naturels ou sous produits industriels , actifs ou inertes , favorise l'accroissement de la compacité des bétons et l'augmentation de la masse volumique , c'est la conséquence de la densification de la matrice et des performances mécaniques très correctes en plus de leurs avantages économiques et écologiques.
- L'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau dans la confection des bétons à hautes performances permet de réduire la porosité et d'augmenter la résistance mécanique. Ces performances sont obtenues avec ajout de laitier et / ou la fumée de silice ou la combinaison entre les deux , mais le taux maximum de fumée de silice sera limité à 5 % ou 8%, et 10% pour le laitier.

- La substitution du sable de dune par le sable concassé dans le béton a pour effet d'améliorer les résistances mécaniques aux milieux agressifs. La microstructure interne des bétons montre notamment la densité importante des CSH et la quasi disparition de la portlandite.

## *Conclusion générale et perspectives*

Les travaux de notre thèse ont été menés dans le but d'atteindre trois principaux objectifs, le premier concerne la valorisation des ajouts cimentaires tels que laitier granulé de la région Est Algérien (Annaba) et la poudre de marbre (Boussaâda) comme addition minérale dans le BHP, et le deuxième objectif est de donner une réponse assez claire sur l'influence du type et de la quantité d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des BHP dans les milieux agressifs tels que l'eau gypseuse et pouvoir ainsi comparer entre le BHP sans ajout et le BHP combiné avec ajout binaire (L+FS) ou (L+PM), le dernier objectif est d'étudier l'effet de la nature des granulats sur la durabilité des BHP.

D'après les résultats des essais effectués, on constate :

### *a) L'effet des fillers :*

- ✓ L'ajout binaire (fumée de silice et laitier granulé) augmente la surface spécifique du liant qui entraîne une demande d'eau supplémentaire et conduit ainsi à une eau de consistance plus importante dans toutes les pâtes de ciment.
- ✓ Le temps de prise des premières heures pour les bétons formulés avec laitier granulé et fumée de silice est plus faible; cela est dû à la nature de ce type d'addition avec le processus d'hydrations lent formulé à jeune âge.
- ✓ Pour des BHP plus plastiques, l'incorporation de la fumée silice et laitier granulé affecte positivement la maniabilité du béton.
- ✓ Pour viser une durabilité meilleure en milieux sulfatés, la quantité de fumée silice sera limitée à 8%, mais l'incorporation de 10% de laitier granulé limite l'ajout de fumée de silice à 5%.
- ✓ L'addition de 8% de fillers de marbre engendre un squelette plus cohérent, une peau de BHP plus imperméable et par conséquent un béton plus résistants par rapport au béton de référence.
- ✓ L'incorporation d'ajouts actifs (fumée de silice, laitier granulé) dans le ciment pour formuler les BHP diminue le rapport  $\text{CaO/SiO}_2$ , mais augmente les oxydes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les analyses par diffraction X, confirment la diminution considérable de la quantité de portlandite après un an de conservation.
- ✓ On peut fabriquer des meilleurs bétons à haute performance en incorporant 8% de fumée silice ou un liant binaire composé de 5% fumée silice et 10% laitier granulé comme on peut utiliser un ajout composé de 5% de fumée silice et 10% de poudre de marbre.

**b) L'effet de la nature des granulats :**

- ✓ L'ouvrabilité des bétons (BHP) augmente sensiblement avec la substitution du sable concassé par sable de dune. Cela est dû à la substitution de la partie de sable concassé (d'origine calcaire) par sable de dune (siliceux).
- ✓ Les valeurs d'absorption d'eau du béton contenant les granulats concassés sont plus élevés que ceux des granulats fins dunaires.
- ✓ Les bétons formulés avec sable binaire (granulats fins naturels et concassés) présentent une faible porosité en comparaison avec le béton BHP à base de sable de dune.
- ✓ L'absorption d'eau des BHP diminue avec la substitution des sables concassés par sable de dune, cela est dû à la différence de la porosité des différentes mixtures de sables (les sables dunaires rond et les sables concassés anguleux).
- ✓ Les hautes performances sont obtenus pour les BHP formulés avec 10% de laitier et de 5% de fumée silice avec 2/3 de sable concassé.
- ✓ Les bétons conservés dans les milieux agressifs, présentent un accroissement progressif de gain en masse cela est attribué à la continuité de la formation d'hydrates dans les différents bétons par la formation de couches denses de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) sur la surface des éprouvettes.
- ✓ La porosité accessible au milieu agressif des BHP (1/3SD) et (2/3SD) est plus faible que celle des BHP (SD), surtout pour l'essai réalisé après 360 jours de cure, la différence entre BHP (1/3SD) et BHP (SD) est respectivement comprise entre (54.64% en solution  $\text{MgSO}_4$  et de 33% en solution  $\text{NaCl}$ ), tandis que pour le BHP (2/3SD) et le BHP (SD), la différence est comprise respectivement entre (23.69% en solution  $\text{MgSO}_4$  et de 13.4% en solution  $\text{NaCl}$ ). La comparaison entre les formulations du BHP montre des résultats équivalents pour les essais réalisés à court terme. Les formulations du BHP (1/3SD) présentent des porosités inférieures par rapport à celles des BHP de même milieu de conservation.

**Perspectives et recommandations :**

Les résultats trouvés montrent qu'il demeure nécessaire de poursuivre l'étude et la caractérisation des BHP à base de sable dunaire / calcaire ou la mixture entre les deux avec ajout de laitier d'El -Hadjar + la fumée silice ou avec fillers de marbre afin de mieux connaître l'influence de ces agrégats sur les performances de durabilité des bétons et bétons HP dans un environnement chimiquement agressif. Ainsi, on recommande principalement l'étude de:

- ✓ L'influence de la conservation cyclique (mouillage-séchage et chauffage-refroidissement) des bétons à haute performance formulés avec des sables (SD, SC, et sable de mer) dans une solution sulfatique;
- ✓ La durabilité des BHP formulés avec des sables (SD, SC, et sable de mer) en fonction des différentes concentrations de  $\text{NaCl}$  ou  $\text{MgSO}_4$  ;

- ✓ L'évolution de la porosité des bétons et des BHP pouzzolaniques exposés aux sulfates ;
- ✓ La résistance des bétons et des BHP pouzzolaniques aux attaques sulfatiques internes ;

## Références bibliographiques

- A.Nicos et al.** Identification of composite cement hydration products by means of X-Ray diffraction. *Microchimica Acta*136, 181-183(2001).
- A.Rahman , F.P. Glasser.** Comparative studies of the carbonation of hydrated cement. *Advances in Cement Research*, 2(6) :49-54, 1989.
- A.Tafraoui** . Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie). *Journal of Applied Sciences* 12/2006; 6(13). DOI:10.3923/jas.2006.2833.2836
- A. R'mili , M. Ben Ouezdou** . Valorisation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants . *Web of Conferences MATEC* 01001 (2012).
- A.Komar.** Matériaux et élément de construction .Ed,Mir, Moscou, 1978.
- A. Fernandez-Jimenez, J. G. Palomo, F. Puertas.** Alkali-activated slag mortars. Mechanical strength behavior. *Cement and Concrete Research* 29 (8) pp. 1313-1321 (1999)
- A.M.Paillère , A.M.Ravrdy** . Influence d'ajout inerte ou actif sur les propriétés des ciments. *bulletin de liaison* ; pp :49-60.Juin – Aout 1977
- A.S Boldyrev , Z.B. Entine.** Experiences et fondements physico chimiques de l'utilisation des sous produits dans l'industrie du ciment. *7<sup>eme</sup> congrès international de chimie des ciments*, Volume II,pp.83-88, paris , 1980
- A. Yeginobali , F. T. Dilek.** Sulfate resistance of mortars containing silica fume as evaluated by different methods. *Proceedings, Fifth International Conference, Milwaukee, Wisconsin, USA- Vol 2* , pp 795-813 – 1995.
- A. M. Boddy, S. T. Lee ,H. Y. Moun, R. N. Swamy** . Sulphate attack and role of silica fume in resisting strength loss . *Cement & Concrete Composites- Vol 27*, pp 65-76-2005.
- A.M.Paillère , J.J.Serrano et M.Grimaldi** . Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimum des bétons à hautes performances avec et sans fumée de silice. *Proceeding of the international RILEM Symposium ,Barcelona* , p 63- 79 . 1990.
- A. Haouas** . Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait. *Thèse de Doctorat*, ENS de Cachan, janvier, 222p.2007
- A.M. Brandt.** Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance. *London; New York:* E & FN Spon, 1995 .
- A.M. Neville.** Properties of concrete ». 3rd ed. UK: *Longman House*, 1993.
- A.Ghreib , E.Lkhlef** . Influence de résistance du béton sur le comportement en béton armé soumises à la flexion. *Mémoire PFE ,ENP d'Alger* 1999.
- A.M. Palier.** Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimum des bétons à hautes performances avec et sans fumée de silice. *Proceeding of the international RILEM Symposium*, Barcelone, p63-79.1990
- ASTM C618-03** .Standard specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. 2003.

- ASTM C989-04. Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars », 2004.
- A. M. Boddy-R.D. Hooton-M. D. A. Thomas . The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction . *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1263-1268- 2003.
- A.M. Neville . Propriété des bétons . Eyrolles, Paris, France, 806p ;2000
- A.BRAHMA . Le Béton. Université de Blida , office des publications universitaires ;1992
- A.Meyer . Experiences with the use of superplasticizers in Germany. *ACI SP-62*, pp. 21-36 ;1979.
- A. Folliot . Le ciment. In : Le béton hydraulique. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées* ; 1982.
- A. Popova . Etude des interactions entre les hydrosilicates de calcium et les adjuvants superplastifiants. *Thèse de doctorat en chimie, Ecole Polytechnique*, 2000;
- A.Rahman and F.P. Glasser “Comparative studies of the carbonation of hydrated cement”. *Advances in Cement Research*, 2(6):49-54, 1989;
- A.F. Stock, D.J. Hannat , R.I.T. Williams (1979) The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31. 109, pp. 225-234.
- A. K. Tamimi .High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic Conditions. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 30, pp 188-191, 1997.
- A. Sellier , L.Buffo-Lacarrière L. Toward a simple and unified modeling of basic creep shrinkage and drying creep for concrete. *Eur J of Environ and Civ Eng*, 10, pp. 1161 1182 ; 2009.
- B.J .Kim et al. The absorption behaviour of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste .*Cement and Concrete Research*, 2000. 30p. 887-893.
- B. Demirel The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete, *International Journal of the Physical Sciences*, 5 (2010) 1372-80.
- B.Menadi, S.Kenai , J.Khatib, A.Aït-Mokhtar. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, *Construction and Building Materials*, 23(2009) 625-33. 6.
- C. Badoz , P.Francisco , P.Rougeau .A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks. In: *Proceedings of the second International congress of FIB*, June 5 -8, 2006, 2006.
- C.Richet, C.Galle, et al .Synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des bétons application au colis cimentes». Rapport CEA-R-6050, *commissariat à l'énergie atomique*; 2004.
- C.Tasdemir . Combined effect of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete . *Cement and Concrete Research*, Vol 33, N<sup>o</sup> 10,pp1637-1642- Oct 2003
- CARISWARD et AL. Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, *Proceedings of the third international RILEM conference on SCC*, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
- C. Carde , R. François .Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials., *Cement and Concrete Research* 27, 971-978; 1997.

- C. Lévy.** A propos de la carbonatation accélérée des bétons (comparaison béton ordinaire- béton à hautes performances du pont de Joigny). Les BHP. Edition, ENPC1990.
- C.F. Chang , J.W Chen.** « The experimental investigation of concrete carbonation depth » In: *Cement and Concrete Research* 36 pp: 1760-1767;2006.
- C. Richet, C. Galle, et al** «Synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des bétons application au colis cimentes». Rapport CEA-R-6050, commissariat à l'énergie atomique2004.
- C.Gonilho Pereira , J.Castro-Gomez , L.Pde Oliveira .** Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete. *Construction and Building Materials*. 23, pp. 602-608.2009.
- C. Galle .**Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying; *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1467-1477, 2001
- C.Vernet , G.Noworyta .**Interaction des adjuvants avec l'hydratation du C3A: point de vue chimique et rhéologique. Communication, 56p. (1992)
- CIM béton, Centre d'information sur le ciment et ses applications, Fiche technique Tome2 "Les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre "1997.
- D. M. Roy , Arjunan P., Silsbee M. R.**Effect of silica fume, and low- calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cement and concrete Research*, Vol. 2, pp 1809-1813, 2001.
- D.Whiting, A. Walitt ,1988,** « Perméabilité of sélecte concrete »,ACI publication ,SP 108- 11, *Editorial production : Patricia J.Kost*, N :88 -71000 ,USA 1988,pp :195-22.
- D. Benamara & B. Mezghiche .** Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux locaux «bhp», *Courrier du Savoir – N°10*, Avril 2 Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2010010, pp.09-14
- Dados do INE.** Origine des Résidus de la Construction et Démolition au Portugal. *Instituto Nacional de Estatística* de 2002., Março de 2008.
- D.M.Mulenga, J. Stark, P. Nobst .**Thaumasite formation in concrete and mortars containing fly ash .*Cement & Concrete Composites-* N<sup>0</sup> 25, pp 907-912-2003.
- D. Perraton and P.C. Aïtcin,** Perméabilité du béton de peau, le choix du granulat peut-il s'avérer un élément plus déterminant que le rapport e/c, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 232 (2001) 59–72.Aitc 2003
- De Sa, C.** Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton. Influence des gradients et des incompatibilités de déformation, Thèse de doctorat, *LMT ENS Cachan*, Paris.2007.
- D.Darwin, Gartner W., Russel W.** The mechanisms of superplasticizer action: theory and experiment. *68th American society colloid and surface science symposium*, Standford University, PaloAlto; 1994
- D.Perraton,P.C Aitcin , A.Carles-Gibergues ,** « Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol. 221, pp. 69-78, 1999.
- D.Chen , E. Sakai , M.Daimon.** Carbonation of low heat Portland cement paste procured in water for different time. *Journal of University of Science and Technology Beijing Mineral Metallurgy Material* 14(2):178-184 · April 2007.

- E.J .Sellevold , F.F. Radj .** Condensed Silica fume ( Microsilica) in concrete : Water demand and strength development Fly - Ash , silica fume , slag and other mineral By – Products in Concrete. *ACI*, SP-79,677 , 1983.
- E.Roziere.** Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle. Thèse de doctorat, *l'Ecole Centrale de Nantes*, 2007.
- E.Rossington.** Adsorption of admixtures on Portland cement hydration products. *JACS*, vol.51, n°1, pp:46-50;1968
- E. Guillon.** Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles. Thèse de doctorat, *d'école normale supérieure de Cachan*, France 2004.
- E. Stutzman Paul.** Guide for X-Ray powder diffraction analysis of Portland cement and clinker . *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, March 1996.
- F- Z. Dakhmouche.** Etude de l'effet des superplastifiants sur les propriétés des bétons frais et durcis et leur interaction avec les ciments algériens ». Thèse de Magister, *Université Mentouri Constantine*, Juin 2000.
- F. NORMAN et al.** Synthèse des données sur l'emploi d'ajouts cimentaires dans le revêtement de chaussée en béton exposés aux cycles de gel dégel et au produit chimique de déglacage. *Cement association of canada*, 2005.
- F.Z. DAKHMOUCHE '.** Carbonatation de bétons adjuvantés à base de ressources locales algériennes. Thèse de doctorat en Génie civil, l'Université Mentouri-Constantine.2009
- FERRARIS, OBLA et al .**Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and concrete research*, vol 31, pp245-255. 2001.
- F. Adenot, M.Buil.** Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water.*Cement and Concrete Research* 22, 259-272, 1992.
- F. Adenot.** Caractérisation et Modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment . Thèse de doctorat en Matériaux Minéraux, Université d'Orléans. 17 décembre 1992.
- F.LARRARD .**Construire en béton l'essentiel sur les matériaux. *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées* .France ; 2002.
- F.P. Nichols .** Manufactured sand and crushed stone in Portland cement concrete. *Concrete International*, 4, No 8, pp. 56-63;1982.
- G.Camps .** Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton. Thèse de doctorat. *Université de Toulouse*, 282p.2008
- G. Villain, Thierry M., Platret G.** Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetr. *Cement and Concrete Research* 37(2007) 1182–1192.
- G.Rimmelé, Barlet-Gouédard V., Porcherie O., Goffé B., Brunet F.** “Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO<sub>2</sub>-rich fluids”. In: *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 1038–1048;
- G.Menendez and al .**Strength development of ternary blended cement with limesotone filler and blast furnace slag.*Cement and Concrete Research* – Vol 25 , pp 61-67-2003

- G.Mantegazza,E.Alberti.** Slump loss and rheology of superplasticizer mortar and concrete with different polysaccharides. *4<sup>ème</sup> Conference CANMET/ACI, Montréal* , p 105-102,1994.
- G.Dreux, Festa J.** Nouveau guide du Béton. 7<sup>ème</sup> édition Eyrolles, 1995.
- G.Mantegazza .** Slump loss and rheology of superplasticizer mortar and concrete with different polysaccharides. 4<sup>ème</sup> Conference CANMET/ACI, Montréal, p 105-102.1994
- G. Zhang, J. Song, J. Yangb, X. Liu,** Building and Environment, 41(2006) FOLAGBADE,
- G.Platret , F.X.Deloye** « Thermogravimetry and carbonation of cements and concretes, Actes des Journées des Sciences de l'Ingénieur du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Publication LCPC, Paris, 1994, pp. 237–243, (in French)
- G.Pons , J.M.Torrenti .** Chapitre 5: Retrait et Fluage. dans La Durabilité des Bétons. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées* (ed), pp. 167-216.2009
- G. Pons, et J. Torrenti .** Retrait et fluage. La durabilité des bétons, Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Sous la direction de Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT , *Presses de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées*, Paris.2008.
- G. Platret , F.X. Deloye .** Thermogravimetry and carbonation of cements and concretes. *Actes des Journées des Sciences de l'Ingénieur du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Publication LCPC, Paris, 1994, pp. 237–243, (in French).
- G. Camps.** Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 282p. 2008
- H A. TOUTANJI.** Rôle de la fumée de silice dans la résistance a la traction directe des matériaux à base de ciment. *matériels and structures/ matériaux et constructions*, Volume: 32 ,Issue Number: 217,1999.
- H. Hebhoub, M.Belachia .**Introduction de sable de déchet de marbre dans le béton hydraulique . *Revue Nature et Technologie*. N° 04/Janvier 2011. Pages 41 à 46
- Ho D.W.S., Lewis R.K.** Carbonation of concrete and its prediction. *Cement Concrete Research*, 1987, 17, pp. 489–504.
- Hostomsky et Jones .**Calcium carbonate crystallization, agglomeration and form during continuous precipitation from solution . *J. Phys D: appl, phys*; 24:165-170. Paris. LCPC, 2005;
- H.Rahmani, A.A.Ramzaniapour .**Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes. *Asian journal of civil engineering (building and housing)* VOL. 9, NO. 3, 2008, pp 303-319.
- H.H. Bache.** Densified Cement /Ultra-fine particle – Based Materials. *2<sup>ème</sup> conference internationale sur les super plastifiants dans le béton*, 11-12 juin, Ottawa , Canada, publié par Aalborg Cement , Aalborg, B.P.163,DK-9100 Aalborg, Danemark, 12p.1981.
- I.Guénot-Delahaie.** Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton, Thèse de doctorat, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.1997
- I.Messaoudene, Jauberthie,A.Nacéri .** Influence des fillers de calcite sur le comportement des mortiers au jeune âge . *Actes des 29<sup>ème</sup> Rencontre de Génie Civil*, 29-31 Mai 2011, Tlemcen-Algérie, p. 197-205.
- I.El Khadiri, A.Diouri A.Boukhari,J. Aride and F.Puertas .** Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in moroccan Portland.*Cement and Concrete Research* – Vol 32 , pp 1597-1603-2002.

- I. Hager.** Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.*
- I.SOROKA.** Concrete in hot environment . *ED.E and FN SPON*, london,1993
- J. J. Chang, W. Yeih, C. C. Hung.** Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based slag pastes. *Cement and Concrete Composites* 27 (1) pp. 85-91 (2005)
- J. L. Ramires , J.M. Barcena.** Proposal for limitation and control of fines in calcareous sands based upon their influence in some concrete proprieties. *Material and structures*, 23,pp 277-288, 1990.
- Jan Desmyter-Edmonde Rousseau,** CSTC : RTD info 26 le bâtiment ce recycle, mars 2004.
- J.Alexandare , J.L.sébileau .** Le laitier de haut fourneau. *Edition centre technique et promotion des laitiers*, Paris ,1988,340p.ISBN 2-9503049-07
- J.Bai,,BB.Sabir,S.Wild and J.M.Kinuthia.** Strength development in concrete incorporating PFA and metakaolin .*Magazine of Concrete Research – Vol 52– N°03 ,pp153-162- Juin 2000.*
- J.M.Torrenti .** Résistance du béton au jeune âge .*Bull .Liaison,P et ch.179,Mai – juin 1992,PP 31-41.*
- J.C. MASO.** La liaison pâte-granulats. **In :** *Le béton hydraulique.* Edited by J. BARON et R. SAUTEREY. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982. p. 247-
- J. Grandet.** Durabilité des bétons à hautes performances, réaction alcalis- granulats et carbonatation. Edition, ENPC1990.
- J.Baron , R. Sauterey .** Le béton hydraulique, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.1982.
- J.P. Ollivier, A.C.Giberguee et B.Hanna.** Activité pouzzolanique et action de remplissage d'un fumée de silice dans les matrices de béton de haute résistance, *Cement and Concret Reasearch* , 18,438. 1988.
- J.XIE .** Mechanical proprieties of three high strength concrete containing silica fume. *ACI Material Journal*, N°92, March –April 1995.
- J.C. Maso (1980)** La liaison entre les granulats et pâte de ciment hydratée. *7<sup>ème</sup> Congrès International de Chimie des Ciment*, Vol 1, Paris, France, pp. 3-14,1980
- J.Baron, et R. Sauterey .** Le béton hydraulique, *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris.1982.
- J.Letourneur, , et R. Michel .** Géologie du Génie Civil, Armand Colin, Paris. **1971**
- J.F.Young .** A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement paste containing organic admixtures. *Cement and Concrete Research*, 14, 439, 1984;
- K.Hermann.** Substances exerçant une action chimique sur le béton . *Bulletin du ciment* 63 (11), pp 3-11-1995.
- Khelafi et A.Mokhtari.** Etude experimentale sur les bétons performances aux fumées silice . liason avec l'armature . *Algerie EQUIPEMENT* ,N° 12 ,Mars 1994.
- K. Vivekanandam, I. Patnaikuni,** Transition zone in high performance concrete during hydration, *Cement and concrete composites*, 27 (1997) 817-823.
- K. Beck .** Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. *Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 02 Octobre 2006;*

- M.I.Khan , R.Siddique.** Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties *Resources, Conservation and Recycling*, **57**(2011) 30-5.
- Khalife.** Contribution à l'étude de la compatibilité ciment / super plastifiant. mémoire de maitrise, *département de génie civil, Université de Sherrbrooke, Québec*, p125.1991.
- K.E.Hassan, J.G.Cabrera, Head M.K.** The influence of aggregate characteristics on the properties of high performance, high strength concrete. In: Rangan B, Patnaik A, editors. *Proceedings of the International Conference*. Perth, Australia, pp. 441-55.1998.
- K.R .Lauer** , « Classification of concrete damage caused by chemical attack », *Materials and Structures* 23 pp 223-229 (1990).
- K.Hattori** . Expérience with Mighty superplasticizer in Japan, ACI SP-62, pp. 37-66.1979
- L. BONAVETTI V.** Studies on the carboaluminate formation in limestone filler- blended cements. *Cement and concrete research* 31(2001) 853-859.
- L.Azzouz ; M.Bouhicha ; S.Kenai ; M.Hadjoudja.** Recyclage des déchets de briques dans le béton de sable de dunes », *PROCEEDINGS du 1<sup>er</sup> colloque national de génie civil : matériaux de construction*, novembre 2000, université de Mostaganem).
- L. Boubakir.** Elaboration et étude d'un béton à haute performance . *thèse de magister . Ecole national polytechnique d'Alger* 1999.
- L.J. Struble** . The rheology of fresh cement paste. *International Symposium on advances in Cementations Material, Conference of American ceramic Society*, p7-29.1991
- L. ALEXANDRE et SEBILEAU J L.** Le laitier de haut fourneau. Édité par *le centre technique de promotion des laitiers* et, 1988, 340 p.
- L.JParrott and D.C.Killoh** «Carbonation in 36 years old, in-situ concrete ». *Cement and Concrete Research*, 19(4) : 649-656, 1989.
- L.J Parrott and D.C. Killoh** «Carbonation in a 36 years old, in-situ concrete ». *Cement and Concrete Research*, 19(4) : 649-656, 1989.
- L.J Parrott and D.C. Killoh** .Carbonation in 36 years old, in-situ concrete. *Cement and Concrete Research*, 19(4) : 649-656, 1989.
- M.Buil, J.P. Ollivier** . Conception des bétons : la structure poreuse. La durabilité des bétons, *collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques*. Sous la direction de Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, 1992.
- M.Bederina , Z. Makhloufi , et al** .Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions . *Construction and Building Materials*, **47**(2013) 146-58.
- M.Colleparidi , S. Monosi , A.Moricani** Tetracalcium aluminoferrite hydration in the presence of lime and gypsum. *cem, concr, Res*; 9, 431-437;1979.
- M.Ghrici , S.Kenai , M.Said-Mansour M.**Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 542-549.
- M.Ismail.** Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucleaires). *Thèse de doctorat, INSA Toulouse*, 2006.

- M. Maza, A. Nacéri and S. Zitouni** . Physico-mechanical properties of mortar made with binary natural fine aggregates (dune sand and crushed sand) with and without chemical admixture. *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BHRC)* vol. 17, NO. 5(2016) PAGES 663-682.
- M. Thiery**. Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurelles et hydriques. Thèse de doctorat, 2005; Publisher: *ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES (ENPC)*
- M. Thiery, G. Villain, P. Dangla, G. Platret** . Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials : Effects of the chemical kinetics” *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1047–1058;
- M.G. Alexander, Magee B.J.** Durability performance of concrete containing condensed silica fume . *Cement and Concrete Research* 29, pp. 917-922, 1999. Tasdemir (2007)
- M.G. Alexander Magee B.J.** Durability performance of concrete containing condensed silica fume . *Cement and Concrete Research* 29, pp. 917-922, 1999. Tasdemir (2007)
- M. Singh, M. Garg**. Calcium sulfate hemihydrate low heat sulfate resistant cement. *Construction and Building Materials*. 16 (2002) pp. 181-186.
- M. Touguuy, L. Nouari** . Les fillers calcaire utilisé comme constituant secondaire dans la production du ciment composé. *Revue marocaine du génie civil* ; pp,35-39. N°67 ; Fevier 1997.
- M. N. OUDJIT, M. OULD AHMED, A. BELLAL & K. ARROUDJ**. Comportement rhéologique et mécanique des mortiers à base d’ajouts cimentaires. 8<sup>ème</sup> séminaire technique de Lafarge 13 - 14 Décembre 2011 - Mercure, Alger
- M. Malhotra, R. Ramachandran, R. Feldman, et P.C. Aïtcin**. Condensed Silica Fume in Concrète, *CRC Press*, Boca Raton, FL, USA, ISBN 0-8493-5657-1 ,221.1987
- M. Auperin, F. Richard et al** . Retrait et fluage des bétons à hautes performances . I.T.B.T.P. N° 474, Mai 1989.
- M. Collepardi** . Acrylic based superplasticizer . 4<sup>th</sup> international conference CANMET/ACI-Monterial, supplementary papers, pp.1-18.1994.
- M. Daimon**, Mécanisme et cinétique de l’hydratation du ciment au laitier. *Proceedings of the 7<sup>ème</sup> International Conference on the Chemistry of Cement*, Paris, 1980
- M. H. Shehata, M.D. A. Thomas**. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 pp. 1063-1072-2000.
- M. Safiuddin, SN. Raman, MFN. Zain** . Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(2007) 202-8.
- M. Venuat**. Adjuvants et traitements techniques modernes d’amélioration des ouvrages en béton, ed. ED. L’auteur, Chatillon-sous-bagneux.306, 1984.
- M. Haque, S. Ray, HMA. Mahzuz**. Use of Stone Powder with Sand in Concrete and Mortar: A Waste Utilization Approach. *ARP Journal of Science and Technology*, 2(2012) 613-18.
- M. Thiery** . Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires prise en compte des effets cinétiques et des modifications micro structurelles et hydriques. *Thèse de doctorat*, 2005.
- N. KAID** «Contribution à l’étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques». Thèse de magistère génie civil à l’USTMB d’Oran, 2000.
- NF EN – (196- 3) EN 196-3, Méthodes d’essais des ciments — Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité. 2002.
- NF EN (197- 1) EN 197 – 1, Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 2002.

- NF EN 12350-2 EN 12350-2, Essai pour béton frais - Partie 2: Essais d'affaissement, 2009.
- NF EN 12390 - 4 EN 12390-5, Essai pour béton durci - Partie 5: Résistance à la flexion sur éprouvettes. 2009
- N.KAID** .Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques.*Thèse de magistère génie civil à l'USTMB d'Oran*, 2000.
- Nour El Houda Khalifa, Marwen Bouasker, et al.** Approche physico-chimique et mécanique de la fissuration endogène de liants binaires et ternaires au jeune âge .*XXIX e Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Tlemcen ALGERIE, 29 au 31 Mai 2011
- N.E.H. Khalifa 1, M. Bouasker 2, P. Mounanga3 et N. Ben Kahla1.**Study of the mechanical behavior of slag-limestone filler cement blended binders. *Web of Conferences2*, 01009 (2012)
- N.Tebbal, Z.Rahmouni., M.Belouadah.** Valorisation du filler de marbre dans la formulation d'un béton à haute performance. *Colloque NoMaD* - 19 et 20 novembre 2012. Toulouse.
- N.P. Mailvaganam.** Factors influencing slump loss in concrete. American Concrete Institute, SP-62,p 389-403.1979.
- N. Petrov , M. Thibault, A. Tagnit-Hamou .** Attaques externes et internes par les sulfates; Similarités et différences. *1<sup>er</sup> Congrès International sur la technologie et la durabilité du béton*, U.S.T.H.B, Alger 24-25 et 26 Mai 2004.
- O.J., Uzomaka .** Some factors with effet the cruching strenght of sandcrète blocks. *Matériaux et Construction*, January 1977, Volume 10, Issue 1, pp 45-48.1977.
- P.C. Hewelt ,R.Rixom.** Superplasticized concrete. *ACI Journal*, 74(5), mai, pp. 6.1977
- P.K.Mehta .** Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review. *Materials Science of Concrete III. The American Ceramic Society*, 1993 pp. 105-130.
- P.K.Mehta .**Studies on blonded Portland cements containing Santorin earth. *Cement and concrete research*; N°11; pp: 507-518; 1981.
- Philippe Turery.** Retrait et fissuration des BAP influence de la formulation. *Thèse de doctorat 2004*.
- Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement*. Janvier 2002, Algérie.
- PARK, NOH.** Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and concrete research*, 2005, vol 35, pp 842-849.
- P.K. Metha,** Concrete, structures, properties, and materials, Englewood cliff, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- P. C. Aïtcin.** Condensed, Silica fume, *Editions de l'Université de Sherbrooke*, Québec.Canada,ISBN 2-7622-0016-4,1983,52p. 1983.
- P.C. Aïtcin, P.K. Mehta.** Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete .*ACI Material Journal*, 87(2), mars-avril, pp. 103-107.1990.
- P.C. Aïtcin.** L'emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances, les bétons à hautes performances . chapitre 3, *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées*, paris, 2eme édition, pp45-64.1992.
- P.C. Aïtcin**« Bétons haute performance », Edition Eyrolles.2001.
- P. Acker, M.Mamillan, B. Miao.** Drying and shrinkage of concrete: the case of massive parts, Suprenant, B.A. (Ed.), Serviceability and Durability of Construction Materials. *ASCE*, New York, pp. 1072-1081. 1990

- P. Muñoz**, Rhéologie des bétons durcis : Approche couplée de la modélisation des retraits et fluages de bétons à hautes et très hautes performances, *Thèse de doctorat INSA*, Toulouse, France.2000
- P.C. Kreijger**. Plasticizers and Dispersing Admixtures, *Concrete International 1980. The Construction Press*, London 1980, pp. 1-16.
- Paillore et al** ,1990. Influence du dosage et du mode d'introduction des super plastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumée silice. *Bulletin. Liaison.P*.et ch.170.990.
- P.KUMAR MEHTA**,High – performance, high volume fly ash concrete for sustainable development, *University of California*, Berkeley, USA.
- R. Gagné, P-C. Aïtcin and P. Lamoth** « Chloride-ion permeability of different concretes », In : *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on durability of building materials and components*, Omiya, Japan, E & FN Spon, London, ISBN 0-419-18690-5, 1993, p. 1171-1180.
- R.S.Golop , H.F.W. Taylor** .Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement: reaction with sodium and magnesium sulfate solutions». *Cem. Concr. Res.*, vol.25, 8, 1995, p.1581-1590
- R. LANCHON** , tome I "Cours de laboratoire / Granulats, Béton, sols " CIMbéton, Centre d'information sur le ciment et ses application, *Fiche technique*
- R. Patel , K.M.A. Hossain , et al** . Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self- Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, 101(4), pp. 294-302.2004
- Roger Dron** . Structure des laitiers et hydratation des ciments de laitier - ciment de laitier granule sans clinker. *7<sup>me</sup> congrès international de la chimie*, Vol 2. 1981.
- R.Derabla** . Propriétés physico – mécaniques des mortiers et des ciments élaborés à base de laitier granulé d'El Hadjar . MEMOIRE de MAGISTER, 2002
- RN.Swamy et A.Bouikni**. Some engineering proprieties of slag concretes as influenced by mix proportioning and curing . *ACI,Material journal*:pp:210-220.May-June 1990
- R. Chaid1 R. Jauberthie , M. T. Abadlia, A. BALI** . Étude expérimentale de la durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux . *Sciences & Technologie B – N°27*, Juin (2008), 57-62.
- R. DUPAIN, R. LANCHON, J .C SAINT-ARROMAN** «Granulats, Sols, Ciments et Bétons» 2<sup>eme</sup> édition, Casteilla, 2000.
- R. LANCHON**. Tome I. Cours de laboratoire / Granulats, Béton, sols ,1993
- SA. Abo-El-Enein, HA .El-Sayed, et al**. Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume. *HBRC Journal*, 10 (2014) 43-8.
- S. Diamond** .The microstructure of cement paste in concrete. In: *Proceedings of the 8th International Congress on the chemistry of cement*, Rio de Janeiro, Brasil, 1986, sous-thème 2.2: Microstructure of hardened cement paste and its effect on behaviour. Finep, Rio de Janeiro, 1986, vol.1, pp122-147.
- S.Hanechera and al**. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydratation, absorption behaviour of admixture and paste rheology. *Cement and Concrete Research*, 1999.29; p.1159-1165.

- S.Kamali , B.Gérard , M.Moranville** . Modelling the leaching kinetics of cement-based materials – influence of materials and environment. *Cement and Concrete Composites* 25, 451-458, 2003.
- Samuel Olufemi** . Effect of cement additions on the plastic density and workability of concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248-9622 Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp.674-679
- S.Hui-sheng , X.Bi-wan , Z.Xiao-chen** . Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp 1980–1985.
- S. Mezazigh , J. Behmanesh** . Effet de la fumée de silice sur le comportement mécanique et géotechnique d'un sédiment stabilisé à base de ciment et additifs. *Revue francophone d'écologie industrielle* - N° 53 - 1er trimestre 2009
- S. D Wang, K. L. Scrivener, P. L. Pratt**. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research* 24 (6) pp. 1033-1043 (1994)
- S.Tsivilis. J.Tsantilas, G.Kakali, E.Chaniotakis and A.Sakellariou**. The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research* – Vol 33 , N°9 , pp 1465-1471-Sep 2003.
- S.P. Jiang et al**. Evolution comparée des porosités des mortiers du ciment au laitier et des mortiers du ciment Portland . *Cement and concret research* , vol.19,pp.487-496,1989
- S. Bjanja and B.Sengupta** .Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, University Kolkata – India,Vol 35, pp743-747-2005.
- S. A. Hartshorn, J.H. Sharp, R.N. Swamy** .the thaumasite form of sulphate attack in Portland limestone mortars stored in magnesium sulphate solution. *Cement and Concrete Research*- Vol 24, PP 351-359 - 2002.
- S. T. Lee ,H. Y. Moun, R. N. Swamy** . Sulphate attack and role of silica fume in resisting strength loss. *Cement & Concrete Composites*- Vol 27, pp 65-76-2005.
- S. Assié**. Durabilité des bétons autoplaçants. *Thèse de doctorat INSA*, Toulouse, 2004.
- S.Freedman. High Strength concrete**. ISI 76. OIT , *Association du ciment Portland* .Skokie .IL,19 p.1971.
- S. Diamond**.The microstructure of cement paste in concrete. *proceeding of the 8th international congress on the chemistry of cement*, Rio de Janeiro, Brasil, 1 (1986) 122-147.
- S. Seki, M. Morimoto et al** . Recherche expérimentales sur l'amélioration du béton par l'incorporation de sous-produits industriels. *I.T.B.T.P.N°436* Juillet – aout 1985.
- SHI and AL.**, A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1998, vol 20, pp 9-14.
- S.P. SHAH, S.H. AHMAD** . High performance concretes and applications Edward Arnold, *ISBN 0-340-58922-1*, 1994.
- S. Guettala., B.Mezghiche , R.Chebili**, Interest and effectiveness of the addition of the sand of the finely crushed to cement , on the proprieties of the concrete . Sun Light Publishing Canada, *World journal of Engineering* 4(1)45-53, 2007.
- S. Ushikawa et al. (1997)** “The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particules in fresh paste prepared with organic admixture”. *Cement and Concrete Research*, vol.27, n°1, pp: 37-50, Japan; 1979

- S.Tsivilis, J.Tsantilas, G.Kakali, E.Chaniotakis, A.Sakellariou** . The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research* – Vol 33 , N°9 , pp1465- 1471-Sep 2003.
- SPS Rajput, MS. Chauhan. Suitability of Crushed Stone Dust as Fine Aggregate in Mortars, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(2014) 87-9.
- T.Akçaoglu, M. Tokyay, et T. Çelik** . Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 633-638. (2004)
- T.Celik, K.Marar** , «Effects of crushed stone dust on some properties of concrete», *Cement and Concrete Research*, 26(1996) 1121-30.
- T. Boubekour, Mohamed Salhi** .Effet du laitier sur la durabilité des ciments à base de calcaire. 1<sup>er</sup> séminaire national de génie civil, Souk-Ahras les 22 et 23 octobre 2012
- T. Boubekour, Bensaid Boulekbache, Ali Makhelouf** . Influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire. "SICZS\_2010" *Symposium International sur la Construction en Zone Sismique* Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010.
- T.Nawa, Eguchi H., Okkubo M.** Effect of fineness of cement on the fluidity of cement paste and mortar. *Transaction of JSCE*, 13, août, pp. 199-213.
- T.S. Nguyen** . Influence de la nature de liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires», *Thèse de doctorat génie civil, INSA, Toulouse, France, 2006.*
- T.Nawa, Eguchi H., Okkubo M.** Effect of fineness of cement on the fluidity of cement paste and mortar. *Transaction of JSCE*, 13, août, pp. 199-213.1991.
- T. Larrard**, (2010), Variabilité des propriétés du béton: caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation, Thèse de doctorat, ENS Cachan ; 2010.
- V. Baroghel-Bouny, T.Chaussadent, et al** . Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons -Méthodes de mesures et d'essais de laboratoire. Méthodes d'essai n°58. Dans : *Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, L.C.P.C Paris, Février 2002,87p;*
- V.Baroghel-Bouny et al.** Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcaliréaction, Etat de l'art et Guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité , *Association Française de Génie Civil, (2004).*
- V. C. Ernesto, V. M. Eduardo Jesus et al** . Kinetics of the water absorption in slag cements mortars ». *Condmat / 0210138, V2 23 Jul. 2003.*
- V. M. Malhotra, P. K. Metha.** Pozzolanic and cementious materials. *Advances in concrete technology*. Ed. V. M. Malhotra, CANMET. Gordon and Breach publishers, Ottawa, Ont. p. 191.
- V.Baroghel-Bouny, T. Chaussadent, G.Croquette, L.Divet et al.** Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons -Méthodes de mesures et d'essais de laboratoire . Méthodes d'essai n°58. Dans : *Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, L.C.P.C Paris, 87p. Février 2002,*
- V.H. Nguyen Nedjar B., Colina H., Torrenti J.M.**A separation of scales analysis for the modelling of calcium leaching in concrete. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195, 7196-7210, 2006.
- V.S.Ramachandran** . Use of superplasticizers in concrete. *II Cemento, Vol3,p273- 298.1987*

- V.M. Malhotra** . Superplasticizers: their effect on fresh and hardened concrete .Ottawa, *CANMET*,95 p, Report 79-31.1979
- VS.Ramachandran** . Influence of Superplasticizers on the hydration of cement ‘’, 3<sup>rd</sup> International Congress on polymers in Concrete, Koriyama, p1071-1081; 1981.
- V.S .Ramachandran et R.F. Feldman**. Effet du lignosulfonate de calcium sur l’aluminatetricalcique et ces produits d’hydratation. *Matériaux et Construction*, 1972.5 (26):p.67-76
- W.W.J. Chan, Wu C.M.L.** Durability of concrete with high cement replacement . In: *Cement and Concrete Research* 30 (2000) pp: 865-879;
- W. Prince et al.** Interaction between ettringite and a polynaphtalene sulfonate superplasticizer in a cementious paste . In: *Cement and Concrete Research* 32 (2002) pp: 79-85.
- Y. Malier** . Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications. *Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 674p.1992.
- Y.Senhadji., G.Escadeillas, H. Khelafi, M .Mouli., A.S. Benosman** ,*European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 16 (1) (2012) 77-96.
- ZHU et GIBBS**. Use of different limestone and chalk powders in self-Compacting concrete, *Cement and concrete research*, 2005, vol 35, pp1457-1462.
- Z. Rahmouni. M.Belouadah, N.Tebbal** . Influence des additions minérales sur les propriétés à l’état durci des bétons ordinaires à base de matériaux locaux. *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie*, 6 au 8 juin 2012.
- Z. BENGHAZI**. site internet [www.univ-guelma.dz/files/offres de formations/Conception...](http://www.univ-guelma.dz/files/offres%20de%20formations/Conception...)
- Z. Bazant**. Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, 2(1), 1-16;1972.