

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR



**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

**Spécialité :**

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX

**Option :**

Physico-chimie des matériaux minéraux

**THEME**

**Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable  
(Approche expérimentale)**

Présenté par : ZEROUB Hamid

**Soutenu publiquement le 15 /02/2012 devant le jury composé de :**

-Abderrahim BALI	Pr	ENP	<b>Président</b>
- Rabah CHAID	MCA	UMBB	<b>Rapporteur</b>
- Mohamed Nadjib OUDJIT	MCA	USTHB	<b>Examineur</b>
- Djamilia SAFI	MCB	UMBB	<b>Examinatrice</b>

**Boumerdes 2012**

## ملخص:

في الوقت الراهن، تعد إعادة استعمال الزجاج في صناعة الزجاج نفسه أمرا ليس مجديا اقتصاديا في أغلب دول العالم، ومصير بقايا الزجاج يكون إما التخزين أو الدفن وكلاهما يضر بالاقتصاد والمحيط. لذا جرى البحث عن سبل جديدة لإعادة استعمال الزجاج. نظرا لتركيبته الغنية بأكسيد السيليسيوم المتفاعل، فإن استعمال الزجاج كإضافة اسمنتية في الخرسانة يعتبر بديلا لانتقا.

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

النتائج أظهرت أن إضافة الزجاج المسحوق يزيد من سيولة الخرسانة مع كمية أقل من اللدائن و يجعل التركيبة الإسمنتية أكبر كثافة مما يمنع نفوذ المواد المعادية.

**كلمات مفتاحية:** زجاج، إضافات، خ م س، استدامة.

## **Résumé :**

*Le recyclage du verre pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable. Ceci explique la recherche d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges.*

*Vu sa composition riche en silice réactive, la valorisation de verre dans le béton semble être une bonne alternative pour son recyclage.*

*Notre travail consiste à formuler un BHP avec ajout de 30% de poudre de verre comme substituant au même poids de ciment. L'étude de béton formuler s'étale de l'état frais à l'état durcis tout en réservant une partie pour l'étude de la durabilité dans les milieux agressifs.*

*Les résultats montrent que l'ajout de la poudre du verre améliore l'écoulement e béton tout en gardant la même quantité de superplastifiant, aussi elle il consolide d'avantage la matrice cimentaire ce qui rend difficile la pénétration des composés agressif dans le béton.*

**Mots clés :** verre, ajout, BHP, durabilité.

## **Abstract:**

*Glass recycling for the production of new glasses is not currently economically viable. This explains the search for outlets other than the storage or burial in landfills.*

*Given its composition rich in reactive silica, recovery of glass in concrete seems to be a good alternative for recycling.*

*Our work consists of formulating a HPC with adding 30% by weight of glass powder as a substitution to cement. The assessment of concrete formulation ranges from fresh to hardened state respectively. The study of durability in aggressive environments has been examined as well.*

*The results show that the addition of glass powder improves concrete flow while keeping the same amount of superplasticizer and the cement matrix is more consolidated, which helps avoiding the penetration of aggressive compounds into the concrete.*

**Keywords:** glass, addition, HPC, durability.

# Remerciements

*Je tiens à remercier...*

- ☀ *Mon promoteur **Mr. CHAID Rabah** (enseignant chercheur à UMBB) pour m'avoir donné la chance de réaliser ce mémoire, pour la confiance qu'il a manifesté à mon égard et pour m'avoir soutenu et toujours encouragé. Je lui exprime en toute sincérité ma gratitude pour sa disponibilité, sa confiance, sa gentillesse et surtout sa patience.*
- ☀ ***Mr. A. BALI**, professeur de l'ENP, **Mr. MN.OUDJIT**, maître de Conférences à l'USTHB et **M<sup>me</sup>. Dj. SAFI**, maître de Conférences à UMBB pour avoir accepté d'examiner ce travail.*
- ☀ *Sincèrement le PDG de CETIM **Mr. ADJTOUTAH Abdenour** pour m'avoir accueilli au sein de son établissement.*
- ☀ ***Mr. Daoudi** directeur du laboratoire, **Mr. BELLAL Ahmed** chef de département liant, granulats et béton, ainsi que tout le staff technique de CETIM.*
- ☀ *Madame **IDIR Rachida**, de l'INSA de Toulouse pour ses conseils et recommandations.*
- ☀ ***Mr. Abdelkarim BENGOUGAME**, professeur à l'université de Sherbrooke pour les fournitures des articles sur le même travail.*
- ☀ ***Mr. TALAH Aissa** qui a m'a accueilli chaleureusement dans son laboratoire à l'USTHB.*
- ☀ ***Mr. TIKLET Djamel** qui a fourni les matériaux nécessaires pour la réalisation du travail.*
- ☀ *Infiniment, **Mr. BEZZAZI** qui a su m'encourager pour mieux donner.*

*Fortement mes parent, ma femme, mes frères et sœurs, mes amis et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

## SOMMAIRE

<i>Introduction générale</i> .....	1
<i>1. Introduction</i> .....	3
<i>2. Le ciment portland</i> .....	4
<i>3. Les granulats</i> .....	6
<i>3.1. Forme de Particule et Texture</i> .....	6
<i>3.2. La porosité</i> .....	6
<i>3.3. La nature minéralogique</i> .....	7
<i>3.4. La granularité</i> .....	7
<i>4.3. Mode d'action</i> .....	9
<i>4.3.1. Adsorption des superplastifiants sur les grains de ciment :</i> .....	9
<i>4.3.2. La répulsion stérique</i> .....	9
<i>5. Eau de gâchage</i> .....	10
<i>1. Introduction</i> .....	11
<i>2. Rôle de l'ajout cimentaire</i> .....	11
<i>2.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout</i> .....	11
<i>2.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire</i> .....	12
<i>3. Classification des ajouts minéraux</i> .....	12
<i>3.1. Principaux ajouts minéraux inertes</i> .....	12
<i>3.1.1. Fillers calcaires</i> .....	13
<i>3.2. Les ajouts minéraux actifs</i> .....	13
<i>3.2.1. La pouzzolane</i> .....	13
<i>3.2.1.1. Pouzzolane naturelle</i> .....	14
<i>3.2.1.2. Pouzzolane artificielle</i> .....	14
<i>3.2.2. La fumée de silice</i> .....	14
<i>3.2.3. Le laitier de haut fourneau</i> .....	16
<i>3.2.4. Les cendres volantes</i> .....	17
<i>1.2.5. La poussière :</i> .....	19
<i>3.2.6. Le verre</i> .....	20

3.2.6.1.	<i>Définition du verre</i> .....	20
3.2.6.2.	<i>Comportement du verre dans un milieu cimentaire</i> .....	23
3.2.6.3.	<i>Réaction pouzzolanique du verre</i> .....	23
3.2.6.4.	<i>Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes :</i> .....	24
3.2.6.5.	<i>L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane :</i> .....	25
3.2.6.6.	<i>Réaction alcali-silice du verre</i> .....	25
1.	<i>Caractéristiques physiques</i> .....	26
1.1.	<i>L'ouvrabilité</i> .....	26
1.2.	<i>Porosité et porométrie</i> .....	26
1.3.	<i>La perméabilité</i> .....	27
1.3.1.	<i>La perméabilité aux gaz</i> .....	27
1.3.2.	<i>La Perméabilité à l'eau :</i> .....	29
2.	<i>Les caractéristiques mécaniques</i> .....	30
2.1.	<i>La résistance à la compression</i> .....	30
2.2.	<i>La résistance à la traction par flexion</i> .....	31
2.3.	<i>La résistance à la traction</i> .....	31
2.	<i>Caractéristiques élastiques :</i> .....	32
2.1.	<i>Le retrait :</i> .....	32
2.1.1.	<i>Le retrait endogene</i> .....	32
2.1.2.	<i>Contraction le chatelier ou retrait chimique</i> .....	33
2.1.3.	<i>Retrait plastique</i> .....	33
2.1.4.	<i>Retrait thermique</i> .....	34
2.1.5.	<i>L'autodissiccation</i> .....	34
2.1.6.	<i>Retrait de séchage</i> .....	34
1.	<i>Microstructure des BHP</i> .....	37
1.1.	<i>Introduction</i> .....	37
1.2.	<i>Hydratation du ciment</i> .....	37
1.2.1.	<i>Silicate de calcium hydraté</i> .....	37
1.2.2.	<i>la portlandite</i> .....	38
1.2.3.	<i>Le trisulfoaluminate et le monosulfoaluminate (AFt et AFm)</i> .....	38

1.3.	<i>Particularité de l'hydratation des bétons</i> .....	38
1.4.	<i>Structure et morphologie des gels de C-S-H</i> .....	38
1.5.	<i>L'eau dans la pâte de ciment</i> .....	40
1.5.1.	<i>L'eau adsorbée</i> .....	41
1.5.2.	<i>L'eau chimiquement liée :</i> .....	41
1.5.3.	<i>L'eau dans les C-S-H</i> .....	41
1.6.	<i>Porosité de la pâte de ciment :</i> .....	42
1.7.	<i>Influence de l'auréole de transition :</i> .....	44
2.	<i>Durabilité des BHP :</i> .....	45
2.1.	<i>Durabilité des bétons dans les eaux naturelles</i> .....	46
2.2.	<i>durabilité des bétons dans les eaux sulfatique</i> .....	46
2.2.1.	<i>les sources externes</i> .....	46
2.2.2.	<i>Les sources internes</i> .....	47
2.2.3.	<i>Les mécanismes de dégradation par les sulfates</i> .....	47
2.2.4.	<i>L'action chimique des sulfates</i> .....	47
2.3.	<i>Durabilité dans les eaux marines</i> .....	49
2.3.1.	<i>Composants agressifs du milieu marin</i> .....	49
2.3.2.	<i>Mécanismes d'attaque par les composants agressifs de l'eau de mer</i> .....	50
1.	<i>Facteur influençant la durabilité des BHP:</i> .....	52
1.1.	<i>Facteurs internes</i> .....	52
1.1.1.	<i>Porosité du béton :</i> .....	52
1.1.2.	<i>Fissuration</i> .....	52
1.2.	<i>Facteur externes</i> .....	53
1.	<i>Caractérisation des matériaux utilisés :</i> .....	54
1.1.	<i>Le ciment</i> .....	54
1.2.	<i>Les granulats</i> .....	55
a.	<i>Le sable</i> .....	55
b.	<i>Le gravier</i> .....	56
1.3.	<i>L'eau de gâchage</i> .....	57
1.4.	<i>Le superplastifiant</i> .....	57

1.5.	<i>La poudre du verre</i> .....	58
2.	<i>Méthodes et expériences</i> .....	60
2.1.	<i>Formulation des bétons</i> .....	60
2.1.1.	<i>Optimisation de la pâte cimentaire par les méthodes des coulis</i> .....	60
2.1.2.	<i>Principe de la méthode</i> .....	61
2.1.3.	<i>Optimisation du dosage en poudre du verre</i> .....	62
2.1.4.	<i>Optimisation de squelette granulaire par la méthode DREUX-GORISS:</i> .....	63
2.1.5.	<i>Optimisation de dosage en adjuvant par la méthode des coulis</i> .....	64
3.	<i>Comportement de béton à l'état frais</i> .....	68
3.1.	<i>La masse volumique</i> .....	68
3.2.	<i>La maniabilité</i> .....	68
3.3.	<i>L'air occlus</i> .....	68
4.	<i>Comportement de béton à l'état durcis</i> .....	69
4.1.	<i>Résistance à la traction par fendage</i> .....	69
4.2.	<i>Résistances à la traction par flexion</i> .....	70
4.2.1.	<i>Dans l'eau de robinet</i> .....	70
4.2.2.	<i>Dans l'eau séléniteuse</i> .....	71
4.2.3.	<i>Dans l'eau de mer</i> .....	72
4.2.4.	<i>Discussion et interprétation</i> .....	73
4.3.	<i>Le retrait</i> .....	74
5.	<i>Etude de la durabilité des bétons à base de la poudre de verre</i> .....	75
5.1.	<i>Pénétration des ions chlore</i> .....	75
1.1.	<i>La perméabilité aux gaz</i> .....	77
2.	<i>Analyse microstructurale</i> .....	80
2.1.	<i>Formations superficielles :</i> .....	80
2.1.1.	<i>dans l'eau de robinet :</i> .....	80
6.1.2.	<i>Dans l'eau séléniteuse :</i> .....	81
6.1.3.	<i>Dans l'eau de mer :</i> .....	81
6.2.	<i>Microstructure interne</i> .....	82
7.	<i>L'analyse par diffraction des rayons X:</i> .....	83

<i>7.1. Dans l'eau de mer</i> .....	84
<i>7.2. Dans l'eau de robinet</i> .....	85
<i>7.3. Dans l'eau séléniteuse</i> .....	86
<i>8. conclusion</i> .....	87
<i>Conclusion générale</i> .....	88
<i>Perspectives</i> .....	90

<b>Liste des tableaux</b>	<b>page</b>
<i>Tableau II-1. Réactions d'hydratation des composés du ciment portland</i>	5
<i>Tableau .III- 2.composition chimiques de la fumée de silice.</i>	15
<i>Tableau III-3. Composition typique de laitier de haut fourneau</i>	17
<i>Tableau III-4. Composition chimique type de certaines cendres volantes</i>	19
<i>Tableau V-1.Composition minéralogique du ciment.</i>	54
<i>Tableau V-2.Composition chimique et caractéristique physico-mécanique du ciment.</i>	55
<i>Tableau V-3.Caractéristique physiques des sables utilisés.</i>	56
<i>Tableau V-4.Caractéristiques des graviers</i>	57
<i>Tableau V-5.Composition chimique de la poudre de verre.</i>	58
<i>Tableau V-6.Caractéristique physique de la poudre de verre.</i>	59
<i>Tableau V-7. Résistance à la compression des éprouvettes de mortier</i>	64
<i>Tableau V-8.Composition de 1,5 l de coulis.</i>	66
<i>Tableau V-9.Composition des coulis pour V=1,5 l.</i>	66
<i>Tableau V-10.Temps d'écoulement des coulis à travers le cône de Marsh.</i>	67
<i>Tableau V-11. Compositions des bétons optimisées.</i>	69
<i>Tableau V-12. Résultats de perméabilité aux ions chlore.</i>	77
<i>Tableau V-13. Pénétration des ions chlore basée sur la charge passante.</i>	79
<i>Tableau V-14.Coefficient de perméabilité aux gaz des bétons testés</i>	81

## **Liste des figures**

	<b>page</b>
<b>Figure I-1.</b> Illustration schématique de la structure moléculaire des polycarboxylates	8
<b>Figure I-2.</b> Représentation schématique d'un lignosulfonates	8
<b>Figure I-3.</b> Représentation schématique des mécanismes d'action des superplastifiants a) répulsion électrostatique d'un polymère chargé; b) répulsion stérique d'un polymère adsorbé.	9
<b>Figure II-1.</b> (a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire (b) – Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire.	11
<b>Figure II-1.</b> a) Structure en anneau de la Cristobalite; b) Modèle proposé par Zachariassen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions	20
<b>Figure II-2.</b> L'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de $\text{Na}_2\text{O}$ et $\text{CaO}$ brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodocalcique	21
<b>Figure II-3.</b> Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur $\text{Na}_2\text{O}$	22
<b>Figure II-4.</b> Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes	24
<b>Figure III-1.</b> Influence du type de liant sur la perméabilité à résistance mécanique donnée	28
<b>Figure III-2.</b> Evolution de la perméabilité à l'eau en fonction de l'âge pour des mortiers contenant des cendres volantes à différents E/L.	29
<b>Figure III-4.</b> Distribution de la teneur en eau dans l'éprouvette à différentes échéances	35
<b>Figure III-5.</b> Autocontraintes de structure dues au retrait de séchage	36
<b>Figure IV-1.</b> Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H	39
<b>Figure IV-2.</b> Modèle de Munich 1976 de gonflement du gel C-S-H en trois différents états d'humidité	40
<b>Figure IV-3.</b> État de l'eau dans le gel de C-S-H	42
<b>Figure IV-4.</b> Influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de pâtes de ciment Portland âgées de 28 jours	43

<b>Figure IV-5.</b> <i>Influence de la durée de l'hydratation sur l'évolution porosimétrique d'une pâte de ciment Portland de rapport E/C = 0,7</i>	44
<b>Figure IV-6.</b> <i>Structure poreuse d'une pâte de ciment de type CEM I et de la pâte d'un mortier confectionné avec le même ciment (E/C = 0,4, 3 mois)</i>	45
<b>Figure V-1.</b> <i>Analyse granulométrique par voie sèche NF EN932-2.</i>	57
<b>Figure V-2.</b> <i>Analyse granulométrique de la poudre de verre</i>	59
<b>Figure V-3.</b> <i>Radiogramme DRX de la poudre du verre.</i>	59
<b>Figure V-4.</b> <i>a).Volume de HCl consommé au titrage de la solution de chaux .b).Activité pouzzolanique de la poudre de verre.</i>	60
<b>Figure V-5.</b> <i>Evolution des résistances à la compression des mortiers avec différents dosages en poudre de verre.</i>	63
<b>Figure V-6.</b> <i>Optimisation de dosage pondéral des granulats par la méthode DREUX-GORISS</i>	64
<b>Figure V-5.</b> <i>Ecoulement des coulis en fonction du dosage en superplastifiant.</i>	66
<b>Figure V-6.</b> <i>Evolution de la masse volumique</i>	68
<b>Figure V-7.</b> <i>Evolution de la teneur en air occlus.</i>	69
<b>Figure V-8.</b> <i>Résistance à la traction par fendage.</i>	70
<b>Figure V-9.</b> <i>Résistance à la traction par flexion des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet.</i>	71
<b>Figure V-10.</b> <i>Résistance à la compression des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet</i>	72
<b>Figure V-10.</b> <i>Résistance à la compression des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet</i>	72
<b>Figure V-11.</b> <i>Résistance à la traction par flexion dans l'eau séléniteuse.</i>	73
<b>Figure V-12.</b> <i>Resistance à la compression dans l'eau seleniteuse.</i>	73
<b>Figure V-13.</b> <i>Évolution des résistances à la traction par flexion dans l'eau de mer.</i>	74
<b>Figure V-14.</b> <i>Évolution des résistances à la compression dans l'eau de mer.</i>	74
<b>Figure V-17.</b> <i>Retrait totale des bétons testés.</i>	75
<b>Figure V- 19.</b> <i>Evolution de l'intensité du courant (mA) à travers les bétons conservés 90 j dans les différents milieux en fonction du temps.</i>	77

<b>Figure V-20.</b> <i>Variation de la charge du courant dans différents milieux de conservation des différents types de béton.</i>	77
<b>Figure V-21.</b> <i>Schéma d'une cellule du perméamètre.</i>	79
<b>Figure V-22.</b> <i>Evolution de la perméabilité mesurée <math>k_a</math> en fonction de la pression moyenne avec détermination de la perméabilité intrinsèque <math>K_i</math></i>	80
<b>Figure V-23.</b> <i>Observation au MEB de la surface externe des échantillons. Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre (eau séléniteuse).</i>	81
<b>Figure V-24.</b> <i>Observation au MEB de la surface externe des échantillons. a) Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre (eau de robinet).</i>	82
<b>Figure V-25.</b> <i>Observation au MEB de la surface externe des échantillons. Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre (eau de mer).</i>	83
<b>Figure V-26.</b> <i>Observation au MEB de la microstructure interne des échantillons. a) Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre.</i>	84
<b>Figure V-27.</b> <i>Diffractogramme de la pâte du ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation (eau de mer)</i>	85
<b>Figure V-28.</b> <i>Diffractogramme de la pâte du ciment avec poudre de verre après 90 jours de conservation (eau de mer)</i>	86
<b>Figure V-29.</b> <i>Diffractogramme de la pâte du ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation (eau de robinet)</i>	86
<b>Figure V-31.</b> <i>Diffractogramme de la pâte du ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation (eau séléniteuse)</i>	87
<b>Figure V-32.</b> <i>Diffractogramme de la pâte du ciment avec poudre de verre après 90 jours de conservation (eau séléniteuse)</i>	87



# Introduction générale

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont apparus il y a environ une trentaine d'années. De résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa, ils présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue grâce à l'utilisation de superplastifiants réducteurs d'eau et des produits ultrafins amorphes ou cristallisés jouant à la fois un rôle de complément granulaire et pouzzolanique.

Les sous-produits de l'industrie tel que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes trouvent une large utilisation comme ajouts cimentaires dans les bétons. Leur utilisation permet d'améliorer pour le mieux les caractéristiques des bétons jusqu'à leur fournir les qualités d'un béton de haute performances. A cet effet, en utilisant ces ultrafine comme ajouts cimentaires, le béton à hautes performance ouvre le champ à une nouvelle vision de voir le recyclage des déchets industriel.

Retenus essentiellement pour leur pouvoir pouzzolanique du à leur teneur en agents réactif tel que la silice ou l'alumine, les ajouts cimentaires ont la faculté de donner un plus pour la résistance du béton via la consommation de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) créant ainsi de nouveau C-S-H, produit essentiel de l'hydratation du ciment et élément responsable de la résistance du béton à jeune et à long terme.

Comme il est obtenu essentiellement de la fusion du sable à 99,99% de silice, le verre se place comme un matériau digne de terme « pouzzolanique ».

Le verre a été un matériau indispensable à l'homme pour plusieurs propriétés comme la possibilité à prendre des différentes formes facilement, la clarté de la surface, la résistance à l'abrasion, sécurité et durabilité.

Comme la demande et l'utilisation du verre s'accroît, les déchets de verre aussi. Les nations unies estiment un volume annuel de 200 million tonnes de déchet solides dont 7% c'est du verre. Par ailleurs, contrairement à l'autre déchet, le verre est impérissable et donc préjudiciable pour l'environnement.

Plusieurs alternatives de réutilisation de verre existent. D'après certaines études existantes, toutes ces débouchés, qui nécessitent un pré-conditionnement (y compris un broyage), ont un développement limité et ne parviennent pas à absorber les quantités de verre récupérées. Afin d'apporter une solution durable à la problématique de verre entreposé, une autre piste potentielle et encourageante consiste à le valoriser dans les bétons.

Notre étude est consacrée à formuler un béton de haute performance en additionnant 30% de la poudre de verre finement broyée comme substitution de même poids de ciment.

Ce mémoire est reparti en 5 chapitres comme suit :

- Le premier chapitre renferme des généralités sur les BHP ainsi que les constituants adoptés pour leur formulations ;
- Le deuxième chapitre traite d'une explicitation des constituants des BHP qui est les ajouts cimentaires, plus profondément la poudre de verre qui est le sujet de notre travail.
- Le troisième chapitre a fait l'objet d'énumération des propriétés des BHP ;
- Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la microstructure des BHP et leur durabilité dans les milieux agressifs.
- Le cinquième chapitre résume les essais et les résultats des expériences réalisées durant notre étude.

# CHAPITRE 1

## LES CONSTITUANTS DES BHP

## 1. Introduction

Longtemps considéré comme un matériau incapable d'évoluer, le béton s'est néanmoins amélioré de manière spectaculaire ces dernières années comme le prouve l'arrivée des bétons à hautes performances. En effet, dans les années 80, on a trouvé le moyen d'augmenter les performances du béton en diminuant la quantité d'eau de gâchage (totalité de l'eau intervenant dans le mélange), en jouant sur la granulométrie et en ajoutant des adjuvants.

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont des bétons de consistances fermes à fluides qui développent des résistances mécaniques à court et long terme très élevées (entre 60 à 80 MPa à 28 jours).

La diminution de la porosité grâce à la diminution de rapport E/C par adjonction de superplastifiants qui déflocculent les grains de ciment et assurent aussi une maniabilité suffisante, ainsi que l'élargissement de leur spectre granulaire grâce à l'ajout d'éléments ultrafins qui confère à l'ensemble une forte compacité et une grande durabilité vis-à-vis des agents agressifs chimiques extérieurs [1].

L'emploi des BHP permet d'envisager la réalisation d'ouvrages ou d'éléments en béton de sections réduites ou de plus grandes portées et donc des gains en poids et en matières intéressants. Elle permet aussi d'envisager dans certains cas, le remplacement d'autres matériaux tels que le bitume, l'acier ou le bois par le béton et d'ouvrir de nouveaux marchés à ce dernier (constructions multiétagées en Amérique du Nord, viaducs sophistiqués en France, revêtements routiers aux États Unis) [2].

L'acceptation des BHP et leur utilisation s'accroît lentement mais sûrement, dans de nombreux pays. Il est aussi vrai que, à l'heure actuelle, les BHP ne représentent qu'une faible part de marché du béton.

Le béton à haute performance n'est pas un matériau révolutionnaire, car il contient exactement les mêmes constituants que les autres bétons. La technologie des bétons à hautes performances est plutôt un développement des bétons usuels [3].

## 2. Le ciment portland

Les ciments portland sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique avec l'eau appelée hydratation.

Le clinker est le principal constituant du ciment industriel il est obtenu par cuisson du cru (80% de calcaire et 20% d'argile) à environ 1450 °C, c'est le phénomène de clinkérisation (combinaison de la chaux venant du calcaire et de différents oxydes venant de l'argile). Il est essentiellement constitué de 4 minéraux :

- ✓ Silicate tricalcique  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  .....noté  $\text{C}_3\text{S}$  (alite) 50-70 %.
- ✓ Silicate bicalcique  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  .....noté  $\text{C}_2\text{S}$  (bélite) 15-30%.
- ✓ Aluminate tricalcique  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  .....noté  $\text{C}_3\text{A}$  (célite) 5-10%.
- ✓ Alumino-ferrite tétracalcique  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ..... noté  $\text{C}_4\text{AF}$  5-15%.
- ✓ Autre : sulfate, alcalis, filler calcaire, chaux libre, impuretés.

Pour éviter la prise éclaircie suite à l'hydratation des  $\text{C}_3\text{A}$ , une quantité de 5% de gypse est ajoutée et broyée avec le clinker.

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) [4].

Les résultats de l'hydratation du ciment sont énumérés dans le tableau suivant :

**Tableau 1.** Réactions d'hydratation des composés du ciment portland (notation comme oxydes)

2 (3CaO.SiO <sub>2</sub> ) Silicates tricalcique	+6H <sub>2</sub> O eau	=3CaO.3SiO <sub>2</sub> .8H <sub>2</sub> O Silicates de calcium hydrates	+3(CaO.H <sub>2</sub> O) Hydroxyde de calcium
2(2CaO.SiO <sub>2</sub> ) Silicates bicalciques	+4H <sub>2</sub> O eau	=3CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O Silicates de calcium hydrates	+CaO.H <sub>2</sub> O Hydroxyde de calcium
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminates tricalcique	+3(CaO.SO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O) gypse	+26H <sub>2</sub> O eau	=6CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SO <sub>3</sub> .32H <sub>2</sub> O ettringite
2(3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Aluminates tricalcique	+6CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SO <sub>3</sub> .32H <sub>2</sub> O ettringite	+4H <sub>2</sub> O eau	=3(4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SO <sub>3</sub> .13H <sub>2</sub> O) Monosulfoaluminate de calcium
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminates tricalciques	+CaO.H <sub>2</sub> O Hydroxyde de calcium	+12H <sub>2</sub> O eau	=4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .12H <sub>2</sub> O Aluminate tetracalcique hydraté
4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminoferrite tetracalcique	+10H <sub>2</sub> O eau	+2(CaO.H <sub>2</sub> O) Hydroxyde de calcium	6CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .12H <sub>2</sub> O Aluminoferrite de calcium hydraté

La classe de résistance du ciment, sa compatibilité avec le type d'adjuvant et sa finesse sont les facteurs essentiels de choix du ciment à utiliser pour la confection des BHP. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du superplastifiant. Les ciments à temps de prise très long sont à éviter, des dosages élevés en superplastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures [2].

### **3. Les granulats**

Comme les trois quart du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revêtent une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leur propriétés, ils affecteront la durabilité et la performance structurelles du béton [3].

Pour ce qui est des BHP, le choix des granulats doit être fait avec beaucoup de soin. Au fur et à mesure qu'augmente la résistance visée puisque les granulats peuvent devenir le maillon le plus faible où peut s'initier la rupture de béton [4].

D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des BHP concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique [2].

#### **3.1. Forme de Particule et Texture**

Idéalement, pour réduire au minimum la quantité de la pâte de ciment exigée pour fournir l'ouvrabilité adéquat du béton frais, les granulats devraient être grossièrement équidimensionaux avec des surfaces relativement lisses, comme la plupart des sables naturels et gravier. Où ces derniers sont indisponibles, le granulats concassé peut être utilisé, il a tendance à avoir une surface plus rugueuse et être plus angulaire en forme. En conséquence, il a tendance à exiger plutôt plus de pâte de ciment pour une bonne ouvrabilité. Cependant, les granulats de formes plates ou allongées devraient être évités [5].

#### **3.2. La porosité**

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats de coefficient d'absorption inférieur à 1 % [2].

### 3.3. La nature minéralogique

Elle est caractérisée la texture (la rugosité de surface) des grains et la possibilité des réactions à l'interface granulat – pâte de ciment. Les granulats présentant des risques de réactions alcali – granulat sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité des enceintes et la stabilité à long terme des ouvrages. La présence des poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances [2].

### 3.4. La granularité

C'est elle qui régit la compacité du mélange et sa maniabilité. Les dosages en ciment dans les BHP étant élevés, il n'y a pas intérêt à utiliser des sables fins, Alaejos Gutierrez et al recommandent le sable de rivière qui réduirait la demande en eau. Dutruel recommande de limiter la dimension maximale du gros granulat à 12 mm pour avoir des résistances élevées. Metha et al. sans s'y opposer, recommandent les granulats de dimension maximale comprise entre 20 et 25 mm ; Addis et al. Avaient trouvé que la résistance du béton augmentait avec la dimension du gros granulat entre 13,5 et 26,5 mm ; Alaejos Gutierrez et al. ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient Los Angeles inférieur à 15. Des études ont recommandé un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [2].

## 4. Les superplastifiants

Les qualités demandées aux bétons sont sans cesse évolutives. Pour parvenir à concurrencer d'autres matériaux et respecter les cahiers de charges, le recours aux adjuvants s'est généralisé. L'adjuvant a pour objet de modifier une ou plusieurs propriétés de béton frais ou durcis. il est considéré comme le 5eme ingrédient de béton et représente un cout non négligeable. L'adjuvant est de venu une partie intégrante dans la mise en œuvre des bétons [6].

Dans le cas des BHP, les adjuvants utilisés sont les superplastifiants. Ils comportent deux familles essentielles qui sont, respectivement, les polycarboxylates (polymères synthétiques) et les lignosulfonates (polymères naturels modifiés) [7].



### 4.3. Mode d'action

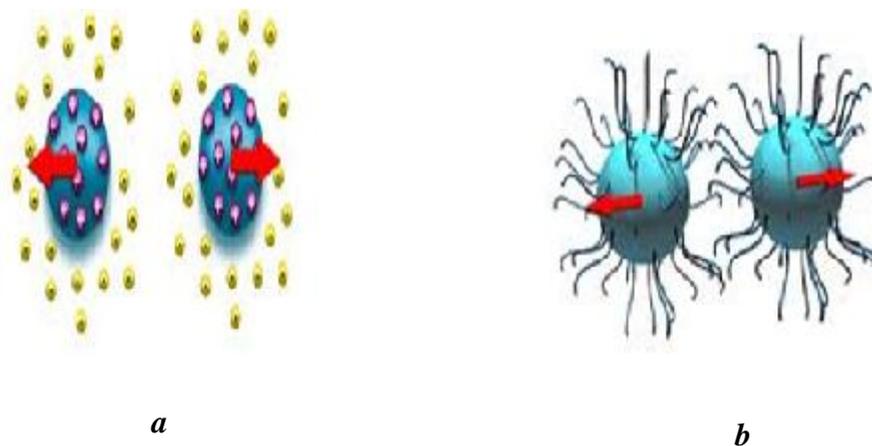
Le pouvoir fluidifiant des superplastifiants s'exerce par une combinaison de phénomènes physiques se produisant instantanément (à  $t = 0$ ) [8]. Ces processus sont l'adsorption des superplastifiants, la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique. La dispersion des particules de ciment par les superplastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment.

#### 4.3.1. Adsorption des superplastifiants sur les grains de ciment :

Une étude de l'effet dispersant des superplastifiants, a montré que seuls les superplastifiants adsorbés contribuaient à la dispersion. Les molécules de superplastifiant doivent d'abord s'adsorber à la surface des grains de ciment et, seulement après, elles peuvent exercer leur pouvoir fluidifiant [9].

#### 4.3.2. La répulsion stérique

La répulsion stérique peut être produite par le déploiement en solution de polymères de masse molaire élevée adsorbés à la surface des particules. Ces polymères vont empêcher les particules de s'approcher pour s'agglomérer à cause des répulsions entre les chaînes. La répulsion stérique peut être influencée par le design de la molécule polymérique, par les ramifications ou par le choix des groupements chimiques, généralement moins hydrosolubles, qui composent le polymère [10].



**Figure I-3.** Représentation schématique des mécanismes d'action des superplastifiants

a) répulsion électrostatique d'un polymère chargé; b) répulsion stérique d'un polymère adsorbé.

## 5. Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton. En effet, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc de la résistance mécanique. L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable.

Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent convenir.

Un excès d'impuretés dans l'eau peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des taches, attaquer les armatures et réduire la durabilité. Certaines limites peuvent donc être établies pour les chlorures, sulfates, alcalis et solides présents dans l'eau de gâchage comme on peut effectuer des essais appropriés pour déterminer l'effet de l'impureté sur diverses propriétés.

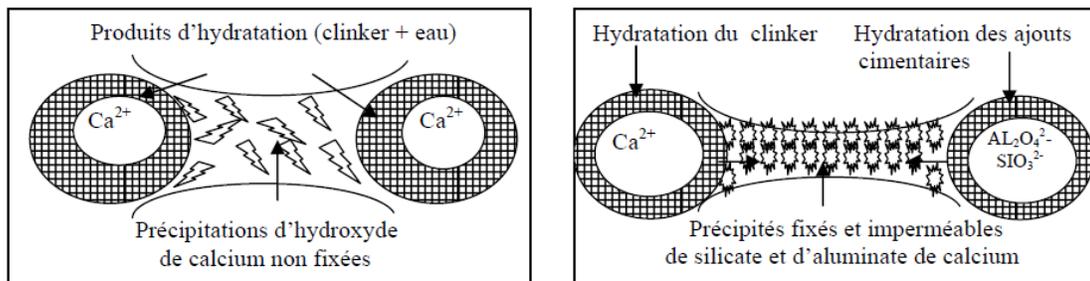
# CHAPITRE 2

## LES AJOUTS CIMENTAIRES

## 1. Introduction

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agents agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux [11].

Il a été prouvé que l'introduction des minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux (figure II-1) [2].



**Figure II-1.** (a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire (b) – Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire.

## 2. Rôle de l'ajout cimentaire

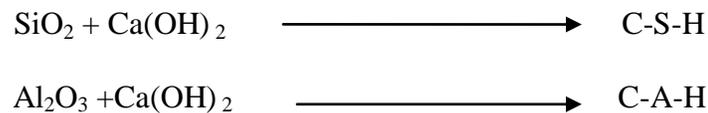
### 2.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Le rôle propre du superplastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à sa propriété dispersante), ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire [12].

## 2.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le bétonné qui augmente la perméabilité de lessivage.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-H-S, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [2]. Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



## 3. Classification des ajouts minéraux

Selon la norme [ENV 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

### 3.1. Principaux ajouts minéraux inertes

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 (N F P 18- 305).

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.

### 3.1.1. Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes cc). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutent à un CPA. Ils peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau)
- rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_3A$  et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit

L'épaisseur entre la pâte et le granulat.

## 3.2. Les ajouts minéraux actifs

### 3.2.1. La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [13].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

### **3.2.1.1. Pouzzolane naturelle**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites

### **3.2.1.2. Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique.

Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler. On classe les pouzzolanes en trois catégories [13]:

Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.

- ✓ Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- ✓ Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.

### **3.2.2. La fumée de silice**

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique ou 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, l'dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) se forme [14] et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice  $\text{SiO}_2$ .

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice.

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  $\text{SiO}_2$ .

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.

**Tableau .II- 2.** composition chimiques de la fumée de silice.

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO <sub>2</sub>	93.7	87.3	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na <sub>2</sub> O	0.2	0.2	0.9
K <sub>2</sub> O	0.5	0.6	1.3
Pertes au feu	2.9	0.6	1.2

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. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique.

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 [15].

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 durcis [15].

### **3.2.3. Le laitier de haut fourneau**

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

D'un point de vue chimique (tableau), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au – dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

**Tableau III-3.** Composition typique de laitier de haut fourneau [16].

Oxydes	Laitier français	Laitier USA	Laitier algérien
SiO <sub>2</sub>	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	0.3 à 20	2.0
MgO	6	3 à 12	4.7
S	1.5		0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.
- Chaleur (étuvage, autoclavage).
- Produits chimiques (la chaux, la soude (NaOH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse).

#### 3.2.4. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique.

Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables. Cependant, comme on peut le voir dans le tableau ( III-4) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup.

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- ❖ Les cendres silico- alumineuses (cendre de houille).
- ❖ Les cendres sulfocalciques (cendre de lignite).
- ❖ Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

La plupart des particules ont un diamètre compris entre  $1\mu\text{m}$  et  $100\mu\text{m}$ , leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et  $600\text{ m}^2/\text{kg}$ . La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium. D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces [15].

**Tableau III-4.** Composition chimique type de certaines cendres volantes [16].

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo-calcique	Sulfo-calcique
SiO <sub>2</sub>	59.4	47.4	36.2	24	13.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.9	6.2	6.4	17	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1	1.8
Na <sub>2</sub> O	2.2	0.4	2.2	0.8	-
SO <sub>3</sub>	2.4	1.5	2.8	8	15.1
PAF	2.0	1.5	0.6	-	-
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	-	-	-	-	28

### 1.2.5. La poussière :

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm<sup>2</sup>/g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

### 3.2.6. Le verre

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent. [22, 23].

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études [25, 36].

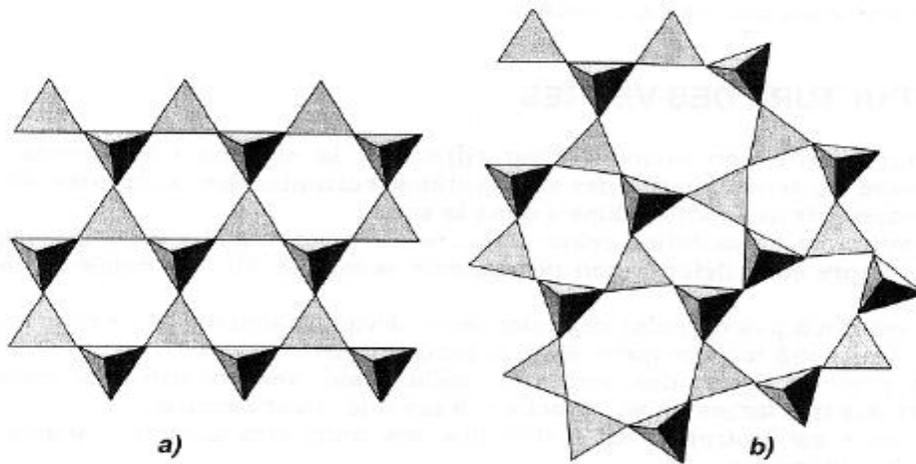
#### 3.2.6.1. Définition du verre

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux présentent une meilleure illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés tel que : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin.

Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial.

On obtient un verre, la silice vitreuse. L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées.

Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement Figure (II-1).



**Figure II-1.** a) Structure en anneau de la Cristobalite; b) Modèle proposé par

*Zachariasen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions [20].*

En 1921, LEBEDV avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines désordonnés.

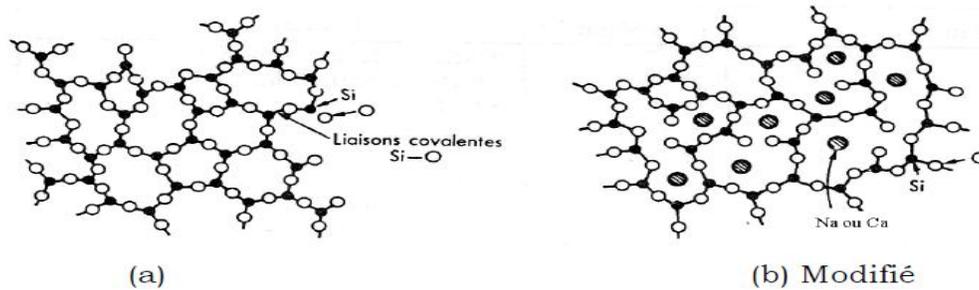
La théorie de ZACHARASEN décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages  $\text{SiO}_4$  de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite.

Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente.

ZACHARASEN a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes :

- ✓ la coordinance du cation doit être petite ;
- ✓ un ion oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations ;
- ✓ les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces ;
- ✓ trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (Figure II-2), proche de celui d'un liquide qui tend à se cristalliser. La cinétique de cristallisation est en général suffisamment lente pour que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine.

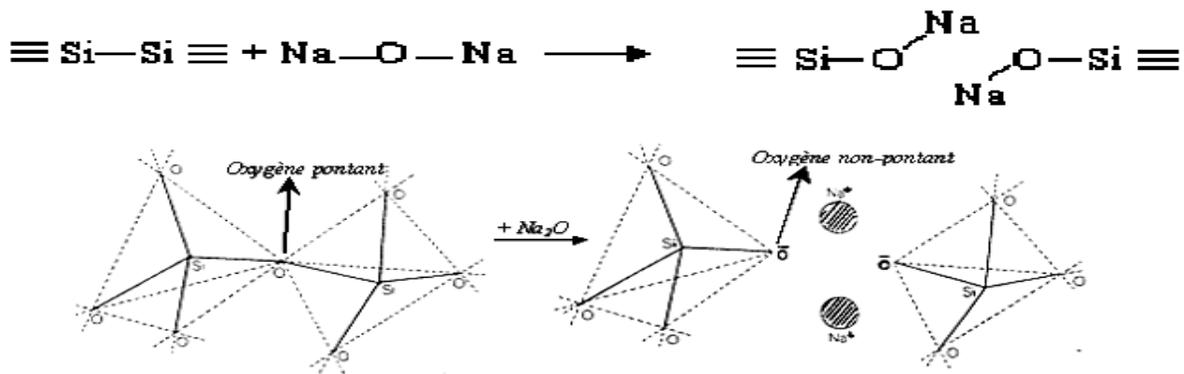


**Figure II-2.** L'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de  $Na_2O$  et  $CaO$  brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique [20].

La silice et tous les oxydes qui permettent de telles constructions sont appelés formateurs de réseau. Chaque liaison entre deux polyèdres est effectuée par un atome d'oxygène bivalent : un tel atome est appelé oxygène portant.

On peut modifier la structure d'un verre en y introduisant des modificateurs de réseau. Ce sont des oxydes alcalins de formule  $M_2O$ , comme  $Na_2O$  et  $K_2O$  ou des alcalino-terreux de formule  $MO$ , comme  $CaO$  et  $BaO$ . En ajoutant les fondants (oxydes alcalins), la température de fusion passe de  $1730^\circ C$  à  $1400^\circ C$  (économie d'énergie) et les possibilités de travail sont facilitées.

Avec  $Na_2O$  nous avons (FigureII-3):



**Figure II-3.** Rupture d'un pont  $Si-O-Si$  par adjonction d'une molécule de modificateur  $Na_2O$  [19].

La présence de  $\text{Na}_2\text{O}$  provoque l'interruption des liaisons du réseau continu noncristallin, rendant le verre plus fluide à haute température. La formation de ces discontinuités entraîne un affaiblissement de la structure vitreuse dont la solidité augmente avec le nombre de ponts  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ .



L'introduction de  $\text{CaO}$  entraîne l'existence d'ions  $\text{O}^{2-}$  liés au silicium d'un seul côté et apporte ainsi une certaine discontinuité au réseau. Mais la liaison  $\text{Ca} - \text{O}$  est considérablement plus forte que la liaison  $\text{Na} - \text{O}$  à cause de la bivalence de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$ , de sorte que les deux oxygènes non portants se trouvent en quelque sorte liés à travers l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  [18].

### 3.2.6.2. Comportement du verre dans un milieu cimentaire

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique [17].

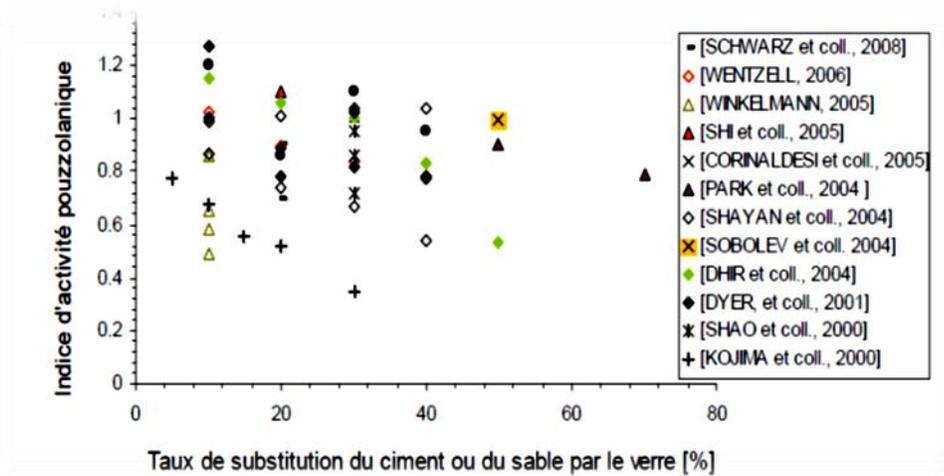
### 3.2.6.3. Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG et DRX.

La Figure (II-4) rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec ajout de verre à la résistance du mélange témoin.

Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique.
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.
3. L'activité é pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leur couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable.



**FigureII-4.** Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [17].

### 3.2.6.4. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes :

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines, lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante : en effet, dans le cas du verre, celui apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Par exemple, une substitution de 30% du ciment dans les bétons affiche une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante [25]. Les travaux de SHI et coll. [2005], viennent confirmer également cette tendance.

Ces auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante [33]. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante.

**3.2.6.5. L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane :**

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoire ont été conduites. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment la fumée de silice, la cendre volante ou même le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [29, 35].

**3.2.6.6. Réaction alcali-silice du verre**

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau en prenant certaines précautions.

Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons. La réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres, la bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

**CHAPITRE 3**

**LES CARACTERISTIQUES**

**DES BHP**

## 1. Caractéristiques physiques

### 1.1. L'ouvrabilité

La norme de l'institut américain de béton 116R-90 (ACI 1990b) définit l'ouvrabilité comme étant : la propriété de béton frais qui détermine la facilité et l'homogénéité avec lesquelles un béton peut être confectionné, mis en œuvre, consolider et finaliser [37]. Faury souligne que l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de malfaçons.

L'ouvrabilité d'un béton est influencée par chaque composant de béton et essentiellement par chaque condition dans laquelle le béton est réalisé. Ces facteurs interagissent pour que le changement de la proportion d'un composant pour atteindre une caractéristique spécifique exige que d'autres facteurs soient ajustés pour maintenir l'ouvrabilité de béton.

Ce facteur primordial peut varier comme pour les bétons classiques et l'on obtient facilement des affaissements au cône d'Abrams appelés slumps de 15 à 18 cm, mais il faut impérativement étudier :

- ✓ les granulats (module de finesse du sable et granulométrie) ;
- ✓ le choix du ciment et du superplastifiant ;
- ✓ le dosage de ces différents matériaux (l'ajout cimentaire et de l'eau) pour une plasticité désirée, en fonction des plus ou moins grandes difficultés de mise en œuvre dans les coffrages et l'embarras des armatures ;
- ✓ la plasticité désirée qui doit être garantie au moins une heure après le malaxage pour tenir compte des délais inévitables de transport et de mise en œuvre [38].

### 1.2. Porosité et porométrie

Parmi les nombreuses définitions de la porosité, en voici une très simple: La porosité est égale au rapport du volume des vides d'un corps au volume occupé par ce corps [39].

Or, contrairement à la facilité avec laquelle nous cernons les limites d'un volume macroscopique, l'évaluation du volume des vides prend, dans le cas de certains matériaux, une tournure complexe.

Une telle difficulté se présente notamment avec les matériaux cimentaires pour lesquels la distinction entre phases solide et vide s'atténue lorsque l'échelle d'examen approche le nanomètre [39].

La matrice cimentaire hydratée est un corps poreux. Les vides qui constituent cette porosité sont de nature et d'échelle dimensionnelle très différente :

- les micropores des hydrates eux-mêmes, notamment du C-S-H qui est le principal composant de la pâte cimentaire, de dimensions 3 à 10 nm.
- les capillaires qui correspondent aux espaces intergranulaires de la pâte de ciment fraîche (avant hydratation) de dimensions 0,1 à 10  $\mu\text{m}$ .
- les bulles d'air occlus le cas échéant au cours du malaxage de dimensions 10  $\mu\text{m}$  à 0,5 mm.
- les éventuels défauts (hétérogénéité, fissures) de dimensions 1 à 2 mm.

La plupart des propriétés macroscopiques d'un matériau poreux (résistances mécaniques, isolation thermique ou phonique) sont gouvernées par le nombre, la taille et la forme des pores ainsi que leur connectivité.

Quel que soit l'instant durant la réaction d'hydratation, les espaces non remplis par des produits solides (hydrates et particules de ciment anhydre) pourront être considérés comme des vides ou des pores capillaires [4].

### **1.3. La perméabilité**

La perméabilité est caractérisée par la valeur de débit de transport des fluides et des gaz (eau, chlorure, sulfates, oxygène...) à travers des pores capillaires et des fissures du béton [2].

#### **1.3.1. La perméabilité aux gaz**

Lawrence mesure la perméabilité au gaz de trois bétons formulés à partir d'un ciment Portland ordinaire, d'un ciment contenant des cendres volantes et d'un ciment contenant des laitiers (figure.III-1), en prenant soin de les comparer pour de mêmes valeurs de résistances mécanique développée [40]. Généralement, les additions minérales augmentent la compacité de la matrice cimentaire, ce qui a pour conséquence une augmentation de la résistance mécanique et une diminution de la perméabilité au gaz [41].

La perméabilité au gaz ne dépend pas seulement du volume total de pores mais de leur connectivité.

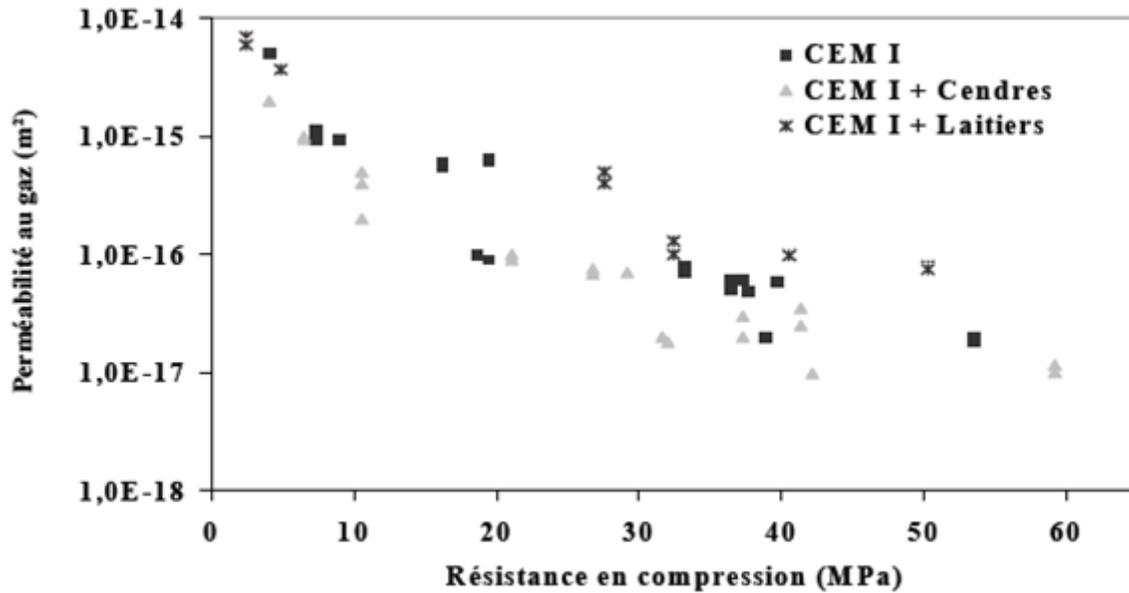


Figure III-1. Influence du type de liant sur la perméabilité à résistance mécanique donnée [40].

La perméabilité intrinsèque  $k$  ( $m^2$ ) peut être reliée à la taille des pores et plus précisément au diamètre critique  $d_c$  (m), obtenu par la dérivée de la courbe de distribution porosimétrique cumulée du matériau considéré, selon la théorie de Katz & Thomson [42].

$$k = \frac{cd_\epsilon^2}{F}$$

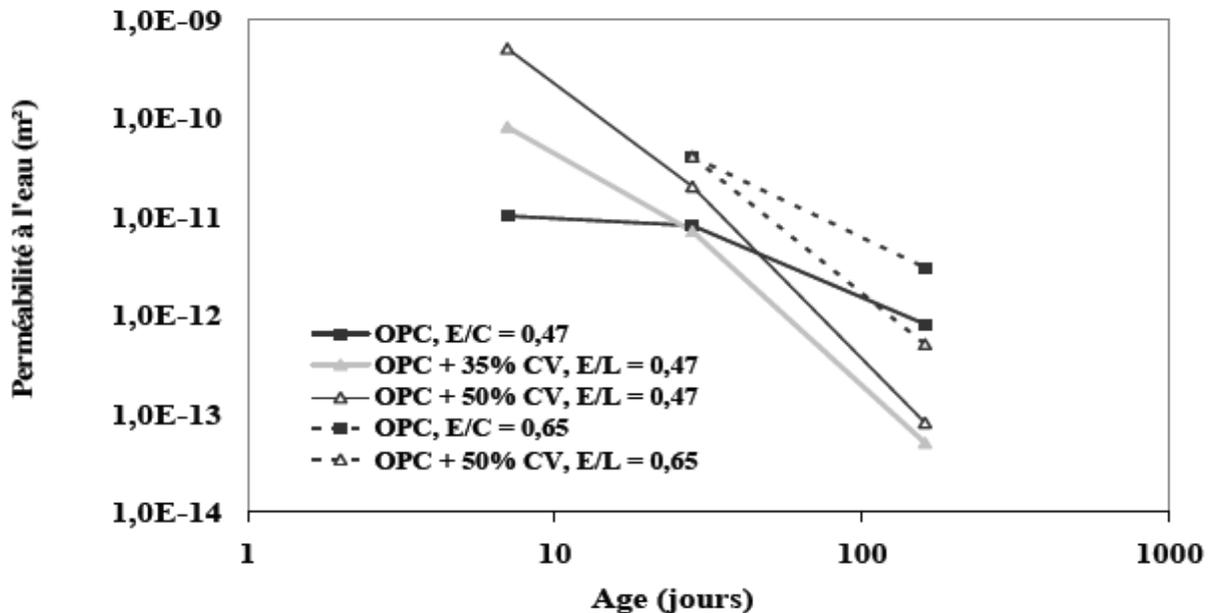
Avec :

- C : constante égale à  $1/226$
- F :  $\sigma/\sigma^\circ$  où  $\sigma$  ( $\Omega \cdot m^{-1}$ ) représente la conductivité électrique du matériau poreux saturé par un électrolyte de conductivité électrique intrinsèque  $\sigma^\circ$ .

La perméabilité varie donc comme le carré du diamètre du pore critique.

### 1.3.2. La Perméabilité à l'eau :

Day & Konecny démontrent que la perméabilité à l'eau est très sensible à la microstructure puisque sa valeur peut varier jusqu'à quatre ordres de grandeur (figure.IV-2) entre le jeune âge (7 jours) et une cure prolongée (160 jours), pour des mortiers à base de ciment ordinaire ou contenant des cendres volantes et à divers E/L [42].



*Figure III-2. Evolution de la perméabilité à l'eau en fonction de l'âge pour des mortiers contenant des cendres volantes à différents E/L.*

Des mesures allemandes de perméabilité de mortier conduisent à des valeurs comprises entre 0,64 10<sup>-12</sup> m/s pour E/C = 0,40 et à 440 10<sup>-12</sup> m/s pour E/C = 0,75. Ces résultats confirment des essais américains anciens qui montraient que la perméabilité d'un béton était réduite d'un facteur égal à 1000 lorsque le rapport E/C passait de 0,80 à 0,40 [43].

La perméabilité à l'eau de matériaux cimentaires est diminuée de plus d'un ordre de grandeur par la simple présence d'additions minérales car elles développent une matrice de porosité plus fine comportant des chemins de percolation plus discontinus et tortueux [41].

## 2. Les caractéristiques mécaniques

### 2.1. La résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons est la propriété la plus appréciée chez les constructeurs. La résistance à la compression des BHP est plus élevée que celle des bétons usuels. Dans certaines régions du monde, un béton est considéré comme de haute performance quand sa résistance dépasse 60 MPa.

En Algérie, il est admis que dès la résistance dépasse 40 MPa le béton peut être considéré comme de haute performance [43].

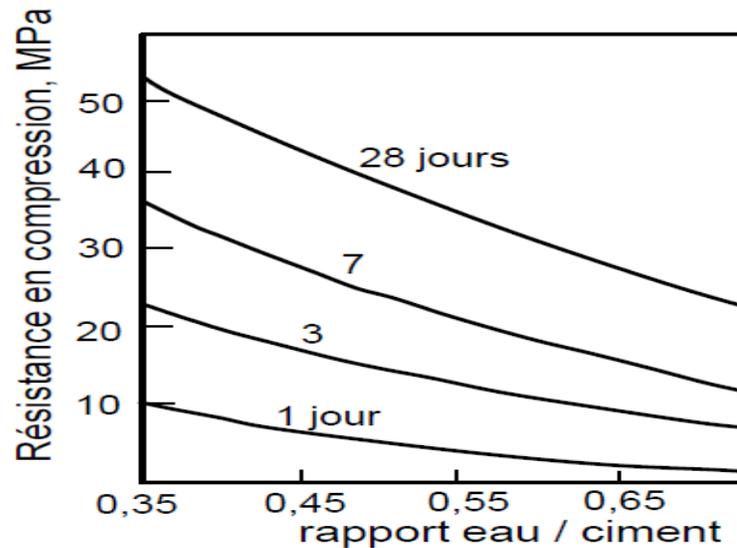
Si l'on cherche à fabriquer des bétons maniables avec des granulats ordinaires, on devra se limiter, dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 et 120 MPa en résistance moyenne à 28 jours. Une explication de cette augmentation de la résistance est due au rôle accélérateur de la fumée de silice, selon la nouvelle loi de Féret exprimée par :

$$f_{c28} = \frac{K_g}{\left[ 1 + \frac{3,4 E/C}{1,4 - 0,4 \exp\left(-\frac{11S}{C}\right)} \right]^2}$$

Où:

- $f_{c28}$  : la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.
- E, C et S : le poids respectif d'eau, du ciment et de la fumée de silice au mètre cube de béton.
- $K_g$  : paramètre dépendant de la qualité des granulats (pour des granulats courantes la valeur  $K_g = 4.91$ ).

La figure (III-3) confirme les informations apportées par la loi de féret à propos de l'influence du temps et du rapport E/C sur la résistance à la compression des bétons.



*Figure IV-3. Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton.*

## 2.2. La résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion croît sensiblement par rapport à la résistance en compression ; la relation entre la résistance à la compression et celle 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 de 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

## 2.3. La résistance à la traction

Comme dans le cas de la résistance à la compression, il a été établi et vérifié que la résistance en traction des BHP progressait linéairement en fonction de la compacité de la pâte de ciment durcie [45]. De nombreuses études ont fait l'objet de corrélation entre la résistance à la compression et celle à la traction. Notamment, Pedeches qui lors d'une étude sur les BHP à base de fumée de silice a montré que l'ensemble des points ( $R_c$  et  $R_t$ ) se situait au-dessus de la courbe représentant la relation adoptée par les règlements de béton armé [46] et de béton précontraint [47] :

$$R_t = 0,6 + 0,06 R_c$$

Il a proposé la relation suivante pour des résistances en compression comprises entre 30 et 130 MPa :

$$R_t = 5,5 + 0,027 R_c$$

Un autre modèle avait déjà été proposé par Ahmed pour des résistances en compression supérieures à 84 MPa [48] :

$$R_t = 0,44 R_c^{2/3}$$

## **2. Caractéristiques élastiques :**

### **2.1. Le retrait :**

Par définition, on distingue deux types de retrait suivant le mode de conservation du béton. On parle ainsi de retrait endogène ou d'autodessiccation lorsqu'il n'y a pas d'échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces déformations différées libres sont alors caractéristiques du comportement du matériau au cœur de la structure. Lorsque les échanges hydriques sont permis, le retrait est dit de dessiccation ou de séchage.

Le retrait est à la fois un phénomène simple dans sa manifestation – une diminution du volume apparent du béton – mais aussi assez complexe quand on veut bien comprendre les phénomènes sous-jacents et les mécanismes mis en jeu [49].

Il vaudrait mieux parler des retraits du béton plutôt du retrait du béton parce que le retrait global que l'on mesure correspond à la combinaison de plusieurs retraits élémentaires [50].

#### **2.1.1. Le retrait endogene**

Le retrait endogène est un phénomène identifié comme étant la conséquence directe de l'autodessiccation de la pâte de ciment, c'est-à-dire de la consommation de l'eau des pores capillaires par l'hydratation des grains de ciment non hydratés dans des conditions où l'échange hydrique avec l'extérieur est empêché et en l'absence de tout chargement extérieur. Ce phénomène est observé au cœur des structures massives en béton.

Nous présentons les différents types de déformations libres qui se produisent dans l'ordre chronologique d'occurrence.

### 2.1.2. Contraction le chatelier ou retrait chimique

L'expérimentation de Le Chatelier a mis en lumière le fait que le volume des hydrates formés par la réaction d'hydratation est inférieur d'environ 20% au volume initial de l'eau et du ciment anhydre. Cette contraction a lieu sans apport ni départ d'eau (condition endogène). La contraction de Le Châtelier est une contraction d'origine chimique (un retrait chimique). Elle a lieu pendant les premières heures de l'hydratation (depuis le contact eau-ciment jusqu'au début de la prise).

Le retrait chimique commence donc dès le gâchage (contact eau-ciment), et se poursuit après prise, tout au long de l'hydratation des grains anhydres du ciment mais ses conséquences à l'échelle du béton sont de moins en moins sensibles au fur et à mesure du durcissement de la pâte. Une fois la pâte durcie, la variation de volume « chimique » conduit à un abaissement de la teneur en eau des pores qui induit à son tour au retrait endogène par autodessication.

Les tensions capillaires ainsi générées peuvent atteindre plusieurs MPa de dépression et provoquer une contraction du squelette solide de la pâte. La déformation de la pâte étant empêchée par la présence des granulats, des tensions et une microfissuration peuvent apparaître. La microfissuration induit à son tour une redistribution interne des contraintes [51]. Sellier et Buffo-Lacarrière ont récemment exploré les effets de cette microfissuration pour concilier les modèles de fluage de dessiccation et de retrait. Nous reviendrons sur ce point dans la partie dédiée à la modélisation [52].

Notons que la réaction d'hydratation s'arrête généralement si l'humidité relative interne descend en dessous de 70-80 % environ, [53 ; 54], limitant ainsi la valeur maximale possible de la dépression capillaire à l'origine du retrait d'autodessication

### 2.1.3. Retrait plastique

Ce type de retrait est de durée relativement courte (il se produit durant les premières heures après coulage). Le retrait plastique est la conséquence de l'évaporation de l'eau ressuée à la surface du béton encore frais. C'est le résultat d'un déséquilibre entre le flux d'eau évaporée à la surface et l'apport d'eau provenant de la masse de béton en dessous. Ce déséquilibre produirait une forte contraction qui se manifeste par des fissures très ouvertes à la surface externe [55]. Une cure appropriée permet généralement de pallier à ce problème.

#### **2.1.4. Retrait thermique**

Le retrait thermique résulte de la contraction de la pâte de ciment et des granulats durant le refroidissement si la prise a eu lieu à une température élevée, en raison de l'exothermie des réactions d'hydratation [51].

Un gradient thermique se crée entre le cœur de la structure et la peau (surface externe). Ce type de retrait est d'autant plus prononcé que la structure est massive (cas de centrales nucléaires, barrages, blocs de fondation, piles de pont...) où la température d'hydratation au cœur peut atteindre les 80°C [54].

#### **2.1.5. L'autodissiccation**

Comme nous l'avons vu plus haut, au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation de la pâte, le matériau se rigidifie et forme peu à peu un squelette caractérisé par une porosité importante. L'eau des pores capillaires continue à être consommée pour former de nouveaux hydrates qui comblent la porosité. Il en résulte une densification de la matrice et une diminution de la teneur en eau des pores. Ce séchage interne des pores s'accompagne par l'apparition d'un volume gazeux de vapeur d'eau. Il se forme alors un ménisque à l'interface eau-vapeur d'eau dans le pore.

L'équilibre de ce ménisque obéit à la loi de dépression de Kelvin-Laplace. Ce phénomène provoque une mise en traction de l'eau et par réaction une mise en compression du squelette solide de la matrice cimentaire. Cette compression conduit à une variation de volume d'autant plus importante que le diamètre des pores est faible.

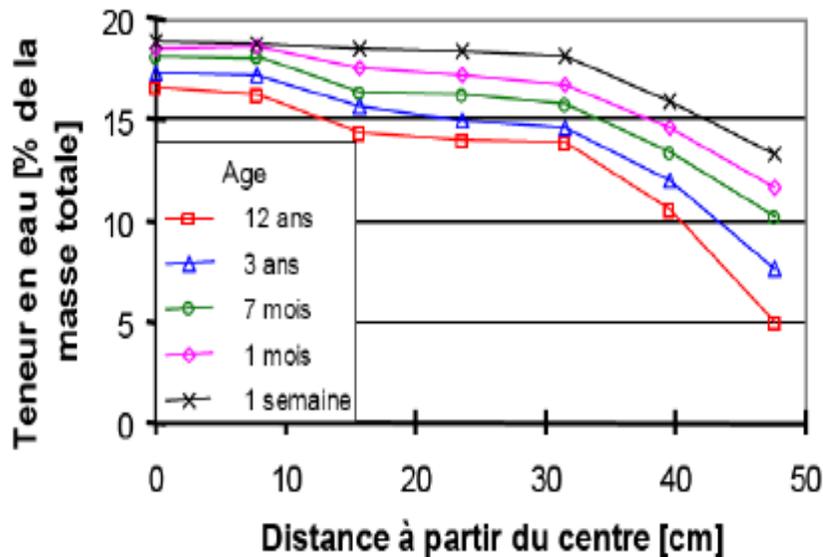
Cela justifie le fait que les BHP et BTHP à microstructure plus fine ont un retrait endogène plus grand que celui des BO (diamètres de pores plus grands)

#### **2.1.6. Retrait de séchage**

Le béton se met à sécher lorsqu'il est soumis à un milieu ambiant à humidité relative inférieure au sien. Le séchage du béton n'est pas homogène entre le cœur et la peau de la structure. La figure IV-4 ci-dessous nous montre la variation de la teneur en eau dans un bloc imposant (prisme de dimension 100×100×200 cm) séchant de façon unidirectionnelle sur une longueur de 1 m pendant 12 ans [56].

On constate que l'équilibre hydrique est loin d'être atteint après 12 ans de séchage du fait de la faible perméabilité et de la faible diffusivité du béton.

Dans le cas de cet exemple, la fin du séchage du bloc est estimée, par extrapolation, comme étant atteinte au bout de 120 ans. Le séchage des matériaux cimentaire est donc un phénomène très lent.

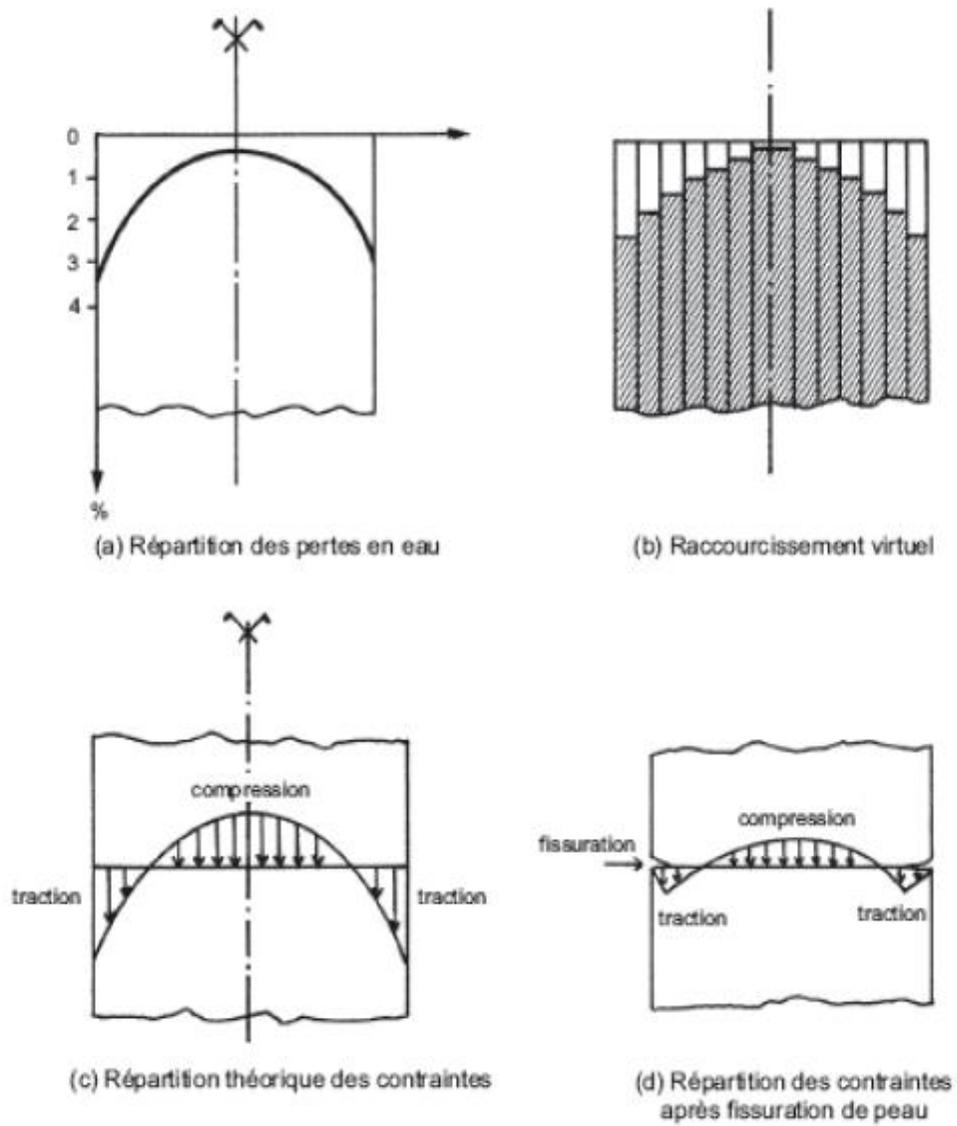


*Figure III-4. Distribution de la teneur en eau dans l'éprouvette à différentes échéances [56].*

Ce déséquilibre hydrique observé dans les matériaux cimentaires séchant provoque un gradient de contraintes capillaires qui induit un retrait de dessiccation dit apparent lorsque le matériau subit une microfissuration en même temps que le retrait (Figure III-5) ou potentiel lorsque le matériau ne subit pas de microfissuration [3, 57].

En effet, comme le montre la Figure IV-5, le gradient de dépression capillaire engendré par le déséquilibre hygrométrique amène par auto-équilibre de la traction au voisinage de la surface et de la compression au cœur [58].

Ces tractions en surface peuvent conduire à une fissuration en peau et donc à une relaxation partielle des contraintes (Figure IV-5) [51].



*Figure III-5. Autocontraintes de structure dues au retrait de séchage [51]*

*CHAPITRE 4*

*MICROSTRUCTURE ET*

*DURABILITE DES*

*BHP*

## 1. Microstructure des BHP

### 1.1. Introduction

Les bétons à hautes performances, comme tous les bétons est avant tout un matériau hétérogène, constitué de deux phases principales : une phase liante que constitue la pâte de ciment durcie (matrice cimentaire) et une phase granulaire (granulats). La pâte de ciment durcie assure la fonction de « colle » responsable de l'adhérence des phases granulaires, conférant la rigidité au matériau (Phase liante). Cette pâte est polyphasique : phase solide, phase liquide et phase gazeuse. La phase solide est constituée des hydrates de ciment (grains hydratés) et d'anhydres (grains non hydratés). Elle contient principalement des silicates de calcium hydratés C-S-H, issus des réactions d'hydratation entre les constituants du ciment Portland et l'eau. La phase liquide correspond à l'eau interstitielle et la phase gazeuse aux vides remplis d'air et/ou de vapeur d'eau.

### 1.2. Hydratation du ciment

#### 1.2.1. Silicate de calcium hydraté

Ils constituent 70% en masse de la phase liante de la pâte de ciment durcie. Ces composés amorphes nanocristallins confèrent à la pâte de ciment durcie ses principales propriétés notamment les caractéristiques mécaniques. Leur structure est lamellaire en feuille. La structure interfeuillet dépend de la concentration de la solution interstitielle en hydroxyde de calcium.

On distingue les C-S-H de par

- ✓ **Leur rapport Ca/Si ;**

Il existe trois phases distinctes de C-S-H dépendant du rapport Ca/Si :

C-S-H- $\alpha$  correspondant à  $0,66 < \text{Ca/Si} < 1$  (à l'interface de la fumée de silice dans le cas de ciment avec ajout de fumée de silice).

C-S-H- $\beta$  correspondant à  $1 < \text{Ca/Si} < 1,5$ .

C-S-H- $\gamma$  correspondant à  $1,5 < \text{Ca/Si} < 2$  (cas de ciment CEM I).

- ✓ **Leur morphologie ;** on définit les C-S-H externes de morphologie plutôt fibrillaire et les C-SH internes de morphologie plus compacte. Leurs proportions dépendent directement du rapport E/L [63].

### 1.2.2. la portlandite

La portlandite est la dénomination minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé  $Ca(OH)_2$ . Sa proportion massique est d'environ 20%. Elle représente la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Sa solubilité dans l'eau est de 22 mol/l à 25°C. La portlandite cristallise sous forme de cristaux hexagonaux.

### 1.2.3. Le trisulfoaluminate et le monosulfoaluminate (AFt et AFm)

L'AFt désigne le trisulfoaluminate de calcium hydraté appelée également ettringite ( $3CaO.3CaSO_4.Al_2O_3.32H_2O$ ). L'AFm désigne quant à lui le monosulfoaluminate de calcium hydraté. Ils ont des structures différentes. L'ettringite se présente sous forme d'aiguilles tandis que les monosulfoaluminates de calcium hydratés sont de structure hexagonale dérivant directement de celle de la portlandite

## 1.3.Particularité de l'hydratation des bétons

Etant donné que les BHP sont formulés à partir des mêmes ciments que les bétons usuels (bétons ordinaires : BO), les réactions chimiques, le processus d'hydratation et les hydrates formés sont par conséquent analogues HP.

La différence réside dans le volume ainsi que dans la compacité des hydrates produits : produits internes de haute densité (High Density HD) ou externes de faible densité (Low Density LD). La nature de ces derniers est étroitement liée au rapport E/L [63]. En effet, en réduisant le rapport E/L (cas des BHP) de la pâte de ciment, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres laissant ainsi moins d'espace pour les produits externes [64]. En conséquence, la principale caractéristique des gels de C-S-H issus d'un faible ratio E/L réside dans leur compacité et une plus grande proportion de gels HD que dans le cas de gels issus d'un ratio E/L grand.

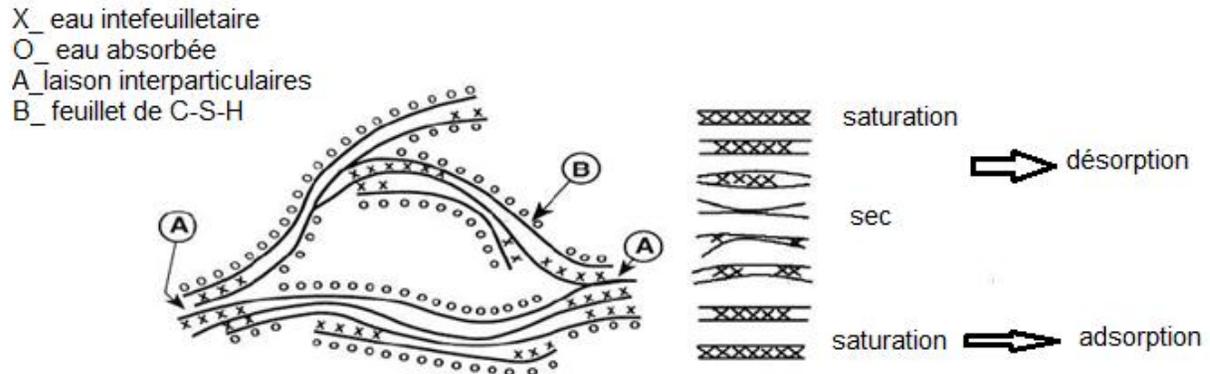
## 1.4.Structure et morphologie des gels de C-S-H

Comme nous l'avons dit, le béton est un matériau hétérogène, composé principalement de deux phases solides : les granulats de rigidité élevée et ne fluant pratiquement pas par rapport à la pâte et la pâte de ciment. Cette dernière est en effet le siège des déformations différées.

Pour comprendre les mécanismes des phénomènes physicochimiques intrinsèques aux déformations différées, la connaissance de la structure physique ainsi que la chimie des principaux hydrates du ciment à une échelle microscopique est nécessaire. Le modèle de la littérature que nous présentons ici pour schématiser la microstructure du gel C-S-H est celui proposé par Feldman et Sereda (1968) [65].

Ce modèle offre une description plausible de ces hydrates pour expliquer les mécanismes des phénomènes à l'origine des déformations différées.

La structure des C-S-H est schématisée sous la forme de lamelles constituées chacune de 2 à 4 feuilletts de C-S-H (Figure VI-1). L'espace interfoliaire entre feuilletts est d'environ 150 à 300 nm [66]. Ces feuilletts sont capables d'avoir un mouvement relatif et la pénétration ou le départ de l'eau des espaces interfoliaires est possible.



**Figure VI-1:** Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H [65].

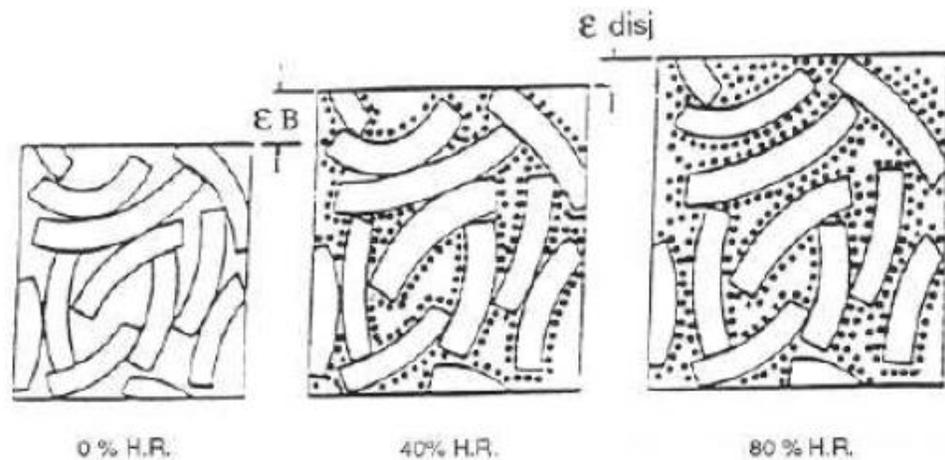
Les feuilletts sont liés entre eux par des forces superficielles ou parfois par des liaisons ioniques covalentes rigides. Ces liaisons se renforcent au cours du séchage, mais elles seraient détruites lors de l'humidification [81]. Ce phénomène expliquerait en partie que la résistance mécanique du béton à l'état humide soit plus faible que celle du matériau sec.

Les forces physiques qui s'exercent entre les feuilletts de nature hydrophile, séparés par une mince couche d'eau, sont les suivantes :

- Forces de Van-der-Waals (attractives) ;
- Forces électrostatiques (répulsives) ;

Les interactions stériques et les forces dues à la structuration de l'eau (répulsives).

Le modèle de la structure du gel C-S-H proposé par Feldman et Sereda permet d'interpréter l'influence de l'humidité relative sur les propriétés physiques et mécaniques de la pâte de ciment. La Figure VI-2 présente de façon simplifiée les phénomènes de désorption et d'adsorption de l'eau qui sont principalement liés aux mouvements de l'eau interfeuillet. De la même façon, dans le modèle de Munich (1976) dans la Figure V-2, les mécanismes de retrait et de gonflement sont attribués aux mouvements de l'eau dans la structure du gel C-S-H. Dans le gel C-S-H sec, les particules sont à l'état de contraction, du fait des forces de tension superficielle. Les forces de tension sont réduites par l'eau absorbée sur les particules. L'augmentation du volume est évidente. Le gonflement complémentaire est provoqué par la pression de disjonction [68].



*Figure VI-2. Modèle de Munich 1976 de gonflement du gel C-S-H en trois différents états d'humidité [69]*

### 1.5.L'eau dans la pâte de ciment

Le rôle de l'eau est essentiel dans la description des déformations différées du béton [70]. Pour pouvoir cerner le rôle de l'eau dans les phénomènes différés de retrait et fluage, il est nécessaire de connaître les différents types d'eau, ses liaisons, sa structure, son mouvement (diffusion) et les tensions qu'elle génère par son mouvement dans la structure des C-S-H.

#### L'eau libre et capillaires

Elle occupe les macropores et fissures et échappe aux forces d'attraction des surfaces solides. L'eau capillaire est la phase condensée remplissant le volume poreux et séparée de la phase gazeuse par des ménisques. Cette eau obéit aux lois de capillarité. L'évaporation de l'eau libre et capillaire s'effectuerait entre 30 et 120°C. La vitesse de montée en température est un paramètre influent. En effet, La vapeur n'arrive pas à s'échapper lorsque cette vitesse est élevée [71]. A titre d'exemple, avec une vitesse de 1°C/min à 100°C, seuls 3% de l'eau s'évaporerait, alors que la proportion atteindrait 9% avec une vitesse de 0,2°C/min à 100°C [68].

### 1.5.1. L'eau adsorbée

Cette eau est adsorbée soit :

- physiquement via les forces d'attractions type Van-der-Waals et les forces électriques superficielles des particules C-S-H ; on parle dans ce cas-là d'adsorption physique.
- chimiquement en mettant des électrons en communs avec les surfaces solides des hydrates (C-S-H) de la pâte de ciment et il s'agit alors de l'adsorption dite chimique.

Le nombre de molécules d'eau adsorbées physiquement peut aller de un à cinq en fonction de l'humidité relative des pores. L'eau adsorbée à l'intérieur et à l'extérieur des feuillets C-S-H est une eau fortement liée. L'évacuation de cette eau ne se ferait qu'à des températures plus élevées (120°C-300°C) par rapport à l'eau libre [68].

### 1.5.2. L'eau chimiquement liée :

Cette eau est combinée aux hydrates dont elle fait partie, sous forme d'eau de cristallisation. De ce fait, elle n'est plus considérée comme eau faisant partie de la phase liquide. La libération de l'eau chimiquement liée par l'augmentation de la température provoque la déshydratation de la pâte de ciment (nous reviendrons sur ce point lorsque nous étudierons la stabilité des hydrates en température).

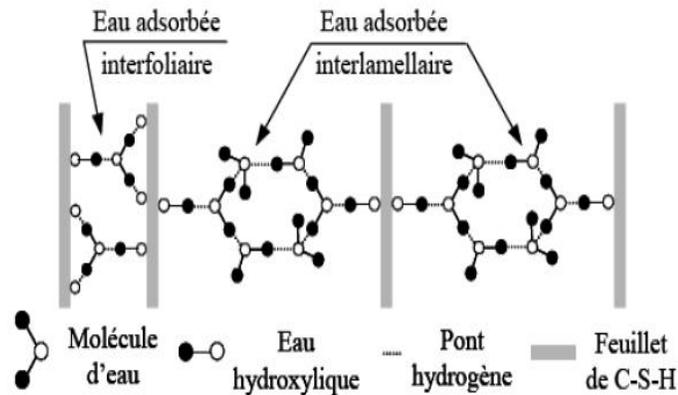
### 1.5.3. L'eau dans les C-S-H

D'après les expérimentations menées par Sierra [68], l'eau serait présente dans le gel C-S-H sous trois formes :

- L'eau hydroxylique : cette eau est chimiquement liée aux atomes de silicium et de calcium par des hydroxyles (groupement OH) sur les faces internes et externes des feuillets. On trouve deux OH par feuillet.
- L'eau interfoliaire ou interfeuillet : elle est liée aux feuillets par des groupements hydroxyles. Elle contribue à la cohésion intrinsèque de la lamelle. L'extraction des molécules d'eau interfoliaire triplement liées par des ponts hydrogène nécessite un séchage avec une température comprise entre 30 et 120°C.
- L'eau interlamellaire : elle est adsorbée aux surfaces des lamelles soit par un hydroxyle, soit liée à d'autres molécules d'eau.

Le schéma de la Figure VI-3 ci-dessous de Sierra considère le modèle lamellaire des C-S-H. Il illustre les liaisons des trois formes d'eau dans les C-S-H.

Tous les processus d'évacuation de l'eau libre, liée et adsorbée sont difficiles à dissocier, ce qui ne facilite pas les observations scientifiques [68].



*Figure VI-3. État de l'eau dans le gel de C-S-H [66].*

### 1.6. Porosité de la pâte de ciment :

La porosité d'un béton, caractérisée par sa taille et son interconnexion, est un paramètre important dont la durabilité en termes d'attaques d'agents agressifs mais aussi les déformations différées (retrait et fluage) sont tributaires. La structure poreuse régit la difficulté de mouvement de l'eau. Dans une pâte de ciment, on constate deux types de porosité :

- ✚ une porosité capillaire constituée de pores de gros diamètres supérieurs à 100 nm (d'après la figure V-4) issus de vides vestiges de l'eau capillaire qui ne participe pas à l'hydratation ;
- ✚ une porosité des hydrates (pores de très faibles diamètres, de l'ordre du nanomètre).

Le diamètre et la distribution des pores notamment dépendent de plusieurs paramètres que nous allons détailler. La porosité dans la pâte de ciment est principalement régie par le facteur E/C ou E/L. De manière générale, la porosité capillaire diminue avec le rapport E/C (Figure VI-5) et avec le degré d'hydratation (ou l'âge) (Figure VI-5). On peut également constater l'absence de porosité capillaire pour les bétons à faible rapport E/C tels que les BHP (Figure VI-4), ou à partir d'un certain degré d'hydratation (90 jours) pour un rapport élevé de 0,7. L'humidité relative ou humidité environnementale a également une influence. Au-dessous d'une humidité relative d'environ 75%, le processus d'hydratation est fortement ralenti, voire même arrêté [72].

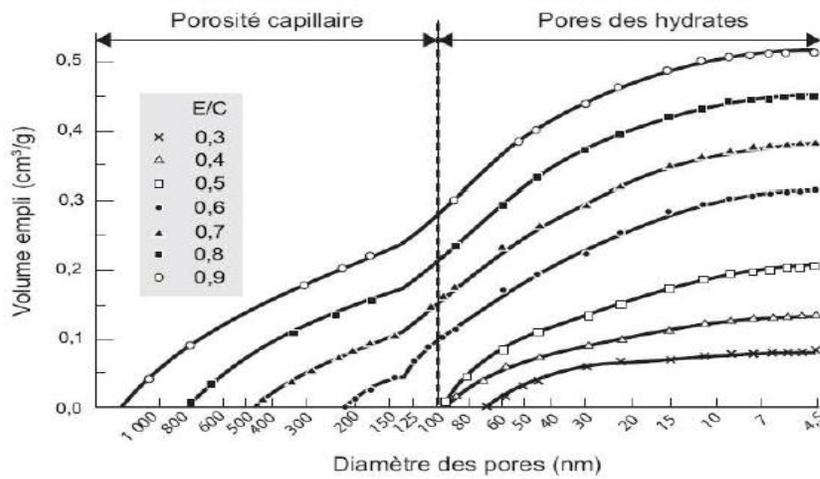


Figure VI-4. Influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de pâtes de ciment Portland âgées de 28 jours [73].

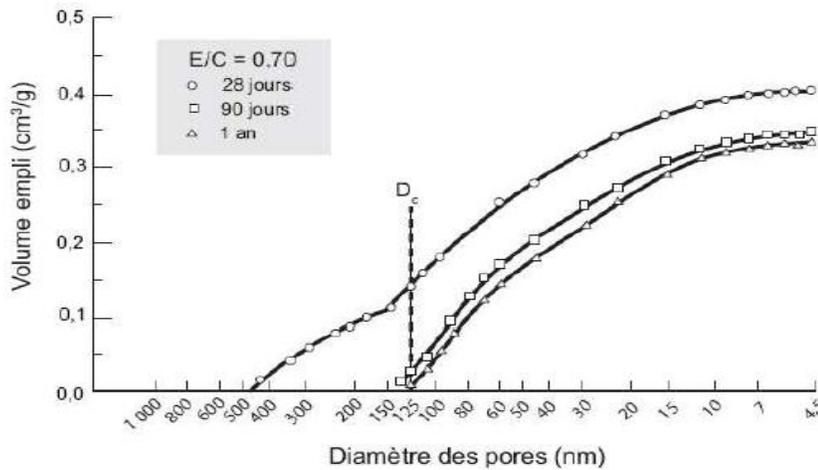


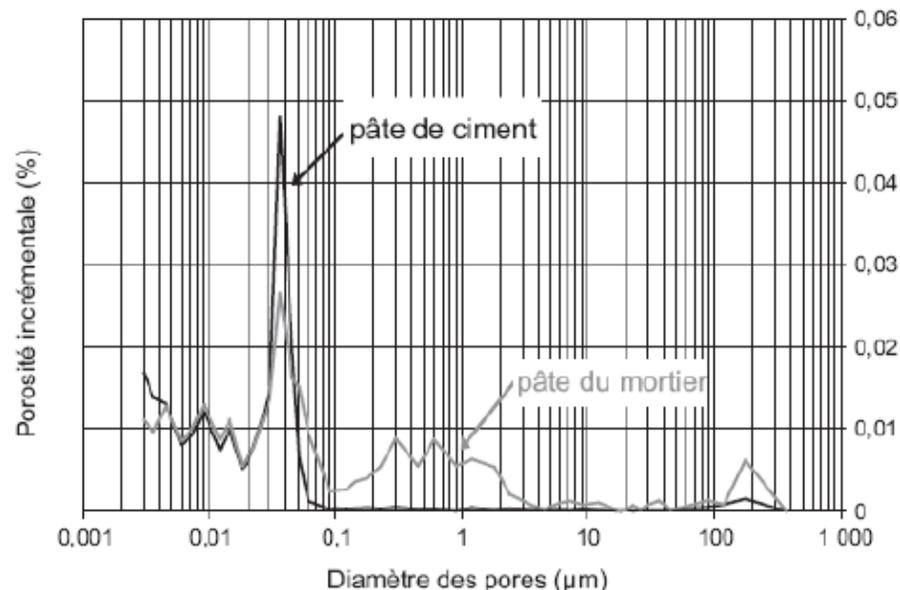
Figure VI-5. Influence de la durée de l'hydratation sur l'évolution porosimétrique d'une pâte de ciment Portland de rapport E/C = 0,7 [73].

En présence de cendres volantes ou de laitier, la plus grande taille des pores est augmentée aux très jeunes âges, mais à plus long terme, leur effet se traduit par une diminution de la taille des plus gros pores. En effet, les réactions pouzzolaniques entraînent la formation de C-S-H secondaires qui réduit la porosité, ce qui est favorable vis-à-vis de la durabilité [74]. Pour ce qui est de la fumée de silice, son effet sur la porosité des bétons est bénéfique notamment sur l'auréole de transition à l'interface pâte-granulat [89].

### 1.7. Influence de l'auréole de transition :

Au voisinage des granulats (sable et gravillons), il existe une variation locale de la teneur en eau. Dans cette zone-là, l'arrangement des grains de ciment est perturbé par les surfaces des granulats et la pâte se trouve confinée dans des espaces réduits. Cette zone, d'une épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de micromètres pour les BHP contre environ 50  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  dans les BO avec  $E/L = 0,5$  à  $0,7$  est dénommée, comme nous l'avons déjà présentée précédemment, auréole de transition ou ITZ (Interfacial Transition Zone) [76 ; 77].

Elle se distingue du reste de la pâte par une porosité plus grossière et de larges cristaux. La Figure VI-6 ci-dessous met en évidence l'effet de l'interface pâte-granulat sur la porosité.



**Figure VI-6.** Structure poreuse d'une pâte de ciment de type CEM I et de la pâte d'un mortier confectionné avec le même ciment ( $E/C = 0,4$ , 3 mois) [78].

Il résulte de cet accroissement local de porosité une moindre résistance lorsque le béton est soumis à des sollicitations mécaniques. Les fissures s'amorcent ainsi de façon préférentielle au niveau de l'interface. Pour pallier à cette fragilité observée dans les BO et pouvoir atteindre des hautes performances, un renforcement de cette zone doit être apportée [79 ; 80 ; 81 ; 82].

L'incorporation de fumée de silice et la réduction du rapport E/L réduisent sa porosité mais aussi son épaisseur, et finalement sa fragilité.

Aïtcin (2003) considère même cette zone comme inexistante dans certains BHP. Ce phénomène s'explique par la densification de la structure du matériau apportée par l'ajout de la fumée de silice.

En outre, la nature pétrographique ainsi que la forme des granulats sont deux facteurs déterminants sur la qualité de l'interface pâte-granulats. En effet, les granulats calcaires réactifs en contact avec la pâte de ciment, contrairement à ceux neutres de type quartzeux, forment les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment, rendant ainsi le matériau plus résistant. Quant à la forme, l'ITZ est de meilleure qualité lorsqu'ils sont concassés ou semi-concassés [45].

## **2. Durabilité des BHP :**

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

Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton est l'un des facteurs 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 pour une longue période. L'échelle de temps à prévoir est de l'ordre de quelques centaines d'années jusqu'à des dizaines de milliers d'années. Ces échelles de temps rendent nécessaire une connaissance des mécanismes physico-chimiques qui sont à l'origine de la dégradation des propriétés chimiques, hydrodynamiques et mécaniques du béton.

### 2.1. Durabilité des bétons dans les eaux naturelles

L'agressivité des eaux naturelles est due :

- au pH (compris entre 4 et 6,5 suivant les cas) ;
- à la teneur en dioxyde de carbone agressif.
- à la dureté ou titre hydrotimétrique, qui correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux de l'hydrogène et des métaux alcalins :

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{autres cations métalliques Fe, Al, Mn, Sr}] \text{ (principalement } [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]) ;$$

- à la mobilité du milieu agressif.

Le processus d'altération correspond essentiellement à la lixiviation des ions  $\text{Ca}^{2+}$  de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et des silicates de calcium hydratés C-S-H (accompagnée de la dissolution plus tardive des phases AFm et AFt). Il conduit à une augmentation de la porosité et, dans les cas les plus graves, à la dégradation des propriétés mécaniques du matériau.

Les critères de résistance à l'agression par les eaux naturelles sont :

- la compacité du béton (perméabilité et diffusivité réduites) ;
- l'incorporation, aux ciments ou aux bétons, d'additions minérales qui abaissent la teneur en chaux et sont favorables à l'accroissement de compacité du matériau [83].

### 2.2. durabilité des bétons dans les eaux sulfatique

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Elles peuvent être de l'intérieur de béton ou bien de son extérieur.

#### 2.2.1. les sources externes

Ils sont présents dans le sol à une concentration assez faible. Elle varie en moyenne entre 0.01 et 0.05% du sol sec.

Les sulfates alluviaux et argileux sont également susceptibles de contenir des pyrites qui s'oxydent aux sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec formation d'acide sulfurique. Ce dernier, par réaction avec le carbonate de calcium finement répartie dans le sol, peut à son tour donner naissance à du gypse. Les sulfates présents dans les sols peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre : engrais, plantes à la surface du sol.

Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solubilité varie en fonction des conditions environnementales, elle dépend de la température et de la présence éventuelle d'autres sels. Dans des températures qui voisinent  $40^\circ\text{C}$  et en présence des chlorures de sodium, le gypse et l'anhydrite présentent une solubilité fortement accrue. Les eaux souterraines sont essentiellement chargées de sulfates alcalins et de sulfate de magnésium.

### **2.2.2. Les sources internes**

La présence des sulfates dans le béton peut être ramenée par deux facteurs :

- Une pollution accidentelle des granulats (déchets de plâtre par exemple).
- Utilisation de granulats gypseux. La teneur en soufre totale exprimée en  $\text{SO}_3$  des granulats est limitée en France à 0.4% par la norme NF P18-301.

Dans ce cas, le ciment utilisé dans la formulation du béton doit tenir compte de ce gypse, conformément à la norme NF P 15-319.

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite [84].

Il faut distinguer entre trois types d'ettringite (primaire, secondaire et différée).

### **2.2.3. Les mécanismes de dégradation par les sulfates**

Les modes d'action des sulfates dans les bétons sont complexes, nombreux et n'ont pas encore tous été identifiés.

Outre les constituants du béton, dont les produits d'hydratation (C-S-H et portlandite), trois composés qui se forment en présence de sulfates, jouent un rôle important dans les attaques sulfatiques externes : le gypse, l'ettringite, et dans certains cas, la thaumasite.

### **2.2.4. L'action chimique des sulfates**

Dans le cas de solutions à fortes teneurs en sulfates – supérieures à 1000 mg ou 8000 ppm de  $\text{SO}_4^{2-}$  – le gypse résulte de l'interaction entre les sulfates d'apport et la matrice cimentaire. Le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) est utilisé comme régulateur de prise et contenu dans le ciment. Il existe donc déjà dans le béton sain.

Celui qui se forme en présence d'une solution riche en sulfates résulte de la substitution des ions hydroxyde par les ions sulfate au niveau de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , selon la réaction suivante, dans le cas où le cation associé est l'ion sodium  $\text{Na}^+$  [84 ; 85].



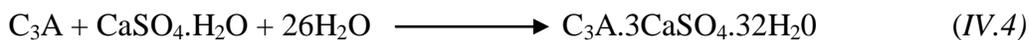
Le gypse ainsi produit peut alors réagir avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite,  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{30-32}$  (où c'est utilisé pour désigner CaO, A pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et H pour  $\text{H}_2\text{O}$ ) à partir de  $\text{C}_3\text{A}$  anhydre, selon la réaction (V.2). Mais l'ettringite peut également se former à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté  $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{H}_{13}$  ou du monosulfoaluminate de calcium  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$ .



Les sulfates de magnésium ont un mode d'action particulier, encore plus préjudiciable au béton car, en plus de la formation d'ettringite, selon les réactions (IV.3) et (IV.4), se produit la substitution des ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  par les ions magnésium  $\text{Mg}^{2+}$  au niveau des silicates de calcium hydrates C-S-H selon la réaction (IV.5).

Ceci entraîne la perte de leurs propriétés liantes et donc la perte de la résistance mécanique du béton, car les silicates de magnésium hydrates M-S-H n'ont pas de caractère liant. Cependant, l'hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  sous forme de brucite, produit de la réaction (IV.3), peut ralentir la pénétration des sulfates et former une couche protectrice, si celle-ci n'est pas détruite mécaniquement.

C'est ce qui peut expliquer le bon comportement de certains bétons dans l'eau de mer, pourtant riche en ions sulfate et magnésium [86].



Le mode d'action des sulfates dépend donc assez étroitement du cation associé. Le sulfate de sodium est très soluble et entraîne la formation de gypse et d'ettringite expansive, dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration en sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$  et en aluminate tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  du ciment. Le sulfate de calcium, issu du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou de l'anhydrite  $\text{CaSO}_4$  est peu soluble et dégrade le béton par formation d'ettringite expansive.

Au cours de ces processus de dégradation, la solubilité des différents précipités quantifiée en chimie de solutions aqueuses par le produit de solubilité, a un rôle majeur. Ainsi, selon les concentrations présentes, les ions resteront en solution ou précipiteront, si leurs concentrations dépassent la solubilité maximale. Les effets de tels phénomènes peuvent être assez complexes, dans la mesure où un même cation par exemple, peut intervenir dans plusieurs équilibres de précipitation et dissolution. La formation d'un précipité peut ainsi conduire à la dissolution d'un autre, selon les valeurs de leurs produits de solubilité : le précipité dont la solubilité est la plus faible se forme préférentiellement à un solide de solubilité plus élevée.

### **2.3. Durabilité dans les eaux marines**

L'agressivité de l'eau de mer est faible lorsque le béton est totalement immergé. Les attaques les plus importantes ont lieu dans les zones de marnage ou d'aspersion qui sont les zones de grandes concentration en sels ou les actions chimiques se combinent aux actions physiques : cycle humidification-dessiccation, choc, érosion, aux quelles peuvent venir s'ajouter les phénomènes de corrosion des armatures due à l'action des armatures [87].

#### **2.3.1. Composants agressifs du milieu marin**

Les facteurs agressifs du milieu marin sont multiples, on distingue quatre catégories de facteurs :

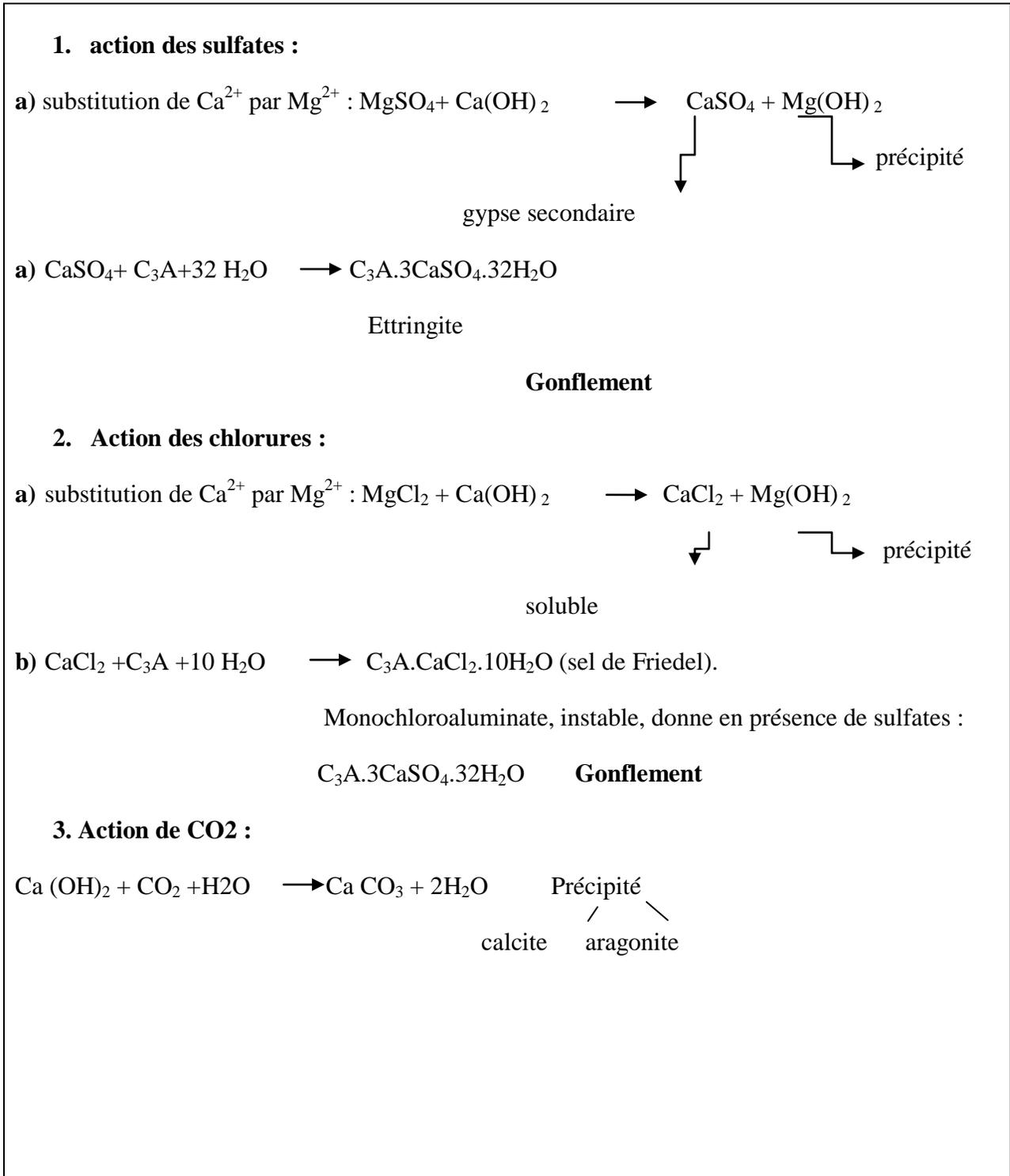
- ✓ Facteurs chimiques : l'eau de mer renferme des ions variés dont les effets ne sont pas forcément cumulatifs.
- ✓ Facteurs qualifiés de « géométriques » : les fluctuations du niveau marin (marées, tempêtes, ...) font que telle partie de construction peut être continuellement émergée ou alternativement immergée ou émergée.
- ✓ Facteurs physiques : dans les parties émergées et en climat rigoureux, il peut se produire des phénomènes de gel-dégel. Dans les mers et océans au climat chaud, la température est un paramètre d'activation des réactions de détérioration.
- ✓ Facteurs mécaniques : l'énergie cinétique des vagues et des matériaux solides qu'elles transportent, dans certains cas les chocs de glaces flottantes, constituent des causes d'érosion et de fissuration des bétons qui favorisent les attaques chimiques ultérieures

**2.3.2. Mécanismes d'attaque par les composants agressifs de l'eau de mer**

Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes faisant appel à différents mécanismes :

- ❖ dissolution-lixiviation,
- ❖ réactions d'échange de bases,
- ❖ précipitation de composés insolubles,
- ❖ cristallisation de sels expansifs.

Tableau V-1. Action de l'eau marine sur le béton [2].



### 3. Facteur influençant la durabilité des BHP:

#### 3.1. Facteurs internes

##### 3.1.1. Porosité du béton :

La microstructure des bétons présente une porosité de 10 à 12 % due à la texture même des hydrates mais aussi à la structure des grains. Ces derniers présentent des capillaires de dimensions plus importants, mais ne dépassent pas un diamètre de quelques microns. Les pores des hydrates sont 10 à 100 fois plus petits.

Le béton comme beaucoup de roches naturelles, est traversé d'une multitude de canaux très fins et de canaux capillaires, par lesquels se font les échanges avec le milieu extérieur. La première condition de durabilité, est donc que le volume de ces capillaires soit le plus réduit possible. La réduction de la porosité du béton dépend principalement de sa conception et de sa mise en œuvre.

Deux facteurs sont prépondérants dans la conception d'un béton de faible porosité :

- une faible teneur en eau.
- une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actifs en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les granulats.

Il faut souligner l'importance de la mise en œuvre du béton sur ses propriétés : un malaxage efficace et une vibration appropriée [2].

##### 3.1.2. Fissuration

Les principales causes de fissuration sont les suivantes :

- ✓ Retrait de pâte de ciment.
- ✓ Conditions thermiques.
- ✓ Causes mécaniques.

Dans les conditions normales, les armatures enrobées de béton sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la réaction à la surface du métal, d'une pellicule protectrice de ferrite  $\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$  [2].

Plusieurs agents peuvent neutraliser cette protection : le gaz carbonique, les chlorures et les sulfates mais aussi l'eau pure. La carbonatation s'affiche comme l'un des principaux phénomènes qui peuvent neutraliser la couche de protection. En effet en présence du gaz carbonique de l'air, la chaux libre de la pâte cimentaire se carbonate.

### **3.2. Facteur externes**

#### **3.2.1. Environnement agressif**

Le béton est souvent exposé aux agressivités de l'environnement externe, sa structure plus ou moins poreuse facilite le transport des ions des différentes solutions environnantes à l'intérieur de sa structure. La migration des agents agressifs externes tels que les ions chlorures, les sulfates ou bien le gaz carbonique peut engendrer des détériorations remarquables de comportement de béton.

#### **3.2.2. Ambiance hevernale**

Il existe deux phénomènes qui peuvent être à l'origine des altérations du béton :

- Une succession des phases de gel et dégel.
- L'action des sels de déverglaçage.

Le mécanisme d'altération s'explique, dans le premier cas, par l'accroissement des pressions dans les capillaires, dues au mouvement de l'eau vers les fronts de gel d'eau interne, le second cas, par l'action des sels.

#### **3.2.3. Vieillessement du béton**

Sans mettre réellement en cause la durabilité, le vieillissement de la surface visible du béton reste un facteur préjudiciable sur le plan esthétique. Les salissures sont souvent dues à la présence de mousses et de lichens auxquels s'ajoute le dépôt de diverses poussières. Il convient simplement de souligner que, comme tous les matériaux le béton subit un vieillissement qui doit être considéré comme naturel, l'entretien des ouvrages en béton est donc une opération qui doit être revue, au même titre qu'elle l'est pour tous les ouvrages dont on souhaite conserver les qualités esthétiques[85].

# CHAPITRE 5

## PARTIE PRATIQUE

## 1. Caractérisation des matériaux utilisés :

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

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

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

### 1.1. Le ciment

Le ciment utilisé est le ciment portland CEM II /B 42 ,5 provenant de l'usine ACC de LAFARGE-Algérie dont les compositions chimique et minéralogique ainsi les caractéristiques physico-chimiques sont présentées respectivement dans les tableaux V-1et V-2 ; la fiche technique du ciment est donnée en annexe A.

*Tableau V-1.composition minéralogique du ciment.*

constituant	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO .L	gypse	calcaire
Teneur %	57	19	05	13	01	05	18

*Tableau V-1.composition chimique et caractéristique physico-mecanique du ciment.*

<i>Composants chimiques</i>	<i>%</i>	<i>Caractéristiques physiques</i>
<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>18,13</i>	<i>Début de prise : 150 – 180 min</i>
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>4,42</i>	<i>Fin de prise : 3 h 30 – 4 h 30</i>
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>3,03</i>	<i>Masse spécifique : 3,1 g/cm<sup>3</sup></i>
<i>CaO</i>	<i>60,78</i>	<i>SSB : 3555 cm<sup>2</sup>/g</i>
<i>MgO</i>	<i>1,84</i>	<i>Chaleur d'hydratation : 456,60 (j/g)</i>
<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>2,34</i>	
<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>0,64</i>	<i>Résistance à la compression (MPa)</i>
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>0,13</i>	<i>7j : 36,74</i>
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	<i>0,10</i>	<i>14j : 41,07</i>
<i>TiO<sub>2</sub></i>	<i>0,23</i>	<i>28j : 45,07</i>
<i>Perte au feu</i>	<i>8,36</i>	

## 1.2.Les granulats

### a. Le sable

Pour la confection de notre béton, on a utilisé le sable de Baghliâ d'un module de finesse (Mf = 3,86) corrigé avec celui de Boussaâda (Mf = 0,96). Le tableau V-3, résume les caractéristiques physico-mecaniques des sables utilisés.

Un module de finesse élevé est préférable pour le sable utilisé en BHP en vue de réduire la quantité d'eau utilisée [86].

*Tableau V-3. caractéristique physiques des sables utilisés.*

Types de sables	M <sub>va</sub> (kg/l)	M <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ESP (%)	MF
Sable de Boussaâda	1.48	2.66	68	0.96
Sable De baghlia	1.53	2.73	73.2	3.86

Le module de finesse prédéfini de sables à utiliser étant 2.8, une correction de sable grossier est faite.

$$S_1 = \frac{2.8 - 0.96}{3.86 - 0.96} \times 100 = 63.44\% \quad S_2 = \frac{3.86 - 2.8}{3.86 - 0.96} \times 100 = 36.56\%$$

On aura donc un mélange des deux sables contenant 63.44% de sable grossier de Baghlia et 36.56% de sable fin de Boussaâda.

### b. Le gravier

Pour la confection de nos échantillons, le gravier utilisé et de provenance de Sétif, il est d'origine calcaire. Les caractéristiques physiques et mécaniques des graviers utilisés sont présentées dans le tableau V-4.

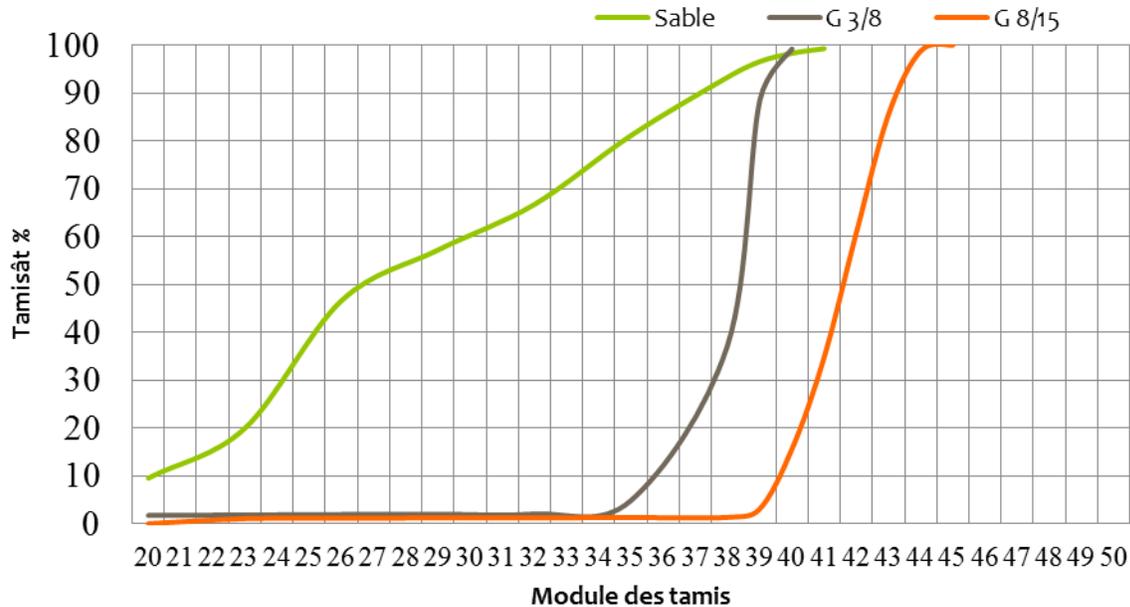
Des études ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient Los Angeles inférieur à 15[87].

Des études récentes recommandent un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [88].

*Tableau V-4. Caractéristiques des graviers.*

Types de gravies	M <sub>va</sub> (kg/l)	M <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Los Angeles
Graver 3/8	1.36	2.63	26.70
Graver 8/15	1.45	2.63	25.5

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats par voie sèche selon la norme NF EN 932-2 est représentée dans la figure V-1.



*Figure V-1. Analyse granulométrique par voie sèche NF EN932-2.*

### 1.3.L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour gâcher notre béton est l'eau potable de robinet, on a pris la précaution de constater sa propreté et son odeur, visuellement, elle apparaissait bonne pour être utilisé.

### 1.4.Le superplastifiant

Le groupe GRANITEX nous a fournis le superplastifiant nommé MEDAFLOW 40HR, c'est un superplastifiant réducteur d'eau non chloré, à base de polycarboxylates modifiés et prêt à l'emploi. Il se présente sous la forme d'un liquide ocre claire. Il assure un maintien de maniabilité jusqu'à 1h30.

Il est utilisé pour la fabrication de :

- Béton plastique
- Béton à faible rapport E/C avec ou sans fumée de silice
- Bétons pompés sur longues distances

Dans les bétons fluides, MEDAFLOW 40HR améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.

La fiche technique de MEDAFLOW 40HR est présentée en annexe B

### 1.5. La poudre de verre

Provenant essentiellement de verre sodocalcique, la poudre de verre est obtenue après le broyage de débris de verre ramassés ; le broyage dure 2h pour aboutir à la finesse voulue. Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de verre sont illustrées dans les tableaux V-4, V-5.

*Tableau V-4. composition chimique de la poudre de verre.*

composant	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	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
%	72,84	0,98	0,55	9,66	1,76	0,25	0,43	12,69	0,01	0,04	0,79

*Tableau V-5. caractéristique physique de la poudre de verre.*

<b>Caractéristiques</b>	
<b>Masse Volumique (g/l)</b>	2,5
<b>Surface Spécifique (cm<sup>2</sup>/g)</b>	8000
<b>Couleur</b>	Blanc grisâtre
<b>Activité pozzolannique</b>	28,5 g (Ca(OH) <sub>2</sub> /g (PV)

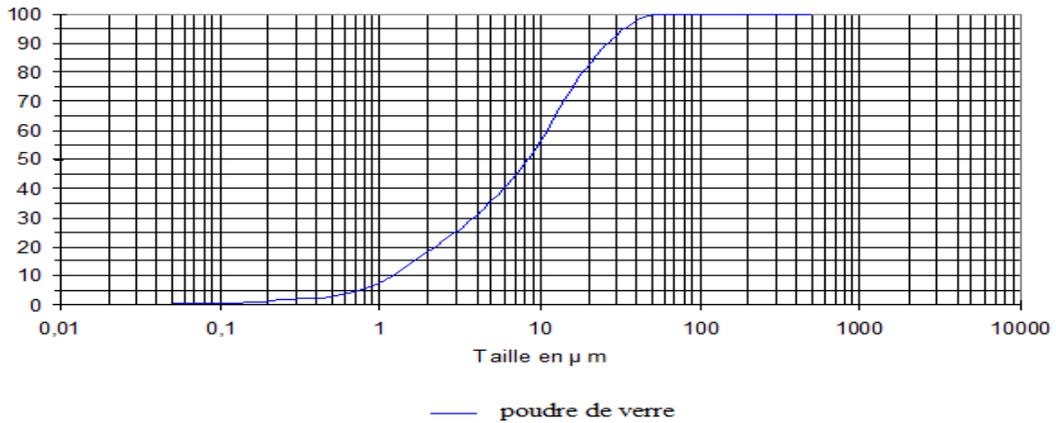


Figure V-2. Analyse granulométrique de la poudre de verre

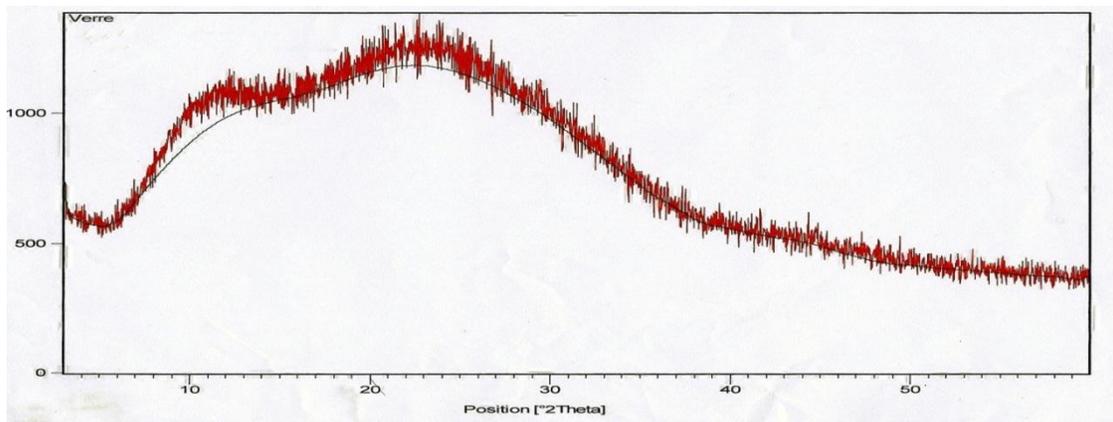


Figure V-3. Radiogramme DRX de la poudre du verre.

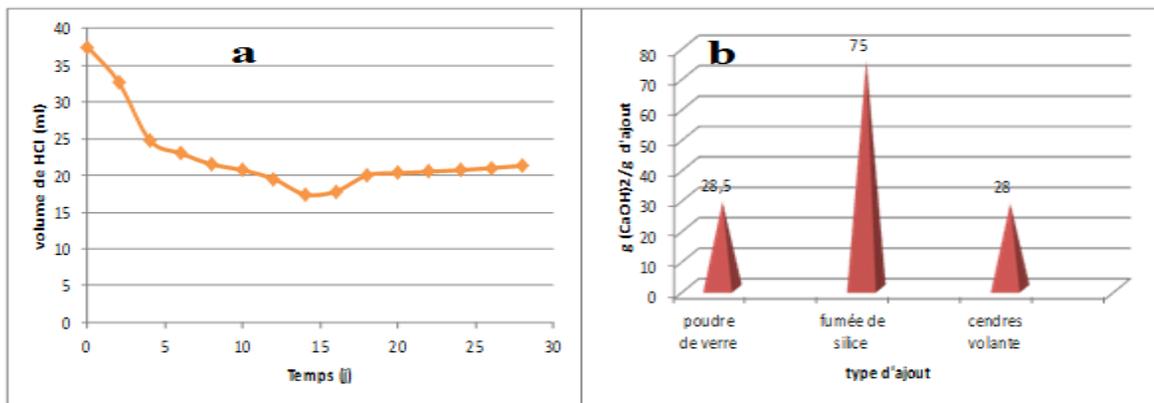


Figure V-4. a).Volume de HCl consommé au titrage de la solution de chaux .b).Activité pouzzolanique de la poudre de verre.

## 2. Méthodes et expériences

Durant notre étude nous avons comparé les résultats obtenus pour le béton à base de poudre de verre (BPV) par ceux obtenus par le béton de référence (BR), cette abréviation sera donnée aux deux bétons le long de cette étude.

La numérotation 1, 2 et 3 sera respectivement attribuée à l'eau de robinet, eau séléniteuse et l'eau de mer qui sont les milieux de conservation des éprouvettes.

Pour observer l'effet de l'ajout de la poudre de verre et déduire le bon dosage, on a procédé à des essais sur des éprouvettes de mortier à consistance normale. Les résultats des essais mécaniques sont illustrés dans le tableau V-6.

### 2.1. Formulation des bétons

#### 2.1.1. Optimisation de la pâte cimentaire par les méthodes des coulis

Les bétons à hautes performances (BHP) sont caractérisés par leur résistance élevée à 28 jours (60 à 100 MPa). Pour atteindre cette résistance, ils sont fabriqués généralement à base de ciment CEM-I 52,5 avec un rapport E/C qui doit être le plus faible que possible ; la perte en maniabilité étant compensée par l'adjonction d'un superplastifiant et l'ajout des ultra- fines tel que la fumée de silice. La formule de bolomey largement utilisée depuis de nombreuses années, montre bien l'influence du rapport E/C sur la résistance finale de béton.

$$f_c = k_b \times f_{mc} \times \left[ \frac{c}{E+V} - 0,5 \right] \quad (V.1)$$

Où:

- $f_c$ : résistance du baton.
- $f_{mc}$ : résistance du ciment.
- $k_b$  : coefficient de Bolomey.
- $C, E$  : masse du ciment et de l'eau.
- $V$  : volume d'air exprimé à la même masse de volume d'eau.

Sur le plan économique, l'utilisation d'un adjuvant dans le béton fait augmenter son prix ce qui nous pousse à optimiser son dosage afin d'éviter tous gaspillage. D'autre part, les BHP sont mis en œuvre avec une consistance très plastique voir fluide (slump de 18 à 20 cm), il convient d'adapter la formulation de matériau, en particulier d'optimiser le couple (ciment –plastifiant).

Par ailleurs on doit toujours s'assurer de la compatibilité du ciment et du superplastifiant, en vérifiant le maintien de l'ouvrabilité dans le temps.

### **2.1.2. Principe de la méthode**

Supposant que l'adjuvant s'adsorbe essentiellement sur la partie fine des agrégats utilisés, on va réduire la taille des granulats susceptible d'interagir avec l'adjuvant à une dimension de 2mm c.-à-d. utiliser un béton de réduction dans le  $D_{max}$  est de 2mm.

Le comportement rhéologique de ce béton de réduction va nous donner une image globale sur celui de béton étudié.

La manipulation se fera en 3 étapes :

#### ▪ **Étape 1 : formulation d'un BHP de référence**

- Le béton de départ est formulé avec des constituants en quantité et qualité susceptibles d'occasionner les performances souhaitées ;
- On détermine le squelette granulaire avec la méthode DREUX-GORISS;
- On fixe un dosage en superplastifiant à 1,5% en extrait sec par rapport au ciment ;
- Pour terminer on ajuste la quantité d'eau pour obtenir un affaissement au cône  $\leq 20$  cm.

#### ▪ **Étape 2 : établissement de la courbe de saturation du superplastifiant**

- À partir du béton de référence, on déduit la proportion du coulis respectif et on fait une mesure de temps d'écoulement au cône de Marsh ( $T_0$ ).
- En faisant varier uniquement le dosage en superplastifiant, on procède à d'autre mesure sur les coulis confectionnés.
- On déduira le dosage optimal du graphe [temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant].

#### ▪ **Étape 3 : détermination du dosage en eau**

- Avec le dosage en superplastifiant retenu, on fait varier le dosage en eau pour retrouver le temps d'écoulement de référence ( $t_0$ )
- On déterminera ainsi le dosage en eau optimum.

#### ▪ **Étape 4 : vérification du maintien de la fluidité.**

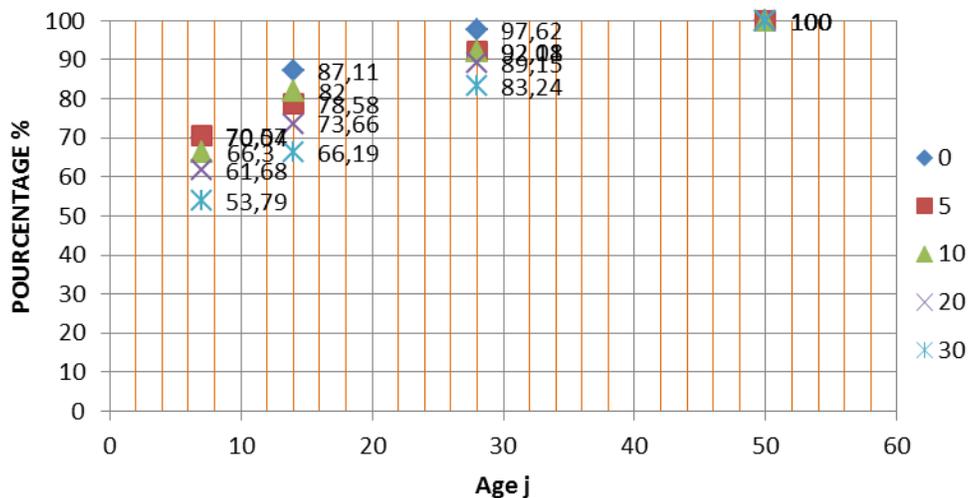
**2.1.3. Optimisation du dosage en poudre de verre**

L’incorporation de la poudre de verre dans notre béton s’est effectuée par substitution d’une partie de ciment. Pour parvenir à un dosage adéquat on a réalisé des essais de compression sur des mortiers normalisés à différentes teneur en poudre de verre. Comme il apparait dans la figure V-5, la substitution du ciment par la poudre de verre à 30 % de son poids présente le meilleur taux d’accroissement des résistances entre 28j et 90j,

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau VI-1.

**Tableau V-10.** Résistance à la compression des éprouvettes de mortier (MPa)

Poudre de verre	Ages			
	7	14	28	90
0%	37,57	41,95	46,46	47,59
5%	33,73	37,16	43,55	47,28
10%	31,09	38,45	43,18	46,89
20%	27,64	33,01	39,95	44,81
30%	23,79	29,27	36,81	44,22



**Figure V-5.** Evolution des résistances à la compression des mortiers avec différents dosages en poudre de verre.

### 2.1.4. Optimisation de squelette granulaire par la méthode DREUX-GORISS:

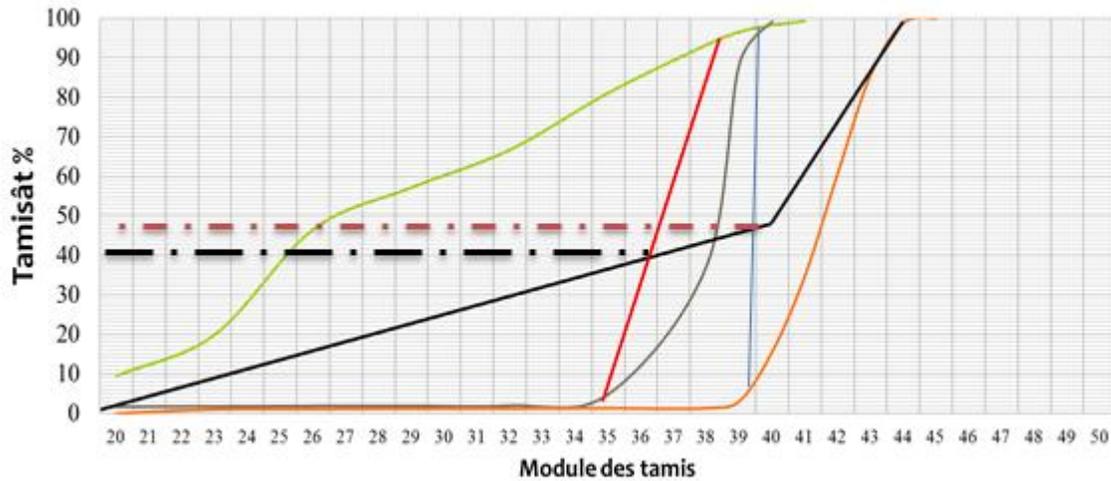


Figure V-6. optimisation de dosage pondéral des granulats par la méthode DREUX-GORISS.

La courbe granulaire de référence OAB, est déterminée par trois points : l'origine (0,0), B (D max, 100% tamisât) et un point de brisure A (X, Y), dont les coordonnées sont :

$$\text{L'abscisse } X=16/2=8 \quad \text{si } D_{\max} \leq 25\text{mm}$$

$$\text{L'ordonnée } Y=50-\sqrt{D_{\max}}+k ; \text{ d'où } Y=44.8$$

D'après la courbe granulométrique (Figure.VI-6) on obtient :

Sable corrigé	→	40%
Gravier 3/8	→	8%
Gravier 8/15	→	52%

On prend le coefficient de compacité égale à  $\gamma = 0,825 - 0,01 = 0,815$ .

Le dosage volumétrique des constituants est :

- volume absolu total.....  $V = 1000 \times \gamma = 815 \text{ l}$
- volume absolu de ciment.....  $V_c = 400 / 3.1 = 129 \text{ l}$
- volume absolu des granulats .....  $V_g = 815 - 129 = 686 \text{ l}$

Le dosage pondéral des matériaux secs pour un  $\text{m}^3$  (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) est :

- ♦ le sable.....  $0,4 \times 686 \times 2.55 = 700 \text{ kg}$
- ♦  $G_{3/8}$ .....  $0,08 \times 686 \times 2.63 = 148 \text{ kg}$
- ♦  $G_{8/15}$ .....  $0,52 \times 686 \times 2.63 = 938 \text{ kg}$
- ♦ Ciment.....  $400 \text{ kg}$
- ♦ Eau.....  $120 \text{ kg}$

La composition finale de béton de référence est la suivante :

- ❖ Ciment CPJ CEM II 42,5      C = 400 kg .....V = 129 l
- ❖ Sable                                S = 700 kg .....V = 247,4 l
- ❖ Gravillon (3/8 + 8/15)      G = 1086 kg .....V = 412,92 l
- ❖ Eau                                    E = 120 l
- ❖ Superplastifiant en extrait sec    A = 1,5% C .....V = 5,94 l
- ❖ Sable  $\leq 2\text{mm}$        $m_{S2\text{mm}} = m_s \times 0,75 = 525 \text{ kg}$     V = 205 l

NB : le pourcentage de sable tamisé à 2mm est déduit de la courbe granulométrique, il correspond au tamisât sur tamis 2mm. L'étude sera portée sur le béton de réduction ou coulis composé seulement avec de l'eau ; du ciment et du sable passant au tamis 2mm

### 2.1.5. Optimisation de dosage en adjuvant par la méthode des coulis

➤ Calcul du volume de béton de réduction :

$$B_{\text{béton de réduction}} = V_c + V_e + V_{s2\text{mm}} = 0,129 + 0,205 + 0,120 = 0,454 \text{ l}$$

Les proportions des volumes des composants sont :

$$V_e = \frac{0,12}{0,454} \times 100 = 26,43\% \quad . \quad V_c = \frac{0,129}{0,454} \times 100 = 28,41 \%$$

$$V_{s2\text{mm}} = \frac{0,205}{0,454} \times 100 = 45,15 \%$$

Pour la confection de 1,5 l de coulis, les quantités nécessaires sont mentionnées dans le tableau V-6.

**Tableau V-6.** composition de 1,5 l de coulis.

composant	Volume (l)	Masse (kg)
Ciment	$1,5 \times 28,41/100 = 0,42$	1,32
Sable $\leq 2\text{mm}$	$1,5 \times 45,15/100 = 0,68$	1,72
Eau	$1,5 \times 26,43/100 = 0,39$	0,39

Le dosage en adjuvant pour le coulis de référence étant égal à 1,75% du poids du ciment, les quantités massique et volumétrique sont calculées comme suite :

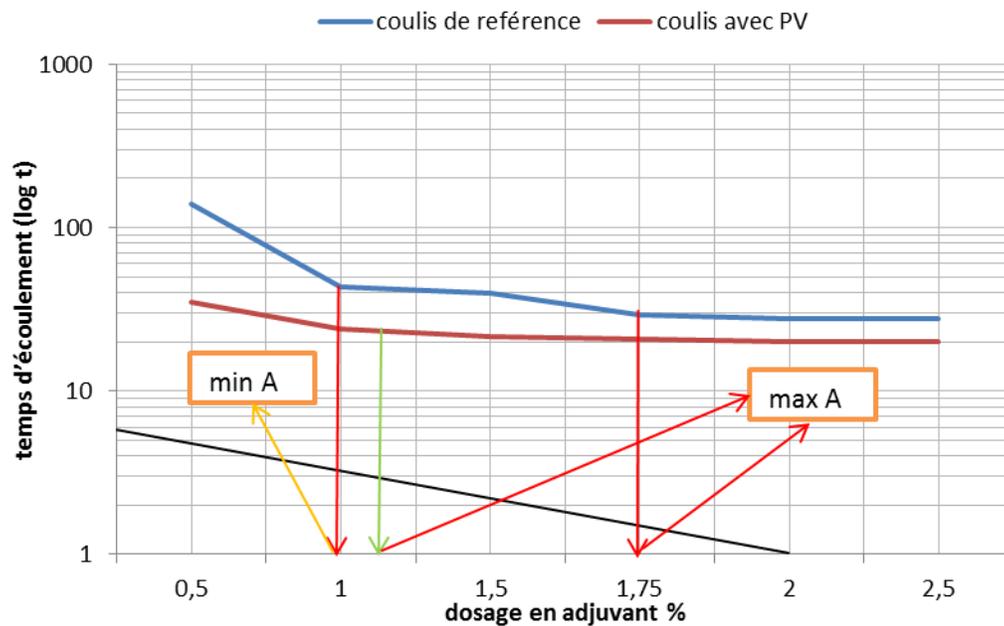
$$A_{\text{sec}} = 1,5 \times 1000 \times 1,32 = 19,8 \text{ g} \quad \text{donc} \quad A_{\text{liquide}} = 19,8/0,42 = 47,14 \text{ g.}$$

**Tableau V-7.** composition des coulis pour V=1,5 l.

<i>composant</i>	<i>Coulis de reference</i>		<i>Coulis avec poudre de verre</i>	
	<i>masse</i>	<i>volume</i>	<i>masse</i>	<i>volume</i>
<i>ciment</i>	<i>1, 32kg</i>	<i>0,42l</i>	<i>0,924kg</i>	<i>0,29l</i>
<i>sable</i>	<i>1,72kg</i>	<i>0,68l</i>	<i>1,72kg</i>	<i>0,68 l</i>
<i>eau</i>	<i>0, 39kg</i>	<i>0,39l</i>	<i>0,39kg</i>	<i>0,39 l</i>
<i>Adjuvant (liquid)</i>	<i>47, 14g</i>	<i>42,58ml</i>	<i>47148mg</i>	<i>42,58mg</i>
<i>Poudre de verre</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,396kg</i>	<i>0,15 l</i>

**Tableau V-8.** Temps d'écoulement des coulis à travers le cône de Marsh.

<i>essai</i>	<i>Dosage en adjuvant</i> <i>%</i>	<i>Temps d'écoulement</i>	
		<i>Coulis de référence</i>	<i>Coulis avec 30% poudre de verre</i>
<i>1</i>	<i>0,5</i>	<i>139</i>	<i>34,79</i>
<i>2</i>	<i>1</i>	<i>43,18</i>	<i>23,86</i>
<i>3</i>	<i>1,5</i>	<i>39,68</i>	<i>21,42</i>
<i>4</i>	<i>1,75</i>	<i>28,96</i>	<i>20,72</i>
<i>5</i>	<i>2</i>	<i>27,58</i>	<i>20</i>
<i>6</i>	<i>2,5</i>	<i>27,55</i>	<i>19,98</i>



*Figure V-5. Ecoulement des coulis en fonction du dosage en superplastifiant.*

La figure V-5 nous renseigne sur le dosage optimal en adjuvant ; en effet, la droite qui passe par le point 5 en coordonnée et 2 en abscisse est tangente aux courbes d'écoulement des coulis en deux points min A et max A ; le dosage optimal correspond au point max A.

Donc les dosages pour les deux coulis sont :

- ❖ Coulis de référence :  $A=1,75\%$
- ❖ Coulis avec poudre de verre :  $A= 1,1\%$ .

On aura alors:

- ✓ Pour le béton de référence :

$$A_{sec} = \frac{1,75 \times 400}{100} = 7 \text{ kg/m}^3 \qquad A_L = \frac{7}{0,42} = 16,66 \text{ kg/m}^3$$

D'où la quantité d'eau réelle sera :

$$e_r = e - (A_L - A_{sec}) - \frac{1,5}{100} e = 108,54 \text{ L}$$

✓ Pour le béton avec poudre de verre :

$$A_{sec} = \frac{1,1 \times 400}{100} = 4,4 \text{ kg/m}^3$$

$$A_L = \frac{4,4}{0,42} = 10,47 \text{ kg/m}^3$$

D'où la quantité d'eau réelle sera :

$$e_r = e - (A_L - A_{sec}) - \frac{1,5}{100} e = 112,13 \text{ L}$$

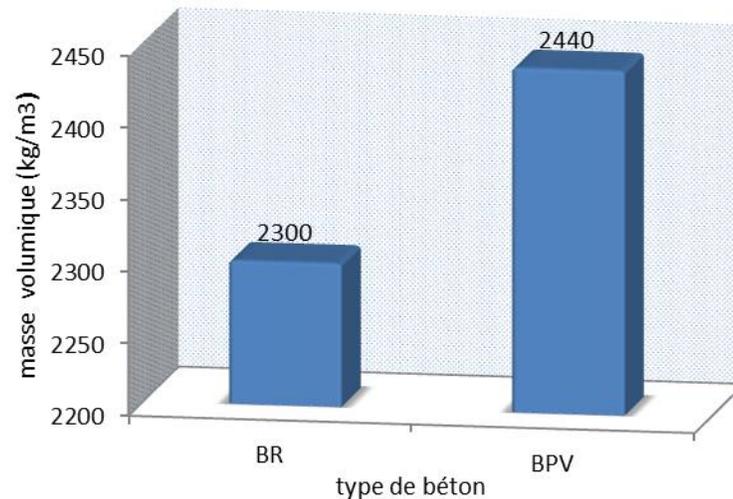
Les compositions finales des deux bétons sont présentées dans le tableau V-9.

**Tableau V-9.** Compositions des bétons optimisées.

Composants	Béton de référence (BR) en kg/m <sup>3</sup>	Béton avec poudre de verre (BPV) en kg/m <sup>3</sup>
Ciment	400	280
Gravier 3/8	148	148
Gravier 8/15	938	938
Sable	700	700
Eau	120	120
Medaflow 40HR (extrait sec)	7	4,4
Poudre de verre	0	120

### 3. Comportement de béton à l'état frais

#### 3.1. La masse



**volumique**

*Figure V-6. Evolution de la masse volumique*

Tandis que la masse volumique du béton de référence est  $2300 \text{ kg/m}^3$ , on observe une augmentation de celle du béton avec poudre de verre à  $2440 \text{ kg/m}^3$  (Figure 1), cela est dû à l'effet de remplissage de la poudre de verre de surface spécifique Blaine élevée ( $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ ), ceci induit un compactage du béton d'où une densité accrue.

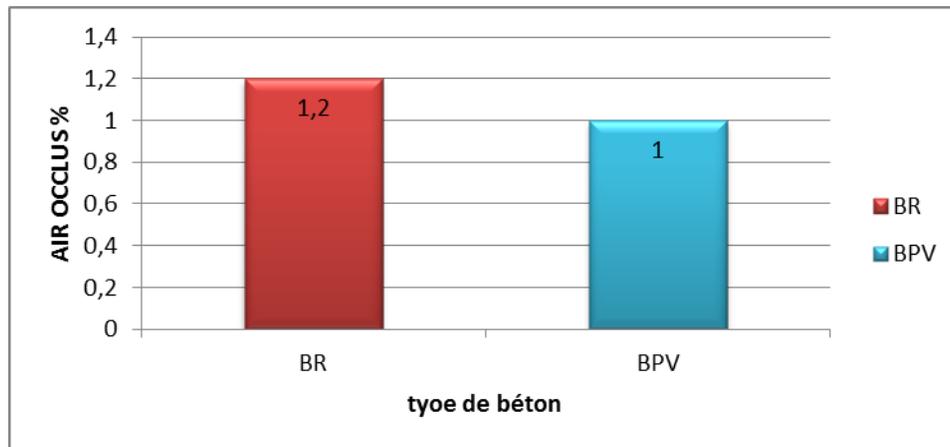
#### 3.2. La maniabilité

La figure V-4 nous renseigne sur le comportement des deux bétons pendant l'écoulement ; l'ajout de la poudre de verre influe positivement sur l'écoulement du béton tout en maintenant constant la quantité d'adjuvant et le même rapport E/C pour les deux échantillons. Ce résultat est dû à l'effet de correcteur rhéologique que joue la poudre de verre [87].

#### 3.3. L'air occlus

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un mortier ou un béton le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange [88]. Il est possible d'évaluer la quantité d'air enfermée lors de remplissage par la méthode décrite par la norme NF 413-2 et EN 459-2. La teneur en air occlus d'un BHP est généralement comprise entre 1% et 1,3%, ce résultat est vérifié dans les deux bétons testés.

La poudre de verre utilisée est finement broyée donc elle remplit les pores et libèrent l'eau emprisonnée, ainsi l'air occlus diminue.



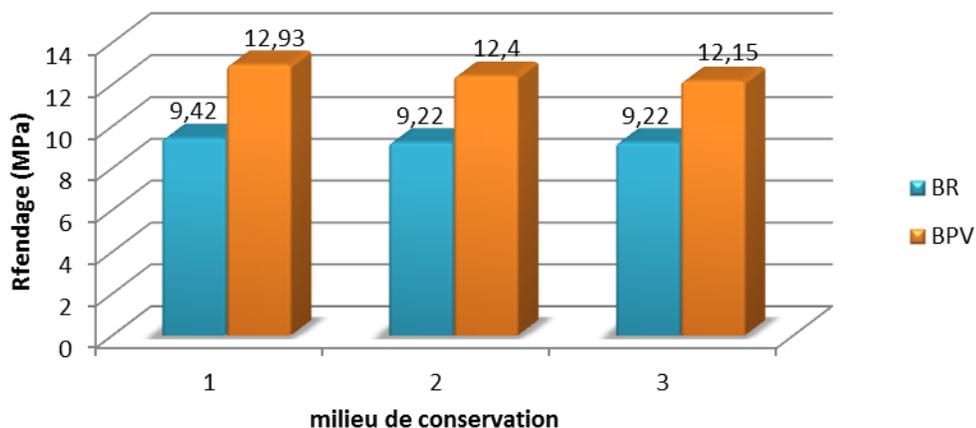
*Figure V-7. Evolution de la teneur en air occlus.*

#### 4. Comportement de béton à l'état durcis

Les éprouvettes confectionnées, après démoulage elles sont conservées dans les différents milieux de cure (eau de robinet, eau séléniteuse et eau de mer). Notons que la température du milieu environnant extérieur était stabilisée à 20 °C, les essais mécaniques sont effectués aux échéances 7, 14, 28 et 90 jours.

##### 4.1. Résistance à la traction par fendage

L'essai de traction par fendage est réalisé sur des éprouvettes cylindriques (16x32) après un séjour de 28 jours dans les différents milieux ; les résultats sont présentés dans la figure V-8.



*Figure V-8. Résistance à la traction par fendage.*

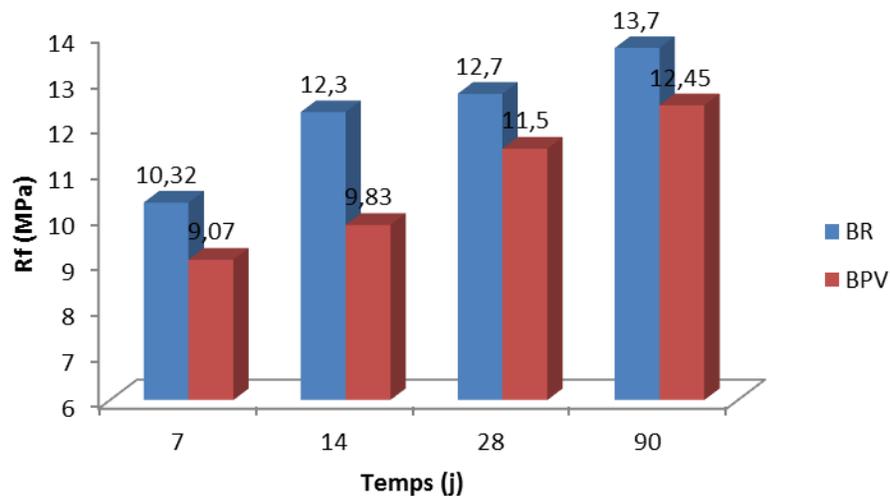
Les résultats obtenus affirment que plus le béton est compacté plus il est résistant. En effet, avec une finesse de  $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , la poudre de verre densifie d'avantage la matrice cimentaire générant ainsi une grande résistance mécanique. En outre, le pouvoir pouzzolanique de la poudre de verre ( $28,5 \text{ g Ca(OH)}_2/\text{g PV}$ ) lui permet de consommer la portlandite issue de la réaction d'hydratation du ciment. Ce qui donne naissance à des nouveaux C-S-H qui font densifier d'avantage la matrice cimentaire et occupent les pores libres, cela rend la structure plus compacte et plus résistante.

Il faut signaler que l'influence du milieu environnant sur le bon murissement des bétons est moins considérable par rapport à l'action de l'ajout cimentaire, cela peut être expliqué par la compacité des deux bétons due à l'usage d'un rapport  $E/C = 0,3$  pour le gâchage de béton.

Avec un rapport pareil, une compacité élevée est assurée, par conséquent la diffusion des agents agressifs à l'intérieur de la matrice est minime, ce qui amortit énormément l'influence des milieux environnants prétendus agressifs sur la qualité des bétons.

## 4.2. Résistances à la traction par flexion

### 4.2.1. Dans l'eau de robinet



**Figure V-9.** Résistance à la traction par flexion des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet.

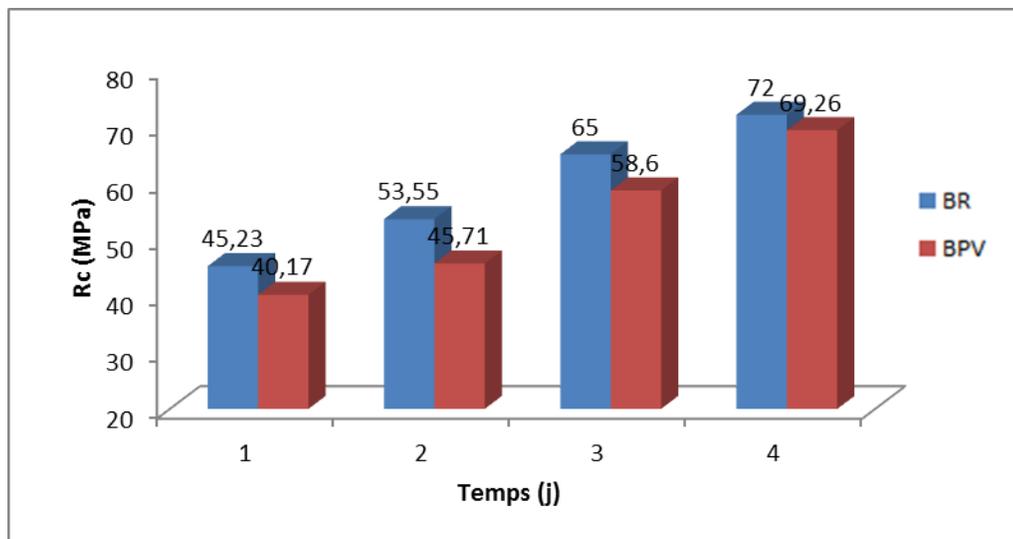


Figure V-10. Résistance à la compression des éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet

#### 4.2.2. Dans l'eau séléniteuse

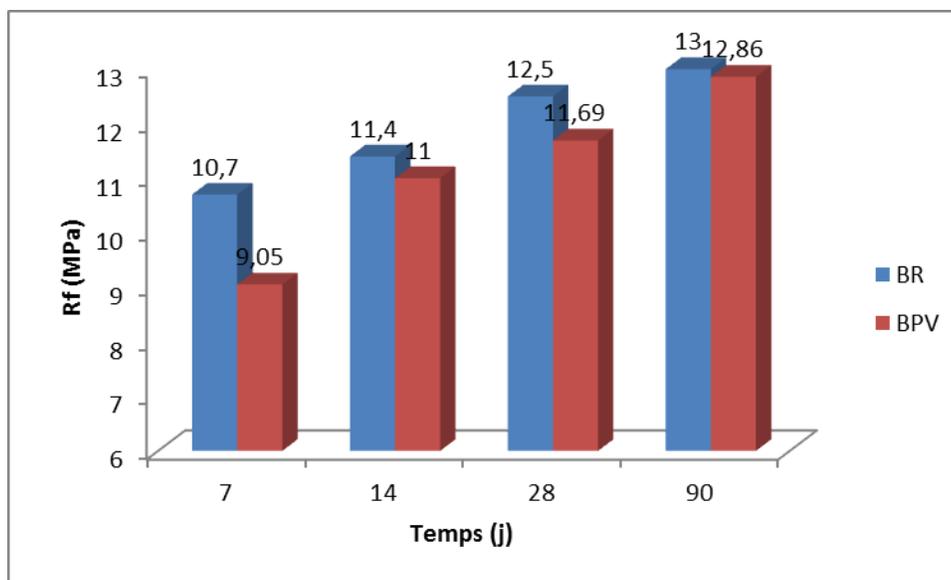
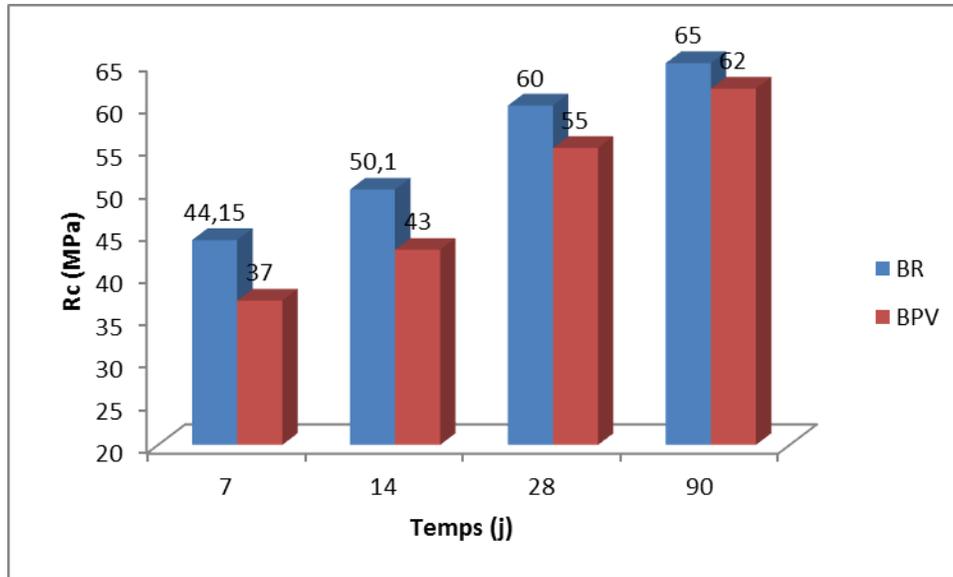
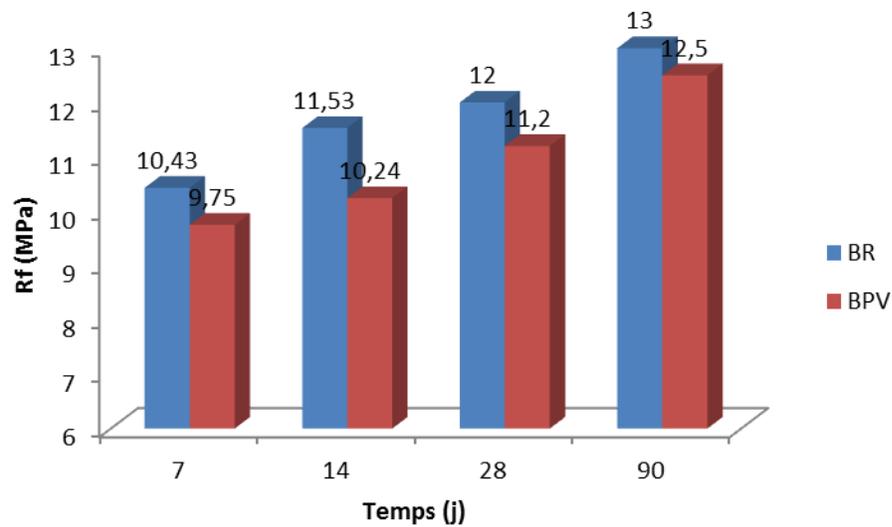


Figure V-11. Résistance à la traction par flexion dans l'eau séléniteuse.

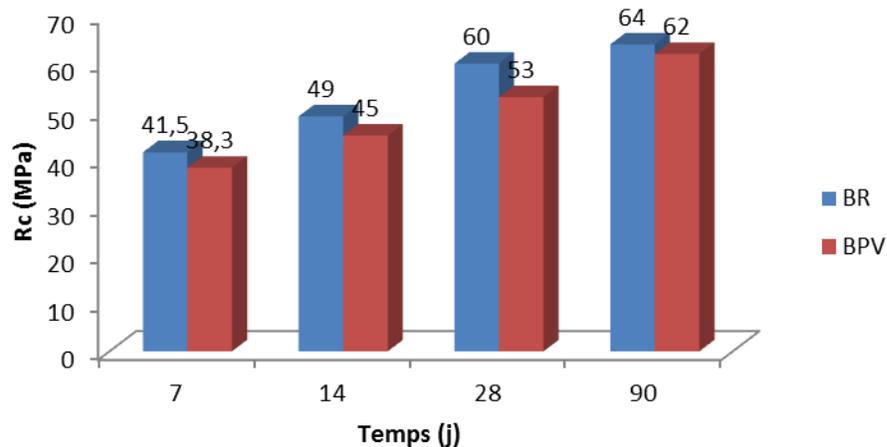


*Figure V-12.* Résistance à la compression dans l'eau seleniteuse.

#### 4.2.3. Dans l'eau de mer



*Figure V-13.* Évolution des résistances à la traction par flexion dans l'eau de mer.



*Figure V-14.* Évolution des résistances à la compression dans l'eau de mer.

#### 4.2.4. Discussion et interprétation

Les résistances mécaniques élevées représentent un bonus de la formulation des BHP, il se trouve aussi que c'est l'une des performances qui pourront nous renseigner sur la durabilité des bétons.

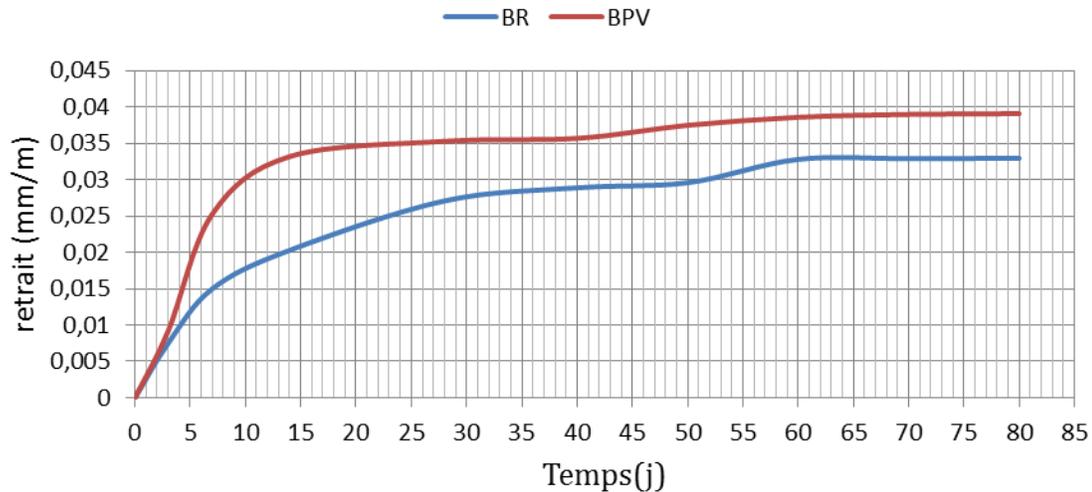
Les figures précédentes rassemblent les résultats de l'évolution des résistances mécaniques des bétons testés dans les trois milieux (eau de robinet, eau séléniteuse et l'eau de mer). Pour les échéances de 7 et 14 jours, le béton de référence (BR) s'affiche plus résistant que celui avec la poudre de verre (BPV) cela est due à la substitution de 30% de poids du ciment par la poudre de verre, ce qui influe sur l'hydratation du ciment ainsi sur le taux des produit de cette hydratation (C-S-H) éléments responsables des résistances de la matrice cimentaire.

Par contre, à partir de 28 jours le BPV développe une meilleure augmentation en résistances par rapport au BR ; cet exploit s'explique par le déclenchement des réactions pouzzolaniques de la poudre de verre, l'effet de remplissage et de densification de la matrice cimentaire a aussi apporté un gain de résistance pour le BPV.

En utilisant la poudre du verre sodocalcique issus essentiellement des débris de verre plat, le risque de déclenchement des réaction alcali-silice est majeur ce qui n'est pas le cas du « verre bouteille » qui contient des éléments qui stoppent ce type de réaction notamment le chrome, le lithium et l'oxyde de fer [89].

### 4.3. Le retrait

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules à alvéoles prismatiques (7x7x28 cm) munies de plots en laiton à leurs extrémités qui serviront à les positionner sur l'appareil de mesure. Elles sont entreposées dans une chambre à ambiance contrôlée : température ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) et en hygrométrie ( $55 \pm 5\%$ ). Les mesures sont effectuées, suivant un rythme adapté à la cinétique du phénomène observé, sur un rétractomètre digital de précision de  $\pm 0.02$  mm (figure V-18).



**Figure V-17.** Retrait totale des bétons testés.

Le retrait du béton est essentiellement dû à l'évaporation de l'eau libre contenue dans le béton et par l'hydratation de ses constituants dans le temps. Dans les bétons à très faible rapport E/C, dès que le ciment commence à s'hydrater, les capillaires fins commencent très vite à se dessécher en créant des contraintes de tension élevées [93]. Ces contraintes de tension se développent à un moment où la résistance de la pâte de ciment hydraté est faible, ce qui peut entraîner la fissuration du béton [89].

Généralement dans les bétons avec ajouts cimentaires substitués à une partie de ciment, le retrait doit être minimisé ce qui n'est pas le cas du béton avec ajout de la poudre de verre, ce comportement paradoxal peut s'expliquer comme suite :

- ♦ Les résistances mécaniques des pâtes des ciments hydratées diminuent et le retrait de séchage/gonflement augmentent proportionnellement avec la quantité d'alcalins rentrants dans la composition chimique et cela même avec une teneur optimale en  $\text{SO}_3$  [93].
- ♦ La diminution du pH par la consommation des ions  $\text{OH}^-$  et la neutralisation des charges négatives de la silice dissoute favorisent la polymérisation.

Le produit de réaction est alors un silicate alcalin gélatineux. La pénétration des alcalins dans la structure entraîne une augmentation de volume, réduit la force mécanique, augmente probablement le retrait de séchage et le gonflement du produit de réaction [90].

Ces deux derniers constats sont remarquables lors de l'utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment.

## 5. Etude de la durabilité des bétons à base de la poudre de verre

### 5.1. Pénétration des ions chlore

Le test rapide de perméabilité des ions chlore (RCPT) est réalisé selon la norme ASTM C 1202 après une cure de 90 jours. Ce test donne une indication de la pénétrabilité des ions chlore à travers le béton sous une différence de potentiel de 60 V.

La charge  $Q = I t$  (coulomb) la résistivité  $\rho = 2\pi e \frac{u}{i}$  ( $\Omega$  cm), tel que :

$e$  : l'épaisseur de l'éprouvette

$U$  : le potentiel La conductivité  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  (siemens)

Tableau V-10. Résultats de perméabilité aux ions chlore.

	Type de baton	I (mA)							Q (coulomb) 6 h	$\Delta T$ °C	$\rho$ $\Omega$ cm		$\Delta$	
											$10^3$		$10^{-3}$	
		1mn	1H	2H	3H	4H	5H	6 H			1mn	6 H	1mn	6 H
1	BR	67,5	78	78,5	81	84	87	88	1900,8	17	25,13	19,27	0,04	0,05
	BPV	18	20,9	21,1	22	22	23	23,5	507,6	18	94,2	72,15	0,01	0,013
2	BR	81	90	96	99	105	108	110	2376	16	20,93	15,41	0,047	0,064
	BPV	19	22	22,5	23	24	24	25	540	18	89,42	67,82	0,011	0,014
3	BR	81	94,5	96	102	105	108	111	2397,6	17	20,93	15,27	0,047	0,065
	BPV	20	23	24,5	25	26	26,5	27	583,20	18	84,78	62,8	0,011	0,016

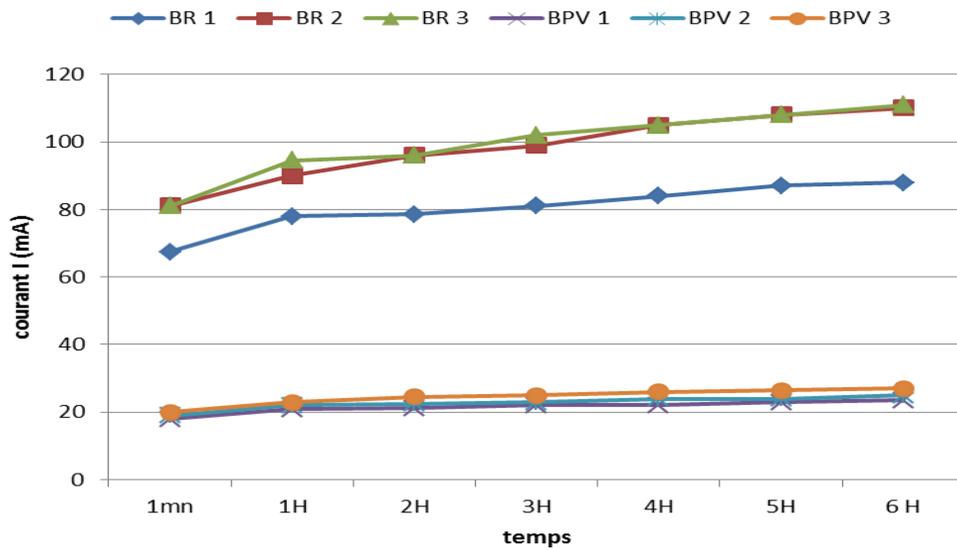


Figure V- 19. Evolution de l'intensité du courant (mA) à travers les bétons conservés 90 j dans les différents milieux en fonction du temps.

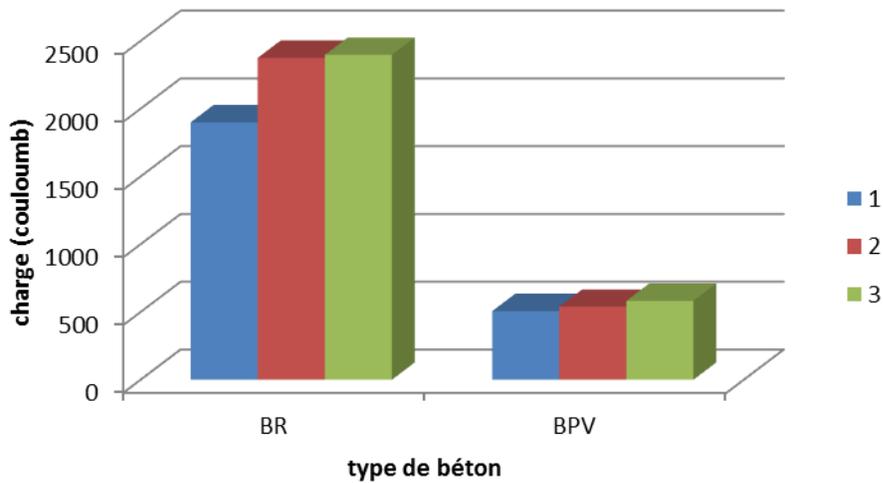


Figure V-20. Variation de la charge du courant dans différents milieux de conservation des différents types de béton.

**Tableau V-11.** Pénétration des ions chlore basée sur la charge passante.

Charge passé (coulombs)	Penetration des ions chlore
>4000	Élevée
>2000 – 4000	Moyenne
>1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
<100	négligeable

En se référant au tableau VI-10 qui donne une classification qualitative de la pénétration des ions chlore dans le béton on constate que cette pénétration est très faible concernant béton à base de la poudre de verre ; par contre elle est qualifiée de moyenne pour le béton de référence.

Les résultats obtenus dépendent à la fois de la microstructure du béton ainsi que la conductivité de la solution interstitielle [95]. Un béton de même microstructure peut montrer une augmentation des résistances à la pénétration des ions chlore si la conductivité de la solution interstitielle est grande [96 ; 97]. La poudre de verre remplacée dans le ciment libère plus d'ion alcalin dans la solution aqueuse que le ciment substitué, augmentant ainsi la conductivité de la solution interstitielle [97]. Toutefois, la figure VI-20 montre que le béton à base de poudre de verre présente une pénétrabilité des ions chlore très faible par rapport au béton de référence ; cela confirme que la poudre de verre agit avantageusement sur la microstructure et la résistance chimique des bétons

### 1.1.La perméabilité aux gaz

La perméabilité aux gaz est une propriété de transfert qui est fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité du béton. Ainsi, la mesure de la perméabilité à l'oxygène est une mesure fiable, relativement simple et utilisable pour le simple classement des bétons ou encore pour une évaluation de leur durabilité potentielle. De ce point de vue, elle peut constituer un bon indicateur de durabilité.

L'essai consiste à soumettre le corps d'épreuve à une pression constante de gaz (le schéma de principe de fonctionnement du perméamètre est présenté dans la figure VI- 20).

La perméabilité apparente  $K_a$ , en  $m^2$ , est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz  $Q$  (en  $m^3 \cdot s^{-1}$ ), en régime permanent, avec l'hypothèse d'un flux laminaire, à une pression donnée, en utilisant la formule (V-2) .

$$K_a = \frac{2 \cdot Q \cdot L \cdot P_{atm} \cdot \mu}{A \cdot (P_e^2 - P_{atm}^2)} \quad \text{en } (10^{-16} m^2) \quad (V-2).$$

Où

- $L$  (m) est l'épaisseur de l'éprouvette traversée par le flux.
- $A$  ( $m^2$ ) la section de l'éprouvette traversée par le flux
- $\mu$  (Pa.s) est la viscosité dynamique du gaz.

$P_{atm}$  (Pa) est la pression atmosphérique.

$P$  (Pa) est la pression d'entrée appliquée

La perméabilité intrinsèque est calculée par une régression linéaire suivant l'approche de Klinkenberg.

$$K = K_{int} \left( 1 + \frac{\beta}{P_{moy}} \right) \quad \text{avec} \quad P_{moy} = \frac{P_0 + P_{atm}}{2}$$

$K_{int}$  définie comme étant la perméabilité intrinsèque,  $P_0$  la pression atmosphérique,  $\beta$  la constante de Klinkenberg et  $\beta K_{int}$  est la pente de la droite de Klineberg

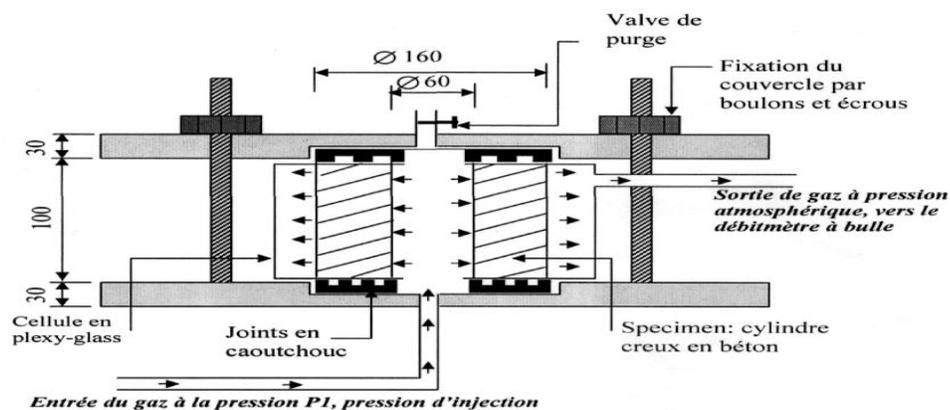


Figure V-21. Schéma d'une cellule du perméamètre.

Par extrapolation, on déduit la valeur de  $K_{int}$  pour une pression d'écoulement infinie, soit lorsque  $(1/P_{moy}) \rightarrow 0$ . C'est la valeur de l'ordonnée à l'origine de la droite reliant la perméabilité et l'inverse de  $P_{moy}$ . Les résultats des essais sont inscrits dans le tableau V-12

Tableau V-12. coefficient de perméabilité aux gaz des bétons testés.

$P_{adm}$ (bars)		2	4	6
$1/P_{moy}$ (1/Pa)		6.67E-06	4E -06	1.66E -06
$K_a$ ( $10^{-16}m^2$ )	1	0,03	0,02	0,017
	2	0,041	0,025	0,021
	3	0,036	0,021	0,017

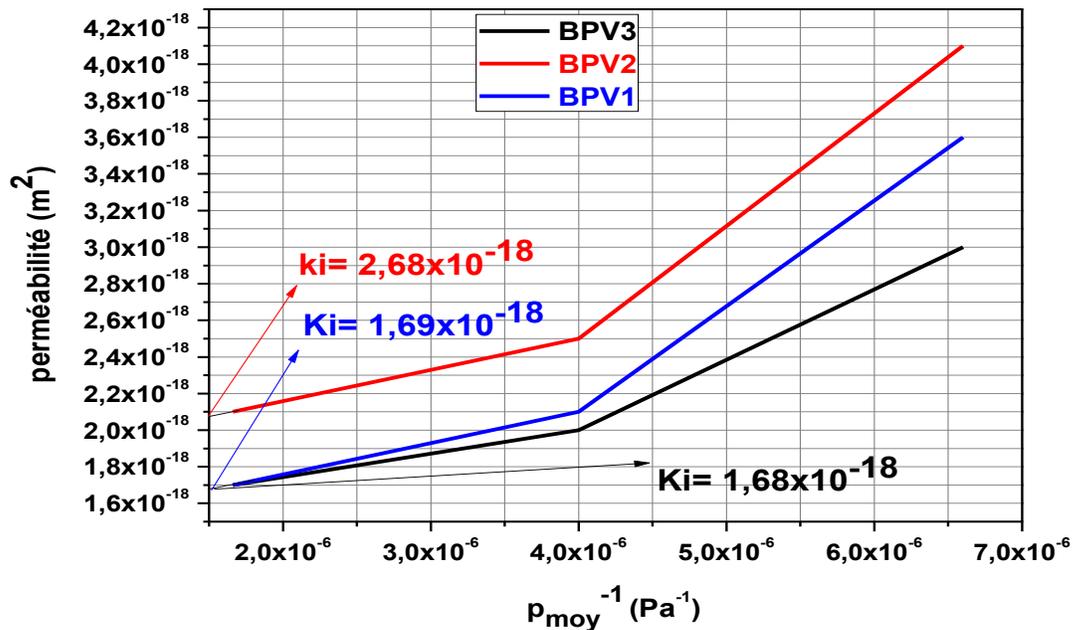


Figure V-22 .Evolution de la perméabilité mesurée  $k_a$  en fonction de la pression moyenne avec détermination de la perméabilité intrinsèque  $K_i$

La perméabilité au gaz, propriété du matériau régissant le transfert par perméation selon la loi de Darcy, est un indicateur de durabilité plus fin que la porosité. La perméabilité dépend en effet à la fois de la porosité mais aussi de la géométrie de la microstructure [98].

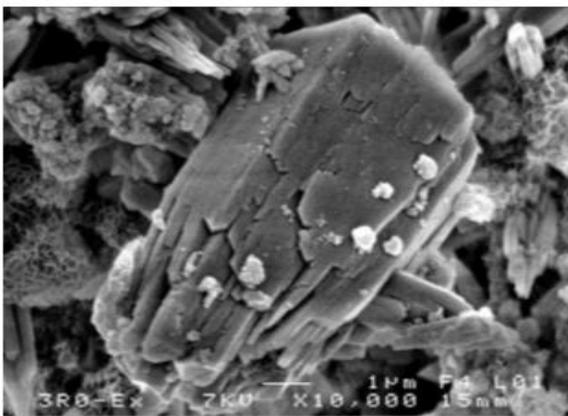
L'ajout de la poudre de verre dans le béton diminue fortement la porosité du milieu, il a pour conséquence la déconnection des pores existant rendant ainsi le milieu plus étanche limitant ainsi le transfert des fluides dans le béton

## 2. Analyse microstructurale.

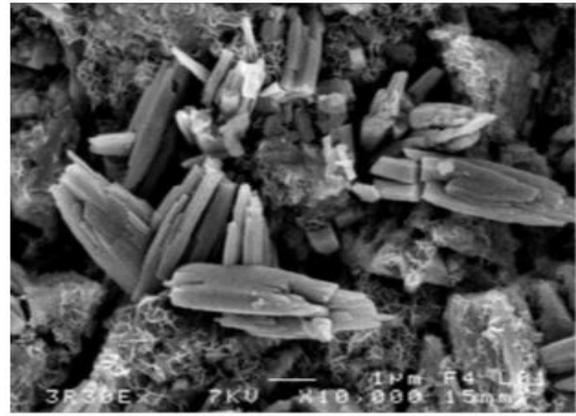
### 2.1. Formations superficielles :

#### 2.1.1. dans l'eau de robinet :

La figure V-23 présente les observations des surfaces des éprouvettes de pâte de ciment conservées dans l'eau robinet, les cristaux de portlandite sont bien composés avec des formes allongées, la taille de ceux observés pour la pâte de ciment sans ajout (a) et largement plus grande que celle de la pâte de ciment avec ajout de poudre de verre (b). On peut observer quelques figures de dissolution sur certains cristaux.



**a**



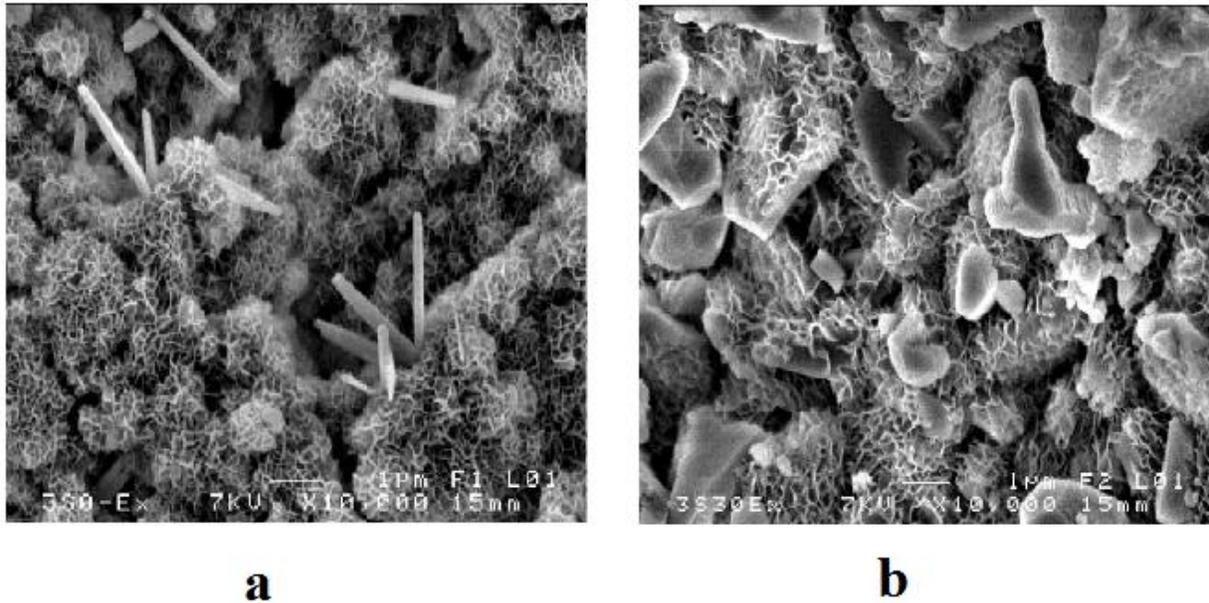
**b**

*Figure V-23. Observation au MEB de la surface externe des échantillons.*

*a) Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre.*

### 6.1.2. Dans l'eau séléniteuse :

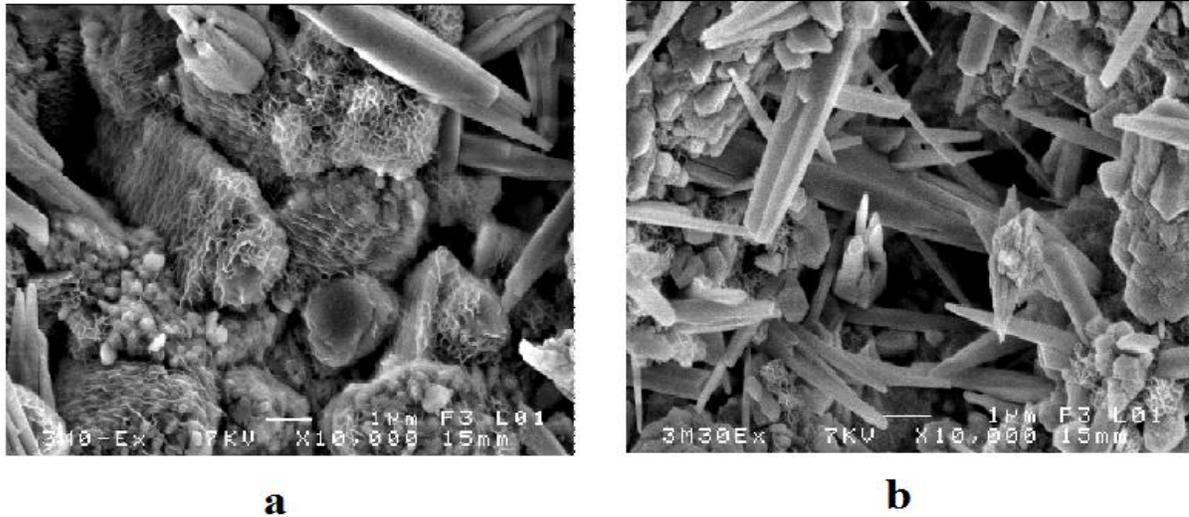
Pour des éprouvettes conservées dans l'eau séléniteuse la surface dégradée laisse apparaître des CSH sous forme de nid d'abeilles, quelques aiguilles de gypse sont observées sur la pâte cimentaire sans ajout (a), la présence des cristaux de calcites sur la pâte cimentaire avec ajout de poudre de verre est mieux marquée (b).



**a** **b** *Fig*  
*ure V-24. Observation au MEB de la surface externe des échantillons. a) Pâte de ciment sans ajout -  
b) Pâte de ciment avec poudre de verre.*

### 6.1.3. Dans l'eau de mer :

Par contre, dans le cas des éprouvettes de pâte de ciment sans ajout (a) conservées dans l'eau de mer la surface est assez dégradée et laisse apparaître des cristaux de CSH, contrairement à celle avec ajout de poudre de verre (b) où l'échange de  $Mg^{2+}$  contenu dans l'eau de mer et  $Ca^{2+}$  du ciment conduit à la formation de la brucite  $Mg(OH)_2$ , ainsi que le montre l'analyse des zones superficielles des éprouvettes de pâtes de ciment ayant séjourné trois mois en eau de mer [98].

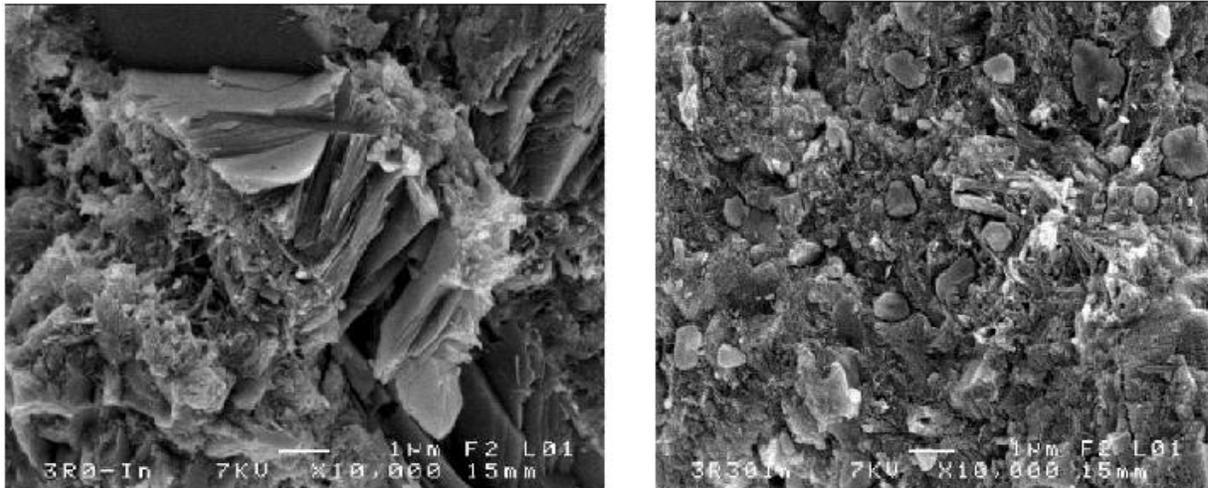


*Figure V-25. Observation au MEB de la surface externe des échantillons.  
Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre.*

## 6.2. Microstructure interne

L'observation au MEB nous a permis d'examiner la microstructure des hydrates formés au sein des pâtes après 3 mois de durcissement (figure V-26). Indifféremment du milieu de conservation, une microstructure relativement améliorée dans les pâtes avec ajout de poudre verre (b) a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées et riches en C-S-H, caractéristiques des BHP avec ajouts cimentaires actifs [99].

Toutefois, on peut distinguer quelques plaquettes de chaux. La présence d'ettringite (aiguilles) n'est visible que dans les cavités mais la matrice étant très dense, elle ne favorise pas l'épanouissement de cette phase. La pâte de ciment avec ajout de poudre verre se caractérise par la présence de composés hydratés très massifs aux différentes échéances, ce qui explique les résistances mécaniques élevées et les masses volumiques plus importantes des bétons remarquées précédemment.



**Figure V-26.** Observation au MEB de la microstructure interne des échantillons.

**1.** Pâte de ciment sans ajout -b) Pâte de ciment avec poudre de verre.

## 7. L'analyse par diffraction des rayons X:

L'analyse par diffraction de rayons X (fig. V-27 à V-32) illustre l'influence du milieu de conservation sur les différentes formations. Les hydrosilicates de calcium formés (habituellement appelés CSH) sont semi – cristallins ou amorphes et difficilement identifiables par diffraction X ; Seules quelques raies apparaissent mais elles sont superposées aux raies des autres phases cristallines.

Les phases cristallines (intérieur des éprouvettes) des différentes pâtes de ciment avec ajout de poudre de verre paraissent identiques indépendamment de leurs milieux de conservation. L'hydratation de leurs composés anhydres se trouve freinée, contrairement à celles de la pâte de référence. Ceci, est la conséquence de la densification de la matrice.

Les hydroaluminates de calcium sont cristallisés sous la forme de  $C_4AH_{13}$  ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ ) pour l'ensemble des pâtes, et sont détectés par certaines raies de diffraction X. On note l'absence de raies de diffraction X du gypse, il est totalement consommé pendant l'hydratation et contribue à la formation d'ettringite

Le diffractomètre utilisé est de type Philips PW3710, avec une anticathode en Cuivre et un filtre au Nickel ( $K\alpha$  Cu,  $\lambda = 0,154nm$ ), l'enregistrement est de type pas à pas (pas de  $0,02^\circ 2\theta$ ).

9.1. Dans l'eau de mer

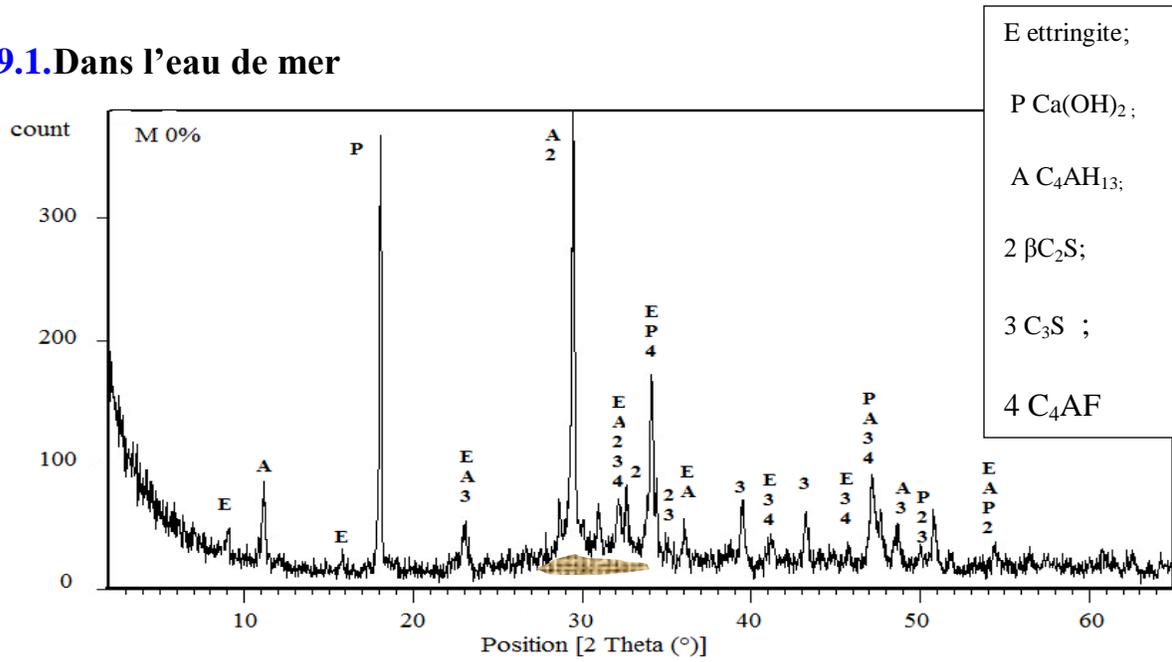


Figure V-27. Diffractogramme de la pâte du ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation.

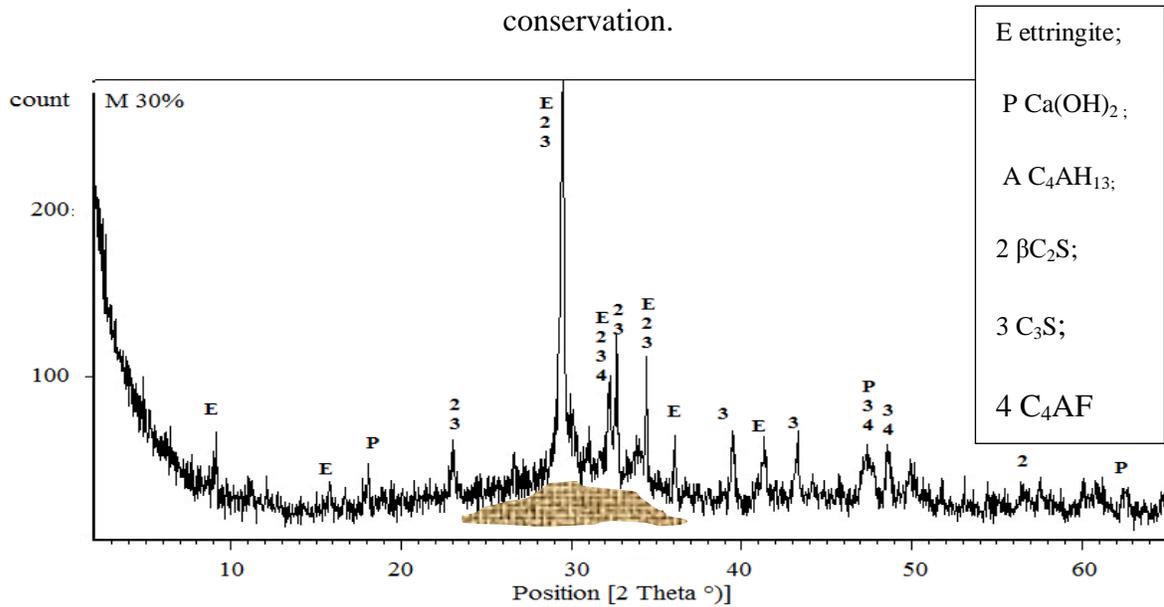
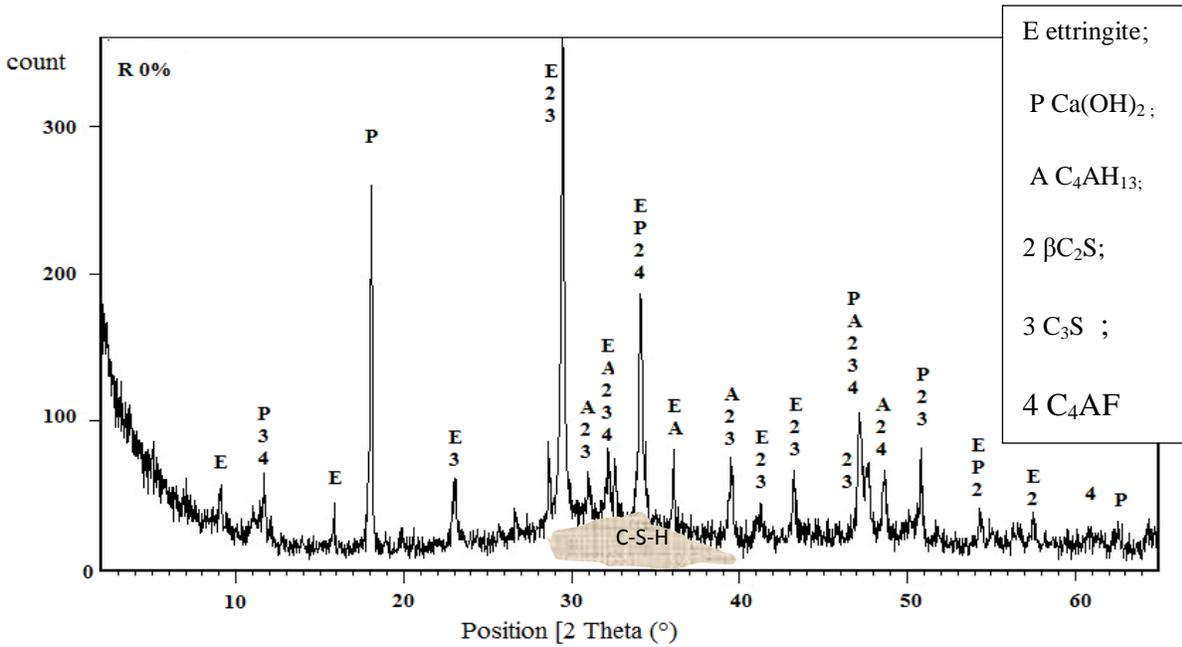


Figure V-28. Diffractogramme de la pâte du ciment avec poudre de verre après 90 jours de conservation.

9.2. Dans l'eau de robinet



Figure

e V-29. Diffractogramme de la pâte du ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation

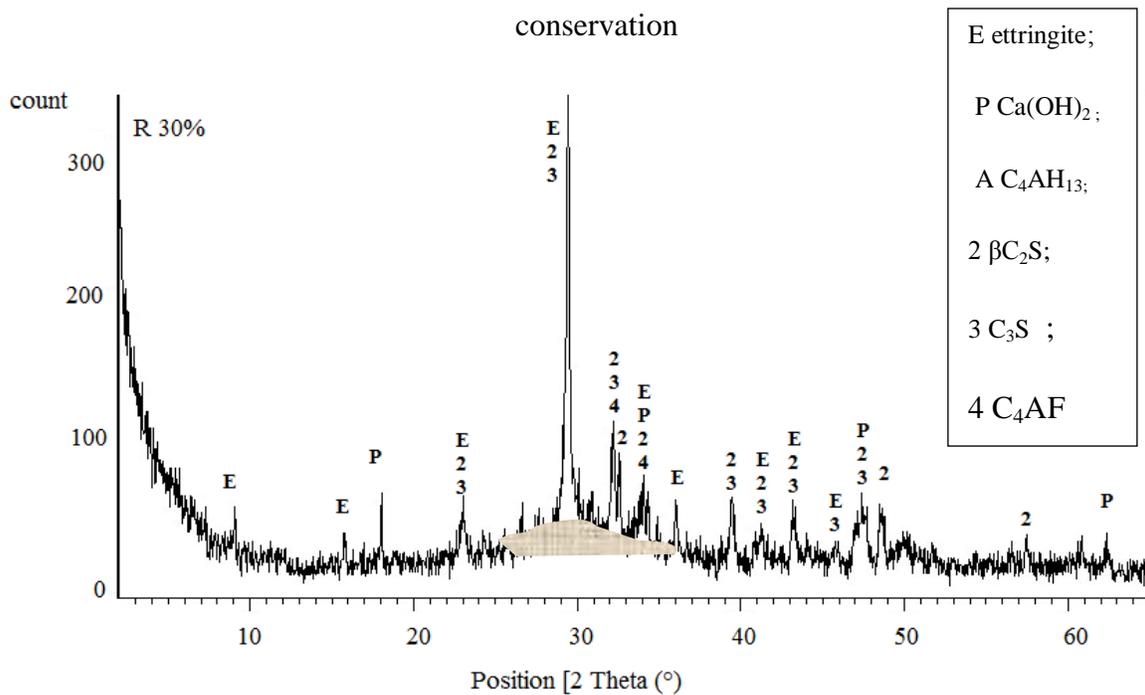
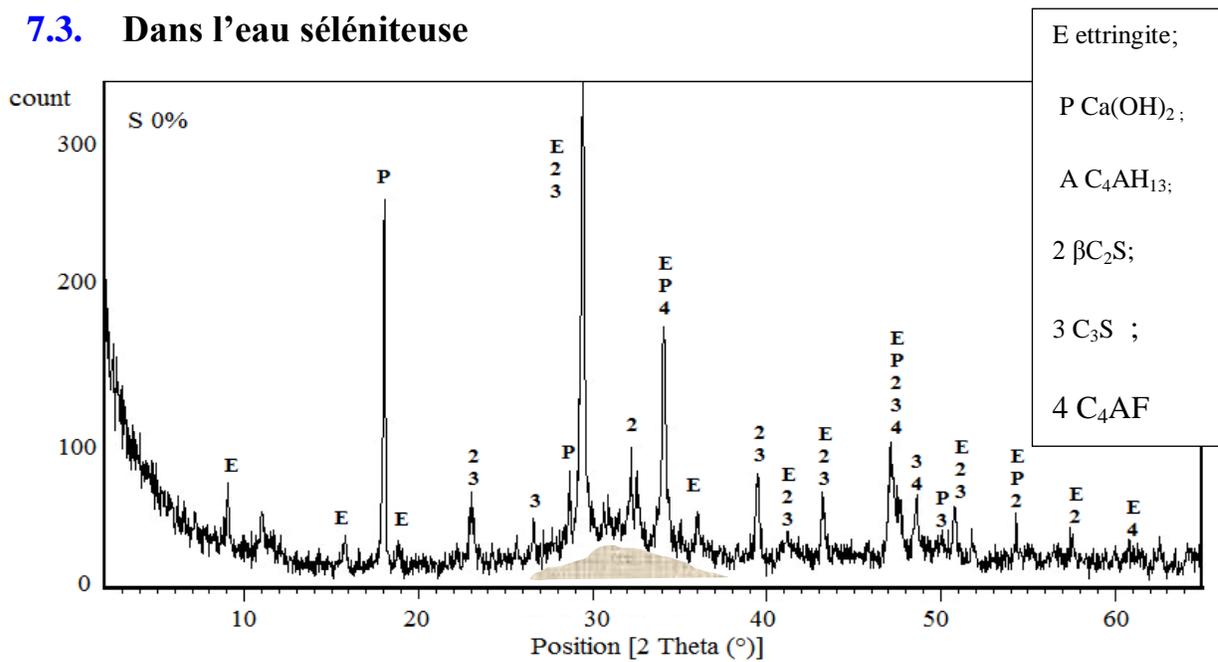


Figure V-30. Diffractogramme de la pâte du ciment avec poudre de verre après 90 jours de conservation

7.3. Dans l'eau séléniteuse



Fig

Figure V-31. Diffractogramme de la pâte du ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation

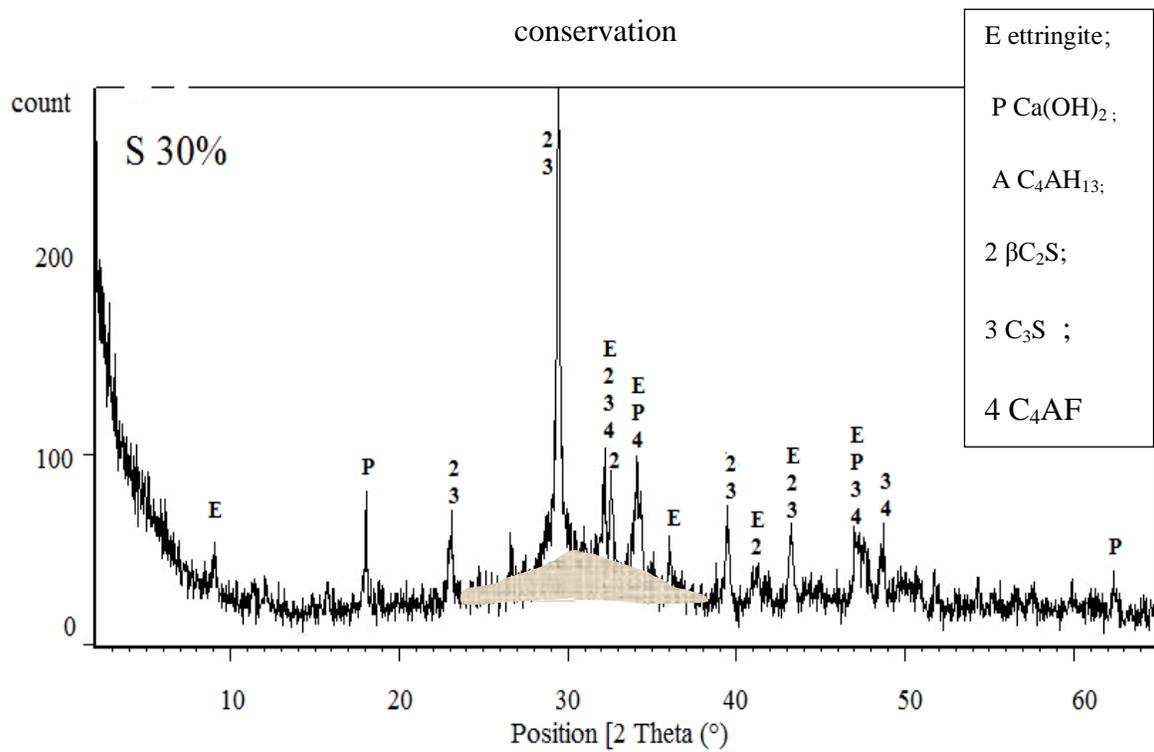


Figure V-32. Diffractogramme de la pâte du ciment avec poudre de verre après 90 jours de conservation

## 10. conclusion

La conjugaison de la méthode des coulis et celle de Dreux Goriss pour la formulation d'un BHP aboutie à des résultats satisfaisants.

L'optimisation du dosage en adjuvant donne une meilleur ouvrabilité pour le béton, elle est encours meilleure pour le BPV grâce à l'ajout de la poudre de verre.

La poudre de verre finement broyé joue la fois un double rôle pouzzolanique et densification de la matrice cimentaire.

La micro-analyse des pâtes cimentaires confirme les résultats obtenus, pour ce qui est de la résistance chimique des bétons ; soit le béton avec ajout de poudre de verre était imperméable aux différents fluides externes.

L'intensité des pics de portlandite est plus faible en présence de la poudre de verre, cela traduit le pouvoir pouzzolanique de la poudre de verre.

Le halo centré  $3,06 \text{ \AA}$  confirme la fixation de C-H en C-S-H en non la carbonatation de C-H en  $\text{CaCO}_3$ .

---

# Conclusion générale

L'objectif de notre travail concerne l'utilisation de la poudre de verre finement broyé comme ajout cimentaire dans le but de formuler un béton à hautes performances. L'étude s'est articulée autour des trois principaux axes suivants:

- ♦ étude de l'influence de la poudre de verre sur les propriétés des bétons élaborés.
- ♦ caractérisation des bétons avec poudre de verre à travers des essais physico-mécaniques.
- ♦ étude de la durabilité de ces bétons (BPV, BR) conservés dans différents milieux agressifs via deux paramètres (pénétration des ions chlorures ; perméabilité aux gaz).

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

- 1.** En fixant le rapport E/C à 0,3 et le slump à 180 mm, la méthode de Dreux-Gorisse conjuguée à celle de coulis nous ont conduit à des compositions de béton satisfaisantes, suite à l'optimisation des facteurs suivants :
  - a- la teneur en adjuvant par rapport à la masse du ciment est 1,1 % pour le BPV et 1,55% pour le BR.
  - b- diamètre maximal des gros granulats à 16 cm.
  - c- mouture de la poudre de verre :  $SSB = 8\ 000\ \text{cm}^2/\text{g}$ .
  - d- teneur en poudre de verre : 30% du poids de ciment.
- 2.** L'utilisation de la poudre de verre finement broyé et d'un superplastifiant abouti à un bon écoulement du béton par rapport au béton de référence.
- 3.** Le taux d'air occlus des bétons frais avec poudre de verre, comparé à celui du béton de référence, est plus faible. L'effet de l'introduction de la poudre de verre, conjugué à celui du superplastifiant, limite l'air emprisonné dans des pores suite au remplissage de ces derniers par la poudre de verre.

4. La masse volumique des bétons avec poudre de verre, est sensiblement élevée par rapport à celle du béton de référence, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines.
5. La résistance mécanique des bétons avec poudre de verre augmente d'une façon graduelle par rapport à celle du béton de référence. Au niveau de la résistance à la traction par flexion à 28 jours, le béton avec poudre de verre développe des résistances similaires à celles du béton de référence. Par contre, les résistances à la compression du béton de poudre de verre concurrencent celles du béton de référence mais sans les dépasser. De façon générale, un double rôle de la poudre de verre est reconnu : pouzzolanique et granulaire.
6. A l'encontre des autres ajouts cimentaires, l'ajout de la poudre de verre ne réduit pas le retrait dans le béton.
7. Après 90 jours de conservation dans les milieux plus ou moins agressifs, les caractéristiques des bétons avec poudre de verre, ne sont pas affectées par les dégradations, probablement à cause de la porosité très faible qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi à la sortie des cations.
8. Par contre, la structure de béton de référence a été affectée mais pas gravement et cela est due au rapport E/C (0,3) qui induit une porosité minime mais n'égale pas à celle de béton avec ajout de poudre de verre.

La valorisation de verre dans la fabrication des bétons engendre deux principaux comportements que peut avoir ce verre lorsqu'il est mis en contact avec une matrice cimentaire, à savoir :

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

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

Il faut se rappeler que le verre utilisé dans notre étude est essentiellement issue des rebus de verre plat, un verre sodo-calcique avec un taux d'alcalin qui dépasse 13% en masse ; il ne contient ni de chrome ni de lithium, éléments principaux qui peuvent réduire le développement des réactions alcali-silice dans le béton. Ce qui n'est pas le cas de « verre bouteilles » dont des études ont montré que grâce à sa teneur en oxyde de chrome et en oxyde de lithium a réussi d'éviter le développement des RAS.

Enfin, la valorisation de verre dans le béton se présente comme une issue important dans la préservation de l'environnement. En effet, en substituant jusqu'à 30% du poids de ciment, on amortie considérablement et d'une manière indirecte le taux de CO<sub>2</sub> (cause principale de l'effet de serre) dégagé dans l'air par les cimenteries. Néanmoins, il faut concilier les deux effets qu'a cette valorisation sur le comportement des bétons (l'activité pouzzolanique et la réaction alcali-silice).

## Perspectives

Ce travail a permis d'effectuer une étude globale sur l'utilisation de la poudre de verre dans le béton, mais il a également soulevé certains points qu'il serait intéressant d'exploiter :

- ♦ il semble primordiale que le verre soit finement broyé avant son utilisation pour éviter toute manifestation des RAS.
- ♦ Utiliser le verre mixte de bouteille comme ajout cimentaire en association avec le verre plat pour compenser la teneur en chrome et en lithium, ou bien un autre déchet qui répond au profil d'un ajout cimentaire qui peut satisfaire à cette compensation.
- ♦ Le travail présenté dans ce manuscrit est expérimental. Il semble que la modélisation devrait permettre de conforter ou d'infirmier certaines hypothèses, notamment pour les mécanismes d'action du verre.

## Références bibliographiques

1. **J.YAMMINE**. Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques. Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan ENSC - 2007 - N°81.
2. **R. CHAID**. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006
3. **A. Neville**. Propriétés des bétons. Edition EYROLLES (version traduite par le CRIB Sherbrooke) 2000.
4. **P.C.AITCINE**. Béton à hautes performances. Université de Sherbrooke Edition EYROLLES (nouvelle édition) 2000.
5. **E.G. NAWY, P.E., C.Eng** .Concrete Construction Engineering. The State University of New Jersey New Brunswick, New Jersey. Deuxième édition 2008.
6. **A.PESCHARD**. Aspects physico-chimiques de l'interaction ciment-polysaccharides dans les enduits ; effet des polysaccharides sur l'hydratation du ciment. Thèse doctorat de l'école nationale supérieure des mines de St-ETIENNE. Février 2003
7. **F.PERCHE**. Adsorption de polycarboxylates et de Lignosulfonates sur poudre modèle et ciments. Thèse doctorat de l'école polytechnique de Lausanne 2004.
8. **KELZENBERG A.L., TRACY S.L., CHRISTIANSEN B.J., THOMAS J.J., CLARAGE M.E., HODSON S., and JENNINGS H.M.**: Chemistry of the aqueous phase of ordinary Portland pastes at early reaction times. Journal American Society, Vol. 81, No. 9, pp. 2349-2359, 1998.
9. **N. EDWIGE** Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants. thèse doctorat de l'université Henry Poincaré et de l'université de Luxembourg 2010.
10. **D. LOOTENS**. Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement, encombrement et floculation. thèse doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. Oct 2004.
11. **A.TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB**. Les ajouts cimentaires et le développement durable. Département de génie civil, Université de Sherbrooke.
12. **R. CHAID, R. JAUBERTHIE et A. BOUKHALED**. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.
13. **M VENUAT** .La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. 1989.
14. **P.C. AITCIN, C. JOLICOEUR et J. MACGREGOR**. « Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't », concrete international, pp 45-52 – Mai 1994.
15. **A.KERBOUCHE**. influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des bétons. mémoire de magister .UST Oran .2009.
16. **P.C. AITCIN**. «les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de construction. Mai 1968.
17. **H .SCHOLZE**. Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980.

18. **J. ZARZYCKI**, A direct electron microscope study of the structure of glass, *Physics and chemistry of Glasses*, vol.3.1962.
19. **M.F. ASHBY, et M.F. JONES**, *Matériaux- propriétés et applications*, Paris, 2e édition, Dunod 1996.
20. **W. H. ZACHARIASEN**, The atomic arrangement in glass, *Journal of the American chemical society*, vol. 54. 1932.
21. **SCHMIDT, A. et SAIA, W.H.F.** Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. *American concrete institute, Material Journal*, n° 60, 1963.
22. **PIKE, R.G., HUBBARD, D. et NEWMAN, E.S.** Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, *Highway Research Board Bulletin*, n°275, 1960.
23. **PATTENGIL, M. et SHUTT T.C.** Use of ground glass as a pozzolan; *Albuquerque symposiums on Utilization of Waste Glass in Secondary Products*. Albuquerque, New Mexico, U.S.A.1973.
24. **SHAO, Y., LEFORT, T., MORAS, et S. RODRIGUEZ, D.** Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n°1. 2000.
25. **KOJIMA, T., TAKAGI, N. et HARUTA, K.** Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles, *11th international conference on Alkali Aggregate Reaction*, Quebec. 2000.
26. **BAZANT, Z, K, P., ZI, G et MEYER, C.** Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, *Journal of Engineering Mechanics*, mars 2000.
27. **DYER, T. D. et DHIR, R. K.** Chemical reactions of glass cullet used as cement component, *journal of materials in civil engineering* , novembre/décembre 2001.
28. **MEYER, C. et BAXTER, S.** Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks Final Report 97-15, Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority. 1997.
29. **BYARS, E., ZHU, H. et MORALES, B.** Conglasscrete, the Waste and Resources Action Programme, Mars 2004.
30. **PARK, S. B., LEE, B. C. et KIM J H.** Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* vol. 34, n°12. 2004.
31. **KARAMBERI, A., KERINIS, and M. et MOUTSATSOU, A.** Innovative reuse of glass cullet in cement products, A. Source: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste*. 2004.
32. **SHI, C., WU, Y., SHAO, Y. et RIEFLER, C.** Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder, *Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete*. 2004.
33. **SHI, C., WU, Y. et RIEFLER, C. et WANG, H.** Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 5. 2005.
34. **SHAYAN, A. et XU, A.** Value-added utilisation of waste glass in concrete, *IABSE symposium*, Melbourne. 2002.
35. **SCHWARZ, N et NEITHALATH, N.** Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n°4. 2008.
36. **Norme ACI** (American concrete institute) 116R-90 (ACI 1990b).
37. **Dreux G.** *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, E. Eyrolles, Paris, 1998.
38. **FRANÇOISE BELTZUNG.** *Approche colloïdale du retrait des matrices cimentaires*. Thèse doctorat de l'école polytechnique fédérale de Zürich. 2004
39. **C.D. LAWRENCE** Measurement of permeability. 8ème congrès international de la chimie des ciments, Rio de Janeiro, Brésil. 1986.

40. **C.PERLOT.** influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert : application au stockage profond de déchets radioactifs. thèse doctorat et du grade de philosophiae doctor (ph.d). l'université Paul Sabatier de Toulouse u.f.r. p.c.a. et la faculté de génie de l'université de sherbrooke.2005.
41. **R.L. DAY, L. KONECNY** Relationship between permeability and microstructural characteristics of fly ash mortars. Materials Research Society, Symposium proceedings: Pore structure and permeability of cementitious materials, Ed. L.R. Roberts, Skalny J.P., USA. 1989.
42. **R. BAKKER** « Permeability of blended cement concrete », SP-79, ACI, Detroit, 1983.
43. **M.CHEMROUK.** "Etude des Ingrédients du Mélanges pour formuler un Béton Hautement Performant et Durable", 1er séminaire sur les technologies du béton : le Béton, Perfection et Incertitudes ; Alger ,18-19 Septembre 2004.
44. **DE LARRARD F. et MALIER Y.** « Propriétés constructives des bétons à très hautes performances de la microstructure à la macrostructure », les bétons à très hautes performances caractérisation, durabilité, application, 2e édition par Y. Malier, presse de l'ENPC, Paris, 1992.
45. **BAEL 91.** « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section I du CCTG.
46. **BAEL 91.** « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section II du CCTG.
47. **AHMAD S-H. et Shah S-P.** « Structural properties of high strength concrete and its implication for precast prestressed concrete », PCI Journal, vol. 30, n° 6, Nov-Dec 1985.
48. **BARON J.** « Les retraits de la pâte de ciment, dans le béton hydraulique » édité par Baron J. et Sauterey R., presse de l'école nationale des ponts chaussées, 1982.
49. **AÏTCIN P-C., NEVILLE A-M et ACKER P.** « Les différents types de retrait du béton », Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, n° 215, mai-juin 1998.
50. **PONS G., TORRENTI J.M.** Chapitre 5: Retrait et Fluage. dans La Durabilité des Bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2009.
51. **SELLIER A., BUFFO-LACARRIERE L.** Toward a simple and unified modeling of basic creep shrinkage and drying creep for concrete. Eur J of Environ and Civil Eng. 2009.
52. **Xi Y., BAŽANĚ Z.P., MOLINA L., JENNINGS H.** Moisture diffusion in cementitious materials: moisture capacity and diffusivity, Advanced Cement Based Materials.1994.
53. **BUFFO-LACARRIÈRE L., SELLIER A., ESCADEILLAS G., TURATSINZE A.** Multiphasic finite element modeling of concrete hydration. Cement and Concrete Research. Volume 37, Issue 2, February 2007.
54. **HAOUAS A.** Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait. Thèse de Doctorat, ENS de Cachan, janvier. 2007.
55. **ACKER P., MAMILLAN M., MIAO B.**Drying and shrinkage of concrete: the case of massive parts, Suprenant, B.A. (Ed.), Serviceability and Durability of Construction Materials. ASCE, New York. 1990.
56. **ACKER P.** Retrait et fissuration du béton : cause, mécanisme, modèles. AFPC. 1991.
57. **PONS G.** Caractérisation du comportement différé des bétons : de la réalité du matériau à la note de calcul. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Spécial XX, 1998.

58. **LE ROY robert.** Déformation instantanée et différée des BHP. thèse doctorat de l'ENPC. septembre 1995.
59. **GIACCIO G., ROCCO C. and KARR M-E.** « The fracture energy (Gf) of high strength concrete », Materials and structures, 1993.
60. **GUETTU R., BAZANT Z-P. and ZERBINO R.** « Fracture proprieties and brittleness of high strength concrete », ACI Materials journals, Nov-Dec. 1990.
61. **ZHOU F., BARR B. and LYDON F-D.** « Fracture proprieties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregate », Cement and concrete research, vol. 25, n°3, 1995.
62. **TENNIS. P.D., JENNINGS H.M.** A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. Cement and Concrete Research .2000.
63. **MEHTA P.K., MONTEIRO P.J.M.** Concrete: Structure, Properties and Materials. Englewood Cliffs, NJ; Prentice Hall. 1993.
64. **FELDMAN R.F., SEREDA P.J.** A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. Materials and Structures. 1968.
65. **REGOURD M.** L'eau, dans Le béton hydraulique. Presse de l'ENPC, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, Paris. 1982.
66. **BAROGHEL-BOUNY V.** Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyse, interprétation. Thèse de doctorat, ENPC, Paris. 1994.
67. **HAGER I.G.** Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris et Ecole Polytechnique de Cracovie, novembre 2004.
68. **WITTMANN F.H.** Creep and shrinkage mechanisms. dans **BAŽANT Z.P., WITTMANN F.H.** (Eds.), Creep and Shrinkage in concrete Structures, Wiley, Chi Chester 1982.
69. **POWERS T.C.** The thermodynamics of volume change and creep, Materials and Structures, Research and testing .Paris. 1968.
70. **KHOURY G.A.** TRANSIENT thermal creep of nuclear reactors pressure vessel type concrets. Tesis submitted to the University of London for the degree of PhD .1983.
71. **PATEL R.G., KILLOH D.C., PARROTT L.J., GUTTERIDGE W.A.** Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste. Materials and Structures. 1988.
72. **MEHTA P.K., MANMOHAN D.** Pore size distribution and permeability of hardened cement paste. 7ème Congrès de la chimie des ciments, Vol. 3, Paris. 1980.
73. **FELDMAN R.F.** Significance of porosity measurements on blended cement performance. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on the Use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, Montebello, V.M. Malhotra Ed., ACI, SP-79, 1. 1983.
74. **PERSSON B.** Seven-year study on the effect of silica fume in concrete, Advn. Cem. Based Mater. 1998.
75. **MASO J.C.** La liaison entre les granulats et pâte de ciment hydratée. 7ème Congrès International de Chimie des Ciment, Vol 1, Paris. 1980.
76. **OLIVIER J.P., MASO J.C., BOURDETTE B.** Interfacial Transition Zone in Concrete. Advanced Cement Based Materials, vol. 2, n° 1. 1995.

77. **BOURDETTE B., RINGOT E., OLLIVIER J.P.** Modelling of the Transition Zone Porosity. Cement and Concrete Research, vol. 25. 1995.
78. **AİTCIN P.C.** From gigapascals to nanometers. Engineering Science Fondation Conference on Advance in Cement Manufacture and Use, Editer par E. Gartner, American Society of Civil Engineers Fondation, Potosi, Mo., USA. 1989.
79. **BAALBAKI W., BENMOKRANE B., CHAALLAL O., AICTIN P.C.** Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. ACI Materials Journal, 88(5), septembre octobre. 1991.
80. **BAALBAKI W., AICTIN P.C., BALLIVY. G.** On predicting elastic modulus of high-strength concrete. ACI Materials Journal, 89(5), septembre-octobre. 1992.
81. **EZELDIN A., AICTIN P.C.** Effect of coarse aggregate on the behavior of normal and highstrength concretes. Note technique dans ASTM Cement, Concrete and Aggregates, 13(2). 1991.
82. **L. COURARD, M. MARTIN, F. MICHEL.** Effet des fillers calcaires sur la résistance aux chlorures des mortiers Université de Liège 2007-2008.
83. **E.DEBY.** approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin. thèse doctorat de l'université de Toulouse III .octobre 2008.
84. **CIMBETON.** Fiche technique. Centre d'information de l'industrie cimentière, Paris.
85. **P.A. GUTIRREZ et M.F.CANOVAS.** « High performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning, ACI Materials journal, N°93, 1996.
86. **M. Behim et T. Ali Boucetta,** « Effet des additions micronisées sur L'écoulement des bétons atoplaçant (laitier de haut fourneau, filler calcaire et Poudre de verre) », SBEIDCO, ENSET-Oran (Algérie), 12-14 Octobre 2009.
87. **BENTALHA. M.** Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone –Microstructure. Thèse doctorat d'état, université MENTOURI-CONSTANTINE. 2007.
88. **R. Chaid, R. Jauberthie, A. Boukhaled, A. Talah.** Endommagement, déformations et microstructure des BHP de pouzzolane. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria).2009.
89. **R. IDIR.** Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. Thèse doctorat. INSA de TOULOUSE en cotutelle avec l'UNIVERSITE DE SHERBROOKE (CANADA). 2009.
90. **JIN, C., MEYER, C. et BAXTER, S.** "Glasscrete"-Concrete with glass aggregate, American concrete institute, Material Journal, n°97, 2000.;
91. **A.CARLES-GIBERGUES, H. HORNAIN.** La durabilité des bétons face aux réactions de gonflement endogènes. Durabilité des bétons. Presse de l'ENPC.
92. **Morin R., Haddad G. et Aïtcin P-C.** ' Des structures en béton à haute performance sans fissures ', journée d'information : ciments, bétons et adjuvants, Alger. 2004.
93. **JAWED, I. et SKALNY, J.** Alkalis in cement: a review: II. Effects of alkalis on hydration and performance of Portland cement, Cement and Concrete Research, vol.8, n°1. 1978.
94. **Bentz DP.** A virtual rapid chloride permeability test. Cem Concr Compos 2007.

95. **Schwarz N, Neithalath N.** Influence of a fine glass powder on cement hydration: comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cem Concr Res* 2008.
96. **N. Schwarz, H. Cam, Nar Neithalath.** Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cem Concrete Res* 2008.
97. **Abbas, M. Carcassès, J.P. Ollivier.** The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52 (1), 2000.
98. **Chaid R., Jauberthie R. et Talah A.,** « Action de l'eau de mer sur la durabilité des bétons de poudre de marbre », INVACO2 : Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, Rabat - Maroc, 23 - 25 Novembre 2011.
99. **Chaid R., Jauberthie R., Abadlia M-T. et Bali A.,** « Caractéristiques physico-mécaniques et microstructurale des BHP de laitier », *Revue : Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, Édition ESKA, Avril - Juin 2007, N° 2- 3, p. 49-56.

# ANNEXE A

## FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

**MATINE**  
Ciment pour béton exigeant  
CEM II/B 42,5 N NA 442



**MATINE** est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO<sup>2</sup>) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al<sup>2</sup>O<sup>3</sup>) et le fer (Fe<sup>2</sup>O<sup>3</sup>). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

**MATINE** présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

### Domaine d'utilisation :

**MATINE** est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement,. .etc.) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaia, M'sila (ACC)  
Tel: +213.35.50.78.20  
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger  
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65  
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)  
BP 67, 29350, Mascara  
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



# ANNEXE A

## FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

### Analyses et caractérisation

#### Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO <sub>3</sub> (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

#### Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C3S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C2S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C3A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF (%):	10,00 – 12,00

#### Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

#### Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

#### Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

**MATINE**  
Ciment pour béton exigeant  
CEM II/B 42,5 N NA 442



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaia, M'sila (ACC)  
Tel: +213.35.50.78.20  
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger  
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65  
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)  
BP 67, 29350, Mascara  
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



## MEDAFLOW 40HR Superplastifiant - Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2

### DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 40 HR** est un superplastifiant très haut réducteur d'eau de la nouvelle génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'éther combinés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas et un maintien d'ouvrabilité remarquable.

Le **MEDAFLOW 40 HR** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Le **MEDAFLOW 40 HR** ne présente pas d'effet retardateur.

### CARACTERISTIQUES

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... Ocre clair
- pH ..... 5.5 - 6.5
- Densité .....  $1,10 \pm 0,01$
- Teneur en chlore .....  $< 1g/L$
- Extrait sec ..... 42%

### PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 40 HR** permet :

#### Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton
- décoffrage rapide

#### Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

### DOSAGE

#### Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 40 HR** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW 40 HR** peut être combiné à un retardateur de prise tel que **MEDARETARD GR**.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 40 HR** est conditionné en bidon de 11 kg et fût de 225 kg.

#### Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}C < t < 35^{\circ}C$ ).

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Ils sont donnés à titre indicatif. Il appartient au client de s'assurer que le produit convient à l'utilisation envisagée.



### Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: 213 (0) 21 51 66 81 / 82 Fax: 213 (0) 21 51 64 22 / (0) 21 51 65 23

Site Web: www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz