

**Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene**  
Faculté de Génie Civil



***Thèse***

Présentée en vue de l'obtention du grade de **doctorat**  
En : G-Civil

Spécialité : Géotechnique

Par : **Aïssa TALAH**

**Thème**

**CORROSION DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES DE  
POUZZOLANE ET DE LAITIER EN MILIEU  
CHLORHYDRIQUE**

Soutenu publiquement, le : 08 février 2012, devant le jury composé de :

M. M. CHEMROUK  
Mme. F. KHARCHI  
M. H.CHABIL  
M. Y.KHILA  
M. M. OUDJIT  
M. R. CHAID

Prof. à l'USTHB  
Prof. à l'USTHB  
Prof. à l'U.M/ Constantine  
Prof. à l'EPAU  
M.C.A. à l'USTHB  
M.C.A. à l'U.M.M.B

Président  
Directrice de Thèse  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie DIEU tout puissant qui m'a donné la volonté et la force d'achever cette recherche et nous lui rendons grâce.

A l'issue de la rédaction de ce mémoire, je profite de l'occasion pour remercier toutes celles et ceux qui ont pu contribuer, à leur niveau, à ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement **Fattoum Kfarchi**, Professeur à l'université des sciences et de technologie (USTHB) qui a dirigé ce travail. Déjà pendant le Magister, mais encore plus durant ces cinq années, **Kfarchi** m'a apporté sa rigueur scientifique, son sens inné de la pédagogie, et j'ai vraiment apprécié de travailler dans son équipe de recherche ; sa disponibilité, son ouverture, et sa bonne humeur étaient toujours bienvenus.

Cette thèse a fait l'objet d'une collaboration entre le Laboratoire Bâti dans l'environnement (LBE) et le Laboratoire matériaux et durabilité de construction (LMDC) de l'INSA de Toulouse.

J'adresse ma profonde gratitude au professeur **Djillali Benouar** directeur de LBE qui a bien voulu mettre à notre disposition les moyens et les matériaux nécessaires pour réaliser ce travail.  
Grand merci à tout le personnel de la faculté de Génie Civil à l'Université de Bab Ezzouar(USTHB).

Ce travail a été finalisé au Laboratoire Matériaux et Durabilité de Construction de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, sous la direction de Madame **M. Carcasses**, Professeur à l'INSA de Toulouse, auquel j'exprime ma profonde gratitude pour son soutien matériel et scientifique qu'elle a su m'apporter pendant le stage. J'ai trouvé un accueil chaleureux et une ambiance conviviale au Laboratoire (LMDC). Je remercie très sincèrement Monsieur **G. Escadeillas**, Directeur du LMDC-Toulouse.

Je remercie vivement Monsieur **M. Chemrouk**, Professeur à l'USTHB/FGC, qui m'a fait l'honneur de juger ce travail et d'accepter la présidence du jury d'examen.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, Monsieur **H. Chabil**, Professeur à l'université de Constantine, Monsieur **Y. Kehila**, Maître de conférences à l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Monsieur **M. Oudjit**, Maître de conférences à l'USTHB/FGC et Monsieur **R. Chaid**, Maître de conférences à l'université de Boumerdes. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Enfin, je ne pourrai pas terminer cette page de remerciements sans mettre un mot particulier pour ma famille qui a toujours été présente. Merci !

Cette thèse est dédiée à la mémoire de ma fille, **Soumia**. Puisse Dieu, le tout puissant, l'accepte dans sa sainte miséricorde.

أَسْأَلُ اللَّهَ الْعَظِيمَ رَبَّ الْعَرْشِ الْعَظِيمِ أَنْ يَجْعَلَ قَبْرَ سَمِيَّةَ رَوْضَةً مِنْ رِيَاضِ الْجَنَّةِ

## ملخص:

ترتبط طول حياة الهياكل الخرسانية بمدى قدرتها على منع تغلغل الأجسام الضارة داخل المسامات. حيث تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة تآكل الخرسانة المدعمة بالبوزولان وخبث الفرن العالي داخل وسط هيدروليكي. إذ قمنا بإضافات إسمنتية مسحوقة جدا بغرض خفض سعره و الحفاظ على البيئة. تمت تحديد الخصائص الميكانيكية للخرسانة ذات المميزات عالية الجودة بواسطة تجارب الضغط، الشد، الإنكماش وتسرب سرعة الصوت. إن دراسة ديمومة الخرسانة تمت داخل وسط بيئي عدواني. دامت ملاحظة ضرر الخرسانة من أربعة أسابيع إلى سنة. شُخصت خصائص ديمومة الخرسانة بتجارب أيون الكلور وامتصاص الماء ونفوذية للأكسجين و قد اقترحت تجربة جديدة لقياس نفاذية الخرسانة للغازات وأخيرا أكدت النتائج قدرة مقاومة خرسانة البوزولان والخبث للأجسام الضارة.

**كلمات مفتاحية:** خ م س، خرسانة، نفوذية الخرسانة للغازات، البوزولان، الخبث، خصائص ميكانيكية وديمومة.

## Résumé :

La durée de vie d'un ouvrage en béton est souvent liée à la capacité du béton à empêcher la pénétration d'agents agressifs dans son réseau poreux.

Cette thèse a pour but d'étudier la corrosion des bétons de laitier et de pouzzolane dans un milieu chlorhydrique.

A cet effet, nous avons procédé à la substitution d'une partie de ciment par du laitier de haut fourneau et de la pouzzolane naturelle, dans la perspective de réduire le prix de revient du béton et de contribuer à la préservation de l'environnement.

Les essais de compression, de traction par flexion, de retrait et l'évolution des vitesses de propagation du son à travers les bétons ont permis de caractériser les bétons formulés. La durabilité des bétons à hautes performances a été étudiée dans un milieu de conservation agressif en l'occurrence la solution saline. Les dégradations ont été observées à différentes échéances entre vingt huit (28) jours et un (01) an.

Les essais de perméabilité aux ions chlore, de sorptivité et de perméabilité à l'oxygène ont permis d'évaluer les paramètres de durabilité de ces bétons. Une procédure optimisée de mesure de perméabilité aux gaz pour des bétons ordinaires aussi bien que pour des BHP est proposée.

Les résultats confirment que les BHP de pouzzolane et de laitier ont l'aptitude de résister à l'intrusion d'agents agressifs.

**Mots clés :** BHP, béton, laitier, pouzzolane, perméabilité à l'oxygène, propriétés mécaniques et durabilité.

## Abstract:

The life of a concrete structure is often related to the ability to prevent ingress of aggressive agents in its porous network. The aim of research work is to study the corrosion of concrete with blast furnace slag and pozzolan in a chloride environment. For this purpose, we introduced pozzolan and blast furnace slag to reduce the cost of the concrete and preserve the environment. Compressive tests, tensile bending, removing and changing speed of sound through concrete have characterized the mechanical properties of HPC. The durability of HPC was investigated in an environment of aggressive storage. Degradations were observed at different time between twenty eight (28) days and one year. The test of permeability to chlorine ion and the tests of sorptivity and oxygen permeability have been used to characterize properties of the durability of concrete. An optimized procedure for measuring gas permeability for ordinary concrete as well as for HPC is proposed.

Results confirmed that HPC of pozzolan and blast furnace slag have the ability to resist to the intrusion of aggressive agents.

**Keys words:** HPC, concrete, slag, pozzolana, oxygen permeability, mechanical properties and durability.

# SOMMAIRE

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### Chapitre I

#### Microstructure d'une pâte de ciment

Introduction.....	4
Microstructure d'une pate de ciment : hydratation.....	4
1.2.1 Le ciment portland à l'état anhydre.....	4
1.2.1.1 Fabrication d'un ciment.....	4
1.2.1.2 Composition chimique d'un ciment.....	5
1.2.2 Hydratation d'un ciment portland.....	5
1.2.2.1 Hydratation des silicates.....	6
1.2.2.2 Hydratation des aluminates.....	6
2.2.3 Le rôle des sulfates dans l'hydratation du ciment.....	7
1.2.2.4 La solution interstitielle.....	7
1.2.2.5 Aspects cinétiques de l'hydratation.....	8
1.2.3 Microstructure d'une pâte de ciment hydratée.....	10
1.2.3.1 Description des hydrates formés.....	10
1.2.3.2 Description du réseau poreux.....	14

### Chapitre II

#### Mécanismes physiques et chimiques intervenant dans les phénomènes de durabilité des bétons

2.1 Introduction.....	16
2.2 Les différentes formes de transport dans un milieu poreux.....	16
2.2.1 Transport par perméation.....	16
2.2.2 Transport par advection.....	19
2.2.3 Transport par diffusion.....	19
2.3 Détermination du coefficient de diffusion.....	20
2.3.1 Essai de diffusion en régime stationnaire.....	20
2.3.2 Essai d'immersion ou diffusion en régime transitoire.....	22
2.3.3 Essai de migration.....	23
2.3.3.1 Essai de migration en régime permanent.....	23
2.3.3.2 Essai de migration en régime transitoire.....	24
2.4 Ions chlorures dans les matériaux cimentaires.....	25
2.4.1 Chlorures libres.....	25

2.4.2 Chlorures fixes.....	25
2.4.3 Chlorures et gels de C-S-H.....	26
2.4.4 Chlorures et aluminates.....	26
2.4.5 Chlorures cristallisés.....	26
2.4.5.1 Méthode d'équilibre.....	27
2.4.5.2 Technique d'extraction de la solution des pores.....	27
2.5 Phénomènes réactionnels.....	27
2.6 Phénoménologie de la lixiviation.....	28
2.7. Conclusion.....	29

## Chapitre III

### La formulation des BHP

3.1 Généralités.....	30
3.2 Méthodes de composition.....	31
3.3 Dosage en ciment et en fines.....	32
3.4 Effets de la porosité sur la résistance mécanique.....	32
3.5 Effets du rapport E/C sur les caractéristiques du béton.....	33
3.5.1 Porosité.....	33
3.5.2 Résistance mécanique du béton.....	34
3.5.3 Module d'élasticité.....	34
3.6 Conclusion.....	35

## Chapitre IV

### Les ajouts cimentaires

4.1 Introduction.....	36
4.2 Rôle granulaire des ajouts cimentaires.....	37
4.3 Rôles pouzzolaniques des ajouts cimentaires.....	37
4.4 Rôles mécaniques des ajouts cimentaires.....	38
4.4.1 Fumée de silice.....	38
4.4.2 Laitier.....	39
4.4.2.1 laitier vitrifié.....	39
4.4.2.2 laitier cristallisé.....	40
4.4.2.3 du laitier.....	40
4.4.2.4 rôles du laitier dans le béton.....	40
4.4.3 La pouzzolane.....	41
4.4.3.1 pouzzolanes naturelles.....	41
4.4.3.2 pouzzolanes artificielles.....	41
4.4.3.3 Hydratation des pouzzolanes.....	41
4.4.3.4 Rôle de la pouzzolane dans le béton.....	42

## Chapitre V

### Caractéristiques des BHP

5.1 Introduction.....	43
5.2 Caractéristiques physiques.....	43
5.2.1 Ouvrabilité.....	43
5.2.2 Porosité.....	44
5.2.3 Perméabilité.....	44
5.3 Caractéristiques mécaniques.....	46
5.3.1 Résistance en compression.....	47
5.3.2 Résistance en traction.....	48
5.3.3 Résistance à la fatigue.....	48
5.4 Caractéristiques élastiques.....	49
5.4.1 Module de d'élasticité ou module de Young (E) .....	49
5.4.2 Coefficient de Poisson ( $\nu$ ) .....	50
5.4.2.1 Coefficient de poisson à l'état initial.....	51
5.4.2.2 Evolution de $\nu$ instantané au cours du chargement.....	51
5.4.3 Fluage.....	52
5.4.4 Retrait.....	53
5.5 Facteurs influant sur les caractéristiques mécaniques et élastiques.....	54

## Chapitre VI

### *Durabilité des BHP*

6.1 Introduction.....	56
6.2 Caractéristiques des milieux poreux et grandeurs associées.....	58
6.2.1 Définition.....	58
6.2.2.2 Porosité.....	58
6.2.2.3 Tortuosité et connectivité.....	59
6.3 Paramètres influençant les propriétés de transfert dans le béton.....	60
6.3.1 Rapport E/C.....	60
6.3.2 Ajouts minéraux.....	63
6.3.2.1 Fumées de silice.....	63
6.3.2.2 Fillers calcaires.....	63
6.3.3 Durée du murissement.....	64
6.3.4 Degré de saturation.....	64
6.3.5 Températures.....	64
6.4 Effet de la pénétration des agents agressifs sur la durabilité des structure.....	65
6.4.1 Action de l'eau de mer.....	66
6.5 Effet des fuites de gaz via les fissures sur l'aptitude au service des structures... ..	68
Conclusion.....	70

## **PARTIE EXPERIMENTALE**

Introduction.....	71
-------------------	----

### **Chapitre VII**

#### **Analyse des matériaux utilisés**

7.1. Introduction.....	74
7.2. Ciment.....	74
7.2.1 Propriétés chimiques.....	74
7.2.2 Propriétés physiques.....	75
7.2.3 Propriétés mécaniques.....	75
7.3 Granulats.....	76
7.3.1 sable.....	76
7.3.2 Gravier.....	77
7.4. Ajouts cimentaires.....	80
7.4.1 Laitier.....	80
7.4.2 Pouzzolane.....	83
7.5. Adjuvant.....	87
7.6. Conclusion.....	87

### **Chapitre VIII**

#### **Formulation des BHP avec ajouts cimentaires locaux**

8.1 Généralités.....	88
8.2 Formulation de la composition de référence.....	88
8.3 Optimisation du dosage en adjuvant et du rapport E/C.....	90
8.4 Formulation des bétons avec ajouts cimentaires.....	91
8.5 Conclusion.....	92

### **Chapitre IX**

#### **Caractérisation des BHP avec ajouts cimentaires locaux**

9.1 Généralités.....	94
9.2 Essais sur béton frais.....	95
9.3 Caractéristiques physiques des bétons durcis.....	96

9.3.1. Masse volumique.....	96
9.3.2 Vitesse de propagation d'onde sonore.....	97
9.4 Caractéristiques mécaniques des bétons durcis.....	99
9.4.1 Résistance à la compression.....	99
9.4.2 Résistance à la flexion.....	101
9.5 Retrait.....	102
9.6 Conclusion.....	104

## Chapitre X

### Durabilité des BHP avec ajouts cimentaires locaux

10.1 Généralités.....	105
10.2 Evolution des résistances mécaniques.....	106
10.3 Perméabilité aux ions chlore.....	107
10.4 La sportivité des bétons... ..	110
10.5 Perméabilité à l'oxygène (une procédure optimisée de la mesure de la perméabilité). .....	111
10.5.1 Introduction.....	111
10.5.2 Objet de la mesure et domaine d'application .....	111
10.5.3 Principe de l'essai.....	112
10.5.4 Dispositif expérimental.....	113
10.5.5 Exploitation des résultats et exemple d'utilisation de l'essai.....	116
10.5.6 Conclusions.....	119
10.6 Caractérisation microstructurale.....	120
10.7 Conclusion.....	126

## Conclusion générale

Conclusion.....	127
Perspectives.....	131
Références bibliographiques.....	132
Communications et publications.....	142

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## Chapitre I

Figure 1-1 : Evolution de l'hydratation de la composition de la solution interstitielle.....	8
Figure 1-2 : Courbes de flux thermiques dégagés lors de l'hydratation de l'alite et du système $C_3A$ -gypse-CH (à gauche), et comparaison entre le flux théorique, somme des flux des deux systèmes, et le flux thermique expérimental, d'après H. Minard.....	9
Figure 1-3 : Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une pâte de ciment hydraté.....	9
Figure 1-4 : Cristal de portlandite (x) entre des C-S-H.....	10
Figure 1-5 : Image au microscope électronique à transmission d'un C –S –H de synthèse dit tobermoritique (photo C. Clinard.....	11
Figure 1-6 : Observations au microscope électronique à balayage d'aiguilles d'ettringite dans un ciment au laitier et d'ettringite massive dans des pâtes de ciment..	13
Figure 1-7 : Schématisation de la structure des C-S-H.....	15

## Chapitre II

Figure 2-1 : Loi de Darcy sur un élément de volume.....	18
Figure 2-2 :Appareil de diffusion de Graham.....	21
Figure 2-3 : Cellule d'immersion.....	22
Figure 2-4 : Cellule de migration en régime permanent.....	24
Figure 2-5 : Cellule de migration en régime transitoire (LMDCstandard).....	25

## Chapitre III

Figure 3-1 :Vue microscopique d'un béton courant (grossissement x 5 000.....	30
Figure 3-2 :Vue microscopique d'un BHP(grossissement x 5 000.....	31
Figure 3-3 :Forme de la relation entre le rapport E/C et la porosité.....	33
Figure 3-4 :Effet du rapport E/C sur la résistance mécanique du béton.....	34

## Chapitre IV

Figure 4-1 : Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire .....	37
Figure 4-2 : Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire .....	37

## Chapitre V

Figure 5-1 :Porosité des bétons ordinaires et des BHP .....	46
---	----

Figure 5-2: <i>Diagramme de Goodman</i> .....	48
Figure 5-3: <i>Courbes "contrainte – déformation" des bétons de différentes résistances</i> .....	50

### Chapitre VI

Figure 6-1 : <i>Représentation schématique d'un solide poreux</i> .....	58
Figure 6-2 : <i>Matériau poreux, imperméable ; Matériau poreux, perméable</i> .....	59
Figure 6-3: <i>Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratée et le rapport E/C</i> .....	61
Figure 6-4 : <i>Perméabilité à l'air du béton en fonction du rapport E/C et de la durée du mûrissement humide</i> .....	62
Figure 6-5 : <i>Coefficient de diffusion apparent à 30 °C des ions <math>I^-</math> et <math>Cs^+</math> dans des pâtes de ciment</i> .....	63
Tableau 6-1 : <i>Action de l'eau de mer</i> .....	67
Tableau 6-2 : <i>Concentration en ions chlore dans les pâtes exposées</i> .....	68

### Chapitre VII

Tableau 7-1 : <i>Composition chimique du ciment CEM I 42.5</i> .....	74
Tableau 7-2 : <i>Composition minéralogique du ciment CEM I 42.5</i> .....	75
Tableau 7-3 : <i>Propriétés physiques du ciment CEM I 42.5</i> .....	75
Tableau 7-4 : <i>Évolution de la résistance du ciment CEM I 42,5</i> .....	76
Tableau 7-5 : <i>Analyse granulométrique du sable (900 g)</i> .....	76
Tableau 7-6 : <i>Analyse granulométrique du gravier</i> .....	78
Figure 7-1 : <i>Graphique et courbes granulométriques</i> .....	79
Tableau 7-7 : <i>Composition chimique du laitier</i> .....	80
Figure 7-2 : <i>Diffractogramme du laitier</i> .....	81
Figure 7-3 : <i>Micro-analyse (x2000) du laitier</i> .....	81
Figure 7-4 : <i>Observation au MEB du laitier</i> .....	82
Figure 7-5: <i>Distribution granulométrique du laitier</i> .....	83
Tableau 7-8 : <i>Composition chimique de la pouzzolane</i> .....	83
Figure 7-6: <i>Diffractogramme de la pouzzolane</i> .....	84
Figure 7-7: <i>Observation au MEB de la pouzzolane</i> .....	85
Figure 7-8: <i>Micro-analyse (x2000) de la pouzzolane</i> .....	85
Figure 7-9: <i>Distribution granulométrique de la pouzzolane</i> .....	86

### Chapitre VIII

Tableau 8-1 : <i>Caractéristiques de la composition de référence</i> .....	89
--	----

Tableau 8-2 : <i>Influence du dosage en adjuvant et du rapport E/C sur les caractéristiques de la composition de référence.....</i>	90
Tableau 8-3: <i>Composition d'un BHP sans ajout.....</i>	91
Figure 8-1 : <i>Evolution des résistances en compression en fonction de la teneur d'ajout cimentaire.....</i>	92

### Chapitre IX

Tableau 9-1: <i>Caractéristiques des bétons frais.....</i>	95
Figure 9-1 : <i>Évolution des masses volumiques des bétons conservés dans l'eau courante en fonction de la durée de conservation.....</i>	96
Figure 9-2 : <i>Évolution des masses volumiques des bétons conservés dans l'eau agressive . en fonction de la durée de conservation.....</i>	97
Figure 9-3 : <i>Évolution des vitesses de propagation du son à travers les bétons.....</i>	98
<i>conservés dans l'eau courante en fonction de la durée de conservation.....</i>	99
Figure 9-4: <i>Évolution des vitesses de propagation du son à travers les bétons conservés dans l'eau agressive en fonction de la durée de conservation.....</i>	99
Figure 9-5: <i>Presse hydraulique asservie (KARL KOLB Germany).....</i>	100
Figure 9-6: <i>Évolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation.....</i>	100
Figure 9-7: <i>Portique universelle asservie (Controlab).....</i>	101
Figure 9-8: <i>Évolution des résistances à la traction par flexion en fonction de la durée de conservation.....</i>	102
Figure 9-9: <i>Essai de retrait.....</i>	103
Figure 9-10: <i>Évolution des retraits des différents bétons.....</i>	103

### Chapitre X

Figure 10-1 : <i>Évolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation pour les éprouvettes conservées dans l'eau agressive .....</i>	106
Figure 10-2 : <i>Essai de perméabilité aux ions chlore.....</i>	107
Figure 10-3: <i>Variation de la charge du courant électrique à différents âges.....</i>	108
Figure 10-4: <i>Relation entre la charge électrique et la différence de température à 6 h...108</i>	
Figure 10-5: <i>Essai de sorptivité.....</i>	110
Tableau 10-1 : <i>Sorptivité des bétons à différents âges (<math>cm / min^{0,5} \cdot 10^{-3}</math>).....</i>	110
Figure 10-6: <i>Eprouvette cylindrique.....</i>	112
Figure 10-7: <i>Pérméamètre-vue d'ensemble.....</i>	113
Figure 10-8: <i>Cellule-épreuve.....</i>	113

Figure 10-9: <i>Schéma théorique du perméamètre</i> .....	114
Figure 10-10: <i>Coupe de la cellule</i> .....	114
Tableau 10-2 : <i>Coefficients de perméabilité à l'oxygène (<math>10^{-18}m^2</math>) à 0,2Mpa</i> .....	116
Figure 10-11: <i>Variation de la perméabilité à l'oxygène des bétons</i> .....	117
Tableau 10-3 <i>Permeabilité aux gaz de différents type de béton à l'age de six mois</i> .....	117
Figure 10-12: <i>Perméabilité intrinsèque de deux types de bétons âgés de six mois</i> .....	118
Figure 10-13: <i>Observation au MEB de la micro structure interne des éprouvettes de béton conservées dans l'eau courante</i> .....	121
Figure 10-14: <i>Observation au MEB de la micro structure interne des éprouvettes de béton conservées dans l'eau agressive</i> .....	122
Figure 10-15: <i>Radiogramme des éprouvettes des différents bétons conservées dans l'eau courante</i> .....	124
Figure 10-16: <i>Radiogramme des éprouvettes de béton de contrôle conservées dans l'eau agressive</i> .....	125

## Introduction générale

Le béton est le produit le plus consommé après l'eau et le pain. Avec plus de sept milliards de m<sup>3</sup> produit annuellement dans le monde il dénote l'état de développement des pays.

Le béton est un matériau durable lorsqu'il est bien formulé et correctement mis en œuvre. Toute fois même durci de longue date, il est loin d'être un matériau inerte. Il travaille et subit l'épreuve du temps dans le milieu plus au moins agressif qui l'entoure.

Actuellement, lorsqu'on conçoit et on construit un ouvrage d'art ou une structure du génie civil, un des aspects du cahier des charges est la durée d'utilisation de cet ouvrage. Par exemple, les enceintes de confinements des réacteurs de centrales nucléaires sont prévues pour une utilisation de quarante ans. Le pont Vasco de Gama à Lisbonne doit pouvoir tenir cent ans avant que la corrosion des armatures ne soit visible à la surface des piles. Le viaduc de Millau est prévu pour une durée de service d'un siècle, et le tunnel sous la Manche 120 ans. Pouvoir garantir une durée de vie d'un ouvrage implique en particulier de pouvoir garantir l'intégrité du matériau composant l'ouvrage pendant cette durée de vie.

Pour le cas d'un pont dans un environnement marin, il est par exemple nécessaire d'éviter que les ions chlore n'atteignent les armatures de la pile de pont, ce qui impose dans la conception de la structure, un enrobage des armatures important (trois à cinq centimètres par exemple), mais aussi dans la conception du matériau, par le choix de ciments résistants à l'eau de mer et d'une formulation assurant une faible perméabilité. Lorsque le matériau est bien conçu, il n'y a à priori pas de risque lié à la durabilité de la structure lors de son fonctionnement nominal.

La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel celui-ci va être exposé durant la durée de vie d'un ouvrage. Certains ions, dans un environnement aqueux, peuvent être néfastes pour le ciment hydraté, et par conséquent, pour l'intégrité du matériau béton

Les dégradations physico-chimiques et biologiques peuvent être dues à des agents extérieures (acide, eau pure, eau de mer, solution saline, solution bactériologique etc.) ou à des agents internes (alcali réaction, activité sulfatique, gel et dégel de l'eau interstitielle etc.).

Par ailleurs ces altérations sont de deux types, soit une érosion qui entraîne un liant, soit un gonflement souvent accompagné par une fissure due à la formation de composés expansifs.

La dégradation du béton provient le plus souvent de son attaque par les agents acides ou salines contenues dans l'eau avec laquelle il est en contact. Elle peut provenir aussi de la corrosion des armatures dans le cas de béton armé. Si le béton n'assure pas une barrière protectrice efficace entre ces armatures et l'ambiance extérieure, l'oxydation provoquera le gonflement des armatures; ce gonflement est alors la cause de l'éclatement du béton censé protéger le ferrailage. Il s'agit donc de concevoir des bétons capables de résister à l'agressivité du milieu ambiant.

De nos jours, la production de bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa est très fréquente dans bons nombres de laboratoires dans le monde et, leur utilisation sur les chantiers commence à se développer.

L'emploi des bétons à hautes performances (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.

Cette étude est divisée en quatre parties.

**La première partie** présente, premièrement, sous l'aspect de sa microstructure, la pâte de ciment jusqu'à son hydratation. Deuxièmement, nous explicitons les phénomènes physiques et chimiques qui peuvent intervenir lors d'agressions chimiques sur des matériaux cimentaires. L'objectif de ce chapitre est de mettre en place les outils qui seront nécessaires à la réalisation de notre étude.

**La deuxième partie** définit l'approche retenue pour notre étude ainsi que la formulation du béton. Des séries de bétons sont formulés avec ajouts locaux : laitier de hauts fourneaux et pouzzolane finement broyée. D'autres séries sont préparées sans ajouts, et serviront de référence.

**La troisième partie** propose des applications pour un ciment CPA CEM I 42.5 sans ajouts et pour un CEM I substitué partiellement par du laitier d'une part et par de la pouzzolane d'autre part, conservé dans deux environnements différents : eau potable et eau séléniteuse. Dans ces trois applications, nous avons comparé qualitativement et

quantitativement les résultats issus de notre travail et les résultats expérimentaux issus de la littérature.

*La quatrième partie* présente des développements sur la durabilité des bétons, en tirant parti de la formulation retenue. Nous présentons en particulier un développement de la mesure de la perméabilité aux gaz des bétons durcis par un perméamètre à charge constante que nous avons conçue et réalisé au laboratoire. L'endommagement chimique, rapport des coefficients de perméabilité aux gaz du matériau chimiquement dégradé et du matériau sain, est caractérisé dans le cadre de la pénétration des chlorures. Il est en particulier défini par la porosité capillaire et par la répartition spatiale des phases solides, ceci par le biais de la percolation du squelette solide.

Enfin, nous terminons cette thèse par une conclusion, qui rappelle les objectifs et les principaux résultats obtenus. Cette conclusion est complétée par des perspectives d'extension de ce travail, pour améliorer cette recherche ou compléter les résultats obtenus par des informations supplémentaires.

*REVUE*

*BIBLIOGRAPHIQUE*

# MICROSTRUCTURE D'UNE PATE DE CIMENT

---

## 1.1 INTRODUCTION

Les matériaux à matrice cimentaire tels que les bétons sont les matériaux de construction les plus utilisés dans le monde.

Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons, car ses hydrates apportent la cohésion du squelette granulaire, et donc une tenue mécanique du matériau et de la structure en béton. Par contre, la stabilité des propriétés mécaniques d'un béton repose en grande partie sur la stabilité des hydrates du ciment. Il est donc nécessaire de s'assurer du comportement à long terme du ciment pour garantir celui de la structure en béton.

## 1.2 MICROSTRUCTURE D'UNE PATE DE CIMENT : HYDRATATION

Les ciments sont des matériaux complexes, car polyphasiques, poreux, et évolutifs dans le temps. L'analyse de la microstructure des ciments est nécessaire pour comprendre précisément ces matériaux et leurs comportements. Ce chapitre présente, pour un ciment CEM I, dit Portland, différents aspects liés à sa microstructure.

Tout d'abord, le matériau est décrit à l'état anhydre. Puis les processus d'hydratation de ce ciment, et les différents aspects de la microstructure, sont détaillés.

### 1.2.1 LE CIMENT PORTLAND A L'ETAT ANHYDRE

#### 1.2.1.1 Fabrication d'un ciment

La base du ciment Portland, le clinker, est fabriquée à partir d'un mélange de calcaire et d'argile extraits de carrières. Après extraction et concassage, ces deux roches sont mélangées, décarbonatées et transformées lors d'une cuisson dans un four où la température atteint 1450°C. Le produit formé, le clinker, est trempé à l'air. Les granules de

clinker sont ensuite finement broyés. La surface spécifique des grains, notée finesse, est de l'ordre de  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  pour un ciment courant et est un facteur direct de la réactivité, et en conséquence, de la résistance caractéristique du ciment hydraté.

A ce clinker, base du ciment Portland, sont ajoutés du gypse (à hauteur de 3 à 5%), qui agit comme régulateur de prise, et éventuellement d'autres constituants tels que des fillers calcaires, de la fumée de silice, des laitiers de haut-fourneau ou des cendres volantes, en fonction du ciment à composer.

### 1.2.1.2 Composition chimique d'un ciment

Le ciment Portland est constitué de minéraux. Sa cuisson et sa trempe conduisent à avoir quatre constituants de base, très solubles, dont les compositions chimiques et cimentières, ainsi que leurs proportions volumiques moyennes sont les suivantes :

- silicate tricalcique (50 à 70 %) :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$   $\leftrightarrow$   $\text{C}_3\text{S}$
- silicate bicalcique (15 à 30 %) :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$   $\leftrightarrow$   $\beta \text{C}_2\text{S}$
- aluminat tricalcique (5 à 15 %) :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$   $\leftrightarrow$   $\text{C}_3\text{A}$
- aluminoferrite tetracalcique (5 à 15 %) :  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$   $\leftrightarrow$   $\text{C}_4\text{AF}$

Les silicates,  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\beta\text{C}_2\text{S}$ , sont contenus dans les phases désignées respectivement par alite et bélite. Ces phases contiennent aussi quelques impuretés sous forme d'alcalins, à l'origine de la présence des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  dans la solution interstitielle, ou de traces de métaux lourds. Ces derniers ont pour origine les combustibles utilisés dans le four. Quelques études ont permis de comprendre les mécanismes de piégeage dans la matrice cimentaire ou de relargage dans l'environnement extérieur de ces métaux lourds lors du comportement à long terme de bétons, mortiers ou ciments, soumis à une lixiviation [1, 2]. A ce clinker il est ajouté du gypse ( $\text{CaSO}_4 : 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CSH}_2$ ) et d'autres ajouts normalisés.

Dans la suite de l'étude, nous ne traiterons que le cas du ciment dit Portland CEM I, c'est à dire du clinker complété par du gypse simplement.

### 1.2.2 HYDRATATION D'UN CIMENT PORTLAND

L'hydratation d'un ciment Portland peut se résumer, dans une approche simplifiée, à l'hydratation des quatre constituants de base ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\beta\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$ ). Pour ce faire, nous étudierons d'abord les mécanismes d'hydratation des silicates ( $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ ), des

aluminates ( $C_3A$  et  $C_4AF$ ), puis nous aborderons le cas de l'hydratation couplée de ces deux familles d'anhydres pour traiter du cas du ciment Portland.

### 1.2.2.1 Hydratation des silicates

Les silicates représentent une proportion pouvant aller des 66% à 85% en volume d'un ciment. Les deux espèces de silicates présents dans la phase anhydre du ciment, les silicates tricalcique et bicalcique, ne diffèrent que par la stœchiométrie.

Les hydrates produits par la dissolution de ces deux silicates, très solubles, sont des silicates de calcium hydratés, plus communément appelés C-S-H, et de la chaux hydratée, désignée par les cimentiers par CH. Les C-S-H sont des hydrates de stœchiométrie variable. Le rapport entre le nombre de moles de calcium sur celui de silice donne une indication sur cette stœchiométrie. Dans une pâte de ciment hydratée, ce rapport, noté C/S est proche de 1,7. Les C-S-H précipitent autour des grains de ciment et forment une couche qui ralentit la cinétique de dissolution des anhydres, qui devient contrôlée par la diffusion ionique au sein des hydrates. La portlandite est appelée chaux éteinte, ou plus simplement, chaux, notée  $[Ca(OH)_2]$  précipite quant à elle dans la solution interstitielle. F. Young [3] propose une équation bilan de l'hydratation



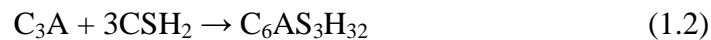
L'équation bilan de l'hydratation du  $C_2S$  est similaire, mais ne produit que 0,3 moles de portlandite au lieu de 1,3 pour le  $C_3S$ . En présence de fumée de silice, la portlandite issue de l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  peut être consommée et former à partir de cette silice des C-S-H dont la structure est plus polymérisée et le rapport C/S proche de 1,1. La cinétique d'hydratation du  $C_2S$  est beaucoup plus lente que celle du  $C_3S$ . Par exemple, des études sur des bétons à poudres réactives (BPR) ont montré que le  $C_2S$  n'est pratiquement pas hydraté par rapport au  $C_3S$  lorsque le matériau n'évolue plus [4]. A court terme, les silicates hydratés formés proviennent donc majoritairement du  $C_3S$ , qui ont un rôle prépondérant dans les montées en résistance à court terme des bétons. L'hydratation plus lente du  $C_2S$ , après 28 jours, conduit à l'amélioration des résistances à long terme. Des essais sur de l'alite et de la bélite ont mis en évidence que les résistances à long terme sont comparables et que seule la cinétique d'hydratation est différente [5].

### 1.2.2.2 Hydratation des aluminates

L'hydratation des aluminates (qui représentent une fraction volumique maximale de 20% du ciment) est très rapide, exothermique, et par conséquent intervient dans les premiers instants de l'hydratation d'un ciment CEM I. Les hydrates formés peuvent être  $C_2AH_8$ ,  $C_3AH_6$  ou  $C_4AH_{13}$ . Ils précipitent immédiatement autour des grains de ciment et perturbent par conséquent l'hydratation des silicates en limitant la surface de dissolution. Ce phénomène provoque, de plus, une rigidification précoce du matériau, perturbant sa mise en œuvre, limite la quantité de C-S-H et de portlandite formés et pénalise donc les résistances mécaniques à long terme.

### 1.2.2.3 Le rôle des sulfates dans l'hydratation du ciment

Pour remédier à ce phénomène de fausse prise, les cimentiers incorporent une source de sulfates par l'intermédiaire du gypse. Si cette quantité est bien dosée, ce gypse réagit avec les aluminates pour former des hydrates de sulfoaluminates de calcium : le trisulfoaluminate de calcium, aussi connu sous le nom d'ettringite et le monosulfoaluminate de calcium. La précipitation d'ettringite, plus tardive dans le processus d'hydratation, se fait au détriment des hydrates  $C_4AH_n$ , et permet donc aux silicates de s'hydrater "librement". L'équation bilan de l'hydratation de l'aluminate tri-calcique en présence de gypse donne :



Après quelques jours, cette ettringite formée se dissout partiellement pour former du monosulfoaluminate de calcium.

### 1.2.2.4 La solution interstitielle

Lors de l'hydratation, l'eau de gâchage se charge en ions. Ces ions ont pour origine les anhydres qui se sont dissous :  $C_3S$ ,  $\beta C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  et gypse. La précipitation des hydrates se produit suivant des processus de germination et croissance de cristaux, en fonction de la concentration des ions de cette solution aqueuse, nommée dans la pâte de ciment hydratée la solution interstitielle.

Au cours de l'hydratation de la pâte de ciment, la composition chimique de la solution interstitielle évolue. Cette évolution est à mettre en relation avec les espèces solides présentes, au contact direct avec la solution. Une étude de l'évolution des espèces en solution a été proposée par P. Longuet [6]. Dans la figure 1.1, nous voyons une

augmentation au cours du temps de la concentration en alcalins ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ), relargués lors de la dissolution des phases alite et bélite, et une diminution globale de la quantité de calcium et de sulfates en solution. L'augmentation de la concentration en sulfates après sept jours d'hydratation est à mettre en relation avec la mise en place d'un nouvel équilibre chimique liée à la formation de monosulfualuminate au détriment de l'ettringite. La première baisse de la concentration du calcium en solution, après pratiquement cinq heures, est reliée à une précipitation de portlandite.

La composition de la solution interstitielle pour une pâte de ciment hydratée n'évolue pratiquement plus après six mois d'hydratation et se caractérise par une forte concentration en alcalins (de l'ordre de 100 à 300  $\text{mmol.l}^{-1}$ ), un pH très élevé (13,5 environ en présence d'alcalins) et une concentration en calcium assez faible ( $1\text{mmol.l}^{-1}$ ).

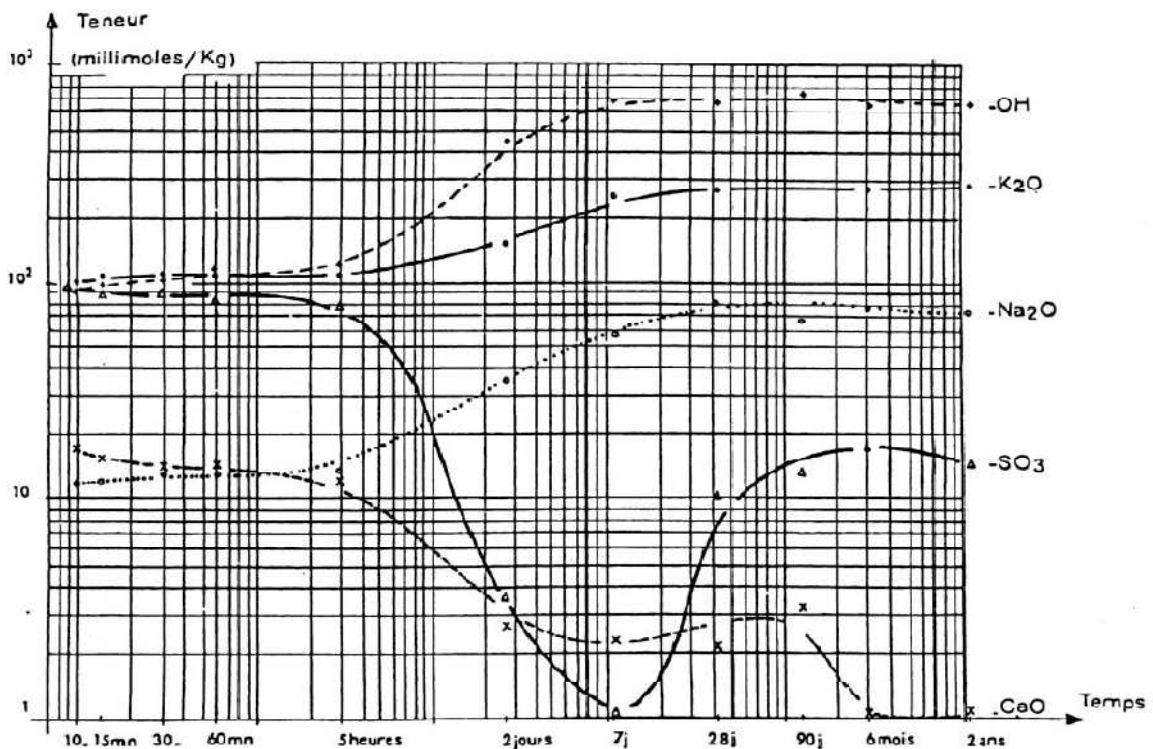


Figure 1.1 – Evolution de l'hydratation de la composition de la solution interstitielle, d'après P. Longuet et al. [6]

### 1.2.2.5 Aspects cinétiques de l'hydratation

La cinétique d'hydratation de chaque phase anhydre ou du ciment peut être caractérisée à partir du flux thermique dégagé par l'hydratation au cours du temps.

Nous voyons que le flux thermique expérimental est très différent du flux 'théorique', résultant de la somme des flux thermiques de l'alite et du système  $C_3A$  – gypse – CH pris séparément (figure 1.2), ce qui illustre bien le fait que la cinétique globale d'hydratation d'un ciment est très fortement influencée par tous les constituants qui composent le ciment.

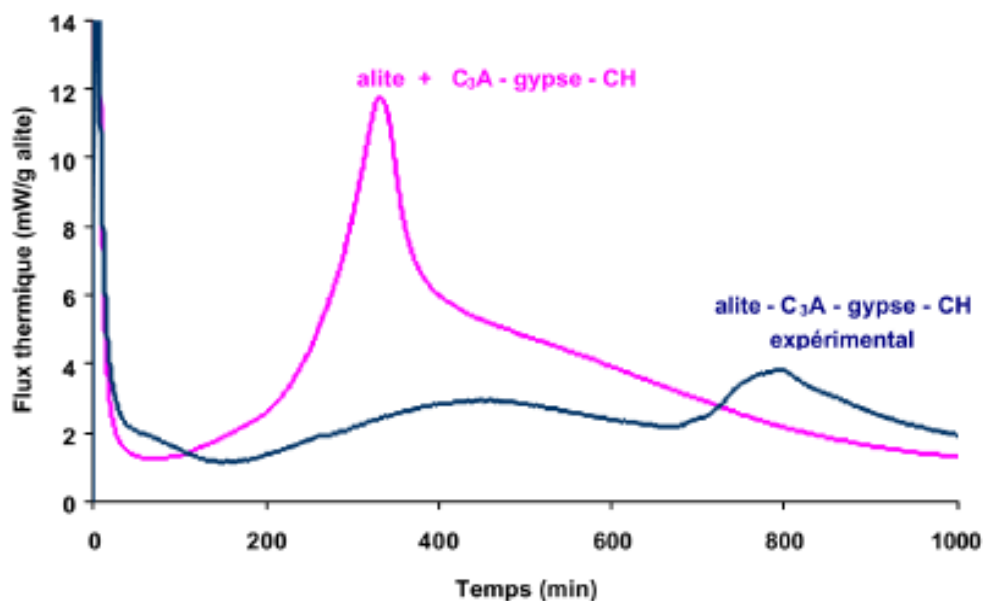


Figure 1.2 – Courbes de flux thermiques dégagés lors de l'hydratation de l'alite et du système  $C_3A$ –gypse–CH (à gauche), et comparaison entre le flux théorique, somme des flux des deux systèmes, et le flux thermique expérimental, d'après H. Minard [7]

Un point important dans la cinétique d'hydratation d'un ciment est le passage du comportement 'fluide' au comportement 'solide' de la pâte, cet instant est nommé la prise. Elle correspond au moment où il y a une percolation mécanique en particulier par les C–S–H mais aussi, localement, par la portlandite qui peut jouer le rôle de ponts d'hydrates (figure 1.3).

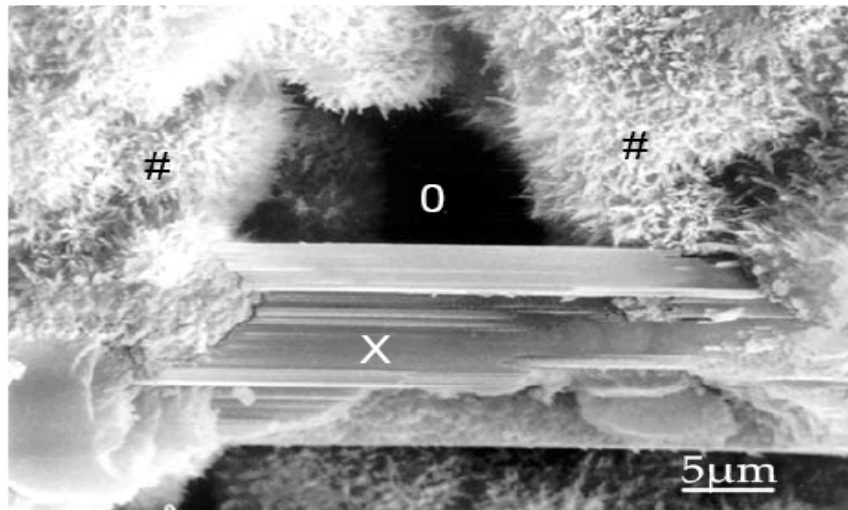


Figure 1.3 – Cristal de portlandite (X) entre des C – S – H (#), d'après [8]. La porosité est repérée par (O).

### 1.2.3 MICROSTRUCTURE D'UNE PÂTE DE CIMENT HYDRATÉE

#### 1.2.3.1 Description des hydrates formés

Les **silicates de calcium hydratés** (désignés par C–S–H), issus de l'hydratation des phases alite et bélite, représentent en volume 50 à 60% des hydrates formés dans un ciment Portland. Le terme C–S–H désigne une famille de silicates de calcium, mal structurés et de stoechiométrie variable, ce qui la distingue dans la pâte de ciment par rapport aux autres hydrates, cristallins, tels que la portlandite. Dans une pâte de ciment, les C–S–H ont une structure fibreuse. (Figure 1.4).

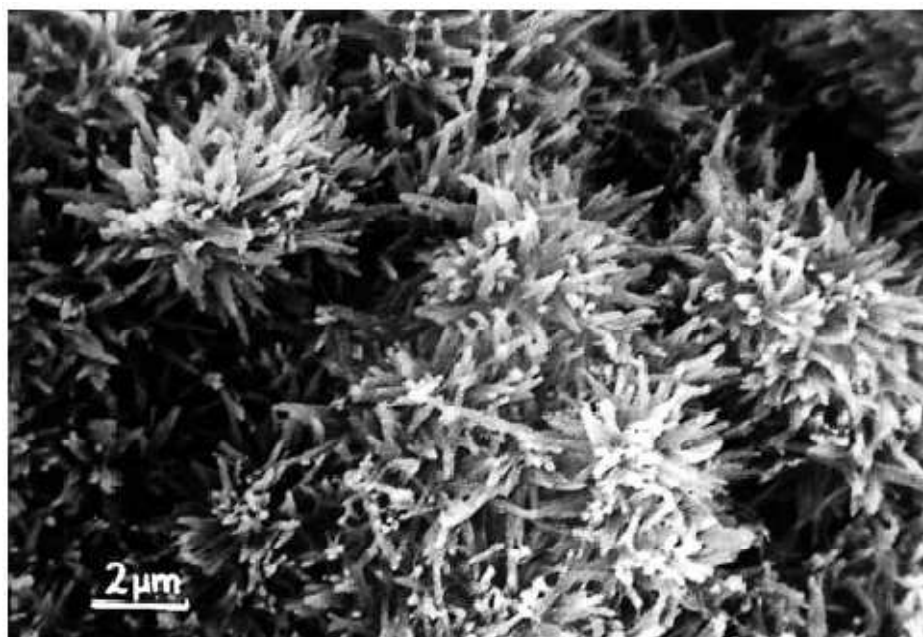


Figure 1.4 – Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une pâte de ciment hydratée, d'après [8]

La formation des C–S–H dans une pâte de ciment peut avoir plusieurs origines.

Les C–S–H peuvent être issus de l'hydratation des  $C_3S$  ou  $\beta C_2S$  et avoir un rapport C/S proche de 1,7 ou aussi bien être issus de la réaction de la portlandite avec de la fumée de silice et avoir un rapport C/S plutôt proche de 1,1. Ce deuxième C–S–H est dit pouzzolanique.

Dans une pâte de ciment, et dès les premières secondes, la formation du C–S–H a lieu à la surface des grains de clinker, à partir des ions  $Ca^{2+}$ ,  $H_2SiO_4^{2-}$  et  $OH^-$  fournis par la dissolution de l'alite et de la bélite [9, 10]. Ce C–S–H a initialement un rapport C/S proche de 1,1. La porosité de cette couche conduit à contrôler par diffusion la vitesse de dissolution des anhydres. Après formation de cette "couche" deux types de C–S–H se forment : à l'extérieur de cette couche un C–S–H en forme d'aiguilles nommé *outer product* est formé à partir des ions en solution tandis qu'à l'intérieur de cette couche, "en remplacement" des anhydres, se forme un C–S–H plus dense que l'*outer product*, l'*inner product*.

En laboratoire, la synthèse des C–S–H peut se faire par des suspensions où l'on fait réagir de la portlandite et de la fumée de silice, ou bien du  $CaCl_2$  avec du  $Na_2SiO_3$ . Cette deuxième réaction conduit à former des C–S–H de rapport C/S proche de 1 et du chlorure de sodium.

La structure des C-S-H est assez complexe. Son étude à l'échelle nanométrique peut expliciter le comportement physico-chimique des C-S-H et en particulier sa stoechiométrie variable. La synthèse en laboratoire des C-S-H de rapport C/S proche de 1 et leur étude, notamment par observation au Microscope Electronique à Transmission (MET) (figure 1.6), a révélé la structure lamellaire et permis de confirmer l'existence d'un analogue naturel de ces C-S-H, la tobermorite, structure proposée par H.F.W. Taylor [5]. Elle peut aussi se former dans des ciments ayant subi un autoclavage.

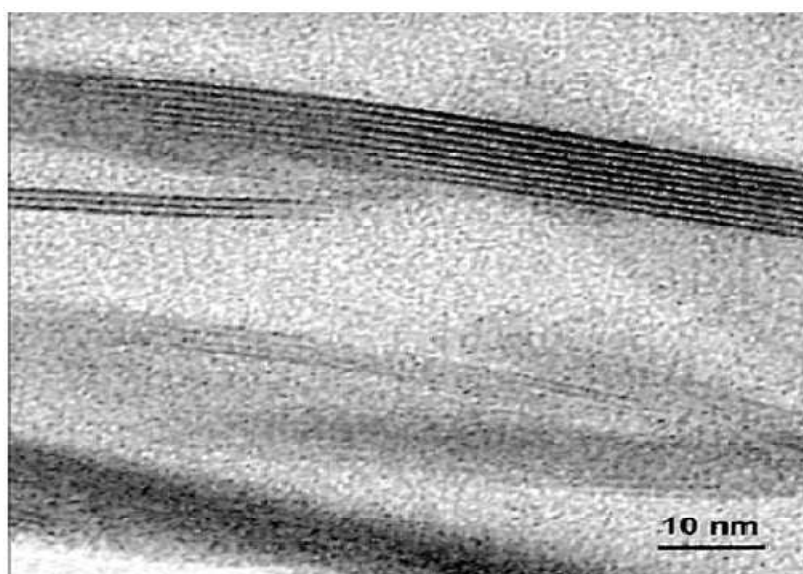


Figure 1.5– Image au microscope électronique à transmission d'un C –S –H de synthèse dit tobermoritique (Photo C. Clinard, d'après [11])

**La portlandite** est un composé cristallin sous forme de plaquettes hexagonales et de formule chimique  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Elle se forme par précipitation dans l'espace poreux de la pâte de ciment. Au cours de l'hydratation, les cristaux de portlandite croissent, rejoignent les grains de ciment recouverts de gel de C-S-H et forment ainsi des ponts d'hydrates (figure 1.3), facilitant la percolation des phases solides à court terme.

L'équilibre chimique de la portlandite dans un milieu cimentaire sans présence d'alcalins s'établit à un pH très basique, de l'ordre de 12, 4. Ainsi, la portlandite est très sensible à un abaissement du pH de la solution interstitielle et, du fait de sa grande solubilité, se dissout pour compenser le départ des ions calcium lors de la lixiviation par l'eau pure. Des essais

expérimentaux [12] et des calculs par modélisations [13] sur une pâte de ciment CEM I à rapport E/C de 0,5 ont montré que la seule dissolution de la portlandite (qui représente en volume environ 20% des phases solides) conduit à diviser par deux le module de Young de la pâte de ciment lixiviée.

**Les sulfoaluminates de calcium** sont issus de l'hydratation de l'aluminate tricalcique et de l'aluminoferrite tétra-calcique en présence de gypse. Dans les premiers instants, seule l'ettringite (tri-sulfoaluminate de calcium) se forme, par précipitation dans le réseau poreux.

La formation de monosulfoaluminate de calcium intervient plus tardivement dans le processus d'hydratation et précipite dans les pores suite à l'hydratation du C<sub>3</sub>A et à la dissolution de l'ettringite préalablement formé (qui devient vis-à-vis du monosulfoaluminate la source d'ions sulfates lorsque tout le gypse a été consommé).

L'ettringite issue de l'hydratation du ciment est souvent désignée ettringite primaire.

De par sa structure en aiguilles (figure 1.6 à gauche), son volume molaire est important et est bénéfique au comportement mécanique de la pâte de ciment en contribuant à assurer une résistance mécanique aux jeunes âges et à diminuer la porosité capillaire.

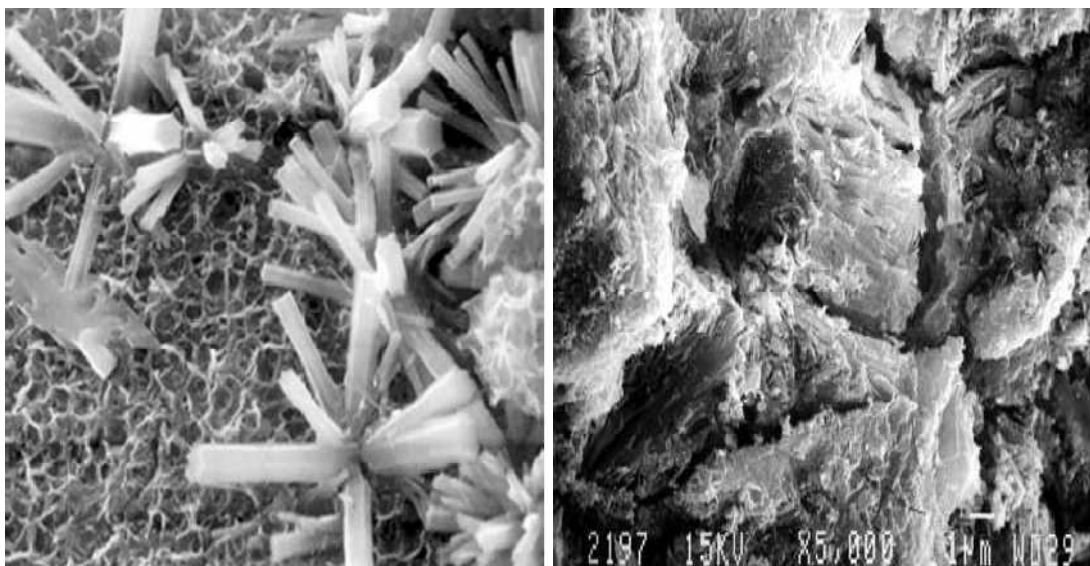


Figure 1.6 – Observations au microscope électronique à balayage d'aiguilles d'ettringite dans un ciment au laitier [14] et d'ettringite massive dans des pâtes de ciment [15]

La formation d'ettringite peut se faire aussi à long terme dans une matrice cimentaire durcie. Deux origines d'ettringite différée sont actuellement connues.

D'une part, l'ettringite différée peut se former par la transformation du monosulfoaluminate ou par l'hydratation du  $C_3A$  résiduel suite à l'apport d'ions sulfates provenant de l'environnement extérieur. D'autre part, suite à une cure thermique pour accélérer les processus d'hydratation, ou dans les structures massives en béton, si la température au cœur du matériau est trop importante et dépasse  $80^\circ\text{C}$ , l'ettringite primaire se dissout puis reprécipite après le refroidissement du matériau cimentaire durci.

Dans les deux cas, la précipitation d'ettringite se fait dans un milieu durci et confiné et peut générer des contraintes puis une expansion au sein du matériau cimentaire. Des observations au microscope électronique à balayage mettent en évidence une forme d'ettringite massive (figure 1.6 à droite), remplissant intégralement des pores, puis initiant des fissures. Pour éviter ces désordres microstructuraux qui pénalisent le fonctionnement du matériau, des prescriptions conduisent à limiter la température de cure à  $65^\circ\text{C}$  et, en fonction de l'environnement extérieur, à limiter la teneur en aluminates dans le ciment.

### 1.2.3.2 Description du réseau poreux

La porosité initiale est implicitement définie à partir de la quantité d'eau qui est utilisée pour hydrater le ciment, autrement dit du rapport E/C. Pour des raisons de mise en œuvre et dans un béton courant, la quantité d'eau introduite est supérieure à la quantité d'eau stoechiométriquement nécessaire à l'hydratation totale du ciment. De ce fait, même à hydratation complète, il reste nécessairement une phase aqueuse au sein de la microstructure de la pâte de ciment. Cette phase aqueuse peut s'évaporer et être remplacée partiellement par une phase gazeuse. De ce fait, une pâte de ciment est obligatoirement poreuse.

Une première porosité, dite *porosité capillaire*, a une taille de pores comprise entre 0,1 et  $10\mu\text{m}$ . Cette porosité est un "reliquat" de la porosité initialement introduite lors de la définition du rapport E/C. C'est au sein de cette porosité que la plupart des phénomènes de dissolution ou précipitation de phases solides se produit, ou que l'échange d'espèces par diffusion avec l'environnement extérieur se fait. Cette porosité peut être partiellement

ou totalement connectée. Une étude statistique de percolation dans un réseau 3D composé de mailles cubiques de  $1\mu\text{m}$  de côté a mis en évidence un seuil de percolation de la porosité pour une valeur d'environ 18% [16]. Des essais de diffusivité confirment l'ordre de grandeur de cette porosité limite. La porosité capillaire d'une pâte de ciment de rapport  $E/C = 0,65$  est d'environ 30% alors que pour un béton de poudres réactives elle est plutôt proche de 4% [6].

Les essais de porosimétrie mettent aussi en évidence une *porosité nanométrique*. Cette porosité est due à la porosité intrinsèque de certains hydrates et en particulier les C-S-H qui ont une structure lamellaire, mise en évidence par des observations au Microscope Electronique à Transmission (figure 1.6) et illustrée dans le modèle de R. Feldman et P. Sereda (figure 1.7). La porosité nanométrique comprend aussi bien l'espace interfeuillelet des C-S-H que les vides créés par l'empilement parfois irrégulier des lamelles de C-S-H. L'ordre de grandeur de ces pores est de 0,1 à 10 nm. A cette échelle, les effets surfaciques tels la pression capillaire ou l'absorption dans les pores sont prépondérants devant les phénomènes de transport tels que le transport diffusif. Powers a évalué à 28% la porosité comprise au sein du gel de C-S-H [17].

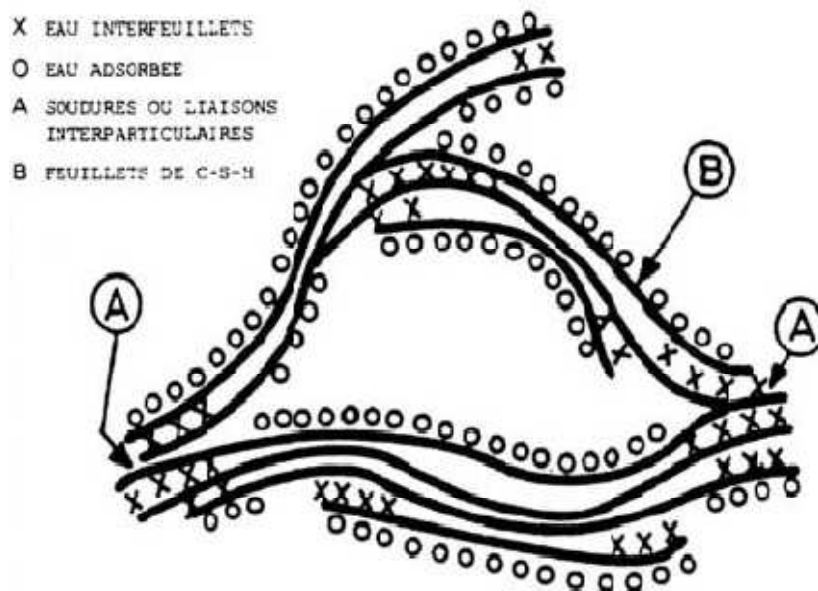


Figure 1.7 – Schématisation de la structure des C-S-H, d'après R. Feldman et P. Sereda [18]

# **MECANISMES PHYSIQUES ET CHIMIQUES INTERVENANT DANS LA DURABILITE DES BETONS**

---

## **2.1 INTRODUCTION**

Puisque les matériaux à matrice cimentaire sont poreux, la plupart des phénomènes physiques et chimiques associés à des agressions chimiques externes sur une pâte de ciment s'effectuent par l'intermédiaire de cette porosité. Dans notre étude, ces phénomènes sont :

- D'une part le transport de matière entre le matériau et un environnement externe aqueux, initié par la différence de composition chimique entre la solution poreuse du matériau et l'environnement externe,
- D'autre part les réactions, par dissolutions ou précipitations, pour rétablir un équilibre chimique entre les phases solides au contact avec la solution interstitielle contenue dans la porosité du matériau.

## **2.2 LES DIFFERENTES FORMES DE TRANSPORT DANS UN MILIEU POREUX**

L'objectif de cette partie est de présenter de manière générale les différents modes de transport de fluides ou d'ions en solution au sein d'un matériau poreux composé d'une matrice solide et de sa porosité dans laquelle cohabitent une phase liquide et une phase gazeuse. Dans cette partie, nous ne considérons pour l'instant que le transport dans un milieu non-réactif. En effet, les éventuelles dissolutions, précipitations ou absorptions à la surface modifient les expressions des lois de transport en ajoutant des termes source.

### **2.2.1 TRANSPORT PAR PERMEATION**

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité représente le deuxième indicateur de la durabilité de béton. Elle dépend fortement du réseau poreux et de sa connectivité. En 1856, Henri Darcy [19] a formulé la loi de la vitesse d'écoulement de l'eau dans un corps poreux, à la suite de travaux sur l'écoulement de l'eau dans une couche filtrante de sable. D'après Darcy, cette loi se traduit par l'équation :

$$Q = K.S. (H + e) / e$$

Où :

$Q$  : Volume d'eau écoulé par unité de temps (débit).

$S$  : Surface de la couche filtrante.

$e$  : Epaisseur de couche.

$H$  : Hauteur de la colonne d'eau au-dessus de la couche filtrante.

$K$  : Coefficient lié à la nature du sable, lorsque la pression sous le filtre est égale à la pression atmosphérique. Considérons l'ensemble du matériau poreux de section apparente  $A$ , siège d'un écoulement établi en régime laminaire. Le débit volumique  $Q_x$  du fluide de viscosité  $\mu$  dans la direction  $Ox$  sous un gradient de pression est donné sous forme différentielle par la loi de Darcy, figure (2-1).

$$Q_x = -Kx / \mu \cdot A \cdot dp / dx$$

Avec :

$K_x$  : Perméabilité au fluide du matériau dans la direction  $Ox$  considérée ( $m^2$ ) ;

$\mu$  : Viscosité du fluide (Pa.s) ;

$A$  : Section ( $m^2$ ) ;

$P$  : Pression (Pa) ;

$x$  : Longueur (m) ;

$Q_x$  : Débit volumique du fluide ( $m^3/s$ ).

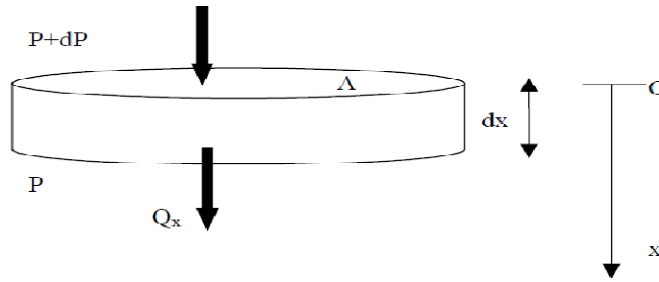


Figure 2-1 : Loi de Darcy sur un élément de volume.

Des écarts avec la loi de Darcy sont observés expérimentalement [20, 21].

En effet, pour une mesure de perméabilité sur un matériau donné (âge et préconditionnement fixés), la nature du fluide s'écoulant à travers le matériau et la pression appliquée pendant la mesure influencent les résultats car il existe des interactions fluide-milieu poreux. Enfin, l'état hydrique du matériau influence sa perméabilité.

L'application d'un gradient de pression à un fluide dans un matériau poreux inerte induit un déplacement de ce fluide au sein des pores. Ce phénomène de transport a été mis en évidence par H. Darcy (1803-1858), qui a énoncé la fameuse loi, mettant en relation le flux du fluide au gradient de la charge hydraulique, dans le cadre d'un écoulement unidirectionnel dans un milieu poreux isotrope.

Son expression, étendue au cas tridimensionnel, donne :

$$J = -K \text{ grad}(H), \quad (2.1)$$

où

J est le flux du fluide [ $\text{m.s}^{-1}$ ], K le coefficient de perméabilité isotrope du matériau poreux [ $\text{m.s}^{-1}$ ], et H la charge hydraulique [m]. Si l'on applique la conservation de la masse, dans un volume élémentaire du matériau poreux, le flux sortant est égal au flux entrant, ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\text{div}(J) = 0. \quad (2.2)$$

Dans le cas d'un fluide incompressible, le développement de l'équation 2.2 donne l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0. \quad (2-3)$$

La résolution numérique de cette équation différentielle permet de déterminer l'allure du réseau d'écoulement dans le matériau poreux.

### 2.2.2 TRANSPORT PAR ADVECTION

Si l'on s'intéresse maintenant au transport des ions contenus dans ce fluide en mouvement, au sein du milieu poreux, le flux de matière peut s'écrire alors par :

$$\vec{J} = c \vec{v}, \quad (2-4)$$

où  $v$  est le vecteur vitesse du fluide. Si le mouvement du fluide est dû à des phénomènes de perméation, la vitesse du fluide s'exprime à partir du gradient de la pression, ce qui conduit à l'expression suivante [22] :

$$\vec{J} = -c * K \overrightarrow{\text{grad}}(H). \quad (2-5)$$

Ce mode de transport est dit transport par advection, ou aussi désigné par transport par dispersion.

### 2.2.3 TRANSPORT PAR DIFFUSION

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée, [23].

Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide ou en phase gazeuse.

La diffusion en phase liquide concerne notamment la diffusion des chlorures dans le béton.

Deux paramètres sont essentiels pour décrire ce phénomène :

- Le coefficient de diffusion des chlorures qui caractérise leur mobilité. Il est d'une grande importance pour estimer le taux de pénétration des chlorures.
- Les isothermes de fixation des chlorures dans le cas de matériaux cimentaires.

La diffusion en phase gazeuse concerne notamment la dessiccation d'un béton déjà partiellement séché (transfert de vapeur d'eau), ainsi que la pénétration de gaz agressifs pour le béton ou pour ses armatures tels que le dioxyde de carbone ou l'oxygène [23].

A noter que, le transport de gaz dans les bétons ne se produit généralement pas par écoulement (sous l'effet de différence de pression), mais plutôt par diffusion dans l'air contenu dans les pores ou les fissures du matériau.

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

$$J = -D \text{ grad}(c), \quad (2-6)$$

où  $c$  est la concentration de l'espèce considérée et  $D$  le coefficient de diffusion de l'ion en solution.

Ecrivons la relation de conservation de la matière dans un volume élémentaire. La variation de la concentration entre deux instants est égale à la quantité de matière échangée par diffusion.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div}(\vec{J}) = \text{div}(D \overrightarrow{\text{grad}}(c)). \quad (2-7)$$

En notation différentielle, ceci se traduit par :

Le coefficient de diffusion  $D$  de l'ion en solution est une grandeur qui inclut des paramètres liés notamment à la mobilité de l'ion et donc à son diamètre et à la force ionique de la solution. Si l'on considère que le volume élémentaire représentatif est cette fois le milieu poreux, d'autres paramètres tels que la tortuosité ou la connectivité du réseau poreux influent alors sur le mouvement de l'ion au sein du milieu poreux.

## **2.3 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION**

Il est intéressant de noter que les méthodes utilisées pour déterminer le coefficient de diffusion ont été toujours améliorées afin de réduire la durée des essais.

### **2.3.1 ESSAI DE DIFFUSION EN REGIME STATIONNAIRE**

En 1850, Graham [24], a entrepris des expériences sur la diffusion de solution de chlorure de sodium. Pour réaliser ses expériences, il a relié deux bouteilles contenant des

solutions de sel diluées (figure 2-2) pendant quelques jours. Il était le premier à observer que le flux provoqué par diffusion est proportionnel au gradient de la concentration du sel. Quelques années plus tard (1855), Adolf Fick, a développé la loi connue aujourd'hui sous l'appellation de la première loi de Fick. Cette loi est purement phénoménologique et s'apparente aux lois de Fourier.

Le flux est donné par la relation suivante :

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2-7) \quad (2-8)$$

Où :

$J$  : Flux (mol/ m<sup>2</sup>.s).

$D$  : Coefficient de diffusion (m<sup>2</sup>/s).

$\partial c$  : Concentration de l'espèce diffusante (mol/m<sup>3</sup>).

$\partial x$  : Distance (m)

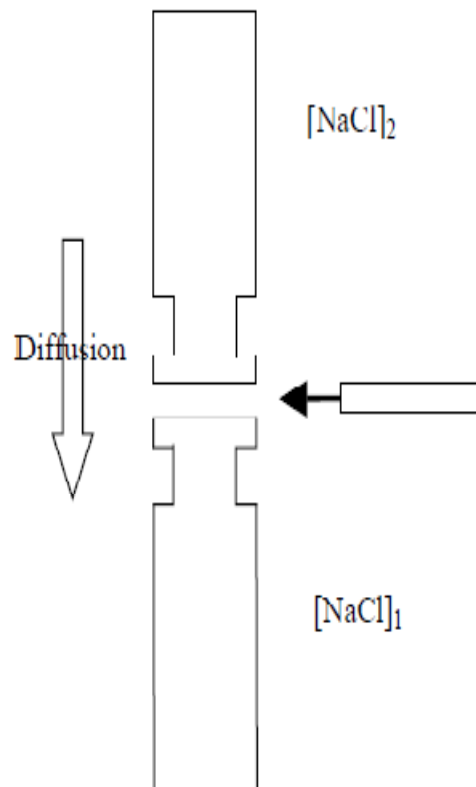


Figure 2-2 :Appareil de diffusion de Graham [24].

### 2.3.2 ESSAI D'IMMERSION OU DIFFUSION EN REGIME TRANSITOIRE

Le principe de cet essai est le même que l'essai de diffusion. Un échantillon saturé de béton est exposé à une solution de sel où les chlorures pénètrent dans le matériau par diffusion. La différence fondamentale entre les deux essais, c'est que dans le cas de l'immersion, on détermine un profil de concentration des chlorures, alors que dans le cas de diffusion, on mesure le flux des chlorures passant du compartiment amont au compartiment aval [25].

Pour réaliser un essai d'immersion, les échantillons de béton sont saturés avant l'essai afin d'éviter les effets capillaires. L'essai d'immersion est effectué généralement sur des échantillons cylindriques. Toutes les surfaces sont scellées sauf la surface qui est en contact direct avec la solution, afin que la diffusion ait lieu à travers cette surface dans une direction unique, figure (2-3), [26].

Les normes AASHTO préconisent une durée d'essai de 90 jours avec 3% de chlorure de sodium, [27]. A la fin de l'exposition, le profil de la concentration des chlorures est déterminé à l'aide des échantillons de poudre collectée à différentes profondeurs. L'analyse chimique de cette poudre permet de déterminer le taux des chlorures à chaque profondeur.

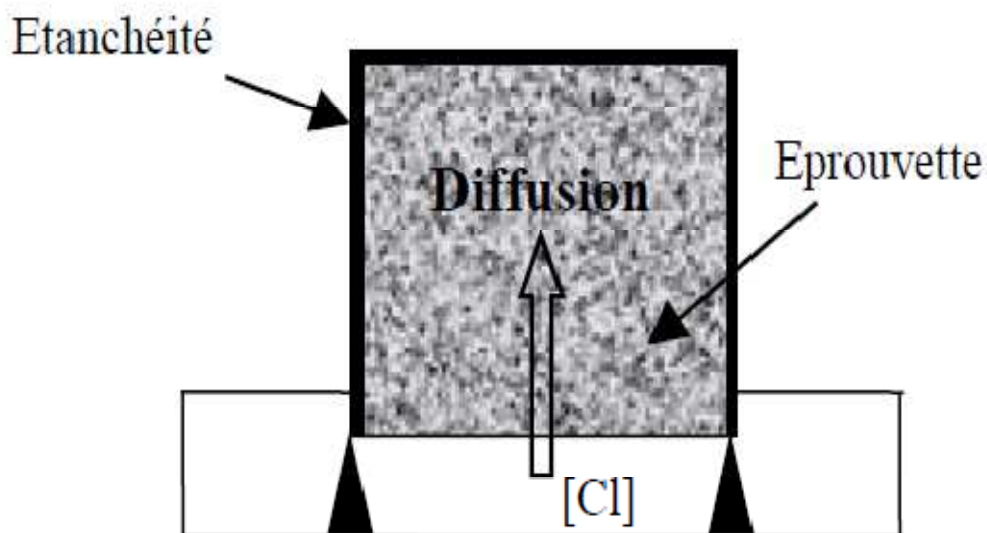


Figure 2-3 : Cellule d'immersion.

Le coefficient de diffusion peut être obtenu rapidement par l'analyse des profils de teneur en chlorures en régime transitoire de diffusion libre. Pour obtenir ces profils, il suffit d'interrompre l'essai classique de diffusion avant que les ions aient traversés l'échantillon, et de mesurer le profil dans les matériaux testés. Un protocole de dépouillement de l'essai a été proposé par Francy et François [28]

### **2.3.3 ESSAI DE MIGRATION**

Pour accélérer le transport des chlorures, l'essai de migration a été développé. Le principe consiste à appliquer une différence de potentiel dans la cellule de diffusion des chlorures, afin d'accélérer leur transport à travers le matériau.

Il existe deux types d'essais :

#### **2.3.3.1. Essai de migration en régime permanent**

La figure (2-4), montre le principe de cet essai [29]. Une éprouvette de béton saturée est placée entre deux conteneurs avec deux solutions différentes. Le conteneur attaché à la cathode contient une solution de chlorure de sodium, hydroxyde de sodium et hydroxyde de potassium. Le conteneur attaché à l'anode contient la même solution sauf les chlorures de sodium. La mesure de taux de chlorures est effectuée quand la concentration de chlorures dans le béton est stable.

Le champ électrique utilisé est situé entre 3 et 10V/cm. Pour la majorité des essais, le champ électrique est fixé à 4 V/cm. En effet cette valeur est suffisante pour le mouvement des chlorures et permet de limiter l'augmentation de la température, par conséquent, le risque de modification de la porosité du béton est négligeable. Sous l'effet du champ électrique, les ions chlore se déplacent de la cathode vers l'anode quand le régime de l'écoulement est stable, et le coefficient de migration peut être déterminé [30].

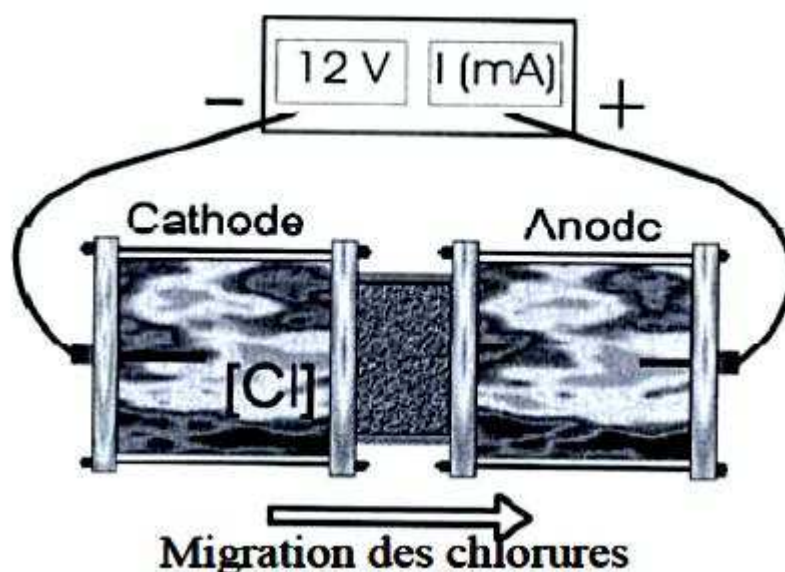


Figure 2-4 : Cellule de migration en régime permanent.

### 2.3. 3.2 Essai de migration en régime transitoire

Cet essai a pour but la détermination de la profondeur de pénétration des chlorures pendant l'état de transition. Le premier essai de migration à l'état non stable est appelé « Rapid chloride permeability test » (AASHTO T277-83) [31]. Cette méthode est utilisée principalement aux USA. Comme dans l'essai de migration en régime permanent, une tranche de béton est mise entre deux électrodes et un champ électrique est appliqué à travers l'échantillon.

Les paramètres qui sont mesurés pendant l'essai sont :

- La charge électrique totale qui passe à travers la tranche de béton durant l'essai
- La résistivité du béton au début et à la fin de l'essai.

D'autres essais de migration en régime transitoire ont été développés par Tang Luping [32, 33] et par des chercheurs du LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions [34] de Toulouse) qui permettent de déterminer un coefficient de diffusion. Un champ électrique a été appliqué à travers l'éprouvette comme dans l'essai de migration en régime permanent, mais l'équipement utilisé et la façon d'obtenir le coefficient de migration sont fondamentalement différents. Les détails de la cellule de migration utilisée au LMDC sont présentés sur la figure (2-5).

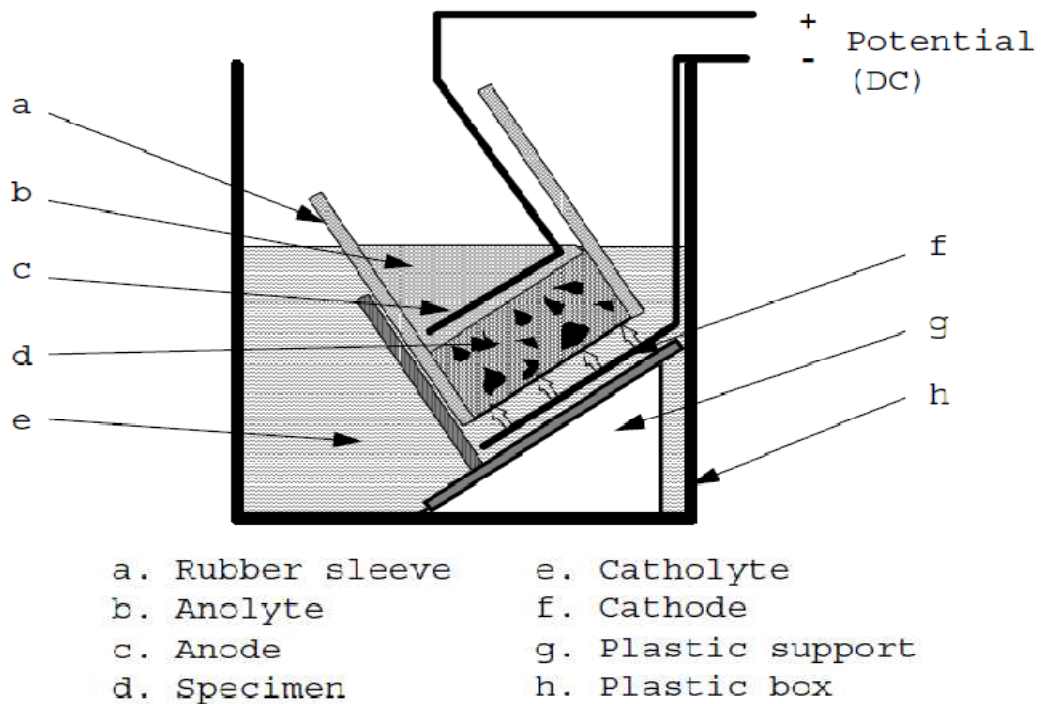


Figure 2-5 : Cellule de migration en régime transitoire (LMDC standard [34]).

## 2.4. IONS CHLORURES DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRE

Les chlorures peuvent être rencontrés dans un milieu poreux cimentaire sous plusieurs forme: Chlorures libres en solution, physiquement liés à la matrice, chimiquement liés et éventuellement cristallisés [28].

### 2.4.1. CHLORURES LIBRES

Ces ions sont capables de se déplacer dans la phase liquide sous gradient de concentration, tout comme la vapeur dans l'air. Leur mouvement dans un milieu poreux non saturé sera intimement lié à celui de la phase liquide. En particulier, la disparition de la continuité de la phase liquide (annulation de la perméabilité au liquide), sera également un seuil de transfert pour les ions qui resteront prisonniers dans les pores. Les chlorures libres sont considérés comme les principaux acteurs dans les processus de corrosion des armatures.

### 2.4.2. CHLORURES FIXES

Plusieurs facteurs ont de l'influence sur la quantité de chlorures fixés, [35,36, 34] :

- La concentration en chlorures libres : plus la concentration en chlorures dans la solution des pores est élevée, plus la fixation des chlorures est importante.
- La quantité de liant : la quantité de chlorures fixée est proportionnelle à la quantité de liant.
- La surface spécifique : plus la surface spécifique du ciment est grande, plus le nombre de sites de fixation est grand.
- La température : l'élévation en température tend à diminuer la fixation des chlorures.
- La présence d'autres espèces ioniques : particulièrement les hydroxydes et les alcalins. L'augmentation du pH diminue la fixation des chlorures. De plus, la quantité de chlorures fixée est différente selon le type des cations associés aux chlorures en raison de leurs solubilités différentes

Deux types de fixation des chlorures peuvent être distingués :

- Les chlorures adsorbés sur les gels de C-S-H.
- Les chlorures fixés par les aluminates.

#### **2.4.3. CHLORURES ET GELS DE C-S-H**

Les gels de C-S-H sont le siège d'une adsorption physico-chimique des chlorures ainsi que d'un piégeage au sein des feuillettes. L'adsorption possédant une faible énergie d'activation et une faible chaleur de réaction, elle est très facilement réversible. Les chlorures intercalés dans les feuillettes sont probablement fortement liés.

#### **2.4.4. CHLORURES ET ALUMINATES**

L'hypothèse la plus plausible est une combinaison des chlorures avec les aluminates de calcium de la pâte de ciment durcie [37]. Le terme généralement usité de « chimisorption » est quelque peu abusif pour caractériser ce phénomène. En effet, il ne s'agit pas d'une sorption au sens strict du terme, mais simplement d'un équilibre de précipitation, en compétition avec ceux des autres hydrates de la pâte de ciment. Ce phénomène est a priori tout aussi réversible que la sorption proprement dite sur les gels, puisqu'une diminution de la concentration en chlorures entraînera un décalage de l'équilibre dans le sens de la disparition du précipité [36].

#### **2.4.5. CHLORURES CRISTALLISES**

Localement dans le milieu poreux, la concentration en chlorures de la solution interstitielle peut atteindre la limite de solubilité de cristaux tels que NaCl ou CaCl<sub>2</sub>. Il y a donc possibilité de précipitation de sels dans le réseau. On peut considérer ces chlorures comme « fixés », à condition qu'on puisse effectivement les considérer comme immobiles et liés au squelette solide.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la quantité de chlorures fixés. On va présenter deux méthodes brièvement.

#### **2.4.6.1 Méthode d'équilibre**

Cette méthode a été développée par Tang et Nilsson en 1993 [38]. Le principe consiste à exposer une petite quantité de poudre à une solution de chlorures de concentration connue. La différence entre la concentration initiale de la solution et la concentration après l'équilibre, donne la teneur des chlorures fixés.

#### **2.4.6.2 Technique d'extraction de la solution des pores**

Le principe de la technique consiste à mouler des échantillons de béton avec une certaine quantité de chlorures ajoutée à l'eau de gâchage ou les soumettre à un essai d'immersion jusqu'à la répartition uniforme des chlorures dans l'échantillon. Quelques millilitres de la solution des pores sont extraits par compression de l'échantillon dans un équipement spécial équivalent à une presse de compression.

### **2.5 LES PHENOMENES REACTIONNELS**

L'état thermodynamique d'un système réactif peut être caractérisé à partir de l'enthalpie libre de ce système. Localement ou à une échelle plus globale, son équilibre thermodynamique se traduit par une évolution nulle de l'enthalpie libre. A cet équilibre et à des conditions thermodynamiques définies (pression et température) est associée à ce système réactif une constante thermodynamique K. Pour un système multiphasique, où plusieurs réactions apparaissent, le système global est en équilibre si tous ses sous-systèmes sont en équilibre, c'est à dire que pour toutes les réactions considérées les produits d'activité sont égaux à leurs constantes d'équilibre respectives.

Lorsqu'un système n'est plus en équilibre thermodynamique, à la suite par exemple d'un échange de matière ou une modification des conditions thermodynamiques, il tend à retrouver un nouvel état d'équilibre. Ce retour à un état d'équilibre conduit à l'apparition

de réactions qui peuvent être dans notre cadre d'étude la dissolution, la précipitation ou la complexation.

Un système réactionnel, composé d'une ou plusieurs phases solides et d'une phase aqueuse, tend à toujours être localement et globalement en équilibre thermodynamique.

Cet équilibre, à conditions de pression et de température définies, se caractérise pour toutes les phases solides par des lois d'action de masse qui définissent des relations non-linéaires entre les ions qui composent les phases solides. Le passage d'un état quelconque du système à un état d'équilibre se traduit par des dissolutions ou des précipitations de phases solides lorsque respectivement la solution aqueuse est sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis de cette phase solide. Dans un système composé de plusieurs phases solides, la dissolution d'une espèce et la précipitation d'une autre peuvent apparaître simultanément. Les calculs de spéciation permettent de déterminer un état d'équilibre d'un système réactif, connaissant son état initial.

## **2.6 PHENOMENOLOGIE DE LA LIXIVIATION**

La lixiviation d'un matériau à matrice cimentaire correspond à la dissolution progressive de ses principaux constituants. Ce processus s'initie dès que la matrice d'un béton ou d'un mortier est exposée à un environnement aqueux de composition chimique différente de celle de la solution interstitielle d'un matériau sain. Puisque le pH de la solution interstitielle est proche de 13,5, la plupart des environnements aqueux naturels sont potentiellement agressifs vis-à-vis de ce matériau et un échange ionique avec l'extérieur peut se produire au sein de la porosité capillaire. Les phénomènes de lixiviation ont été observés dans de nombreuses structures en béton mais celles qui sont continûment en contact avec un environnement liquide, comme les barrages, sont les plus dégradées.

Les cinétiques de dégradation sont très variables et dépendent en particulier du matériau et de l'environnement aqueux. Par exemple, F. Badouix [39] rapporte que, pour des durées d'exposition et un environnement agressif comparables (53 et 66 ans), les couches superficielles dégradées du barrage de Saint Etienne du Vigan et de l'écluse de Krembs ont pour épaisseur respectives 6 à 8 mm d'une part, et 1 à 3 mm d'autre part. Cet écart est imputé aux ciments utilisés, un CEM I/CPA pour le barrage et un CEM II/CPJ pour l'écluse. Y. Fujiwara [40] a montré que la présence d'ions dissous dans l'eau modifie aussi fortement les cinétiques de dégradation de bétons enfouis dans un sol. En effet, certains de

ces bétons, âgés de 60 à 100 ans, ont été dégradés sur quelques centimètres en présence d'une eau saline, soit des épaisseurs dix fois plus importantes qu'en eau douce. Cette différence s'explique par le caractère agressif, ou au contraire, protecteur, de certains ions tels que  $\text{CO}_3^{2-}$  qui induisent la formation d'une couche protectrice, à la surface du matériau.

Ainsi, la forte variabilité des cinétiques de dégradation observées dans des structures existantes, ainsi que la volonté de pouvoir garantir dans le temps une tenue du matériau, a conduit à de nombreuses études en laboratoire, sur des environnements parfaitement reproductibles.

Ces études ont mené à des travaux sur des pâtes de ciment [41, 42, 43] et des mortiers [44] soumis à l'eau pure [41, 43], à l'eau minéralisée [14, 43], ou à une solution au nitrate d'ammonium [45, 43]. Les réactions agressives ont été aussi accélérées par un champ électrique [42, 73]. Certains matériaux étaient totalement hydratés [41], et d'autres partiellement hydratés [5, 18]. Les modélisations qui en ont été déduites ont expliqué la phénoménologie des dégradations observées mais restent exclusives à des conditions expérimentales particulières, en terme de matériau et/ou d'environnement agressif.

Des études précédentes [41, 42] ont mis en évidence une dissolution progressive des principaux hydrates : d'abord la portlandite  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , qui est l'hydrate le plus soluble, puis le monosulfoaluminate de calcium, et enfin l'ettringite. Après que la portlandite soit totalement dissoute, les C-S-H se décalcifient jusqu'à former, dans l'état ultime de dégradation un gel de silice.

## **2.7. CONCLUSION**

Dans la solution interstitielle, des phénomènes de transport d'ions et des réactions de dissolution ou de précipitation interviennent. Lors d'agressions chimiques externes, la phénoménologie de dégradation du matériau peut être décrite à partir de deux interactions :

- entre l'environnement externe agressif et la solution interstitielle d'une part, par échange diffusif d'ions, puisque ces solutions ont des compositions chimiques différentes,
- entre la solution interstitielle et le squelette solide de la pâte de ciment d'autre part, par réactions de dissolution et de précipitation, pour établir un équilibre chimique local.

## LA FORMULATION DES BHP

### 3.1-GENERALITES

L'étude d'une composition de béton consiste à rechercher conjointement deux qualités essentiels : résistance et ouvrabilité ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais elles varient en sens inverse. Ce problème ne peut être réglé que par des solutions de compromis.

Un béton hautes performances (BHP) (ou béton à hautes performances) est un béton caractérisé par une très grande résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en terme de viscosité), à court ou à long terme. Pour améliorer les performances d'un béton, il convient d'en réduire la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines type "fumée de silice", l'ajout d'un adjuvant superplastifiants/haut réducteur d'eau et la réduction de la quantité d'eau de gâchage.



Figure 3-1: Vue microscopique d'un béton courant (grossissement x 5 000) [46].



Figure 3-2 : Vue microscopique d'un BHP (grossissement x 5 000) [46].

Le BHP présente, à l'échelle microscopique, une structure plus dense qu'un béton courant.

### 3.2. METHODES DE COMPOSITION

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées : faury (1958), Joisel (1952), Vallette(1963), Dreux et Baron- Lesage(1976), un logiciel intitulé BétonlabPro2(2000), toutes se réfèrent aux travaux de Feret (1892-1892) et, sous des formulations diverses, le but paraît être le même : chercher des compositions de matériaux inertes, pour un dosage donné en ciment, afin d'assurer une meilleure compacité.

La théorie de la granulation optimale due à Caquot (1936), montre l'importance d'un dosage optimal en éléments fins (ciment+ fines inertes). Cette théorie est probablement la seule à tirer, d'une façon cohérente les conséquences d'une interaction entre les grains [47].

On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

### 3.3 DOSAGE EN CIMENT ET EN FINES

Toutes les méthodes ne distinguent pas clairement les deux rôles de ciment : fines de remplissage et liant hydraulique. En tant que liant hydraulique, son dosage dépend de sa classe et de la résistance mécanique recherchée ; en tant que fines de remplissage, il existe un dosage optimal pour le lequel la porosité est minimale.

Caquot, Joisel et Faury accordent beaucoup d'importance à ce dosage optimale en éléments fins. Dreux, s'appuyant sur les résultats des précédents auteurs, remarque cependant, que le dosage en ciment optimal pour le remplissage est dans la plupart des cas, beaucoup plus faible que celui nécessaire pour la résistance désirée [47].

### 3.4 EFFETS DE LA POROSITE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE

La résistance à la compression à long terme de la pâte de ciment est simplement fonction des vides de la pâte après mise en place. Elle augmente lorsque l'indice des vides diminue [48].

Un seul moyen pour diminuer l'indice des vides de la pâte est de réduire la porosité :

- Soit réduire le dosage en eau et compenser la perte de maniabilité par un adjuvant ;
- Soit incorporer des ajouts plus fins que le ciment, qui s'insérant entre les grains de ce dernier, réduisent sa porosité.

Expérimentalement, on montre qu'il existe un dosage en eau, pour lequel la porosité est minimale, et que ce dosage dépend fortement des conditions de mise en œuvre [48].

La quantité d'eau nécessaire pour un gâchage correct du ciment est supérieure à la quantité strictement utile aux seules réactions chimiques. On doit en effet distinguer :

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation qui est celle fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydrates et nécessaire à leur structure cristalline. Elle est en général de l'ordre de 25 à 30 % de la masse de ciment.
- L'eau absorbée qui pénètre plus ou moins à l'intérieur des granulats, selon leur degré de porosité.
- L'eau libre qui s'élimine plus ou moins par séchage. Elle est nécessaire pour le mouillage des granulats en vue d'obtenir la viscosité, la plasticité, l'onctuosité

indispensables au gâchage et à la mise en place correcte du béton dans les coffrages [51,53].

### 3.5 EFFETS DU RAPPORT E /C SUR LES CARACTERISTIQUES DU BETON

Le rapport eau sur liant représente avec le degré d'hydratation de liant, les deux facteurs principaux influant sur la porosité de la pâte de liant, après durcissement et par conséquent, sur la porosité et la résistance du béton, ainsi que sur d'autres caractéristiques.

#### 3.5.1 LA POROSITE

Le rapport (E/C) détermine la distance initiale entre les grains anhydres de ciment dans le mélange eau – ciment ; ce qui influe directement sur la porosité initiale et finale de ce mélange. La figure 3-3 représente cette relation croissante entre la porosité, et le rapport (E/C).

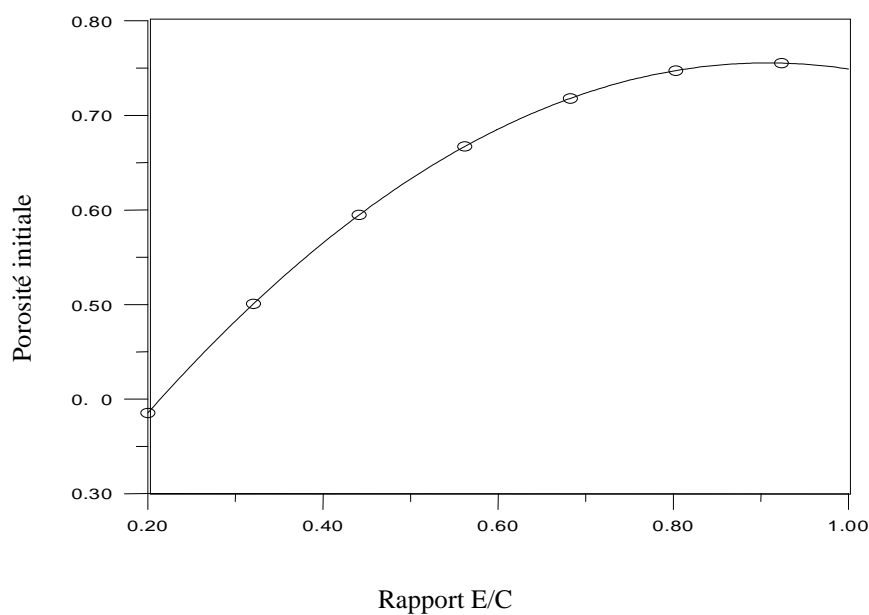


Figure 3-3 : *Forme de la relation entre le rapport E/C et la porosité [49].*

Puisque la compacité est le complément de la porosité, alors il faut diminuer au maximum le rapport (E/C) pour avoir une structure plus compacte [49].

### 3.5.2 LA RESISTANCE MECANIQUE DU BETON

De nombreuses études expérimentales, telles que celles de Soroka I., Sereda J-P., Sponer D-C., Feldman R-F. et Beaudoin J-J. [49], confirment que la résistance du béton qui est liée directement à la compacité du squelette rigide, est une fonction décroissante du rapport (E/C), au-delà de 0,30.

La figure 3-4 représente cette relation décroissante entre la résistance, et le rapport (E/C).

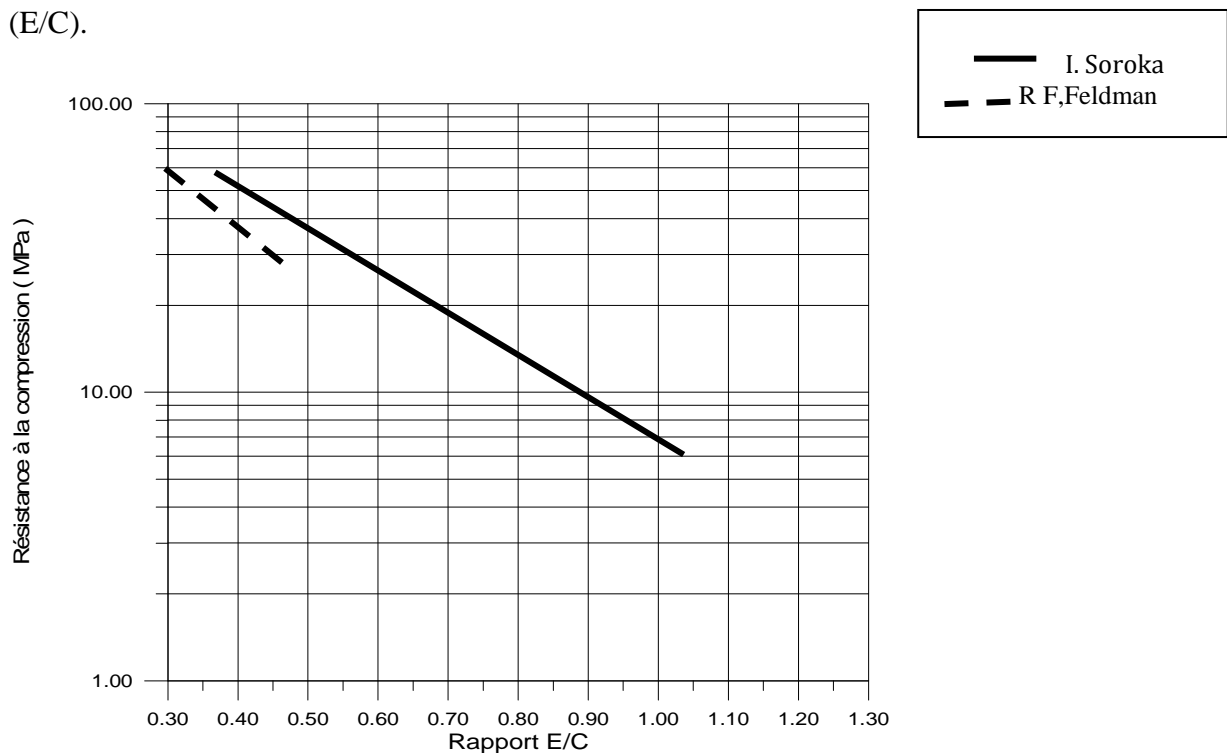


Figure 3-4 : Effet du rapport E/C sur la résistance mécanique du béton [49].

### 3.5.3 LE MODULE D'ELASTICITE

Le module d'élasticité du béton durci est à priori fonction de la résistance mécanique. On peut remarquer que les facteurs agissant sur le module d'élasticité sont les mêmes que ceux agissant sur la résistance. Le rapport (E/C) sera, alors, le facteur le plus

important influant sur le module d'élasticité et par conséquent ce dernier augmente avec la diminution de (E/C) [50].

### 3.6 CONCLUSION

La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires, la recherche des hautes performances passe donc par la réduction de la porosité des bétons.

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste donc à :

- diminuer la porosité ;
- Optimiser le squelette granulaire.

Pour diminuer la porosité il faut :

- Réduire le rapport E/C (de l'ordre de 0.30 à 0.35) ;
- Fluidifier le mélange en défloculant les grains de ciment à l'aide de superplastifiants.

Pour optimiser le squelette granulaire il faut :

- Introduire des ultrafines ;
- Adapter chaque classe granulaire (afin d'obtenir un mélange de très haute compacité) ;
- Déterminer la distribution de taille des grains (la forme et la résistance des grains les mieux adaptés).

## LES AJOUTS CIMENTAIRES

---

### 4.1. INTRODUCTION

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance [51,52].

Il est possible de modifier la microstructure du béton en incorporant des produits minéraux. Ces ajouts modifient la microstructure du béton en termes de caractéristiques physiques et chimiques. Il a été prouvé que l'introduction des minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires (fig. 4-1) 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 (fig. 4-2).

De plus, les dimensions des pores capillaires sont réduites grâce à la réaction pouzzolanique de l'ajout minéral avec la chaux en présence de l'eau en donnant des C-S -H [53].

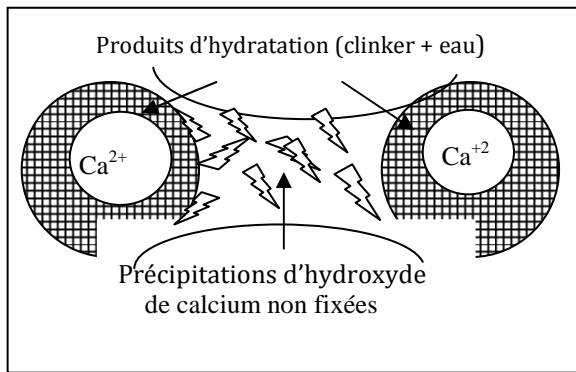


Figure 4-1 : Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire

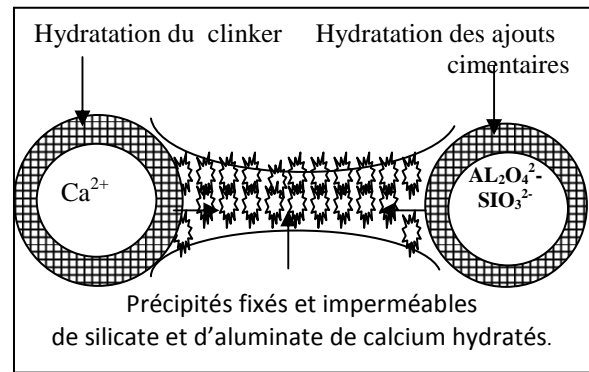


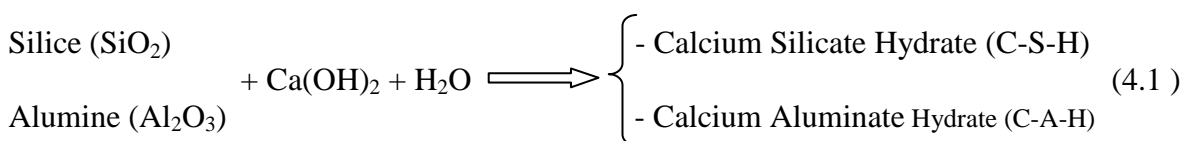
Figure 4-2 : Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire

## 4.2 RÔLE GRANULAIRE DES AJOUTS CIMENTAIRES

Les ajouts cimentaires comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide en permettant la diminution de la quantité d'eau. En outre, les divers ajouts jouent un grand rôle pour modifier les propriétés selon leurs domaines d'emploi.

## 4.3 RÔLES POUZZOLANIQUES DES AJOUTS CIMENTAIRES

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec la 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. De façon générale, les pouzzolanes sont définies comme des matériaux ne possédant pas en eux des propriétés liantes, mais dont les constituants peuvent se combiner avec la chaux à température ordinaire en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes [54, 55].



## 4.4 ROLES MECANIQUES DES AJOUTS CIMENTAIRES

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité.

La réflexion s'oriente vers une ou plusieurs activités d'origine physique d'une poudre chimiquement inerte. Il a été montré par calorimétrie que l'hydratation du silicate tricalcique ( $C_3S$ ) est plus rapide en présence de fines calcaires [56]. Dans un tel cas, le calcaire n'entre dans aucune réaction chimique, l'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de «nucléation hétérogène» : les germinations du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite.

Cette germination entraîne une précipitation des C-S-H et donc, une précipitation plus rapide de la portlandite  $Ca(OH)_2$ . Une explication semblable a été avancée pour l'accélération de l'activité des cendres volantes avant vingt huit jours en présence de fines calcaires.

En conséquence, la germination au contact de la surface des additions a deux conséquences :

- L'accélération de l'hydratation présentée ci-dessus ;
- La modification de l'assemblage des hydrates favorables à la résistance.

Ce deuxième effet expliquerait l'activité des additions même si, par ailleurs, elles peuvent être considérées comme chimiquement inertes.

### 4.4.1 LA FUMÉE DE SILICE

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux,  $SiO_2$  se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four ; il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice  $SiO_2$ . Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage.

Du 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% a 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.

Les performances offertes par la fumée [57, 58] constituent un atout pour son utilisation dans les BHP avec pour but l'obtention d'un matériau de bonne ouvrabilité, de résistance mécanique élevée et une bonne durabilité grâce à une réduction du dosage en eau.

#### 4.4.2 LE LAITIER

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers  $1550^\circ\text{C}$  au-dessus de la fonte (gravitation de la fonte en fusion).

##### 4.4.2.1 le laitier vitrifié

Obtenu par refroidissement brutal (trempe). Le laitier vitrifié, granulé ou bouleté est un produit hydraulique, c'est à dire susceptible de donner par activation basique, des produits d'hydratation stables. Il a des propriétés hydrauliques dites latentes. Le laitier expansé éventuellement obtenu par refroidissement dans l'eau ou la vapeur d'eau sous pression, peut être utilisé comme granulats légers. Il présente un aspect alvéolaire rappelant la ponce. Par refroidissement rapide à l'air comprimé, on peut effiler le laitier sous forme de fibres très fines. *La laine de laitier* ainsi obtenue est utilisée comme isolant thermique.

#### 4.4.2.2 le laitier cristallisé

Obtenu par refroidissement lent à l'air. C'est une roche dure anguleuse qui, après concassage et criblage, est utilisé comme granulat dans le béton, les matériaux d'assises de chaussées, les enrobés bitumineux, les remblais, etc.

#### 4.4.2.3 l'hydratation du laitier

Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant. L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés qui fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution.

Ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produits jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. C'est cette répétition du cycle dissolution – concentration – précipitation (plusieurs années), qui constitue la prise et le durcissement du laitier vitrifié [55, 59].

#### 4.4.2.4 le rôle du laitier dans le béton

Les précipitations résultantes sont normalement destinées à obturer les grands pores ; cependant les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles des ciments Portland ne le sont pas. Par conséquent le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier [60, 61].

De nos jours, l'utilisation du laitier devient de plus en plus fréquente [43, 57, 58, 60]. Les résultats sont très peu différents sinon similaires : une chute importante de dégagement de chaleur d'hydratation ; une prise lente ; une bonne ouvrabilité avec réduction du dosage en eau ; une faible résistance au jeune âge ; un accroissement des résistances au-delà de 28 jours.

### 4.4.3 LA POUZZOLANE

Les pouzzolanes peuvent être définies comme des matériaux ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau et à former des composés possédant des propriétés liantes. Elles sont formées d'éléments surtout vitreux (peu d'éléments cristallisés comme la zéolite). Mais elles peuvent contenir des constituants nocifs tels que : les substances organiques et les argiles gonflantes [62, 63].

#### 4.4.3.1 les pouzzolanes naturelles

Produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

- Soit d'origine volcanique : verre volcanique, pierre ponce, trasse, tuf, vitrophyres.
- Soit d'origine sédimentaire : diatomite, tripolis, gaize.

#### 4.4.3.2 les pouzzolanes artificielles

Toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer [34, 64] :

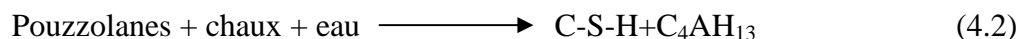
- Roches traitées thermiquement : argile et schiste expansés ;
- Cendres volantes, laitier métallurgique.

#### 4.4.3.3 l'hydratation des pouzzolanes

Par définition, une pouzzolane est un matériau ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau et à former des composés possédant des propriétés liantes [55, 64].

Si on se base sur cette définition simple et précise, on peut déduire que le meilleur activant des pouzzolanes c'est la chaux.

Avec l'addition de la chaux aux pouzzolanes, on obtiendra des aluminates tétracalciques et des silicates de calcium hydraté (Ferret (1933), Guillaume (1963) Sersal et al. (1968)) [59], cette réaction est schématisée comme suit :



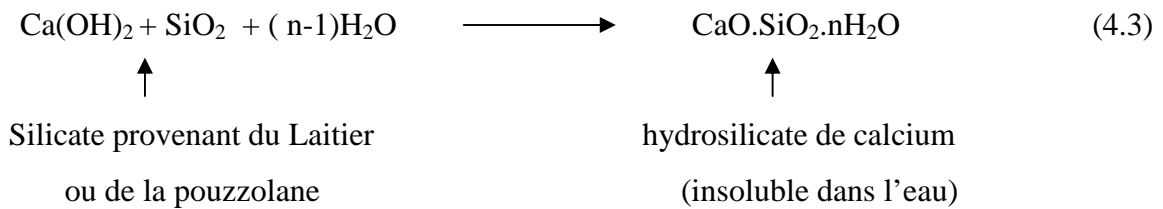
Dans le ciment Portland pouzzolanique, deux processus ont lieu pendant son durcissement :

- Hydratation des minéraux faisant partie du clinker ;
- Interaction de l'adjuvant minéral actif (la pouzzolane) avec l'hydroxyde de calcium qui se dégage lors de la prise du clinker.

#### 4.4.3.4 le rôle de la pouzzolane dans le béton

La contribution à l'augmentation de la résistance mécanique est notable dès les premières semaines pour le laitier, elle peut être encore plus tardive pour les produits pouzzolaniques.

Le laitier et la pouzzolane ont des cinétiques d'hydratation plus lentes que celle du ciment Portland (clinker) [55, 65]. L'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) provenant de l'hydratation primaire du ( $\text{C}_3\text{S}$ ), joue le rôle d'activant principal des ajouts pouzzolaniques, ou du laitier, selon la réaction suivante :



L'hydratation du laitier ou de la pouzzolane, ne peut donc débuter que lorsque le ( $\text{C}_3\text{S}$ ) a déjà partiellement réagi. Comme leur cinétique est plus lente que celle du ( $\text{C}_3\text{S}$ ), il va se constituer "une réserve" de portlandite qui sera ensuite progressivement absorbée [55, 65].

## CARACTERISTIQUES DES BHP

---

### 5.1. INTRODUCTION

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages des BHP qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Les BHP sont, en fait, des matériaux à très haute compacité, ils sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale présentent une durabilité accrue. Ils permettent de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effet de gel, attaques acides, etc.)

### 5.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

#### 5.2.1 OUVRABILITE

Elle peut se définir par la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage.

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, avec un choix rigoureux :

- Des granulats (module de finesse du sable) ;
- Du ciment et du superplastifiant ;
- Des dosages des matériaux intervenant, de la fumée de silice et de l'eau pour la plasticité désirée, en fonction des plus ou moins grandes difficultés de mise en œuvre dans les coffrages et l'embaras des armatures ;
- De 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 [50].

L'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs :

- Type et quantité de ciment ;
- Type et quantité de sable ;
- Teneur en eau ;
- Aspect et grosseur des agrégats.

La fluidité du mélange de béton croît avec l'augmentation de la quantité d'eau.

Le mortier de ciment, non seulement remplit les vides et enrobe les particules des agrégats, mais les écarte également les uns des autres, en créant entre eux des couches abondantes qui diminuent le frottement entre les grains : ceci augmente la fluidité.

Si les agrégats sont plus gros, la surface spécifique est en général moindre, par conséquent, pour une même quantité de mortier de ciment, les couches intermédiaires entre les grains des agrégats se trouvent plus épaisses ce qui rend le mélange de béton plus fluide.

L'augmentation de la quantité de sable au-dessus de la quantité optimale, diminue la fluidité de la pâte par suite de l'accroissement de la surface totale des agrégats.

La forme des grains influe sur la fluidité, si la surface des grains est arrondie et lisse, la surface de contact et le frottement entre eux seront plus petits donc le mélange est plus fluide que le mélange formé avec des granulats concassés.

### **5.2.2 POROSITE**

La porosité est essentiellement fonction du rapport E/C du béton. Il a été démontré que pour un béton donné, la seule réduction du rapport E/C de 0,5 à 0,22, réduit d'un facteur 3 le volume total des pores capillaires [49].

L'ajout de laitier ou de cendres volantes ne modifie pas la porosité totale mais conduit à une diminution générale de la dimension des pores [66].

L'adjonction d'ultrafins et en particulier de fumée de silice se traduit par une réduction de la porosité et par une diminution caractéristique des pores.

On note que la porosité totale des BHP est inférieure à celle des bétons ordinaires. La distribution des dimensions des pores, observée sur la courbe porosimétrique des BHP (figure 5-1) se situe sous celle des bétons ordinaires.

### **5.1.3 PERMEABILITE**

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.

A cause de leur très grande compacité, les BHP ne sont que très peu perméables. On peut s'en rendre compte lorsqu'on brise des échantillons de béton conservés pendant un an dans l'eau, on constate que le cœur de l'éprouvette est absolument sec.

Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieur du béton tout en le rendant encore plus imperméable.

Des mesures allemandes de perméabilité de mortier conduisent à des valeurs comprises entre  $0,64 \cdot 10^{-12}$  m/s pour  $E/C = 0,40$  et à  $440 \cdot 10^{-12}$  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 [67].

La perméabilité d'un béton à faible rapport  $E/C$  est donc appréciée par la mesure du débit d'air ou d'autre gaz (oxygène, oxyde de carbone) et par celui des ions chlore transitant dans le béton sous l'effet d'un gradient de pression ou de courant.

La microstructure de la pâte de ciment hydraté du béton de 20 MPa est très ouverte et l'on peut y voir des pores, de grands cristaux d'ettringite et de portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  avec de plus petites aiguilles de silicate de calcium hydraté.

Il est possible de voir que la zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats est très poreuse dans le cas du béton usuel. A l'inverse, il est impossible de discerner les moindres cristaux dans la microstructure d'un BHP qui a un rapport eau/liant de 0,25 ; la pâte de ciment hydraté a un aspect dense et donc très compacte.

Cette différence de microstructure des BHP a deux conséquences très importantes du point de vue résistance à la compression et du point de vue perméabilité : la résistance à la compression d'un BHP augmente au fur et à mesure que le rapport eau/liant diminue et la perméabilité d'un BHP est considérablement plus faible, pratiquement impossible à mesurer selon Torrent et Jornet [68], sauf si l'on recourt à la mesure de la « perméabilité » dite aux ions chlore selon la norme ASTM C1202-91 [69].

Un béton qui a un rapport eau/liant de 0,45 a une « perméabilité aux ions chlore » qui varie entre 3 000 et 5 000 coulombs, alors qu'elle n'est que de 100 à 500 coulombs pour un BHP qui contient de la fumée de silice et qui a un rapport eau/liant inférieur à 0,25[68].

Cette très faible « perméabilité aux ions chlore » des BHP indique qu'il existe encore un réseau de capillaires très fins interconnectés, mais que ces capillaires sont suffisamment fins pour que l'eau ne s'y écoule pas d'elle-même.

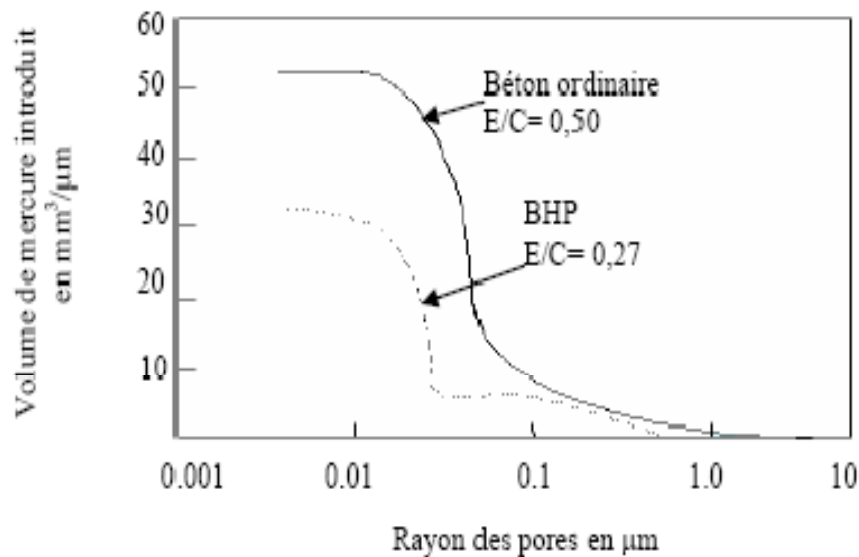


Figure 5-1 : Porosité des bétons ordinaires et des BHP [70].

Tant que les granulats et particulièrement les plus gros, sont suffisamment résistants, au fur et à mesure que la porosité de la pâte de ciment décroît, la résistance du béton augmente. Ainsi, la sélection et la composition des ingrédients d'un BHP sont beaucoup plus critiques que dans le cas des bétons usuels.

### 5.3 CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Il est confirmé que la formation des silicates de calcium hydratés, créés durant l'hydratation des silicates di et tricalciques, soit essentiellement responsable des gains de résistance de béton.

Toutefois, il faut admettre qu'à l'heure actuelle, la composition exacte et la structure des silicates de calcium ne sont pas très connues, ce qui explique d'ailleurs pourquoi, de façon très prudente, on représente le silicate de calcium hydraté par l'expression volontairement vague de C-S-H [71, 72].

Les phénomènes complexes liés à l'hydratation du ciment (mouvements thermiques ou retrait) provoquent la création des défauts. Dans le cas des bétons classiques, ces défauts sont particulièrement localisés dans l'auréole de transition (interface pâte-granulat).

Dans les BHP cette zone est inexistante et, les défauts prennent naissance dans la matrice, siège des phénomènes d'hydratation. C'est à partir de ces défauts (microfissures, microcavités ...) que vont se développer les microruptures lors des sollicitations mécaniques [73].

### 5.3.1 RESISTANCE EN COMPRESSION

C'est la propriété d'usage la plus importante, c'est aussi celle dont l'amélioration est plus spectaculaire ; on a pu réaliser en laboratoire des bétons dont la résistance à la compression dépassait 200 MPa. Cependant, 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 [74, 75].

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

Une explication de cette augmentation de la résistance est due au rôle accélérateur de la fumée de silice, selon la nouvelle loi de Féret [76] exprimée par :

$$f_{c28} = \frac{K_g}{\left[ 1 + \frac{3,1E / C}{1,4 - 0,4 \exp(-11 S / C)} \right]^2} \quad (5.1)$$

Où : -  $f_{c28}$  est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.

- E, C et S sont le poids respectif d'eau, du ciment et de fumée de silice par mètre cube de béton.

-  $k_g$  est un paramètre qui dépend de la qualité des granulats (pour des granulats courants  $K_g = 4,91$ ).

### 5.3.2 RESISTANCE EN 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 [77].

Tazawa [93] a montré que la résistance en traction par flexion à 28 jours avec un BHP à la fumée de silice varie entre 5 et 9 MPa. Il a montré dans la même étude 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 et de béton précontraint [78] :

Les règles BAEL définissent la résistance caractéristique à la traction, à partir de la résistance à la compression, par les formules suivantes :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad \text{si } f_{cj} < 60 \text{ MPa}$$

$$f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3} \quad \text{si } 60 \leq f_{cj} \leq 80 \text{ MPa}$$

### 5.3.3 RESISTANCE A LA FATIGUE

La résistance à la fatigue peut être représentée par le diagramme de Goodman (fig. 5-2) où l'on reporte les valeurs de  $S_{min}$  et  $S_{max}$  respectivement, sur l'axe des X et des Y. Dans ce diagramme,  $S_{min}$  et  $S_{max}$  sont exprimés sous forme d'une fraction de la charge statique à laquelle se produit la rupture.

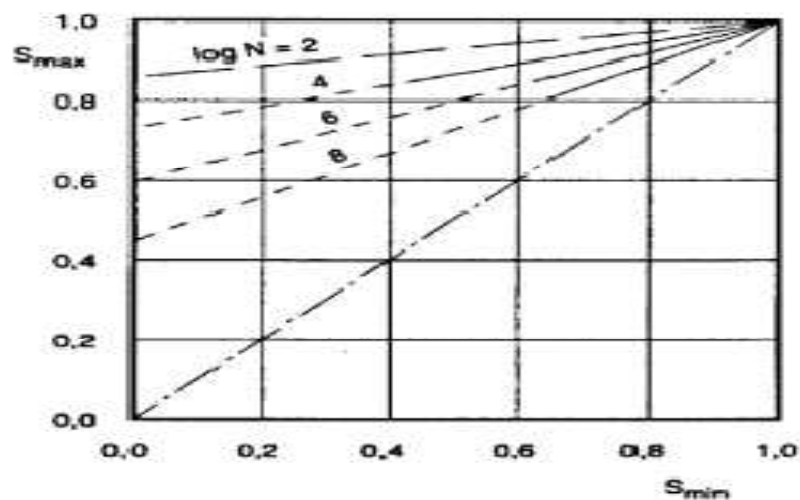


Figure 5-2: Diagramme de Goodman Rilem [78].

- Dans leurs études sur certains aspects de la résistance à la fatigue des BHP conduites à l'université de Sherbrooke et au laboratoire central des ponts et chaussées à Paris, Do et coll. [98 - 100] ont trouvé que la résistance à la fatigue des BHP est comparable à celle d'un béton usuel. Les résultats suggèrent que l'évolution des déformations des BHP est semblable à celle des trois phases de déformation qui sont bien connues dans le cas des bétons usuels :
- Phase I – initiation ;
- Phase II – stabilisation ;
- Phase III – instabilité.

Cependant, la durée de chacune de ces phases et l'amplitude des déformations dépendent du type de BHP. Ces études ont aussi montré que la déformation des BHP contenant de la fumée de silice ne semble pas évoluer et que la rupture à la fatigue de certains BHP peut être brutale.

En général, les BHP perdent moins de rigidité lors des essais de fatigue que les bétons usuels : plus le module élastique est élevé, plus la perte de rigidité est faible. Sous des cycles de compression où  $S_{\max}$  est supérieure à 0,75, des BHP ont pu résister à un plus grand nombre de cycles qu'un béton usuel. Cependant, quand  $S_{\max}$  est inférieur à 0,75, l'inverse est vrai [78].

## 5.4 CARACTERISTIQUES ELASTIQUES

### 5.4.1 MODULE D'ELASTICITE OU MODULE DE YOUNG (E)

Il est très important de connaître avec précision le module d'élasticité des BHP si on veut étudier la déformabilité de la structure.

La figure 5-3 présente l'évolution des courbes contrainte-déformation pour des bétons à différentes résistances à la compression. Le module d'élasticité se définit de deux façons :

- Soit en utilisant la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation : c'est le module tangent. Sa détermination semble être relativement plus complexe, il correspond à une très petite déformation du matériau ;
- Soit en utilisant la ligne sécante de la courbe contrainte-déformation : c'est le module sécant [79].

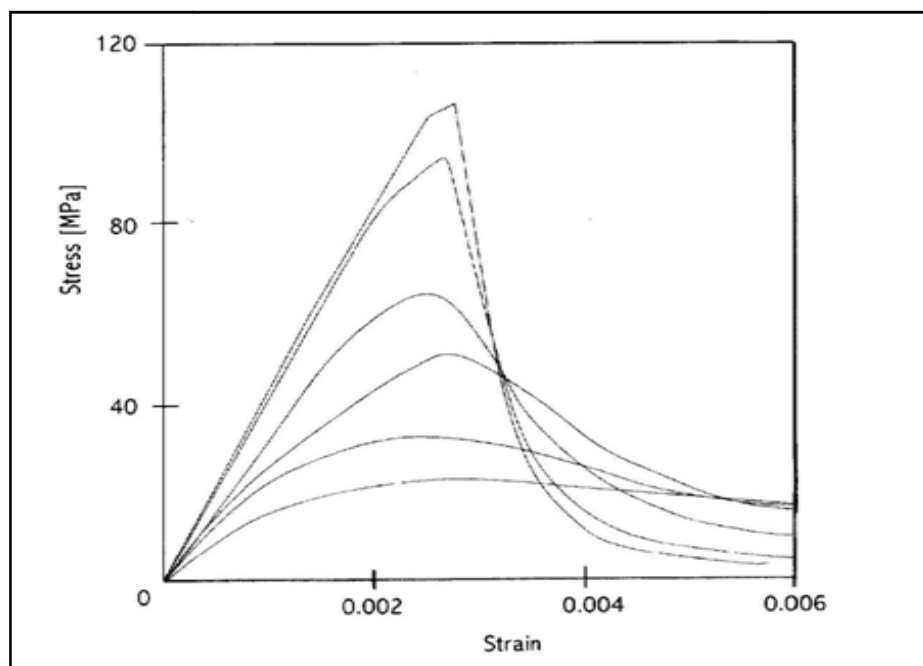


Figure 5-3: Courbes "contrainte – déformation" des bétons de différentes résistances [80].

Toutefois, dans le cas des BHP, les deux modules semblent être confondus du fait de la linéarité de la courbe  $\sigma$ - $\epsilon$  depuis l'origine jusqu'à une certaine valeur  $\sigma_0$  de  $\sigma$  proche de la contrainte de rupture  $\sigma_r$ .

Le module de Young  $E$  des BHP est, selon la raideur des granulats, de l'ordre de 45 GPa.

#### 5.4.2 COEFFICIENT DE POISSON ( $\nu$ )

S'il n'est pas facile de mesurer le module élastique d'un béton, il est encore plus délicat de déterminer le coefficient de Poisson qui exige l'enregistrement simultané de la charge axiale, de la déformation axiale, de la déformation transversale, le tout à une vitesse de chargement constante. La documentation scientifique propose très peu de données sur le coefficient de Poisson des bétons usuels en général et des BHP en particulier. Ahmad et Shah [81] rapportent des valeurs comprises entre 0,18 et 0,24 tandis que Kaplan [82] rapporte des valeurs comprises entre 0,23 et 0,32.

### 5.4.2.1 Coefficient de Poisson à l'état initial

L'introduction de la fumée de silice ne conduit pas à l'augmentation du coefficient de Poisson malgré la densité de ces bétons. Ce phénomène n'est observé que pour les bétons contenant le moins de liant, c'est à dire ceux présentant la structure initiale la moins dense. Pedeches a mis en évidence deux comportements sur l'influence de la fumée de silice [93].

- Pour les dosages en liant de 350-600 kg/m<sup>3</sup>, une diminution quasi-uniforme de  $\nu$  lorsque le rapport fumée de silice/ciment augmente. Les valeurs passent de 0,23 à 0,24 sans fumée de silice à 0,19 à 0,21 avec 40% de fumée de silice. Le matériau devient donc plus compressible.
- Pour les dosages en liant de 250 kg/m<sup>3</sup> et une teneur de 10-20% de fumée de silice. Le coefficient ( $\nu$ ) étant passé de 0,18 à 0,21.

Par ailleurs, Pedeches [83] a fait remarquer que les évolutions de  $\nu$  lorsque les dosages en eau et liant changent sont très faibles et qu'il n'était pas possible d'en tirer des conclusions valables. D'autres auteurs Brooke et al. [84] ont montré que  $\nu$  décroît lorsque le rapport E/L augmente.

### 5.4.2.2 Évolution de $\nu$ instantané au cours du chargement

Deux phases ont été distinguées:

- 1- A partir de l'état initial, augmentation lente et quasi linéaire jusqu'à un seuil situé entre 30-80% de la déformation de rupture, suivant le béton : cette phase traduit le comportement linéaire du matériau et sa consolidation interne.
- 2- Accélération rapide de la progression au-delà de 0,5. Cette phase traduit l'apparition de modifications internes irréversibles (microglissements, microfissuration), l'endommagement du matériau est tel que le volume apparent du béton augmente.

Lorsque le rapport fumée de silice/liant passe de 0 à 10%,  $\nu$  est fortement réduit juste avant la rupture. Plus le rapport E/L est élevé, plus les valeurs de  $\nu$  augmentent rapidement.

Au voisinage de la rupture, les valeurs les plus faibles ne sont pas nécessairement obtenues pour les plus petits dosages en eau [85].

### 5.4.3 FLUAGE

L'application de contraintes extérieures à un élément en béton lui fait subir des déformations spontanées et différées. Il est généralement admis de diviser les déformations différées en deux parties pour permettre l'exploitation des résultats:

- La première, appelée *fluage propre*, représente les déformations dues au chargement du matériau, lorsque celui-ci est protégé vis-à-vis de l'absorption ou de la désorption d'eau ;
- La deuxième, appelée *fluage de dessiccation* est le complément par rapport au fluage propre de la part de déformation due au chargement, lorsque le matériau est exposé aux variations hydriques du milieu extérieur [73].

Les études relatives au fluage des BHP ont permis à Le Roy [73] de dresser un tableau cohérent avec l'état des connaissances sur les mécanismes physico-chimiques qui contrôlent le fluage, notamment :

- Une très forte diminution du fluage de dessiccation – et en suppression avec l'emploi de la fumée de silice – une indépendance vis à vis des effets de l'humidité et de la géométrie des structures ;
- Une modification de la cinétique de fluage propre qui se stabilise beaucoup plus vite que celle du béton ordinaire (à 7 jours de chargement, une proportion de 67% de la déformation à un an est déjà obtenue contre 41% seulement pour le béton témoin) [74] ;
- Une amplitude de fluage très faible par rapport au béton ordinaire [74] ;
- Il faut toutefois noter un effet de vieillissement beaucoup plus marqué qui se traduit au jeune âge (1-3 jours) de chargement par des déformations totales du même ordre que celles d'un béton ordinaire dans des conditions de séchage extrêmes. Ce qui est un inconvénient pour le BHP si on veut faire de la précontrainte au jeune âge ;
- Le fluage à différents volumes granulaires augmente lorsque le volume de la pâte augmente. Cette tendance est observée pour la plupart des essais. Lorsque les variations de température sont faibles et que les variations de contraintes sont positives (augmentation) ou faiblement décroissante, la *Viscoélasticité Linéaire* (VEL) est bien adaptée pour prendre en compte les effets du fluage dans les structures [73].

Le Roy [73] a supposé que la pâte de ciment suit un comportement viscoélastique linéaire non vieillissant, ce qui limite l'exploitation des résultats sur pâtes pures et bétons au moins à 28 jours. A partir de cette durée de chargement, bien que le vieillissement ne soit pas achevé, les propriétés du matériau (résistance, module ...) évoluent lentement, ce qui permet de négliger les effets de leurs variations.

Il existe une limite des sollicitations au-dessus de laquelle la viscoélasticité linéaire n'est plus applicable. Cette limite varie selon les auteurs et les expériences entre 30 et 75% de la résistance du béton et dépend d'un grand nombre de facteurs, comme la maturité du béton au moment du chargement, le degré hygrométrique ambiant (fissures de retrait) et l'homogénéité du matériau.

Auperin et al. [86] après avoir fait des essais sur des bétons industriels à hautes performances, ont montré que ces derniers avaient des déformations de fluage ne ressemblant en rien de ce qu'on peut calculer avec les règlements (BAEL). Ils ont proposé des lois totalement empiriques mais qui ne correspondaient qu'à une gamme bien précise de béton.

#### 5.4.4 RETRAIT

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 (Baron [87]). Il vaudrait mieux parler des retraits du béton plutôt que du retrait du béton, parce que le retrait global que l'on mesure correspond à la combinaison de plusieurs retraits élémentaires (Aïtcin et coll. [88]) :

- Le retrait plastique qui se développe à la surface d'un béton frais exposé au séchage Wittmann [89] ;
- Le retrait endogène (aussi appelé retrait d'auto dessiccation ou retrait chimique) qui peut se développer quand le ciment s'hydrate (Lynam [90] ; Davis [91] ; Buil [92] ; Tazawa et coll. [93] ; Aïtcin [94]) ;
- Le retrait de séchage qui se développe quand l'eau s'évapore d'un béton en atmosphère sèche ;
- Le retrait thermique induit par la diminution de la température du béton (contraction thermique) ;

- Le retrait de carbonatation.

Tous les bétons, quel que soit leur rapport eau/liant, peuvent développer du retrait endogène, mais, dans le cas des bétons usuels, ce retrait est négligeable (Davis [95]), ce qui n'est pas le cas dans les BHP où, plus le rapport eau/liant est faible, plus le retrait endogène peut être élevé.

Comme toute contraction chimique de la pâte de ciment entraîne une réduction du volume absolu de 10 % et comme un BHP a une teneur en ciment plus élevée que celle d'un béton usuel, on pourrait penser qu'un BHP peut développer plus de retrait endogène.

Cependant, s'il est continuellement conservé sous l'eau dès que son hydratation commence, on le verra même augmenter de volume apparent.

Par conséquent, le retrait endogène se développe de façon rapide et intense dans les BHP si l'on n'y prend pas garde (Buil M [92]). Jensen et Hansen [96, 97] ont mesuré des retraits endogènes de l'ordre de  $3\ 000$  et  $1\ 500 \times 10^{-6}$  dans des pâtes de ciment ayant des rapports eau/ciment de 0,25, tandis que Tazawa et Miyazawa [98] ont mesuré des retraits endogènes dans des bétons de très faible rapport eau/liant aussi élevés que  $4\ 000 \times 10^{-6}$  et un retrait endogène sur un BHP aussi élevé que  $600 \times 10^{-6}$ .

## 5.5 FACTEURS INFLUANT SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET ELASTIQUES

Il a été montré, que trois groupes de paramètres influent sur les propriétés mécaniques et élastiques des BHP [99]:

- **Type et proportion des composants :**
  - Ciment ;
  - Ajouts minéraux ;
  - Adjuvants chimiques ;
  - Granulats.
- **Rapport eau/liant :**

Il influe sur la microstructure du matériau et notamment sur la porosité : plus il est élevé, plus la porosité le sera, entraînant une modification des caractéristiques du matériau.

De tous ces facteurs, si les autres conditions sont remplies, l'influence du gros granulat semble être la plus importante.

Cependant, cette influence sur les propriétés des BHP demeure un problème très compliqué. L'expérience a montré que les bétons ayant une même résistance ont donné des modules d'élasticité très différents du fait de la complexité des granulats utilisés [99].

Chaque famille de roches a ses caractéristiques et son origine mais, à l'intérieur d'une même famille de roches, les propriétés mécaniques peuvent varier considérablement à cause de la porosité des roches, de leur densité et de la taille des cristaux [81].

Ces variations vont donc influencer sur les caractéristiques des bétons conçus à base de ce type de granulats. En particulier, la résistance en compression diminue lorsqu'on réduit ou augmente considérablement la dimension du gros granulat [100].

La prise en compte de tous ces paramètres s'avère nécessaire lorsqu'on veut étudier le comportement mécanique du matériau.

---

## DURABILITE DES BHP

---

### 6.1. INTRODUCTION

La durabilité est la préoccupation majeure lorsqu'on aborde la conception de béton. La politique du développement durable exige en effet que le béton offre aux constructions futures une plus longue durée de vie. Plusieurs causes de détériorations sévères du béton, internes et externes au matériau, ont été identifiées. Les dégradations les plus couramment rencontrées sont la conséquence de:

La pénétration des chlorures ;

L'attaque par les sulfates ;

L'attaque par l'eau de mer ;

La réaction alcali-silice ;

La carbonation lorsqu'elle induit la corrosion des armatures ;

Les effets de gel-dégel et l'action des sels de déverglaçage.

Il arrive que des défauts de conception ou de mise en œuvre, ou des causes accidentelles, soient à l'origine des désordres. La notion de durabilité est donc indissociable de celle de qualité à tous les niveaux et en particulier de celle du matériau béton.

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. Ces deux paramètres sont considérés comme des « indicateurs de la durabilité ».

La perméabilité et la diffusivité correspondent à deux mécanismes bien distincts de transport de matière : la perméabilité décrit un écoulement (d'eau ou de gaz par exemple) qui se produit sous gradient de pression. Elle dépend de la taille des espèces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que de leur interconnexion. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion [101].

Le transport de matière par perméabilité ou diffusivité caractérise l'aptitude à l'usage de béton. Plus la résistance du béton augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité augmente. C'est la raison pour laquelle la compréhension des mécanismes de transport dans un milieu poreux est très importante.

Les transferts dans une pièce de béton durci s'établissent par l'intermédiaire :

- D'un réseau poreux, qui apparaît normalement dans la structuration de la pâte au cours de son hydratation ;
- D'un réseau des fissures qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé (dalles, poutres) et éventuellement de diverses causes accidentelles [101].

Dans ce cas, l'augmentation de la capacité de pénétration de ces agents dans le béton facilite la détérioration de la structure.

Cette écriture s'exprime par la chaîne suivante [102]:

***Détérioration → Fissuration → Augmentation de la perméabilité → Plus de détérioration***

A noter que la perméabilité de la peau du béton est étroitement liée à la durabilité dans le cas des structures armées. En effet, c'est véritablement cette peau qui bloque ou ralentit le passage des agents chimiques agressifs qui peuvent corroder les armatures en aciers.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la diffusion dans le béton des chlorures et à sa perméabilité au gaz.

## 6.2. CARACTERISTIQUES DES MILIEUX POREUX ET GRANDEURS ASSOCIEES

### 6.2.1. DEFINITION

Pour sa représentation thermodynamique, on conceptualise le milieu poreux en trois phases : Solide, liquide et gazeuse. Dans le cas du béton durci, la matrice représente la phase solide. Les pores remplis d'air ou d'eau représentent les phases gazeuses ou liquides respectivement. Ces pores peuvent être connectés entre eux ou non, figure (6-1).

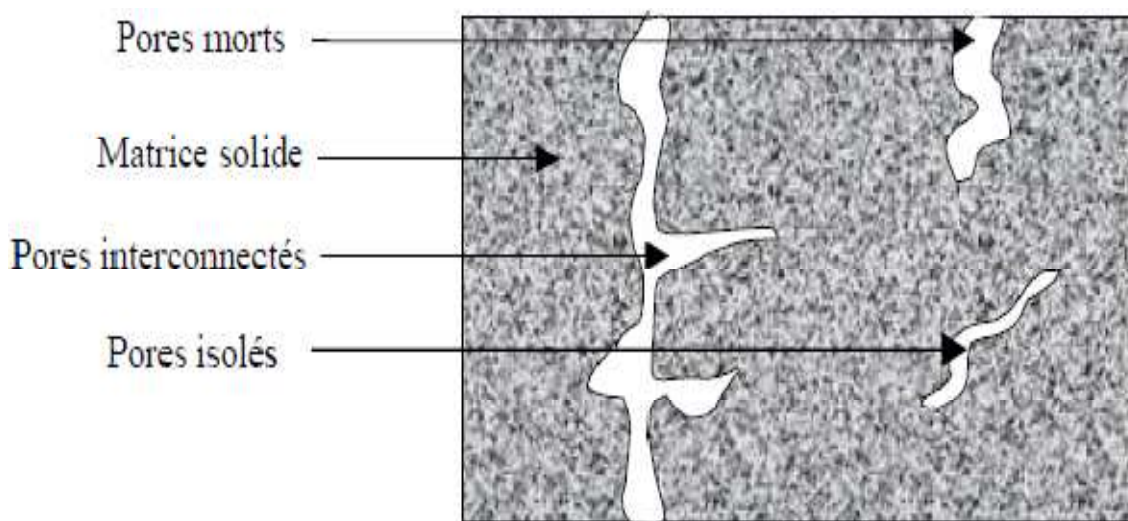


Figure 6-1 : Représentation schématique d'un solide poreux [103].

A noter que dans cette représentation on ne fait pas intervenir l'effet d'échelle sur la porosité, alors que la structure poreuse des matériaux cimentaires se décline sur un vaste intervalle de tailles de pores. Cette lacune de la représentation macroscopique standard pourra être à l'origine de différences entre modèles et expériences [103]

### 6.2.2.2. Porosité

La porosité est définie par le rapport entre le volume de pores ( $V_p$ ) et le volume total ( $V_t$ ) de matériau.

$$\Phi = V_p / V_t$$

D'après la figure (6-1), on constate trois groupes de pores :

- Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux participent au transport de matière à travers le matériau, dite porosité ouverte.
  - Les pores aveugles ou morts qui sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessible à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.
  - Les pores isolés qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur, dite porosité fermée.
- On définit aussi l'indice des vides par le rapport du volume des vides ( $v_{vides}$ ) sur le volume de solide ( $v_s$ ).

$$e = v_{vides} / v_s$$

**Remarque :**

La porosité est une propriété volumétrique représentant le volume des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise l'aptitude d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide, figure (6-2).

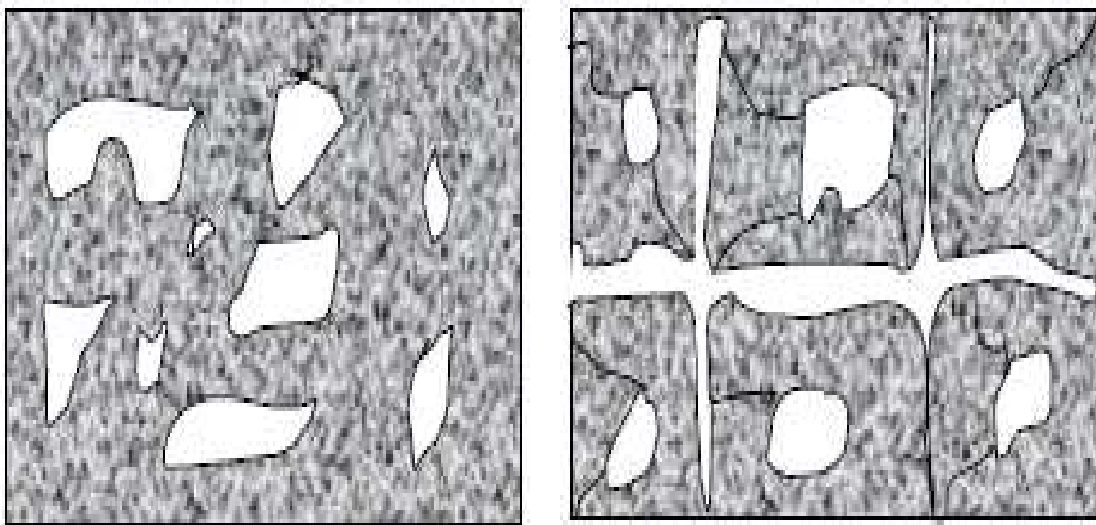


Figure 6-2 : *Matériau poreux, imperméable.*

*Matériau poreux, perméable*

### 6.2.2.3. Tortuosité et Connectivité

La tortuosité  $\tau$ , est définie par le rapport entre la distance parcourue par le fluide  $L_e$  et la distance effective du déplacement  $L$ . Selon d'autres auteurs, elle est définie par le carré de ce rapport. Cette dernière définition est celle proposée par Carman, Quenard et Sallée [104, 105].

$$\tau = (L_e / L)^2$$

Avec :

$L_e$  : Longueur effective du déplacement du fluide, c'est à dire la longueur moyenne des lignes de courant du fluide.

$L$  : Distance parcourue par le fluide, c'est à dire la longueur de l'échantillon poreux dans la direction de l'écoulement.

La connectivité est définie grâce à la relation suivante :

$$C = b - n + 1$$

Avec :

$b$  : Nombre de branches (ou d'orifices d'une cavité).

$n$  : Nombre de nœuds (ou de cavité).

### **6.3. PARAMETRES INFLUENÇANT LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LE BETON**

#### **6.3.1. RAPPORT E/C**

De nombreuses études conduites notamment sur des pâtes de ciment, ont confirmé que la porosité est directement liée au rapport E/C en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires. Plus le rapport E/C est faible, plus le temps de segmentation du réseau capillaire des pâtes de ciment diminue et par conséquent plus la perméabilité à l'eau diminue [106, 101], figure (6-3). D'après cette figure, on constate l'importante diminution de perméabilité d'une pâte de ciment lorsque le rapport E/C diminue en dessous du rapport critique 0,7.

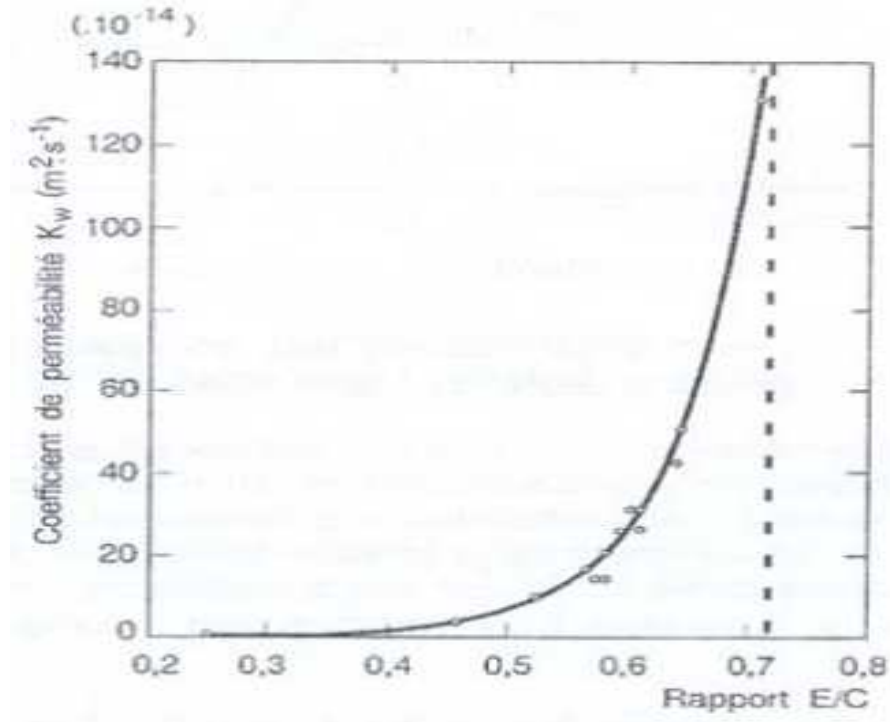


Figure 6-3: Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C d'après [106].

Dans les conditions de durcissement habituelles, l'hydratation s'effectue sans apport d'eau externe, au moins au cœur du béton. La porosité capillaire d'une pâte de ciment totalement hydratée sans apport d'eau externe, diminue rapidement avec le rapport E/C, jusqu'à une valeur de 0,42 environ d'après modèle de Powers, [106]. Pour des rapports E/C inférieurs à 0,42, la perméabilité et la diffusivité diminuent moins rapidement.

Dans le cas où le béton en service serait exposé pendant une longue durée à une source d'eau non agressive et si l'on recherche à réduire la perméabilité, il paraît intéressant de réduire le rapport E/C en dessous de 0,36. Parce que dans ces conditions, l'apport d'eau externe permet une poursuite de l'hydratation jusqu'au remplissage de la porosité capillaire [107, 101].

La perméabilité à l'air est particulièrement sensible à la valeur du rapport E/C pendant les sept premiers jours de l'hydratation [108]. La figure (6-4) montre que la perméabilité à l'air est réduite par un facteur de 10 lorsque le rapport E/C passe de 0,7 à 0,4 pendant les quatre premiers jours. Le rapport E/C a également de l'influence sur la diffusivité de la pâte de ciment. On constate que le coefficient de diffusion diminue avec le rapport E/C figure (6-5). Cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la tortuosité du

cheminement poreux et par la présence dans ces trajets de régions constituées de gel hydraté microporeux [109].

Puisque la résistance à la compression est liée à la valeur du rapport E/C, il existe une relation très nette entre la résistance à la compression et la perméabilité soit à l'air ou à l'eau. Il a été observé que la perméabilité décroît lorsque la résistance mécanique des bétons croît [110].

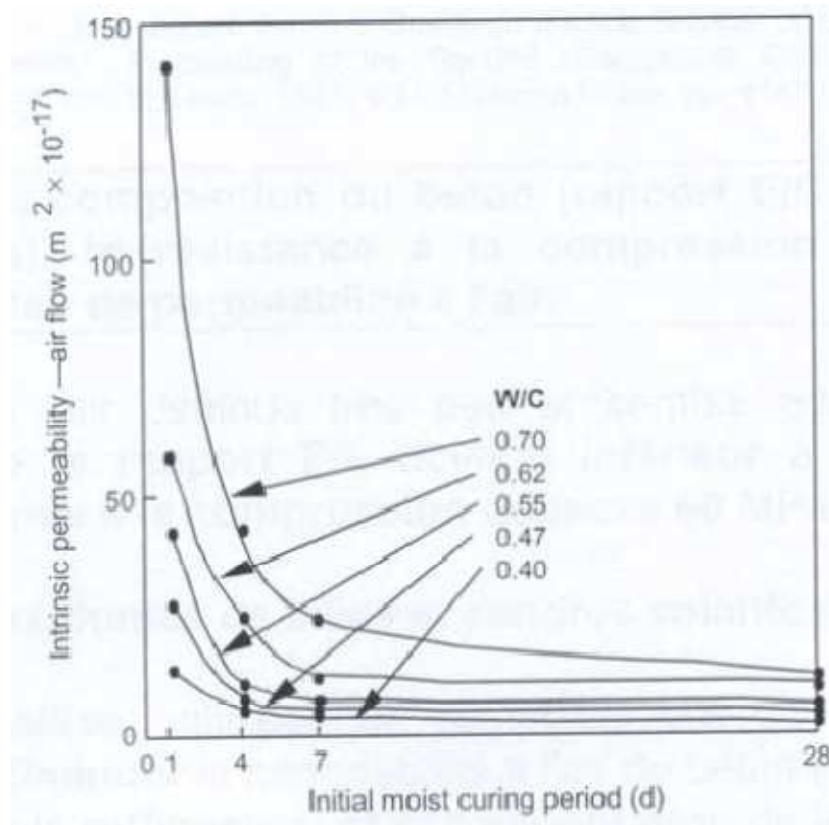


Figure 6-4 : Perméabilité à l'air du béton en fonction du rapport E/C et de la durée du mûrissement humide d'après [108].

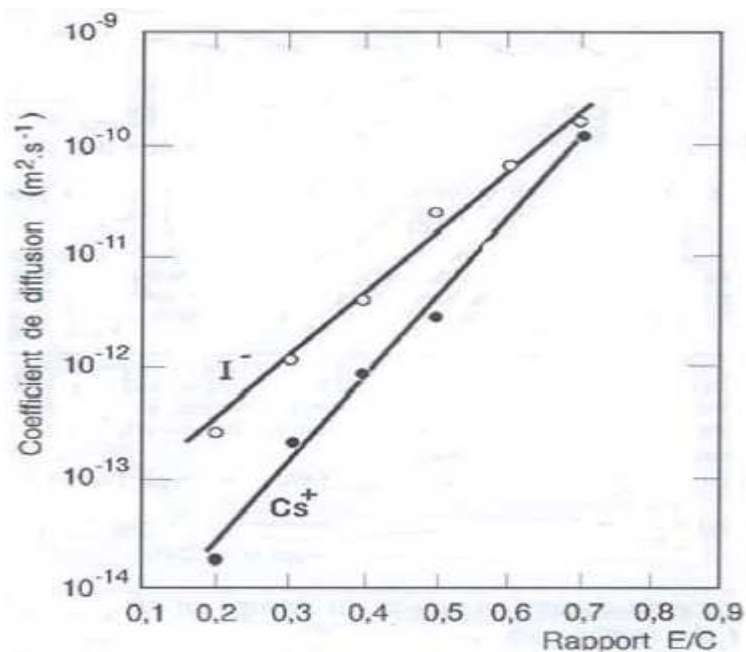


Figure 6-5 : Coefficient de diffusion apparent à 30 °C des ions I<sup>-</sup> et Cs<sup>+</sup> dans des pâtes de ciment durcies, en fonction du rapport E/C, D'après [109].

## 6.3.2. AJOUTS MINÉRAUX

### 6.3.2.1. Fumées de silice

Les fumées de silice, utilisées en remplacement du ciment, permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'air et à l'eau. Cet effet s'explique par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l'hydratation des sphères de fumée de silice. Le taux de remplacement optimal se situe aux environs de 10 % [101].

### 6.3.2.2. Fillers calcaires

La comparaison entre le ciment portland et le ciment aux fillers calcaires montre que la résistance à la compression à 28 jours, la quantité d'hydratés, la porosité et la distribution porosimétrique sont les mêmes et par conséquent l'addition de fillers calcaire ne modifie pas les propriétés de transfert par rapport au ciment portland [101].

### 6.3.3. DUREE DU MURISSEMENT

La durée de mûrissement influence fortement la perméabilité à l'air et à l'eau. Une période de mûrissement plus longue diminue très significativement la perméabilité parce qu'elle favorise la formation d'une plus grande quantité d'hydratés qui viennent combler et fractionner davantage la porosité capillaire.

### 6.3.4. DEGRE DE SATURATION

La perméabilité au gaz diminue avec le degré de saturation du béton à la différence de la perméabilité à l'eau qui augmente lors d'une imbibition [110].

Un séchage modéré ne permet pas le drainage des pores les plus fins, et la perméabilité mesurée est sous évaluée. Un séchage trop poussé entraîne une dégradation de la microstructure du matériau conduisant à une perméabilité artificiellement accrue ou à une surévaluation de la perméabilité du béton en service.

Un béton poreux avec une saturation d'eau élevée peut témoigner d'une perméabilité au gaz inférieure à un béton à haute résistance sec (peu poreux). C'est pourquoi les échantillons doivent autant que possible être séchés avant d'effectuer une mesure. [111].

Le choix de la température de séchage est délicat. En effet, une température trop élevée peut engendrer une évaporation de l'eau liée et une modification des hydrates : l'ettringite puis le C-S-H [110, 112]. Généralement, il convient d'appliquer un séchage par paliers de température croissants [113], de manière à diminuer d'une part les gradients de température et d'autre part les gradients hydriques. Cependant, une comparaison entre un béton séché par paliers de température croissants, et un béton ayant subi un séchage appliqué directement à 105 °C montre que la perméabilité au gaz n'augmente que légèrement [111,114].

### 6.3.5. TEMPERATURE

L'effet de la température sur la perméabilité et la diffusivité du béton a fait l'objectif d'une étude menée par Jooss et Reinhard. [115]. Dans cette étude, en testant onze types différents de bétons, les auteurs ont trouvé que la température a une influence sur la perméabilité et la diffusivité. En effet, la perméabilité augmente entre 13-62% quand la

température est augmentée de 20 à 50°C, puis de 3-55% additionnels quand la température atteint 80°C selon le type de béton figure (6-6). Cette variation du taux d'augmentation dépend du type de béton.

La même tendance a été observée pour la diffusivité qui a augmenté de 10-21% quand la température a augmenté de 20 à 50°C, puis de 8-21% quand la température a monté de 50 à 80°C figure (6-7).

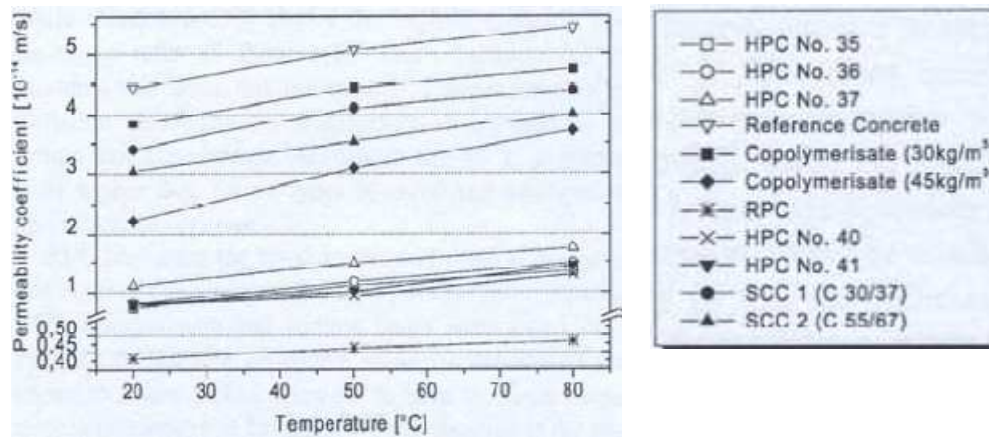


Figure 6-6: Effet de la température sur la perméabilité de différents types de bétons.

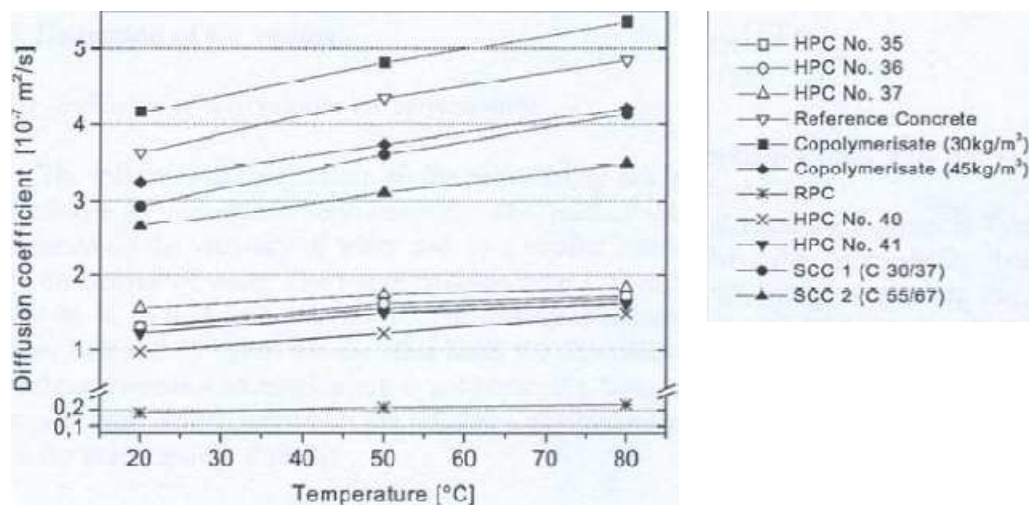


Figure 6-7 : Effet de la température sur la diffusivité de différents types de bétons.

#### 6.4. EFFET DE LA PENETRATION DES AGENTS AGRESSIFS SUR LA DURABILITE DES STRUCTURES

Dans la pratique, il est très commun d'avoir des fissures dans les structures de béton qui se trouvent dans un environnement riche en chlorures. Dans ce cas, le transport d'ions par le mouvement d'eau ou d'humidité peut prendre seulement quelques heures pour

atteindre l'acier. Tandis que la pénétration d'ions dans le béton non fissuré prend beaucoup plus de temps. L'amorçage d'une corrosion, l'attaque des sulfates et l'abrasion par le gel, pourront se propager et conduirons éventuellement à la ruine de l'ouvrage surtout pour les structures côtières ou les structures dans un milieu marin.

La situation s'est aggravée avec l'introduction des sels de déverglaçage. Les ouvrages routiers ont alors été exposés à des conditions encore plus agressives en raison de forte concentration en chlorures.

Actuellement, plusieurs ponts aux pays nordiques ont développé de la fissuration transversale sur le tablier peu après la construction. Il est connu qu'une telle fissuration engendre la corrosion prématurée des aciers d'armature et l'écaillage du béton protecteur, résultant en des coûts de maintenance accrus et une durée de vie réduite.

L'évaluation de la durée de vie des structures de béton fissurées est influencée par leurs caractéristiques, (largeur, longueur, ouverture), et par les propriétés du béton et les conditions d'exposition environnementales [116].

Les ingénieurs sont confrontés maintenant aux problèmes des structures en béton armé qui subissent, d'un côté, des environnements très agressifs (l'eau de mer) où les chlorures peuvent pénétrer dans le béton suivant divers processus (diffusion, capillarité, convection) et qui doivent assurer, d'un autre côté, une longue durée de vie (pont de Vasco de Gama au Portugal) [117].

#### **6.4.1. ACTION DE L'EAU DE MER**

Les sels dissous sont principalement des chlorures et des sulfates. L'attaque du béton est le résultat de réactions séparées mais plus ou moins simultanées entre les sulfates et chlorures et les constituants du ciment.

Aucun des composants hydratés du ciment Portland n'est stable en milieu marin. Vicat [118] dès 1857, avait établi un lien entre l'attaque chimique du ciment et la présence de  $MgSO_4$ . Les sels de magnésium  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$  sont les plus agressifs.

La substitution ( $Mg^{2+} \longrightarrow Ca^{2+}$ ) s'effectue également dans les silicates hydratés C-S-H qui se transforment progressivement en M-S-H, silicate de magnésium sans propriétés liantes.

Lorsque les ions chlore pénètrent dans la solution interstitielle, ils réagissent dans un premier temps avec le  $C_3A$  non hydraté pour former des monochloroaluminates de calcium

( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), ce qui représente une modification positive de la microstructure du béton [119]).

Le chlore peut s'insérer dans le réseau cristallin de C-S-H. Il fait disparaître les fibres et crée une structure alvéolaire : il se forme un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus lâches quand la quantité de chaux dissoute augmente.

Les différentes réactions chimiques illustrant l'attaque de l'eau de mer sont présentées dans le tableau 6-1.

Tableau 6-1  
Action de l'eau de mer

<b>1 Action des sulfates</b>	
a) Substitution $\text{Mg}^{2+} \longrightarrow \text{Ca}^{2+}$ :	$\text{Mg SO}_4 + \text{Ca (OH)}_2 \longrightarrow \text{Ca SO}_4 + \text{Mg (OH)}_2$ (précipité) Soluble 1,2 g/l Solide (gypse secondaire)
b) $\text{Ca SO}_4 + \text{C}_3\text{A} + 32 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow$	$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ettringite <b>GONFLEMENT+FISSURATION ET ECLATEMENT</b>
<b>2 Action des chlorures</b>	
c) Substitution $\text{Mg}^{2+} \longrightarrow \text{Ca}^{2+}$ :	$\text{Mg Cl}_2 + \text{Ca (OH)}_2 \longrightarrow \text{Ca Cl}_2 + \text{Mg (OH)}_2$ Soluble      Précipité
d) $\text{Ca Cl}_2 + \text{C}_3\text{A} + 10 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (sel de Friedel) Monochloroaluminate, instable, donne en présence de sulfates : $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ <b>GONFLEMENT+FISSURATION ET ECLATEMENT</b>
<b>3 Action de <math>\text{CO}_2</math></b>	
e) $\text{Ca (OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow$	$\text{Ca CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ Précipité ↙                  ↘ Aragonite          calcite <b>CARBONATATION+CORROSION DES ARMATURES</b>

Tout récemment on a entrepris d'étudier plus en détail, les mécanismes de pénétration des ions chlore, dans des pâtes de ciment de rapport E/L faible (inférieur à 0,30).

Récemment, Gagné et coll. [120] ont étudié l'importance du pH de la solution interstitielle sur la pénétration des ions chlore. Ils ont trouvé que cette pénétration augmentait de façon significative avec la diminution du pH.

Les essais ont clairement montré que, lorsque le pH de la solution contenant les ions chlore en solution est plus faible (11,5), la pénétration des ions chlore est significativement plus importante (tab. 6-2).

On détecte alors plus souvent la présence de chloroaluminates et la concentration en ions chlore atteint très souvent 3% après 12 mois d'exposition, particulièrement dans les pâtes où le rapport E/L est de 0,30. A un pH de 11,5, c'est la lixiviation des ions calcium qui est prépondérante. La portlandite et le C-S-H peuvent devenir instables à des pH < 13 et qui provoquent l'apparition d'une très fine porosité qui facilite la pénétration des ions chlore [120].

Tableau 6-2  
Concentration en ions chlore dans les pâtes exposées  
à une solution contenant 3% de NaCl [120].

Exposition (mois)	Concentration en ions chlore (+1%)							
	E/L = 0,30				E/L = 0,25			
	Type 30		Type 30 + FS		Type 30		Type 30 + FS	
	pH		pH		pH		pH	
	13,0	11,5	13,0	11,5	13,0	11,5	13,0	11,5
1	1	3	< 1	3	< 1	2	< 1	1
3	1	3	< 1	3	1	2	1	2
12	-	3	-	3	-	3	-	2

## 6.5. EFFET DES FUITES DE GAZ VIA LES FISSURES SUR

### L'APTITUDE AU SERVICE DES STRUCTURES EN BETON

Comme les fissures sont des chemins préférentiels pour la pénétration des chlorures, elles sont aussi des lieux favorables pour les fuites du gaz dans les structures de

confinement. Donc, la perméabilité au gaz des bétons qui est en général supérieure à leur perméabilité à l'eau, joue un rôle important pour certaines applications, par exemple lors du stockage des gaz dans des réservoirs en béton, du stockage final de substances radioactives ou des calottes étanches au gaz sur les bassins de putréfaction des stations de dépuración des eaux usées. La perméabilité peut être utilisée pour évaluer la durabilité des bétons, surtout lorsqu'il s'agit de carbonatation et de corrosion, et l'on s'en sert pour le contrôle de la qualité des ouvrages en béton. La perméabilité au gaz des bétons est également un paramètre important dans le projet Swiss métro : des trains à grande vitesse se déplaceraient à l'intérieur de tunnels sous vide partiel reliant des villes suisses, le vide partiel nécessaire ne peut être obtenu qu'avec un revêtement intérieur des tunnels aussi étanche que possible [111].

## CONCLUSION

---

Les six premiers chapitres consacrés à l'étude bibliographique du matériau BHP c'est-à-dire depuis sa fabrication jusqu'à la réponse de la structure aux agressions environnementales, nous ont permis de mettre en évidence la nécessité d'étudier les caractéristiques mécaniques et physiques et les paramètres de durabilité du matériau.

La plupart des résultats présentés jusqu'à aujourd'hui dans la littérature nécessitent plus de vérification ou de précision, surtout en ce qui concerne l'évaluation des paramètres de durabilité. Ces paramètres doivent être bien maîtrisés avant de pouvoir explorer d'autres facteurs influant sur la performance du béton. Par exemple, l'influence de la pression de confinement sur les résultats de la perméabilité aux gaz est loin d'être négligeable.

Nous récapitulons les observations qui découlent de l'étude bibliographique de la manière suivante.

L'étude des BHP laisse observer une microstructure bien distincte de celles des bétons classiques :

- Par sa nature polyphasique, le béton est un matériau complexe à étudier ;
- Une pâte de faible porosité, gage de durabilité ;
- Une faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité ;
- Une distribution des pores plus fine que celle d'un béton ordinaire, réduit considérablement le risque de pénétration et de migration interne d'ions chlore ;
- Des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, sont très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Ces paramètres sont responsables de l'amélioration de la durabilité des matériaux.

La durabilité d'un ouvrage en béton est liée à la capacité du béton à résister aux divers agents agressifs (liquides, ions, gaz). Cependant la fissuration d'origine mécanique ou thermique ou physico-chimique, offre des chemins préférentiels pour la pénétration de ces agents. Dans les structures en milieu marin, les chlorures exploitent les fissures comme des chemins préférentiels pour mener leur attaque contre les armatures.

Les différences de composition chimique entre un environnement aqueux extérieur et la solution interstitielle sont moteurs de mouvements d'ions, majoritairement diffusifs en milieu totalement saturé.

Les mouvements d'ions modifient localement la composition de la solution interstitielle et par conséquent perturbent les équilibres chimiques en place. Ceux-ci sont rétablis instantanément par des dissolutions ou précipitations de phases solides.

Est-ce que les relations existant entre la durabilité et les caractéristiques cimentaires comme la porosité accessible et la résistance à la compression, peuvent être validées si l'on ne prend pas en compte la mesure de la perméabilité ?

Est-ce que les résultats de la perméabilité aux gaz permettent de différencier deux matériaux de résistances distinctes ?

Cependant, bien qu'il soit prématuré de conclure pour une bonne durabilité des BHP, est-ce que leur forte densité induisant une faible perméabilité milite en faveur d'une prédisposition pour une bonne résistance aux attaques chimiques ?

Afin de répondre le plus précisément possible aux questions mentionnées ci-dessus, nous présentons nos résultats en considérant la perméabilité comme paramètre de base dans cette étude.

*PARTIE*

*EXPERIMENTALE*

# INTRODUCTION

---

Dans cette partie expérimentale, notre but n'est pas d'en définir une méthode de composition des bétons à hautes performances, mais plutôt, sur la base de connaissances théoriques et des matériaux disponibles, de formuler des BHP dont les principaux critères sont :

- Un béton de bonne ouvrabilité ;
- Une résistance en compression à 28 jours supérieure à 50 MPa ;
- Une résistance chimique correcte en milieux agressifs.

Nous présentons dans ce chapitre le détail des matériaux ayant servi à l'élaboration des bétons.

Le calcul d'un mélange de béton n'est qu'une première approche qui nécessite par la suite la préparation des mélanges d'essais qui eux permettront de corriger expérimentalement la formule calculée, pour aboutir au béton qui répond aux critères définis initialement.

Les essais de recherche et d'optimisation de la composition des BHP définis par les normes et les tests préliminaires de durabilité ont été exécutés dans les laboratoires de la faculté de génie civil à l'université des sciences et de la technologie (USTHB).

Avant même la formulation d'un tel béton, il est primordial d'effectuer l'analyse et le contrôle des propriétés physico-chimiques et mécaniques des différents constituants (ciment, sable et graviers) ainsi que les ajouts cimentaires locaux sélectionnés (laitier de haut fourneau et pouzzolane). Le liant doit être en particulier d'une classe de résistance supérieure à 42,5 MPa.

Cette optimisation intègre l'étude de l'influence des propriétés des ajouts cimentaires sur les caractéristiques des BHP dans le but de justifier les performances plus ou moins élevées de tel ou tel autre béton.

Nous exposons dans la partie expérimentale, la procédure de mesures des paramètres de durabilité des bétons.

Nous avons mis au point une procédure pour mesurer la perméabilité aux ions chlore et nous avons conçu et réalisé une procédure pour mesurer la perméabilité aux gaz des bétons.

Les investigations menées à *l'INSA de Toulouse (France)* ont permis de comparer les résultats obtenus par notre propre méthode (mesure de la perméabilité des bétons à l'oxygène), à ceux obtenus par la méthode Cembureau.

L'étude comparative des performances des bétons élaborés permettra d'effectuer un choix éclairé parmi les différentes formulations.

En outre, il est nécessaire de savoir si ces bétons se distinguent par leurs performances, leur comportement ou par les deux à la fois, à résister aux divers agents agressifs.

## ANALYSE DES MATERIAUX UTILISES

---

### 7.1. INTRODUCTION

Dans le but de mettre en évidence l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité des bétons confectionnés à base de ciment Portland artificiel (C.P.A), des essais physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de la faculté de Génie Civil de USTHB (Algérie);
- Laboratoire bâti dans l'environnement (LBE) de la faculté de Génie Civil de USTHB (Algérie);
- Laboratoire physique de la cimenterie de Meftah (Algérie);
- Laboratoire chimique de la cimenterie de Meftah (Algérie);
- Laboratoire matériaux et durabilité des constructions (LMDC) de l'INSA de Toulouse (France).

### 7.2. LE CIMENT

Le ciment utilisé est un CPA CEM I 42.5 de la compagnie algérienne des ciments(ACC).

#### 7.2.1 PROPRIETES CHIMIQUES

Tableau 7-1  
*Composition chimique du ciment CEM I 42.5*

Éléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	RI	PAF	CaO <sub>1</sub>
%	63,05	21,28	3,85	4,61	1,19	2,54	0,48	0,23	1,11	1,58	0,75

La Composition minéralogique de ce ciment calculée par la méthode de Bogue est donnée au tableau 7-2.

Tableau 7-2  
*Composition minéralogique du ciment CEM I 42.5*

Minéraux	%
C <sub>3</sub> S	60.57
C <sub>2</sub> S	12.22
C <sub>3</sub> A	2.41
C <sub>4</sub> AF	14.01

### 7.2.2 PROPRIETES PHYSIQUES

Tableau 7-3  
*Propriétés physiques du ciment CEM I 42.5*

Masse volumique absolue g/cm <sup>3</sup>	3.15
Consistance normale de la pâte de ciment%	27,00
Surface Spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3219
Retrait à 28 jours (µm/m)	475
Début de prise à 20°C (heure-min)	2 :00
Fin de prise à 20°C (heure-min)	4:15

### 7.2.3 PROPRIETES MECANIQUES

Pour calculer la composition du béton, il est nécessaire de déterminer la résistance vraie du ciment utilisé, soit dans notre cas présent le CPA CEM I 42,5. Le mortier normal utilisé est conçu suivant la norme *NF P 15-403* avec un rapport eau/ciment égal à 0,5. Les éprouvettes de mortier (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup> sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 7 jours, puis stockées en salle climatisée (20°C, 50% HR) jusqu'à la réalisation des essais. Les résultats des essais de ruptures à la flexion et à la compression sont reportés sur le tableau (7-4).

Tableau 7-4  
Évolution de la résistance du ciment CEM I 42,5.

Résistance (MPa)	02 j	07 j	28 j
flexion	4,08	6,56	8.28
compression	18	35	51

En conclusion, le ciment CEM I 42,5 correspond parfaitement à la classe de résistance minimale recherchée (40 MPa) qui est indispensable pour l'élaboration des BHP d'une résistance projetée de 50 MPa.

### 7.3. LES GRANULATS

#### 7.3.1 LE SABLE

Le sable utilisé est un sable roulé (0/3,15) provenant de la rivière de Baghlia, la composition granulométrique est représentée sur le tableau (7-5), le module de finesse calculé est 3,2, ce qui correspond à des sables utilisés pour la recherche de résistances élevées, mais en général, il conduit à une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation. Cependant, la teneur de la partie supposée argileuse, soit de diamètre inférieur à 0,135mm, est de 8,67 %.

Tableau 7-5  
Analyse granulométrique du sable (900 g)

Tamis (mm)	Refus partiel		Refus cumulés		Module de finesse %
	(g)	%	(g)	%	
3,15	0	0	0	0	3,23
2,5	122	13.55	122	13.55	
1,25	319	35.44	441	49	
0,63	237	26.31	678	75.33	
0,315	144	16.00	822	91.33	
0,16	24	2.67	846	94.00	
0,08	41	4.56	887	98.55	
F. tamis	13	1.44	900	100	

Autres propriétés physiques :

Masse volumique apparente .....	1600 kg/m <sup>3</sup> ;
Masse volumique absolue .....	2,60 g/cm <sup>3</sup> ;
Équivalent de sable visuel .....	ESV = 97% ;
Équivalent de sable à piston .....	ESP = 95%.

La granulométrie, le module de finesse et l'équivalent de sable, montrent que le sable peut être utilisé pour l'élaboration d'un BHP [121].

### 7.3.2 LES GRAVIERS

Les graviers utilisés de classe 3/8 et 8/16 proviennent de la carrière Jaubert (Alger). Ce sont des graviers concassés de hautes qualités d'origine silico-calcaire, dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques sont les suivantes :

- Masse volumique absolue : 2,50 g/cm<sup>3</sup> ;
- Masse volumique apparente : 1,40 g/cm<sup>3</sup> ;
- Résistance aux chocs dynamiques mesurée par l'essai Los Angles selon la norme NFP 18-573 : 33% ;
- Résistance à l'usure par frottement réciproque mesurée par l'essai micro-Deval selon la norme 18-573 : MDE = 24% ;
- Teneur en sulfate et sulfure : mesurée selon la norme NFP 18-011 égale à 0,39% (agressivité faible) ;
- Coefficient d'aplatissement (norme 18-561) : 28,18%.
  
- Essai de propreté (norme NF 18-301) :
  - Gravier (3/8) ..... P = 1,98 ;
  - Gravier (8/16) .... P = 1,58.
  
- granulométrie :

L'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16 est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 7-6  
Analyse granulométrique des graviers

Tamise (mm)	Refus cumulés en %	
	Fraction 3/8	Fraction 8/16
16,00	00	00
12,50	00	03
10,00	00	26
08,00	00	61
06,30	09	87
05,10	70	99
03,15	97	100
02,50	98	/
01,25	100	/
F tamis	/	/

Conformément à la norme *NF P 18-304*, le graphique granulométrique (Figure 7-1) présente les courbes granulométriques du sable et des deux fractions de graviers, sur lequel les coordonnées du point de brisure (A) sont :  $x = 8$  et  $y = 53,7$  %.

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton, passe impérativement par la mise au point de compositions qui consiste à définir le mélange optimal des différents granulats.

La synthèse des courbes granulométriques tracées sur la figure 7-1 présente un squelette granulaire continu, autrement dit s'élevant du plus petit grain de sable (de 80  $\mu\text{m}$ ) aux plus gros grains de gravier (de 16 mm), reste à combler les vides avec une matrice cohérente pour élaborer les bétons désirés.

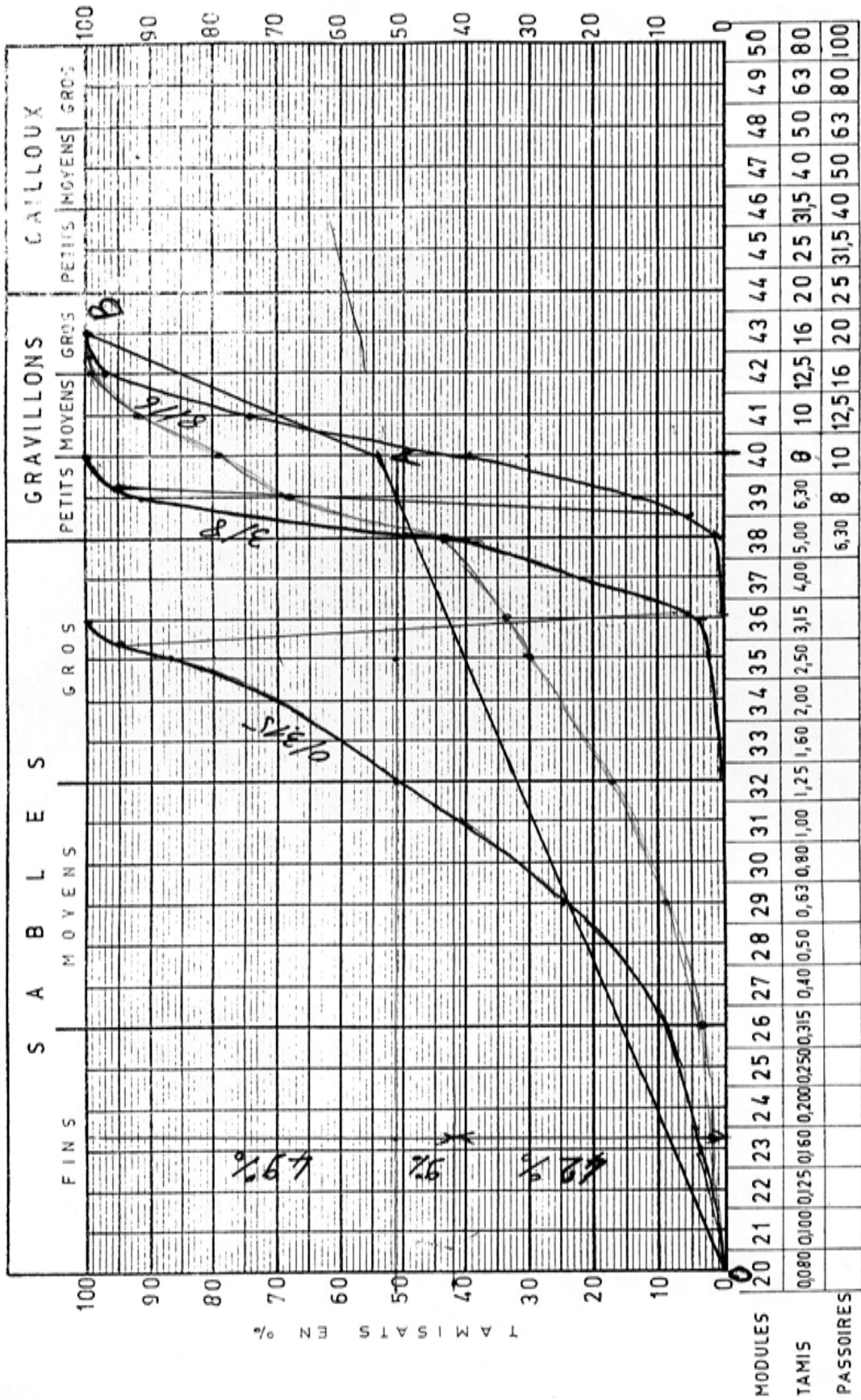


Figure 7-1 : Graphique et courbes granulométriques

## 7.4. LES AJOUTS CIMENTAIRES

La composition chimique des ajouts cimentaires est déterminée par microanalyse (EDS) couplée au MEB. L'appareil utilisé est un microscope électronique à balayage, à effet de champ JSM 6380, destiné à l'observation d'échantillons secs, conducteurs ou faiblement isolants, avec une excellente résolution, en particulier à basse tension.

Pour obtenir un dosage global représentatif, les différents échantillons sont réduits en poudre passant entièrement au tamis de 50  $\mu\text{m}$  puis homogénéisés et pastillés sous une presse de façon à obtenir une face plane pour l'exposition sous le faisceau d'électrons. La diode d'analyse a ainsi un angle invariant par rapport à la surface observée. D'autre part, la surface irradiée et analysée est la plus grande possible.

### 7.4.1 LE LAITIER

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-hadjar 'Annaba', c'est un sable de granulométrie 0/5 mm, le tableau 7-7 donne sa composition chimique.

Tableau 7-7  
*Composition chimique du laitier*

Éléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	RI	PAF
%	39,77	41,69	7,05	1,41	5,49	0,15	0,44	0,10	0,12	0,11

Cependant, le refroidissement brutal (trempe) du laitier sous un jet d'eau, permet l'obtention d'un état vitrifié (amorphe), ce qui explique l'absence de raie de diffraction dans le diffractogramme de rayons X (fig. 7-2).

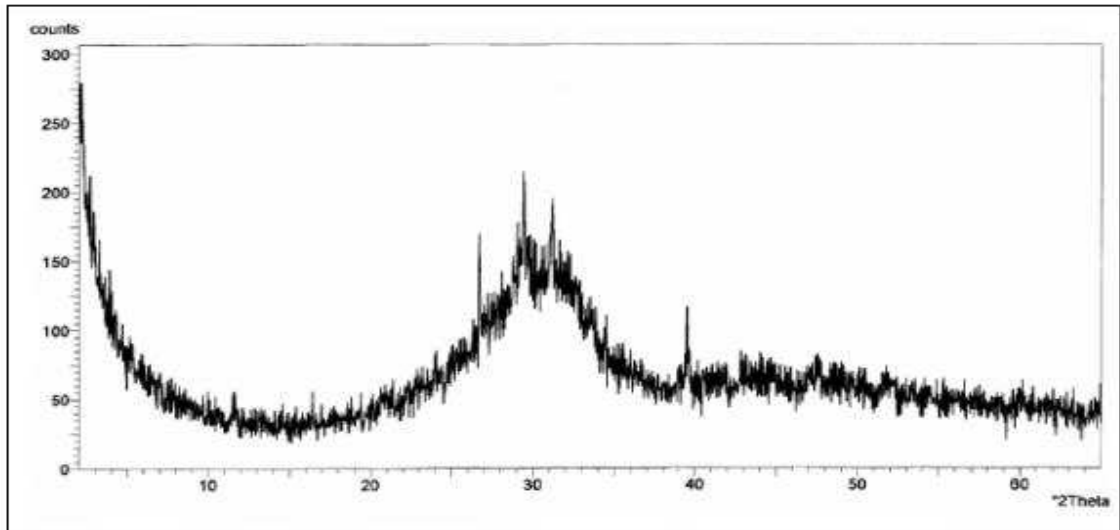


Figure 7-2 : *Diffractogramme du laitier*

Le laitier d'El-hadjar a l'avantage d'être plutôt acide (le rapport  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  varie dans les limites de 0,95 – 1,04) ; il est relativement stable. Le résultat de la micro-analyse (fig. 7-3) confirme bien l'hypothèse avancée.

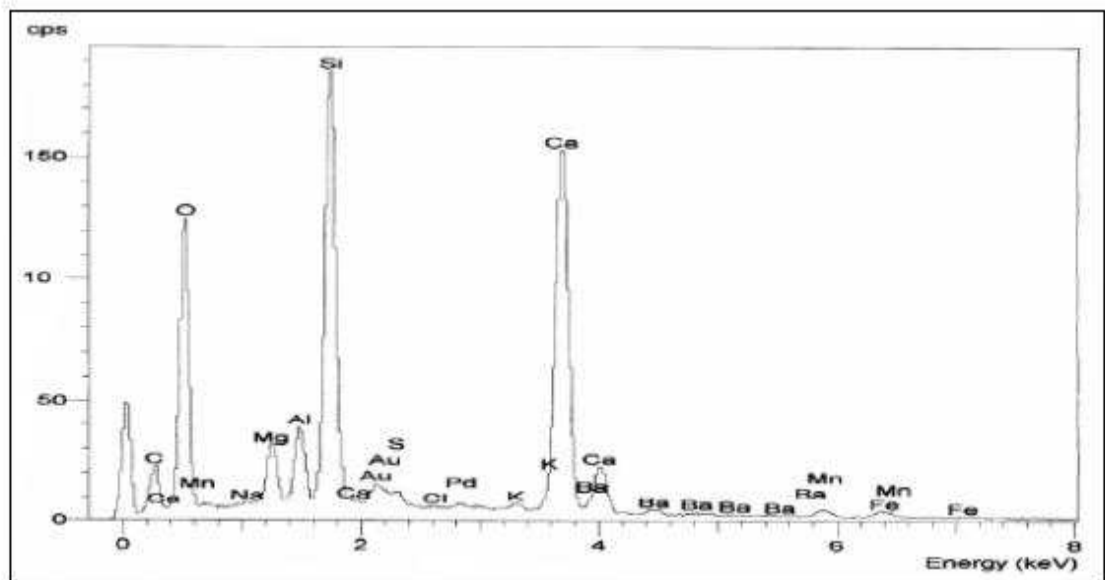


Figure 7-3 : *Micro-analyse (x2000) du laitier.*

La figure 7-4 (a x 5 000 et b x 20 000) représente une vue globale de l'observation au MEB du laitier, qui se présente sous forme de nodules d'un aspect poreux dû à de la vapeur d'eau piégée lors de la trempe. Il faudra tenir compte de son influence sur la maniabilité et sur le dosage en eau.

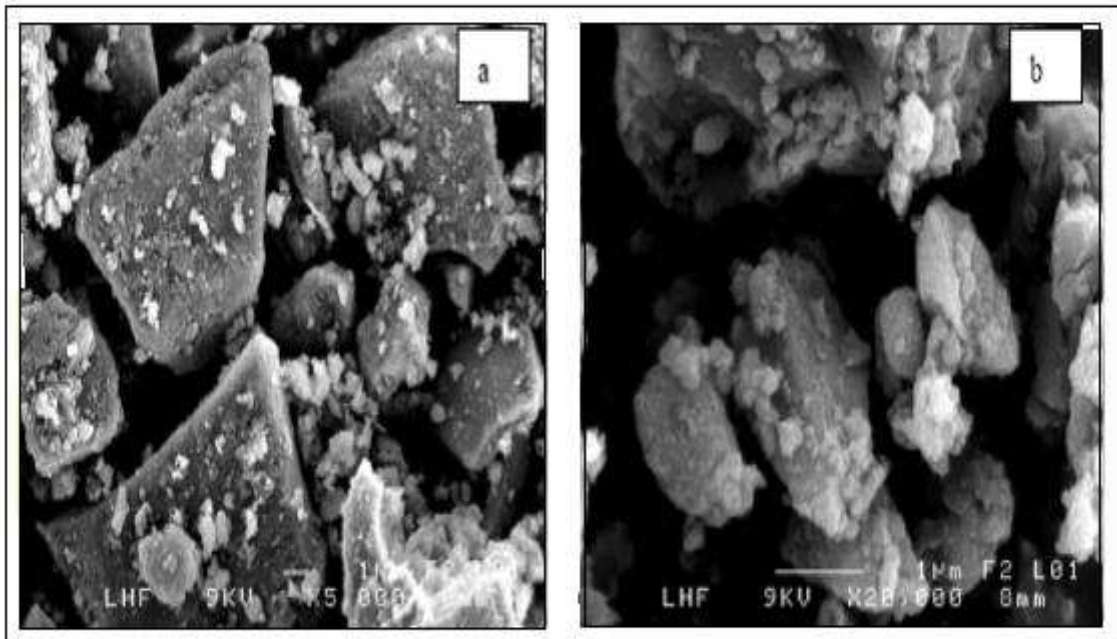


Figure 7-4 : Observation au MEB du laitier.

L'analyse granulométrique (fig. 7-5) réalisée à l'aide d'un granulomètre laser représente les courbes granulométriques partielle et cumulée du laitier [122]. On peut observer une granulométrie continue moyenne entre 0,3 et 77  $\mu\text{m}$  avec les classes granulaires suivantes :

- 90% des particules de diamètre inférieur ou égal à 77  $\mu\text{m}$ .
- 50% des particules de diamètre inférieur ou égal à 22  $\mu\text{m}$ .
- 10% des particules de diamètre inférieur ou égal à 2  $\mu\text{m}$ .

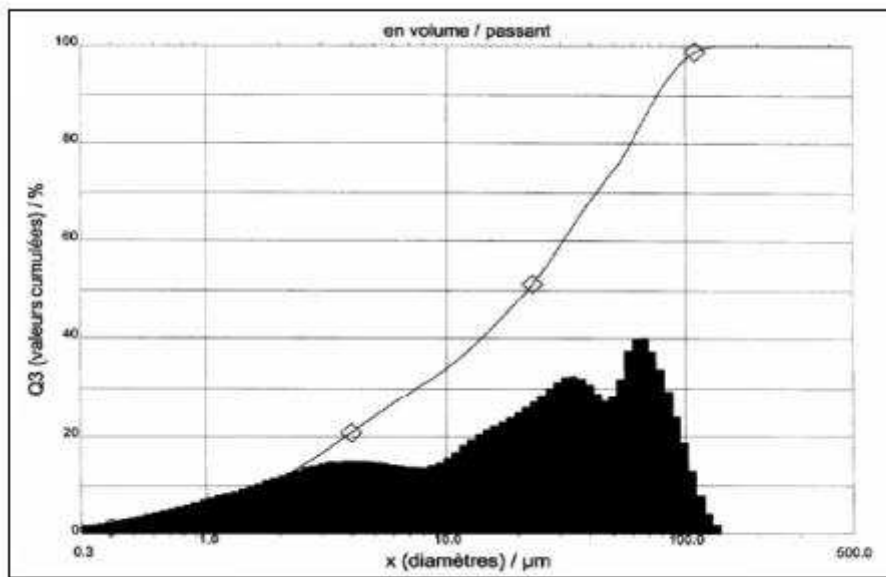


Figure 7-5: *Distribution granulométrique du laitier*

En plus de son pouvoir pouzzolanique, caractérisé par le taux de chaux combinée, le laitier avec une telle granulométrie, assurera la densification de la matrice, du fait de la taille de ces particules qui peuvent s’insérer en partie entre les grains de ciment.

Autres propriétés physiques :

- Masse volumique absolue ..... 2,99 g/cm<sup>3</sup> ;
- Surface spécifique ..... 8 500 cm<sup>2</sup>/g ;
- Activité ..... 125 mg<sub>cao</sub>/g.

### 7.4.2 LA POZZOLANE

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle d’origine volcanique, extraite de la carrière de Béni-saf ; le tableau 7-8 présente sa composition chimique.

Tableau 7-8  
*Composition chimique de la pouzzolane.*

Éléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	RI	PAF
%	14,59	44,95	16,91	09,47	3,70	0,20	1,35	1,34	0,56	4,30

La pouzzolane observée sur le diffractogramme (fig. 7-6) est constituée essentiellement de quartz ( $\text{SiO}_2$ ), cordiérite ( $\text{Mg}_2\text{Al}_3 [\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$ ), hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), analcime ( $\text{Na} [\text{AlSiO}_6] \text{H}_2\text{O}$ ) et axinite ( $\text{Ca}_2 (\text{Fe}, \text{Mn}) \text{Al}_2 [\text{SiO}_4]_4$ ), dont la partie amorphe est en grande quantité.

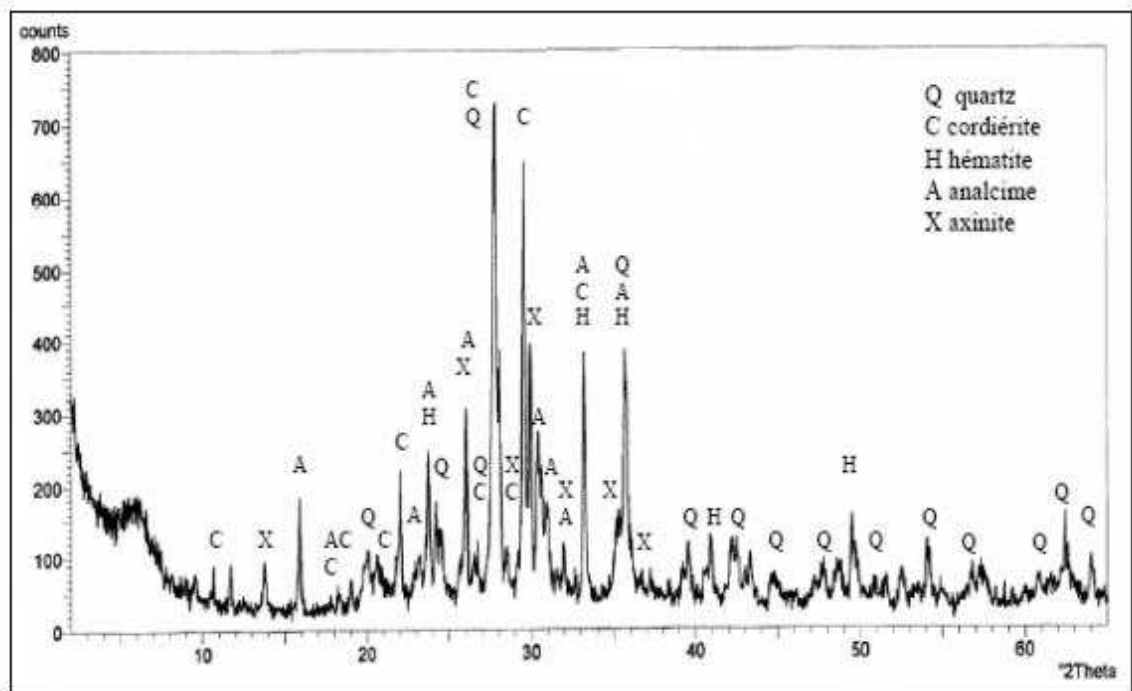


Figure 7-6: *Diffractogramme de la pouzzolane.*

La figure 7-7 (a x 5 000 et b x 20 000) représente une vue globale de l'observation au MEB de la pouzzolane, la figure 7-8 représente la microanalyse globale. Ces données confirment les constatations précédentes et la composition chimique présentée (tab. 7-8). Les particules de la pouzzolane de néoformation ont un aspect poreux semblable à celui du laitier.

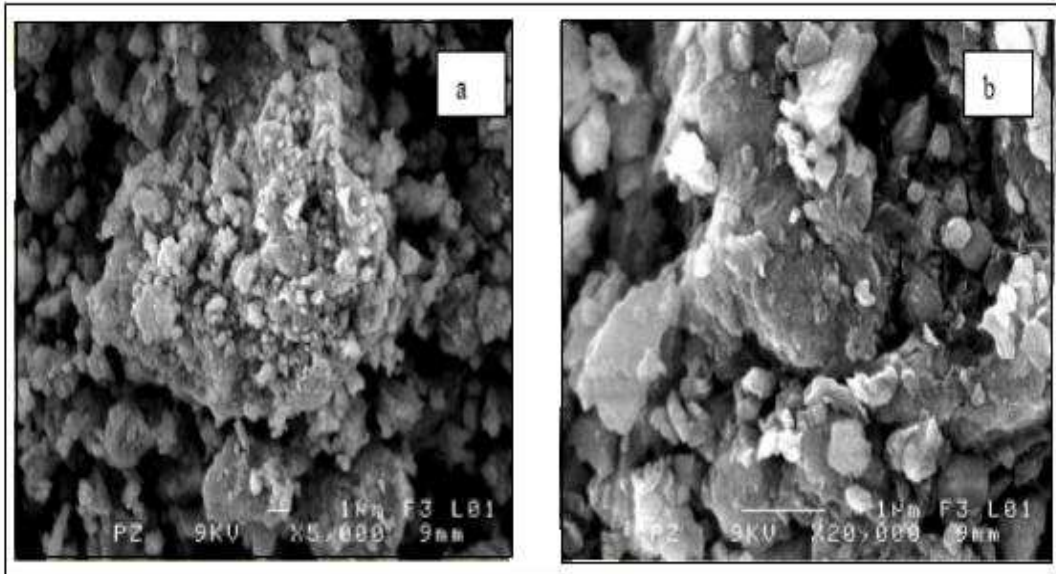


Figure 7-7: Observation au MEB de la pouzzolane.  
(a x 5 000 et b x 20 000)

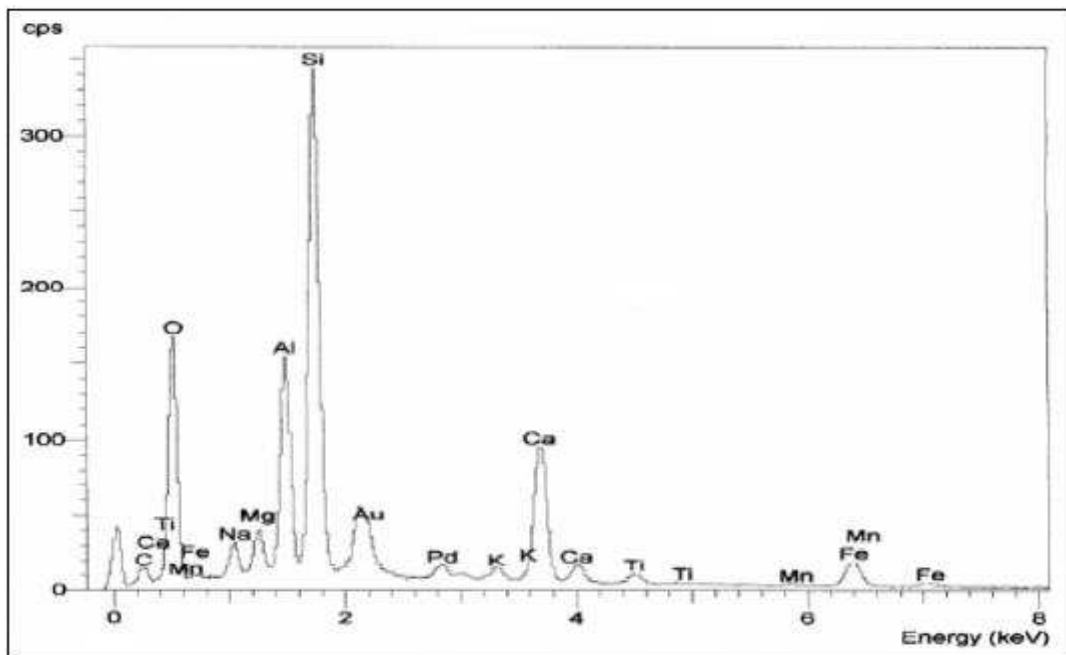


Figure 7-8: Micro-analyse (x2000) de la pouzzolane.

La granulométrie de la pouzzolane est plus serrée par rapport à celle du laitier utilisé, elle s'étale entre 2 et 15  $\mu\text{m}$  seulement (figure 7-9).

Les classes granulaires sont :

- 75% des particules de diamètre inférieur ou égal à 15  $\mu\text{m}$ .
- 50% des particules de diamètre inférieur ou égal à 6  $\mu\text{m}$ .
- 25% des particules de diamètre inférieur ou égal à 2  $\mu\text{m}$ .

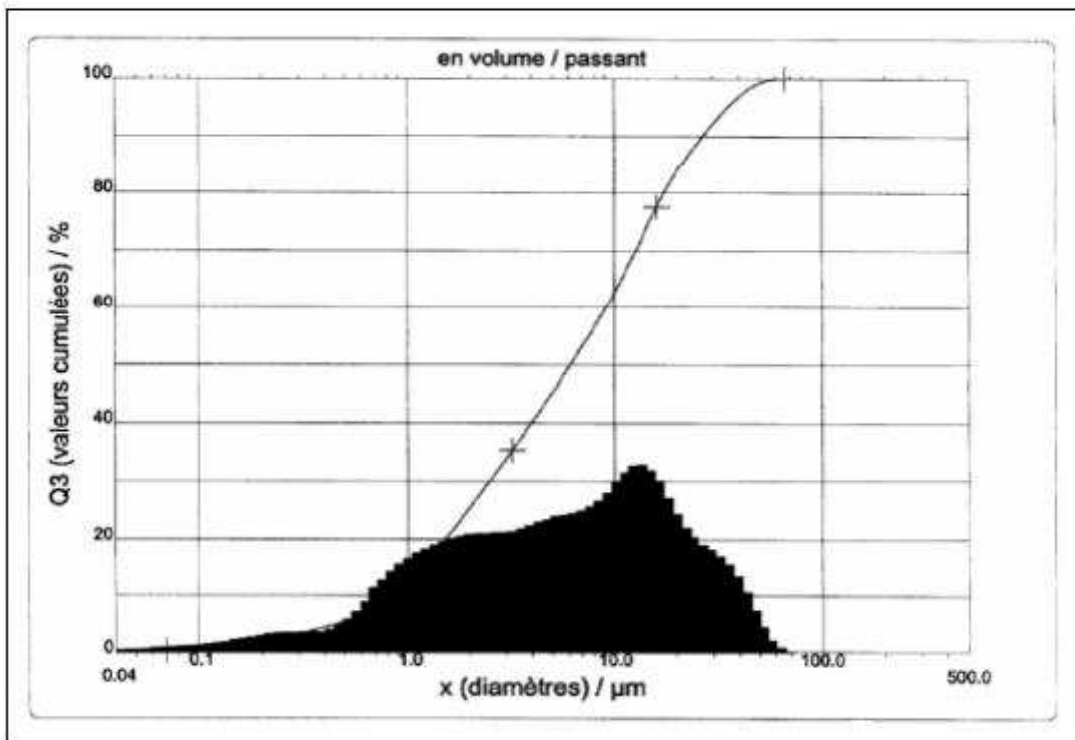


Figure 7-9: *Distribution granulométrique de la pouzzolane.*

Autres propriétés physiques :

Masse volumique absolue ..... 2,66  $\text{g}/\text{cm}^3$  ;  
 Surface spécifique ..... 9 565  $\text{cm}^2/\text{g}$  ;  
 Activité ..... 115  $\text{mg}_{\text{cao}}/\text{g}$ .

## 7.5. L'ADJUVANT

L'adjuvant utilisé, est un plastifiant réducteur d'eau pour bétons à hautes performances conforme à la norme *NF EN 934-2* fourni par la société GRANITEX; sa fiche technique est la suivante :

**-Présentation** : Le **Médaflow (30)** permet la confection de bétons à très faible rapport E/C ayant des résistances mécaniques très élevées à toutes échéances et en particulier aux jeunes âges.

**-Caractères généraux** : Le **Médaflow (30)** permet la confection de bétons fluides particulièrement adaptés aux :

- bétons à très hautes performances (résistance caractéristique > 50 MPa) ;
- bétons préfabriqués, étuvés ou non ;
- bétons additionnés de silice micronique.

**Caractéristiques physiques et chimiques** :

- Solution aqueuse.
- Densité :  $1,07 \pm 0,01$ .
- pH : 6 à 6.5.
- Teneur en ions  $Cl^-$  : < 0,1 %.
- Extrait sec :  $30 \pm 1,5$  %.

**Dosage** : La plage d'utilisation recommandée est 0,5 à 2 % du poids du ciment selon les performances recherchées. Ce dosage pourra être dépassé pour obtenir des réductions d'eau plus importantes notamment lors de la confection des bétons avec silice micronique.

Le **Médaflow (30)** est ajouté en même temps que l'eau de gâchage. Son effet sera maximum s'il est introduit sur un béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

## 7.6. CONCLUSION

En résumé les matériaux mis à notre disposition ont des propriétés conformes aux normes en vigueur et conviennent parfaitement à notre objectif notamment la formulation des bétons à hautes performances.

# FORMULATION DES BHP AVEC AJOUTS CIMENTAIRES LOCAUX

---

## 8.1. GENERALITES

Les essais que nous entreprenons dans ce chapitre consistent à optimiser les différentes compositions de béton (de référence et celles avec ajouts).

Il est nécessaire de préciser que le ciment utilisé est un CPA 42.5 produit par ACC, le sable est celui de Baghlia (sable de rivière), les graviers sont extraits de la carrière Jaubert et l'adjuvant est un super plastifiant réducteur d'eau (Médaflow (30)) produit par Granitex.

## 8.2. FORMULATION DE LA COMPOSITION DE REFERENCE

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le dosage optimal en granulats en ciment et en eau, afin de réaliser un béton de qualités requises (résistance, durabilité) par des spécifications liées au contexte de réalisation d'un ouvrage.

L'idée principale est d'élaborer un béton dense à partir d'un squelette granulaire le plus compact possible avec un dosage en ciment et en eau compatible avec la résistance projetée et l'ouvrabilité désirées.

Nous nous limiterons à l'application de la méthode pratique et simple de « Dreux Gorisse » basée sur l'analyse granulométrique du sable et différentes fractions de graviers.

Les données de base sont :

- Résistance vraie du ciment  $R_c = 47$  MPa;
- Résistance désirée du béton  $R_b = 35$  MPa ;
- Diamètre maximal des gros granulats = 16 mm;
- Dosage en ciment :  $425 \text{ kg/m}^3$ ;
- $E/C = 0,5$  donc  $E = 212,5 \text{ l/m}^3$ ;
- Ouvrabilité mesurée au cône d'Abrams :  $(6 \div 9)$  cm.

Après analyse et contrôle des différents matériaux et à partir du graphique granulométrique (fig. 7-1) du sable et des deux fractions de graviers (3/8 et 8/16) où les coordonnées du point de brisure A fixées sont ( $x = 8$  et  $y = 53,7 \%$ ), nous avons retenu le dosage des granulats formant le squelette de la composition de base comme suite :

- sable .....42 % ;
- fraction 3/8 .....09 % ;
- fraction 8/16 .....49 %.

Nous cherchons un béton plastique avec vibration normale, alors on adopte au coefficient de compacité la valeur 0,810 tirée par extrapolation du tableau correspondant.

Les valeurs absolues des constituants solides sont :

- ciment .....135 dm<sup>3</sup> ;
- sable .....283dm<sup>3</sup> ;
- fraction 3/8 ..... 61 dm<sup>3</sup> ;
- fraction 8/16 .....331dm<sup>3</sup>.

La composition finale pour 1 m<sup>3</sup> de béton, après correction est la suivante :

- ciment .....425 kg;
- sable .....736 kg;
- fraction 3/8 .....153 kg;
- fraction 8/16 .....827 kg;
- eau ..... 212,5 l.

Tableau 8-1  
Caractéristiques du béton de référence.

Composition	Béton frais			Béton durci		
	Air occlus (%)	Affaissement (cm)	Mv kg/m <sup>3</sup>	Mv kg/m <sup>3</sup>	Rc (MPa)	
					7 jours	28 jours
B.R	2,2	7	2360	2380	30	42

Les caractéristiques du béton élaboré répondent bien aux objectifs visés, résistance à 28j :

$R_c = 42$  MPa et un affaissement égal 7 cm (tableau 8-1).

### 8.3. OPTIMISATION DU DOSAGE EN ADJUVANT ET DU RAPPORT E/C

Afin de déterminer le dosage optimal en adjuvant, des mesures de l'ouvrabilité de béton frais et de la résistance mécanique à la compression sont réalisées.

Une série de gâchées de compositions similaires à celle de béton de référence à différents rapports E/C et à différents dosages d'adjuvants ont été préparées. Le but visé est une ouvrabilité acceptable et une résistance mécanique en compression élevée.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 8-2  
*Influence du dosage en adjuvant et du rapport E/C sur les caractéristiques du béton de référence*

Dosage en adjuvant MF.30(%c)	Béton frais				Béton durci
	N°	E/C	Affaissement (cm)	M <sub>v</sub> (Kg /m <sup>3</sup> )	R <sub>c</sub> (28j) (MPa)
1	1	0,3	15	2400	52
1,5	2	0,3	20	2360	46
2	3	0,3	23	2370	39
1	4	0,27	13	2410	60
<b>1,5</b>	<b>5</b>	<b>0,27</b>	<b>20</b>	<b>2380</b>	<b>56</b>
2	6	0,27	22	2350	50
1	7	0,25	3	2360	51
1,5	8	0,25	13	2380	54
2	9	0,25	15	2400	58
1	10	0,20	1	2300	28
1,5	11	0,20	1	2320	31
2	12	0,20	2	2335	35

L'analyse de ces résultats permet de choisir un dosage optimal en adjuvant (MF.30) de 1,5% et un rapport E/C égal à 0,27. Pour chaque essai, trois éprouvettes sont préparées et nous considérons la moyenne des résultats obtenus. La composition finale de béton (5<sup>ème</sup> essai) sera donc :

Tableau 8-3  
Composition d'un BHP sans ajout

Composants	Liant	Sable	Gravier		Eau	MF.30	Mv théorique
			3/8	8/16			
Quantité en kg/m <sup>3</sup>	425	736	153	827	100	21.25	2380

#### 8.4. FORMULATION DES BETONS AVEC AJOUTS CIMENTAIRES

Le but de cette partie consiste à déterminer les compositions optimales des ajouts cimentaires, en explorant les différentes possibilités de leur insertion.

Pour cela, nous avons d'une part broyé les ajouts cimentaires en fonction de la mouture ultime de chacun, à une surface spécifique Blaine : 8 500 cm<sup>2</sup>/g pour le laitier et 9 565 cm<sup>2</sup>/g pour la pouzzolane et d'autre part nous avons fait varier leur teneur par rapport à la masse de ciment : 2.5, 5.0 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 et 20 %.

La figure (8-1) illustre la synthèse de l'évolution des résistances mécaniques à 28 jours des bétons durcis pour les différentes compositions de béton avec ajouts cimentaires. Nous notons une augmentation des résistances mécaniques, ainsi qu'une densification de la matrice pour tous les bétons avec ajouts cimentaires par rapport à celles du béton de référence dont sa résistance mécanique à 28 jours est de 42 MPa et sa masse volumique au même âge est de 2480 kg/m<sup>3</sup>.

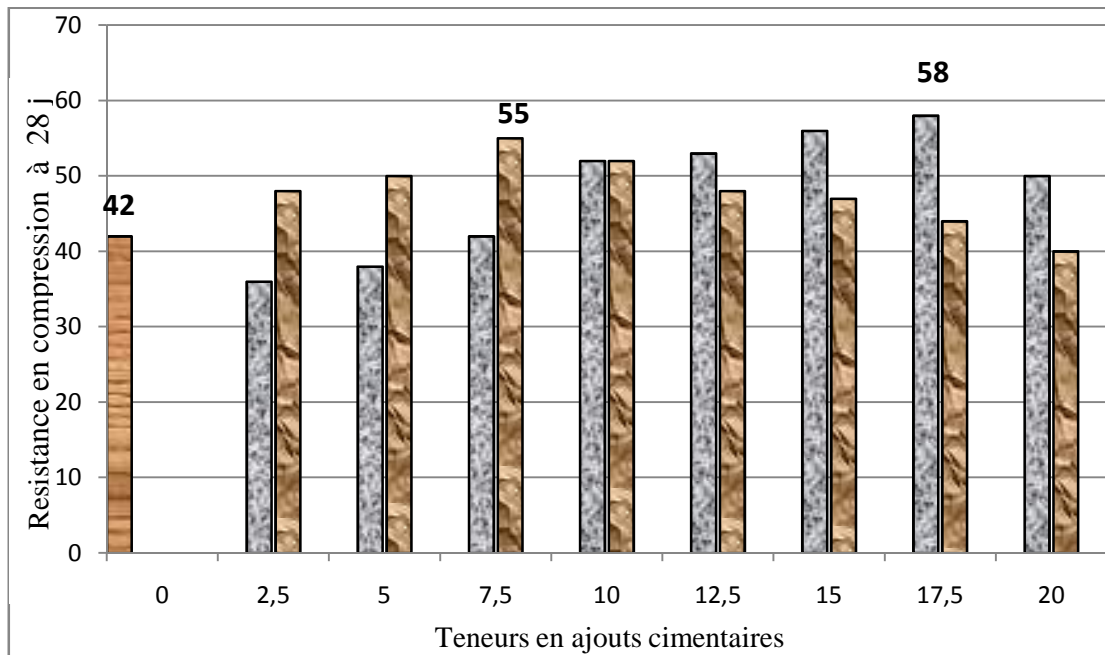


Figure 8-1 : Evolution des résistances en compression en fonction de la teneur d'ajout cimentaire.

**BR** : béton de référence.
  **BHPZ** : béton de pouzzolane.
  **BHPL** : béton de laitier.

En conséquence, l'optimum de la teneur de chacun des ajouts cimentaires donnant de meilleures résistances se situe à :

- 17,5 % pour le laitier ;
- 7,5 % pour la pouzzolane.

Les masses volumiques respectives des bétons durcis sont :

- 2 450 kg/m<sup>3</sup> pour le laitier ;
- 2 460 kg/m<sup>3</sup> pour la pouzzolane.

Ces résultats sont obtenus pour des moutures très poussées :

- pouzzolane : SSB = 9 565 cm<sup>2</sup>/g ;
- laitier : SSB = 8 500 cm<sup>2</sup>/g.

## 8.5. CONCLUSION

La méthode de Dreux Gorisse, nous a conduits à des compositions de béton satisfaisantes, présentant des gains significatifs de résistance mécanique (38 % pour le béton au laitier et 31% pour le béton de pouzzolane). La mouture poussée des ajouts cimentaires a favorisé

l'accroissement de la compacité des bétons, ce qui explique l'augmentation de leurs masses volumiques par rapport au béton de référence.

Sur le plan physico-mécanique, ces ajouts réagissent par leur finesse et par leur activité pouzzolanique, engendrant ainsi un squelette plus cohérent et par conséquent un béton plus résistant et plus durable.

Il paraît intéressant, pour terminer cette présentation, d'insister sur le fait que l'influence de la qualité des granulats et celle du ciment sont d'autant plus significatives, selon que l'on cherche à fabriquer des bétons plus performants.

Le rapport eau/liant et la teneur en adjuvant par rapport à la masse du ciment retenus pour la suite de notre étude sont respectivement 0,27 et 1,5%. Le diamètre maximal des gros granulats est 16 mm.

Une étude approfondie sera menée, pour suivre l'incidence des différents ajouts cimentaires algériens (17,5 % de laitier et 7,5 % de pouzzolane) sur les caractéristiques physico-mécaniques et structurale des bétons élaborés.

Nous allons adopter dans tout ce qui suit la même légende utilisée à savoir :

- **BR** : Béton de référence.
- **BHPL** : Béton avec ajout de laitier.
- **BHPZ** : Béton avec ajout de pouzzolane.

## CARACTERISATION DES BHP AVEC AJOUTS CIMENTAIRES LOCAUX

---

### 9.1. GENERALITES

Les essais que nous présentons dans ce chapitre, consistent à étudier les caractéristiques physiques et mécaniques des différentes compositions de béton. La procédure de malaxage pour confectionner les éprouvettes de béton est la suivante :

- 1 - Les granulats et le liant (ciment + ajout cimentaire) sont mélangés à sec dans le malaxeur pendant une minute ;
- 2 - L'eau de gâchage est ajoutée avec un tiers du volume de superplastifiant et le malaxage se poursuit pendant 2 minutes et 30 secondes ;
- 3 - Le superplastifiant restant est ajouté avec un malaxage final d'une minute.

Les éprouvettes de béton sont conservées dans leur moule en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 heures. Elles subissent ensuite, une cure appropriée selon le type d'essai :

- Pour les essais mécaniques elles sont immergées dans l'eau courante à 20° C jusqu'aux échéances fixées ;
- Pour les essais de retrait et variation de masse elles sont placées sans moyen de protection dans une salle à hygrométrie (50 ± 10 %) et température (20 ± 1 °C) contrôlées.

Pour chaque essai, trois éprouvettes sont préparées et nous considérons la moyenne des résultats obtenus.

## 9.2 ESSAIS SUR BETON FRAIS

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont:

- l'ouvrabilité (affaissement au cône d'Abrams)  $A_c$ ;
- La masse volumique  $M_v$ ;
- Le pourcentage d'air occlus déterminé par l'aéromètre  $A_o$ .

Le tableau 9-1 illustre l'influence des ajouts cimentaires sur les caractéristiques des bétons frais. Cette influence traduit les effets de la nature, la finesse, la teneur et la forme des ajouts cimentaires. Toutefois, la qualité de l'homogénéité du béton est conditionnée par l'effet du malaxage et celui de la mise en place.

Tableau 9-1  
Caractéristiques des bétons frais

Bétons	$A_c$ (cm)	$M_v$ (kg/m <sup>3</sup> )	$A_o$ (%)
<b>BR</b>	7	2360	2
<b>BHPL</b>	20	2510	1,6
<b>BHPZ</b>	18	2490	1,8

Du point de vue rhéologique, les ajouts cimentaires modifient la pâte et influent sur :

- Sa cohésion et son paramètre de frottement interne, ce dernier est diminué ;
- Sa viscosité qui est augmentée (effet lubrifiant).

Il se produit donc un changement dans le comportement rhéologique du béton. Ce comportement évolue selon la nature, l'état de surface, la finesse et la porosité des fillers ajoutés.

Nous avons observé des prises lentes pour les BHPL et les BHPZ. Nous pouvons y remédier par des accélérateurs de prise. Pour une maniabilité équivalente au BR, l'affaissement des BHPL et BHPZ doit atteindre environ 20 cm, ce qui est le cas. (D'après François de Larrard). [121]

La masse volumique ( $M_v$ ) des différents bétons avec ajouts cimentaires, est plus élevée que celle du béton de référence, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines. Le taux d'air occlus ( $A_o$ ) des bétons frais avec ajouts cimentaires, comparé à celui du béton de référence, est plus faible. L'effet de l'introduction des ajouts

cimentaires, conjugué à celui du superplastifiant, limite l'air emprisonné dans les pores et le remplissage par les ultrafines est meilleur. Les bétons ainsi élaborés, sont relativement plus denses par rapport au béton sans ajout.

### 9.3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BETONS DURCIS

Pour chaque type de béton, neuf éprouvettes cylindriques (11 x 22 cm) ont été confectionnées pour mesurer dans un premier temps, la masse volumique et la vitesse de propagation d'onde, puis procéder aux essais de compression.

#### 9.3.1 MASSE VOLUMIQUE

La figure 9-1 montre l'évolution de la masse volumique des différents bétons conservés dans l'eau courante. Nous remarquons que le béton de référence se densifie plus que les bétons contenant des ajouts cimentaires pendant les trois premiers mois. Nous notons également que, quasiment tous les bétons ont atteint leur limite de saturation et que leurs masses volumiques sont assez proches les unes des autres.

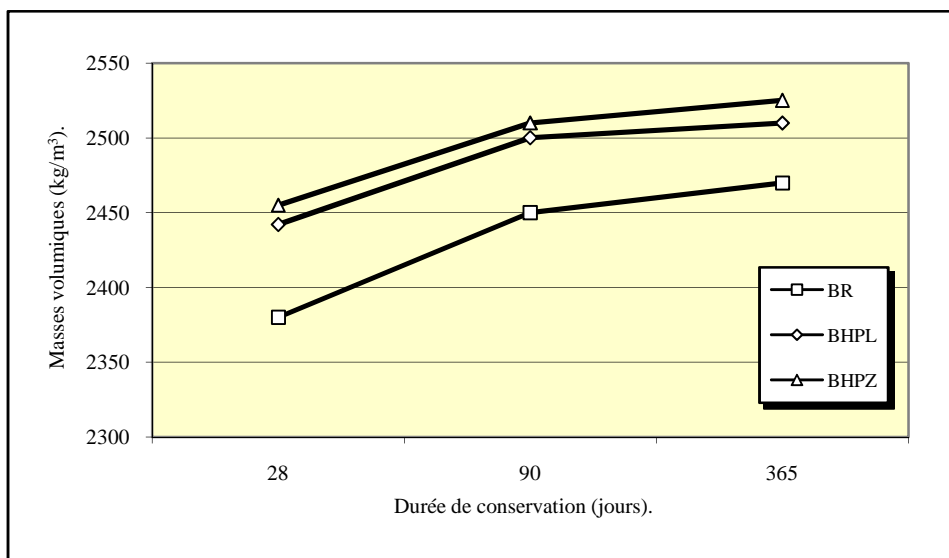


Figure 9-1 : Évolution des masses volumiques des bétons conservés dans l'eau courante en fonction de la durée de conservation.

La figure 9-2 montre l'évolution de la masse volumique des différents bétons conservés dans l'eau agressive. Nous remarquons que l'écart entre les différentes valeurs des masses des bétons est un peu plus exprimé.

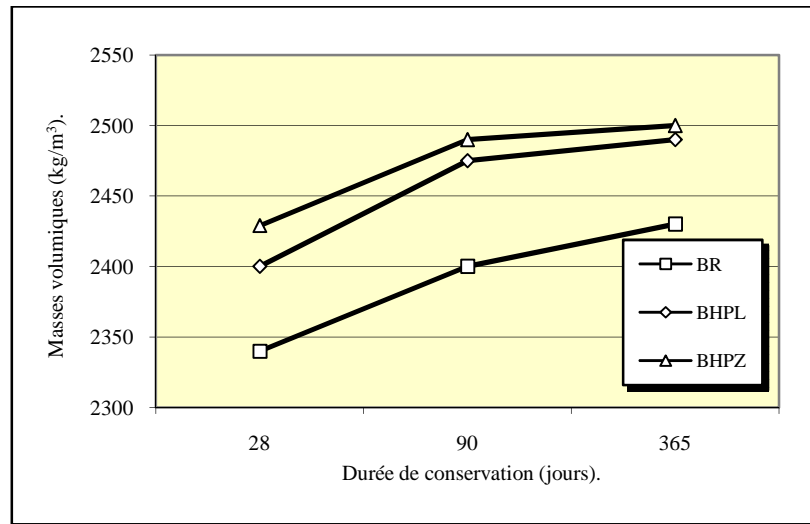


Figure 9-2 : Évolution des masses volumiques des bétons conservés dans l'eau agressive en fonction de la durée de conservation.

La mouture élevée des ajouts cimentaires, conjuguée à leur interaction avec la portlandite pour former des hydrosilicates de calcium non solubles, favorisent l'accroissement de la compacité des bétons durcis. Ce qui explique l'augmentation de leurs masses volumiques par rapport au béton de référence.

En effet, ces ajouts ayant des finesses plus grandes que celles du ciment utilisé, s'insèrent dans les vides et les pores capillaires, et densifient le squelette du béton. Cependant, cette augmentation reste relative, et dépend entre autre du mode de préparation et de mise en place des différentes compositions de béton.

Dans l'ensemble, nous remarquons que les masses volumiques des bétons durcis avec ajouts cimentaires varient dans l'intervalle 2400 à 2500 kg/m<sup>3</sup>.

### 9.3.2 VITESSE DE PROPAGATION D'ONDE SONORE

C'est un essai non destructif qui consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son dans le béton à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure et deux sondes, une émettrice et l'autre réceptrice.

La mesure est faite en transparence, cette méthode consiste à presser les deux sondes sur les deux faces opposées de l'éprouvette, dont la surface du béton est raisonnablement plane et bien nettoyée, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microseconde. La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante :

$$V = \frac{s}{t} 10^6 \quad (9-1)$$

-V : vitesse de propagation en m /sec.

-s : distance entre les sondes en (mètre).

-t : temps en micro-seconde.

La vitesse dans un béton normal est environ de 4000 à 4800 m/sec.

D'après les résultats obtenus (Figure 9-3), nous remarquons que la vitesse de propagation du son dans toutes les compositions de béton est d'autant plus grande que ce dernier est plus âgé, ce qui est en corrélation avec l'évolution de la compacité dans le temps. Un écart non négligeable est observé entre les bétons avec ajouts et de référence.

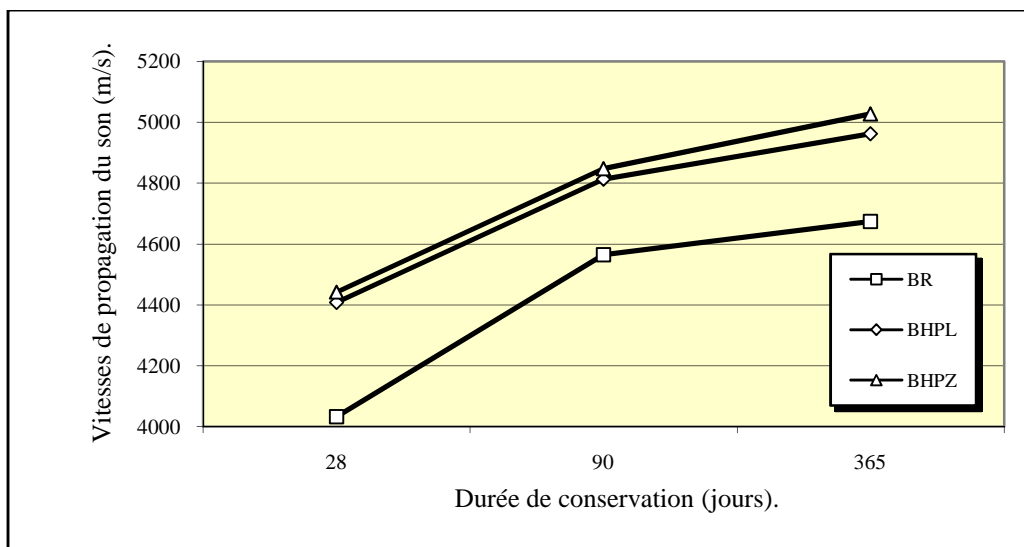


Figure 9-3 : Évolution des vitesses de propagation du son à travers les bétons conservés dans l'eau courante en fonction de la durée de conservation.

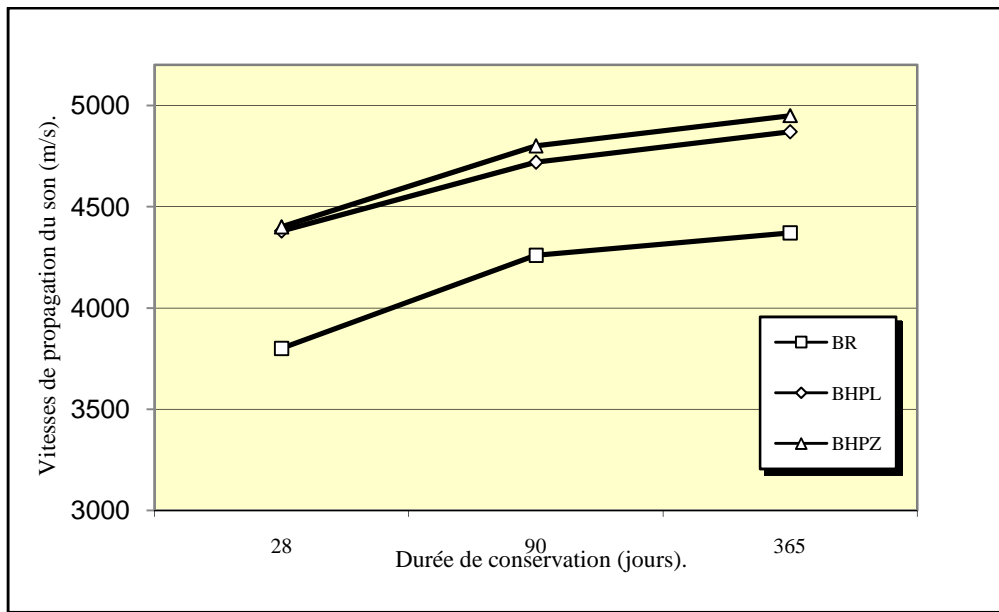


Figure 9-4: *Évolution des vitesses de propagation du son à travers les bétons conservés dans l'eau agressive en fonction de la durée de conservation.*

Nous notons aussi, que les bétons avec ajout de laitier et de pouzzolane, présentent des vitesses un peu plus élevées par rapport à celles du béton de référence. Cette augmentation peut être liée au fait que les ajouts cimentaires agissent, d'une part par leur grande finesse et d'autre part par leur activité pouzzolanique.

Ces observations sont toutefois les mêmes pour les deux types de bétons conservés dans les deux milieux : l'eau +5% NaCl et l'eau courante. L'allure des courbes représentant l'évolution de la vitesse du son dans ces cas est identique.

## 9.4. CARACTERISTIQUES MECANQUES DES BETONS DURCIS

### 9.4.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les essais de compression uniaxiale sont réalisés au moyen d'une presse hydraulique asservie (KARL KOLB Germany, de capacité 2000 kN), (fig. 9-5).



Figure 9-5: Presse hydraulique asservie (KARL KOLB Germany).

La compression simple est sans doute de toutes les caractéristiques celle qui est la plus étudiée sur le béton. La résistance à la compression est la propriété essentielle pour la réalisation des ouvrages et de ce fait, est devenue une caractéristique fondamentale, base du calcul des structures.

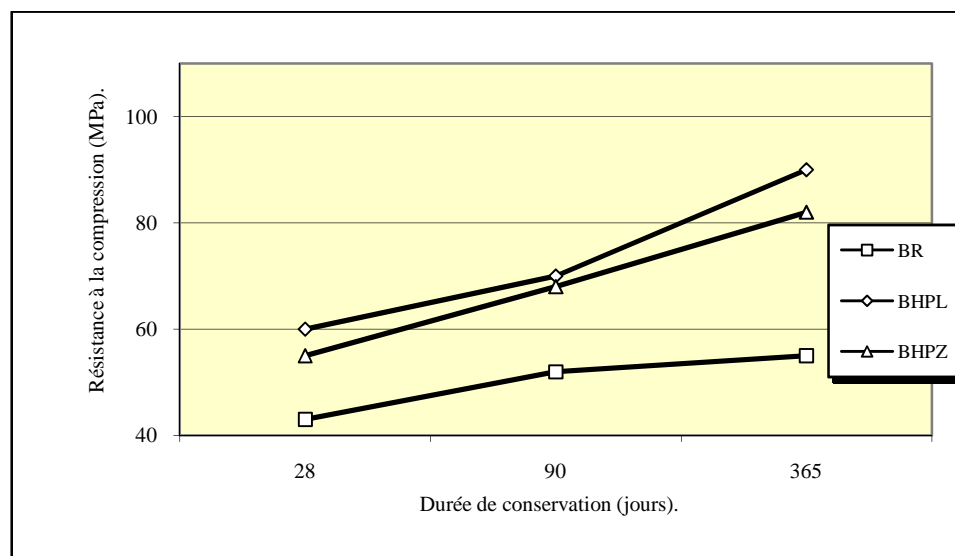


Figure 9-6: Évolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation.

La figure 9-6 montre l'augmentation de la résistance, en fonction de la durée de conservation dans l'eau courante qui est notablement plus rapide pour les bétons avec ajouts que celle du béton de référence, dont la courbe représentative tend vers une allure logarithmique. Les contraintes atteintes pour les bétons avec ajouts sont comprises entre 80 et 90 MPa.

#### 9.4.2. RESISTANCE A LA FLEXION

Les essais de flexion sont réalisés à l'âge de 90 jours sur des éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28 cm), au moyen d'une machine universelle asservie (Controlab, de capacité 160 kN) ; sa mise en marche s'effectue avec une vitesse de chargement constante de 0,5 MPa par seconde (fig. 9-7).

La résistance à la traction (par flexion) en MPa, correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{2,7P}{a^2} \quad (9.2)$$

- P : charge appliquée (kN).
- a : coté de l'éprouvette (cm).



Figure 9-7: Portique universelle asservie (Controlab)

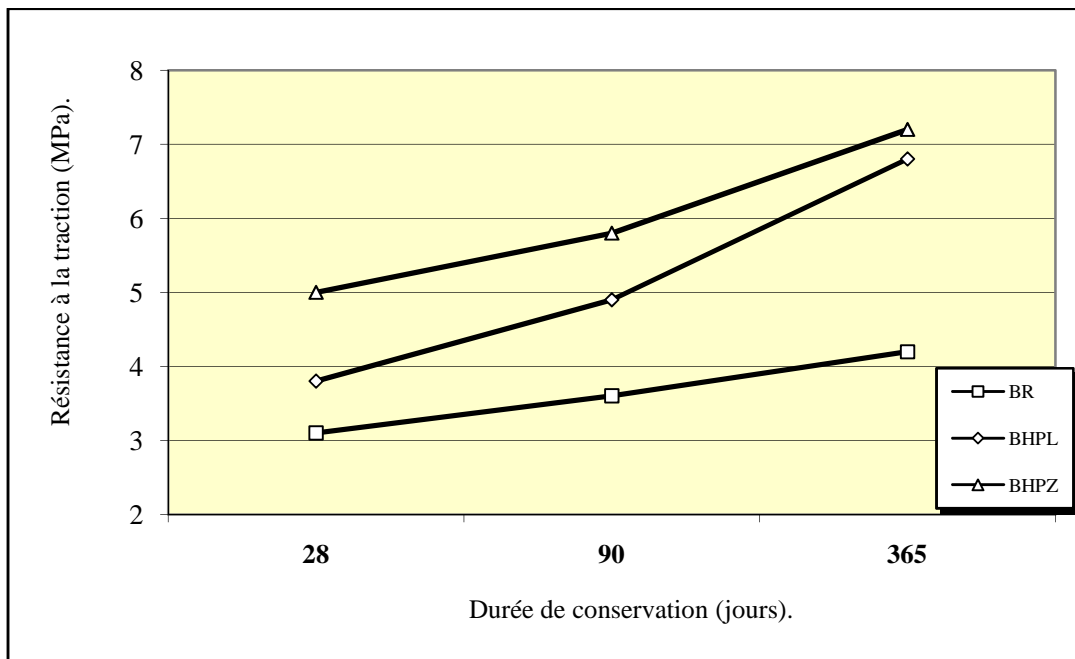


Figure 9-8: *Évolution des résistances à la traction par flexion en fonction de la durée de conservation.*

Le développement des résistances à la traction par flexion est encore plus rapide que celui des résistances en compression. La densification de la matrice et l'évolution de l'interface pâte-granulat sont à l'origine de l'amélioration de la résistance en flexion.

La résistance à la flexion est réputée être la sollicitation dépendant le plus des variations de l'adhérence pâte-granulats. Nous pouvons donc par un essai de traction indirecte par flexion nous rendre compte des différences d'adhérence qu'entraînent les ajouts cimentaires.

La figure 9-8 montre les contraintes de flexion des différents bétons, pour des éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28 cm) conservées dans l'eau courante. On note des contraintes de flexion plus développées pour les bétons avec ajouts (6,8 à 7,2 MPa) que pour le béton de référence (4,2 MPa).

### 9.5. RETRAIT

Les essais de retrait ont été réalisés sur des éprouvettes (7 x 7 x 28 cm) démoulées à 24 heures et laissées sécher dans une salle à hygrométrie ( $50 \pm 10 \%$ ) et température ( $20 \pm 1$  °C) contrôlées (fig. 9-9).



Figure 9-9: Essai de retrait

Le retrait total des bétons avec ajouts cimentaires, mesuré sur éprouvettes 7 x 7 x 28 cm, est plus faible que celui mesuré sur celles de béton de référence (fig. 9-10). Ce fait est dû en particulier à la grande finesse de cet ajout, qui avantage la densification dès les premières échéances et diminue par conséquent le retrait.

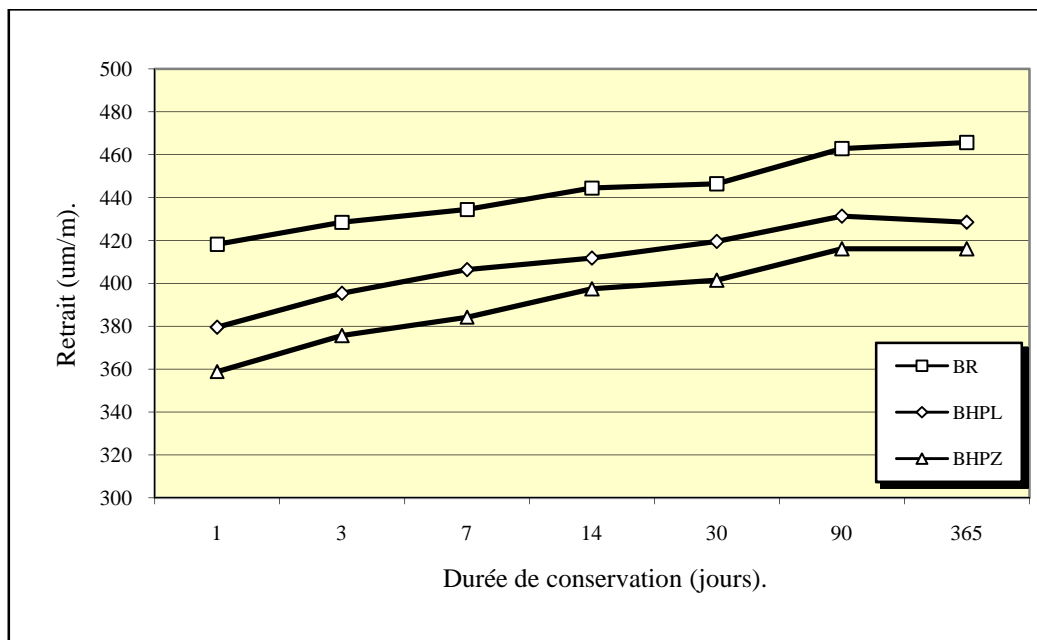


Figure 9-10: Évolution des retraits des différents bétons.

## 9.6. CONCLUSION

Grâce à l'ajout des ultrafines et l'utilisation de superplastifiant, nous avons obtenu des bétons de bonne ouvrabilité et de résistance en compression à 12 mois égale à 90 MPa.

L'influence des ajouts cimentaires dépend en outre des conditions d'essai mais aussi, bien sûr, de leur granulométrie et de leur pouzzolanité.

L'ajout d'ultrafines a entraîné une amélioration relative des performances :

- La mouture élevée des ajouts cimentaires, conjuguée à leur interaction avec la portlandite, a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, phénomène visualisé par l'augmentation de la vitesse de propagation du son. Ce qui explique l'augmentation de leurs masses volumiques par rapport au béton de référence.
- L'adhérence pâte-granulats est améliorée dans les bétons avec ajout, ce qui se traduit par un accroissement de la résistance à traction par flexion.
- Les bétons avec ajouts cimentaires présentent des déformations aux retraits plus faibles par comparaison avec le béton de référence.

## **DURABILITE DES BHP AVEC AJOUTS CIMENTAIRES LOCAUX**

---

### **10.1 GENERALITES**

Les essais que nous entreprenons dans cette partie, consistent à suivre le comportement à long terme des différentes compositions de béton, conservés dans un milieu agressif (eau +5% NaCl).

Dans ce chapitre, nous nous limitons aux résultats des travaux réalisés au Laboratoire bâti dans l'environnement (LBE) de la faculté de génie civil de l'université de Bab Ezzouar et au Laboratoire Matériaux et Durabilité de Construction (LMDC) de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA-Toulouse).

Les différents échantillons préparés, sont conservés en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 h. Ils sont ensuite mis dans des bains de conservation. La durée de conservation a été fixée à 28 jours, 3 mois, 6 mois et 1 an.

La durabilité des bétons dans le milieu agressif est évaluée par l'évolution de la résistance mécanique, de la diffusivité, de la sorptivité et de la perméabilité. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques.

L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion d'agents agressifs est caractérisée par deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. Ces deux paramètres sont considérés comme des « indicateurs de durabilité ».

Après avoir maîtrisé les paramètres d'essai et s'être assuré de la capacité du phénomène de perméabilité à caractériser les matériaux, nous avons comparé les deux méthodes de mesure utilisées c'est à dire la méthode LMDC et la méthode LBE.

L'objectif de cette évaluation est de proposer une méthode optimisée.

L'évolution des différentes phases cristallines présentes dans le béton ou nouvellement formées dans le milieu agressif est suivie par diffraction X(DRX). Le diffractomètre utilisé est de type Siemens D5000 muni d'un monochromateur arrière ainsi que de fentes Soller arrières et utilisant une anticathode de cobalt. La durée du programme d'analyse est de 2 heures. Les échantillons sont préalablement broyés à une granulométrie inférieure à 80 $\mu$ m avant l'essai.

Pour confirmer les résultats obtenus par l'essai de DRX, nous avons procédé à des observations au microscope. L'appareil utilisé est un microscope électronique à balayage de type JEOL JSM-6380, destiné à l'observation d'échantillons secs et conducteurs et à l'analyse par un spectromètre de dispersion d'énergie OXFORD Link Isis et couplé à une microanalyse.

## 10.2. ÉVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES

L'expression *durabilité du béton* est généralement utilisée pour caractériser de façon générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique. La nature, l'intensité et les mécanismes concernés dans chacun des cas et les différents impacts peuvent varier considérablement. C'est pourquoi il vaut mieux parler des durabilités du béton plutôt que de la durabilité du béton [123].

L'évolution des résistances mécaniques des éprouvettes de béton conservées dans l'eau séléniteuse suivie pendant un an, est représentée sur la figure 10-1.

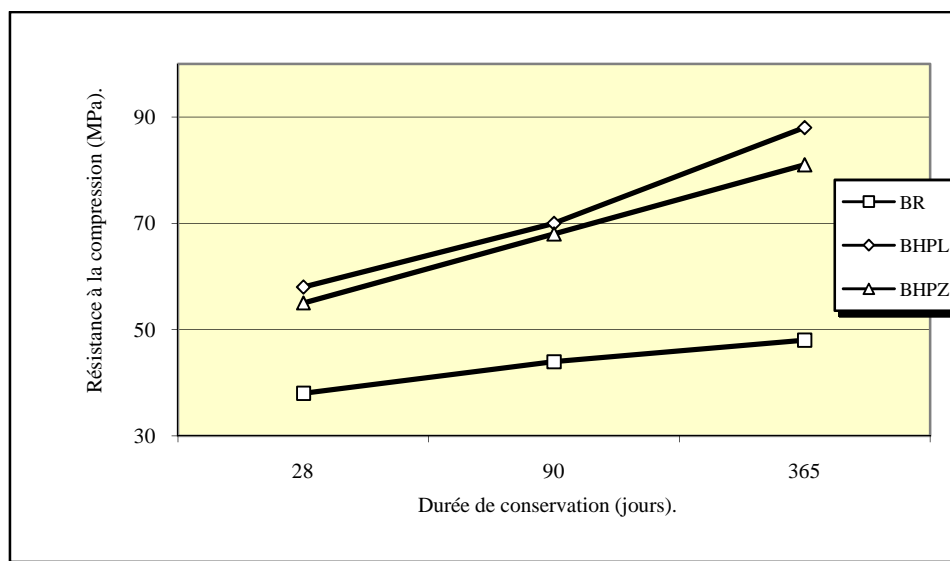


Figure 10-1 : Évolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation pour les éprouvettes conservées dans l'eau agressive.

Nous notons que les résistances en compression de tous les bétons avec ajouts cimentaires sont toutes supérieures au béton de référence. Nous avons donc affaire à des bétons de hautes performances. Cette qualité n'est en rien affectée par le milieu environnant.

En général, il faut retenir qu'après 12 mois de conservation dans des milieux contenant 5% de NaCl, il y a très peu d'interaction entre les ions chlore et les produits d'hydratation du ciment de rapport eau / liant faible ( $E/L = 0,27$ ). Les ions chlore restent cependant mobiles, mais ils ne réagissent que très peu avec les aluminates du ciment pour former des chloroaluminates.

La perte relative des résistances des BR est conséquente tandis que pour les BHPZ et les BHPL est négligeable. Ceci s'explique par la contribution positive du laitier et de la pouzzolane sur la formation des C.S.H qui procurent aux bétons une densification et une imperméabilisation élevées.

Donc l'augmentation de la résistance est remarquable après 28 jours, suite à la propriété pouzzolanique de ces ajouts qui en présence de  $\text{Ca(OH)}_2$  et de l'eau donne naissance à de nouvelles formations de silicates de calcium hydratés et d'aluminates de calcium hydratés possédants des propriétés liantes analogues à celles formées à base de minéraux de ciment.

### 10.3. PERMEABILITE AUX IONS CHLORE

Les résultats de la perméabilité aux ions chlore des différents types de bétons dans les deux milieux (milieu1 : eau potable, milieu2 : eau séléniteuse) portent sur :

- La variation de l'intensité  $I$  (ampère) du courant en fonction du temps.
- La charge électrique  $Q$  (coulomb) qui a traversé l'échantillon au terme de l'essai (6 heures).



Figure 10-2 : Essai de perméabilité aux ions chlore.

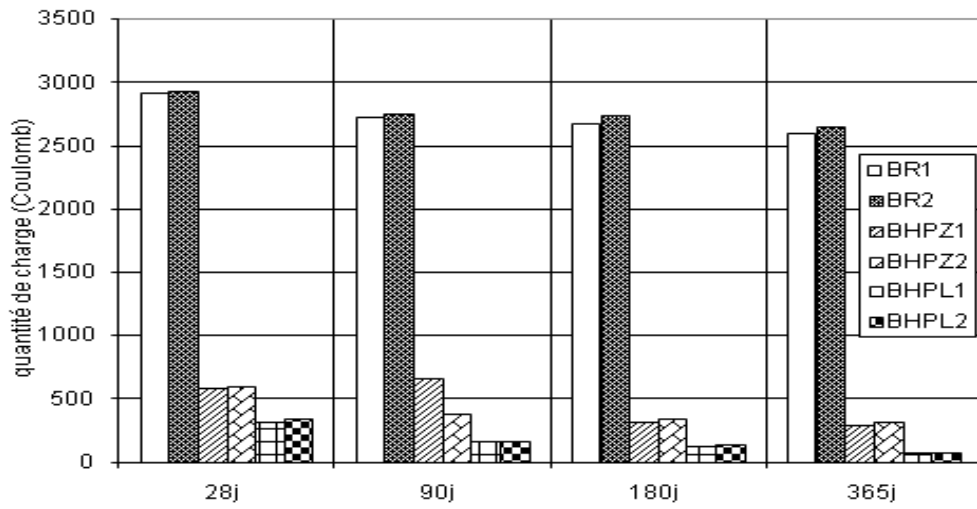


Figure 10-3: Variation de la charge du courant électrique à différents âges

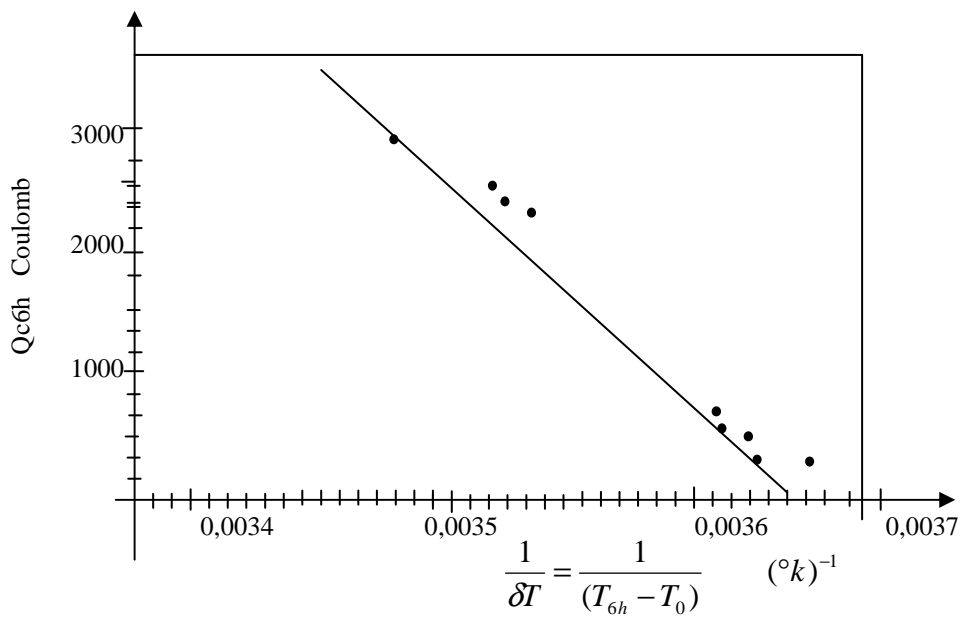


Figure 10-4: Relation entre la charge électrique et la différence de température à 6 h.

Les résultats des essais de perméabilité aux ions chlore sur les différents types de bétons à différents âges ont montré que la diminution du rapport eau-liant permet de réduire de façon considérable, tant la pénétration des ions chlorures que la charge électrique véhiculée à travers l'échantillon.

Ces résultats montrent que les valeurs de l'intensité du courant et de la charge électrique pour les BHPL et les BHPZ sont trop réduites. Evidemment, cette réduction se précise plus encore lorsque l'âge du béton à l'essai est avancé compte tenu de la réactivité pouzzolanique de l'ajout qui réduit la quantité de chaux hydratée dans la matrice cimentaire.

Cette diminution est reliée au colmatage des pores des BHP et au faible rapport  $\text{CaO/SiO}_2$  du C-S-H dans les pâtes contenant l'ajout cimentaire naturelle, puisque les ions de sodium ( $\text{Na}^+$ ) et de potassium ( $\text{K}^+$ ) tendent à être inclus dans ces gels (C-S-H) à faible teneur en calcium. Ce phénomène réduit la quantité d'alcalis dans la solution d'eau interstitielle ainsi que la conductivité électrique [124], donc augmentation de la résistivité électrique du béton. Lorsque le ciment est substitué par 7,5 % de pouzzolane et par 17,5% de laitier finement broyés, la quantité de charge passée est 12% et 6% de celle du béton de référence, pour les différents âges respectifs avec un rapport  $E/L = 0,27$ .

Feng et al [125] ont utilisé 10% de fumée de silice avec un rapport  $E/L = 0,42$ , ils ont trouvé que la quantité de charge électrique passée est 13% de celle du béton de contrôle. Wee et al [126] ont trouvé que la quantité de charge passée d'un béton contenant 10% fumée de silices avec un  $E/L = 0,5$  est 37% de celle du béton de contrôle.

Feng et al [125] ont trouvé une réduction de la charge passée de 31% en utilisant 15% de Zéolite naturelle pour  $E/L$  égal à 0,42.

Taghni Hammou et al [127] ont utilisé un béton contenant 30% de terre diatomée avec un  $E/L=0,40$  à l'âge de 28 jours, ils ont trouvé une réduction de charge passée de 62% par rapport au béton de contrôle.

Nous avons remarqué que le gradient thermique du BR à la fin de l'essai est élevé, tandis que celui du BHP est assez réduit. Ce résultat se rapproche à deux travaux de G.A Juliot-Betancourt et R.D. Hooton [128]

Cet essai a montré une plus grande résistance des bétons à haute performance à la perméabilité aux ions chlore dans un milieu agressif. Ceci confirme la contribution de la pouzzolane et du laitier face à la corrosion des BHP dans un milieu chlorhydrique.

#### 10.4. LA SORPTIVITE DES BETONS

Les essais ont été réalisés à l'âge de 28,90,180 et 365 jours.



Figure 10-5: -Essai de sorptivité

Les résultats de la sorptivité des différentes compositions de bétons dans les deux milieux et à différents âges sont reportés dans le tableau 10-1.

Tableau 10-1  
Sorptivité des bétons à différents âges ( $cm / min^{0,5} \cdot 10^{-3}$ )

Code spécimen	Milieux	Durée de conservation en jours			
		28	90	180	365
BR	1	9,48	8,63	8,22	8,07
	2	13,54	10,74	10,16	10,03
BHPZ	1	3,06	2,75	2,55	2,38
	2	5,23	3,97	3,09	2,63
BHPL	1	3,17	2,15	2,08	1,78
	2	5,30	3,67	2,79	1,86

L'essai montre l'influence du rapport E/L sur la sorptivité des BHP à différents âges relativement au béton de référence. Nous remarquons que la pouzzolane naturelle et le laitier réduisent la sorptivité des bétons en fonction de l'âge. L'incorporation de ces ajouts est très avantageuse ; ils permettent une réduction de la sorptivité de 78% à 77% à l'âge d'une année respectivement dans les milieux 1 et 2.

Dans ce cas, les pores capillaires dans la pâte du ciment durci, sont réduits par la formation des gels de C-S-H.

Plusieurs recherches ont montré l'efficacité des ajouts minéraux sur la sorptivité des bétons et mortiers [129, 130, 131].

## **10.5. PERMEABILITE A L'OXYGENE (UNE METHODE OPTIMISEE DE LA MESURE DE PERMEABILITE)**

### **10.5.1. INTRODUCTION**

Après avoir maîtrisé les paramètres d'essai et s'être assuré de la capacité du phénomène de perméabilité à caractériser les matériaux, nous avons comparé les deux méthodes de mesure utilisées c'est-à-dire celle utilisée par l' LMDC et par l' LBE.

L'objectif de cette évaluation est de proposer une méthode optimisée.

Dans un premier temps nous récapitulons les qualités qui nous paraissent nécessaires pour une procédure de mesure de perméabilité :

- Qu'elle soit pratique c'est-à-dire rapide et simple à réaliser ;
- Qu'elle soit capable de discriminer deux matériaux ;
- Qu'elle fournisse la plupart des informations concernant la perméation ;
- Qu'elle puisse être représentative des conditions réelles entourant la vie d'une structure ;
- Qu'elle ne modifie pas la structure poreuse de manière importante.

Le perméamètre à charge constante a été conçu et réalisé au laboratoire bâti dans l'environnement LBE de la faculté de génie civil (FGC).

### **10.5.2 OBJET DE LA MESURE ET DOMAINE D'APPLICATION**

L'essai de perméabilité à l'oxygène décrit ici est réalisé avec un perméamètre à charge constante. L'essai a pour objet de mesurer la perméabilité du béton durci (en  $m^2$ ) à l'air, à l'oxygène ou à l'azote (suivant le type de gaz choisi pour alimenter le dispositif expérimental) de corps d'épreuve en béton durci. Le gaz le plus couramment utilisé pour la mesure de la perméabilité est l'oxygène. Il s'agit d'une méthode de laboratoire, applicable aux éprouvettes moulées et aux carottes issues d'ouvrages. Il est possible de mesurer avec cet appareil des valeurs de perméabilité comprises entre  $10^{-15}$  et  $10^{-20} m^2$ . Cette méthode s'applique donc à la plupart des bétons ordinaires et des bétons à hautes performances.

Les matériaux cimentaires étudiés doivent atteindre un certain degré d'hydratation (théoriquement supérieure à 70 % tel que l'évolution de la microstructure soit insignifiante vis-à-vis des propriétés de transfert. Pour notre étude, les éprouvettes de béton ont subi une

cure dans le bac thermostatique (température :  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ , humidité : 100 % HR), durant au moins 28 jours.

### 10.5.3 PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai consiste à soumettre le corps d'épreuve à une pression constante d'oxygène. La perméabilité apparente ( $k_a$ ), en  $\text{m}^2$ , est alors déterminée à partir de la mesure de flux d'oxygène ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), en régime permanent, avec hypothèse d'un flux laminaire, à une pression donnée. Etant donné que les gaz sont compressibles, la pression ( $P$ :pression d'admission) à laquelle le débit ( $Q$ ) est mesuré, doit être prise en compte en plus de la pression de sortie  $P_{\text{atm}}$ (pression atmosphérique) ; toutes les pressions sont des valeurs absolues exprimées en  $\text{N}/\text{m}^2$ . Le coefficient de perméabilité apparente ( $K_a$ ), exprimé en  $\text{m}^2$ , est :

$$K_a = \frac{2QP_{\text{atm}}L\mu}{(P^2 - P_{\text{atm}}^2)A} \quad (10-1)$$

Dans le cas présent  $A = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\pi h R dR}{L}$  et  $L=R_2-R_1$  , voir figure 10-6.

$$K_a = \frac{2QP_{\text{atm}}L\mu}{(P^2 - P_{\text{atm}}^2) \frac{\pi \cdot h (R_2^2 - R_1^2)}{L}} \quad (10-2)$$

$$K_a = \frac{2QP_{\text{atm}}(R_2 - R_1)^2 \mu}{(P^2 - P_{\text{atm}}^2) \pi \cdot h (R_2 - R_1)(R_2 + R_1)} \quad (10-3)$$

$$K_a = \frac{2QP_{\text{atm}}(R_2 - R_1) \mu}{(P^2 - P_{\text{atm}}^2) \pi \cdot h (R_2 + R_1)} \quad (10-4)$$

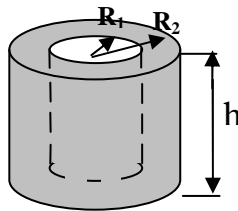


Figure 10-6: *Eprouvette cylindrique*

Où :

- $h$  : hauteur de l'éprouvette en m;
- $A$  : section de l'éprouvette en  $\text{m}^2$ ;
- $L=R_2-R_1$  : son épaisseur en  $\text{m}^2$ ;
- $\mu$  : viscosité dynamique en  $\text{Ns}/\text{m}^2$ .

Pour l'oxygène, à 20°C  $\mu = 20,2 \cdot 10^{-6} \text{Ns/m}^2$ .

La perméabilité intrinsèque ( $k_i$ ) est définie par Klinkenberg comme l'ordonnée à l'origine de la droite reliant la perméabilité et l'inverse de la pression moyenne  $P_{\text{moy}}$ , avec  $P_{\text{moy}} = (P_{\text{atm}} + P)/2$  et  $k_a = k_i(1 + \beta/P_{\text{moy}})$ ,  $\beta k_i$  est la pente de la droite de Klinkenberg et  $\beta$  la constante de Klinkenberg [20,21]. Pour obtenir la perméabilité intrinsèque, les mesures de la perméabilité ont été réalisées dans cette étude, à trois pressions d'admissions différentes comprises entre 0,2 et 0,6 MPa.

Le but de la méthode de Klinkenberg est de séparer dans la perméabilité aux gaz mesurée, la part liée à un écoulement visqueux du fluide qui correspond à la perméabilité intrinsèque définie par Darcy pour les fluides incompressibles, de la part liée à un écoulement par glissement, écoulement propre aux gaz défini par Klinkenberg. Ce dernier fait tendre l'inverse de la pression de mesure vers l'infini pour obtenir la perméabilité intrinsèque, indépendante de la nature du fluide.

#### 10.5.4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La présente recherche concerne un perméamètre destiné à mesurer la perméabilité aux gaz de matières poreuses pouvant se présenter sous la forme d'un cylindre creux (Fig.10-7 et 10-8). Elle s'applique en particulier, mais non exclusivement, à la mesure de la perméabilité aux gaz de spécimens en béton durci.



Figure 10-7: *Perméamètre-vue d'ensemble*



Figure 10-8: *-cellule-épreuve*

La figure 10-9 est le schéma théorique du perméamètre à charge constante permettant une mesure rapide et précise de la perméabilité du spécimen.

Dans cet exemple le perméamètre comprend une bouteille d'alimentation en gaz (1) munie d'un manomètre (2). Ce dernier est raccordée à un régulateur de pression (0,1 à 1 MPa) (3) pouvant maintenir le niveau de pression avec une tolérance de  $\pm 0,01$  MPa. La cellule (4) est raccordée en série avec le régulateur par un flexible et au débitmètre (5) qui est muni d'une poire (6), par un conduit.

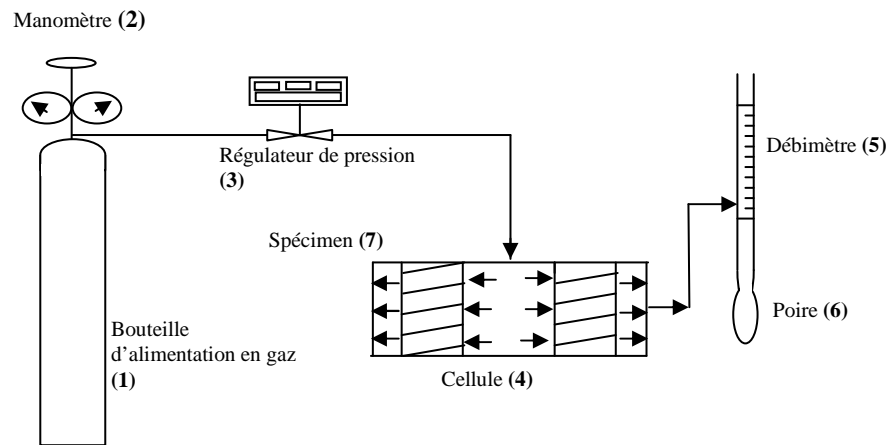


Figure 10-9: Schéma théorique du perméamètre

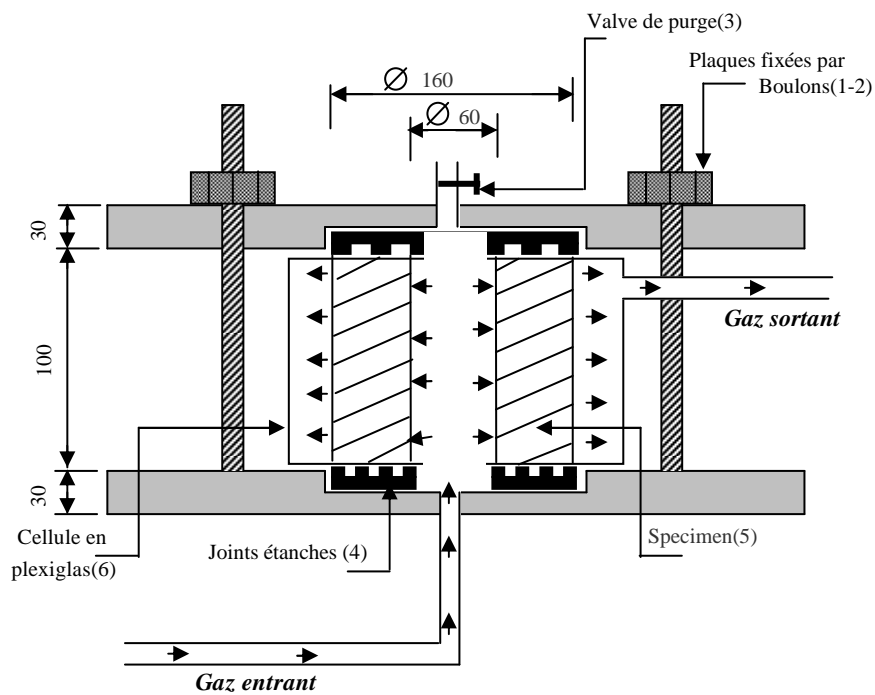


Figure 10-10: coupe de la cellule

La figure 10.10 représente la coupe de la cellule, comprenant deux plaques cylindriques (1,2) de même diamètre, l'une mobile par rapport à l'autre et pouvant être disposées coaxialement l'une vis-à-vis de l'autre pour venir en butée l'une contre l'autre en serrant l'éprouvette dont on veut mesurer la perméabilité.

La plaque supérieure est munie d'une valve (3) afin d'évacuer l'air occlus dans le creux du spécimen. Ces plaques sont revêtues d'une garniture (4) permettant de garantir une bonne étanchéité entre les deux parties (1,2) et le corps d'épreuve (5).

La partie (5) est entourée d'une couronne en plexiglas (6) hermétiquement fermée et communique latéralement par conduit au débitmètre à bulles de savon de telle sorte que tout est sollicité à la pression atmosphérique.

Le débitmètre comprend une poire élastique (6) (fig.10-7) contenant de l'eau savonneuse. En exerçant une pression sur la poire, une bulle surgit, entraînée par le flux de gaz sortant et en parcourant le tube gradué, permettant ainsi de mesurer le débit de gaz.

L'appareil permet de réaliser des essais à des pressions d'entrée comprises entre 0,2 et 0,6 MPa.

La percolation du gaz à travers l'échantillon est maintenue sous l'effet du gradient de pression. La pression d'entrée d'oxygène est appliquée à l'intérieur de l'éprouvette creuse tandis que l'extérieur est sollicité à la pression de sortie (pression atmosphérique).

L'efficacité du système d'étanchéité a été testée à la pression de 0,8 MPa à l'aide d'une éprouvette enduite complètement d'une couche de peinture époxydique. Cette précaution assure l'étanchéité des cellules.

Dans le cas de la percolation d'un gaz à travers un échantillon de matériau poreux, la première condition est d'utiliser un gaz inerte vis-à-vis de la structure poreuse. L'air humide pose donc des problèmes ainsi que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), en raison de son interaction avec les composés de la pâte de ciment hydratée (carbonatation notamment).

Les fluides les plus utilisés sont l'azote ( $\text{N}_2$ ) et l'oxygène ( $\text{O}_2$ ). Dans le cadre de cette recherche, l'oxygène est utilisé comme fluide de percolation pour toutes les mesures de perméabilité au gaz.

### 10.5.5 EXPLOITATION DES RESULTATS ET EXEMPLE D'UTILISATION DE L'ESSAI

Etant donné que la perméabilité aux gaz est considérée comme un indicateur de durabilité, l'essai décrit ici peut être pratiqué dans le cadre de toutes études et recherches relatives à la durabilité des bétons, ainsi que pour des expertises. Les différents travaux menés dans le cadre de la recherche scientifique ont notamment fourni de nombreux résultats expérimentaux en la matière.

Le tableau 10-2 présente, à titre d'exemple, quelques résultats de la perméabilité apparente obtenus sur deux types de bétons à différents âges et pour des conservations dans deux milieux différents (milieu1 : eau potable ; milieu2 : eau agressive). Chaque valeur représente la moyenne de neuf essais.

Tableau 10-2  
Coefficients de perméabilité à l'oxygène ( $10^{-18} m^2$ ) à 0,2MPa.

Code spécimen	Milieux	Durée de conservation en jours			
		28	90	180	365
BR	1	308	279	244	218
	2	351	330	318	316
BHPZ	1	97	81	78	37
	2	112	96	87	46

L'existence d'une relation unique entre perméabilité et résistance à la compression pour toute la gamme des bétons est peu probable. La perméabilité dépend d'une partie de la porosité communicante, de la taille des pores, de leur connectivité et tortuosité c'est-à-dire de caractéristiques de l'espace poreux. La perméabilité et la résistance à la compression peuvent ou non varier indépendamment l'une de l'autre. Les relations rencontrées dans la littérature peuvent être interprétés comme une tendance générale qui accepte des écarts [20].

La figure 6 présente quelques résultats de perméabilité ( $k_a$ ) en fonction du taux de saturation nulle de l'éprouvette testée, obtenus sur différents types de béton à différents âges.

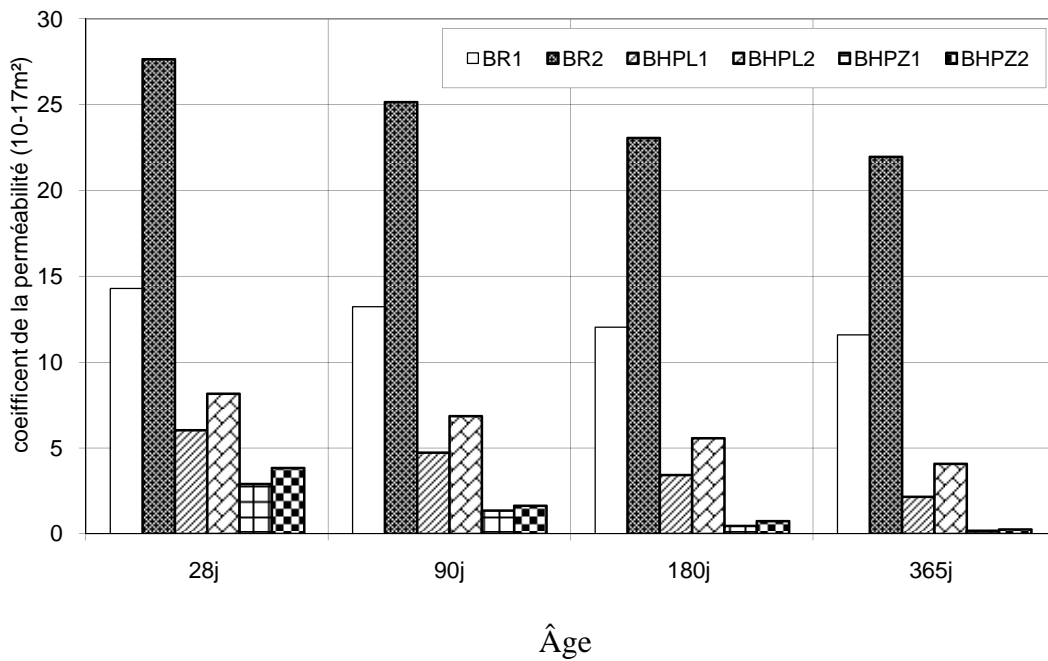


Figure 10-11: Variation de la perméabilité à l'oxygène des bétons

Tableau 10-3 présente les résultats de la perméabilité apparente et intrinsèque de deux types de bétons obtenus par la méthode LBE et la méthode Cembureau (LMDC).

Les résultats à partir de la procédure expérimentale confirment que le coefficient  $k_a$  diminue lorsque la pression d'entrée augmente.

Tableau 10-3  
Perméabilité aux gaz de deux types de bétons à l'âge de six mois

Spécimen code	P(entrée) (MPa)	P(sortie) (MPa)	$K_a$ ( $10^{-18}m^2$ )	$k_i$ ( $10^{-18}m^2$ )	$k_{i\ C.m}$ ( $10^{-18}m^2$ )
B50	0,2	0,1	244	210	203
	0,3	0,1	235		
	0,5	0,1	227		
B80	0,2	0,1	78	53	51
	0,3	0,1	73		
	0,5	0,1	68		

Les résultats sont semblables à ceux déterminés par la méthode Cembureau [132].

La figure 10-12 illustre, pour deux bétons différents (BR1 ET BHPZ1), la détermination de la perméabilité intrinsèque obtenue par la présente méthode et par celle de Cembureau.

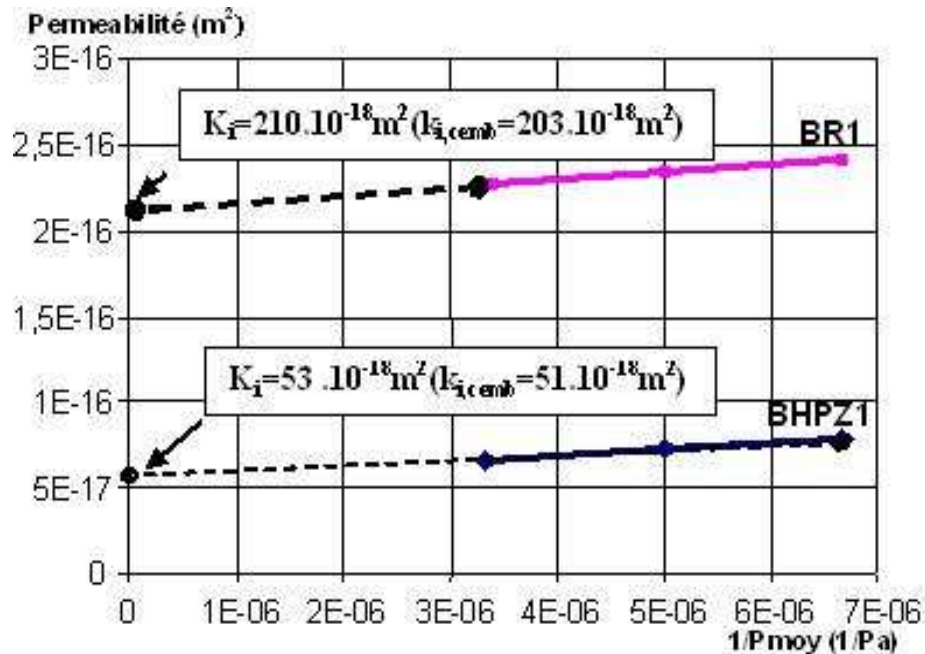


Figure 10-12: Perméabilité intrinsèque de deux types de bétons âgés de six mois.

$k_{i,cemb}$  : Coefficient de perméabilité intrinsèque déterminé par la méthode Cembureau (LMDC).

$K_i$  : Coefficient de perméabilité intrinsèque déterminé par la nouvelle méthode (LBE).

La figure 10-12 montre la détermination de la perméabilité intrinsèque par la méthode de Klinkenberg pour deux types de bétons après séchage à 105 °C.

Les résultats de cette étude, confirme la proportionnalité entre la perméabilité apparente ( $K_a$ ) et l'inverse de la pression moyenne ( $1/P_{moy}$ ).

La corrélation linéaire est très bonne ( $R^2_{BR1} = 0,998$  et  $R^2_{BHPZ1} = 0,995$ ).

La perméabilité intrinsèque est alors obtenue par extrapolation linéaire des valeurs de perméabilité apparente à l'infini des pressions moyennes inverses ( $1/P_{moy} = 0$ ).

Les résultats de la perméabilité obtenus par cette méthode sont similaires à ceux déterminés par la méthode Cembureau.

### 10.5.6 CONCLUSIONS

- L'appareil est caractérisé en ce que la source de la pression d'entrée de gaz au niveau de la cellule est exercée sur la face du creux de l'éprouvette cylindrique en utilisant qu'une source d'alimentation.
- L'appareil est caractérisé par le fait que l'enceinte de la cellule qui est en matière plastique, est sollicitée uniquement par la pression atmosphérique qui présente la pression de sortie, ce qui élimine les risques de d'explosion de la cellule.
- l'appareil est caractérisé par le fait que l'air emprisonné dans le creux de l'éprouvette est évacué par la valve incorporée dans la plaque supérieure de la cellule.
- La forme de l'éprouvette reflète les cas réels où la perméabilité joue un rôle important dans la durabilité et la sécurité des ouvrages, par exemple une centrale nucléaire ou une enceinte de stockage des déchets radioactifs.
- L'ordre de grandeur de la perméabilité (à l'oxygène) des bétons étudiés se rapproche des résultats obtenus par la méthode Cembureau.
- L'essai montre que le coefficient de perméabilité à l'oxygène des bétons de référence (béton ordinaire) est largement plus élevé que celui des bétons à hautes performances, cela est dû à l'amélioration des caractéristiques microstructurales de la pâte de ciment par les ajouts pouzzolaniques employés et à la consolidation de la zone de transition entre pâte et granulats.
- La perméabilité est fortement influencée par les paramètres de compositions (les différents types de béton), par la durée de cure et par les conditions de conservation (milieu agressif et non agressif).
- L'action pouzzolanique de la pouzzolane et du laitier contribue efficacement à la réduction de la perméabilité à l'oxygène des bétons et par voie de conséquence améliore leur durabilité.
- Les essais de durabilité de ces bétons, dans différents milieux, eau courante et eau séléniteuse, montrent la contribution positive des ajouts cimentaires sur les performances mécaniques et sur les paramètres de durabilité.

## 10.6 CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE

L'observation au MEB nous a permis d'examiner la microstructure des hydrates formés au sein des bétons au bout de 365 jours de durcissement. Une microstructure relativement améliorée dans les bétons avec ajouts a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées et riches en CSH, caractéristiques des BHP.

Ces observations couplées à une micro analyse globale et focalisées sur les différentes formations cristallines, nous permettent de les distinguer entre elles (figure 10-13) :

- Les C-S-H.
- Les composées de  $C_xS_yA_vH_z$  sur les photos au MEB.
- La portlandite  $Ca(OH)_2$ .
- L'ettringite  $C_3A.3CaSO_4.31H_2O$  sur les photos au MEB .

Les figures 10-13 et 10-14 illustrent la forme des différentes cristallisations observées au MEB. Pour le laitier et la pouzzolane les CSH se présentent sous forme d'amas hérissés ou dense lorsqu'ils sont mal cristallisés (ordre bidimensionnel de la maille élémentaire). La portlandite  $Ca(OH)_2$  se présente sous forme lamellaire. Les baguettes ou fibres concentrées surtout dans les pores et composées de Ca, Si, Al et S, ce qui correspond bien à la composition chimique de l'ettringite (E), laquelle se présente sous forme d'aiguilles, très fines ou discrètes.

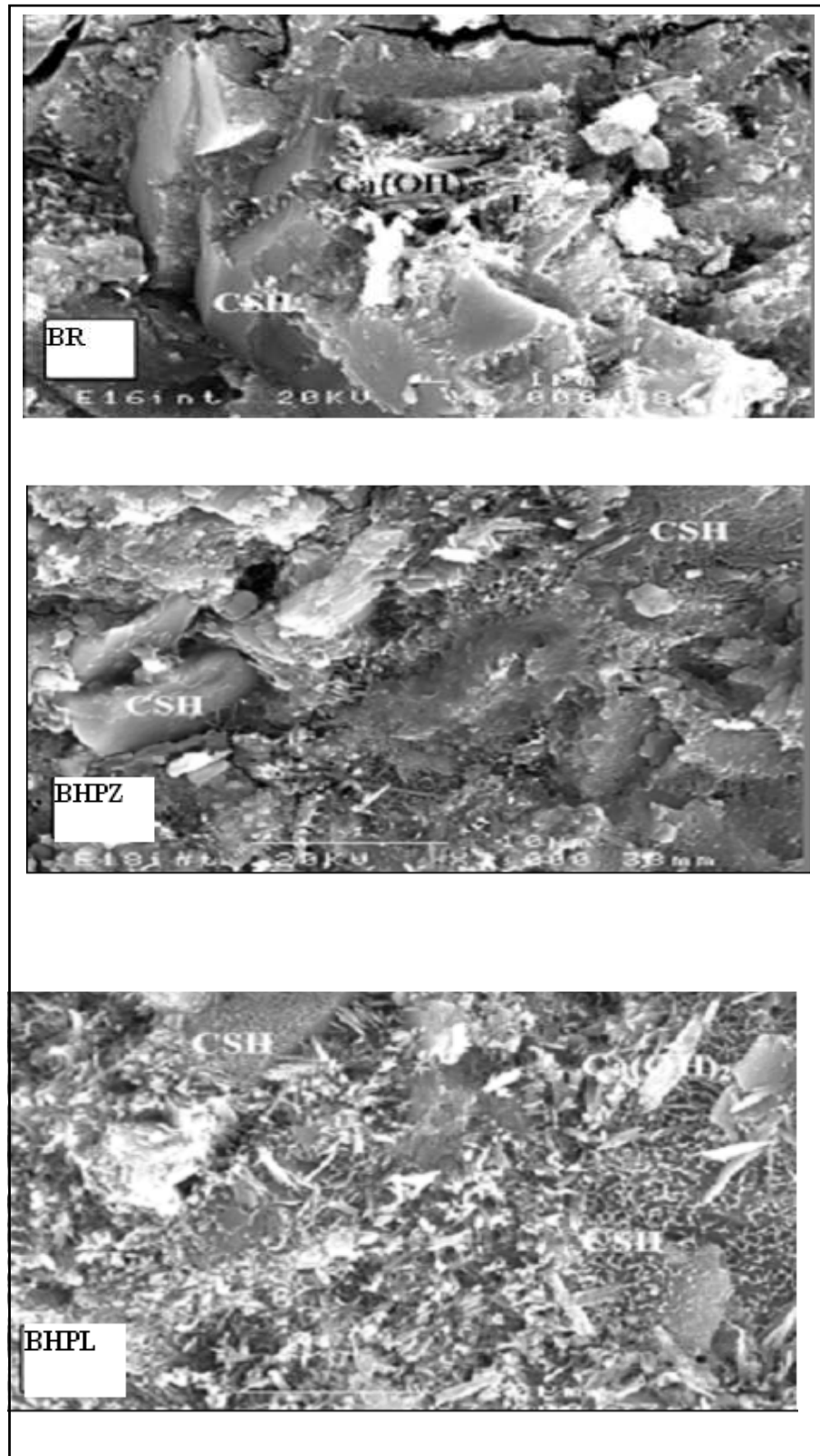


Figure 10-13: Observation au MEB de la micro structure interne des éprouvettes de béton conservées dans l'eau courante.

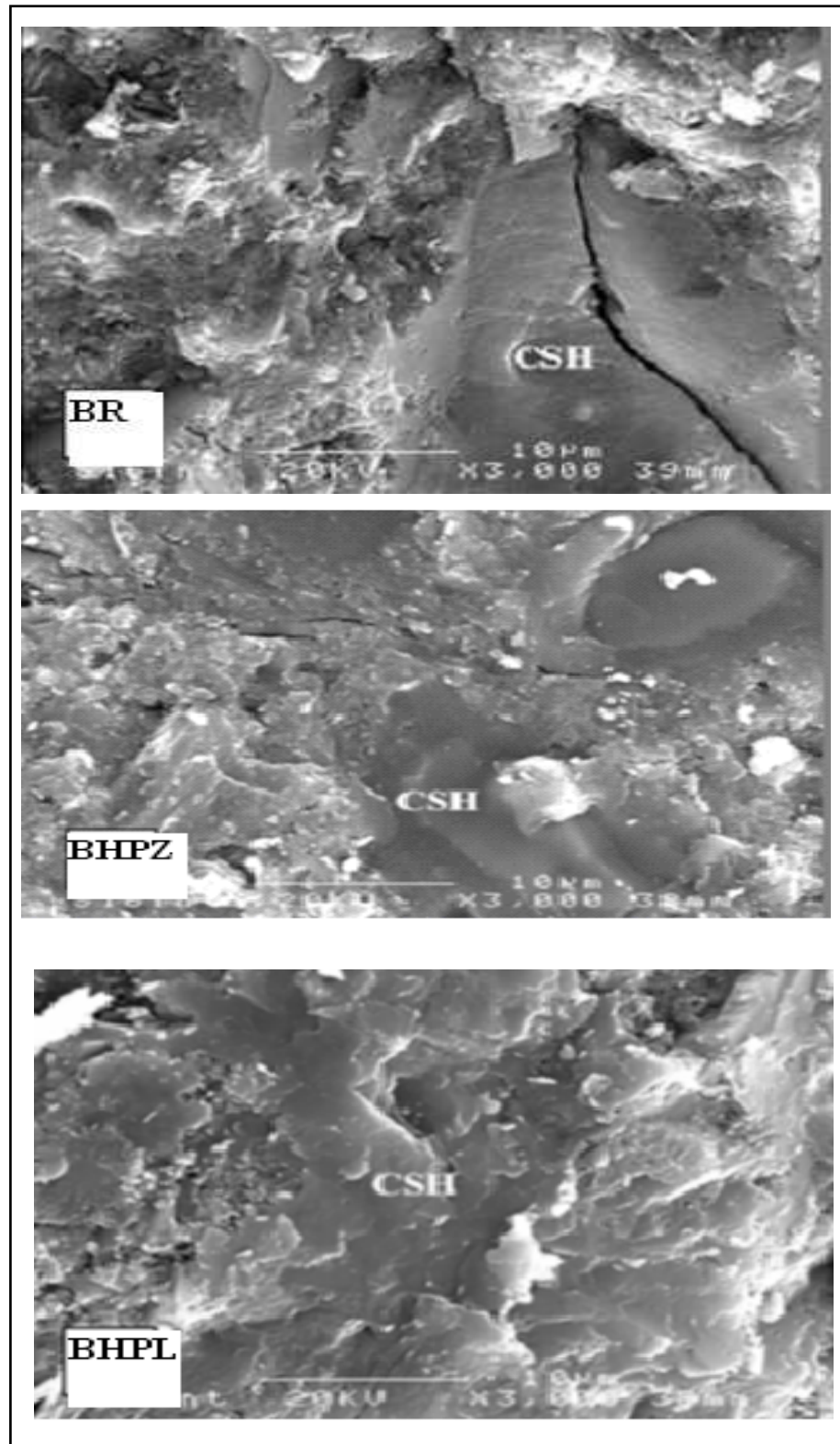


Figure 10-14: Observation au MEB de la micro structure interne des éprouvettes de béton conservées dans l'eau agressive.

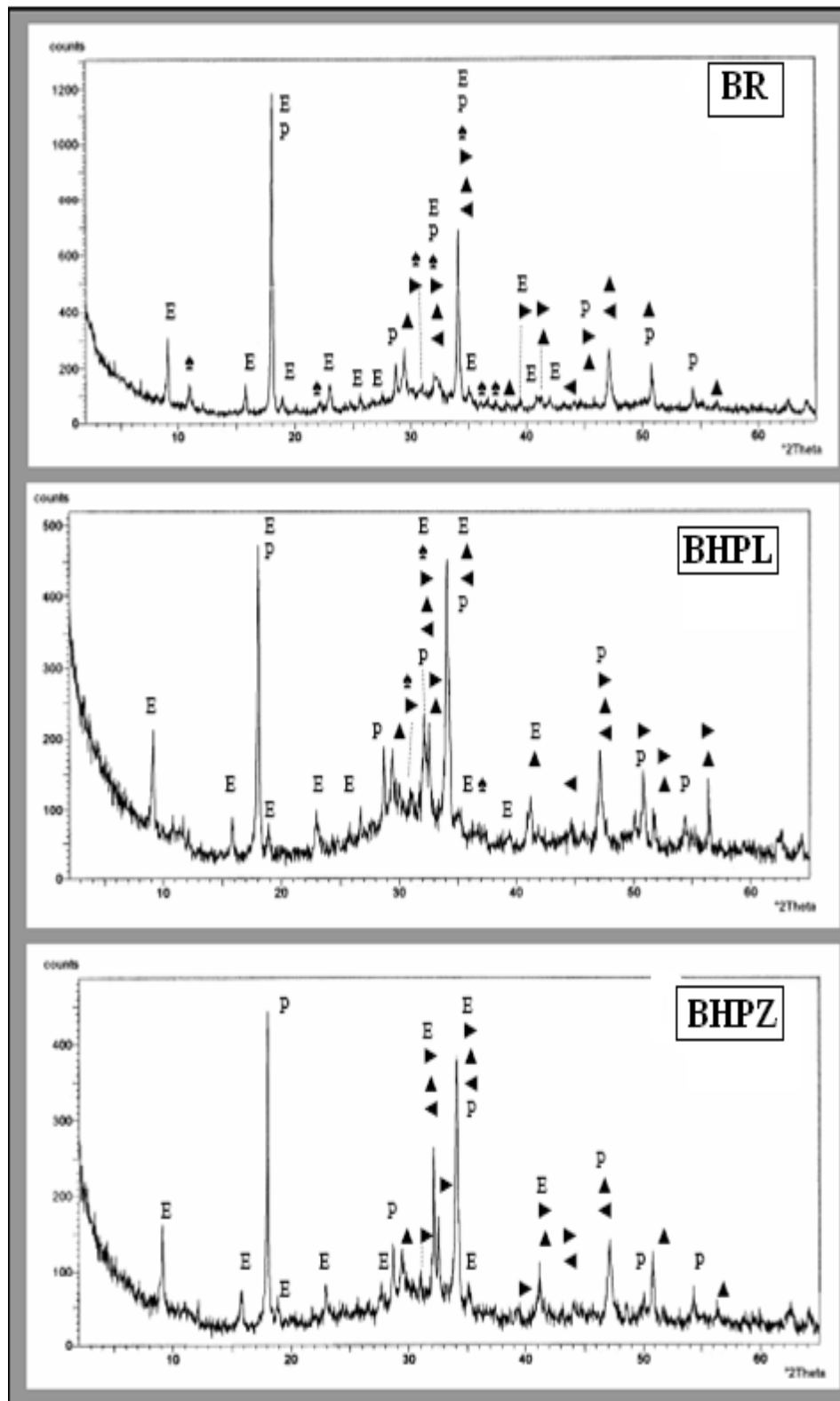
L'analyse par diffraction de rayons X (fig. 10-15 et 101-16) illustre l'influence du milieu de conservation sur les différentes formations. Les hydrosilicates de calcium formés (habituellement appelés CSH) sont semi – cristallins ou amorphes et difficilement identifiables par diffraction X ; Seules quelques raies apparaissent mais elles sont superposées aux raies des autres phases cristallines.

La légende suivante est adoptée pour la désignation des différentes formations sur les radiogrammes ci-dessous :

- E ettringite ,
- P  $\text{Ca(OH)}_2$ ,
- ▲  $\text{C}_3\text{S}$ ,
- $\beta\text{C}_2\text{S}$ ,
- ◄  $\text{C}_4\text{AF}$ ,
- ♠  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$

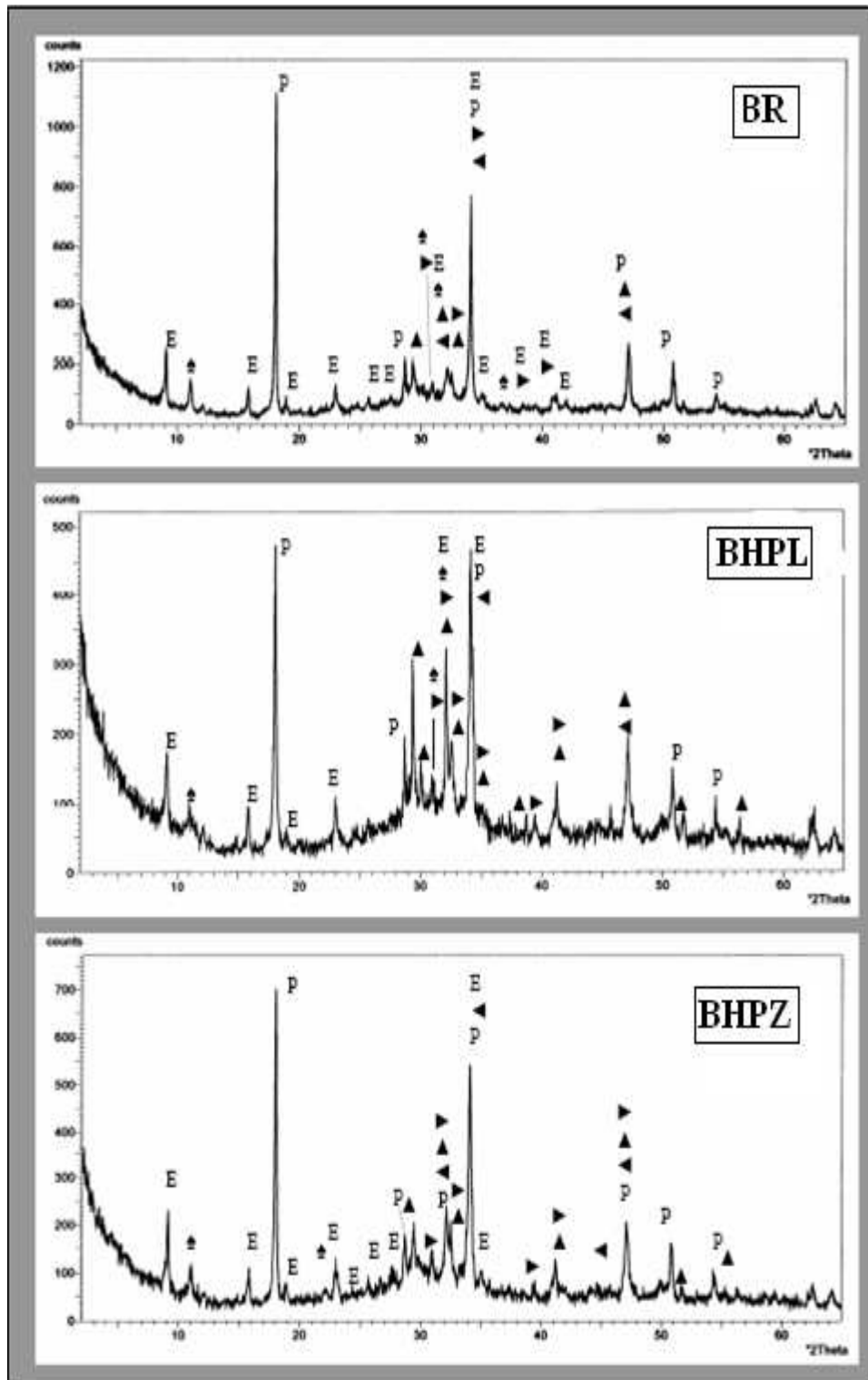
Les phases cristallines (intérieur des éprouvettes) des différents bétons avec ajouts cimentaires paraissent identiques indépendamment de leurs milieux de conservation. L'hydratation de leurs composés anhydres se trouve freinée, contrairement à celles du béton de référence. Ceci, est la conséquence de la densification de la matrice. En favorisant la formation d'un squelette plus compact et par conséquent des résistances chimiques beaucoup plus élevées.

Les hydroaluminates de calcium sont cristallisés sous la forme de  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.13\text{H}_2\text{O}$ ) pour l'ensemble des bétons, 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.



E ettringite , P Ca(OH)<sub>2</sub>, ▲ C<sub>3</sub>S, ▶ βC<sub>2</sub>S, ◀ C<sub>4</sub>AF, ♠ C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>

Figure 10-15: Radiogramme des éprouvettes des différents bétons conservées dans l'eau courante.



E ettringite , P Ca(OH)<sub>2</sub>, ▲ C<sub>3</sub>S, ▶ βC<sub>2</sub>S, ◀ C<sub>4</sub>AF, ♠ C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>

Figure 10-16: Radiogramme des éprouvettes de béton de contrôle conservées dans l'eau agressive.

## **10.7 CONCLUSION**

Avec une composition correctement ajustée, les ajouts cimentaires conduisent bien à des bétons qui sont à classer parmi les bétons à hautes performances. La pouzzolane et le laitier utilisés présentent une cinétique de réaction très correcte.

Les essais de durabilité de ces bétons dans différents milieux, eau courante et eau séléniteuse montrent des modifications structurales par passage en solution de la chaux ou par cristallisation de la calcite ou du gypse.

Il faut noter que, même après 12 mois de conservation dans les milieux plus ou moins agressifs, les caractéristiques mécaniques de ces bétons à hautes performances ne sont pas affectées par les dégradations probablement grâce à la très faible porosité qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi un frein à la sortie des cations.

*Conclusion Générale*

*Perspectives*

*Références Bibliographiques*

## 1. CONCLUSION

La durabilité d'un ouvrage en béton est liée à la capacité du béton à résister aux divers agents agressifs (liquides, ions, gaz). Cependant la corrosion, d'origine physico-chimique de la matrice cimentaire, offre des voies pour la pénétration de ces agents.

Dans les structures en milieu marin, les chlorures exploitent les voies pour mener leur attaque contre le matériau. Néanmoins, la durée de vie importante de nombreux ouvrages actuels montre que le béton bien formulé peut être imperméabilisé et ainsi réduire leur influence.

L'objectif des travaux de cette thèse, concerne l'utilisation des ressources disponibles localement et tout particulièrement les ajouts cimentaires et ceci, dans le but de formuler un béton durable doté d'une imperméabilité élevée et d'une résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 50 MPa.

Cette thèse a permis de mettre en évidence l'efficacité et la validité d'un outil expérimental : un banc d'essai pour mesurer la perméabilité de matériaux poreux de type LBE. C'est un perméamètre à charge constante pour mesurer la perméabilité aux gaz des bétons durcis.

Ce dispositif que nous avons conçu et réalisé au laboratoire permet d'imposer des pressions de gaz au centre d'éprouvettes cylindriques creuses de diamètres extérieur et intérieur, respectivement de 160 mm et 80 mm. L'appareil est caractérisé par le fait que l'enceinte de la cellule qui est en matière plastique, est sollicitée uniquement par la pression atmosphérique qui présente la pression de sortie, ce qui élimine les risques d'explosion dues à la pression de confinement sur l'échantillon. Notre cellule est un peu spéciale parce qu'elle contient une éprouvette en béton qui en fait partie, dont la forme reflète les cas réels où la perméabilité joue un rôle important dans la durabilité et la sécurité des ouvrages (exemple d'une centrale nucléaire ou d'une enceinte de stockage de déchets radioactifs).

L'étude s'est articulée autour de trois principaux axes :

- étude de l'influence des ajouts cimentaires (laitier et pouzzolane) sur les propriétés des bétons élaborés.
- caractérisation des bétons avec ajouts cimentaires à travers des essais physico-mécaniques dont le choix a été justifié.
- étude de la durabilité de ces bétons conservés dans un milieu agressif.

Les résultats obtenus dans cette thèse, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

1- La méthode de Dreux Goriss nous a conduit à des compositions de bétons satisfaisantes, suite à l'optimisation des facteurs suivants :

a- Rapport eau/ciment et teneur en adjuvant par rapport à la masse de ciment sont respectivement 0.27 et 1.5 % ;

b-Mouture des ajouts ;

- Laitier :  $SSB=8500 \text{ cm}^2/\text{g}$  ;
- Pouzzolane :  $SSB=9600 \text{ cm}^2/\text{g}$  ;

c-Teneur des ajouts ;

- 17.5% pour le laitier ;
- 7.5% pour la pouzzolane.

2- Grâce à l'ajout des ultrafines et l'utilisation de superplastifiant, nous avons obtenu des bétons de bonne ouvrabilité. Le béton avec ajout de laitier a un affaissement au cône d'Abrams de 18 cm contre 7 cm pour celui du béton de référence, alors que le béton avec ajout de pouzzolane a un affaissement de 20 cm.

3- Le taux d'air occlus des bétons frais avec ajouts cimentaires, comparé à celui du béton de référence, est plus faible. À titre d'exemple, ce taux est de 2 % pour le béton de référence et 1,6% pour le béton de laitier. L'effet de l'introduction des ajouts cimentaires, conjugué à celui du superplastifiant, limite l'air emprisonné dans des pores et le remplissage par les ultrafines est meilleur.

- 4- La masse volumique des différents bétons avec ajouts cimentaires, déterminée à l'âge de 365 jours, 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. On note, une augmentation de 50 kg pour le béton de pouzzolane et 40 kg pour celui avec ajout de laitier.
  
- 5- La vitesse de propagation d'onde sonore, à travers les bétons avec ajouts, est plus grande que celle du béton de référence. À titre d'exemple, à l'âge de 365 jours, elle est de 4674 m/s pour le béton de référence et 5027 m/s pour le béton de pouzzolane.
  
- 6- le retrait des bétons avec ajouts cimentaires aux différentes échéances est plus faible que celui mesuré sur le béton de référence. Par exemple le retrait des bétons aux ajouts cimentaires se trouve entre 381  $\mu\text{m/m}$  et 428  $\mu\text{m/m}$ , alors que celui du béton de référence est 466  $\mu\text{m/m}$ .
  
- 7- L'étude des résistances mécaniques des bétons avec ajouts, comparés à celles du béton de référence (à 365 jours), permet de tirer les conclusions suivantes :
  - Le béton avec ajout de laitier a une résistance en compression de 90 MPa et en traction par flexion de 7,2 MPa, soit une augmentation respective de 71% par rapport à celle de béton de référence ;
  - Le béton avec ajout de pouzzolane a une résistance en compression de 80 MPa et en traction de 7.2 MPa, soit une augmentation de respectivement de 62% par rapport à celle de béton de référence .D'une façon générale, les ajouts cimentaires influent positivement sur les caractéristiques des bétons par leurs rôles pouzzolaniques et granulaires.
  
- 8- Après 365 jours de conservation dans le milieu agressif, les caractéristiques des bétons avec ajouts cimentaires, 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. Nous notons des résistances mécaniques pour les bétons avec ajouts, entre 79 et 88 MPa, alors que celles de béton de référence ne dépassent pas les 58 MPa et chute jusqu'à 48 MPa.

L'identité de ce comportement vient du fait même de la constitution microstructurale des bétons avec ajouts cimentaires, observée au microscope à balayage. Elle montre notamment la densité importante des C-S-H.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons réussi dans un premier temps à maîtriser les paramètres de l'essai de la perméabilité aux ions chlore et de la perméabilité aux gaz, ce qui nous a conduit à mettre une mise au point du premier essai et de proposer une nouvelle procédure de mesure pour le deuxième.

- 9- Les résultats des essais de perméabilité aux ions chlore montrent que les valeurs de l'intensité du courant et de la charge électrique pour les BHPL et les BHPZ sont trop réduites. Evidemment, cette réduction se précise plus encore lorsque l'âge du béton à l'essai est avancé compte tenu de la réactivité pouzzolanique de l'ajout cimentaire qui réduit la quantité de chaux hydratée dans la matrice cimentaire et donc la basicité du milieu.
- 10 - En effet, la perméabilité aux gaz des matériaux cimentaires varie considérablement en fonction de la pression d'essai. Pour le domaine de pressions utilisées avec l'appareil développé au laboratoire bâti dans l'environnement (LBE) et les valeurs de perméabilité rencontrées pour toute la gamme de bétons depuis les bétons de références (BR) jusqu'aux bétons de hautes performances (BHP), l'approche de Klinkenberg traduit parfaitement le comportement de la perméabilité en fonction de la pression d'essai.
- 11- La perméabilité dépend d'une partie de la porosité communicante, de la taille des pores, de leur connectivité et tortuosité ; en d'autres termes, des caractéristiques de l'espace poreux.
- 12- l'addition d'un super plastifiant peut modifier significativement la perméabilité d'un béton plus particulièrement lorsqu'il s'agit d'un BHP.  
La réduction de perméabilité obtenue avec des pouzzolanes et des laitiers est significative comparée à celle de bétons ordinaires.

- 13- Le travail de recherche souligne la possibilité de mesurer avec cet appareil des valeurs de perméabilité à l'oxygène des bétons comprises entre  $10^{-15}$  et  $10^{-20}$  m<sup>2</sup>. Les résultats obtenus par cette procédure sont similaires à ceux déterminés par la méthode Cembureau.

## 2. PERSPECTIVES

Notre étude a permis de maîtriser à la fois la formulation des bétons à hautes performances (BHP) ainsi que les paramètres d'essais et de proposer une procédure de mesure de perméabilité aux gaz des matériaux poreux. En ce qui concerne l'étude des paramètres liés aux bétons, des interrogations subsistent et tous les paramètres de composition n'ont pas été étudiés. Afin de compléter cette étude il conviendrait donc d'étudier les paramètres liés au matériau tel que : le rapport E/C, le type de ciment, la nature et la forme des granulats.

L'utilisation de la méthode que nous avons proposée devrait permettre de mener à bien une étude concernant les relations perméabilité aux gaz- paramètres de composition de bétons.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires également pour pouvoir mieux estimer la durée de vie des structures et d'évaluer la précision de la relation entre la perméabilité et la résistance des bétons.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] **Moudilou E.**, «*Cinétiques de mécanismes de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matériaux cimentaires*». Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 2000.
- [2] **Brault S.**, «*Modélisation du comportement à la lixiviation à long terme de déchets stabilisés à l'aide de liants hydrauliques*». Thèse de doctorat, Université Paris 6, France, 2001
- [3] **Young Y. F.**, «*Volume relationships for C–S–H formation based on hydration stoichiometries*». L.J. Struble P.W. Brown, editor, Microstructural development during hydration of cement, pp 313–322. Material Research Society Symposium, vol 85, 1987.
- [4] **Matte V.**, «*Durabilité des bétons à ultra hautes performances : rôle de la matrice cimentaire*». Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 1999.
- [5] **Taylor H.F.W.**, «*Proposed structure for calcium silicate hydrate gel*». Journal of the American Ceramic Society, 69(6), p. 464–467, 1986.
- [6] **Longuet L. Burglen A. Zelwer.** «*La phase liquide du ciment hydraté*». 1974. Publication technique CERILH N°219.
- [7] **Minard H.**, «*Etude intégrée des processus d'hydratation, de coagulation, de rigidification et de prise pour un système C3S, C3A, sulfates alcalins*». Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 2003.
- [8] **Regourd M., Hornain H.**, «*Applications de la microscopie électronique à balayage*». Revue des matériaux de construction, 693,p. 73–87, 1975.
- [9] **Thomassin J.H., Regourd M., Baillif P., Touray J.C.**, «*Etude de l'hydratation initiale du silicate bicalcique par spectrométrie de photoélectrons*». Compte-rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 290, p. 1–3, 1980.
- [10] **Regourd M., Thomassin J.H. Baillif P. Touray J.C.**, «*Study of the early hydration of Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> by X-ray Photoelectron Spectrometry*». Cement and Concrete Research, Vol.10, p. 223–230, 1980.
- [11] **ATILH CNRS.** «*Ecole thématique 'physique, chimie et mécanique des matériaux cimentaires*». 2003.
- [12] **Carde C.**, «*Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques due à la lixiviation des matériaux cimentaires*». Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, 1996.

- [13] **Kamali S.**, «*Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à de différents ciments dans différents environnements*». Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Février 2003.
- [14] **Regourd M., Hornain H., Mortueux B.**, «*Résistance à l'eau de mer des ciments au laitier*». *Silicates Industriels*, 42, p. 19–27, 1977.
- [15] **Moranville M.**, «*Implications of curing temperatures for durability of cement-based systems*». K.L. Scrivener J.F. Young, editor, *Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Materials*, p. 211–218, 1997.
- [16] **Garboczi E. J., Bentz D.P.**, «*Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model*». *Cement and Concrete Research*, 21(10), p. 325–344, 1991.
- [17] **Powers T.C.**, «*Physical properties of cement paste. 4th International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington DC, p. 577–611, 1960.
- [18] **Feldman R.F., Sereda P.J.**, «*A model for hydrated portland paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*». *Materials and Structures*, p. 509-519, 1968.
- [19] **Darcy H.**, «*Fontaine publiques de la ville de Dijon*». Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Editeur Victor Dalmont, Paris 1856.
- [20] **Abbas A.**, «*Écoulement gazeux dans les bétons partiellement saturés : Application à la mesure de perméabilité* ». Thèse de l'INSA de Toulouse, 1998.
- [21] **Perraton D.**, «*Perméabilité aux gaz des bétons hydrauliques* », thèse de l'INSA, Toulouse. 1992.
- [22] **Bourdette B.**, «*Durabilité du mortier : prise en compte des auréoles de transition dans la caractérisation et la modélisation des processus physiques et chimiques d'altération* ». Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, 1994.
- [23] **Buil M., et Ollivier J.P.**, «*Conception des bétons : la structure poreuse*». La durabilité des bétons, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Sous la direction de Jacques Baron et Jean-Pierre Ollivier, 1992.
- [24] **Graham T.**, «*Diffusion in liquids applied to analysis* ». *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, vol.151, p.183-224, 1861.
- [25] **Nilsson L.O., Poulson E., Sandberg P., Sorensen H.E., Klinghoffer O.**, «*Chloride penetration into concrete, State of the art Transport Processes, corrosion initiation, test methods and prediction method* ». Danish Road Directorate, Copenhagen, p. 23-25, 1996.
- [26] **NORDTEST METHOD CONCRETE**, «*Hardened: Accelerated chloride penetration* ». NT Build 443, p. 1-5, Approved 1995.

- [27] **AASHTO.** « *Standard method of test for resistance of chloride ion penetration* », American Association of State Highway and transportation officials, Washington D.C, 1980.
- [28] **Francy O. and François R.,** « *Measuring chloride diffusion coefficients from non-steady state diffusion tests* ». Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 7, p. 947-953, 1998.
- [29] **Andrade C.,** « *Calculation of chloride diffusion coefficient in concrete from ionic migration measurements* ». Cement and Concrete Research, Vol.23 (1993), p.724-742.
- [30] **Arsenault J.,** « *Etude des mécanismes de transport des ions dans le béton en vue de la mise au point d'un essai de migration* ». Thèse, INSA de Toulouse et Université de Laval, 1999.
- [31] **AASHTO.**« *Standard method of test for electrical concrete's ability to resist chloride* ». American Association of state Highway and transportation officials, Washington D.C, 1993.
- [32] **Tang and L., Nilsson L.O.,** « *Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars* ». Cement and Concrete Research, 23 (1993), p.49- 53.
- [33] **Tang L.,** « *Chloride transport in concrete- Measurement and prediction* », Building materials, Chalmers, Gothenburg, 1996.
- [34] **Truc O.,** «*Prediction of chloride penetration into saturated concrete- multispecies approach.* ». Thèse, Chalmers university of Technology, Sweden, et Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions, , INSA-UPS, Toulouse, France. 2000.
- [35] **Nilsson L.O., Poulson E., Sandberg P., Sorensen H.E., Klinghoffer O.,** « *Chloride penetration into concrete, Sate of the art, A system for estimation of chloride ingress into concrete, theoretical background* » Danish Road Directorate, Copenhagen, Chapter 6, 1996.
- [36] **Francy O.,** « *Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers partiellement saturés en eau* ».Thèse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions, INSA-UPS, Toulouse, et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1998.
- [37] **Nilsson L.O., Poulson E., Sandberg P., Sorensen H.E., Klinghoffer O.,** «*Chloride penetration into concrete, Sate of the art Transport Processes, corrosion initiation, test methods and prediction method* ». Danish Road Directorate, Copenhagen, p.23-25, 1996.
- [38] **Tang L., Nilsson L.O.,** « *Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars* ». Cement and concrete research, V. 23, p. 247- 253,1993.
- [39] **Badouix F.,** *Modélisation de l'altération à long terme des bétons : prise en compte de la carbonatation.* Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2000.

- [40] **Fujiwara Y., Mayura T., Owaki E.**, «*Degradation of concrete buried in soil with saline ground water*». Nuclear Engineering and Design, 138,p. 143–150, 1992.
- [41] **Adenot F.**, «*Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment* », Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 1992.
- [42] **Gerard B.**, «*Contribution des couplages mécanique-chimie-transfert dans la tenue à long terme des ouvrages de stockage des déchets radioactifs* », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, et Université Laval, Québec, Canada, 1996.
- [43] **Kamali S.**, «*Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à de différents ciments dans différents environnements* », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Février 2003.
- [44] **Bourdette B.**, «*Durabilité du mortier : prise en compte des auréoles de transition dans la caractérisation et la modélisation des processus physiques et chimiques d'altération* », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, 1994.
- [45] **Carde C.**, «*Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques due à la lixiviation des matériaux cimentaires* », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, 1996.
- [46] **ENPC.**, «*Synthèse des travaux du Projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances*», Ed : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, France 2005.
- [47] **Baron J.**, «*Les principes de composition du béton de porosité minimale* », Le béton hydraulique, p. 143-160, presse de l'ENPC, Paris, 1983.
- [48] **Baron J.**, «*La nécessité d'une démarche pragmatique : l'idée de maniabilité et sa mise en pratique* », Le béton hydraulique, p. 131-142, presse de l'ENPC, Paris, 1982.
- [49] **Soroka I.**, «*concrete in hot environment* », Ed. E and FN SPON, London, 1993.
- [50] **Dreux G.**, «*Nouveau guide du béton* », Ed. Éyrolles, Paris, 1998
- [51] **Regourd M.**, «*Hydratation du ciment Portland, dans le béton hydraulique* », édité par baron J. et Saute Rey R., 1982, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, ISBN 2-85978-033-5, p. 193-221
- [52] **Uchikawa H., Uchida S. et Okamura T.**, «*The influence of bending components on hydration of cement minerals and cement* », Review of 41<sup>st</sup> general meeting, 1987, the cement association of Japan, ISBN 4-88175-0023-X, p. 36-39.

- [53] **Sarkar S-L.** and **Xu A.**, « *Why use mineral admixture in high performance concrete* », In : *L'Industria Italiana del cemento*, October 1996, p. 715-726.
- [54] **Lea F-M.**, « *Pozzolans and pozzolanic cements* », In: *The chemistry of cement and concrete*, par F-M. Lea, Great Britain : Edward Arnold, 1970, p.414-453.
- [55] **Dron R.** et **Voinovitch I-A.**, « *Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes* », *Le béton hydraulique*, l'ENPC, Paris, 1982, p. 237-246.
- [56] **Nonat A.**, « *Interaction between chemical evolution and physical evolution , in the case of tricalcium silicate*», *Materials and structures*, 1994, p. 187-195.
- [57] **Yurugi M.**, **Mizobuchi T.** and **Terauchi T.**, « *Utilization of blast-furnace slag and silica fume for controlling temperature rise in high-strength concrete* » In : *Proceedings Fourth CANME-ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, Edited by V-M. Malhotra. Istanbul, Turkey, 1992, vol. 2, p. 1431-1450.
- [58] **Thomas D-L.**, **Thomas M-D-A.** and **Ryell J.**, « *Suitability of lead blast-furnace slag as a mineral admixture for concrete* » In : *Proceedings Sixth CANME-ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, Edited by V-M. Malhotra. Bangkok, Thailand, 1998, vol. 1, p. 1041-1056.
- [59] **Alexandre J.** et **Sebileau J-L.**, « *Le laitier de haut fourneau* », *Centre Technique et de Promotion des Laitiers (C.T.P.L)*, Paris, 1988, p. 340.
- [60] **A.C.I.**, «*Fall convention REVEW*», journal American concrete institute, 1974.
- [61] **Venuat M.**, « *Adjuvant et traitement des mortiers et bétons* » 1<sup>ère</sup> éd. Venuat, Paris 1971, p. 40-45.
- [62] **Soroka I.**, « *concrete in hot environment* », *Ed. E and FN SPON*, London, 1993.
- [63] **Motureau B.** et **Harain H.**, « *Comparaison de la réactivité de différentes pouzzolanes* », 7<sup>ème</sup> Congrès International de Chimie des Ciments, vol. 3, p. 110-115, Paris, 1980.
- [64] **Vernet C.**, « *Séquences cinétiques des réactions d'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence de gypse, de chaux et de fillers calcaires* », In : 8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Edited by Financiadora de Estudos e Projetos. Rio de Janeiro – Brazil, 1986, vol. 3, p. 70-74.
- [65] **Komar A.**, « *Matériaux et éléments de construction* », Ed. Mir, Moscou, 1978.
- [66] **Auperin M.**, **Richard F.** et **aL.**, « *Retrait et fluage des bétons à hautes performances* ». *Annales. I.T.B.T.P*, n° 474, mai 1989.
- [67] **Bakker R.**, « *Permeability of blended cement concrete* », SP-79, ACI, 1983, Detroit, p.589-605.

- [68] **Torrent R-J et Jornet A.**, « *The quality of the concrete of low-medium and high-strength concretes* », 1991, ACI SP-126, p. 1147-1161.
- [69] **ASTM C 1202-91**, « *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration* », Annual book of ASTM standards, Section 4 construction, vol. 04.02 concrete and aggregate, 1993, p. 627-635.
- [70] **Ramachandran V-S.**, « *Thermal analysis of cement components hydrated in the presence of calcium carbonate* », Thermochemica Acta, 1988, vol. 127, p. 387-394.
- [71] **Jauberthie R., Temimi M. and Laquerbe M.**, « *Hydrothermal transformation of tobermorite gel to 10 Å tobermorite* », Cement and concrete research, vol. 26, n° 9, p. 1335-1339, 1996.
- [72] **Jauberthie R., Cortes M., Lanos C. et Mortreuil F.**, « *Évolution de la cristallinité des silicates de chaux hydratés* », Journal de physique, vol 8, p. 531-537, 1998.
- [73] **Le Roy R.**, « *déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances* », *Le béton hydraulique*, LCPC, Paris, 1982, p. 343.
- [74] **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, 2<sup>e</sup> édition par Y. Malier, presse de l'ENPC, Paris, 1992, p. 129-156.
- [75] **Goldman A. et Bentur A.**, « *Bond effects in high strength silica-fume concrete* », ACI, materials journals, n° 86, September-October 1989.
- [76] **De Larrard F.**, « *Prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret* », Annales I.T.B.T.P, n° 483, mai-1990.
- [77] **BPEL 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, 1999.
- [78] **RILEM COMMITTEE-36 RDL**, « *Long term random dynamic loading of concrete structures* », Matériaux et Constructions, 1984, vol. 97, n° 17, p. 1-28.
- [79] **Ahmad S-H.**, « *Short term mechanical properties. High performance concrete and application* », By S.P. Shah and S-H Ahmad, London, 1994, Melbourne, Auckland : Edward Arnold, p. 27-64.
- [80] **Dahl,k. k.B**, « *A constitutive model for normal and high-strength concrete* », ABK; Report N°R287.Dept.Struct.Eng; TU Denmark, Lyngby, 1992.

- [81] **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, p. 91-119.
- [82] **Kaplan M-F.**, « *Ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, Poisson ratio, and the strength of concrete made with thirteen different coarse aggregates* », RIMEL Bulletin, Paris, nouvelle série, n° 1, mars 1959, p. 58-79.
- [83] **Pedeches J-M.**, « *Étude des propriétés mécaniques et du retrait de béton de hautes performances* », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, mars 1988.
- [84] **Brooke J-J.** and **Wainwright P-J.**, « *Time dependent behavior of very-early-strength concrete containing a superplasticizer* », ACI SP68-5, Development in the superplasticizer, p. 81-100, 1981.
- [85] **Pedeches J-M.**, « *Béton à hautes et très hautes performances : propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation* », Annales I.T.B.T.P, n° 525, série bétons 311, p. 1-41, 1994.
- [86] **Auperin M., Richard P., De Larrard F. et al.** « *Retrait et fluage de bétons à hautes performances : influence de l'âge au chargement* », Annales. I.T.B.T.P, série béton 264, n° 474, mai 1989, p. 49-75.
- [87] **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, ISBN 2-85978-033-5, p. 485-501.
- [88] **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, p. 41-51.
- [89] **Wittmann F-H.**, « *On the action of capillary pressure in fresh concrete* », Cement and concrete research, vol. 6, n°1, 1976, p. 49-56.
- [90] **Lynam G-C.**, « *Grow and movement in Portland cement concrete* », Oxford University press, London 1934, p. 25-45.
- [91] **Davis H-E.**, « *Autogenous volume change of concrete* », Comptes rendus de la 43<sup>e</sup> rencontre annuelle de l'ASTM, Atlantic city, NJ, June 1940, p. 1103-1113.
- [92] **Buil M.**, « *Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissant* », Rapport de recherche LCPC, n° 92, ISSN 0222-8394, décembre 1979, p. 72.
- [93] **Tazawa E.** et **Miyazawa S.**, « *Experimental study in mechanism of autogenous shrinkage of concrete* », Cement and concrete research, vol. 25, n° 8, December 1995, p. 1633-1638..
- [94] **Aïtcin P-C.**, « *demytifying autogenous shrinkage* », concrete international, Vol. 21, No. 11 November 1999, p. 54-56.

- [95] **Davis H-E.**, « *autogenous volume change of concrete* », comptes rendus de la 43<sup>e</sup> rencontre annuelle de l'ASTM, atlantic city, june 1940, p. 1103-1113 ,1940.
- [96] **Jensen O.M. et Hansen P-F.**, « *A dilatometer for measuring autogenously deformation in hardening Portland cement paste* », Matériaux et constructions, vol. 28, n° 181, août-septembre 1995, p. 406-409.
- [97] **Jensen O.M. et Hansen P-F.**, « *Autogenously deformation and change of the relative humidity on silica fume – modified cement paste* », ACI material journal, vol. 93, n° 6, november - december 1996, p. 539-543.
- [98] **Tazawa E. et Miyazawa S.**, « *Autogenously shrinkage of concrete and its importance in concrete technology* », Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, Barcelona, Spain, p. 159-168, 1993.
- [99] **Novokshchenov V.**, « *Factor controlling the compressive strength of silica fume concrete in the 100-150 MPa* », Magazine of concrete research, March 1992, vol. 44, n° 158, p. 53-61.
- [100] **Zhou F., Barr B. and Lydon F-D.**, « *Fracture proprieties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates* », Cement and concrete research, vol. 25, n°3, 1995, p. 543-552.
- [101] **Buil M. et Ollivier J.P.**. «*Conception des bétons : la structure poreuse*». La durabilité des bétons, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Sous la direction de Jacques Baron et Jean-Pierre Ollivier.1992.
- [102] **Mehta P.K.**, « *Concrete Technology, Past, Present and Future* », Proc. of V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, p.1-30, 1994.
- [103] **Athinson A. and A.K. Nickerson A.K.**, « *The diffusion of ions through water-saturated cement* », Journal of Materials Science., Vol.19, p.3068-3078, 1984.
- [104] **Carman P.C.**, «*Flow of gases through porous media*» Academic press, New York, 1956.
- [105] **Quénard D. et Sallée. H.** « *Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment*», Cahiers de CSTB, n° 2525, 1991.
- [106] **Powers T.C., Copeland L.E., Hayes J.C., and Mann H.M.**, « *Permeability of Portland cement paste*», Journal of American Concrete Institute, Vol. 51, N°3, p. 285-298, 1954.
- [107] **Hansen T. C.**. « *Physical structure of hardened cement paste. A classical approach*», Materials and Structures. RILEM, 19, p. 423- 436, 1986.
- [108] **Dhir R.K, Hewelett P.C., and Chan Y.N.**,« *Characteristics of concrete near Surface: Intrinsic Permeability*». Magazine of concrete Research, Vol. 41, No 147, p.87-97, 1989.

- [109] **Athinson A.** and **Nickerson A.K.**, « *The diffusion of ions through water- saturated cement* », Journal of Materials Science ,Vol.19, p.3068-3078, 1984.
- [110] **Picandet. V.**, « *Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydraulique des bétons* ». Thèse, université de Nantes, 2001.
- [111] **Hermann K.**, « *Perméabilité au gaz des bétons* ». Bulletin du ciment, novembre 2000.
- [112] **Perraton D.**, **Aïtcin P.C**, **Carles-Gibergues A.**, « *Mesure de la perméabilité au gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque* ». Partie I Validation des concepts de Carmen et de Kinkenberg dans le cas d'un BHP ; partie II- Etude de l'influence de la taille des éprouvette et de variabilité des résultats dans le cas d'un BHP ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n °221, p. 69-87, 1999.
- [113] **AFREM** « *Groupe durabilité des bétons, mode opératoire recommandé, essai de perméabilité au gaz du béton durci* ». Compte –rendu des journées techniques AFREM, Durabilité des bétons, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Toulouse, 11-12 décembre, p. 125-134, 1997.
- [114] **Quénard D.**, **Carcassès M.**,« *Les résultats des essais croisés AFRAM : Perméabilité* ». Compte-rendu des journées technique AFPC-AFRAM, Durabilité des bétons, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Toulouse, 11-12 décembre, p. 41-58, 1997.
- [115] **Jooss, M.** et **Reinhard H. W.**, « *Permeability and diffusivity of concrete as fonction of temperature* ». Cement and Concrete Research (32), p.1497-1504, 2002.
- [116] **Win P.P.**, **Watanabe M.**, **Machida A.**, « *Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete* ». Cement and Concrete Research V. 34, p. 1073- 1079, 2004.
- [117] **Truc O.**, « *Prediction of chloride penetration into saturated concrete- multispecies approach.* ». Thèse, Chalmers university of Technology, Sweden, et Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions, INSA-UPS, Toulouse, France. 2000.
- [118] **Vicat L.**, « *Recherches sur les causes physiques de destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer* », Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1857.
- [119] **Gagné R.**, **Aïtcin P-C** and **Lamoth P.**, « *Chloride-ion permeability of different concretes* », In : Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on durability of building materials and components, Omiya, Japan, E & FN Spon, London, ISBN 0-419-18690-5, p. 1171-1180, 1993.
- [120] **Gagné R.**, **Pigeon M.** and **Aïtcin P-C.**, « *Chloride-ions attack on low water-cement ratio pastes containing silica fume* », 4<sup>ième</sup> Conférence Internationale sur l'utilisation des cendres volantes, fumée de silice, laitiers et autres pouzzolanes naturelles dans le béton, Istanbul, Turquie 1991, p. 19.

- [121] **De Larrad F.**, « *Structures granulaires et formulations des bétons* », Etudes et recherche des LCPC 2004.
- [122] **Chaid R.** « *Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux* ». Thèse de doctorat d'état, école nationale polytechnique d'Alger, 26 décembre 2006
- [123] **Aïtcin P-C.**, « *Bétons haute performance* », édition Eyrolles, 2001 ISBN 2-212-01323-X.
- [124] **Talbort C., Pigeon M., Mardrand J. and Hornain H.** « *Properties of Mortar mixtures containing high amount of various supplementary cementation materials* », Proceeding, Doctorate, American Concrete Institute 1995.
- [125] **Feng N., Feng X., Hao T. and Xing F.** « *Effect of ultrafine mineral powder on the charge passed of the concrete* » cement and concrete research, Vol. 32 - 2002 p. 623 - 627.
- [126] **Wee T.H., Suryavanshi J.A. and Tin S.S.** « *Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPC) results for concrete containing mineral admixtures* ». ACI Materials Journal, Vol. 97 N° 02(2000), p. 221 – 232.
- [127] **Taghni.Hamou A., Petrove N. and Luke K.** « *Properties of concrete containing diatomaceous earth* ». ACI Matériels Journal, Vol. 100 N°01.2003, p. 73 – 79.
- [128] **Julio-Betancourt G.A.,Hooton R.D** « *Study of the joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concrete* ». An international Journal cement concrete research. Vol 34 N° 06,(June2004), p. 1007 – 1015.
- [129] **Tasdemir C.** « *combined effects of mineral admixtures and using on the sorptivity coefficient of concrete* », cement and concrete research Vol. 33, N° 10 , (2003), p. 1637-1642)
- [130] **Dias W.P.S. ,Nanayakara S.M.A. and Ekeneligoda T.C.** « *performances of concrete mixes with OPC.PFA blends.Magaine of concrete Research* »,Vol. 55 N° 02 (2003), p.161-170.
- [131] **Khatib J.M. and Clay R.M.** « *Absorption characteristics of metakaolin concrete* ». cement and concrete research , 34 (1) (2004), p. 19–29.
- [132] **LCPC**, « *Mesure de la Perméabilité aux Gaz des Bétons Durcis par un Dispositif à Charge Constante* » Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées "Méthodes d'essai N°58" LCPC (France), 2002, p. 47-52.

## Communications et publications

Ce travail a fait l'objet de communications et publications suivantes :

Communications internationales :

- 1- **TALAH A, MERIDA A, KHARCHI F, CHAID R**, « Essai de la perméabilité aux ions chlore des BHP de pouzzolane» Colloque Méditerranéen sur les Matériaux de Génie Civil 6&7 décembre 2005, ENSET-Oran. Algérie.
- 2- **MERIDA A, TALAH A, KHARCHI F, CHAID R**, « Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté» Proceeding :2<sup>ème</sup> séminaire sur les technologies des bétons, Agerian Cement Company, Alger 17 & 18 septembre 2005, p.65-72.
- 3- **MERIDA A, TALAH A, KHARCHI F, CHAID R**, « Durabilité des bétons de pouzzolane» Colloque Méditerranéen sur les Matériaux de Génie Civil 6&7 décembre 2005, ENSET-Oran.
- 4- **TALAH A, MERIDA A, KHARCHI F, CHAID R**, « Mesure de la perméabilité aux ions des bétons» conférence internationale de métrologie, Casablanca, 4 au 6 avril 2006.
- 5- **MERIDA A, TALAH A, KHARCHI F, CHAID R**, « Estimation de la compacité et résistances du béton par auscultation dynamique», conférence internationale de métrologie, Casablanca, 4 au 6 avril 2006.
- 6- **TALAH A, KHARCHI F, MERIDA A, CHAID R**, « Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu chlorhydrique»,4<sup>ème</sup> séminaire international sur les technologies des bétons, Agerian Cement Company, Alger 20-21 octobre 2007.
- 7- **TALAH A, MERIDA A, KHARCHI F, CHAID R**, « Measure Permeability to the the Air of the Pouzzolana (HPC) High Performances Concretes», 12<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, Canada, July 8-13 juillet 2007.
- 8- **TALAH.A, CHAID R, BOUKHALED.A.,JAUBERTHIE.R** «Durabilité des BHP de pouzzolane conservés dans un milieu chlorhydrique»,Séminaire national de Génie Civil «SNGCO8» CHLEF 15 et16 décembre 2008.

Publication internationale :

- 9- - **A .TALAH , F .KHARCHI ,R. CHAID** « Contribution of natural pozzolana to durability of high performance concrete in chloride environment » Serial title: Indian Concrete Journal, , vol. 85,n° 6, Rs.65;June 2011, p.39-46,language:English,ISSN/ 0019-4565, ACC Limited,Maharashtra,INDIA.