

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département : Génie Civil & Hydraulique  
Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم : الهندسة المدنية و الري  
المرجع : .....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences**

Spécialité : Génie Civil  
Option : Matériaux de Construction

**Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout  
du sable de dune finement broyé au ciment,  
sur les performances physico-mécaniques,  
la déformabilité & la durabilité du béton**

Présenté par :  
**Salim Guettala**

Soutenue publiquement le : 15 / 03 / 2012

**Devant le jury composé de :**

Dr. Chebili Rachid	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. Mezghiche Bouzidi	Maître de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. Chabil Hocine	Professeur	Examineur	Université de Constantine
Dr. Boudchicha Abdelaziz	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université d'Oum El-Bouaghi
Dr. Cheikh-Zouaoui Mustapha	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université d'Oum El-Bouaghi

---

## *REMERCIEMENTS*

**A** tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse. Tout d'abord, j'adresse ma profonde gratitude à Monsieur Dr. MEZGHICHE Bouzidi, chargé de cours à l'U.M.K.B, je le remercie pour sa constante disponibilité, pour son écoute, pour sa grande qualité pédagogique et humaine.

Le travail présenté ici a été réalisé au sein des laboratoires suivants:

- Laboratoire de génie civil - Université de Biskra.
- Laboratoire et Bureau d'étude Suivi et Technique (L.B.S.T) - Biskra.
- Laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta - Batna.
- Laboratoire de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaâ - M'sila.
- Laboratoire de physique - Université de Laghouat.
- Laboratoire de Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (C.E.T.I.M) - Boumerdès.

Je tiens également à remercier Monsieur le Recteur de l'université de Biskra ainsi que le Doyen de la faculté.

J'exprime ma profonde gratitude au chef de département pour ses encouragements et son assistance qu'il n'a cessé de me prodiguer.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur CHEBILI Rachid président de jury, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membre de jury et de bien vouloir juger ce travail.

- Pr. CHABIL Hocine
- Dr. BOUDCHICHA Abdelaziz
- Dr. CHEIKH-ZOUAOUI Mustapha

Enfin, je remercie très chaleureusement mes parents, ma femme, mes enfants (Salah, Aissa et Sara), mes sœurs, mes frères, mes collègues et tous ceux qui m'ont aidé à finaliser ce travail.

---

---

## RÉSUMÉ

**E**n Algérie, la demande du marché pour le ciment a fortement augmenté, suivant le développement de l'industrie et les besoins de l'urbanisation croissante. La recherche d'un ciment moins coûteux en utilisant des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour pallier au déficit dans la fabrication du ciment.

La contribution de l'ajout du sable de dune finement broyé (Sd) à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets: un effet physico-chimique et un effet chimique. Son rôle est d'une part de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, de réagir en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances physico-mécaniques du ciment et du béton. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

Les résultats ont démontré que jusqu'à 20% Sd pour remplacer le ciment Portland peut être utilisé avec une finesse de 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  sans affecter négativement la résistance à la compression, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10 %. Au-delà d'une teneur de 20%, l'effet de dilution devient prépondérant et entraîne une diminution des résistances à la compression. Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle.

L'utilisation du sable de dune finement broyé améliore globalement la structure poreuse du béton et contribue aussi à la densification de l'interface (mortier/gravier). De ce fait, le sable de dune finement broyé modifie les caractéristiques de rupture (déformabilité), ce qui permet une nette augmentation de la durabilité du béton.

Ces résultats justifient bien l'intérêt que présente la valorisation du sable de dune. Toutefois, afin d'assurer le développement de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et techniques.

**Mots clés:** *Ciment, Béton, Sable de dune finement broyé, Performances physico-mécaniques, Déformabilité et Durabilité.*

---

---

## *ABSTRACT*

**I**n Algeria, the market demand for cement has strongly increased, because of the industrial development and the needs for the increasing urbanization. Searching for cheaper cement made of local natural resources has become a major concern to compensate the deficit in the manufacture of cement.

The contribution of the addition the finely crushed dune sand (Ds) on the cement binding activity results primarily from two effects: a physico-chemical effect and a chemical effect. Its role is on the one hand it changes the hydration process of cement as well as the structuring of hydrated products, on the other; it reacts in the cementing medium and develops new hydrated products. These effects act simultaneously and in a complementary way on the physico-mechanical performances of cement and concrete. The third physical effect which is the granular effect related to the changes induced by the presence of the fine particles in the solid skeleton of the mixture.

The results proved that up to 20% Ds as Portland cement replacement could be used with a fineness of 4000 cm<sup>2</sup>/g without affecting adversely the compressive strength, with an optimum effect for a percentage of the order of 5% to 10%. Beyond a content of 20%, the dilution effect becomes dominant and leads to decreased compressive strengths. The finely crushed dune sand, despite its crystalline nature, presents a partial pozzolanic reactivity.

The use of the finely crushed dune sand improves overall porous structure of concrete and also contributes to the thickening of the interface (mortar/gravel). Thus, the finely crushed dune sand change the fracture characteristics (deformability), this allows an increase net in durability of concrete.

These results justify well the interest that presented valorization of the dune sand. However, to ensure the development of this vital building material, the approach of sustainable development should be incorporated into the production of cement and concrete, which will enable it to reach a balance between the constraints of environmental protection and the economic and technical considerations.

**Key words:** *Cement, Concrete, Finely crushed dune sand, Physico-mechanical performances, Deformability and Durability.*

---

## ملخص

**في** الجزائر، ازداد الطلب على الاسمنت في السوق بشكل حاد، وذلك بسبب التطور الصناعي واحتياجات التوسع العمراني المتزايدة. أصبح البحث عن تكلفة اقل للاسمنت باستخدام الموارد الطبيعية المحلية مصدر قلق كبير لتغلب على العجز في صناعة الاسمنت.

مساهمة إضافة رمل الكثبان الناعم و المسحوق للإسمنت له تأثير على نشاط ترابط الأسمنت الناتج أساسا عن تأثيرين : تأثير فيزيو كيميائي و تأثير كيميائي. ويتمثل دورها من جهة تغيير عملية الاماهة للإسمنت وهيكله المركبات المائية، ومن جهة أخرى، التفاعل في الوسط الإسمنتي لتكوين مركبات مائية جديدة. هذه الآثار تؤثر في وقت واحد و بطريقة متكاملة على الفعالية الفيزيوميكانيكية للإسمنت والخرسانة. التأثير الثالث الفيزيائي الذي هو تأثير حبيبي خاص بالتغيرات المحدثة بوجود جزيئات دقيقة في الهيكل الصلب للخليط.

النتائج أثبتت أنه حتى نسبة 20 ٪ من رمل الكثبان الناعم و المسحوق ليحل محل الاسمنت البورتلاندي يمكن استخدامها بنعومة 4000 سم<sup>2</sup>/غ دون أن يؤثر ذلك سلبا على مقاومة الضغط، مع وجود تأثير امثل من أجل النسبة المئوية من 5 ٪ إلى 10 ٪. وما فوق نسبة 20 ٪، يصبح تأثير كمية الاسمنت وحده المهيمن ويؤدي إلى انخفاض مقاومة الضغط. رمل الكثبان الناعم و المسحوق، بالرغم من طبيعته البلورية، يحدث تفاعل بوزلاني جزئي.

استخدام رمل الكثبان الناعم و المسحوق يحسن عموما بنية المسامية للخرسانة ويساهم أيضا في تكثيف المجال بين (الميلاط / الحصى). وهكذا، فإن رمل الكثبان الناعم و المسحوق يغير خصائص الانكسار (التشوه)، وهذا يسمح بالزيادة في ديمومة الخرسانة.

هذه النتائج تبرير الفائدة من استخدام رمل الكثبان الناعم. ومع ذلك، لضمان تطوير هذه المادة الأساسية للبناء، ينبغي إدراج نهج التنمية المستدامة في إنتاج الاسمنت والخرسانة، والتي سوف تمكننا من التوصل إلى توازن بين حماية البيئة والاعتبارات الاقتصادية والتقنية.

**كلمات المفاتيح:** إسمنت، خرسانة، رمل الكثبان الناعم و المسحوق، الفعالية الفيزيوميكانيكية، التشوه والديمومة.

## TABLE DES MATIERES

<b>Sommaire</b>	<b>N° de page</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>	1
<b>LISTE DES FIGURES &amp; TABLEAUX</b>	4
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	7
1. Contexte	7
2. Objectifs visés	8
3. Méthodologie de travail	8
<b>PREMIERE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>CHAPITRE I : MATÉRIAUX CIMENTAIRES</b>	
I.1. INTRODUCTION	9
I.2. HISTORIQUE	9
I.3. CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES	10
I.3.1. CIMENT	10
I.3.1.1. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland	11
I.3.1.1.1. Finesse	11
I.3.1.1.2. Composition chimique et minéralogique	12
I.3.1.1.2.1. Clinker	12
I.3.1.1.2.2. Gypse	12
I.3.2. SQUELETTE GRANULAIRE	12
I.3.3. EAU	13
I.3.4. ADDITIONS CIMENTAIRES	14
I.3.4.1. Définition	14
I.3.4.2. Classification des additions	14
I.3.4.3. Action des additions cimentaires	15
I.3.4.3.1. Effet granulaire	15
I.3.4.3.2. Effet physico-chimique	16
I.3.4.3.3. Effet chimique	18
I.3.4.4. Comportement du ciment avec addition	23
I.3.4.5. Enjeux environnementaux	23
I.3.4.6. Bénéfices de l'utilisation des additions minérales	24
I.3.4.6.1. Bénéfices techniques	24
I.3.4.6.2. Bénéfices économiques	24
I.3.4.6.3. Bénéfices écologiques et environnementaux	24
I.3.4.7. Poudre de silice	25
I.3.4.7.1. Définition	25
I.3.4.7.2. Effets	25
I.3.4.7.3. Fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes	29
I.3.4.7.4. Sable de dune finement broyé	29
I.4. HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES	32
I.4.1. HYDRATATION	32
I.4.1.1. Définition	32
I.4.1.2. Degré d'hydratation	32
I.4.1.3. Aspects cinétiques et prise	32
I.4.1.3.1. Hydratation des silicates $C_3S$ et $\beta C_2S$	33
I.4.1.3.2. Hydratation des aluminates $C_3A$ et $C_4AF$	33
I.4.1.4. Chimie d'hydratation du ciment Portland avec additions	34
I.4.2. MICROSTRUCTURE DES MATERIAUX CIMENTAIRES	34
I.4.2.1. Composition du ciment hydraté	34
I.4.2.2. Composition des hydrates	34
I.4.2.2.1. Silicates de calcium hydraté	35
I.4.2.2.2. Chaux hydratée	35
I.4.2.2.3. Aluminates hydratés	35
I.5. FABRICATION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES	35
I.5.1. Composition	35

I.5.2. Malaxage	36
I.5.3. Ressuage et ségrégation	36
I.5.4. Retrait et gonflement	36
I.5.5. Traitement de cure	36
CONCLUSION	37

## **CHAPITRE II : STRUCTURE POREUSE, LA DÉFORMABILITÉ & LA DURABILITÉ DU BÉTON**

II.1. INTRODUCTION	38
II.2. CARACTÉRISTIQUES DE STRUCTURE POREUSE	38
II.2.1. Porosité	38
II.2.1.1. État de l'eau dans les matériaux cimentaires	39
II.2.1.2. Influence de rapport E/C sur la porosité	40
II.2.2. Connectivité	43
II.2.3. Tortuosité	43
II.3. DÉFORMABILITÉ	44
II.3.1. Définition	44
II.3.2. Déformations instantanées	45
II.4. DURABILITÉ	46
II.4.1. PERMÉABILITÉ	46
II.4.1.1. Définition	46
II.4.1.2. Paramètres influençant les propriétés de transfert	47
II.4.1.2.1. Influence de rapport E/C	47
II.4.1.2.2. Influence de la durée de cure humide	48
II.4.1.2.3. Influence des fumées de silice	49
II.4.1.2.4. Influence du degré de saturation	49
II.4.1.2.5. Influence de la température	50
II.4.1.2.6. Interface pâte/granulat	50
II.4.1.2.6.1. Définition	50
II.4.1.2.6.2. Mécanisme de formation	51
A. Effet de paroi	51
B. Effet de ressuage localisé	52
II.4.1.2.6.3. Caractéristiques de la zone de transition interfaciale	53
II.4.1.2.6.4. Facteurs d'influence	54
II.4.1.2.6.5. Microstructure de l'interface pâte/granulat	56
II.4.1.2.7. Fissuration	58
II.4.2. RÉSISTANCES AUX EAUX AGRESSIVES	58
II.4.2.1. Définition	58
II.4.2.2. Eaux pures et eaux douces	59
II.4.2.3. Eaux contenant des sulfates	60
II.4.2.4. Eaux contenant des chlorures	60
II.4.2.5. Eau de mer	61
II.4.2.6. Action des chlorures seuls	63
II.4.2.7. Action des sulfates seuls	64
CONCLUSION	68

## **DEUXIEME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

### **CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES**

III.1. INTRODUCTION	69
III.2. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX	69
III.2.1. SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ	70
III.2.1.1. Analyse chimique	70
III.2.1.2. Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X	70
III.2.1.2.1. Nature minéralogique	72
III.2.1.3. Propriétés physiques	73
III.2.2. CIMENT	73
III.2.2.1. Ciment Portland préparé	73
III.2.2.1.1. Analyse chimique et minéralogique	73
III.2.2.1.2. Propriétés physiques	73

III.2.2.2. Ciment Portland composé	73
III.2.2.2.1. Analyse chimique et minéralogique	73
III.2.2.2.2. Propriétés physiques	74
III.2.3. EAU	74
III.2.4. SABLE	74
III.2.4.1. Analyse granulométrique	74
III.2.4.2. Propriétés physiques	74
III.2.5. PIERRE CONCASSÉE	74
III.2.5.1. Analyse granulométrique	74
III.2.5.2. Propriétés physiques	74
<b>CHAPITRE IV : ÉTUDE DU LIANT &amp; MORTIER NORMALISÉ</b>	
IV.1. INTRODUCTION	76
IV.2. ÉTUDE DU LIANT	76
IV.2.1. PROPORTIONS DES MÉLANGES	77
IV.2.2. RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES PÂTES DU CIMENT	77
IV.2.2.1. Influence du temps	82
IV.2.2.2. Influence de la teneur du ciment en sable de dune finement broyé	82
IV.2.2.3. Influence de variation de finesse du sable de dune finement broyé	83
IV.2.2.4. Influence de variation de rapport E/L	83
IV.2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES PÂTES	83
IV.2.4. RÉACTIVITÉ POUZZOLANIQUE DU SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ	84
IV.2.4.1. Évolution de l'hydratation des mélanges (50% Chaux + 50% Sd)	85
IV.2.4.2. Évolution de l'hydratation des mélanges (80% CPA + 20% Sd)	85
IV.2.5. ACTION DES EAUX AGRESSIVES	87
IV.3. ÉTUDE DU MORTIER NORMALISÉ	89
IV.3.1. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	89
IV.3.2. RETRAIT & GONFLEMENT	90
CONCLUSION	93
<b>CHAPITRE V : PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES, LA DÉFORMABILITÉ &amp; LA DURABILITÉ DU BÉTON</b>	
V.1. INTRODUCTION	96
V.2. FORMULATION DE BÉTON	96
V.2.1. Données de base	96
V.2.2. Méthode de calcul	97
V.2.3. Composition	97
V.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	98
V.3.1. Consistance du béton à l'état frais	98
V.3.2. Porosité volumique du béton à l'état durci	98
V.3.2.1. Variation de la porosité en fonction du temps et du type de ciment	100
V.4. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	100
V.4.1. Variation de la résistance mécanique en fonction du temps et du type de ciment	101
V.4.2. Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité volumique	103
V.5. DÉFORMABILITÉ	103
V.6. DURABILITÉ	108
V.6.1. PERMÉABILITÉ	108
V.6.1.1. Variation de la perméabilité en fonction du temps et du type de ciment	110
V.6.1.2. Variation de la perméabilité en fonction de la porosité volumique	110
V.6.1.3. Variation de la perméabilité en fonction de la résistance en compression	110
V.6.2. ÉVOLUTION DE PERMÉABILITÉ À L'EAU EN COURS DE DESSICCATION	111
V.6.3. INTERFACE MORTIER/GRAVIER	112
CONCLUSION	126
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE &amp; PERSPECTIVES</b>	129
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	131
<b>LISTE DES PUBLICATIONS &amp; COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE</b>	141
<b>ANNEXES</b>	142



## LISTE DES FIGURES

<b>N° et titre de la figure</b>	<b>N° de page</b>
<b>Figure I.1</b> : Adsorbats en surface des grosses particules	19
<b>Figure I.2</b> : Décomposition de la résistance en compression en fractions dues aux effets physiques et chimiques de l'addition minérale	20
<b>Figure I.3</b> : Résistance en compression à 7, 28, 90 et 180 jours des mortiers contenant des additions minérales de quartz et des cendres volantes de même finesse par rapport à une addition de référence avec l'effet de dilution seul	21
<b>Figure I.4</b> : Amélioration de la résistance en compression $\Delta f_p$ à 7, 28, 90 et 180 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz	22
<b>Figure I.5</b> : Amélioration de la résistance en compression $\Delta f_{p2}$ à 7, 28, 90 et 180 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz (FAA) et des cendres volantes (FAC)	22
<b>Figure I.6</b> : Effet de la fumée de silice sur l'hydratation du ciment	25
<b>Figure I.7</b> : Effet de la fumée de silice sur la compacité du béton	26
<b>Figure I.8</b> : Effet de la fumée de silice sur le ressuage	26
<b>Figure I.9</b> : Effet de la fumée de silice sur la cohésion interne	27
<b>Figure I.10</b> : Effet de la fumée de silice sur la réaction d'hydratation	27
<b>Figure I.11</b> : Effet de la fumée de silice sur la structure de la pâte de ciment	28
<b>Figure I.12</b> : Effet de la fumée de silice sur la perméabilité à l'eau	28
<b>Figure I.13</b> : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression	28
<b>Figure I.14</b> : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction	28
<b>Figure I.15</b> : Effet de la fumée de silice sur la résistance contre les agressions chimiques	28
<b>Figure I.16</b> : Diffractogramme X du sable de dune broyé	30
<b>Figure I.17</b> : Hydratation des pâtes aux différents âges (85% CPJ 42.5 + 15% Sd)	30
<b>Figure I.18</b> : Pâte de ciment hydrate 7 jours : Ca (OH) <sub>2</sub> et C-S-H (SEM 7000X)	33
<b>Figure II.1</b> : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité	38
<b>Figure II.2</b> : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton	39
<b>Figure II.3</b> : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci	40
<b>Figure II.4</b> : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau	42
<b>Figure II.5</b> : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau	42
<b>Figure II.6</b> : Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte	43
<b>Figure II.7</b> : La courbe expérimentale contrainte-déformation	45
<b>Figure II.8</b> : Etapes classiques d'endommagement par niveaux de contrainte du test de caractérisation des bétons	46
<b>Figure II.9</b> : Effet des paramètres influençant la perméabilité	47
<b>Figure II.10</b> : Evolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure	48
<b>Figure II.11</b> : Nombre minimal de jours de cure pour le béton compact	48
<b>Figure II.12</b> : Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h	49
<b>Figure II.13</b> : Empilement des grains au contact de la roche	52
<b>Figure II.14</b> : Schéma de la zone de transition interfaciale	54
<b>Figure II.15</b> : Interface entre un granulats et une pâte de ciment Portland hydratée	57
<b>Figure II.16</b> : Hydrates fibreux à l'interface pâte/granat (grandissement 600x)	57
<b>Figure II.17</b> : Calcite et aiguilles d'étringite à la surface de la fissure (grandissement 1000x)	57
<b>Figure III.1</b> : Représentation d'un broyeur à boulets	69
<b>Figure III.2</b> : Échantillon du sable de dune	69
<b>Figure III.3</b> : Échantillon du clinker	69
<b>Figure III.4</b> : Diffractomètre de poudre à compteur courbe et la loi de Bragg	71
<b>Figure III.5</b> : Paramètres de diffractomètre	72
<b>Figure III.6</b> : Diffractogramme X (sable de dune finement broyé)	72

<b>Figure III.7</b> : Courbe granulométrique du sable et gravier	75
<b>Figure IV.1</b> : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_1 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,4$ )	78
<b>Figure IV.2</b> : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,4$ )	78
<b>Figure IV.3</b> : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_1 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,3$ )	79
<b>Figure IV.4</b> : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,3$ )	79
<b>Figure IV.5</b> : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_1 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,25$ )	79
<b>Figure IV.6</b> : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,25$ )	80
<b>Figure IV.7</b> : Variation de la résistance à la compression de ciment en (%) par rapport à la pâte de référence en fonction de la teneur en sable de dune broyé ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,25$ )	80
<b>Figure IV.8</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,25$ )	80
<b>Figure IV.9</b> : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment a 20% Sd en fonction du rapport $E/(C+Sd)$	81
<b>Figure IV.10</b> : Développement du gain de résistance à la compression en fonction de l'âge ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , $E/(C+Sd) = 0,25$ )	81
<b>Figure IV.11</b> : Hydratation des pâtes aux différents âges (50% Chaux + 50% Sd)	85
<b>Figure IV.12</b> : Hydratation des pâtes aux différents âges (80% CPA + 20% Sd)	86
<b>Figure IV.13</b> : Variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution $\text{MgCl}_2$ en fonction du temps	87
<b>Figure IV.14</b> : Variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution $\text{Na}_2\text{SO}_4$ en fonction du temps	88
<b>Figure IV.15</b> : Résistance du mortier à la compression, flexion et traction à 28 jours en fonction du type de ciment	89
<b>Figure IV.16</b> : Variation linéaire du mortier en fonction du temps dans le cas de retrait	90
<b>Figure IV.17</b> : Variation linéaire du mortier en fonction du temps dans le cas de gonflement	91
<b>Figure IV.18</b> : Variation massique du mortier en fonction du temps dans le cas de retrait	91
<b>Figure IV.19</b> : Variation massique du mortier en fonction du temps dans le cas de gonflement	91
<b>Figure V.1</b> : Pesée hydrostatique	99
<b>Figure V.2</b> : Porosité accessible à l'eau des bétons en fonction du temps	99
<b>Figure V.3</b> : Résistance à la compression des bétons en fonction du temps	100
<b>Figure V.4</b> : Résistance à la flexion des bétons en fonction du temps	101
<b>Figure V.5</b> : Résistance à la traction par fendage en fonction du temps	101
<b>Figure V.6</b> : Emplacement des cadres et cadrans sur l'éprouvette	104
<b>Figure V.7</b> : Déformations mesurées pendant la compression	104
<b>Figure V.8</b> : Déformations élasto-instantanées longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives	105
<b>Figure V.9</b> : Déformation élasto-instantanées totales longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives	105
<b>Figure V.10</b> : Module de déformabilité des bétons en fonction des contraintes relatives	105
<b>Figure V.11</b> : Module d'élasticité des bétons	106
<b>Figure V.12</b> : Appareillage d'essai de perméabilité	108
<b>Figure V.13</b> : Variation du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du temps	109
<b>Figure V.14</b> : Influence du degré de dessiccation sur la perméabilité des bétons en fonction du temps	111
<b>Figure V.15</b> : Sections des bétons	113
<b>Figure V.16</b> : Microscope électronique à balayage de l'université de Biskra	113
<b>Figure V.17</b> : Les échantillons (BO et B10)	114
<b>Figure V.18</b> : Observation au MEB de la zone de transition interfaciale	122
<b>Figure V.19</b> : Microanalyse élémentaire par spectrométrie X	124
<b>Figure V.20</b> : Diagramme de phase des C-S-H de Verbeck et Copeland cité par [163]	125

## LISTE DES TABLEAUX

<b>N° et titre de tableau</b>	<b>N° de page</b>
<b>Tableau I.1</b> : Classification des additions selon leur réactivité	14
<b>Tableau I.2</b> : Effet de la réaction pouzzolanique des fumées de silice sur des pâtes de ciment	28
<b>Tableau III.1</b> : Analyse chimique du sable de dune finement broyé	70
<b>Tableau III.2</b> : Composition chimique et minéralogique du clinker	73
<b>Tableau III.3</b> : Composition chimique et minéralogique du CPJ-CEM II/A - 42.5	73
<b>Tableau III.4</b> : Analyse chimique de l'eau	74
<b>Tableau IV.1</b> : Détails des proportions des mélanges	77
<b>Tableau IV.2</b> : Propriétés physiques des pâtes	83
<b>Tableau V.1</b> : Compositions des bétons en (kg/m <sup>3</sup> )	98
<b>Tableau V.2</b> : Résultats des essais de perméabilité effectués sur bétons	111

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1. Contexte

**L**a société et les pouvoirs publics sont de plus en plus intransigeants vis-à-vis des problèmes de pollution occasionnés par le gaz carbonique dégagé et par la forte consommation d'énergie lors de la fabrication du ciment.

La production du ciment Portland, a un coût énergétique élevé, calciné à de hautes températures, sa production coûte chère. Les ciments avec additifs permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler certains problèmes environnementaux en plus d'offrir au béton de meilleures performances.

Depuis 1970, un grand effort de recherches a été fourni sur l'utilisation des additifs cimentaires en tant que substitution partielle au ciment Portland. Ces additifs proviennent de sources naturelles ou de sous-produits d'autres industries [131].

La compacité de la pâte de ciment peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés C-S-H II. Ces derniers s'obtiennent par introduction de fines particules siliceuses dotées d'un rôle pouzzolanique certain et contribuent à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des bétons auxquels elles sont incorporées [5 et 26].

L'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune broyé (Sd). En effet, la faible quantité de portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence du Sd, traduit la réaction pouzzolanique partielle de cette addition, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité des pâtes du ciment, et montre aussi que le Sd est constitué de minuscules grains de quartz  $\text{SiO}_2$  bien cristallisé du type low-quartz [2, 3 et 4].

Le sable de dune est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie (près de 60% du territoire national). Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter.

La contribution de l'ajout du sable de dune finement broyé à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets: un effet physico-chimique et un effet chimique. Son rôle est d'une part de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, de réagir en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances physico-mécaniques du ciment et du béton. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, et permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé. De la sorte d'établir la possibilité de la diminution du prix de revient du ciment et du béton.

La durabilité est dans la plupart des cas liée à l'aptitude du matériau à résister à la pénétration d'agents agressifs. De plus, tout mécanisme de dégradation, même interne, fait intervenir un processus de transport vont donc jouer un rôle clé dans l'évaluation et la prévision de la durabilité des ouvrages. Les indicateurs de durabilité retenus pour cette étude: la stabilité chimique du ciment en milieux agressifs mesurée sur des pâtes du ciment ; la stabilité volumique des mortiers (retrait et gonflement) ; la porosité volumique, la perméabilité à l'eau des bétons, l'évolution de la perméabilité à l'eau en cours de dessiccation et l'interface mortier/gravier des bétons.

## **2. Objectifs visés**

**L'**objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement la contribution combinée des effets physique, physico-chimique et chimique de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton.

## **3. Méthodologie de travail**

Cette thèse est structurée en cinq chapitres:

- ✎ Le premier est consacré à une synthèse bibliographique qui permet de présenter l'état des connaissances sur les composants du béton et les additions cimentaires, ainsi que l'hydratation, la microstructure et la fabrication des matériaux cimentaires.
- ✎ Le deuxième est consacré à un certain nombre de connaissance de base sur la structure poreuse, la déformabilité & la durabilité du béton.
- ✎ Le troisième fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques & minéralogiques des matériaux utilisés.
- ✎ Le quatrième chapitre concerne l'étude du liant & mortier normalisé.
- ✎ Le cinquième chapitre consiste à l'étude des propriétés physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton.

Enfin, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

## CHAPITRE I

### MATÉRIAUX CIMENTAIRES

#### I.1. INTRODUCTION

**L**a connaissance des matériaux cimentaires fait appel à diverses disciplines scientifiques: (chimie, physique et mécanique) pour améliorer sa qualité et son développement durable.

Ce premier chapitre décrit les caractéristiques des composants du béton, et une bibliographie concernant les additions cimentaires, la classification et leur action, ainsi que l'hydratation, la microstructure et la fabrication des matériaux cimentaires.

#### I.2. HISTORIQUE

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la chaux éteinte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice. L'association des caractéristiques de ce matériau avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle: le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans.

L'utilisation de ce matériau et les secrets de sa fabrication se sont ensuite perdus à la chute de l'empire face au retour de la maçonnerie en pierre. **John Smeaton** redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile.

En 1817, **Louis Vicat** donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. **Joseph Apsdin** donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon, mais ce brevet comportait encore des points obscurs.

C'est uniquement en 1845 que l'Anglais **Johnson** indique de façon précise les règles de fabrication du ciment. La dénomination Portland, due à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie [171].

Cependant la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, mouillable avec une bonne résistance à la compression. En 1890, on comprend l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et, après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente: par exemple le ciment alumineux fut découvert par **Jules Bied**, en 1908.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 Mpa, et même 140 Mpa dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 Mpa [72].

### **I.3. CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES**

Les caractéristiques physico-mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci dépendent de sa composition et des différentes actions mécaniques auxquelles il est soumis lors de sa fabrication. Le béton est sujet à un ensemble de mécanismes de structuration (hydratation, floculation, ... etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, ... etc.). Les trois composants de base sont l'eau, le ciment et les granulats.

Des additions peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

#### **I.3.1. CIMENT**

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment Portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse  $\text{CaSO}_4$  finement broyé et d'additions éventuels. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement dans des broyeurs à boulets. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique où surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La finesse habituelle est de l'ordre de  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , elle passe à  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80% de calcaire  $\text{CaCO}_3$  et 20% d'argile. L'argile est composée de silice, d'alumine et d'autres phases qui sont présentes à de faibles proportions telles que l'oxyde de fer, le magnésium, l'oxyde de potassium, l'oxyde de sodium.

Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique  $\text{C}_3\text{S}$  dénommé alite, de silicate bicalcique  $\beta\text{C}_2\text{S}$  ou bélite, d'aluminate  $\text{C}_3\text{A}$  ou célite, d'aluminoferrite tétracalcique  $\text{C}_4\text{AF}$  ou Felite, et d'autres phases mineures.

Le  $\text{C}_3\text{S}$  est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70% de sa masse. Le  $\beta\text{C}_2\text{S}$ , le  $\text{C}_3\text{A}$  et le  $\text{C}_4\text{AF}$  représentent respectivement 15 à 30%, 5 à 10% et 5 à 15% du clinker classique. (Pour plus de détails voir [27]). Ces composés sont refroidies, broyés et mélangés au gypse pour former le ciment.

### **I.3.1.1. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland**

Les paramètres de fabrication du ciment Portland ont une influence indéniable sur les caractéristiques du produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de: la composition chimique, le traitement thermique (chauffage et refroidissement) et de la finesse du clinker [27 et 130].

#### **I.3.1.1.1. Finesse**

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes.

En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée. Pour obtenir de bonnes résistances mécaniques, il est nécessaire de mouler finement le clinker, cela fait augmenter la proportion d'hydrates dans le béton durci par rapport aux anhydres [21].

Pour les bétons à faibles rapport E/C, cette augmentation de finesse conduit à l'augmentation de la compacité de la pâte. Par ailleurs, si la proportion de grain de ciment ultrafins devient importante, la prise risque d'être instantanée dès le gâchage et conduira à un ciment, à forte chaleur d'hydratation, générateur de contraintes d'origine thermique, et donc des fissurations dans la peau des pièces massives [21]. L'augmentation de la finesse conduit également à l'augmentation des coûts du ciment.



Lors du broyage, il y a rupture de liaisons chimiques. Cela signifie que des charges électriques sont créées à la surface des grains. Certaines de ces charges pourront être neutralisées par des ions et des électrons présents dans l'atmosphère du broyeur. La plupart resteront insaturées cependant, et les grains de ciment porteront des charges à la sortie du broyeur. La surface présente des charges positives aussi bien que des charges négatives. Par contre, en raison de la taille importante des sites négatifs par rapport aux sites positifs, une grande part de la surface est chargée négativement, comme c'est le cas pour la plupart des minerais [110].

### **I.3.1.1.2. Composition chimique et minéralogique**

#### **I.3.1.1.2.1. Clinker**

Le clinker est le produit sortant du four à ciment avant broyage. Les clinkers obtenus peuvent être très différents les uns des autres suivant les matières premières utilisées, le procédé de fabrication et la vitesse de refroidissement.

#### **I.3.1.1.2.2. Gypse**

Durant la fabrication du ciment Portland, on ajoute du sulfate de calcium (gypse) afin de réguler la prise. En particulier, le contrôle de l'hydratation est lié à la quantité d'ions  $\text{SO}_4^{-2}$  en solution, qui dépend elle-même de la solubilité du sulfate de calcium ajouté au clinker.

### **I.3.2. SQUELETTE GRANULAIRE**

C'est le mélange de sable et de graviers, il intervient dans la résistance finale du béton et occupe près de 3/4 du volume du béton et influe donc sur ses propriétés. Du point de vue économique, car il permet de diminuer la quantité de liant qui est plus cher, du point de vue technique, car il augmente la stabilité dimensionnelle et plus résistants que la pâte de ciment. Sa utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [135].

La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais. La résistance du béton est fonction du rapport eau/liant, la maniabilité du béton frais est, quant à elle surtout, affectée par la granulométrie des granulats. La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation et réduisent le ressuage du béton frais. La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive.

Les granulats réactifs peuvent, avec des parties de ciment, entraîner des dommages nuisibles pour le béton en raison de l'alcali-réaction. Plus les granulats sont arrondis, meilleure est l'ouvrabilité du béton frais. Plus les grains sont anguleux, meilleure sera la résistance à la traction et à la flexion du béton. Plus la résistance des granulats est importante, meilleure sera la résistance définitive du béton.

Selon les résultats de *Rossi and Toutlemonde* [164], la granulométrie joue un rôle important sur la déformation au seuil de non-linéarité, plus le volume de granulats grossiers est élevé, plus faible est cette déformation. Un volume plus élevé de granulats grossiers a donc tendance à anticiper la propagation des microfissures ce qui s'explique par le fait que les interfaces des granulats les plus grossiers sont plus faibles que ceux des granulats plus fins.

### **I.3.3. EAU**

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales: elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau est constituée de molécules polaires de H<sub>2</sub>O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques.

L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces intergranulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (tels que les ciments et les fines). L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment & fines) avec elle. [72]. L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Rappelons qu'un ciment Portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement (sous réserve des problèmes de floculation et d'expansion). Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications et des performances mécaniques. Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont: [72].

- Risque de ressuage et de ségrégation.
- Augmentation de la porosité et le retrait.
- Diminution de la compacité et corrélativement la résistance.

Le dosage en eau doit donc être limité au (juste nécessaire) à l'hydratation du liant et aux exigences d'ouvrabilité. L'eau est le mal nécessaire de réglage le plus simple de la consistance, mais son augmentation entraîne une diminution de la résistance à la compression de béton et affecte la durabilité.

### **I.3.4. ADDITIONS CIMENTAIRES**

#### **I.3.4.1. Définition**

Les additions pour béton sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelque fois également au béton. Les additions permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les additions doivent être prises en compte dans le calcul de la composition du béton.

Des additions, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire.

Les pays industrialisés tels que les États-Unis, Russie, France, Allemagne, Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau [6].

#### **I.3.4.2. Classification des additions**

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des additions qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs.

Les additions peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau I.1 ci dessous.

**Tableau I.1** : Classification des additions selon leur réactivité

<b>Type</b>	<b>Réactivité</b>	<b>Matériaux</b>
<i>hydraulique</i>	<i>Fortement Réactif</i>	<i>Ciments spéciaux, Chaux hydraulique.</i>
<i>Hydraulique Latent</i>	<i>Réactif</i>	<i>Laitier granulé, Cendres volantes riches en calcium (calciques).</i>
	<i>Fortement Réactif</i>	<i>Fumée de silice</i>
<i>Pouzzolanique</i>	<i>Moyennement Réactif</i>	<i>Cendres volantes pauvres en calcium, Pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, Tufs volcaniques, Trass, phonolithe, terres à diatomées).</i>
	<i>Faiblement Réactif</i>	<i>Scories cristallines.</i>
<i>Inerte</i>	<i>Non Réactif</i>	<i>Filler (farine calcaire,...), Fibres, Pigments colorants, Matières expansives, Dispersions synthétiques.</i>

### I.3.4.3. Action des additions cimentaires

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [38].

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes [13, 38, 40-42, 93 et 101-103] s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

- **Un effet granulaire (filler)** résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.
- **Un effet physico-chimique** engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.
- **Un effet purement chimique** propre à certaines additions en milieu cimentaire, qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique.

Lorsque une addition minérale fine ou ultrafine est incorporée dans un mélange cimentaire, elle engendre des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires soit par un effet granulaire ou/et un effet physico-chimique et microstructural ou/et un effet chimique.

Les études récentes qui ont considéré l'influence des additions minérales sur les propriétés des mélanges cimentaires ont montré que celles-ci peuvent améliorer dans certains cas les performances des bétons (résistance mécanique & durabilité) [81, 101 et 153].

#### I.3.4.3.1. Effet granulaire

Un effet granulaire favorable qui conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci [38 et 66].

L'effet granulaire favorable ou défavorable des mortiers avec additions a été confirmé par plusieurs études et dépend de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale et les distributions granulaires [66, 70 et 93].

En effet plusieurs études [34, 48, 95, 96, 106 et 107], ont montré l'existence d'une optimisation des propriétés de la structure granulaire par l'incorporation des additions minérales de différentes natures et quantités [13, 15 et 183].

La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau plus réduite dans le mélange [66].

De même *Kronlof* [95], a montré en étudiant l'effet des agrégats ultrafins sur la résistance du béton, que l'incorporation dans une formulation de béton de trois additions de quartz de finesse différentes conduit à la diminution du besoin en eau en relation avec la quantité et la finesse du matériau de substitution.

Dans le même sens, *Kwan* [96], a montré en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant.

D'autre part *Yijin et al* [183], ont trouvé que l'incorporation de cendres volantes dans les pâtes de ciment, mortiers et bétons peut améliorer la fluidité du mélange, mais certaines additions plus grossières, ne pouvaient pas engendrer une réduction du besoin en eau.

Dans le même contexte, *Bessa* [13], a montré en étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques et mécaniques et de durabilité des mortiers, que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite.

#### **1.3.4.3.2. Effet physico-chimique**

Plusieurs auteurs ont confirmé que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis [38, 41, 46, 92, 101 et 108]. Certains auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment [129]. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [102].

De nombreux auteurs sont unanimes sur le fait que l'introduction des additions minérales dans un mélange cimentaire modifie le processus d'hydratation du ciment indépendamment de la nature de l'addition [13, 40, 46, 93, 101-103, 108, 129 et 135].

De même *Lilkov et al* [108], ont mesuré la quantité d'hydrates formés au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire et a montré que cette quantité est plus importante dans des mélanges cimentaires avec addition de la fumée de silice et cendres volantes que dans les mélanges sans addition.

Dans le même sens, ces résultats sont confirmés par *Jiang et Van Damme* [92], en étudiant l'action des additions siliceuses et calcaires sur le processus d'hydratation du  $C_3S$  pur. (*Care et al ; Lawrence et al*) [49 et 101] ont montré, en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que le degré d'hydratation à court terme des mortiers contenant des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de référence sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes. Ils ont également identifié les deux effets physiques principaux responsables de l'hydratation du ciment et ont montré que la nucléation hétérogène qui croît avec la finesse de l'addition, présente un optimum en fonction du taux de substitution du ciment.

Dans le même contexte, *Cyr et al* [41], ont montré en qualifiant les effets physiques des additions minérales sur l'hydratation à courts termes dans les mortiers, que pour une addition donnée, le surplus d'hydratation du ciment dépendait de la quantité d'addition incorporée. Ils ont aussi montré que les particules d'additions influencent la cinétique d'hydratation uniquement lorsqu'ils sont proches des grains de ciment et que ce n'était possible que lorsque la quantité de quartz dans le mélange reste peu importante.

Aujourd'hui, il n'est donc plus à démontrer que les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions du ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire [93, 103 et 135]. Cette nucléation hétérogène, qui est un processus physique, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment qui dépend de la finesse des particules d'additions, de la quantité d'addition dans le mélange et de l'affinité de la poudre d'addition (la nature) avec les hydrates de ciment [40 et 103].

Dans le même contexte pour les additions siliceuses, les particules de quartz peuvent constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [22 et 24].

D'autres auteurs ont aussi retenu que l'amélioration des résistances en compression est sûrement due aux phénomènes de nucléation hétérogène qui engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment par un processus physique [22, 46, 96 et 101]. Alors que l'effet physico-chimique concerne d'une façon générale toutes les additions minérales indépendamment de leur nature minéralogique.

Les additifs présentent une activité liante croissant avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance [14].

Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons [14].

#### **I.3.4.3.3. Effet chimique**

L'effet chimique des additions permet de les faire contribuer à l'évolution des résistances mécaniques aussi bien que les produits hydratés du ciment. Plusieurs auteurs ont montré que l'incorporation des quantités d'additions minérales peut engendrer dans certains cas des augmentations des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier [40, 42, 60, 92, 96, 102 et 103]. Ce comportement dépend de la nature, la quantité et la finesse de l'addition incorporée [40, 42, 92, 102 et 103].

L'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolanique et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment [38 et 93]. L'effet chimique, est dû à l'activité pouzzolanique de certaines additions qui améliore la résistance en compression du ciment. Les auteurs ont montré que l'effet chimique des cendres volantes commence à être significatif à partir de 07 jours et croît avec l'âge [40, 41 et 42]. Il en résulte que l'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Son action sur les propriétés du matériau durci peut être quantifiée par la mesure du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie rend difficile toute distinction claire entre ces deux effets et fait qu'ils peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment [13 et 15].

L'activité chimique des additions minérales est confirmée par plusieurs auteurs tels que [22, 40, 46, 49, 93, 96, 101, 103, 108, et 135].

La réaction pouzzolanique est une réaction secondaire qui se produit entre la chaux libérée par la réaction principale (produit hydraulique) et les produits silicoalumineux [23].

*Appa Rao* [9], a montré en étudiant le développement des résistances avec l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice, que pour un rapport E/L = 0.5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 30% de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier.

De même *Kwan* [96], a montré que, indépendamment du rapport eau/liant, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 15% de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression à 28 jours.

Dans le même contexte, *Benezet et Benhassaine* [22 et 24], ont montré également en étudiant l'influence de la taille des particules de quartz dans la réaction pouzzolanique, que les poudres de quartz pouvaient être considérées comme des produits pouzzolaniques puisqu'elles consomment la chaux pour former des hydrates stables. La réaction pouzzolanique se déroule lentement, elle se manifeste essentiellement après 28 jours. La réactivité des poudres de quartz cristallisé, mesurée dans un milieu statique (non activé) thermiquement (essai à 20°C), attribuée jusqu'à présent à une amorphisation de la surface des grains, résulte de la présence de grains très fins adsorbés sur la surface des grains plus gros. Comme la montre la figure I.1 ci dessous.

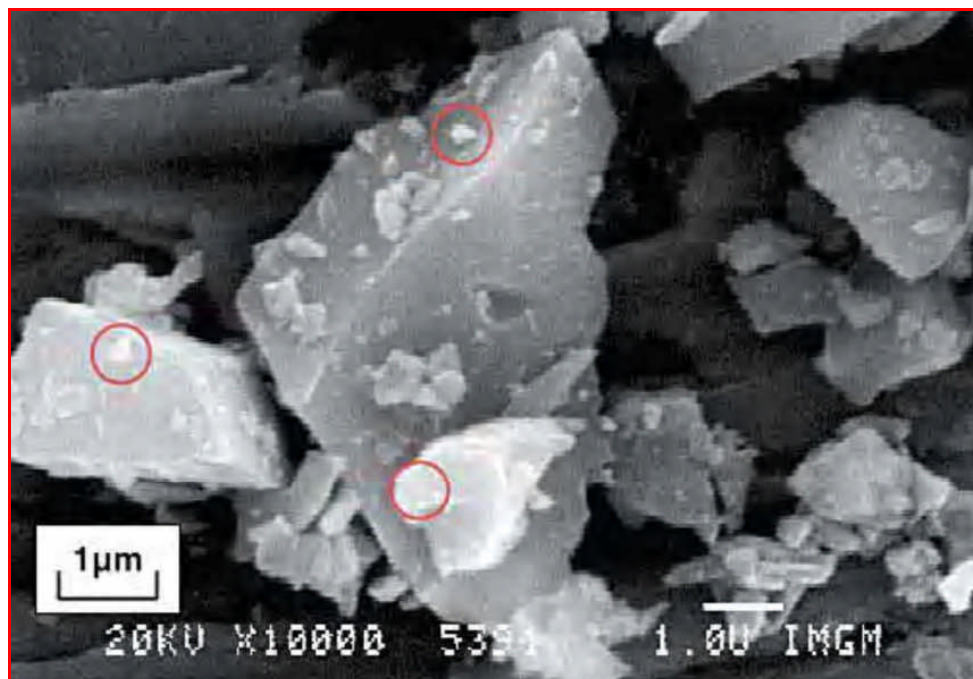


Figure I.1 : Adsorbats en surface des grosses particules [22 et 24]

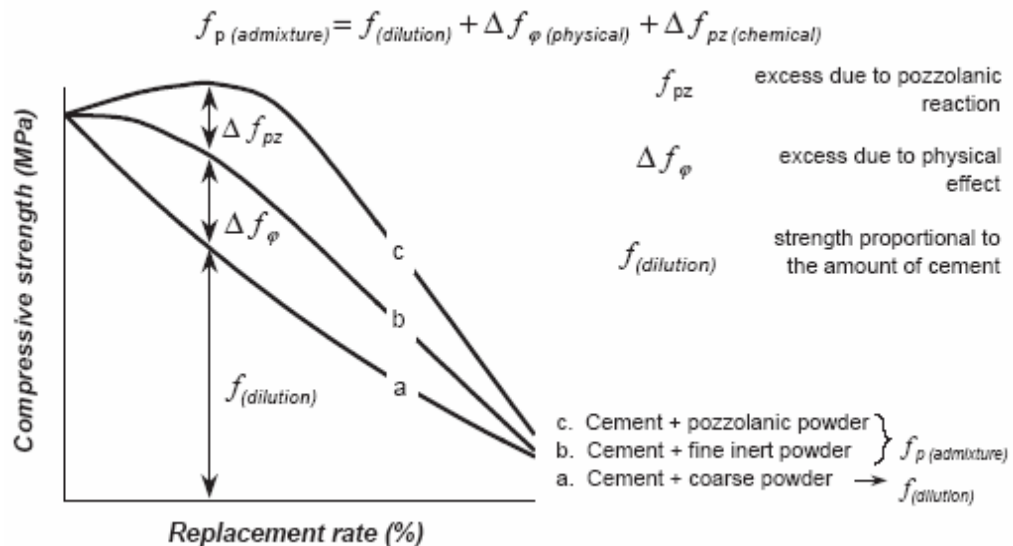


De même **Baron et Ollivier** [17] ont montré que cette réaction est pratiquement constante entre 1 et 28 jours, mais après 28 jours, l'activité pouzzolannique augmente, faisant croître la résistance mécanique et la durabilité.

Dans le même sens, **Cyr et al** [42], ont confirmé la réactivité chimique des additions calcaires en comparant l'évolution des résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec deux cendres volantes et une addition de calcaire.

Une approche plus explicite a été avancée par **Cyr et al** [40], pour quantifier les effets physiques et chimiques des additions sur les résistances en compression.

Dans cette approche la résistance en compression ( $f_p$ ) d'un mortier contenant une quantité ( $P\%$ ), d'addition minérale est représentée comme la combinaison de trois effets qui se superposent (figure I.2).



**Figure I.2 :** Décomposition de la résistance en compression en fractions dues aux effets physiques et chimiques de l'addition minérale [40]

**$f$  (dilution):** désigne la résistance proportionnelle à la quantité de ciment sans les effets physiques et chimiques des additions.

**$\Delta f_{\varphi}$  (physical):** désigne l'amélioration de la résistance qui est due à l'effet physique (l'effet filler et de la nucléation hétérogène).

**$\Delta f_{Pz}$  (chemical):** désigne l'amélioration de la résistance qui est due à l'effet chimique (l'activité pouzzolannique).

L'effet de dilution (figure I.3), a été expliqué comme étant la conséquence à la substitution du ciment par l'addition. Une quantité plus faible de ciment hydraté va engendrer des résistances en compression plus faibles.  $C = C_0 (100\% - P\%)$ .

L'effet physique (figure I.4), est dû à l'effet filler et de la nucléation hétérogène. Les auteurs ont conclu que la nucléation hétérogène augmentait avec la finesse de l'addition et ont confirmé que la quantité optimale d'addition était de 25% et 35%, car au-delà de cette quantité l'effet s'escompte en raison de l'éloignement d'une partie des additions pour participer à la nucléation du processus d'hydratation du ciment.

L'effet chimique (figure I.5), est dû à l'activité pouzzolanique. Les auteurs ont montré que l'effet chimique des cendres volantes commence à être significatif à partir de 07 jours et croît avec l'âge. La quantité optimale d'addition qui conduisait à une activité pouzzolanique maximale était de 35% et 40%.

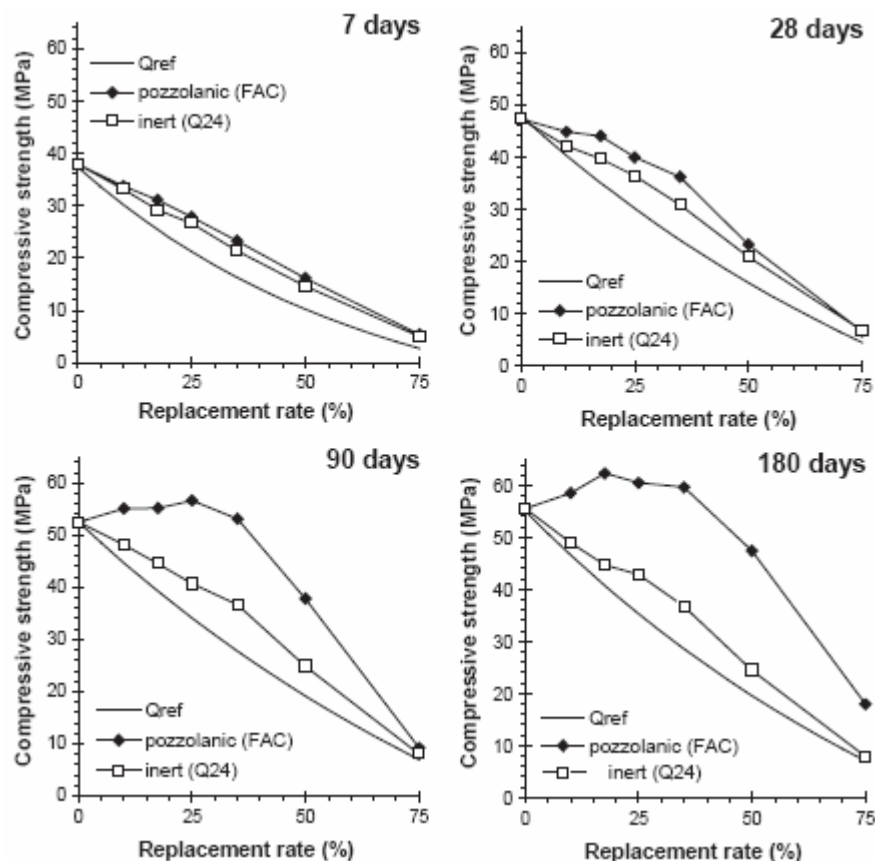


Figure I.3 : Résistance en compression à 7, 28, 90 et 180 jours des mortiers contenant des additions minérales de quartz et des cendres volantes de même finesse par rapport à une addition de référence avec l'effet de dilution seul [40]

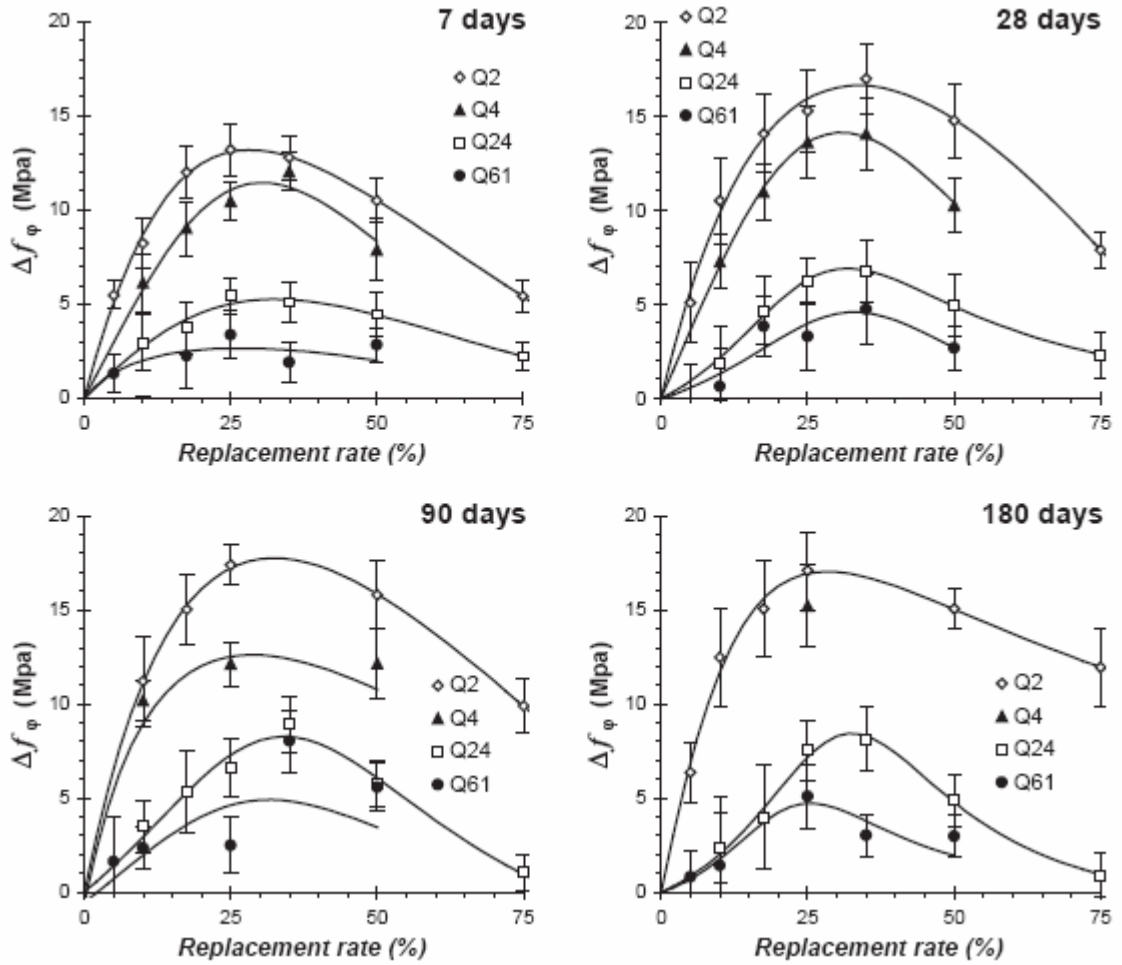


Figure I.4 : Amélioration de la résistance en compression  $\Delta f_{\phi}$  à 7, 28, 90 et 180 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz [40]

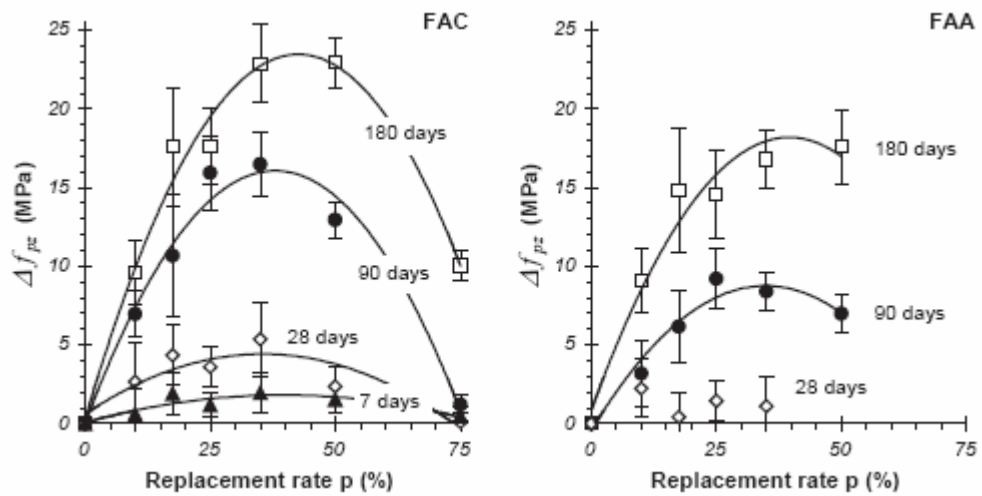


Figure I.5 : Amélioration de la résistance en compression  $\Delta f_{pz}$  à 7, 28, 90 et 180 jours des mortiers contenant des quantités croissantes d'additions minérales de quartz (FAA) et des cendres volantes (FAC) [40]

#### **I.3.4.4. Comportement du ciment avec addition**

Le comportement du ciment avec addition minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'addition: [6].

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons.

#### **I.3.4.5. Enjeux environnementaux**

Le développement durable apparaît comme une stratégie politique visant à être gagnant sur les trois terrains de l'économie, du social et de l'environnement. Il faut signaler ici que notre pays, depuis la première conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972 a pris progressivement conscience de la nécessité à d'intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays [10].

Le ciment, le béton et d'autres matériaux de construction sont essentiels au développement de nos sociétés, mais leurs procédés de fabrication ont d'importants impacts environnementaux. Des émissions de CO<sub>2</sub> se produisent pendant la production du clinker qui est un composant intermédiaire dans la fabrication du ciment. La production de ciment engendre une forte consommation de matières premières et d'énergie.

La clinkérisation est la partie la plus importante du procédé de fabrication du ciment en ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets à l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ 1450°C. Les principaux rejets en termes de volume sont le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, les oxydes d'azote NO<sub>x</sub>, le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> et les poussières.

Dans le secteur cimentier, les émissions de CO<sub>2</sub> sont les plus importantes. En effet, pendant la cuisson des matières premières calcaires, le carbonate de calcium est transformé en oxyde de calcium, laissant s'échapper le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> contenu dans le calcaire.

Les sources d'émissions de CO<sub>2</sub> comprennent donc l'utilisation de combustibles pour la production d'énergie et la décarbonatation du calcaire [171]. On estime que la production de chaque tonne de ciment Portland libère environ une tonne de CO<sub>2</sub> [119].

Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine [171].

#### **I.3.4.6. Bénéfices de l'utilisation des additions minérales**

##### **I.3.4.6.1. Bénéfices techniques**

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des additions d'une grande finesse).
- Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- Prise et durcissement pour les additions qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.
- Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

##### **I.3.4.6.2. Bénéfices économiques**

- La plupart des additions minérales sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.
- Réduit le prix du ciment et du béton.
- Permet un gain appréciable en clinker selon le pourcentage ajouté.
- Réduire la dépense d'énergie nécessaire pour le broyage.

##### **I.3.4.6.3. Bénéfices écologiques et environnementaux**

- Diminution de l'émission du CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière.
- Élimination des sous-produits de la nature.

### **I.3.4.7. Poudre de silice**

#### **I.3.4.7.1. Définition**

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces poussières étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge. Au départ, son utilisation a été motivée par des arguments économiques, car pour une même résistance, il était possible de produire un béton à moindre coût si une partie des matériaux cimentaires était remplacé par la fumée de silice dont le prix de vente était initialement bas.

Dans les années 1990, la dégradation des infrastructures a mis l'accent sur des préoccupations au niveau de la durabilité du béton et ainsi, la fumée de silice a trouvé application dans la production du béton à haute performance.

Aujourd'hui, la fumée de silice est peut-être un matériau de choix pour les ingénieurs qui conçoivent des bétons aptes à résister à des conditions d'exposition agressives. La fumée de silice est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'addition et de stabilisateur. Les microsílices sont un sous-produit de la fabrication du silicium et du ferrosilicium.

Au cours de ce processus, on vaporise du sable siliceux à l'arc électrique et puis il est condensé sous forme de fumée de silice dont la taille des particules est comprise entre 0.05 et 0.5  $\mu\text{m}$ . Les microsílices ont composé à 85-95% ( $\text{SiO}_2$  amorphe), ont une très grande surface spécifique, qui est du même ordre de grandeur que la fumée de cigarettes.

#### **I.3.4.7.2. Effets**

La fumée de silice est l'addition pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, le  $\text{SiO}_2$  amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté C-S-H avec l'hydroxyde de calcium CH qui se forme lors de l'hydratation du ciment (figure I.6).



**Figure I.6 :** *Effet de la fumée de silice sur l'hydratation du ciment [63]*

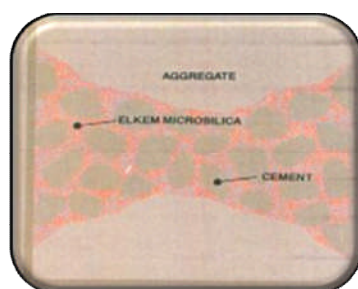
La portlandite a ainsi pu être totalement consommée par la réaction pouzzolanique après 20 jours lors d'une étude menée sur 18 fumées de silice différentes [145]. Les fumées de silice, lorsqu'elles entrent dans la composition du liant, peuvent par leur finesse s'insérer entre les grains de ciment et augmentent ainsi la compacité du béton. Du point de vue chimique, la fumée de silice est composée essentiellement de silice  $\text{SiO}_2$ .

Les mécanismes d'action de la fumée de silice dans le béton reposent sur des effets de nature physique et chimique. Ainsi la granulométrie des particules de fumée de silice, de dimension moyenne cent fois plus faible que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler qui conduit à un empilement plus compact des grains solides.

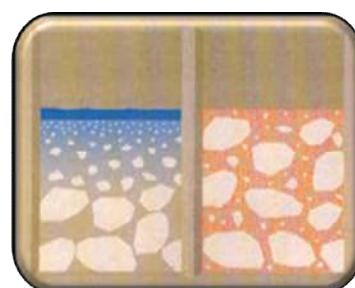
Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique de consommation de l'hydroxyde de calcium par la silice amorphe démarre rapidement. Elle conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée. Cependant, certaines divergences subsistent parmi les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet bénéfique apporté par cette addition. Certains d'entre eux considèrent que la fumée de silice améliore directement la résistance de la liaison granulats/matrice de ciment [46, 71, 105 et 175].

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolanique conduit à une diminution du PH par rapport à un béton exempt de silices. C'est la raison pour laquelle, il convient, dans le cas du béton armé, de limiter la quantité maximale des poussières de silice admissibles, par exemple à 10% de la teneur en matières solides de silice, pris par rapport à la quantité de ciment, afin de garantir la protection anticorrosion de l'armature [46].

Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice, par la forme sphérique de ses grains, permettent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité et augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant (figure I.7).



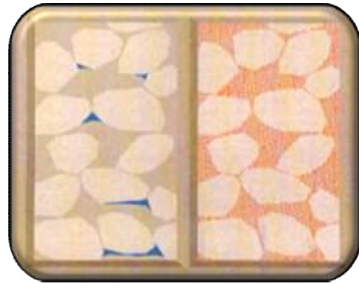
**Figure I.7 :** Effet de la fumée de silice sur la compacité du béton [63]



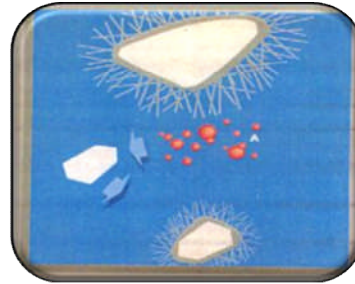
**Figure I.8 :** Effet de la fumée de silice sur le ressuage [63]

Dans le béton frais les fumées de silice induisent les effets suivants:

- ☺ Faible tendance au ressuage, à la sédimentation (figure I.8).
- ☺ Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope (figure I.9).
- ☺ Bon pouvoir de rétention d'eau.
- ☺ Faibles pertes d'air pour le béton à air entraîné.
- ☺ Meilleure adhérence sur le support.
- ☺ Réduction du rebond et amélioration de la résistance du béton projeté.



**Figure I.9 :** Effet de la fumée de silice sur la cohésion interne [63]



**Figure I.10:** Effet de la fumée de silice sur la réaction d'hydratation [63]

- ☹ Augmentation du besoin en eau.
- ☹ Consistance plus ferme.
- ☹ Le béton frais devient plus «collant».
- ☹ L'introduction de pores d'air artificiels est plus difficile.
- ☹ Risque accru de fissures liées au retrait précoce.
- ☹ Durée de la cure plus importante.

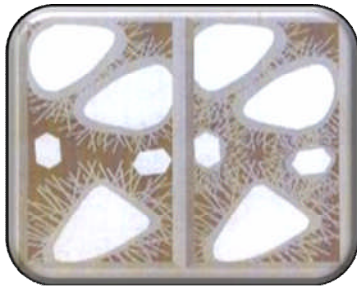
La surface spécifique très élevée implique une augmentation de la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du béton. Pour éviter cet excès d'eau, Il est important de noter qu'un superplastifiant est utilisé pour contrôler le retrait au séchage et ajuster la maniabilité du béton sur une période de temps qui permet la mise en place, habituellement entre 15 et 30 minutes et une diminution du potentiel de ségrégation.

Plusieurs études [26, 46 et 71], montrent que la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice sur l'hydratation combiné à l'effet de remplissage dû à leur finesse, peut conduire à des meilleures résistances à court terme du béton (figure I.10).

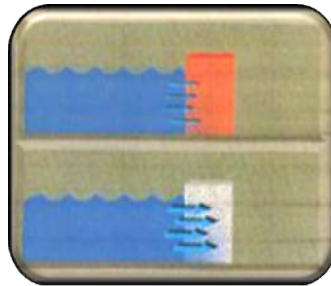
Les microsilices sont 50 à 100 fois plus fines que le ciment et agissent en qualité de filler entre les grains de ciment. Ceci rend la structure de la pâte de ciment plus homogène et beaucoup plus étanche (figure I.11).



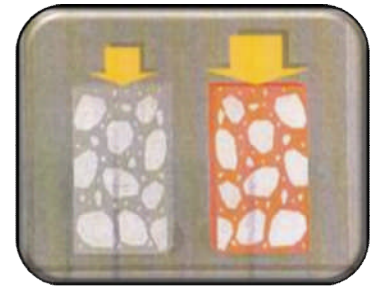
La diminution de la perméabilité à l'eau par la fixation de CH (figure I.12). Améliore les performances mécaniques à long terme: résistances en compression & traction (figure I.13 et I.14). Augmente la résistance contre le gel et/ou les produits de déverglaçage et améliore la résistance contre les agressions chimiques comme la montre la figure I.15 ci dessous [63].



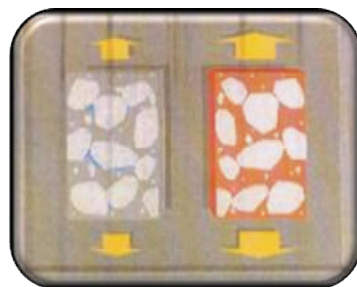
**Figure I.11 :** Effet de la fumée de silice sur la structure de la pâte [63]



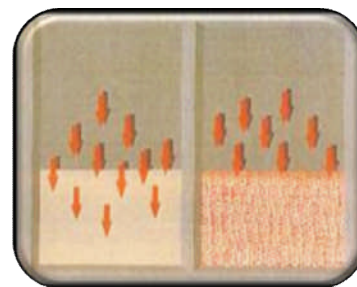
**Figure I.12 :** Effet de la fumée de silice sur la perméabilité à l'eau [63]



**Figure I.13 :** Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression [63]



**Figure I.14:** Effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction [63]



**Figure I.15 :** Effet de la fumée de silice sur la résistance contre les agressions chimiques [63]

De même **Hooton** [85], a mis en évidence: une diminution de la perméabilité à partir de 28 jours des pâtes de ciment avec l'introduction de la fumée de silice, une diminution de la porosité totale, une baisse du taux de portlandite, comme le montre le tableau I.2.

**Tableau I.2 :** Effet de la réaction pouzzolanique des fumées de silice sur des pâtes de ciment ( $E/C = 0.25$ , sans superplastifiant) [85]

A 28 jours	0% fumée de silice	20% fumée de silice
Coefficient de perméabilité ( $\times 10^{-13}$ ) m/s	3.8	< 0.1
Porosité totale (%)	14.9	9.8
Taux de portlandite	18	2

L'évolution de la résistance s'avère plus lente pour des bétons contenant de la fumée de silice que pour des bétons sans fumée. Pourtant la résistance des bétons avec la fumée de silice augmente même au delà de 450 jours [63].

#### **I.3.4.7.3. Fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes**

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

A l'état durci, améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables:

- Améliore les performances mécaniques à longs termes.
- Augmente le module d'élasticité.
- Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion et la durabilité en milieux agressifs.
- Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
- Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Réduit les risques de ségrégations et la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.
- Réduit le coût des ciments.
- Un mariage avantageux pour l'environnement.

#### **I.3.4.7.4. Sable de dune finement broyé**

Dans notre pays, malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité poitrail se chiffrer en milliards de m<sup>3</sup>.

Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction: indice de propreté élevée et absence dans sa composition de matières organiques et autres matières indésirables telles que les sulfates et carbonates.

Le sable de dune est composé de minuscules grains de quartz. Le quartz (c-à-d. du SiO<sub>2</sub>, soit du dioxyde de silicium ou de la silice) est l'un des minéraux les plus répandus sur terre.

L'analyse par diffractométrie aux rayons X montre que le sable de dune finement broyé a constitué de SiO<sub>2</sub> bien cristallisé du type (low-quartz), contrairement au Sd, la fumée de silice à une structure amorphe [2, 3 et 4] (figure I.16).

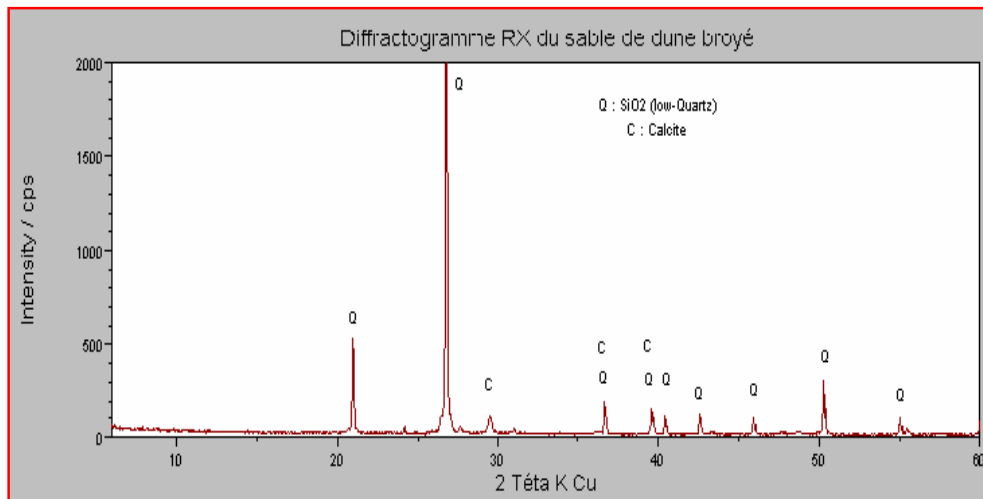


Figure I.16 : Diffractogramme X du sable de dune broyé [2, 3 et 4]

L'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune broyé (Sd). En effet, la faible quantité de portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence de Sd, traduit la réaction pouzzolanique partielle de cette addition, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte [2, 3 et 4] (figure I.17). L'incorporation du sable de dune siliceux finement broyé, sous forme de substitution au ciment Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé ayant des performances physico-mécaniques supérieures à celles du ciment Portland. De par leur réactivité pouzzolanique et leur rôle de remplissage dû aux fines particules du sable de dune broyé.

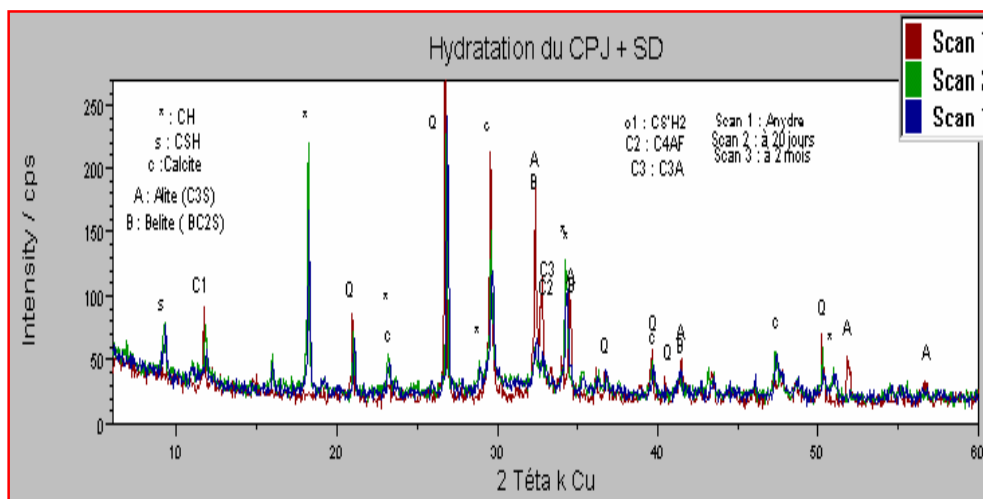


Figure I.17 : Hydratation des pâtes aux différents âges (85% CPJ 42.5 + 15% Sd) [2, 3 et 4]

Les propriétés des bétons sont régies par l'hydratation du ciment, cette dernière peut être modifiée par l'incorporation d'additions siliceux. Parmi les additions siliceux utilisés pour améliorer les propriétés des bétons, les fumées de silice sont les plus recommandées car elles densifient la matrice des bétons en formant des silicate de calcium hydraté supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice.

Néanmoins, ce type d'addition est coûteux et de plus non disponible en Algérie. Cette étude consiste à remplacer la fumée de silice par un matériau très abondant au sud Algérien qui est le sable de dune siliceux.

**Cheikh-Zouaoui** [45], a montré que, globalement l'introduction de l'addition minérale siliceuse substituée (fumée de silice, sable siliceux broyé et sable siliceux rebroyé avec le ciment) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme. Il apparaît notamment que l'introduction de sable siliceux avec le mode opératoire de malaxage-broyage donne des résistances mécaniques supérieures à celles des mélanges de référence et du même ordre de grandeur que l'introduction de fumée de silice. L'addition minérale sous forme de  $\text{SiO}_2$  conduit à la formation d'un supplément de C-S-H apportant ainsi une contribution supplémentaire à la résistance des mélanges substitués.

Inversement aux résistances mécaniques à 7 jours, les résistances mécaniques aux âges avancés à 90 jours, des bétons à base d'addition de Sd par substitution dépassent celles du béton témoin à base de CPJ 42.5, ce qui signifie que cette addition a un rôle pouzzolanique qui se traduit par la formation de silicate de calcium hydraté C-S-H II de deuxième génération. La cinétique de formation de ces C-S-H II par les additions dépend de leur finesse de leur teneur en silice et plus particulièrement de leur structure [3, 4, 112 et 143]. Dans le même contexte, **Wang and Ye** [182], ont montré que la présence de 20% environ du sable de dune broyé dans la pâte du ciment Portland va augmenter le degré d'hydratation du ciment à tous les âges. En outre, le degré d'hydratation est augmenté avec la finesse du Sd. Également une influence significative sur la porosité totale et la perméabilité à l'eau des pâtes du ciment prémélangé au sable de dune broyé.

Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle [1]. Malheureusement, cette silice n'a pas toujours une importante réactivité, d'après **De Larrard** [55] aucune ultrafine n'est inerte. Ainsi le quartz broyé réputé cristallin, est amorphisé en surface. Ils peuvent donc s'associer à la chaux selon la réaction pouzzolanique classique. Le sable de dune finement broyé qui est siliceux, peut donc avoir les mêmes avantages physiques et pouzzolaniques que les autres additions, malgré son caractère cristallin [29 et 155]. Du point de vue chimique le sable de dune finement broyé est composé essentiellement de silice  $\text{SiO}_2$ .

La silice cristalline présente une structure tridimensionnelle régulière, le motif de base est un tétraèdre dont chacun des sommets est occupée par un atome d'oxygène et le centre par un atome de silicium. Selon le diagramme de phase établi par **Fenner** (sa structure atomique est modifiée si la température atteint plus de  $870^\circ\text{C}$ ) le passage du quartz à la tridymite [155].

Une modification de la structure atomique d'un matériau peut survenir suite à des modifications de température et/ou de pression. La modification de la structure engendrera une modification des propriétés de la matière. Persistance du nouvel état cristallin après le retour à des conditions de pression et température habituelles [162].

## **I.4. HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES**

### **I.4.1. HYDRATATION**

#### **I.4.1.1. Définition**

Après le malaxage de l'eau et du ciment la pâte de ciment fluide durcit parce que l'eau est absorbée dans les minéraux de clinker amorphes en formant la pâte de ciment. Les réactions chimiques qui se déroulent à cette occasion sont appelées hydratation [157].

#### **I.4.1.2. Degré d'hydratation**

Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux cimentaires dépendent de l'état d'avancement des réactions d'hydratation. Une manière de quantifier l'état d'avancement des réactions d'hydratation du ciment est de calculer son degré d'hydratation qui est défini comme étant égal au rapport de la quantité de ciment ayant réagi au temps (t) sur la quantité de ciment anhydre initiale [135].

#### **I.4.1.3. Aspects cinétiques et prise**

Les grains de ciment réagissent à leur surface avec l'eau de gâchage, la réaction chimique commence. De très petits produits d'hydratation en forme d'aiguille précipitent et enveloppent les différents grains de ciment (couche fine). Pour que l'hydratation se poursuive, l'eau doit diffuser à travers les pores de gel de la couche de gel de ciment devenant de plus en plus dense et de plus en plus épaisse, jusqu'à ce qu'elle atteigne le noyau non-hydraté. L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée. Une petite partie du ciment reste non-hydraté. Le grain de ciment hydraté grossit et double à peu près son volume initial. La modification de la résistance à la déformation ou l'augmentation de la résistance pendant l'hydratation se subdivise en plusieurs phases. Au fil du temps, le béton frais perd sa consistance initiale et fait prise, jusqu'à ce qu'il ne soit plus ouvrable. Puis le béton se solidifie. Enfin, lorsque la résistance devient mesurable (environ  $0.1 \text{ N/mm}^2$ ) on parle du béton durci [135]. La vitesse d'hydratation dépend de la température du béton frais et de la température ambiante, de la nature et de la finesse du ciment, de la teneur en ciment et du rapport E/C du béton, de la nature et du dosage des adjuvants. L'hydratation d'un matériau cimentaire fait référence à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\beta\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$ ) et l'eau de gâchage [54].

Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires. La vitesse d'hydratation des diverses phases du ciment est différente. L'aluminate  $C_3A$  réagit très rapidement. En absence de sulfate, l'écran d'étringite ainsi formé bloque l'hydratation des autres constituants du ciment et plus particulièrement le  $C_3S$ . Par rapport au  $C_3S$ , le  $\beta C_2S$  réagit beaucoup plus lentement (10 à 20 fois plus lent) et il n'a pas de rôle majeur sur la structuration de la pâte de ciment à l'état frais [54].

#### I.4.1.3.1. Hydratation des silicates ( $C_3S$ et $\beta C_2S$ )

Par addition d'eau le  $C_3S$  est le composé qui durcit rapidement que le  $\beta C_2S$ . De par sa vitesse de réaction élevée on lui attribue le développement de résistance aux bas âges. Après le  $C_3A$ , il est le composé qui dégage le plus de chaleur d'hydratation [97]. Durant la réaction du  $C_3S$  et  $\beta C_2S$ , il se forme de l'hydroxyde de calcium et un gel de silicate de calcium hydraté. Voir figure I.18. Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de  $Ca(OH)_2$  dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment ordinaire contient 50 à 70% de C-S-H et 25 à 30% de  $Ca(OH)_2$ . L'hydratation du  $\beta C_2S$  se déroule dans les mêmes conditions que le  $C_3S$ . Ce composé durcit lentement. Il est responsable des gains de résistance aux âges très avancés [97].

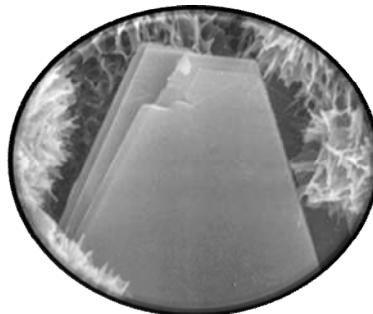


Figure I.18 : Pâte de ciment hydratée 7 jours :  $Ca(OH)_2$  et C-S-H (SEM 7000×)[97]

#### I.4.1.3.2. Hydratation des aluminates ( $C_3A$ et $C_4AF$ )

Le  $C_3A$  est le premier des composants à s'hydrater, suivi de  $C_3S$ . C'est le composé qui s'hydrate rapidement (comparé aux  $C_3S$ ,  $\beta C_2S$ ), il est responsable en partie des résistances au jeune âge 1 jour. Ce composé libère beaucoup de chaleur d'hydratation lors de son interaction avec l'eau. Sa vitesse de réaction a un effet direct sur les temps de prise du ciment Portland. C'est le composé qui est principalement attaqué par les sulfates. Le  $C_4AF$  s'hydrate d'une façon analogue au  $C_3A$  mais à une vitesse de réaction faible, il contribue peu ou pas aux résistances de la pâte de ciment. Il est responsable de la couleur du ciment et permet de diminuer la température de clinker au four [97].

#### **I.4.1.4. Chimie d'hydratation du ciment Portland avec additions**

Les différentes additions minérales affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique, de leur réactivité et de leur granulométrie ainsi que la forme de leur élément [35]. Au cours de l'hydratation du ciment Portland, il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du C-S-H), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. L'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO<sub>2</sub> de la pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca(OH)<sub>2</sub> créée par l'hydratation du ciment Portland [35]. La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, la fumée de silice SiO<sub>2</sub> permet une réduction de la teneur en Ca(OH)<sub>2</sub> et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange [35].

#### **I.4.2. MICROSTRUCTURE DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES**

Le processus d'hydratation d'un ciment conduit à un matériau durci composé de plusieurs phases de l'agencement desquelles résulte la structure et la texture de la pâte. Ces différentes phases peuvent être: [176].

- Des particules de ciment non hydraté ou partiellement hydraté.
- La pâte de ciment, elle-même de microstructure complexe, contenant plusieurs types d'hydrates, de la portlandite et des pores.
- Des bulles d'air, qui constituent une sous-famille spécifique de pores.

Il existe une relation aujourd'hui bien comprise entre la microstructure des ciments et leurs propriétés mécaniques. Elle concerne l'influence néfaste des pores capillaires (porosité à l'échelle supérieure au micromètre) sur la résistance du matériau [178].

##### **I.4.2.1. Composition du ciment hydraté**

La pâte de ciment hydraté est formée de:

- Les hydrates (C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub> et Aluminates).
- Les grains de ciment non hydraté, des espaces capillaires et des bulles d'air.

##### **I.4.2.2. Composition des hydrates**

Les hydrates comprennent de:

- Les silicates de calcium hydratés et la chaux hydratée.
- Les aluminates hydratés et l'eau adsorbée sur certains cristaux et des impuretés.

#### I.4.2.2.1. Silicates de calcium hydraté C-S-H

- Le C-S-H est un gel solide poreux ayant une structure en feuillet. Assurent la cohésion mécanique des ciments. Le PH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13), à des PH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions  $\text{Ca}^{2+}$ . La porosité du gel de C-S-H représente environ 28% du volume total du gel. Les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.
- La famille des C-S-H est formée d'une grande variété de silicates de calcium hydratés. Une des caractéristiques importantes qui différencie ces espèces est le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport C/S). Dans une pâte de ciment ce rapport est compris entre 1,5 et 1,9. [176]).
- Les C-S-H de synthèse (C-S-H non formés à partir de ciment), il est compris entre 0,5 et 2 suivant les conditions de synthèse. Certains auteurs [176]) considèrent qu'il existe plusieurs (phases) C-S-H différenciées par leur rapport C/S. Que ce soient les C-S-H I et C-S-H II pour *Taylor* [176] ou les C-S-H  $\alpha$  et C-S-H  $\beta$  pour *Damidot et al* [57]. Toutefois, leur différenciation dans une pâte n'a pas encore été démontrée.

#### I.4.2.2.2. Chaux hydratée CH

- La portlandite joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique. La portlandite à une morphologie hexagonale prismatique (la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition).
- Elle est produite à la suite de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ .
- Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable lorsque le PH devient ( $< 12,5$ ).

#### I.4.2.2.3. Aluminates hydratés

Ils occupent de 15 à 20% du volume de la pâte de ciment hydraté. On les retrouve généralement sous deux formes: (ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques & monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales)).

### I.5. FABRICATION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

#### I.5.1. Composition

Le mélange de ciment et d'eau (et éventuellement avec des additions) constitue ce qu'on appelle pâte de ciment. En y rajoutant du sable, on obtient un mortier. En y additionnant du sable et un granulats plus gros on obtient un béton. Le choix de la formulation d'un béton impose un compromis entre trois objectifs: une facilité de mise en œuvre définie par son ouvrabilité, une résistance visée à différents stades de maturation et une durabilité vis-à-vis des agressions physico-chimiques du milieu ambiant.



### **I.5.2. Malaxage**

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes.

### **I.5.3. Ressuage et ségrégation**

Le ressuage est une forme de ségrégation du béton frais. La propriété de sédimentation du béton frais entre le moment du compactage et le début de la prise. La durée de ce phénomène est d'environ deux à trois heures pour le béton, mais elle peut dans des circonstances exceptionnelles atteindre cinq à six heures. En vertu de la loi de gravitation, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage remonte à la surface de la masse du béton frais. Le risque de ségrégation est d'autant plus important que la teneur en eau du béton soit élevée. Le ressuage du béton s'accompagne d'un (tassement) du béton frais, le béton durci présentant alors un volume inférieur à celui du béton frais [179].

### **I.5.4. Retrait et gonflement**

Le retrait et le gonflement sont des modifications lentes de volume du béton en durcissement qui dans le cas du béton à granulats denses sont liés à la modification de l'état d'humidité de la pâte de ciment. Le gonflement étant une augmentation du volume résultant de l'absorption de l'humidité. Par contre, le retrait constitue une diminution du volume consécutive à l'évacuation d'humidité, le volume des hydrates formés est inférieur au volume des composants initiaux eau et ciment [111].

### **I.5.5. Traitement de cure**

On entend par traitement ultérieur d'un béton toutes les mesures appropriées visant à protéger le béton mis en œuvre jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance suffisante. Les traitements de cure appropriés sont: laisser le béton dans le coffrage, recouvrir et détacher le béton à l'aide de films, mise en place d'un traitement de cure liquide externe, pulvérisation d'eau et ajout d'un produit de cure interne comme dans le béton frais. Une cure en température a une influence sur la cinétique d'hydratation aux jeunes âges: la formation des hydrates est accélérée avec l'augmentation de la température. Cette accélération influence la texturation et la vitesse de durcissement du matériau. Si la température de cure dépasse une température seuil (autour de 50°C), les propriétés mécaniques sont diminuées. Sans que cela puisse entièrement expliquer le comportement mécanique du matériau, la distribution de la nano-porosité est légèrement modifiée: la grosse porosité a tendance à augmenter [157].

## CONCLUSION

L'industrie cimentière algérienne occupe une place importante dans le développement économique du pays. Actuellement le ciment est considéré comme un des produits stratégiques puisqu'il est à l'amont de toute activité de construction et de réalisation d'infrastructures.

La consommation du ciment est fortement liée au développement local. En Algérie le besoin en ciment a fortement augmenté au cours des cinq dernières années. La production d'une tonne de ciment, un ingrédient essentiel du béton, émet environ une tonne de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, un gaz à effet de serre. On prévoit que la production mondiale annuelle de ciment Portland, et des émissions de CO<sub>2</sub> qui y sont associées, passera du 1,4 milliard de tonnes produites en 1995 à 2 milliards de tonnes en 2010.

A la lumière de l'examen de la documentation, le recours aux additions est formellement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie du ciment et du béton. L'utilisation des additions minérales en substitution du clinker dans le ciment Portland est un excellent exemple de valorisation réussie de déchets industriels qui permet, de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>.

A l'origine, les additions ont été lancées pour des raisons économiques. Soit ils existent sous forme de produits naturels, qui ne devaient être que peu traités, soit ils résultaient de processus industriels, sous forme de déchets ou de sous-produits. Indépendamment de ces avantages fonctionnels, écologiques et économiques, des additions influant positivement sur certaines des propriétés du béton à l'état frais mais surtout à l'état durci.

La raison derrière l'addition de la fumée de silice est d'amener une augmentation des performances physico-mécaniques, augmente le module d'élasticité, diminue le risque de lixiviation et diminue la perméabilité. La tendance actuelle vise l'élaboration des bétons à hautes performances. Ces bétons sont généralement obtenus à base de fumées de silice. A défaut de fumées de silice, coûteuse, le présent travail traite l'influence de l'addition du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton.

## CHAPITRE II

# STRUCTURE POREUSE, LA DÉFORMABILITÉ & LA DURABILITÉ DU BÉTON

### II.1. INTRODUCTION

La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté et du béton durci peut être caractérisée à travers des paramètres tels que la porosité, la connectivité ou la tortuosité des pores. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques, la déformabilité et la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transferts.

### II.2. CARACTÉRISTIQUES DE STRUCTURE POREUSE

#### II.2.1. Porosité

Les pores sont des cavités vides ou remplies d'eau dans le béton durci. La porosité est le rapport entre le volume de vides  $V_V$  et le volume total  $V_T$  d'un corps. La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide (figure II.1).

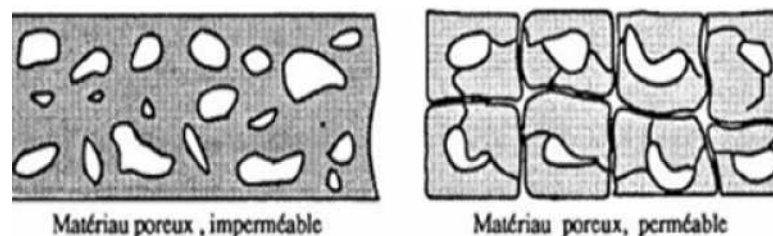


Figure II.1 : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité [140]

La porosité est une caractéristique importante des matériaux cimentaires qui lui confère plusieurs caractéristiques telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique.

Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates,  $\text{CO}_2$ , Cl, ... etc.). La porosité totale d'un béton ordinaire durci est de l'ordre de 10%. Cette porosité résulte de celle de la pâte, des granulats (porosité de l'ordre de 2% pour certains granulats calcaires) voir [27] et de l'interface pâte/granat.

Les pores interconnectés permettent le transport de matières dans le matériau, contrairement aux pores aveugles ou aux pores isolés.

La variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité accessible à l'eau à la même échéance. Nous constatons que la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la porosité [16]. Cette porosité gouverne de nombreuses propriétés du béton: presque toutes les caractéristiques mécaniques, la perméabilité et par conséquent la durabilité. Ainsi, plus la porosité diminue, plus la résistance à la compression augmente et plus la perméabilité diminue. Le niveau de porosité influence de façon importante les caractéristiques mécaniques du matériau. L'effet déterminant de la réduction de la porosité sur la résistance mécanique du ciment a été démontré dans de nombreuses études [86, 109, 132 et 157] comme la montre la figure II.2 ci dessous.

Une cure à température trop élevée ou avec un rapport E/C trop grand augmente la porosité et diminue les propriétés mécaniques, l'addition de la fumée de silice densifie le matériau [157]. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante du volume et de la taille de ces pores capillaires. Dans la suite de notre étude, on va essayer de vérifier cette définition. Bien que la perméabilité soit fort influencée par la porosité, elle dépend aussi d'autres paramètres qui régissent préférentiellement l'écoulement, parmi ces paramètres, on peut citer: la connectivité et la tortuosité.

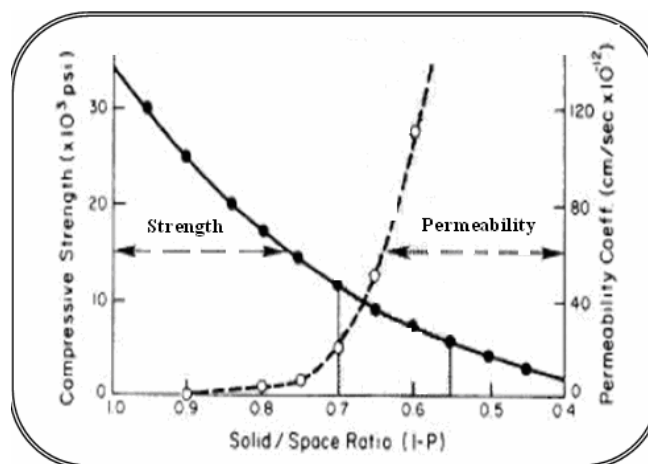


Figure II.2 : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [118]

### II.2.1.1. État de l'eau dans les matériaux cimentaires

Cette eau se trouve dans un état très stable et ne peut pas s'évaporer. Elle représente environ un cinquième de la masse de ciment ayant réagi. L'eau, présente dans la pâte de ciment hydraté et le béton, se retrouve sous trois formes: [27].

L'eau capillaire remplit le volume poreux au-delà de la couche adsorbée et elle est séparée de la phase gazeuse par des ménisques. Lorsque l'eau capillaire se trouve en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane, elle est appelée eau libre. Celle-ci est présente dans les gros pores et s'évacue facilement du béton lors du séchage.

L'eau adsorbée est soumise à des champs de forces superficielles par l'intermédiaire des forces intermoléculaires et des forces électrostatiques. L'eau adsorbée est présente sur la surface solide des pores, notamment sur le gel C-S-H (l'eau interlamellaire et inter-feuillet).

Finalement, l'eau chimiquement liée représente l'eau consommée au cours des réactions d'hydratation du ciment ou combinée avec d'autres composants dans les hydrates. L'eau adsorbée la plus liée (adsorbée chimiquement), ainsi que l'eau chimiquement liée, est également classifiée comme eau (non-évaporable), au contraire de l'eau capillaire et celle adsorbée la moins liée (adsorbée physiquement).

### II.2.1.2. Influence de rapport E/C sur la porosité

Le rapport eau/ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

Sur la figure II.3, on distingue nettement que plus le rapport E/C est faible, plus, les grains de ciment sont rapprochés initialement les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

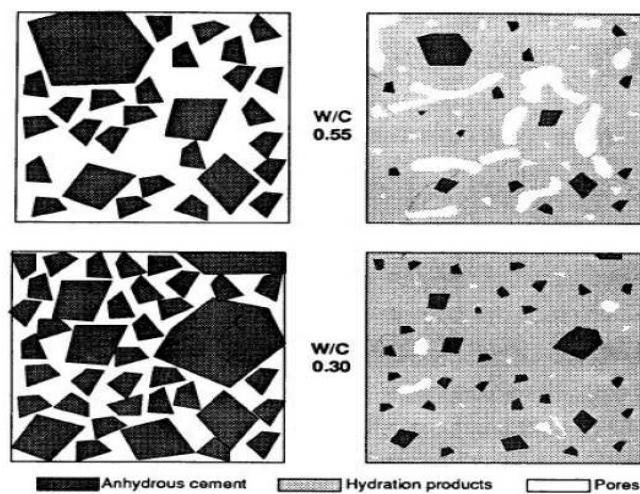


Figure II.3 : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci [69]

Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler les espaces intergranulaires. C'est en partie ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement leur résistance [69].

L'influence du paramètre E/C sur l'avancement de l'hydratation est très complexe. D'après **Hearn and Lok** [80], de faibles valeurs du rapport E/C entraînent un ralentissement des réactions d'hydratation au jeune âge. Une concentration élevée en C-S-H est obtenue plus rapidement quand la quantité d'eau interstitielle est faible. Au-delà de cette période, une baisse du E/C produit l'effet contraire.

**Powers et al** [151], explique ceci par le fait qu'à faible teneur en eau, la quantité d'eau disponible pour l'hydratation devient rapidement très rare une fois que l'eau contenue dans les pores capillaires est épuisée. Ce manque d'eau se traduit alors par un ralentissement des réactions d'hydratation.

Selon **Baroghel-Bouny** [27], cette théorie de **Powers** n'est pas justifiée étant donné que l'eau retenue entre les feuillets de C-S-H (eau zéolitique) reste encore disponible pour l'hydratation lorsque la totalité de l'eau capillaire est consommée. La porosité du matériau dépend de sa teneur en eau initiale. La taille des pores est d'autant plus petite que le rapport E/C est faible.

D'après **Baroghel-Bouny** [27], les pores des gels sont d'autant moins importants que le rapport eau/solide est faible. Or, plus les pores sont fins, plus les dépressions capillaires sont élevées et les pressions baissent beaucoup plus rapidement. A partir de mesures expérimentales de base, on peut calculer plus précisément la relation entre le E/C et le volume de la porosité capillaire [154].

Sachant que: l'eau combinée chimiquement représente 23% du poids du ciment non hydraté, le volume des produits d'hydratation est égal au volume du ciment non hydraté plus 0,746 fois le volume d'eau combiné chimiquement et la porosité de l'ensemble des hydrates est de 28% d'eau. D'un point de vue strictement chimique, en équilibrant les réactions d'hydratation du ciment, un rapport E/C = 0,22 suffit pour hydrater tout le ciment [154].

Toutefois, **Powers** a montré que pratiquement, et d'un point de vue physico-chimique, il faut un rapport E/C minimal de 0,42 (système scellé). En effet, pour que la réaction d'hydratation se poursuive, une certaine quantité d'eau doit être adsorbée par les hydrates (eau de pores de gel) sans que celle-ci soit liée chimiquement, sa présence dans les hydrates étant absolument nécessaire à leur formation [151].

La figure II.4 permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100% d'hydratation (conservation dans l'eau).

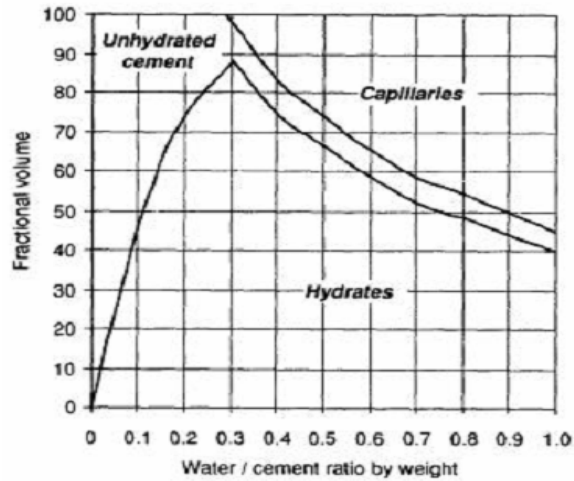


Figure II.4: Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau [84]

En pratique, l'hydratation n'est jamais complète car les plus gros grains de ciment ne s'hydratent jamais complètement. A un certain stade de leur hydratation, ils sont recouverts d'une coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante. C'est pour cette raison qu'en pratique, même dans les pâtes fabriquées avec un E/C très faible 0,25 il subsiste toujours une certaine porosité capillaire. La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. Ce phénomène est illustré sur la figure II.5. En réduisant le E/C de 0,45 à 0,25, le volume total de la porosité passe de 40% à moins de 20% et, en même temps, le diamètre moyen des plus gros pores est diminué par un facteur de l'ordre 10.

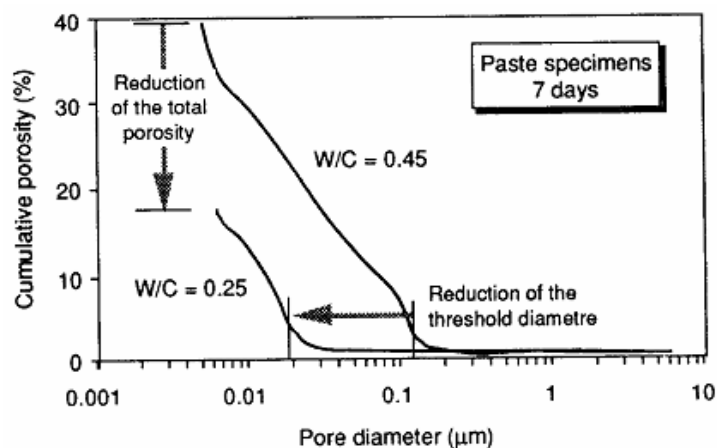


Figure II.5 : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau [69]

## II.2.2. Connectivité

La connectivité est un paramètre topologique qui mesure le degré d'interconnexion d'un milieu poreux, en général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible [61 et 161].

Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu [68]. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a moins de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs (figure II.6).

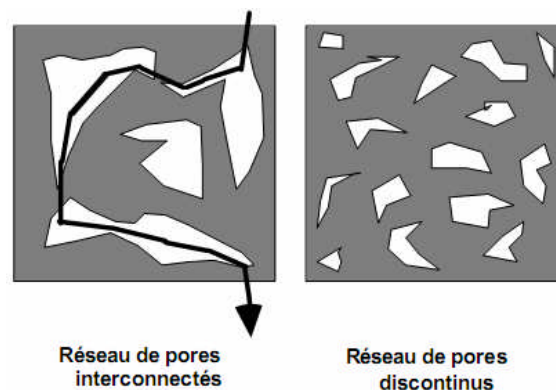


Figure II.6 : Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte [154]

Remarquons qu'un pore isolé, mais qui se connecte par exemple par microfissuration aux pores interconnectés, peut désormais participer aux écoulements à travers le matériau. On a alors une connectivité qui augmente par fissuration.

## II.2.3. Tortuosité

La tortuosité  $\tau$ , caractérise le chemin d'écoulement d'un fluide à travers le réseau poreux. Selon d'autres auteurs, elle est définie par:  $\tau = (L_e/L)^2$  [159].

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.



## II.3. DÉFORMABILITÉ

### II.3.1. Définition

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages. Le béton est un matériau en évolution: ses propriétés se modifient constamment au cours de son existence, l'hydratation du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques et les modules de déformation [179]. Le béton soumis à l'action d'une charge assez faible subit une déformation pratiquement instantanée élastique, réversible. Il suit la loi de *Hooke* bien connue. ( $\sigma = E \times \varepsilon$ ).

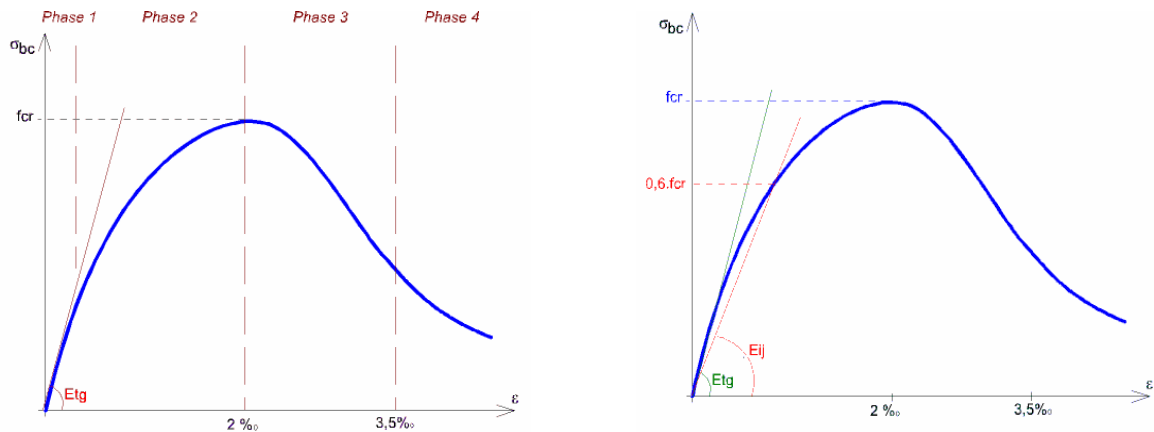
Avec:  $\sigma$  : contrainte appliquée;  $E$  : module d'élasticité;  $\varepsilon$  : déformation.

Au-delà d'une certaine charge apparaît une zone plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation permanente. Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la viscosité du béton qui est très élevée intervient. Il y'a fluage du béton, il se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique. La compacité joue un rôle important. Certains auteurs ont trouvé qu'une revibration du béton diminuait sensiblement à la fois le retrait et le fluage [179]. Il a été prouvé par voie expérimentale que pour pouvoir obtenir des bétons basiques à base de laitier granulé possédant une résistance suffisante ainsi que de bonnes caractéristiques de déformation (module d'élasticité initial), le liant devrait être dosé à 340 - 350 kg par unité de volume, la macrostructure est très compacte où les agrégats sont bien liés au conglomérat fin ainsi les grains d'agrégats sont répartis régulièrement [117]. Cette étude permis de préciser un certain nombre de point:

- Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.
- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle  $\eta = 0-0.5$ .
- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations est curviligne dans l'intervalle  $\eta = 0.5-0.9$ , ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.
- Une attention particulière doit être prêtée au choix optimal de la microstructure des bétons de manière à ce que la résistance et la déformabilité s'y combinent convenablement. En négligent ce facteur on risque de compromettre les caractéristiques de déformation que ce soit celles d'un béton au laitier basique ou de toute autre sorte du béton.

### II.3.2. Déformations instantanées

La courbe contrainte-déformation s'obtient par enregistrement de  $F_{bc} - \varepsilon_{bc}$  au cours d'un essai de compression sur éprouvette  $(16 \times 32) \text{ cm}^2$ :



**Figure II.7 :** La courbe expérimentale contrainte-déformation au cours d'un essai de compression sur éprouvette  $(16 \times 32) \text{ cm}^2$  [72].

**Phase 1:** le béton se comporte à peu près comme un matériau homogène et élastique, cela se traduit par une relation linéaire:  $\sigma_{bc} = E_{tg} \times \varepsilon_{bc}$  ( $E_{tg}$ : module de déformation tangent).

**Phase 2:** une microfissuration due à des tractions transversales se développe, d'où une incurvation progressive de la courbe jusqu'à la résistance  $F_{cr}$ . Pratiquement, pour  $F_{cr}$  correspond  $\varepsilon_{bc} = 2\text{‰}$  (cette déformation est quasiment indépendante de  $F_{cr}$ ). Puis, la rupture se produit plus ou moins brutalement.

**Phase 3:** la fissuration longitudinale se généralise et la courbe redescend lentement pour un béton non fragile, et rapidement dans le cas contraire. L'allure de cette courbe renseigne sur le caractère plus ou moins fragile du phénomène.

**Phase 4:** la phase finale a peu d'intérêt.

D'après **Gabrysiak** [72], on définit un module de déformation instantanée sécant  $E_{ij}$  pour une contrainte de courte durée  $t < 24 \text{ h}$ .  $E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$  (Mpa). Avec,  $f_{cj} = 1.1 f_{c28j}$ . Un béton de 40 Mpa de résistance a donc un module de déformation longitudinale instantané de l'ordre de 38000 Mpa.

En compression, l'endommagement est visible sous forme de microfissures à l'interface pâte/granulat à partir de contraintes comprises entre 30 et 50% de la résistance (figure II.8) selon le type du béton. La microfissuration est issue du déplacement relatif entre le mortier et les inclusions granulaires [37, 87, 172 et 173].

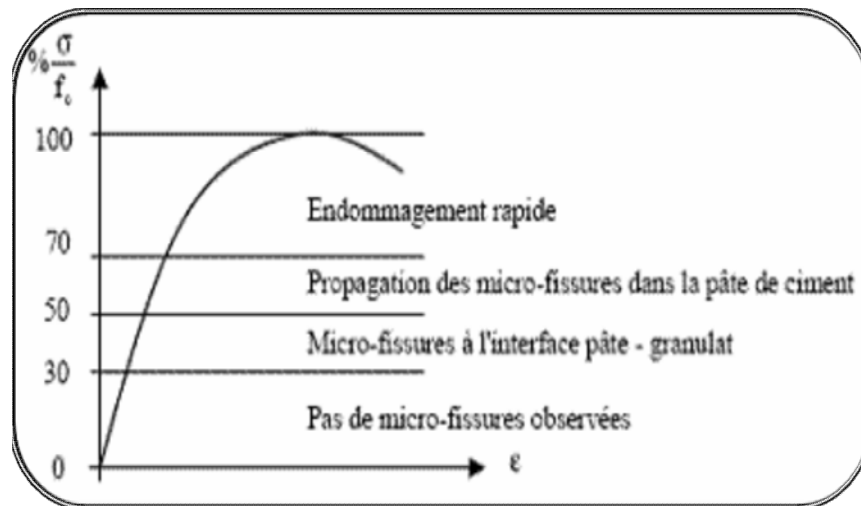


Figure II.8 : Etapes classiques d'endommagement par niveaux de contrainte du test de caractérisation des bétons [87 et 88]

Les fissures de mortier commencent à augmenter sensiblement, et le pont entre les fissures se lie pour former les principales fissures en continu à des charges d'environ 70 à 90% [87]. Paradoxalement, le taux de fissuration s'accélère lorsque la rigidité de l'élément du béton s'avère plus importante [87]. Cet état fissuré influence la stabilité de l'élément à partir du pic de contrainte au-delà duquel la résistance décroît. La fissuration se concentre principalement dans la pâte de ciment et conduit à la rupture du spécimen. A l'échelle de la structure, l'évolution de la fissuration globale peut être suivie par le test de la résistance classique et le relevé des déformations. Localement, lorsque la résistance en traction est dépassée en un point de la structure, une fissure apparaît. Elle forme aussitôt, une discontinuité dans la structure [142].

## II.4. DURABILITÉ

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement. La durabilité du béton peut être affectée non seulement par son environnement, mais aussi par les caractéristiques du matériau telles que la perméabilité, le type de ciment, l'interface pâte/granulat et la nature des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment [18].

### II.4.1. PERMÉABILITÉ

#### II.4.1.1. Définition

La perméabilité du béton est un paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. La perméabilité définit la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous un gradient de pression. Bien que la perméabilité d'un milieu poreux dépende fortement de sa porosité, d'autres paramètres du réseau poreux l'influencent également [167].

Parmi ceux-ci, nous pouvons citer: la connectivité, la tortuosité, ainsi que la constrictivité du réseau poreux liée à la taille des pores. L'effet de ces paramètres vis-à-vis de la résistance au flux est montré sur la figure II.9 [167]. Plusieurs études et relevés sur le terrain montrent que les causes principales de la mauvaise performance du béton sont plus ou moins liées à la facilité avec laquelle un fluide ou un ion pénètre dans la porosité du béton.

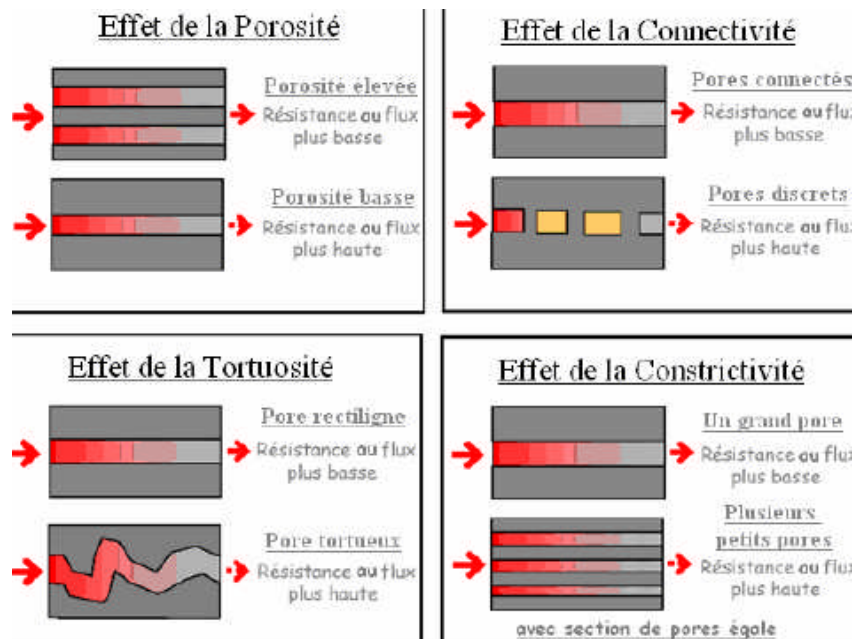


Figure II.9 : Effet des paramètres influençant la perméabilité [167]

## II.4.1.2. Paramètres influençant les propriétés de transfert

### II.4.1.2.1. Influence de rapport E/C

Le rapport E/C exerce une très grande influence sur la perméabilité à l'eau de la pâte de ciment hydraté. Plus E/C est faible, plus la perméabilité de la pâte diminue. La chute est très rapide entre 0,7 et 0,6 puisque c'est dans cette plage que le réseau de pores capillaires devient discontinu [151].

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 [80].

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 [25].

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 Hansen [83]. 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 [25].

Puisque que 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 à l'eau. Il a été observé que la perméabilité décroît lorsque la résistance mécanique des bétons croît [152].

#### II.4.1.2.2. Influence de la durée de cure humide

La durée de mûrissement influence fortement la perméabilité 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'hydrates qui viennent remplir et fractionner surtout la porosité capillaire.

L'augmentation considérable de la résistance et de la durabilité des bétons contenant de la pouzzolane par rapport aux bétons sans addition, s'explique généralement par une plus fine répartition des pores. Bien que la porosité globale ne soit pas relativement plus faible, la perméabilité des bétons contenant des pouzzolanes est fortement réduite, car il y a moins de gros pores dans la pâte de ciment durcie [79].

La perméabilité décroît au cours de l'hydratation du ciment en raison de la porosité capillaire (figure II.10). Une cure adéquate est donc très importante pour que l'hydratation soit la plus complet possible. Le temps minimum prescrit pour la cure des bétons ayant divers rapports E/C est indiqué sur la figure II.11.

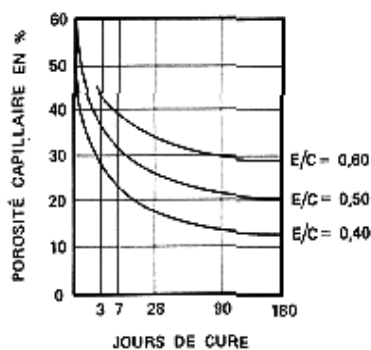


Figure II.10 : Evolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure [50]

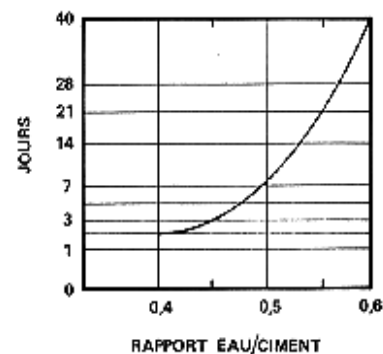


Figure II.11 : Nombre minimal de jours de cure pour le béton compact [50]

#### II.4.1.2.3. Influence des fumées de silice

Les fumées de silice, utilisées en remplacement du ciment permettent généralement de diminuer la perméabilité 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 optimal se situe aux environs de 10% [25].

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Cet effet s'explique, une fois de plus, par le fractionnement de la porosité capillaire. Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton avec un rapport E/L de 0,45 [50].

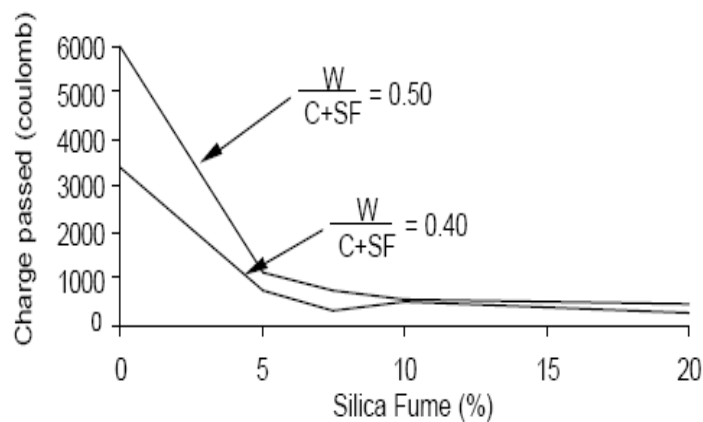


Figure II.12 : Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h [150]

La fumée de silice diminue très significativement la charge totale après 6h (figure II.12). Le taux de remplacement optimal est d'environ 10% puisque des taux de remplacement supérieurs ne produisent pas de réduction significative de la charge totale après 6h.

#### II.4.1.2.4. Influence du degré 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 [152].

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 [78].

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 [148 et 149]. Généralement, il convient d'appliquer un séchage par paliers de température croissants, 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 [78 et 160].

#### **II.4.1.2.5. Influence de la température**

L'effet de la température sur la perméabilité à l'eau du béton a fait l'objet d'une étude menée par *Jooss et Reinhard* [91]. Dans cette étude, en testant onze types différents de bétons, les auteurs ont trouvé que la température a une influence sur la perméabilité à l'eau. 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. Cette variation du taux d'augmentation dépend du type de béton. Ces auteurs expliquent ces effets par la diminution de la viscosité de l'eau avec la température, ce qui provoque une augmentation de la conductivité hydraulique.

#### **II.4.1.2.6. Interface pâte/granulat**

##### **II.4.1.2.6.1. Définition**

Dans le béton durci, autour des granulats, une zone de pâte de ciment hydraté particulière, appelée auréole de transition [122], peut être présente en fonction de la forme et de la composition chimique des granulats. La liaison pâte/granulat est trouvée meilleure d'un point de vue mécanique avec des granulats concassés qu'avec des granulats roulés. C'est la partie la plus poreuse, la mieux cristallisée, et la moins résistante dans un béton [126]. Cette faible résistance mécanique au niveau de l'auréole est due en partie à l'eau piégée sous les granulats. Les études menées sur cette partie montrent que l'interface est constituée de fibres de C-S-H, d'aiguilles d'ettringite, et de plaquettes de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  orientées perpendiculairement à la surface du granulat. L'amélioration des bétons par la microsilice permet de réduire la porosité et l'épaisseur de cette zone ce qui conduit à une meilleure liaison entre la pâte et les granulats. La zone de transition interfaciale est souvent décrite comme une zone dont l'épaisseur, variable de 10 à 50  $\mu\text{m}$ , dépend principalement de la granulométrie du ciment [128] du rapport E/C [12 et 51], des propriétés pouzzolaniques des additions minérales [74, 75, 114 et 146], des propriétés granulométriques et minéralogiques des granulats [12 et 37], et des conditions de malaxage du matériau [62].

Cette zone présente généralement une forte porosité ce qui induit des caractéristiques mécaniques médiocres et une fragilité particulière. Il est souvent avancé que l'adhésion entre le gravier et le mortier conditionne la résistance mécanique et les propriétés de transfert du béton [74 et 114].

La zone d'interface pâte/granulat est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Elle présente souvent une plus grande densité de microfissures. Cette zone offre donc un chemin préférentiel pour le passage de l'eau [68].

**Au niveau microstructural: Ollivier [144]**, a montré une évolution de l'orientation des cristaux de portlandite en fonction de l'éloignement par rapport au granulat par diffraction des rayons X.

**Au niveau physique: Alexander [7]**, a constaté:

- Augmentation du gradient de porosité quand on se rapproche de la surface des granulats.
- L'existence des plans de rupture préférentiels dus à l'orientation non aléatoire des cristaux de portlandite.
- La faiblesse de cette zone qui induit des microfissures formées par des contraintes externes.

L'interface pâte/granulat joue un rôle de premier plan dans le comportement mécanique de béton [123 et 136], on associe même le comportement inélastique du béton à la présence, avant chargement, de défauts localisés à l'interface pâte/granulat [118 et 124] attribuables à l'incompatibilité de déformation entre la pâte et le granulat sous l'effet des retraits et/ou des phénomènes thermiques. Les microfissures peuvent être développées en raison de la différence de rigidité (les écarts de rigidité) entre les agrégats et le mortier [87].

#### **II.4.1.2.6.2. Mécanisme de formation**

L'existence de la zone de transition est attribuée à deux principaux phénomènes: d'une part, *l'effet de paroi* des granulats vis-à-vis des particules fines du mélange et, d'autre part, l'accumulation locale d'eau sous les granulats due à la vibration lors de la mise en place du béton (*microressuage*).

Le premier phénomène induit un gradient de rapport E/C dans la pâte entourant les granulats et le second phénomène peut entraîner une certaine hétérogénéité de ce gradient autour des granulats [146].

#### **A. Effet de paroi**

De nombreux chercheurs ont observé, même sur des bétons bien malaxés [62], un déficit croissant de grains de ciment non hydratés à mesure que l'on s'approche de la surface des granulats.



Cet effet de paroi, largement décrit par (*Cwirzen and Penttala ; Scrivener et Pratt*) [51 et 168], ont noté une augmentation de la porosité importante (de 25 à 30%) dans une zone située à environ 35-45 microns de la surface des granulats. Selon *Ollivier et al* [146], un rapport E/C localement plus grand induit des sites de nucléation moins nombreux et la formation de cristaux mieux formés et orientés de façon préférentielle, en contact direct avec les granulats.

(*Cwirzen and Penttala ; Kjellsen et al*) [51 et 100], ont observé que la zone de transition autour des granulats est caractérisée par de plus faibles quantités des grains anhydres, des hydrates plus petits, de plus grandes quantités de cristaux d'hydroxyde de calcium et une porosité capillaire plus importante. Par contre, pour des bétons à E/C = 0,3 et 0,4 et avec 5 et 10% de fumée de silice [100], n'ont pas mis en évidence une différence significative de composition entre les C-S-H formés au coeur de la pâte de ciment et ceux formés dans la zone de transition.

Plusieurs auteurs ont proposé des hypothèses concernant le mécanisme de formation de la zone de transition interfaciale. Cette section est basée sur les travaux de [30, 33, 58, 122 et 123]. Lorsqu'on met des billes dans un contenant, elles occupent naturellement l'espace le plus faible possible. Près des parois cependant, il y a plus d'espace vide: la raison en est toute simple: le contenant ne peut pas s'adapter à la forme des billes (figure II.13). Cette loi de la physique est souvent appelée (*Effet de paroi*). De la même façon, au contact avec un obstacle solide, l'empilement des grains de ciment est moins compact qu'ailleurs dans la pâte.

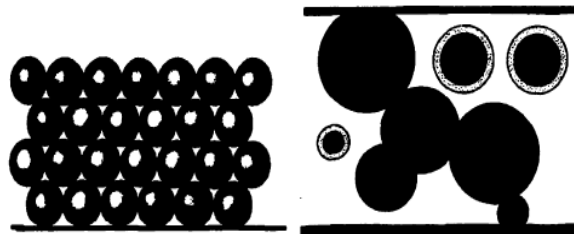


Figure II.13 : Empilement des grains au contact de la roche. À gauche : empilement compact. À droite : pâte floculée [181]

## B. Effet de ressuage localisé

Le second phénomène, proposé par *Goldman and Bentur* [75], pour expliquer le développement d'une zone de transition est le ressuage localisé qui se développe sous les granulats pendant la vibration du béton.

Récemment, *Cwirzen and Penttala* [51], ont attribué la forte porosité capillaire observée près de la surface des granulats les plus grossiers et dans l'espace intergranulaire, à cet effet de ressuage localisé.

En 1995, **Ollivier et al** [146], ont réalisé une analyse bibliographique des travaux sur le sujet et en ont conclu que le phénomène de ressuage localisé et l'hétérogénéité qui en résulte n'a pas été clairement identifiée au travers des études publiées. Ils préconisent notamment de mieux spécifier les procédures de malaxage du matériau et d'étudier l'effet du rapport E/C et de la taille des granulats sur ces phénomènes.

En conséquence, le rapport E/C est plus élevé dans cette région. On sait que la proportion d'eau est associée à la porosité du mélange durci. Il s'agit là d'une des causes de la porosité élevée de la zone de transition interfaciale. La rareté des grains non hydratés près de l'interface est également en relation avec la proportion élevée en eau dans cette zone. La présence d'un rapport E/C local élevé induit la diffusion des ions dissous vers l'interface. Les ions les plus solubles migrent rapidement vers la zone de porosité élevée, il s'agit des ions calcium, aluminium et des sulfates, résultant de l'hydratation rapide des aluminates de calcium et de sa réaction avec le gypse. La surface du granulat agissant comme site de nucléation et l'espace disponible entre les grains de ciment occasionnent la formation de cristaux bien développés. L'orientation préférentielle des cristaux de portlandite est également reliée à l'espace suffisant près de l'interface. Les cristaux peuvent croître sans contrainte, selon le plan d'énergie de surface minimale [90].

Par la suite, entre ces cristaux, les produits d'hydratation continuent de précipiter et forment des cristaux secondaires, plus petits que les premiers. Avec l'éloignement de la surface des agrégats, l'effet de paroi ne se fait plus sentir et la zone de transition interfaciale se termine.

#### **II.4.1.2.6.3. Caractéristiques de la zone de transition interfaciale**

Le béton a longtemps été considéré comme un matériau à deux phases: la pâte de ciment hydratée et les granulats. Cependant, **Farran** [64], observait des caractéristiques particulières dans une zone située près de l'interface entre la pâte et les granulats.

La zone de transition interfaciale revêt une grande importance dans les bétons. Il s'agit de la portion de la pâte de ciment qui se situe autour des granulas. S'étendant sur une épaisseur d'environ 50  $\mu\text{m}$ , on y trouve une microstructure particulière, une porosité élevée et des cristaux bien développés en font une zone propice à la naissance des fissures et au transport des agents agressifs.

La figure II.14 montre une représentation schématique de la zone de transition interfaciale. À mesure que l'on s'éloigne de l'interface, la microstructure se rapproche de plus en plus de celle du reste de la pâte.

La zone de transition interfaciale se termine lorsqu'il n'y a plus de changements. Ainsi, les concentrations de portlandite et d'ettringite diminuent, la porosité diminue et les grains non hydratés se font plus fréquents jusqu'à ce qu'on atteigne la masse de la pâte de ciment. **Breton et al** [30], ont observé un comportement un peu plus complexe en fonction de la distance.

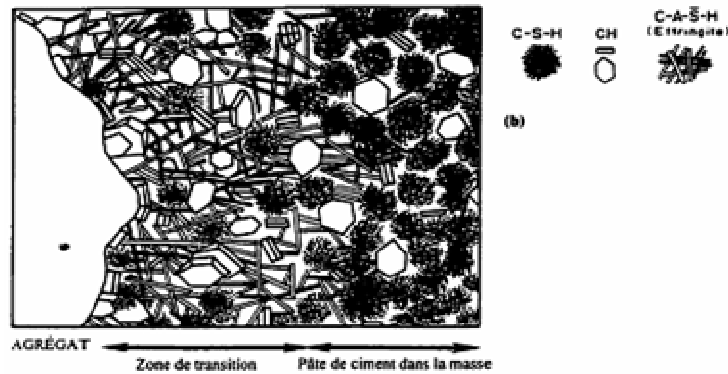


Figure II.14 : Schéma de la zone de transition interfaciale [118]

En raison de sa porosité élevée et de sa forte concentration en cristaux bien développés et orientés, la zone de transition interfaciale est vue comme une région potentiellement faible dans le béton. Il est reconnu depuis longtemps que les microfissures se développent en premier à la zone de transition interfaciale [33 et 87]. Des plans de fracture préférentiels ont également été observés entre les cristaux orientés de portlandite [168]. L'énergie de fracture serait plus faible entre les cristaux qu'à travers ceux-ci. De plus, le travail de fracture diminue lorsque la porosité augmente. La porosité de la zone de transition interfaciale est également associée à la durabilité du béton. Une perméabilité considérablement plus élevée a été observée pour les échantillons contenant des agrégats et pour les mortiers par rapport à une pâte de ciment [43 et 181]. En plus d'une porosité totale plus élevée dans les mortiers, cela indique une plus grande connectivité des pores. En conséquence, les agents agressifs diffusent plus facilement à l'intérieur du béton à travers le réseau de pores des zones de transition interfaciale.

#### II.4.1.2.6.4. Facteurs d'influence

##### ➤ Effet des granulats

Le type d'agrégat joue un rôle important. En effet, l'épaisseur de la zone de transition interfaciale augmente avec la taille des granulats pour les mortiers. Il a également été observé que des agrégats rugueux améliorent l'adhésion avec la pâte [127]. Dans certains cas, les agrégats réagissent avec la pâte de ciment. Pour les agrégats calcaires, après 60 jours, la force du lien est plus élevée que dans le cas d'un granulat non réactif [121]. Les petits grains permettent effectivement un arrangement plus compact près des interfaces pâte/granulat en remplissant les espaces entre les particules plus grosses.

Dans ses expériences **Ping et al** [156], ont montré que l'épaisseur de cette zone diminuait avec la taille des granulats, quelle que soit la nature de ceux-ci (quartz ou calcaire). Une zone de transition plus dense peut être obtenue avec les granulats de calcaire plus petits et grâce aux interactions chimiques possibles entre ciment et particules. Selon **Ollivier** [144], il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. Ce qui explique l'augmentation de la résistance mécanique du béton en fonction du temps de conservation.

De même (**Farran ; Tasong et al**) [67 et 177], ont montré que les granulats calcaires, contrairement aux granulats basaltiques et siliceux, peuvent réagir avec la pâte de ciment en produisant un dégagement de CO<sub>2</sub> et une zone de transition très poreuse. Cette très forte porosité provoque une diminution de l'adhésion pâte de ciment/granat au très jeune âge. Ces effets diminuent avec le remplissage progressif de la porosité par les hydrates qui se forment à plus long terme.

**Tasong et al** [177], ont montré, sur des échantillons constitués d'une couche de pâte de ciment entre deux tranches de granulats, que la nature pétrographique, la résistance mécanique et la rugosité des granulats et leurs interactions chimiques avec la pâte de ciment conditionnent la qualité de l'adhésion entre la pâte de ciment et les granulats. Selon **Guinea et al** [76], ont quantifié l'influence de l'état de surface des granulats sur l'adhésion entre la matrice liante et les inclusions granulaires de bétons en utilisant des granulats roulés et des granulats concassés traités en surface.

D'autre part **Basheer et al** [36], ont étudié l'effet de la taille des granulats et de leur distribution granulaire sur la microstructure de la zone d'interface de bétons matures soumis au séchage pendant 14 jours. Ils ont utilisé des granulats de taille 10 et 20 mm, en maintenant un rapport granulat/ciment constant et en faisant varier la quantité relative de grains de 10 et 20 mm de diamètre. Leurs résultats indiquent que l'augmentation du dosage en granulats de 20 mm provoque une augmentation significative de la porosité et de l'épaisseur de la zone d'interface.

#### ➤ **Rapport eau/ciment**

Plusieurs chercheurs ont observé, que la diminution du rapport E/C conduit à un rétrécissement de la zone d'interface: par exemple, pour **Cwirzen and Penttala** [51], l'épaisseur de la zone d'interface de bétons à hautes performances âgés de 28 jours passe de 40 µm à moins de 5 µm lorsque le rapport E/C diminue de 0,42 à 0,30. Dans ses expériences **Hoshino** [82], a démontré l'existence d'un rapport E/C et d'une porosité plus élevée près de la surface inférieure des agrégats par rapport à la surface supérieure.

Les cristaux de portlandite sont aussi plus nombreux et plus gros sous les granulats. De plus, la différence entre les deux interfaces augmente avec le rapport E/C.

➤ **L'âge**

*Vivekanandam et Patnaikuni* [180], ont aboutit à des conclusions différentes sur bétons à hautes performances. Selon eux, la zone de transition augmente de 8  $\mu\text{m}$  à 13  $\mu\text{m}$  entre 3 et 56 jours d'hydratation; par ailleurs, ils notent également une très faible variation de l'épaisseur au-delà de 14 jours d'hydratation.

Dans ses expériences *Diamond and Huang* [62], la différence de porosité entre la zone d'interface et le coeur de la pâte s'atténue progressivement à mesure que des cristaux de portlandite et des C-S-H remplissent la zone d'interface. Ils observent, qu'à âge mature, il n'existe qu'une faible différence entre la porosité de la zone d'interface et le cœur de la pâte.

➤ **Ressuage**

Le ressuage est un facteur important à ne pas négliger car il peut avoir des effets délétères sur la zone de transition interfaciale. En remontant vers la surface, l'eau libre peut rester coincée sous la surface inférieure des agrégats. Le ressuage interne ainsi produit augmente davantage le rapport E/C local déjà élevé près des interfaces pâte/granat.

➤ **Nature du ciment**

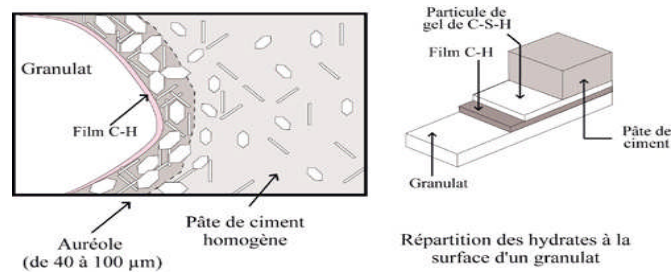
La nature du ciment utilisé constitue un de ces facteurs. Les propriétés mécaniques d'un béton contenant du ciment de type K (expansif: contient du calcium aluminat) sont de 25 à 40% supérieures à celles d'un béton contenant du ciment Portland [121]. La zone de transition interfaciale associée à ce type de ciment K contient des cristaux orientés de façon aléatoire.

➤ **Réaction pouzzolanique**

La réaction pouzzolanique permet d'augmenter la résistance à l'interface pâte de ciment/granat. En effet, la portlandite cristallise à la surface des granulats, la réaction avec la fumée de silice permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type C-S-H bien liés aux granulats [46, 53, 71, 104, 105 et 175].

#### **II.4.1.2.6.5. Microstructure de l'interface pâte/granat**

À une échelle plus petite, une situation similaire à l'effet de paroi est observable entre la pâte de ciment hydratée et le granulat dans un béton. En effet, une zone de transition, sépare la pâte de ciment hydratée et le granulat (figure II.15).



**Figure II.15 :** Interface entre un granulat et une pâte de ciment Portland hydratée [47]

La figure II.16 indique une vue à plus fort grossissement (600×) de la zone d'interface pâte/granulat. On remarque encore, la présence d'une grande quantité d'hydrates fibreux, probablement de l'ettringite. A plus fort grossissement (1000×), on voit apparaître quelques cristaux de calcite enchevêtrés dans les aiguilles d'ettringite (figure II.17) [125].



**Figure II.16 :** Hydrates fibreux à l'interface pâte/granulat (grandissement 600×) [125]



**Figure II.17 :** Calcite et aiguilles d'ettringite à la surface de la fissure (grandissement 1000×) [125]

Plusieurs représentations suivant la nature des hydrates au contact du granulat ont été proposées. Elaborés principalement à partir d'observations en microscopie électronique à balayage et de la diffraction des rayons X, ces modèles montrent bien qu'il n'existe pas un réel consensus à propos de la nature des hydrates présents au contact du granulat.

En effet, certains auteurs comme *Barnes et al* [33] évoquent la formation d'un film duplex d'hydroxyde de calcium et d'hydrosilicates de calcium, et d'autres [133 et 147] la présence d'hydroxyde de calcium associée à des hydrates provenant de l'hydratation des phases aluminates. De plus, la possibilité d'une orientation préférentielle des cristaux d'hydroxyde de calcium au contact du granulat est discutée.

Pour sa part, *Maso* [122] n'a pas observé de cristaux d'hydroxyde de calcium au contact du granulat mais une fine couche de cristaux de petite dimension qui reste difficilement caractérisable en microscopie électronique à balayage ou transmission. Cette couche pourrait être constituée d'hydrosilicates de calcium, hydrates nano-cristallisés.

#### **II.4.1.2.7. Fissuration**

La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie, symptôme qui, pour le béton n'est guère plus spécifique que la fièvre pour les humains. Aucun médecin praticien n'est spécialiste en fièvre, on élimine la fièvre en soignant les maladies les plus diverses [21].

Les fissures de différentes origines (mécanique, thermique et physico-chimique) offrent des chemins préférentiels pour la pénétration de différents agents potentiellement agressifs. De plus, dans le cas des structures de confinement, les fissures peuvent être à l'origine de fuite d'air ou de vapeur contaminée. De ce point de vue, on constate le rôle important des fissures sur la durabilité et les propriétés de transfert du béton. C'est pourquoi ce sujet a fait l'objet de nombreuses publications [65, 89 et 174].

Outre l'influence des fissures sur les propriétés de transfert, elles présentent des milieux favorables pour le développement des réactions chimiques qui augmentent le risque de détérioration du béton. [89]. Définissent la distinction entre micro et macrofissure essentiellement sur la base du volume de l'éprouvette considérée. Selon ces auteurs une microfissure est très petite par rapport au volume de l'éprouvette alors qu'une macrofissure à une taille non négligeable par rapport à ce volume. Une macrofissure est définie comme une discontinuité dans la structure du matériau [98].

Les microfissures sont parmi les premières causes de la formation de l'ettringite différée. La croissance des cristaux d'ettringite dans les fissures mène à l'augmentation de leurs ouvertures et par conséquent la détérioration des matériaux [65]. Dans la littérature, on peut distinguer plusieurs classes de microfissures.

D'après *Blakey* [32], il existe trois types de microfissures: des microfissures à l'interface pâte/granulat, dans la matrice cimentaire et dans les granulats. La croissance des fissures gouvernent la déformabilité à long terme du béton et donc son comportement en service et sa durabilité.

### **II.4.2. RÉSISTANCES AUX EAUX AGRESSIVES**

#### **II.4.2.1. Définition**

Les altérations du béton, observées en présence d'agents agressifs, sont d'ordre chimique ou physique. Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en associations avec cette dissolution la formation des composés nouveaux.

Les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives aux frottements, aux chocs thermiques et aux gonflements ou aux retraites, entraînant l'érosion et la fissuration du béton [169]. L'enquête **OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique)** [73], indique que les plus importantes causes de dégradation relevées sur 800000 ponts de par le monde, sont: contaminations par les chlorures et attaque par les sulfates. L'utilisation de ciments contenant des additions cimentaires semble être aujourd'hui une approche prometteuse. L'incorporation de ces additions nous permet d'augmenter la capacité des bétons à résister à l'attaque chimique de son environnement agressif, comme il a été mis en évidence par plusieurs chercheurs [169].

#### **II.4.2.2. Eaux pures et eaux douces**

Les eaux douces peuvent minéraliser de teneur en dioxyde de carbone agressif comprise entre 15 et 30 mg/l et de PH 5.5 à 6.5, sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs. Toutefois, des expériences récentes établissent que, même dans ce cas, on ne peut pas négliger l'action dissolvante de l'eau. Les silicates et les aluminates, moins solubles, sont attaqués plus tardivement lorsqu'une partie de la chaux a déjà été lessivée. La dissolution sélective de leur calcium provoque un accroissement de leur porosité, en même temps que le rapport molaire  $\text{CaO/SiO}_2$  décroît. Les ions alcalins  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  particulièrement mobile, sont également lessivés par les eaux [99]. Le processus d'attaque conduit à des pertes de masses et d'alcalinité due au lessivage de la portlandite, ce qui induit une augmentation de la porosité et la perméabilité. Il peut se traduire également par une diminution de la cohésion et une chute des résistances mécaniques. Corrélativement, on constate que les ciments sont d'autant plus résistants à l'attaque par les eaux douces qu'ils sont moins riches en hydroxyde de calcium et ont une plus grande stabilité chimique. C'est le cas des ciments avec additions minérales dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des C-S-H de rapport  $\text{CaO/SiO}_2$  faible [18].

L'attaque du béton par les eaux douces chargées en dioxyde de carbone se déroule conformément à un processus de dissolution/précipitation, selon le mécanisme suivant **Baron et Ollivier** [18] ; l'eau amenée à percoler à travers le béton se sature progressivement en bicarbonate, par suite la dissolution de la portlandite et, à un degré moindre, des C-S-H, lorsque cette solution de bicarbonate vient en contact avec d'autres cristaux de portlandite, il y a précipitation de carbonate de calcium, très peu soluble, qui accroît momentanément la compacité du béton en diminuant la section de percolation. Comme dans le cas des bétons au contact d'eaux pures, on constate que la dégradation par eaux chargées en dioxyde de carbone est fonction de la teneur en portlandite, c'est à dire du type de ciments. Les bétons sont d'autant plus résistants que le ciment libère moins de portlandite.



L'hydroxyde de calcium fait plus de 20 à 25% en poids de la pâte de ciment et son enlèvement provoque une évidente augmentation dans la perméabilité du béton et la déstabilisation des phases hydratées. La quantité de la chaux lessivée dépend largement de la compacité du béton et de type de ciment. La résistance à la lixiviation des ions  $\text{Ca}^{2+}$  est d'autant plus grande que le ciment contient moins de chaux, les bétons à base de CPA, riche en chaux, sont plus sensibles à l'altération que les ciments au laitier, pouzzolane et les bétons de ciment alumineux [79].

Les ciments pouzzolanique se comportent mieux que les ciments Portland, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice à la surface du béton riche en gel de silice et d'alumine [18].

#### **II.4.2.3. Eaux contenant des sulfates**

Lorsque le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium, sodium et calcium. Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de  $\text{CaSO}_4$  attaque le béton à cause de la réaction entre  $\text{CaSO}_4$  et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions qui sont comparativement riches en  $\text{CaSO}_4$  et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , comme le cas des pâtes du ciment Portland [135].

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que  $\text{CaSO}_4$  puisqu'il réagit non seulement avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'ettringite expansive. L'importance de la détérioration due à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment [79].

Les additions des pouzzolanes naturelles et des fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact [79].

#### **II.4.2.4. Eaux contenant des chlorures**

A l'exception de l'eau de mer ou l'eau se trouvant à proximité de la mer, la teneur de l'eau en chlorure est généralement très faible et par conséquent non nocive. L'action des agents de dégivrage à base de chlore est révélée par gonflement, fissuration et désagrégation du béton [79].

Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont les chlorures de sodium et calcium, qui sont largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif [79].

Les mécanismes qui conduisent à la détérioration sont différents, et peuvent affecter le béton directement et indirectement. Pour ce qui est de l'attaque directe, on peut dire que quand le béton arrive en contact avec les solutions de chlorure, il se gonfle et perd sa résistance même si les solutions ne sont pas très concentrées. D'ailleurs, les chlorures contribuent au lessivage de la chaux à travers un mécanisme qui n'est pas encore complètement expliqué, et lequel dépend de nombreux facteurs d'environnement (pluie, température,...) mais aussi sur le type de ciment [135].

Le lessivage de chaux CH est plus faible dans les ciments pouzzolaniques, ou les ciments contenant de la fumée de silice, que dans les ciments Portland. Dans ces derniers le CH qui peut seulement être lessivé est celui qui n'a pas été déjà combiné comme C-S-H avant l'exposition aux sels, comme conséquence, la porosité des mortiers exposés à l'action des sels augmente dans les ciments Portland et diminue dans ceux qui contiennent de la fumée de silice ou de la pouzzolane. Une solution concentrée de 30%  $\text{CaCl}_2$  endommage les pâtes et les mortiers de ciment Portland, avec ramollissement de la surface, fissuration, non seulement après plusieurs cycles de séchage et mouillage, mais aussi, après une simple submersion. Les pâtes de ciment pouzzolanique montrent une meilleure résistance aux solutions concentrées de chlorure que celle obtenu par le ciment Portland. Ce comportement est attribué à la faible quantité ou à l'absence de CH dans les ciments pouzzolaniques hydratés [79].

Les chlorures pénètrent au sein du béton à travers des microfissures et par diffusion dans l'eau contenue dans la pâte de ciment et dans les pores d'agrégat. Supposant que le béton ne possède pas de microfissures, la pénétration se produit par diffusion. Les bétons à base des ciments pouzzolaniques s'opposent généralement à la pénétration d'ions de chlorure, contrairement au ciment Portland. Ceci s'explique par le fait que les ciments contenant des matériaux pouzzolaniques sont capables d'immobiliser (dans les aluminates et les silicates) une quantité de  $\text{Cl}^-$  plus grande que celle dans le ciment Portland, ainsi que la diffusion de  $\text{Cl}^-$  dans les ciments pouzzolaniques est ralentie [120].

#### **II.4.2.5. Eau de mer**

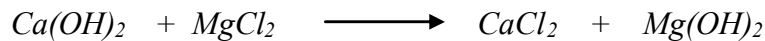
L'eau de mer a une forte teneur en sel (3,5% environ) avec une prédominance de chlorure et de sulfate. Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendante faisant appel à différents mécanismes: dissolution, lixiviation, réaction d'échange de base, précipitation des composées insolubles, cristallisation des sels expansifs [54].

Les principales réactions mises en jeu peuvent se décomposer de la manière suivante:

➤ **Action des chlorures**

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers des bétons armés, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydraté, une autre partie se combine au C<sub>3</sub>A sous forme de monochloroaluminate de calcium C<sub>3</sub>A.CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O.

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite suivant la réaction d'échange:



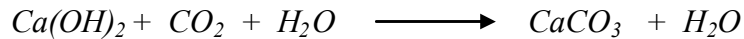
La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le CaCl<sub>2</sub> réagit avec les aluminates pour former de monochloroaluminate.

➤ **Action des sulfates de magnésium**

Cette réaction conduit à la formation d'ettringite expansive et à la substitution des ions Ca<sup>2+</sup> par les ions Mg<sup>2+</sup>, soit dans les C-S-H, soit dans la portlandite (formation de brucite).

➤ **Action du dioxyde de carbone**

Il réagit sur la portlandite selon la réaction:



Le carbone de calcium se précipite à la surface du béton sous forme d'aragonite et de calcite qui colmatent les pores. Les actions de chacun des ions ne sont pas cumulatives. Le monochloroaluminate de calcium devient instable en présence de sulfates et se décompose pour former de l'ettringite. Elle-même, en présence de silice dissoute et de carbone, il se transforme partiellement en thaumasite (Ca.SiO<sub>3</sub>.CaSO<sub>4</sub>.CaCO<sub>3</sub>.15H<sub>2</sub>O). C'est l'interférence des différents ions qui explique que l'agressivité de l'eau de mer sera bien plus faible que celle des eaux sulfatées [18]. La thaumasite n'est détectée qu'en solution solide avec l'ettringite. Sa formation cause une dégradation du béton qui se manifeste par une expansion et une fissuration, dans un premier temps, et par une destruction des C-S-H par la suite. La formation de la thaumasite est encore plus destructive que celle de l'ettringite, car d'abord la quantité de thaumasite qui peut se former est beaucoup plus grande que celle de l'ettringite à cause des constituants qui rentrent dans sa composition (silicates, carbonates, sulfates, chaux et eau) et ensuite, la formation de la thaumasite peut causer la consommation des silicates et du calcium des C-S-H [6].

Selon *Mehta* [120], le remplacement des ions OH<sup>-</sup> par des ions Cl<sup>-</sup> réduit l'alcalinité de la solution interstitielle nécessaire pour former de l'ettringite expansive.

Par ailleurs, du fait de leur coefficient de diffusion relativement élevé, les chlorures pénétrant rapidement dans le béton et consomment une partie des aluminates en formant du monochloroaluminate non expansif. Toutefois, les chloroaluminates instable en présence de sulfate, tendent à se transformer en ettringite expansive plus ou moins lessivée par l'eau de mer.

**Locher** [113], attribue l'agressivité relativement faible de l'eau de mer à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du béton. Cependant la pénétration d'ions de chlorure est beaucoup plus faible quand les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers sont utilisés à la place du CPA.

Les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers, grâce à leur pâte plus compacte et à cause de leur faible teneur en aluminates de calcium hydratés et de CH, empêchent la pénétration d'ions de sulfate et résistent intrinsèquement mieux que les ciments Portland à l'attaque des sulfates [44].

#### II.4.2.6. Action des chlorures seuls

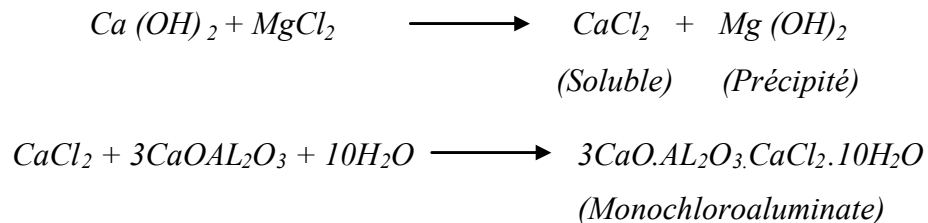
Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit au gâchage à partir des constituants de base lors de la confection du béton, soit plus tardivement si l'ouvrage est exposé à des embruns marine ou des sels. Les chlorures liés se trouvent dans le béton sous deux formes:

- Physiquement adsorbés sur les parois solides dans les pores.
- Chimiquement fixés par réaction avec certains composés du ciment, dans ce dernier cas, les composés formés sont le monochloroaluminate hydraté ou sel de (**Friedel**), de formule  $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ .

La capacité de fixation des ions  $Cl^-$  par le ciment dépend de la nature de ciment utilisé et principalement de la quantité d'aluminate  $C_3A$  présente dans le clinker. D'autres espèces ioniques peuvent intervenir sur la fixation chimique des chlorures. Ainsi les ions sulfates réagissent de préférence aux ions chlore sur le  $C_3A$  présent en formant des sulfoaluminates et en diminuant la capacité de fixation des chlorures. Le pourcentage des chlorures libres s'accroît avec le rapport E/C (alors que la quantité de chlorures liés reste sensiblement constante) et avec la concentration en sels du milieu environnant [154 et 158]. La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultat de mécanismes complexes où l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important. Le taux de diffusion des chlorures dans le béton est affecté principalement par le type de cation associé avec le chlorure [176]. La dissociation de  $MgCl_2$ , l'agent le plus actif dans l'attaque des ciments, libère  $Mg^{2+}$  qui substitue  $Ca^{2+}$  dans  $Ca(OH)_2$  pour former  $Mg(OH)_2$  et dans C-S-H pour former M-S-H sans propriétés liantes, son action se résume par sa dissociation en libérant ainsi les ions chlore qui réagissent avec les aluminates, pour former le monochloroaluminate ou sel de **Friedel** [35].

Ces mêmes ions chlorures peuvent s'insérer dans le réseau cristallin de C-S-H et créer une structure alvéolaire, d'où la formation d'un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus fragiles quand la qualité de la chaux dissoute augmente [35].

Les principales réactions provoquées par l'action du  $MgCl_2$  sont les suivantes:



La formation du monochloroaluminate, instable donne en présence de sulfate l'ettringite  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  d'où le gonflement de l'ouvrage et sa dégradation. Il semble que la diffusion des chlorures combinés aux cations divalents (par exemple  $CaCl_2$ ) soit plus rapide que celle correspondant aux cations monovalents comme  $NaCl$  [154 et 165]. Par contre les chloroaluminates se forment en quantité plus importante à partir de  $CaCl_2$  que de  $NaCl$  [154]. On peut relever trois conséquences relatives à l'incorporation d'additions minérales dans les ciments sur la pénétration des chlorures.

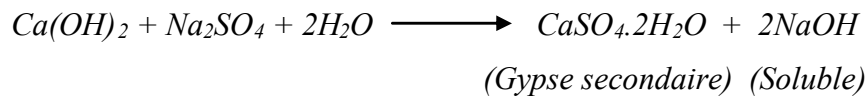
- La capacité de fixation des chlorures est déterminée par la concentration en ( $C_3A + C_4AF$ ) du liant. Or la teneur de ces composés diminue en présence de laitiers ou de cendres volantes puisque les aluminates proviennent de clinker.
- La quantité de chloroaluminates formée étant réduite, la teneur en chlorure libre devrait être plus élevée pour les ciments incorporant des additions minérales.
- Les additions minérales réduisent sensiblement le PH de la solution interstitielle. Cette diminution conduit à admettre une concentration admissible plus faible en chlorure au niveau de l'armature.

#### II.4.2.7. Action des sulfates seuls

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite (secondaire). La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite (primaire) obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments Portland par réaction du gypse, car cette ettringite n'est jamais expansive [18].

Schématiquement, la formation de l'ettringite en deux étapes est résumée ci-après:

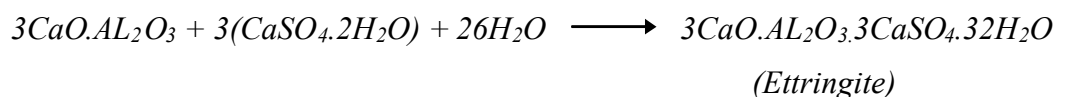
- a) Formation du gypse secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise. La formation de gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate. Par exemple, avec le sulfate de sodium:



Une partie du gypse secondaire formé au cours de cette réaction précipite et provoque une expansion, l'autre partie soluble entraîne une érosion.

- b) Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant l'ettringite.

- Soit à partir de reliquat de C<sub>3</sub>A anhydre:

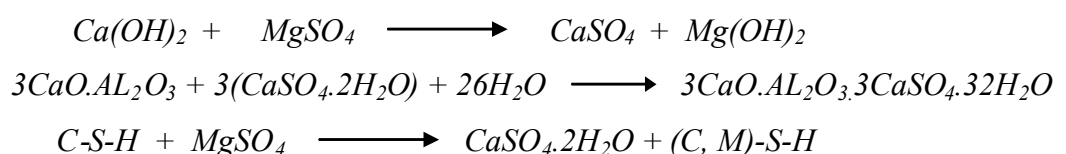


- Soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> ou de monosulfoaluminates de calcium C<sub>3</sub>A.CaSO<sub>4</sub>.18H<sub>2</sub>O.

L'ettringite ainsi formée provoque une expansion. Il est à noter que l'ettringite se forme normalement lors de la prise du ciment Portland, mais elle se transforme rapidement dans les conditions habituelles de conservation en monosulfate. En outre le gypse ajouté au clinker n'est plus à l'état libre dans la pâte durcie, comme les différents sulfates de calcium (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O, CaSO<sub>4</sub> · 1/2 H<sub>2</sub>O et CaSO<sub>4</sub>).

Suivant la composition de la phase liquide, en particulier de la teneur en chaux, la cristallisation de l'ettringite peut être expansive ou non. Dans les produits riches en chaux, où sa solubilité est réduite, l'ettringite se forme in situ au contact des aluminates de calcium, en présence d'une quantité très limitée de solution fortement sursaturée.

Les sulfates les plus agressifs vis à vis des bétons sont les sulfates de magnésium, d'ammonium, de calcium et de sodium. Le sulfate de magnésium est très fortement agressif par la double action du cation Mg<sup>2+</sup> qui s'échange avec Ca<sup>2+</sup> et l'anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> suivant les réactions:



Les échanges de Mg<sup>2+</sup> avec Ca<sup>2+</sup> conduisent à la formation de brucite Mg(OH)<sub>2</sub> qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates.

Ils provoquent aussi la transformation progressive des C-S-H en un silicate de magnésium hydraté M-S-H sans propriétés liantes. De plus, la cristallisation d'ettringite, instable en présence de sulfate de magnésium, intensifie la réaction de formation du gypse [170].

Le sulfate de calcium, présent dans les sols sous forme de gypse et d'anhydrite, et dans les eaux souterraines séléniteuses, est agressif pour le béton malgré sa solubilité relativement faible. Le processus de dégradation, plus lent que dans le cas des sulfates de magnésium et d'ammonium, est du essentiellement à la formation d'ettringite expansive [135].

Le sulfate de sodium, très soluble, entraîne une dégradation par formation de gypse et d'ettringite expansive dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration de  $\text{SO}_4^{2-}$  et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment. Les C-S-H, moins sensibles que la portlandite, ne sont pas affectés directement par le sulfate de sodium, mais, sont néanmoins, susceptibles de se décomposer dans un deuxième temps par lixiviation partielle de leur chaux et formation de gypse [135].

Le sulfate de potassium, a une action voisine de celle du sulfate de sodium, mais la vitesse d'attaque est un peu plus lente. Les phases solides dans le ciment Portland bien hydraté, sont C-S-H, CH et les produits d'hydratation contenant l'alumine, ces deux derniers sont les plus vulnérables contre l'attaque des ions de sulfates [135].

Des essais ont montré que la percolation des sulfates peut, parfois, être responsable de la dégradation des mortiers. Si on considère le cas où les aluminates sont absents, comme dans le cas des mortiers manufacturés avec  $\text{C}_3\text{S}$ , l'action des sulfates sera beaucoup moins agressive que si on utilise le mélange  $\text{C}_3\text{S} + 10\% \text{C}_3\text{A}$  [166].

Une pouzzolane naturelle de l'Italie riche en silice ( $\text{SiO}_2 = 88,25\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,8\%$ ) a donné des résistances meilleures au mélange de ciment exposé à la solution de  $\text{MgSO}_4$  en comparaison à la pouzzolane qui contient  $17,58\% \text{Al}_2\text{O}_3$ . Certainement, par réduction de la quantité totale de l'alumine réactive dans le mélange de ciment, La pouzzolane riche en silice est capable de réduire la teneur en aluminate hydraté vulnérable aux sulfates dans la pâte de ciment. De ce fait, on peut conclure que l'attaque sulfatique peut être réglée quand la présence d'aluminate hydraté dans la pâte de ciment est réduite ou même éliminée par la réduction de la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  ou par la substitution d'une partie de ciment par un matériau convenable [120].

**Mehta** [120], a constaté que la pâte de référence CPA et la pâte avec 10% de pouzzolane perdent plus de 50% de leur résistance à la compression, Tandis que pour le cas de 20 et 30% de pouzzolane la chute de résistance était inférieure à 20%.

En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation des ciments [44], ce qui explique l'augmentation de la résistance de la pâte de ciment aux jeunes âges.

*Costa and Massaza* [44], ont confectionné des ciments composés de ciment Portland avec addition de 10, 30 ou 40% de pouzzolane naturelle de l'Italie. Les mesures d'expansion sur des mortiers exposés à une solution de 1% de  $MgSO_4$  pour une période de 5 ans, prouvent que l'expansion engendrée par les sulfates est légèrement réduite par l'addition de 10% de pouzzolane, mais elle est considérablement réduite lorsque la proportion ajoutée est de 30 ou 40%.

Les auteurs ont attribué ces résultats à la haute imperméabilité et à la faible teneur en chaux du mortier à base de ciment avec 30 ou 40% de pouzzolane. Ils ont observé que dans l'hydratation de la pâte de ciment à la pouzzolane, la chaux est présent non seulement en petite quantité mais encore entouré par les produits imperméables de réactions pouzzolaniques. La réduction de la perméabilité est assurée par l'utilisation des additions pouzzolaniques, qui devient un facteur majeur dans l'amélioration de la durabilité du béton exposé aux solutions sulfatiques [44].



## CONCLUSION

**L**es effets des additions minérales offrent au béton un comportement mécanique amélioré et une meilleure durabilité. Selon le type d'additions et le taux de substitution du ciment, les résistances en compression à long terme d'un béton préparé avec des ciments composés sont généralement meilleures que celles d'un béton avec un ciment Portland ordinaire.

Ensuite, les additions minérales améliorent généralement la porosité, l'interface mortier/gravier, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Le risque de fissuration est aussi considérablement atténué dans les bétons fabriqués avec les ciments contenant des additions minérales [5, 6, 25, 44, 46, 50, 53, 71, 74, 75, 85, 104, 105, 114, 146, 150, 175 et 182].

Une des caractéristiques les plus importantes des ciments est la texture, c'est à dire la façon dont s'arrangent la matière et des pores qui composent le matériau. Elle influence à la fois leurs propriétés mécaniques et leurs propriétés de transport. Ces dernières sont intimement liées à la résistance mécanique (résistance, module d'élasticité) et chimique du ciment dans de nombreux problèmes de durabilité (transport de chlore,...etc.).

La compacité du matériau ainsi que la taille et la répartition des pores a une grande influence sur la résistance mécanique des pâtes de ciment hydratées et par conséquent sur les performances des bétons. L'accroissement des performances mécaniques et la stabilité des matériaux cimentaires hydratés ont été obtenus jusqu'ici essentiellement par la réduction de la porosité [157].

Cette baisse de la porosité est obtenue grâce à l'emploi du sable de dune finement broyé, qui, résulte essentiellement de deux effets: un effet physico-chimique et un effet chimique engendré par la réactivité chimique en milieu cimentaire, de certaines phases minérales, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques.

Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité et la durabilité du ciment et du béton. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

## CHAPITRE III

### CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES

#### III.1. INTRODUCTION

L'emploi judicieux des matériaux utilisés exige la connaissance de leurs diverses propriétés: physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques pour permettre de faire un choix répondant à leur objectif.

#### III.2. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

L'activité physico-chimique d'un ciment est d'autant plus grande que la surface totale développée des grains est élevée. Dans le ciment, une particule de diamètre  $> 50 \mu\text{m}$  est pratiquement inerte. Il s'agit ici d'un broyage du sable de dune et de clinker (laboratoire *C.E.T.I.M – Boumerdès*). Le broyage est effectué à l'aide d'un broyeur conventionnel à boulets (cylindre métallique horizontal mis en rotation et rempli au 1/3 de boulets d'aciers (différentes diamètres) qui broient la matière en se heurtant et en se frottant dans un mouvement de cascade) (figure III.1), après en procède au tamisage (figures III.2 et III.3). Le broyage se fait en plusieurs étapes pour limiter l'échauffement de l'échantillon (broyage par 2kg).

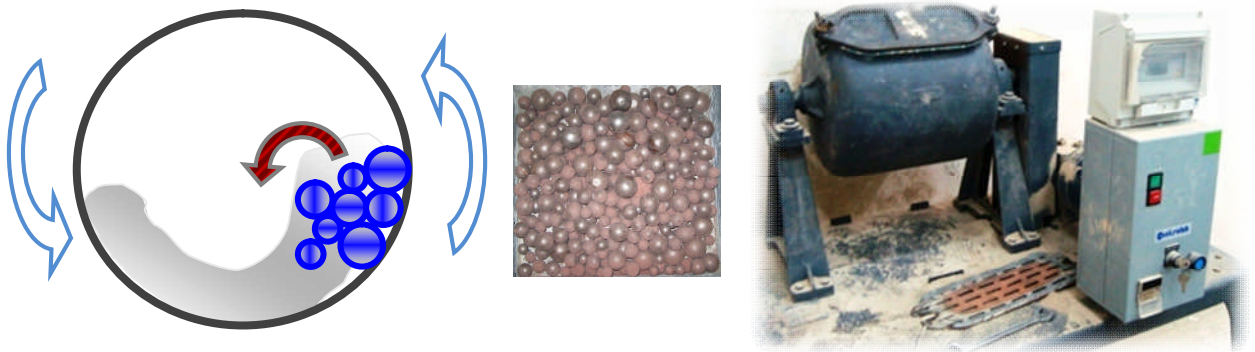


Figure III.1 : Représentation d'un broyeur à boulets



Figure III.2 : Échantillon du sable de dune, (a) : Sable de dune non broyé, (b) «F<sub>1</sub>» et (c) «F<sub>2</sub>» : Sable de dune finement broyé



Figure III.3 : Échantillon du clinker, (a) : Avant broyage, (b) : Après broyage

### III.2.1. SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ

Le choix d'une addition par rapport à une autre est en général, après la disponibilité locale à des coûts acceptables, fait en fonction de la teneur élevée en silice. La silice présente les avantages suivants: matériau de grande dureté, permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâte/granulat est largement disponible. Nous avons utilisé un sable de dune de la région de Biskra, après que les grains de silice ont été réduits à la taille voulue.

#### III.2.1.1. Analyse chimique

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau du laboratoire de la cimenterie de AIN-TOUTA (Batna), elles sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Analyse chimique du sable de dune finement broyé (%)

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$K_2O$	$Cl$	$LOI$
74.61	1.35	0.86	17.3	0.29	0.04	0.47	0.005	5.04

Du point de vue chimique la constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice (minuscules grains de quartz) qui est supérieur à 74%, et par conséquent le sable de dune de Biskra est un sable siliceux.

#### III.2.1.2. Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X

L'analyse par diffraction aux rayons X utilisant la méthode des poudres, trouve son principal emploi dans la détermination des minéraux. Chaque corps cristallin produit en effet un spectre ou diffractogramme X qui rend compte de sa structure interne et de la nature des minéraux. On peut considérer que tout diffractogramme X est une sorte "d'empreinte digitale" spécifique, qui permet de distinguer un minéral d'un autre. Pour identifier un corps, à partir de son diffractogramme X, on dispose d'un *fichier ASTM* où les minéraux sont classés en fonction de leurs trois raies principales, dont l'intensité de la raie la plus forte étant fixée à 100. Si plusieurs espèces minérales sont réunies dans la poudre étudiée, le diagramme est la juxtaposition des diagrammes élémentaires.

Lorsqu'un rayon X monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  est incident aux plans du réseau d'un cristal avec un angle  $\theta$ , la diffraction a lieu seulement lorsque la distance parcourue par les rayons réfléchis de plans successifs, diffèrent d'un nombre entier de longueur d'onde. C'est la *loi de Bragg* (figure III.4). Où  $d$  est la distance interréticulaire séparant deux plans de même famille ( $h, k, l$ ),  $n$  est l'ordre de diffraction.

Le dispositif expérimental utilisé est un diffractomètre (*PHILIPS*) de poudre à compteur courbe. Il fonctionne avec la raie  $\alpha_1$  du Cuivre:  $\lambda = 1,54056$  angström, sur une plage de 5 à 60° (2 $\theta$ ).

L'identification est réalisée en comparant le diffractogramme obtenu avec une base de données internationale *J.C.P.D.S* (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) contenant les diffractogrammes de référence de plus de 80000 phases. Cette méthode permet l'identification des différentes phases cristallines constitutives de l'échantillon et aussi d'estimer les proportions relatives de ces différentes phases. A cet effet, nous avons analysé par diffraction aux rayons X le sable de dune finement broyé, pour mettre en évidence sa nature minéralogique. Par la suite, nous avons suivi la cinétique de fixation de la chaux en fonction du temps des mélanges en pâtes préalablement conservés dans des tubes en PVC à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  fermés hermétiquement. Les analyses ont été faites au laboratoire de physique - *Université Amar Telidji Laghouat*.



Figure III.4 : Diffractomètre de poudre à compteur courbe et la loi de Bragg

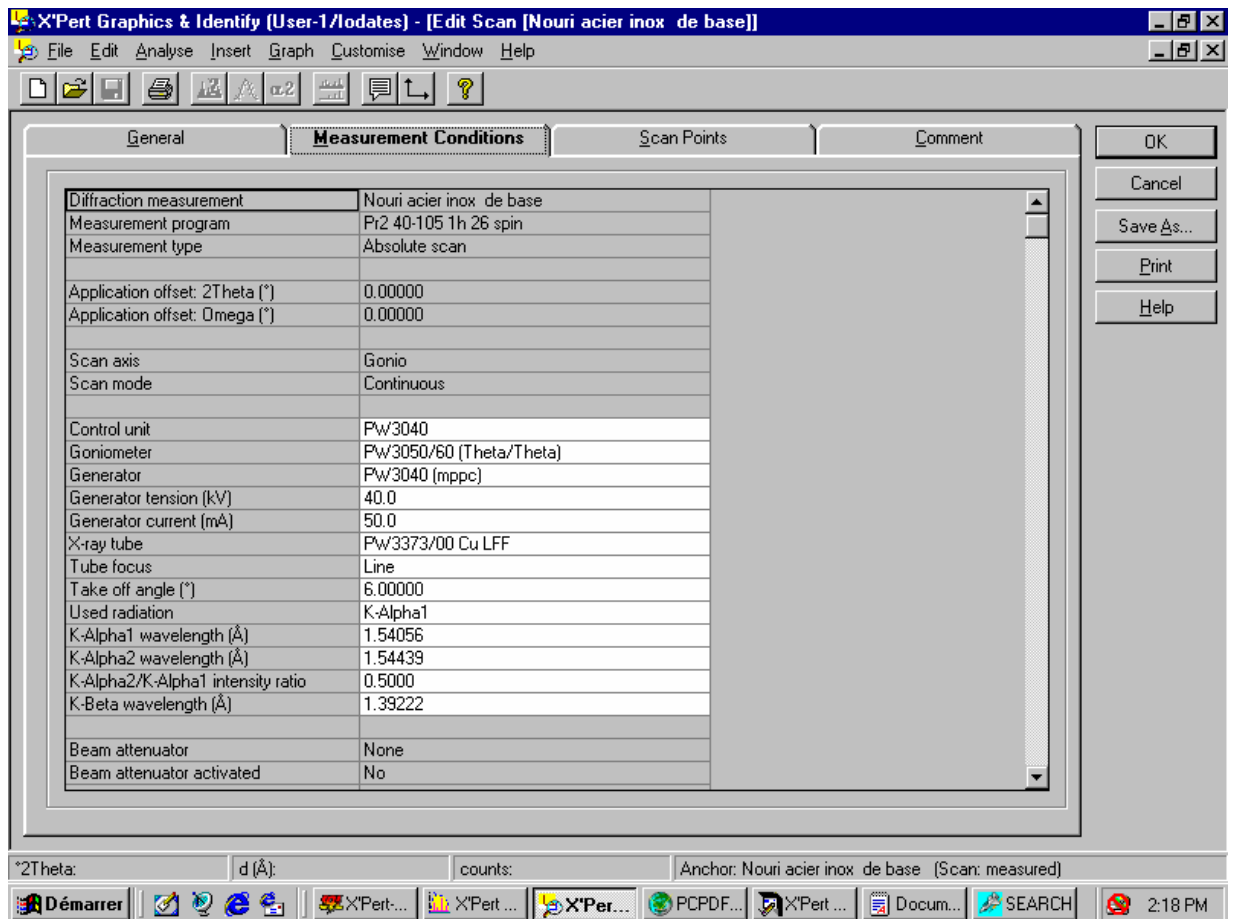


Figure III.5 : Paramètres de diffractomètre

### III.2.1.2.1. Nature minéralogique

La diffraction aux rayons X est effectuée sur sable de dune finement broyé. Les résultats de l'essai sont représentés sur la figure III.6 schématisant les différents composants minéralogiques.

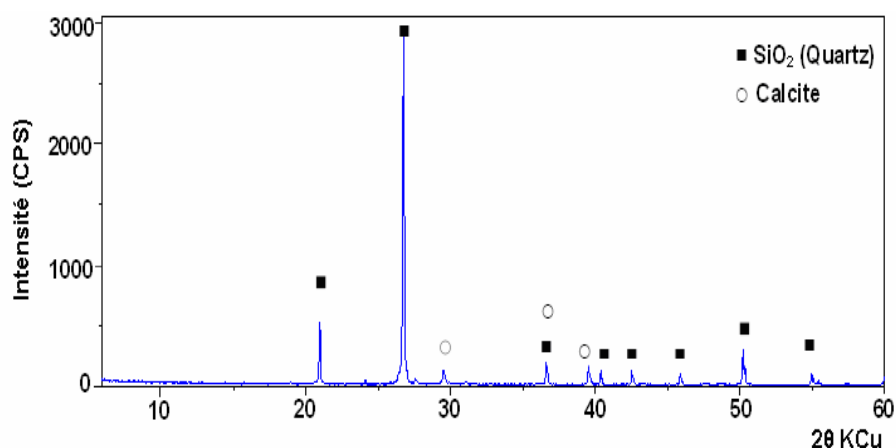


Figure III.6 : Diffractogramme X (sable de dune finement broyé)

Le diffractogramme X de cet échantillon met en évidence une teneur importante et majoritaire en quartz. Indique que le sable de dune finement broyé présente une structure siliceuse cristallisée du type low-quartz (quartz  $\alpha$  (basse température)). Ce qui est en accord avec [2, 3 et 4].

### III.2.1.3. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1300 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 2770 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Equivalent de sable (ES à vue) = 80 (sable propre)
- ✓ Equivalent de sable (ES piston) = 75
- ✓ Surface spécifique BLAINE SSB (F<sub>1</sub>) = (3000 cm<sup>2</sup>/g) avec 6000 tours (20 min)
- ✓ Surface spécifique BLAINE SSB (F<sub>2</sub>) = (4000 cm<sup>2</sup>/g) avec 9000 tours (30 min)

## III.2.2. CIMENT

### III.2.2.1. Ciment Portland préparé

Le ciment utilisé est un ciment Portland préparé au laboratoire (CPA). Il résulte du broyage du 95% clinker avec 5% du gypse, pour la régularisation de la prise. Le clinker est celui de la cimenterie de AIN-TOUTA (Batna).

#### III.2.2.1.1. Analyse chimique et minéralogique

La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de *Bogue* [28]. L'analyse chimique du clinker montre qu'il est conforme à la norme [NFP 15-301] à savoir: % (MgO + CaO (libre)) < 5% et faible taux de SO<sub>3</sub>. La composition chimique et minéralogique du clinker est indiquée dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Composition chimique et minéralogique du clinker (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Free CaO	IR	LOI
22.00	5.02	2.94	64.36	2.07	1.94	0.30	0.73	0.64
			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF		
			51.28	24.68	8.33	8.94		

#### III.2.2.1.2. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1120 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 3050 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Surface spécifique BLAINE SSB = (3200 cm<sup>2</sup>/g) avec 3900 tours (13 min)

### III.2.2.2. Ciment Portland composé

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A - 42.5 de la cimenterie de AIN-TOUTA (Batna). Composé de 75% du clinker, 5% du gypse et 20% du pouzzolane.

#### III.2.2.2.1. Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme [NFP 15-301]. La composition chimique et minéralogique du ciment est indiquée dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Composition chimique et minéralogique du CPJ-CEM II/A - 42.5 en (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Free CaO	IR	LOI
20.32	4.71	3.20	64.34	0.56	1.26	0.21	1.14	4.26
			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF		
			50.59	20.30	7.70	9.55		

### III.2.2.2.2. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1080 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 3150 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Surface spécifique BLAINE SSB = 3300 cm<sup>2</sup>/g

### III.2.3. EAU

L'eau utilisée est l'eau potable (eau du robinet) qui contient peu de sulfate et dont la température est de 20 ± 1°C, sa qualité est conforme aux prescriptions de la norme [NF P18-404]. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont portés dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Analyse chimique de l'eau

Eléments (mg/l)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	Insol	PH
	116	36	80	3	140	170	305	5	786	7.9

### III.2.4.SABLE

Le sable utilisé provient de la région de Biskra (Rivière d'Oued-Djedi).

#### III.2.4.1. Analyse granulométrique

Il est à noter que la courbe granulométrique du sable s'inscrit dans le fuseau recommandé par le béton courant. L'analyse granulométrique est donnée sur la figure III.7.

#### III.2.4.2. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1440 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 2500 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Module de finesse = 2,37 (sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités).
- ✓ Equivalent de sable (ES à vue) = 73 (sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante).
- ✓ Equivalent de sable (ES piston) = 68

### III.2.5. PIERRE CONCASSÉE

Nous avons utilisé des pierres concassées de fractions 7/15 et 15/25 de la région de AIN-TOUTA (Batna).

#### III.2.5.1. Analyse granulométrique

La courbe granulométrique est présentée sur la figure III.7

#### III.2.5.2. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1420 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 2610 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Coefficient de Los Angeles = 21% (résistance à la fragmentation aux chocs acceptable).

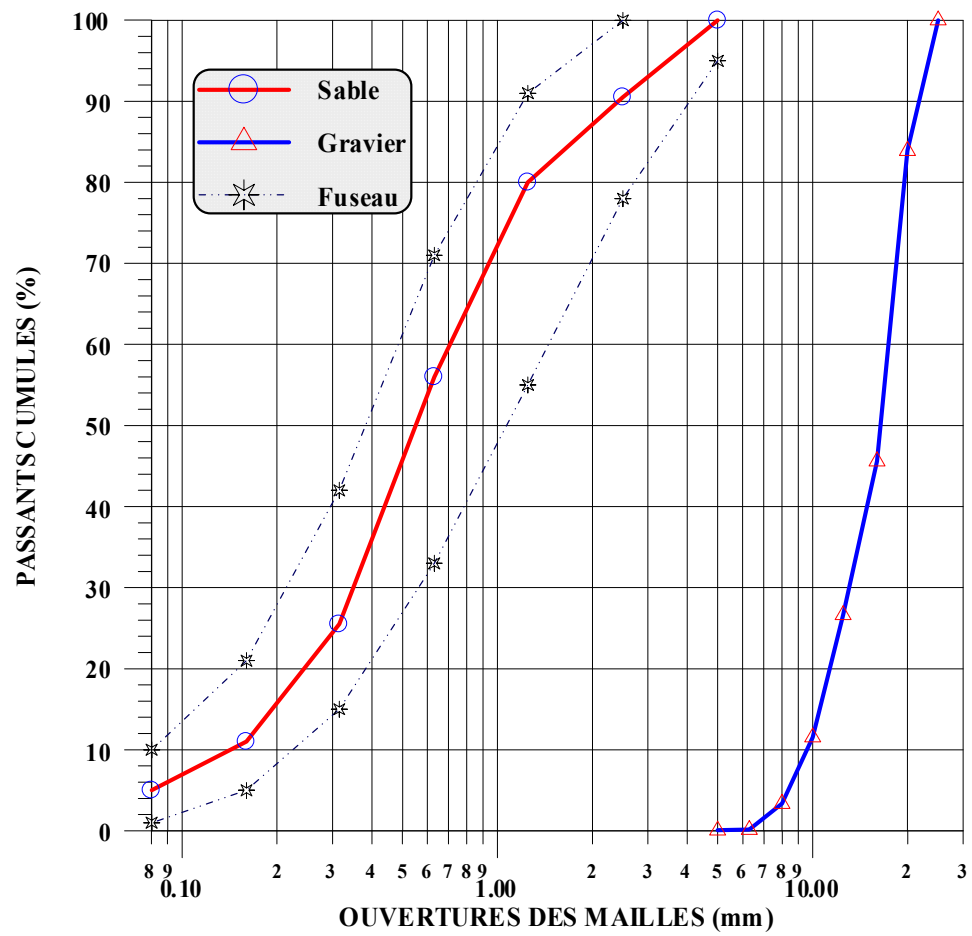


Figure III.7 : Courbe granulométrique du sable et gravier



## CHAPITRE IV

### ÉTUDE DU LIANT & MORTIER NORMALISÉ

#### IV.1. INTRODUCTION

**C**e chapitre a porté sur l'étude de la possibilité d'utiliser le sable de dune finement broyé (Sd) comme addition partielle en masse au ciment Portland préparé au laboratoire, par la méthode de substitution.

En premier lieu nous avons commencé par étudier l'effet de l'addition du sable de dune finement broyé sur le développement de la résistance à la compression avec l'âge des pâtes de ciment en fonction du rapport E/L, on a fait varier, d'une part, le pourcentage du sable de dune finement broyé (effet physico-chimique et chimique) et d'autre part, la finesse du sable de dune finement broyé (effet physique).

Par la suite, nous avons déterminé les propriétés physiques des pâtes de ciment contenant différents pourcentages du sable de dune finement broyé à une finesse de 4000 cm<sup>2</sup>/g.

Afin de mieux comprendre l'effet chimique (effet pouzzolanique) du sable de dune finement broyé dans les pâtes de ciment, nous avons suivi l'hydratation des mélanges (50% Chaux + 50% Sd) par diffraction des rayons X. Cette étude est une approche simplifiée de celle des mélanges (80% CPA + 20% Sd), dans lequel la réaction principale est la fixation de la chaux provenant de l'hydratation du ciment en présence du sable de dune finement broyé (réaction pouzzolanique).

Finalement, nous avons évalué: la stabilité chimique du ciment en milieux agressifs mesurée sur des pâtes de ciment à 28 et 90 jours, les propriétés mécaniques de mortier normalisé en fonction du type de ciment à 28 jours et la stabilité volumique (retrait et gonflement) en fonction du temps et du type de ciment.

#### IV.2. ÉTUDE DU LIANT

On a utilisé des éprouvettes cubiques de (2×2×2 cm) en pâte pure à raison de six éprouvettes par essai. La confection des éprouvettes est réalisée conformément aux modalités des normes [NFP 18- 404 et NFP 18-405] [137].

Les pâtes sont préparées dans un malaxeur normalisé [EN 196-1] [139] en suivant le mode opératoire indiqué par la norme [EN 196-3] [138] relative à la consistance normale des pâtes pures. Le durcissement des éprouvettes étant en conditions naturelles, on soumet les éprouvettes à une cure normale dans l'eau potable à 20 ± 1°C jusqu'au moment des essais [115].

#### IV.2.1. PROPORTIONS DES MÉLANGES

Détails des proportions des mélanges sont donnés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1: Détails des proportions des mélanges

Mélange	E/L	Finesse Sd (cm <sup>2</sup> /g)	Type de ciment	Dosage de masse (%)		
				Clinker	Gypse	Sd
M1	0.25	-	CPA	95	5	0
M2	0.30	-				
M3	0.40	-				
M4	0.25	3000	95% CPA + 5% Sd	90	5	5
M5	0.25	4000				
M6	0.30	3000				
M7	0.30	4000				
M8	0.40	3000				
M9	0.40	4000				
M10	0.25	3000	90% CPA + 10% Sd	85	5	10
M11	0.25	4000				
M12	0.30	3000				
M13	0.30	4000				
M14	0.40	3000				
M15	0.40	4000				
M16	0.25	3000	85% CPA + 15% Sd	80	5	15
M17	0.25	4000				
M18	0.30	3000				
M19	0.30	4000				
M20	0.40	3000				
M21	0.40	4000				
M22	0.25	3000	80% CPA + 20% Sd	75	5	20
M23	0.25	4000				
M24	0.30	3000				
M25	0.30	4000				
M26	0.40	3000				
M27	0.40	4000				
M28	0.25	3000	75% CPA + 25% Sd	70	5	25
M29	0.25	4000				
M30	0.30	3000				
M31	0.30	4000				
M32	0.40	3000				
M33	0.40	4000				
M34	0.25	-	CPJ 42.5	-	-	-

#### IV.2.2. RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES PÂTES DU CIMENT

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages de sable de dune finement broyé Sd et l'influence de la finesse de mouture (3000 et 4000 cm<sup>2</sup>/g).

Ainsi que l'influence du rapport (E/(C+Sd) = 0.4, 0.3 et 0.25) sur la résistance mécanique en compression des pâtes du ciment.

On a choisi cinq pourcentages (5%, 10%, 15%, 20% et 25%) pour les substituer au ciment Portland préparé au laboratoire (CPA) et obtenir une nouvelle variété de ciment composé (optimisation de la teneur du ciment en Sd), et tirer le pourcentage du Sd qui donne des résistances en compression similaires à celui du ciment composé CPJ 42.5.

Les résultats sont illustrés sur les figures ci-dessous:

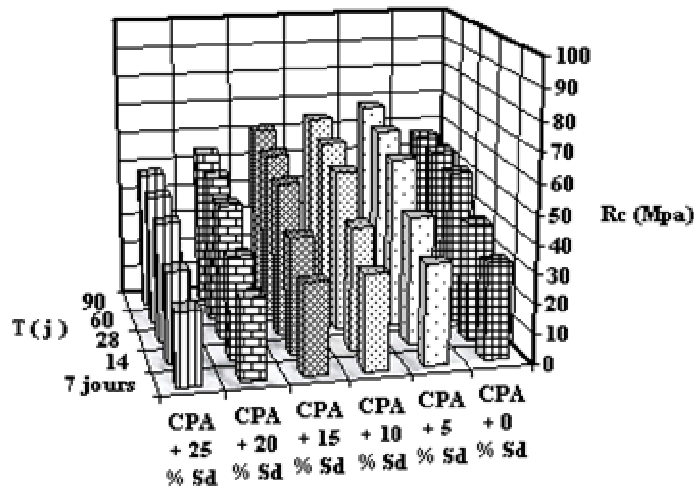


Figure IV.1: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_1 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,4$ )

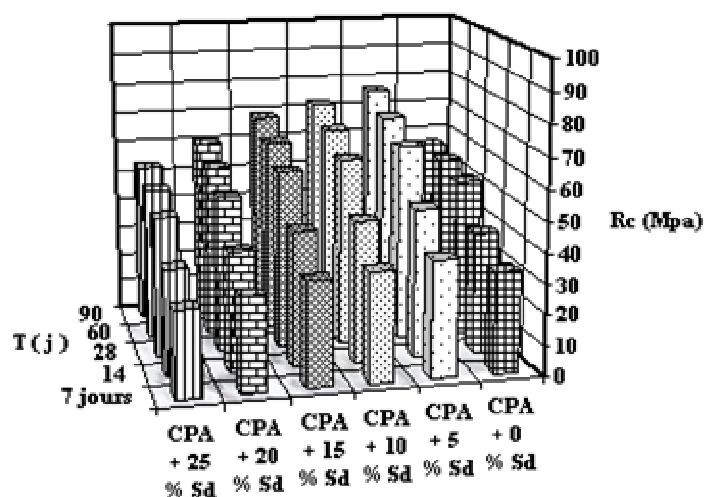


Figure IV.2: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,4$ )

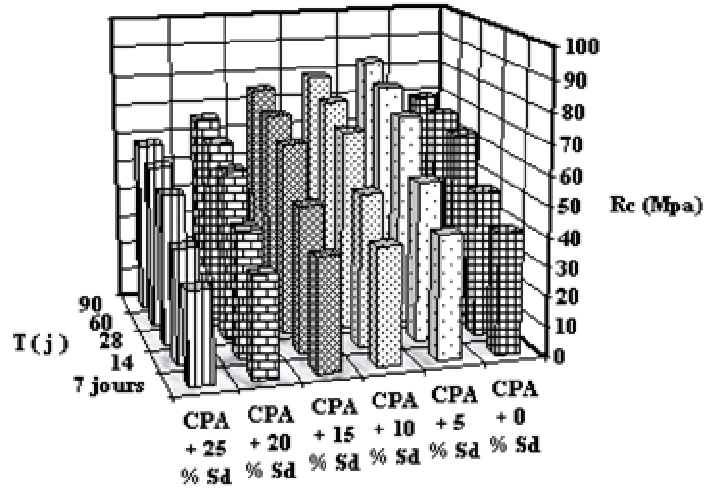


Figure IV.3: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_1 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,3$ )

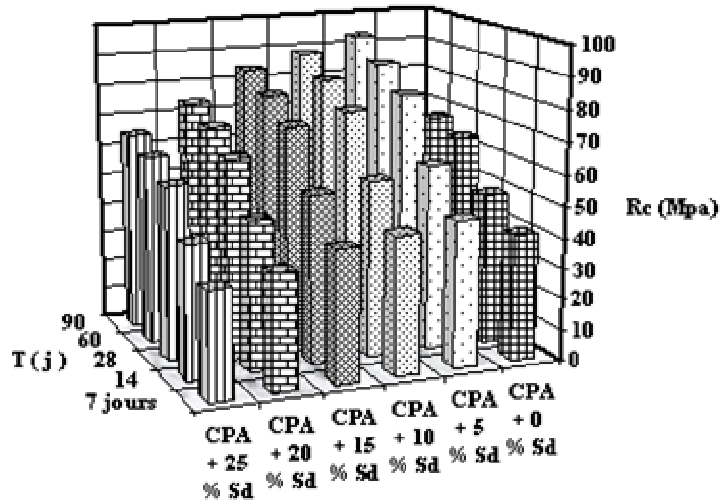


Figure IV.4: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,3$ )

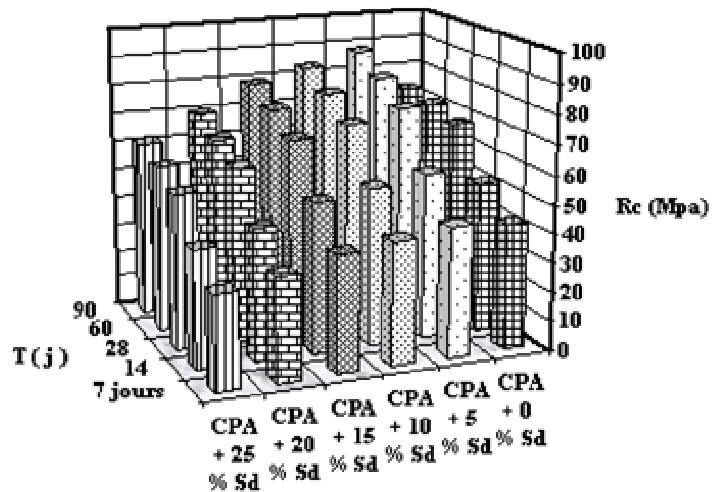


Figure IV.5: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_1 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )

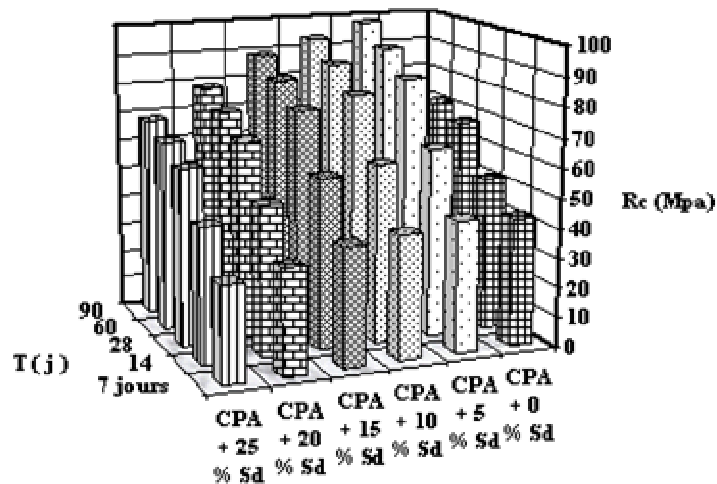


Figure IV.6 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )

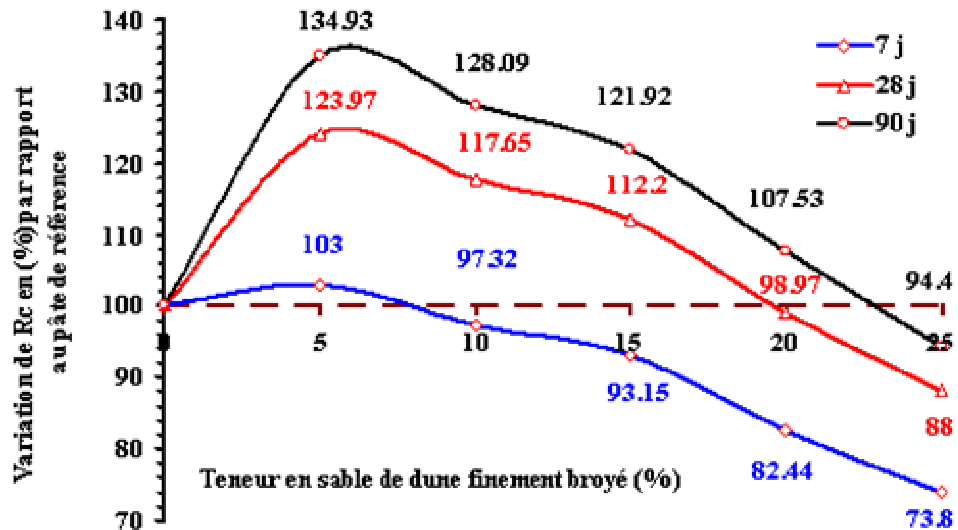


Figure IV.7 : Variation de la résistance à la compression de ciment en (%) par rapport à la pâte de référence en fonction de la teneur en sable de dune finement broyé ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )

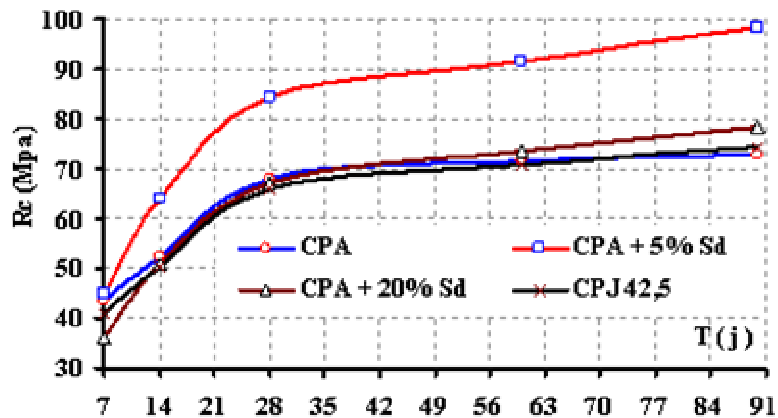
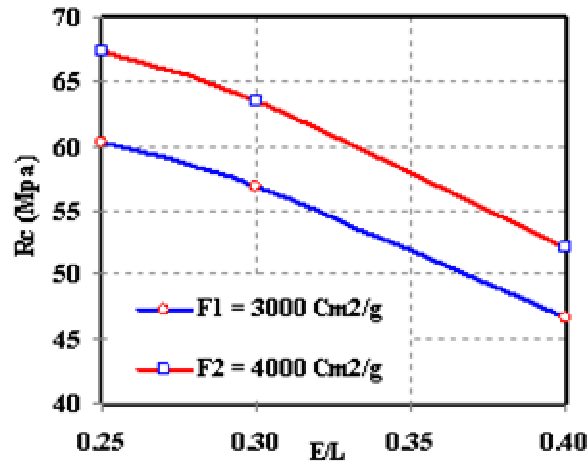


Figure IV.8 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )



**Figure IV.9 :** Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment CPA + 20% Sd en fonction du rapport  $E/(C+Sd)$

Dans le but d'évaluer la contribution du sable de dune finement broyé au développement des résistances à la compression des liants. On calcule le gain de résistance ( $GR_{Sd}$ ) à partir de la relation suivante [115]:

$$GR_{Sd} = R_{Sd} - R_0 (M_C / (M_C + M_{Sd}))$$

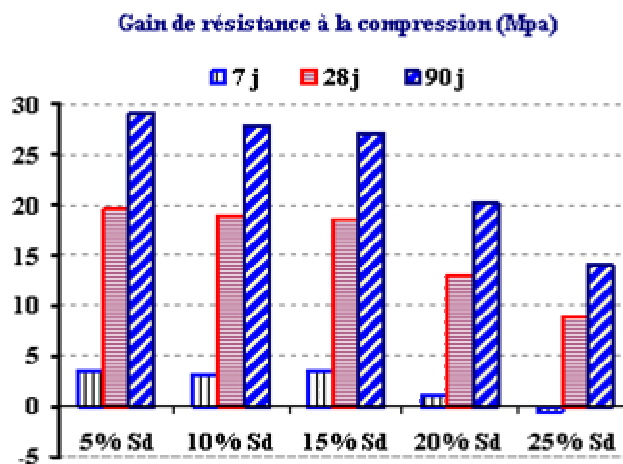
Où:

$R_{Sd}$ : résistance d'un ciment contenant un dosage (Sd%) du sable de dune finement broyé à un âge donné (Mpa).

$R_0$ : résistance du ciment de référence au même âge (Mpa).

$M_C$  et  $M_{Sd}$ : masses du ciment et du sable de dune finement broyé dans le liant, respectivement (g).

La figure IV.10 montre le développement du gain de résistance en fonction de l'âge pour les différents pourcentages du sable de dune finement broyé.



**Figure IV.10 :** Développement du gain de résistance à la compression en fonction de l'âge ( $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )

## **Interprétation et discussion**

### **IV.2.2.1. Influence du temps**

A partir des résultats obtenus, on a pu construire des graphiques présentant l'évolution dans le temps de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction des différents pourcentages du sable de dune finement broyé. L'évolution des résistances en fonction de la durée de cure montre que pendant les sept premiers jours les résistances sont faibles pour toutes les pâtes de ciment, tandis que pour celles de 28 jours les résistances augmentent sensiblement. Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants de ciment mélangé qui devient de plus en plus active. D'après ces résultats, on remarque que l'augmentation de la résistance du CPA seul à 28 et 90 jours, par rapport à celle à 7 jours, est de l'ordre de 56% et 68% respectivement ; l'augmentation de résistance des ciments à 5 et 20% de sable de dune finement broyé et d'environ 69% à 28 jours et 97% à 90 jours, ce qui traduit le rôle chimique joué par le Sd à long terme, donc confirme l'activité pouzzolanique. Ce qui est en accord avec [3, 4, 112 et 143].

### **IV.2.2.2. Influence de la teneur du ciment en sable de dune finement broyé**

Les résistances en compression augmentent lors de la substitution du ciment par le sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire: Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par [13, 15, 17, 38, 39, 40-42, 55, 93, 94, 101-103 et 140].

**Effet physique:** amélioration de la consistance du mélange frais (les pâtes deviennent plus fluides). Ce qui est en accord avec [1 et 2].

**Effet physico-chimique:** un processus physique qui dépend de la quantité et de la finesse du Sd, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment et agit sur l'évolution des résistances en compression aux jeunes âges. Donc le Sd agit en tant qu'activateur chimique. Ce qui est en accord avec [26, 45, 46, 71 et 182].

**Effet chimique:** la chaux fournie dans le cas du ciment Portland est consommée par la réaction pouzzolanique du fait de l'addition de Sd au ciment, et ceci améliorée les résistances en compression des pâtes du ciment à moyen et surtout à long terme. Ce qui est en accord avec [1, 2, 3, 4, 29, 45, 55, 112, 143 et 182].

D'après les résultats obtenus, on remarque que le ciment avec 5% du sable de dune finement broyé présente la résistance maximale à la compression avec une finesse de  $F_2 = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  et de rapport  $E/(C+Sd) = 0.25$ .

$$[R_{c28j} \{CPA+5\% Sd\} = 1.24.R_{c28j} \{CPA\}]$$

$$[R_{c90j} \{CPA+5\% Sd\} = 1.35.R_{c90j} \{CPA\}]$$

En ajoutant 20% Sd par rapport à la masse totale du ciment, on obtient une résistance en compression à 28 jours comparable à celle d'un ciment de référence CPA et CPJ 42.5.

On peut observer globalement qu'au bout de 28 jours, la résistance en compression à 5, 10 et 15% du Sd est supérieure à celle du ciment de référence. Le sable de dune finement broyé joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10%. Par contre, pour une teneur de 25%, la résistance obtenue est toujours plus faible que celle du ciment de référence.

#### **IV.2.2.3. Influence de variation de finesse du sable de dune finement broyé**

Le sable de dune finement broyé peut changer la structure des pores, faire diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui de petits pores. Ce changement est fonction de la finesse, plus les particules sont fines, plus leur rôle est efficace. Les résultats ont montré que par l'augmentation de la finesse de 3000 à 4000 cm<sup>2</sup>/g les résistances à tous âges sont améliorées de l'ordre de 12%. Ce qui est en accord avec [182].

#### **IV.2.2.4. Influence de variation de rapport E/L**

Concernant l'influence de E/(C+Sd), on voit nettement que la résistance de toutes les pâtes de ciment durcies à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport E/(C+Sd), ce rapport exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté (constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu), car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Ce qui explique que les pâtes du ciment avec E/(C+Sd) faible développent très rapidement leur résistance à la compression par une concentration élevée en C-S-H. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par [27, 69 et 80].

### **IV.2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES PÂTES**

Le choix de la composition optimale de ciment prémélangé au sable de dune finement broyé est fonction des critères physiques. Les propriétés physiques des liants contenant différents pourcentages du sable de dune finement broyé à une finesse de mouture de 4000 cm<sup>2</sup>/g sont données par le tableau IV.2.

Nous avons étudié la consistance normale, la prise et la stabilité volumique.

**Tableau IV.2:** Propriétés physiques des pâtes

<i>Essais (T = 27 °C)</i>	<i>Mélange</i>						
	<i>M1</i>	<i>M5</i>	<i>M11</i>	<i>M17</i>	<i>M23</i>	<i>M29</i>	<i>M34</i>
<i>Consistance normale (%)</i>	27	26.7	26.5	26.3	26	25.8	29
<i>Début de prise (minute)</i>	95	100	105	105	105	110	130
<i>Fin de prise (minute)</i>	240	229	227	225	225	230	190
<i>Gonflement à chaud (mm)</i>	1.20	1.15	1.10	1.10	1.10	1.15	1.40



### ***Interprétation et discussion***

La quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance normale de la pâte du ciment [ASTM C 187-86], varie de 23 à 35%. La granulométrie a une influence prédominante sur la demande en eau du ciment. Plus la distribution granulométrique est (serrée), avec peu de particules de petites et de grosses dimensions, plus la demande en eau est élevée. Ce ciment comporte une grande proportion de vides que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pâte du ciment.

D'après les résultats on remarque que la teneur en Sd% n'a pas engendré de modifications significatives sur le temps de prise des pâtes du ciment. Par contre l'addition diminue considérablement les consistances initiales (les pâtes deviennent plus fluides). Pour diminuer la demande en eau du ciment, il faut augmenter les proportions en petites et grosses particules afin de diminuer les vides intergranulaires.

Du fait de leur finesse supérieure à celle du ciment CPA, on remarque dans le tableau IV.2 que l'addition de Sd remplit les vides intergranulaires et diminue la demande en eau, donc le Sd joue un rôle de lubrifiant. Ce qui est en accord avec [1 et 2].

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir observer l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court. Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps.

Cet essai consiste à mesurer l'écartement des extrémités des deux aiguilles de l'appareil de ***Le Châtelier***. D'après les résultats obtenus, le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé présente une bonne stabilité volumique parce que les valeurs de gonflement à chaud sont inférieures à 10 mm d'après la norme [NF P 15-301].

#### **IV.2.4. RÉACTIVITÉ POUZZOLANIQUE DU SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ**

Afin de mieux cerner l'effet pouzzolanique de cette addition dans les pâtes de ciment Portland, nous avons suivi l'évolution de l'hydratation des mélanges en pâtes 50% Chaux + 50% Sd par diffractométrie aux rayons X.

Cette étude est une approche simplifiée de celle des pâtes de ciment 80% CPA + 20% Sd dans lesquelles la réaction principale est la fixation de la chaux, provenant de l'hydratation du ciment, en présence du sable de dune finement broyé (réaction pouzzolanique).

Afin de mettre en évidence le gain de résistance des pâtes à base de ciment prémélangé au sable de dune finement broyé. A un âge donné, une partie de la pâte est broyée en une poudre très fine, dont le diamètre maximum des grains est inférieur à 40  $\mu\text{m}$ , pour être testée par diffraction aux rayons X. Pour analyses la réactivité du sable de dune finement broyé nous avons étudié: l'évolution de l'hydratation des mélanges (50% Chaux + 50% Sd) et (80% CPA + 20% Sd).

#### IV.2.4.1. Évolution de l'hydratation des mélanges (50% Chaux + 50% Sd)

L'évolution de la réaction pouzzolanique en fonction du temps a été étudiée par diffraction aux rayons X sur des pâtes contenant (50% Chaux pure + 50% Sd).

Ces mélanges en pâte ont une prise hydraulique due à la formation d'une phase C-S-H. Cette dernière est semi-cristallisée. Les C-S-H obtenus sont semi-cristallisés vu qu'ils ne présentent pas des raies supplémentaires à celles correspondant aux réflexions h.k.l soient: 3.06  $\text{\AA}$  (220), 2.80  $\text{\AA}$  (400) et 1.83  $\text{\AA}$  (040) [4].

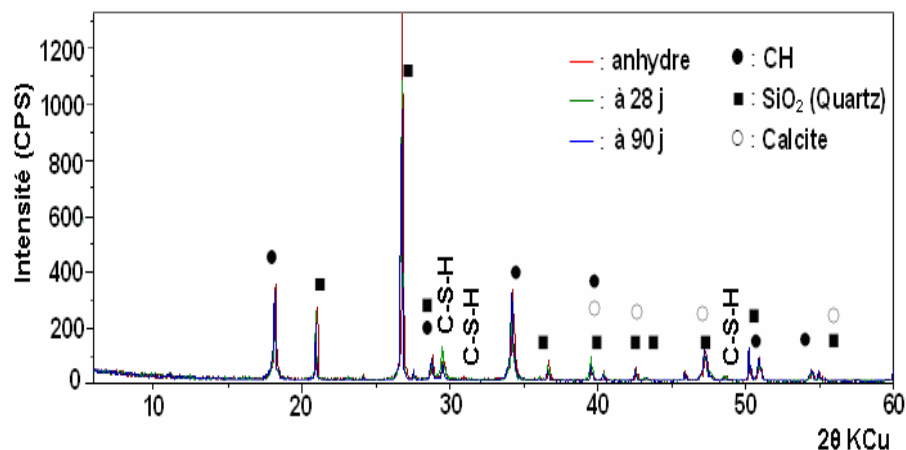


Figure IV.11 : Hydratation des pâtes aux différents âges (50% Chaux + 50% Sd)

Les diffractogrammes X de la figure IV.11 montre que les intensités des raies de la chaux ( $d = 4.9 \text{ \AA}$ ,  $d = 2.62 \text{ \AA}$  et  $d = 1.92 \text{ \AA}$ ) diminuent en fonction du temps, ce qui indique la fixation de la chaux par les grains de silice pour former du silicate de calcium hydraté C-S-H semi-cristallisé (réactivité pouzzolanique partielle du Sd). ( $d =$  distance interréticulaire ou distance entre deux plans cristallographiques). Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle. Ce qui est en accord avec [1, 29 et 55].

#### IV.2.4.2. Évolution de l'hydratation des mélanges (80% CPA + 20% Sd)

De la même manière, nous avons suivi par diffraction aux rayons X l'évolution de l'hydratation des mélanges sous forme de pâtes (80% CPA + 20% Sd) en fonction du temps. Les modifications des cinétiques d'hydratation du ciment Portland, en présence du sable de dune finement broyé sont mises en évidence par diffractométrie aux rayons X.

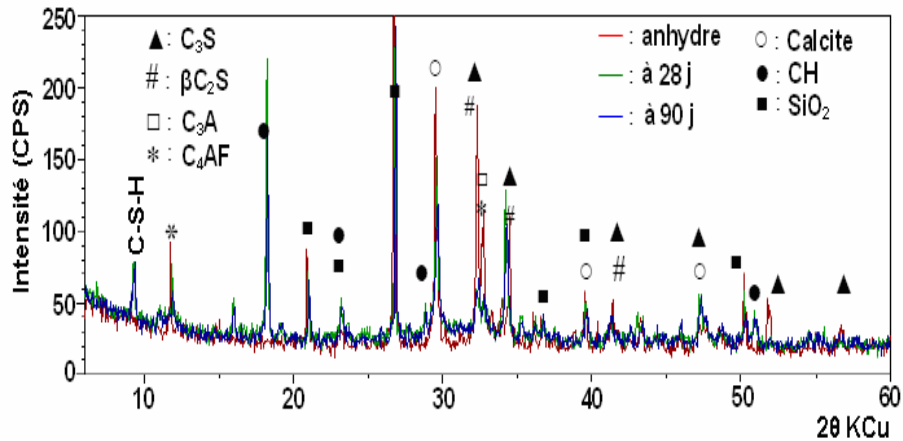


Figure IV.12 : Hydratation des pâtes aux différents âges (80% CPA + 20% Sd)

L'examen des diffractogrammes X de la figure IV.12 conduit aux observations suivantes:

- À 28 jours d'hydratation les intensités des raies de chaux CH et de silicate de calcium hydraté C-S-H apparaissent, et les intensités des raies de  $C_3S$  et  $\beta C_2S$  diminuent ce qui indique l'hydratation des silicates de calcium.
- En présence du sable de dune finement broyé et à 28 jours d'hydratation les intensités des raies du quartz diminuent comparativement à celles du mélange anhydre, donc la réaction pouzzolanique partielle du Sd, ce qui confirme les résultats trouvés précédemment.
- À 90 jours d'hydratation les intensités des raies de chaux et des minéraux du ciment, de même que celle du quartz, diminuent d'une manière significative, ce qui montre l'effet pouzzolanique partiel du sable de dune finement broyé. Ce résultat confirme que le Sd n'est pas inerte et participe à la formation de nouveaux C-S-H II qui rendent la pâte plus dense et plus compacte. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par [2, 3 et 4].

#### IV.2.5. ACTION DES EAUX AGRESSIVES

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatique. Le sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , très soluble, entraîne une dégradation par formation de gypse et d'ettringite expansive dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration de  $\text{SO}_4^{2-}$  et de la teneur en aluminates tricalciques du ciment. La dissociation de chlorure de magnésium  $\text{MgCl}_2$ , l'agent le plus actif dans l'attaque des ciments, libère  $\text{Mg}^{2+}$  qui substitue  $\text{Ca}^{2+}$  dans  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour former  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  et dans C-S-H pour former M-S-H sans propriétés liantes, son action se résume par sa dissociation en libérant ainsi les ions chlore qui réagissent avec les aluminates, pour former le monochloroaluminate ou sel de *Friedel* [35]. Ces mêmes ions chlorures peuvent s'insérer dans le réseau cristallin de C-S-H et créer une structure alvéolaire, d'où la formation d'un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus fragiles quand la qualité de la chaux dissoute augmente [35].

Il faut déterminer le coefficient de qualité qui est défini par la formule suivante:  $A = R_s/R_{ep}$

$R_s$  : résistance à la compression du ciment immergé dans différentes solutions agressives.

$R_{ep}$  : résistance à la compression du ciment immergé dans l'eau potable.

Le ciment est d'autant plus durable que le coefficient de qualité est plus élevé [115].

La résistance aux eaux agressives est déterminée à partir des éprouvettes cubiques ( $2 \times 2 \times 2$  cm) en pâte pure avec un rapport  $E/(C+Sd) = 0.25$ , et la finesse du sable de dune finement broyé ( $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Le durcissement étant en conditions naturelles (cure sous l'eau) pendant 7 jours (temps zéro), puis les pâtes des ciments durcies sont immergées séparément pendant 28 et 90 jours dans les solutions suivantes: eau potable,  $\text{MgCl}_2$  (5%) et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (5%).

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous:

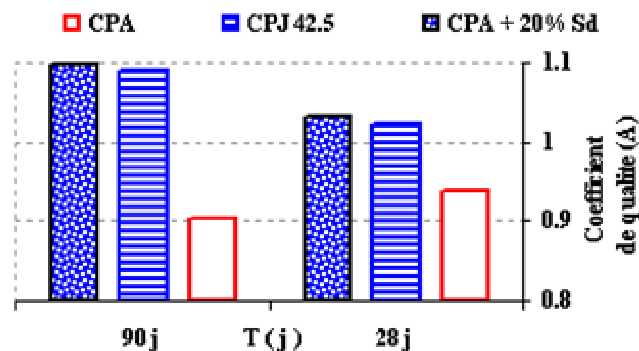


Figure IV.13 : Variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution  $\text{MgCl}_2$  en fonction du temps

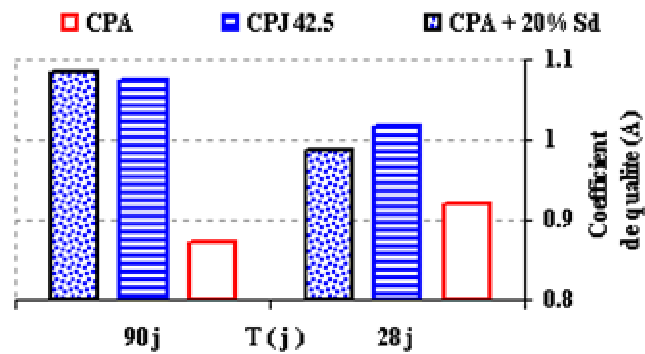


Figure IV.14 : Variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en fonction du temps

### Interprétation et discussion

L'une des raisons initiales pour utiliser diverses additions minérales dans le béton est leur influence sur la résistance aux attaques chimiques. Cette résistance n'est pas seulement due à la composition chimique de la pâte du ciment hydraté, mais aussi à sa microstructure.

Nous constatons, que le coefficient de qualité ( $A$ ), dans les deux solutions agressives, explique nettement la résistance au lessivage du ciment prémélangé au Sd aux agents agressifs. Les ciments CPJ 42.5 et CPA + 20% Sd sont comportent mieux que le ciment Portland, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice, à la surface, riche en gel de silice et d'alumine. Ce qui est en accord avec [18].

Le ciment CPA + 20% Sd immergé dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  montre une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 3 mois. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact. Ce qui est en accord avec [11].

Le sable de dune finement broyé offre également une bonne protection contre l'agressivité des sulfates, ceci s'explique du fait de l'augmentation de PH qui est dû à la formation de NaOH qui stabilise la formation de C-S-H. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation du ciment. Ce qui est en accord avec [11 et 44].

D'autre part la solution de  $\text{MgCl}_2$ , la réduction d'agressivité est directement liée à la présence des chlorures. Ceux-ci accroissent la solubilité du gypse et de l'ettringite qui cristallise au moins partiellement, sous une forme non expansive à partir de la solution. Ce qui est en accord avec [120]. En comparant l'effet du milieu agressif de chlorure à celui de sulfate, on remarque que le sulfate influent plus que le chlorure sur le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé. Par conséquent, le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé est plus durable dans les milieux où les chlorures sont prédominants.

D'après tout ce qui précède, on peut conclure que le ciment prémélangé au Sd est durable dans les deux solutions agressives, cela peut être dû à la forte imperméabilité des pâtes durcies, ainsi qu'à la formation supplémentaire des hydrates C-S-H qui précipitent dans les pores, en diminuant par la suite la porosité de la pâte du ciment. Ce qui est en accord avec [11 et 120].

### IV.3. ÉTUDE DU MORTIER NORMALISÉ (C/S = 1/3)

Dans cette partie, nous présentons des essais de compression, flexion, traction par flexion, retrait et gonflement. Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable normalisé, la quantité d'eau a été ajusté jusqu'à obtenir une maniabilité de référence.

Cette maniabilité de référence a été choisie correspondante à un étalement de 111 mm sur la table à secousses. Les éprouvettes sont conservées dans un environnement humide ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$  et 95% HR) et ce, jusqu'à la réalisation de l'essai de flexion. Les deux morceaux de chaque éprouvette seront testés en compression afin de déterminer la résistance du mortier.

#### IV.3.1. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUE

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions ( $4 \times 4 \times 16$  cm), à raison de trois éprouvettes par essai [115]. Les résistances à la compression des différents mortiers MR (mortier de référence à base de CPA), M10 à base de CPA + 10% Sd et M20 à base de CPA + 20% Sd sont déterminées par écrasement selon la norme [EN 196-1] [139].

Pour que nos conclusions soient justifiées, nous avons gardé constants les paramètres suivants: la finesse du (CPA:  $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) et (Sd:  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Les résultats de compression ( $R_c$ ), flexion ( $R_f$ ) et traction par flexion ( $R_t$ ) en fonction du type de ciment à 28 jours, sont illustrés sur la figure IV.15:

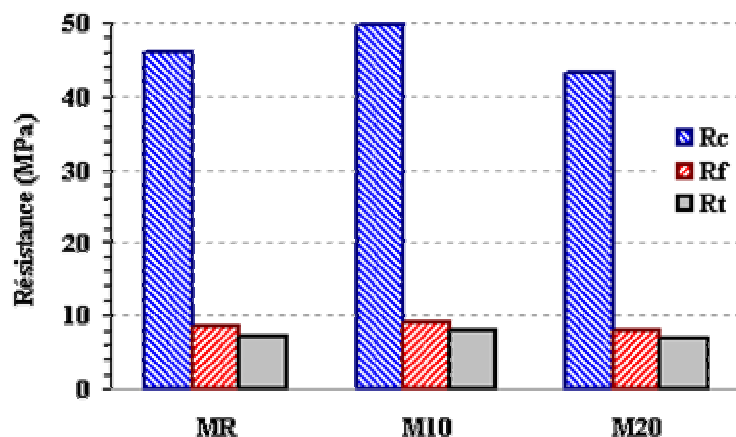


Figure IV.15 : Résistance du mortier à la compression, flexion et traction à 28 jours en fonction du type de ciment

### Interprétation et discussion

Le mortier M10 présente une résistance à la compression supérieure à celle du mortier M20 et du mortier de référence MR. Le sable de dune finement broyé joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%. L'effet du sable de dune finement broyé sur la résistance à la flexion et à la traction par flexion est similaire à celui sur la résistance à la compression.

### IV.3.2. RETRAIT & GONFLEMENT

On sait que l'hydratation du ciment s'accompagne, du fait de la contraction *Le Châtelier*, de la création d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte du ciment hydratée. Dans un premier temps ces capillaires sont saturés en eau. Mais lorsque la consommation d'eau par l'hydratation du ciment provoque leur assèchement, cela aboutit à la formation de ménisques. On s'accorde à expliquer le retrait par les forces de traction qui se développent de ce fait à l'intérieur des capillaires les plus fins. La pâte du ciment ou le béton mûri continuellement dans l'eau après leur mise en place augmente en volume et en masse. Ce gonflement est dû à l'absorption d'eau par le gel de ciment, Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement. De plus, l'intrusion de l'eau réduit la tension de surface du gel, provoquant par la suite une petite expansion.

Il s'agit dans cette partie, d'évaluer le retrait et le gonflement que provoquent les ciments étudiés sur des éprouvettes en mortier à sable normalisé. On compare, à différents temps, la variation de longueur et de masse d'une éprouvette de dimensions (4×4×16 cm), par rapport à sa longueur et sa masse à un temps  $t_0$  pris pour origine. Les résultats obtenus à 3, 7 et 28 jours, sont illustrés sur les figures ci-dessous:

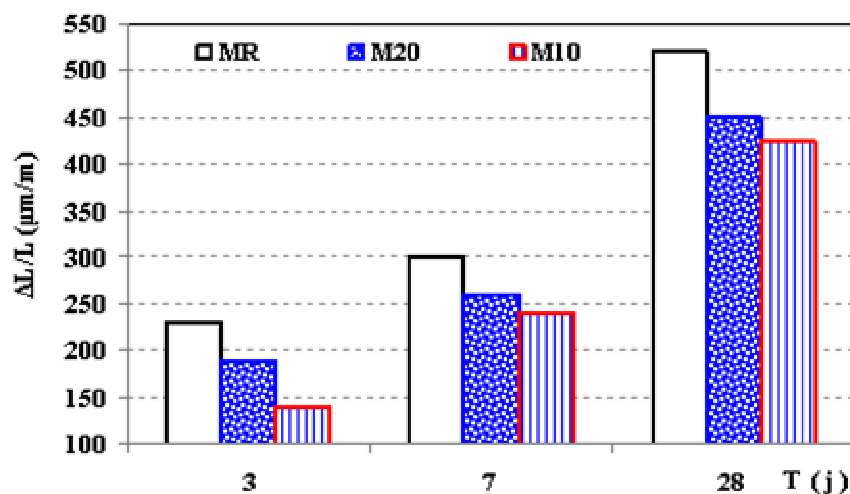


Figure IV.16 : Variation linéaire du mortier en fonction du temps dans le cas de retrait

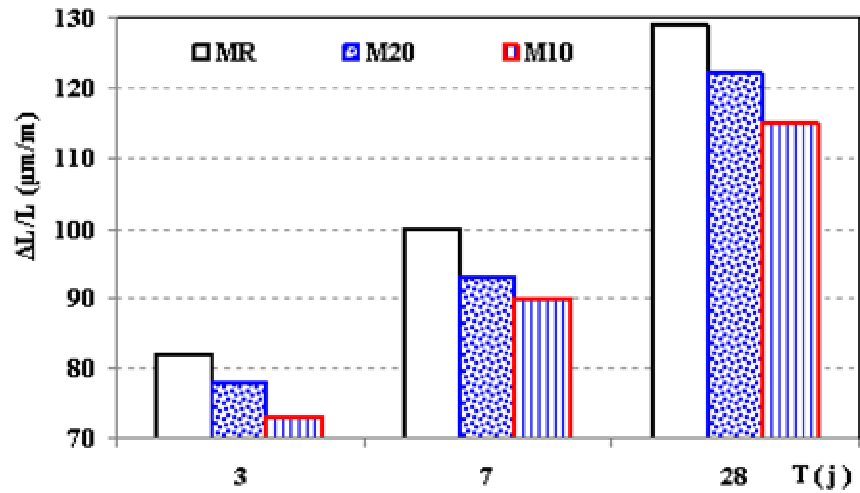


Figure IV.17 : Variation linéaire du mortier en fonction du temps dans le cas de gonflement

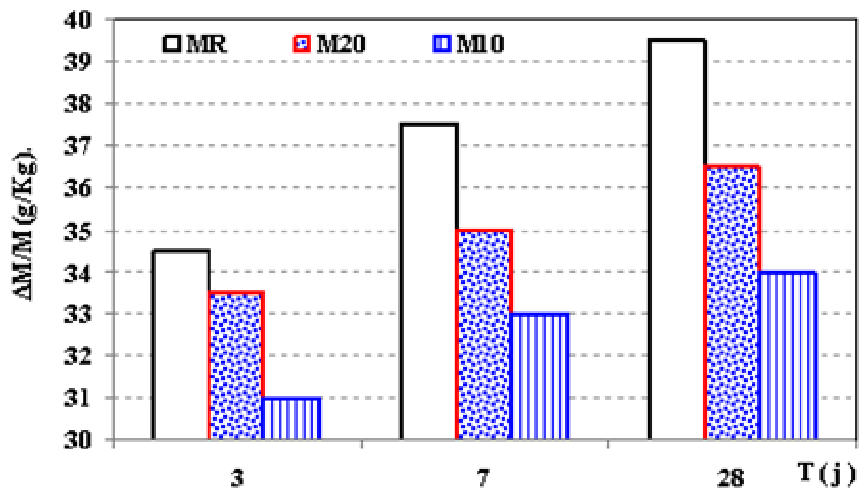


Figure IV.18 : Variation massique du mortier en fonction du temps dans le cas de retrait

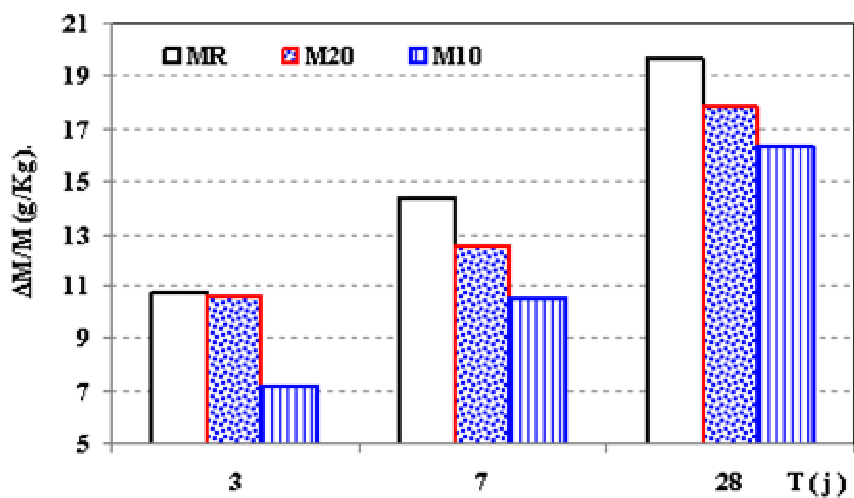


Figure IV.19 : Variation massique du mortier en fonction du temps dans le cas de gonflement



### ***Interprétation et discussion***

D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que les ciments étudiés provoquent de faibles retraits et gonflements sur les éprouvettes de mortier normal qu'on a testé.

Nous découvrons que le mortier de référence MR engendre une augmentation légère des déformations libres que celles des mortiers à base du ciment prémélangé au sable de dune finement broyé, lorsque ces mortiers sont conservés à l'air. Ceci s'explique par le fait que le sable de dune finement broyé, par ses fines particules siliceuses, a un effet de densification, elle diminue la porosité et augmente donc la compacité des mortiers. Le gonflement du mortier M10 est inférieur à celui du mortier de référence MR, ceci montre que la portlandite dégagée lors de l'hydratation du ciment qui est inversement à la formation des autres hydrates se fait avec augmentation de volume ce trouve consommé par la réaction pouzzolanique mieux que le mortier de référence. Le retrait du mortier M10 est inférieur à celui du mortier M20, et la même remarque pour le gonflement.

Le mortier de référence MR engendre une augmentation légère des variations massiques que celles des mortiers M10 et M20. Le gonflement du mortier M10 est inférieur à celui du mortier de référence MR. Le retrait du mortier M10 et le gonflement massique sont légèrement inférieurs que dans le cas du mortier M20.

## CONCLUSION

**A** la lumière des essais réalisés, cette étude nous a permis d'extraire certains nombres de points majeurs méritent d'être soulignés:

- Les résistances en compression augmentent lors de la substitution du ciment par le sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire: effet physique, physico-chimique et chimique. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par [13, 15, 17, 38, 39, 40-42, 55, 93, 94, 101-103 et 140].
- En ajoutant 20% Sd par rapport à la masse totale du ciment, on obtient une résistance en compression à 28 jours comparable à celle d'un ciment de référence CPA et CPJ 42.5.
- L'ajout du sable de dune finement broyé est le moins cher comparé à la pouzzolane dont l'apport est de 20 % mais qui est très coûteuse du point vue transport car elle se trouve à 1000 km de la cimenterie de AIN-TOUTA (Batna).
- On peut observer globalement qu'au bout de 28 jours, la résistance en compression à 5, 10 et 15% du Sd est supérieure à celle du ciment de référence. Le sable de dune finement broyé joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10%. Au-delà d'une teneur de 20%, l'effet de dilution devient prépondérant et conduit à des résistances à la compression plus faibles qu'avec le ciment de référence CPA.
- Les résultats ont montré que par l'augmentation de la finesse de 3000 à 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  les résistances à tous âges sont améliorées de l'ordre de 12%. Ce qui est en accord avec [182]. Concernant l'influence de  $E/(C+Sd)$ , on voit nettement que la résistance de toutes les pâtes de ciment durcies à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport  $E/(C+Sd)$ . Ce qui est en accord avec [27, 69 et 80].
- On remarque que la teneur en Sd% n'a pas engendré de modifications significatives sur le temps de prise des pâtes du ciment. Par contre l'addition diminue considérablement les consistances initiales (les pâtes deviennent plus fluides).
- L'addition de Sd remplit les vides intergranulaires et diminue la demande en eau, donc le Sd joue un rôle de lubrifiant. Ce qui est en accord avec [1 et 2]. Le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé présente une bonne stabilité volumique parce que les valeurs de gonflement à chaud sont inférieures à 10 mm.

- Les intensités des raies de la chaux ( $d = 4.9 \text{ \AA}$ ,  $d = 2.62 \text{ \AA}$  et  $d = 1.92 \text{ \AA}$ ) diminuent en fonction du temps, ce qui indique la fixation de la chaux par les grains de silice pour former du silicate de calcium hydraté C-S-H semi-cristallisé (réactivité pouzzolanique partielle du Sd).
- Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle. Ce qui est en accord avec [1, 29 et 55].
- L'examen des diffractogrammes X conduit aux observations suivantes:
  - À 28 jours d'hydratation les intensités des raies de chaux CH et de silicate de calcium hydraté C-S-H apparaissent, et les intensités des raies de  $C_3S$  et  $\beta C_2S$  diminuent ce qui indique l'hydratation des silicates de calcium.
  - En présence du sable de dune finement broyé et à 28 jours d'hydratation les intensités des raies du quartz diminuent comparativement à celles du mélange anhydre, donc la réaction pouzzolanique partielle du Sd, ce qui confirme les résultats trouvés précédemment.
  - À 90 jours d'hydratation les intensités des raies de chaux et des minéraux du ciment, de même que celle du quartz, diminuent d'une manière significative, ce qui montre l'effet pouzzolanique partiel du sable de dune broyé. Ce résultat confirme que le Sd n'est pas inerte et participe à la formation de nouveaux C-S-H II qui rendent la pâte plus dense et plus compacte. Ce qui est en accord avec [2, 3 et 4].
- Le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé présente une meilleure résistance aux chlorures et aux sulfates, cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité, et à une diminution de la quantité de CH, ainsi qu'à la formation supplémentaire des hydrates C-S-H qui précipitent dans les pores, en diminuant par la suite la porosité de la pâte du ciment. Ce qui est en accord avec [11 et 120]. En comparant l'effet du milieu agressif de chlorure à celui de sulfate, on remarque que le sulfate influe plus que le chlorure sur le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé. Par conséquent, le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé est plus durable dans les milieux où les chlorures sont prédominants.
- Le ciment CPA + 20% Sd immergé dans la solution de  $Na_2SO_4$  montre une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 3 mois. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact. Le sable de dune finement broyé offre également une bonne protection contre l'agressivité des sulfates. Ce qui est en accord avec [11 et 44].

- Le mortier M10 présente une résistance à la compression supérieure à celle du mortier M20 et du mortier de référence MR.
- Le sable de dune finement broyé joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%. L'effet du sable de dune finement broyé sur la résistance à la flexion et à la traction par flexion est similaire à celui sur la résistance à la compression.
- Nous découvrons que le mortier de référence MR engendre une augmentation légère des déformations libres que celles des mortiers à base du ciment prémélangé au sable de dune finement broyé, lorsque ces mortiers sont conservés à l'air. Ceci s'explique par le fait que le sable de dune finement broyé, par ses fines particules siliceuses, a un effet de densification, elle diminue la porosité et augmente donc la compacité des mortiers. Le gonflement du mortier M10 est inférieur à celui du mortier de référence MR, ceci montre que la portlandite dégage lors de l'hydratation du ciment qui est inversement à la formation des autres hydrates se fait avec augmentation de volume ce trouve consommé par la réaction pouzzolanique mieux que le mortier de référence. Le retrait du mortier M10 est inférieur à celui du mortier M20, et la même remarque pour le gonflement.
- Le mortier de référence MR engendre une augmentation légère des variations massiques que celles des mortiers M10 et M20. Le gonflement du mortier M10 est inférieur à celui du mortier de référence MR. Le retrait du mortier M10 et le gonflement massique sont légèrement inférieurs que dans le cas du mortier M20.

Pour compléter notre programme d'essais, et évaluer la capacité du ciment prémélangé au sable de dune finement broyé on a confectionné des éprouvettes cubiques, prismatiques et cylindriques dans le chapitre prochain pour tester les caractéristiques suivantes: la consistance du béton à l'état frais, la porosité à l'état durci, la résistance à la compression, à la flexion, à la traction par fendage, la déformabilité, la perméabilité à l'eau des bétons, l'évolution de la perméabilité à l'eau en cours de dessiccation et l'interface mortier/gravier des bétons.

## CHAPITRE V

# PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES, LA DÉFORMABILITÉ & LA DURABILITÉ DU BÉTON

### V.1. INTRODUCTION

**L**e béton à base du ciment prémélangé au sable de dune finement broyé est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime d'un squelette granulaire et d'un liant qui est la pâte du ciment hydratée. En premier lieu nous avons commencé par étudier l'influence de l'addition du sable de dune finement broyé au ciment, sur les propriétés physico-mécaniques des bétons. Par la suite, nous avons évalué la déformabilité des bétons à 28 jours du durcissement. Finalement, nous avons étudié la durabilité des bétons. Cette partie traite trois aspects de la durabilité des bétons notamment: sa perméabilité à l'eau, l'évolution de la perméabilité à l'eau en cours de dessiccation et l'interface mortier/gravier des bétons.

### V.2. FORMULATION DE BÉTON

L'optimisation de la formulation de béton s'appuie sur plusieurs critères qui doivent faire l'objet d'un compromis: la consistance, la résistance, la durabilité et l'économie [59]. La qualité du béton est étroitement liée à la qualité et le choix judicieux des proportions intime des constituants [17].

Une formulation de béton durable dans son environnement, c'est essentiellement un béton qui soit le plus possible compact et faiblement perméable. Les méthodes de formulation des bétons courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une consistance fixée [17]. Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition du béton, on a utilisé celle qui semble être la moins connue. C'est la méthode de **B. Scramtaiv**. Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé [116].

#### V.2.1. Données de base

- ✧  $D_{max}$  (diamètre des granulats).
- ✧ Résistance à la compression après 28 jours.
- ✧ Ouvrabilité ( $AC$ ).
- ✧ Caractéristiques techniques des matières premières.

## V.2.2. Méthode de calcul

- \* Détermination du dosage en eau

$$E = f(AC, D_{max}, \text{Nature des granulats})$$

- \* Calcul du rapport C/E

Pour un béton courant:  $C/E \leq 2.5$ , pour béton plastique et fluide.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5$$

Pour un béton de qualité:  $C/E > 2.5$ , pour béton fermé et très fermé.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A_1 \cdot R_c} - 0,5$$

$R_b$  : la résistance à la compression à 28 jours de durcissement normal.

$R_c$  : l'activité du ciment.

( $A$  et  $A_1$ ) : coefficients de qualité des matériaux utilisés (granulats et ciment)

➤ Bonne qualité:  $A = 0,65$ ,  $A_1 = 0,43$

➤ Qualité moyenne:  $A = 0,60$ ,  $A_1 = 0,40$

➤ Mauvaise qualité:  $A = 0,55$ ,  $A_1 = 0,37$

- \* Calcul du dosage en ciment  $C = C/E \times E$

- \* Calcul du dosage en agrégats (pierres concassées)  $G = 35G_1 + 65G_2$

$G_1$  : (7/15) et  $G_2$  : (15/25)

$$G = \frac{1000}{V_V \cdot \frac{\alpha}{\gamma_{app}^G} + \frac{1}{\rho_{abs}^G}}$$

$V_V$  : porosité des pierres concassées.  $V_V = 1 - \frac{\gamma_{app}}{\rho_{abs}}$

Coefficient d'écartement de grains  $\alpha = 1.24$  (d'après l'abaque).

- \* Calcul du dosage en sable

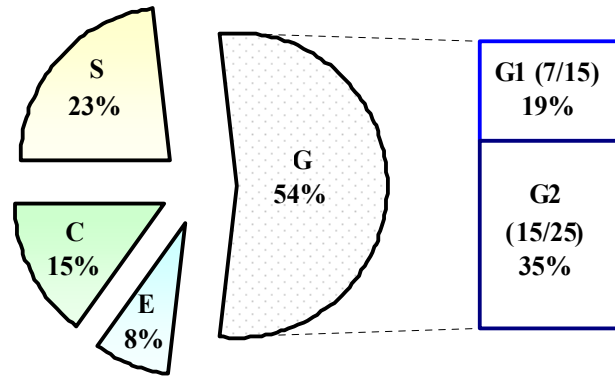
$$S = \left[ 1000 - \left( \frac{G}{\rho_{abs}^G} + \frac{C}{\rho_{abs}^C} + E \right) \right] \cdot \rho_{abs}^S$$

## V.2.3. Composition

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne  $R_{b28j} = 36$  Mpa et dont la consistance est telle que son affaissement au cône soit de  $7 \pm 0.5$  cm. Dans tous les essais le rapport  $E/L \geq 0.4$ ,  $A = 0.6$ ,  $D_{max} = 25$  mm et  $S/G = 0.42$ . Les compositions des trois mélanges de bétons sont reportées dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Compositions des bétons en (kg/m<sup>3</sup>)

Bétons	BO	B10	B20
<b>Constituants</b>			
Eau/liant	0.52	0.49	0.46
Ciment	350	315	280
Sable 0/5	538	538	538
Gravier 7/15	446	446	446
Gravier 15/25	828	828	828
10% Sd	-	35	-
20% Sd	-	-	70



**BO** : béton ordinaire à base de CPA  
**B10** : béton à base de CPA + 10% Sd  
**B20** : béton à base de CPA + 20% Sd

### V.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

#### V.3.1. Consistance du béton à l'état frais

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance qui peut se définir comme la facilité de la mise en œuvre du béton. Le choix de l'essai de caractérisation de la consistance et de la classe de consistance visée est en fonction de sa facilité de mise en œuvre sur chantier et au laboratoire ainsi que sa fiabilité.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme [NF P 18-451] est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables, de variabilité restreinte. En fonction des affaissements obtenus, la classe de consistance des différents bétons est plastique (l'affaissement varie de 5 à 9 cm).

#### V.3.2. Porosité volumique du béton à l'état durci

La porosimétrie par intrusion de mercure est utilisée couramment pour déterminer la porosité des matériaux cimentaires [52, 77 et 134]. Cependant, Gallé [76] indique que la porosimétrie à l'eau peut être une méthode plus réaliste que la porosimétrie par intrusion de mercure. En effet, la porosimétrie à l'eau prend en compte la microporosité capillaire (c-à-d. les pores dont le diamètre moyen est compris entre 0,8 et 2 µm) ainsi que la porosité des C-S-H (volume interfoliaire) car l'eau peut pénétrer dans des espaces d'une taille de 0.5 µm. A partir du volume de l'éprouvette, on peut alors calculer sa porosité volumique représentant le rapport de son volume poreux à son volume total.

Sur une base expérimentale, soit par la pesée hydrostatique d'une éprouvette saturée, on détermine alors le volume total de l'éprouvette (fraction poreuse et solide) et on calcule ainsi sa porosité volumique,  $\varepsilon_{expé}$  à partir de la relation suivante:

$$\varepsilon_{expé} (\%) = ((M_{sss} - M_{sèche}) / (M_{sss} - M_{eau})) \times 100\%$$

Où:

$\varepsilon_{expé}$  : porosité volumique établie expérimentalement par pesée hydrostatique, excluant le volume d'air piégé et/ou entraîné (%).

$M_{sss}$  : masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l'air (g).

$M_{sèche}$  : masse sèche de l'éprouvette (g).

$M_{eau}$  : masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l'eau et déterminée par pesée hydrostatique (g).

La procédure d'évaluation de la porosité est la suivante: les éprouvettes sont séchées dans une étuve à 105°C pendant 24 heures, puis immergées dans l'eau pendant 48 heures, l'échantillon est mis ensuite dans un bain d'eau bouillante pendant 5 heures, les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et à l'eau (pesée hydrostatique) (figure V.1). Les essais ont été faites au laboratoire de la cimenterie *Lafarge de Hammam Dalaâ - M'sila*.



Figure V.1 : Pesée hydrostatique

La méthode utilisée dans ce test est celle établie par [ASTM désignation C 624] [8 et 31]. La porosité est estimée après 28 et 180 jours de durcissement sur des éprouvettes cubiques de (10×10×10 cm). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure V.2.

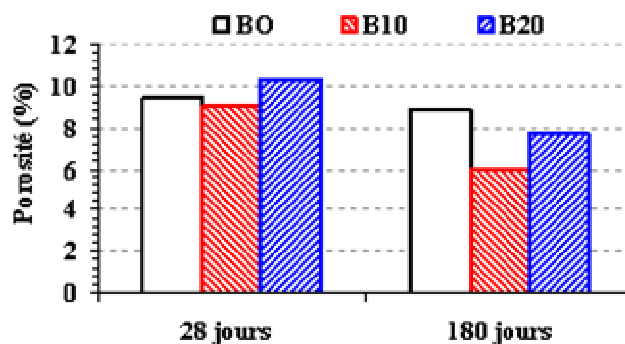


Figure V.2 : Porosité accessible à l'eau des bétons en fonction du temps



## Interprétation et discussion

### V.3.2.1. Variation de la porosité en fonction du temps et du type de ciment

La porosité du matériau est le premier indicateur de la durabilité, car la porosité est le siège des agressions extérieures: plus le matériau est poreux, plus la pénétration d'agents est facilitée, et donc plus sa durabilité est limitée. Les résultats montrent que: à 28 jours, la porosité du béton B10 est inférieure à celle des autres bétons, ce qui est expliqué du fait d'une meilleure hydratation entre les composants du ciment et l'addition du sable de dune broyé. Ce qui est en accord avec [25, 50, 85, 150 et 182], en plus par la bonne qualité de l'interface mortier/gravier. À 180 jours, la porosité diminue pour atteindre les valeurs représentées sur la figure V.2, l'addition de 10% Sd a provoqué une réduction de l'ordre de 32% de la porosité par rapport à celle du béton BO. Les bétons améliorent leur porosité à long terme, ce qui confirme la continuation des réactions d'hydratation, conduisant ainsi au développement de la structure interne par la production de nouveaux produits d'hydratation qui précipitent pour fermer les pores déjà existant dans la structure, en faisant diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui des petits pores. Pour le béton B20, une croissance de la porosité de l'ordre de 9.6% à moyen terme (28 jours). Par contre à long terme (180 jours) une réduction de l'ordre de 12.5% à celle du béton BO.

## V.4. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du béton à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues aux différentes charges de compression, de flexion et de traction. Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques (10×10×10 cm), prismatiques (10×10×40 cm) et cylindriques (16×32 cm), respectivement [115]. On a confectionné trois sortes de bétons (béton ordinaire BO, B10 et B20), chaque série comprend trois échantillons. Les éprouvettes ont été conservées à l'eau pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température a été maintenue constante à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Les résultats obtenus des résistances à 7, 28, 90 et 180 jours, sont illustrés sur les figures ci-dessous:

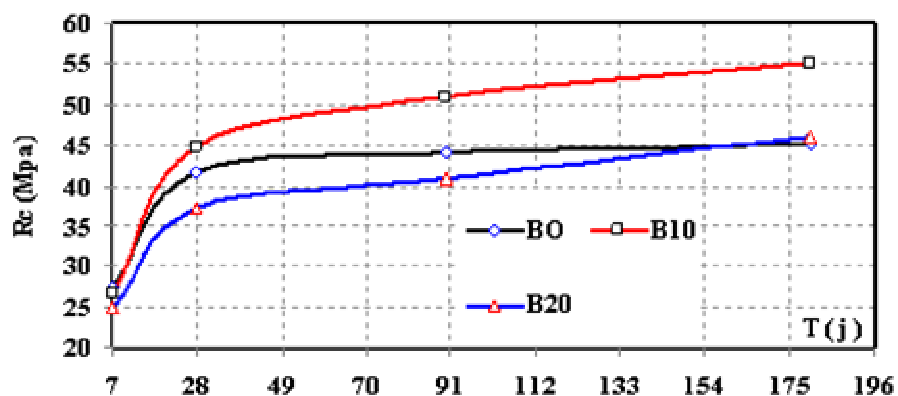


Figure V.3 : Résistance à la compression des bétons en fonction du temps

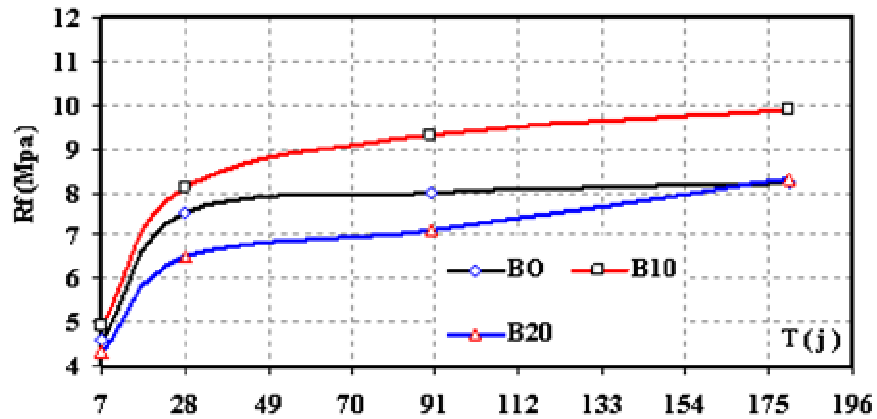


Figure V.4 : Résistance à la flexion des bétons en fonction du temps

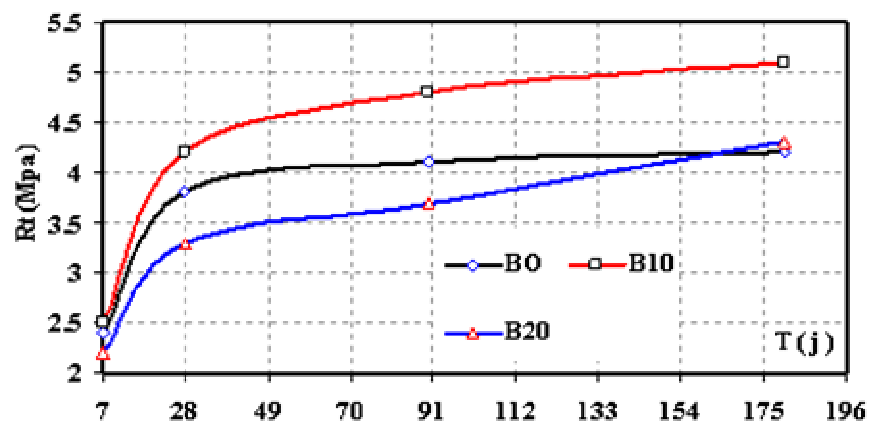
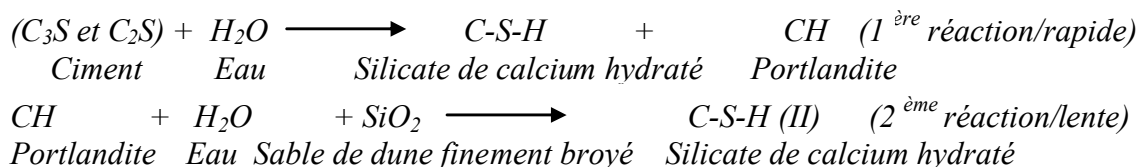


Figure V.5 : Résistance à la traction par fendage des bétons en fonction du temps

### Interprétation et discussion

#### V.4.1. Variation de la résistance mécanique en fonction du temps et du type de ciment

Pour confirmer le résultat de la pâte, des essais ont été effectués sur des éprouvettes du béton qui ont donné par suite la même variation de la résistance à la compression que celle donnée par la pâte. On remarque que, pour tous les bétons la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau, ce qui peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps en présence d'une humidité suffisante. L'évolution des résistances mécaniques en fonction de l'âge montre, que pendant les premiers âges, les résistances sont faibles pour tous les échantillons, tandis que dans les périodes qui suivent, les résistances augmentent sensiblement (figures V.3, V.4 et V.5). Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du sable de dune finement broyé avec la portlandite selon le schéma des réactions suivantes:



La présence du sable de dune finement broyé accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur sur l'hydratation, combiné à l'effet de remplissage dû à leur finesse et l'effet pouzzolanique, peut conduire à de meilleures résistances mécaniques des bétons. Ce qui est en accord avec [1, 2, 3, 4, 26, 29, 45, 46, 55, 71, 112, 143 et 182].

Les résistances en compression augmentent lors de substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des bétons par trois effets: physique, physico-chimique et chimique. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire. Ce qui est en accord avec [13, 15, 17, 38, 39, 40-42, 55, 93, 94, 101-103 et 140].

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que la résistance à la compression, montre que le béton B10 est clairement supérieur aux bétons BO et B20.

$$[R_{c28j} \{B10\} = 1.08. R_{c28j} \{BO\}]$$

$$[R_{c28j} \{B10\} = 1.20. R_{c28j} \{B20\}]$$

Ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton.

Pour le béton B20, une diminution de l'ordre de 10.4% à moyen terme (28 jours). Par contre à long terme (180 jours) des résistances légèrement supérieures de l'ordre de 2.2% à celles du béton ordinaire à cause de la réaction pouzzolanique qui pourrait se déclencher tardivement en améliorant les résistances mécaniques à la compression.

Un autre avantage est qu'il permet au béton de poursuivre l'amélioration de ses performances mécaniques même après la période de 28 jours. Ce qui est en accord avec [3, 4, 112 et 143].

$$[R_{c180j} \{B10\} = 1.22. R_{c180j} \{BO\}]$$

$$[R_{c180j} \{B10\} = 1.19. R_{c180j} \{B20\}]$$

$$[R_{c180j} \{B10\} = 1.23. R_{c28j} \{B10\}]$$

$$[R_{c180j} \{BO\} = 1.08. R_{c28j} \{BO\}]$$

$$[R_{c180j} \{B20\} = 1.23. R_{c28j} \{B20\}]$$

L'effet du sable de dune finement broyé sur la résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. On a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression. Une autre raison est d'améliorer les propriétés du béton frais par une meilleure maniabilité et une diminution du potentiel de ségrégation et une faible tendance au ressuage. De plus, en incluant des particules aussi fines, il est constaté que la cohésion interne et l'adhésion des mélanges est meilleure.

#### V.4.2. Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité volumique

Les résistances en compression des bétons sont inversement proportionnelles à la porosité volumique. Ce qui est en accord avec [13, 15, 16, 86, 109, 132, 118 et 157]. La contribution du sable de dune finement broyé à l'amélioration de la résistance en compression est beaucoup plus significative que celle sur le remplissage de la porosité. Pour le béton B10 à 28 jours (environ 3.2 Mpa gagnés pour une réduction de l'ordre de 0.4% de la porosité) et à 180 jours (environ 10 Mpa gagnés pour une réduction de l'ordre de 2.8% de la porosité). Le sable de dune broyé influe sur cette contribution qui semble être le résultat d'un effet structurant améliorant la solidité mécanique des liaisons mortier/gravier que le résultat d'un effet quantitatif sur le volume des produits hydratés formés.

#### V.5. DÉFORMABILITÉ

Dans le but d'étudier l'influence du sable de dune finement broyé sur la déformabilité du béton à 28 jours du durcissement, on a confectionné trois sortes des bétons (béton ordinaire BO, B10 et B20), chaque série comprend trois échantillons prismatiques de (10×10×40 cm). La déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran indiquant le 0.01 mm qui sont installés à l'aide de cadres appropriés sur une surface de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal, comportant des plots de mesure (distants de 20 cm) (figure V.6).

La définition de la résistance prismatique des éprouvettes par la formule:  $R_{Pri} = P / F$

$P$  : charge de destruction selon les unités de mesure de presse.

$F$  : air de la section de l'éprouvette.

Le module d'élasticité se détermine pour chaque éprouvette au niveau de la charge égal 30% de la charge de destruction.  $E_{el} = \sigma_1 / \varepsilon_{1el}$ ,  $\sigma_1 = P_1 / F$

$\sigma_1$  : accroissement de la contrainte de zéro conventionnel au niveau 30% de la charge de destruction.

$P_1$  : charge de destructions correspondantes.

$\varepsilon_{1el}$  : accroissement des déformations relatives élasto-instantanées longitudinales, des éprouvettes correspondant à la charge  $P_1 = 0.3 P$

L'accroissement des déformations se détermine comme la moyenne arithmétique des indicateurs des quatre cotés du prisme  $\varepsilon_{1el} = \Delta l_1 / l_1$

$\Delta l_1$  : accroissement absolu des déformations longitudinales des éprouvettes correspondant à l'accroissement des contraintes.

$l_1$  : les bases fixes pour les mesures des déformations longitudinales des éprouvettes.

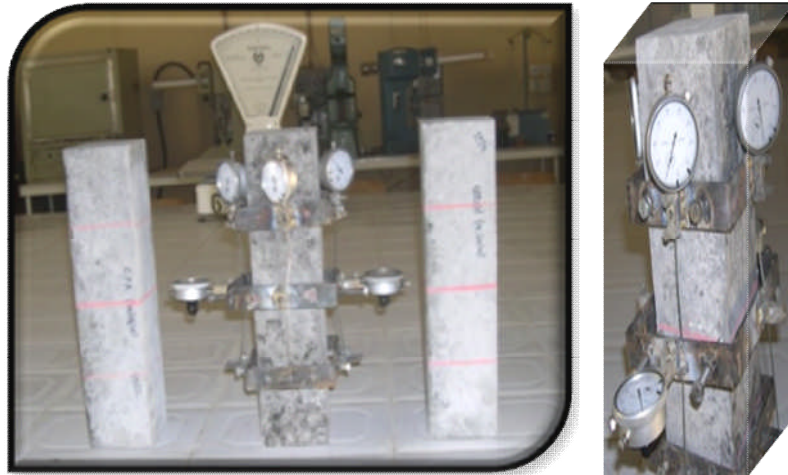


Figure V.6 : Emplacement des cadres et cadrans sur l'éprouvette

L'éprouvette est centrée sur les plateaux de la presse comme pour un essai de rupture en compression (figure V.7).

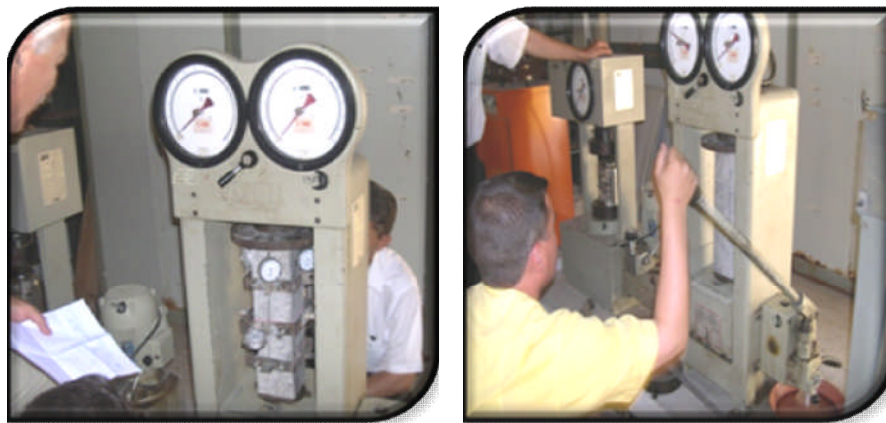


Figure V.7 : Déformations mesurées pendant la compression

A partir des résultats des essais sur les prismes on a construit des graphiques présentant l'évolution du module de déformation des bétons en compression, des déformations élasto-instantanées longitudinales ( $t$ ) et relatives totales ( $t+\Delta t$ ) avec la contrainte relative.

On détermine le module d'élasticité initial à la compression à partir de la formule:

$$E = \Sigma \Delta \sigma / \Sigma \Delta \varepsilon$$

$\Sigma \Delta \sigma$  : la somme d'accroissement de la contrainte à chaque degré de 0.05 à 0.3  $P_c$ .

$\Sigma \Delta \varepsilon$  : la somme d'accroissement de la déformation élasto-instantanées longitudinale relative à chaque degré de la même gamme.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures ci-dessous:

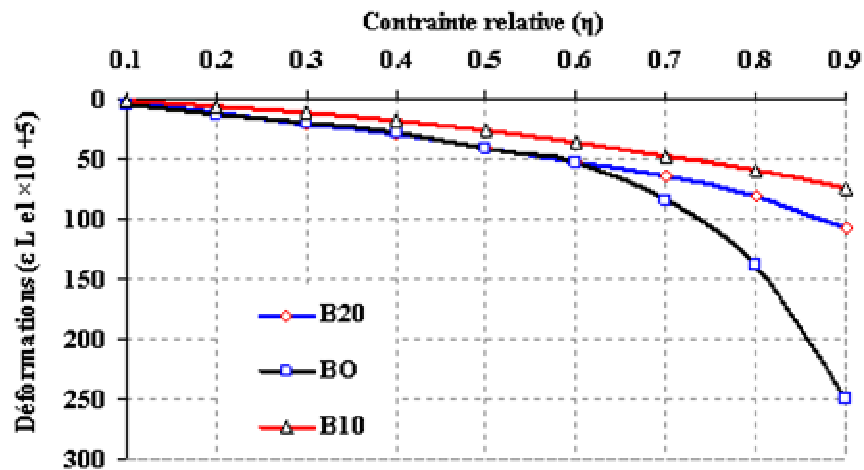


Figure V.8 : Déformations élasto-instantanées longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives

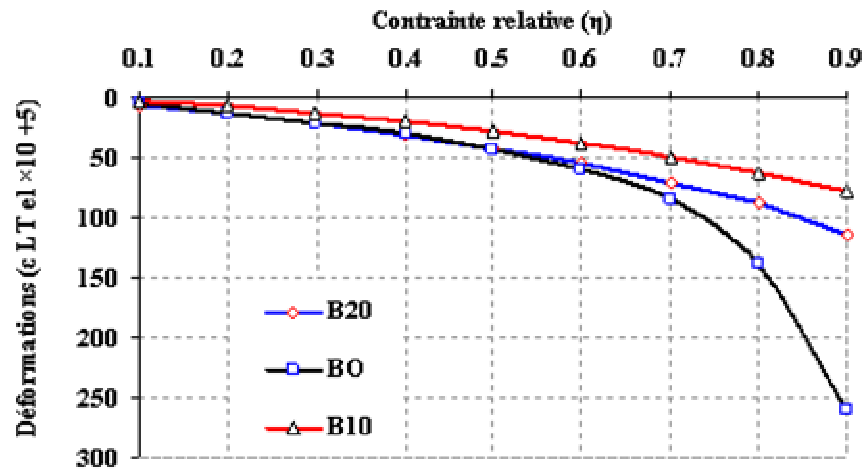


Figure V.9 : Déformations élasto-instantanées totales longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives

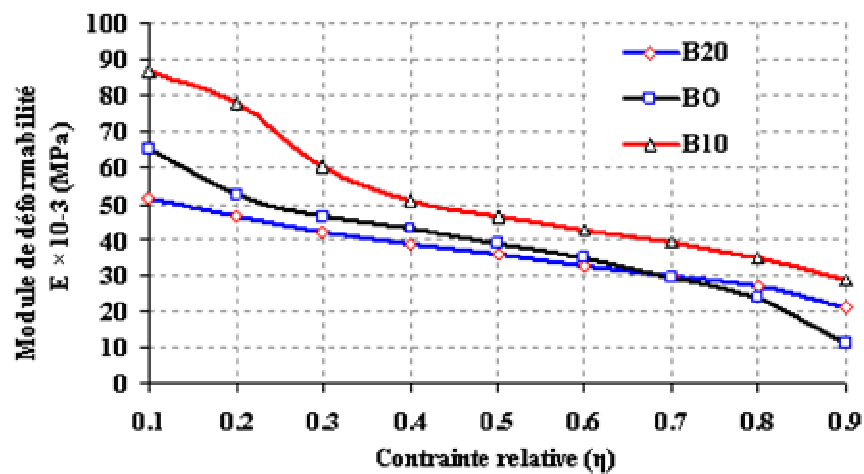


Figure V.10 : Module de déformabilité des bétons en fonction des contraintes relatives

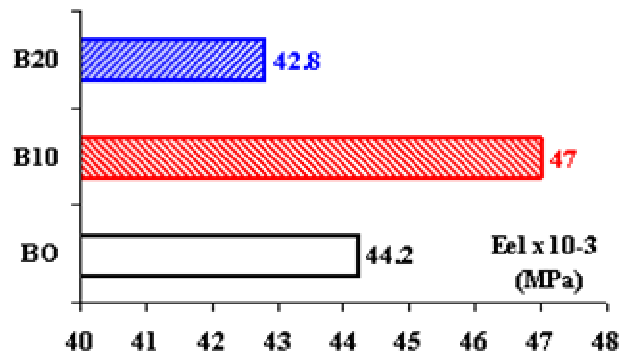


Figure V.11 : Module d'élasticité des bétons

### Interprétation et discussion

Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'effet de sable de dune finement broyé sur la déformation des bétons en compression, et de préciser un certain nombre de points:

- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées des bétons revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle  $\eta = 0.1-0.6$  (10-60% de la contrainte maximale), ce qui indique un comportement élastique linéaire.

D'après *Mehta* [118], les premières microfissures aux interfaces mortier/gravier apparaissent déjà pour 30% de la contrainte maximale. Les microfissures sont créées aléatoirement au sein des éprouvettes. Ce caractère aléatoire est lié à l'hétérogénéité des bétons et à l'existence de points durs (les graviers). L'orientation des fissures, quant à elle, est gouvernée par la différence de rigidité de mortier et de gravier. Ce qui est en accord avec [37, 87, 88, 117, 172 et 173].

- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées des bétons est curviligne dans l'intervalle  $\eta = 0.6-0.9$  (60-90% de la contrainte maximale), ce qui signale le développement dans les bétons de déformations irréversibles, où le comportement devient non-linéaire.

D'après *Mehta* [118], Un réseau de microfissures se propage aux interfaces qui commencent à gagner le mortier déjà pour 75% de la contrainte maximale. Au fur et à mesure que le chargement se poursuit, ces microfissures rejoignent celles des interfaces pour former des microfissures connectées dans les bétons. Ce qui est en accord avec [87, 88 et 117].

Lorsqu'on approche la contrainte maximale, ces microfissures, parallèles à l'axe du chargement, finissent par s'organiser en une ou plusieurs microfissures, toujours orientées parallèlement à la direction de la sollicitation. Finalement, les fissures macroscopiques s'ouvrent et se propagent, conduisant à la rupture des bétons.

- Le sable de dune finement broyé exerce une influence remarquable sur l'évolution des déformations élasto-instantanées longitudinales et relatives totales pour une sollicitation de courte durée. Les valeurs les plus basses de la déformation relative totale sont propres au béton B10, dont macrostructure est très compacte.
- Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative: au fur et à mesure que la contrainte relative augmente, le module de déformabilité du béton B10 reste supérieur à celui des bétons BO et B20. Le module d'élasticité du béton B10 est supérieur à celui des bétons BO et B20.
- Le module d'élasticité augmente lorsque la résistance à la compression augmente, mais il n'y a pas de consensus sur la forme exacte de cette relation. La seule chose certaine est que l'augmentation du module d'élasticité est plus progressive et plus lente que l'augmentation de la résistance à la compression.
- Les déformations transversales montrent des tendances similaires aux déformations longitudinales.



## V.6. DURABILITÉ

Cette partie d'étude traite trois aspects de la durabilité des bétons notamment: sa perméabilité à l'eau, l'évolution de la perméabilité à l'eau en cours de dessiccation et l'interface mortier/gravier des bétons.

### V.6.1. PERMÉABILITÉ

En 1856 *Henri Darcy* [56], a formulé la loi de la vitesse d'écoulement de l'eau dans un corps poreux. Le perméamétrie à l'eau utilisé dans la campagne d'essai est un appareil permettant la mesure du débit d'eau traversant une éprouvette cylindrique en béton de 16 cm de diamètre et 16 cm de hauteur [31] (figure V.12). Les éprouvettes cylindriques 16×16 cm sont obtenues par sciage en deux des éprouvettes 16×32 cm à l'aide d'une scie à béton. Elles sont soumises à une saturation d'eau avant chaque essai. La perméabilité caractérise l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression. La perméabilité ( $k$ ) est définie par la loi de *Darcy* [19].

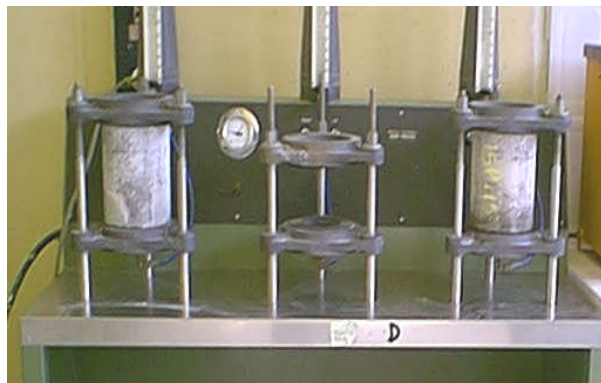


Figure V.12 : Appareillage d'essai de perméabilité

A cause de son utilisation abondante notamment dans les constructions les plus stratégiques, le béton soulève de plus en plus le problème de sa durabilité en prévision des dommages qui pourraient survenir à moyens ou à longs termes. A cet effet, nous avons étudié la durabilité de trois sortes des bétons (béton ordinaire BO, B10 et B20) à travers leur perméabilité à l'eau à 28 et 180 jours.

L'essai consiste à mettre une éprouvette cylindrique dans un appareil de perméabilité de manière à ce qu'elle soit traversée de bas en haut suivant sa hauteur, par de l'eau sous pression. La durée de l'essai est estimée à 9 heures, dont la pression est augmentée d'une unité 1 bar par heure, en commençant par une valeur minimale de 2 bars. A la fin de l'essai la pression atteindra 10 bars. La perméabilité ( $k$ ) est calculée à partir de la formule de *Darcy*:

$$k = (Q / S) \times (\Delta X / \Delta P) \times \eta$$

Avec:

$Q$  : volume d'eau par unité de temps ( $m^3/s$ ).

$\Delta X = H$  : hauteur de l'éprouvette (m).

$\Delta P = P_1 - P_2$  : différence de pression entre les deux faces de l'éprouvette (bar).

$S$  : surface de l'éprouvette ( $m^2$ ).

$\eta$  : viscosité dynamique de l'eau, en fonction de la température (bar.s).

$k$  : la perméabilité ( $m^2$ ).

### Remarque sur la perméabilité ( $k$ ) et le coefficient de perméabilité ( $K$ )

Dans le cas de la perméabilité à l'eau, nous parlons souvent de la conductivité hydraulique  $K$  (m/s) au lieu de la perméabilité intrinsèque  $k$  ( $m^2$ ). On définit la conductivité hydraulique  $K$ , ou coefficient de perméabilité, comme:  $K = k \times (\rho \times g / \eta)$ . Avec:  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) est la masse volumique du fluide,  $g$  ( $m/s^2$ ) est l'accélération gravitationnelle. Poids volumique ( $\rho \times g$ ) de l'eau (à  $20^\circ C = 10^4$   $N/m^3$ ). Viscosité de l'eau (à  $20^\circ C = 10^{-3}$   $N.s/m^2$ ). La perméabilité  $k$  de  $1$   $m^2$  correspond à une conductivité hydraulique  $K$  de l'ordre de  $10^7$  m/s.  $K$  s'exprime en (m/s). Ainsi si la perméabilité  $k$  est une caractéristique du matériau fortement contrôlée par la porosité, la conductivité hydraulique  $K$  est une caractéristique des conditions d'écoulement dans un matériau donné pour un fluide donné. Le principe de l'essai consiste à déterminer le temps d'écoulement d'un volume d'eau délimité par des graduations des cellules. En d'autre termes, il s'agit de préciser le niveau atteints par l'eau au bout d'un certain temps. La vitesse d'écoulement est déterminée par le calcul du rapport entre le volume d'eau écoulé et le temps d'écoulement. La mesure de la perméabilité des bétons dépend fortement des paramètres d'essai tel que la pression de mesure, le type de séchage et plus important encore l'état de saturation du béton. On doit les maîtriser avant de faire une étude quelconque de la perméabilité. Les valeurs du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du temps sont illustrées sur la figure V.13.

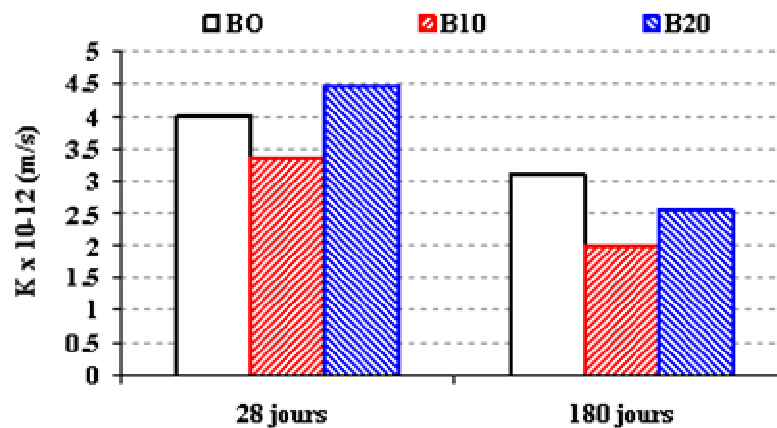


Figure V.13 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du temps

## **Interprétation et discussion**

### **V.6.1.1. Variation de la perméabilité en fonction du temps et du type de ciment**

La perméabilité est un indicateur permettant de compléter l'information donnée par la porosité. En effet, la perméabilité dépend, en plus de la porosité et de la géométrie de la microstructure poreuse. La figure V.13, montre que: à 28 jours de durcissement, le béton B10 à base de ciment CPA + 10% Sd est moins perméable que les autres bétons. Cet effet s'explique par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l'hydratation de ciment prémélangé au sable de dune finement broyé. Ce qui est en accord avec [25, 50, 85, 150 et 182]. À 180 jours, l'addition de 10% Sd a réduit la perméabilité à l'eau de l'ordre de 35.5% par rapport au béton ordinaire, cela s'explique du fait d'une meilleure hydratation entre les composants du ciment et l'addition du sable de dune finement broyé, en plus du remplissage des gros pores qui améliore la perméabilité à l'eau. Cela accroît considérablement la durabilité du béton, qui prolonge la durée de vie de l'infrastructure dans laquelle il est utilisé, réduisant ainsi l'impact écologique.

Pour le béton B20, une augmentation de l'ordre de 11.2% de la perméabilité à l'eau à moyen terme (28 jours). Par contre à long terme (180 jours) une diminution de l'ordre de 17.7% à celle du béton ordinaire. On note enfin, que l'augmentation considérable de la durabilité à travers la perméabilité à l'eau du béton à base d'un ciment prémélangé au sable de dune finement broyé par rapport au béton ordinaire s'explique par une plus fine répartition des pores, mais la réduction de la perméabilité à l'eau peut également être due à une meilleure liaison mortier/gravier.

### **V.6.1.2. Variation de la perméabilité en fonction de la porosité volumique**

La diminution de la porosité entraîne une réduction du coefficient de la perméabilité à l'eau quelque soit le type et l'âge du béton. Enfin, on peut dire que la diminution de la porosité au cours de l'avancement des réactions d'hydratation est accompagnée d'une diminution de la perméabilité.

### **V.6.1.3. Variation de la perméabilité en fonction de la résistance en compression**

Il existe une certaine tendance entre la variation de la résistance en compression et celle de la perméabilité présentée. Toutefois, la variation de la perméabilité à l'eau est faible comparativement à celle de la résistance en compression. La perméabilité à l'eau diminue avec l'augmentation de la résistance en compression quelque soit le type et l'âge du béton. Cela est dû comme il a été cité auparavant à l'hydratation du ciment c'est-à-dire la quantité d'hydrates formés au cours de temps. La résistance en compression se manifeste d'une façon générale avec le sens inverse de la perméabilité à l'eau et de la porosité c'est-à-dire l'augmentation de la résistance en compression entraîne une diminution de la perméabilité à l'eau et de la porosité du béton. Ce qui est en accord avec [13, 15, 16, 86, 109, 132, 118 et 157].

## V.6.2. ÉVOLUTION DE PERMÉABILITÉ À L'EAU EN COURS DE DESSICCATION

Le béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents extérieurs, la caractérisation de la perméabilité à l'eau est indispensable pour décrire de manière correcte les phénomènes de transport qui se produisent dans le milieu poreux lors d'une dessiccation progressive. De façon à évaluer l'influence du degré de dessiccation, la perméabilité à l'eau des bétons a été mesurée à plusieurs reprises, selon une séquence de dessiccation progressive [5], de plus en plus sévère, elles sont présentées dans le tableau V.2. Deux types du béton ont été testés expérimentalement: un béton ordinaire BO à base de CPA et un béton B10 à base de CPA + 10% Sd.

Tableau V.2 : Résultats des essais de perméabilité effectués sur bétons

28 j: cure humide	Laboratoire	Dessiccation		
	+ 105 j (Conservation à l'air 27°C)	+ 3 j (étuve 60°C)	+14 j (étuve 60°C)	+ 21 j étuve 80°C, puis à 105°C jusqu'à masse constante
Série	$K \times 10^{-12}$ (m/s)			
BO	6.30	10.10	21.20	57.30
B10	4.50	6.50	12.00	29.50

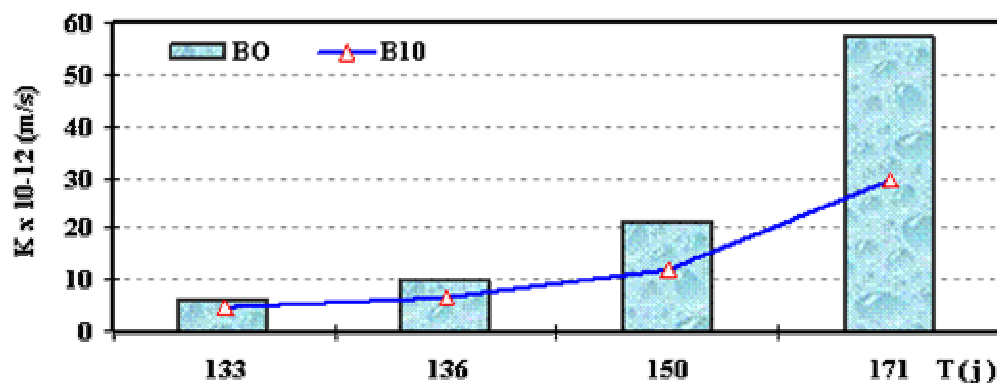


Figure V.14 : Influence du degré de dessiccation sur la perméabilité des bétons en fonction du temps

### Interprétation et discussion

D'après la figure V.14, on distingue clairement qu'à la température ambiante (à 133 jours), l'addition de 10% Sd a réduit la perméabilité à l'eau de l'ordre de 28.5% par rapport au béton ordinaire, et de l'ordre de 48.5% à 171 jours avec une séquence de dessiccation progressive.

Les mesures réalisées sur les bétons permettent de mettre en évidence une augmentation continue de la perméabilité. Ceci montre qu'une microfissuration grave a été générée et qu'un réseau de microfissures interconnectées a été engendré, provoquée par la dilatation thermique différentielle de mortier et de gravier.

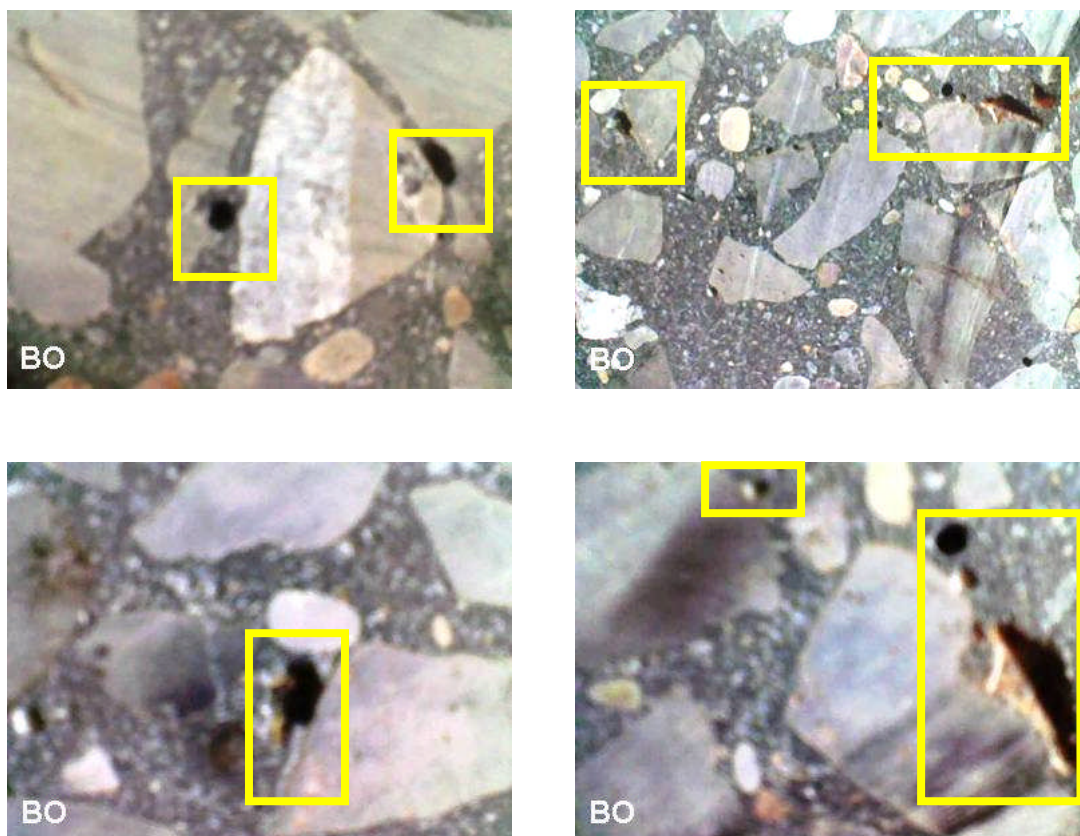
De plus, la microfissuration s'accompagne d'un élargissement des pores. Nous pouvons admettre que l'augmentation de la perméabilité à l'eau est probablement liée à un élargissement des pores par dilatation. Cela signifie de plus que la distribution de la taille des pores est également modifiée sous température entre (27 et 105°C), l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évacuent des bétons.

### **V.6.3. INTERFACE MORTIER/GRAVIER**

Un des facteurs importants qui influencent les propriétés du béton concerne la zone de transition interfaciale, située près de l'interface entre le mortier et le gravier, interface généralement désignée interface mortier/gravier.

Cette zone possède une microstructure différente du reste du béton et ceci peut induire des faiblesses locales dans le béton, altérant ses propriétés mécaniques et sa résistance envers la perméabilité à l'eau et des agents agressifs.

La figure V.15 présente les sections des bétons BO et B10. On observe des cavités dans la structure de béton BO sépare le mortier du gravier, située près de l'interface mortier/gravier. En revanche, elles semblent avoir été éliminées au sein du béton B10.



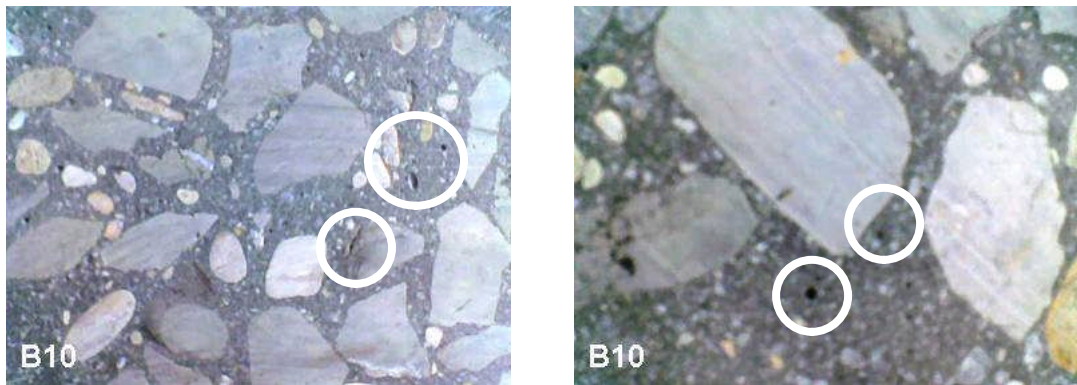


Figure V.15 : Sections des bétons

La zone de transition interfaciale est souvent décrite comme une zone dont l'épaisseur, variable de 10 à 50  $\mu\text{m}$ , dépend principalement des propriétés pouzzolaniques des additions minérales. Cette zone présente une forte porosité ce qui induit des caractéristiques mécaniques médiocres. Il est souvent avancé que l'adhésion entre le gravier et le mortier conditionne la résistance mécanique et les propriétés de transfert du béton [74, 75, 114 et 146]. Il est reconnu depuis longtemps que les microfissures se développent en premier à la zone de transition interfaciale [33 et 87].

Pour examiner la zone de transition interfaciale à 180 jours des bétons BO et B10, nous avons procédé différents grossissements à partir d'un microscope électronique à balayage (MEB) sur surfaces polies. Les analyses ont été faites au laboratoire de *l'université de Biskra*. Le microscope électronique à balayage utilisé pour ce travail est un *JEOL JSM – 6390 LV* équipé d'une microsonde pour l'analyse en sélection d'énergie (figure V.16). La tension d'accélération appliquée est de 15 keV pour l'imagerie sur surface polie et pour la microanalyse élémentaire par spectrométrie X qui permet de cerner leur composition chimique.



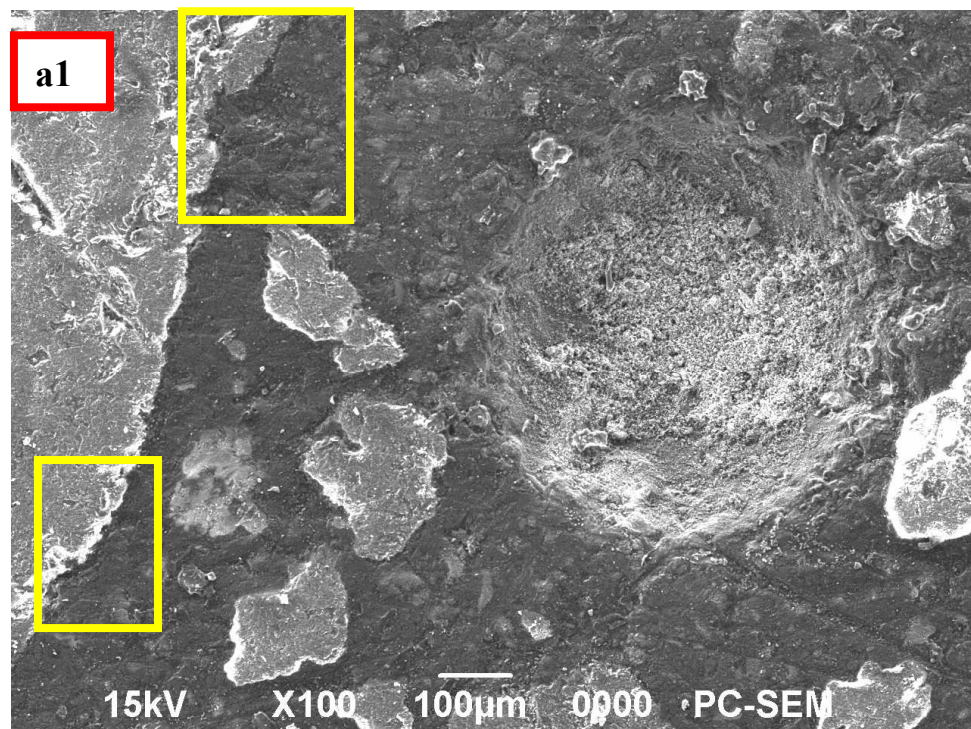
Figure V.16 : Microscope électronique à balayage de l'université de Biskra

Pour cela, les échantillons sont d'abord coupés et polis afin de présenter une surface plane (figure V.17). La qualité des analyses est donc directement liée à la qualité du polissage. Le polissage est effectué avec des papiers abrasifs pour enlever une couche inférieure à 1 mm d'épaisseur. La surface analysable est de  $(2 \times 2) = 4 \text{ cm}^2$  et l'épaisseur de l'échantillon ne doit pas dépasser 1.5 cm. Une fois le polissage terminé, les échantillons sont observés au MEB en utilisant la technique des électrons rétrodiffusés (BSE) (*image chimique*) et la technique des électrons secondaires (SE) (*image topographique*). Les électrons secondaires, autorisent généralement un grossissement 4 fois plus important que les électrons rétrodiffusés et permettent, grâce à la troisième dimension, d'apprécier la géométrie des cristaux et la texture.



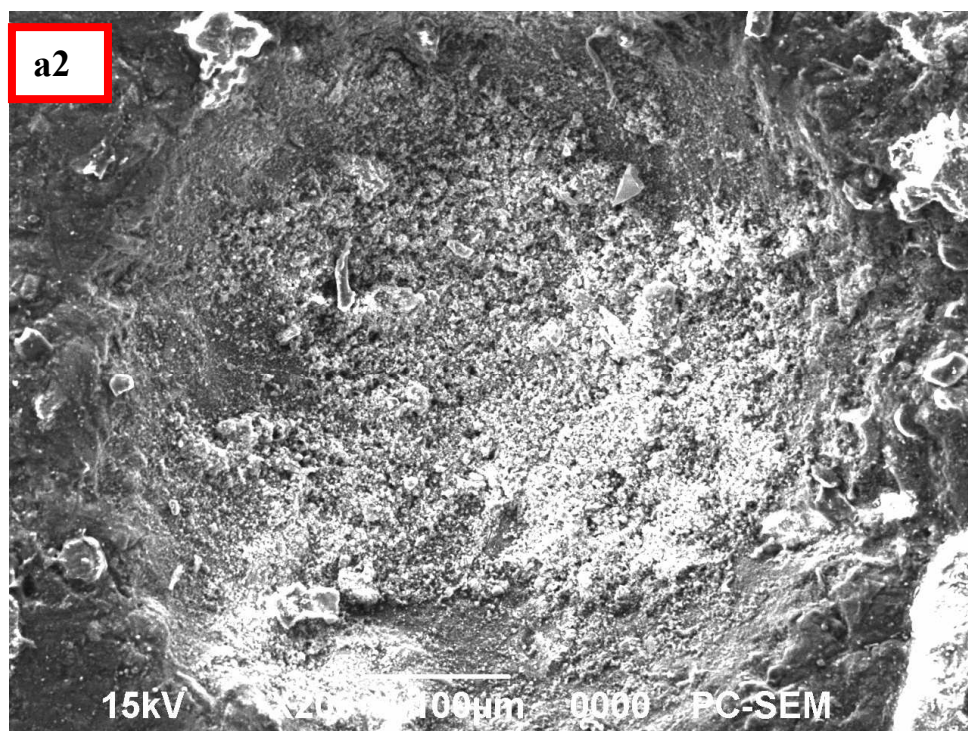
**Figure V.17 :** Les échantillons (BO et B10)

Les photos obtenues au MEB sont présentées sur les figures V.18a et V.18b et la microanalyse élémentaire par spectrométrie X sur les figures V.19a et V.19b.

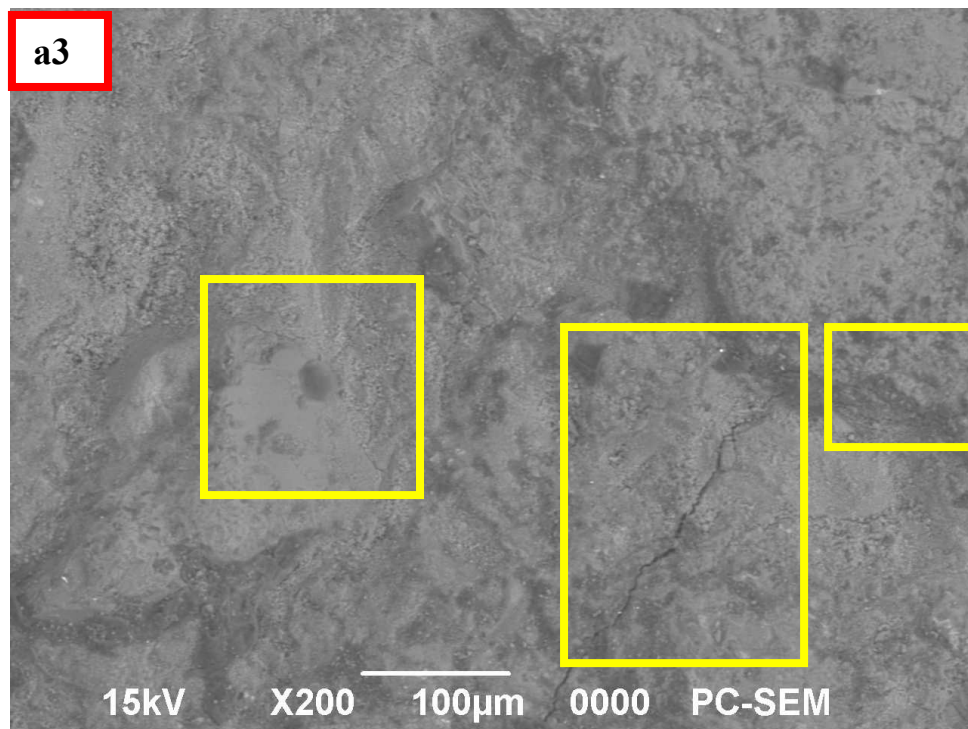


*Une microfissure sépare le mortier du gravier pour le béton ordinaire.*

*La présence d'une porosité fermée.*



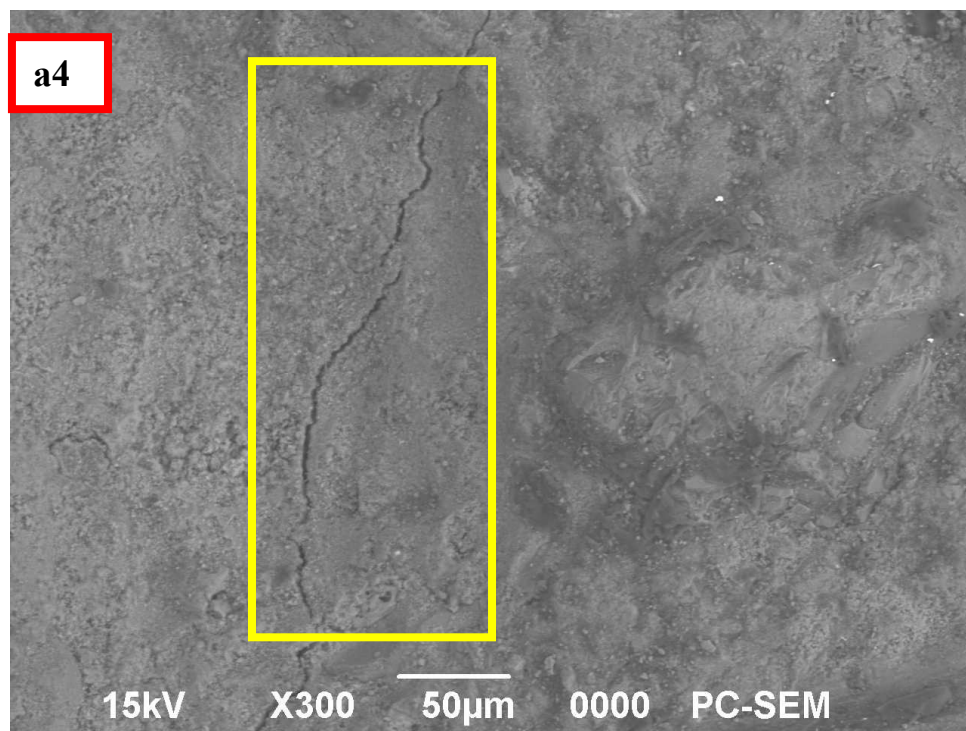
*La présence de la portlandite dans la porosité fermée.*



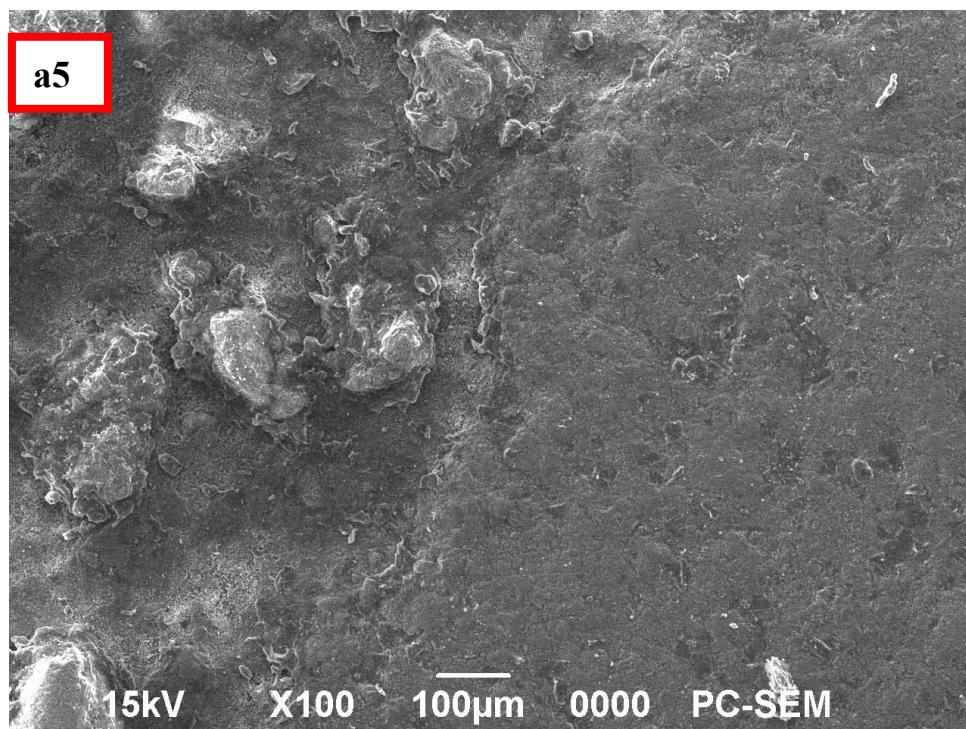
*Une microfissure sépare le mortier du gravier pour le béton ordinaire.*

*La fissuration amorcée au sein du mortier.*



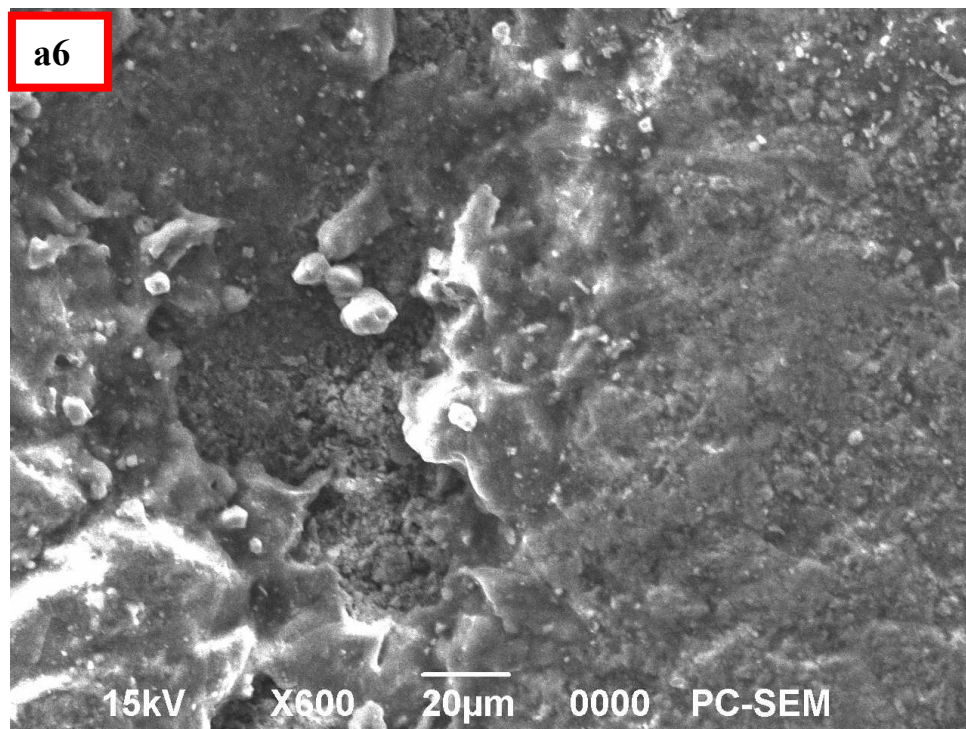


*La fissuration amorcée au sein du mortier.*

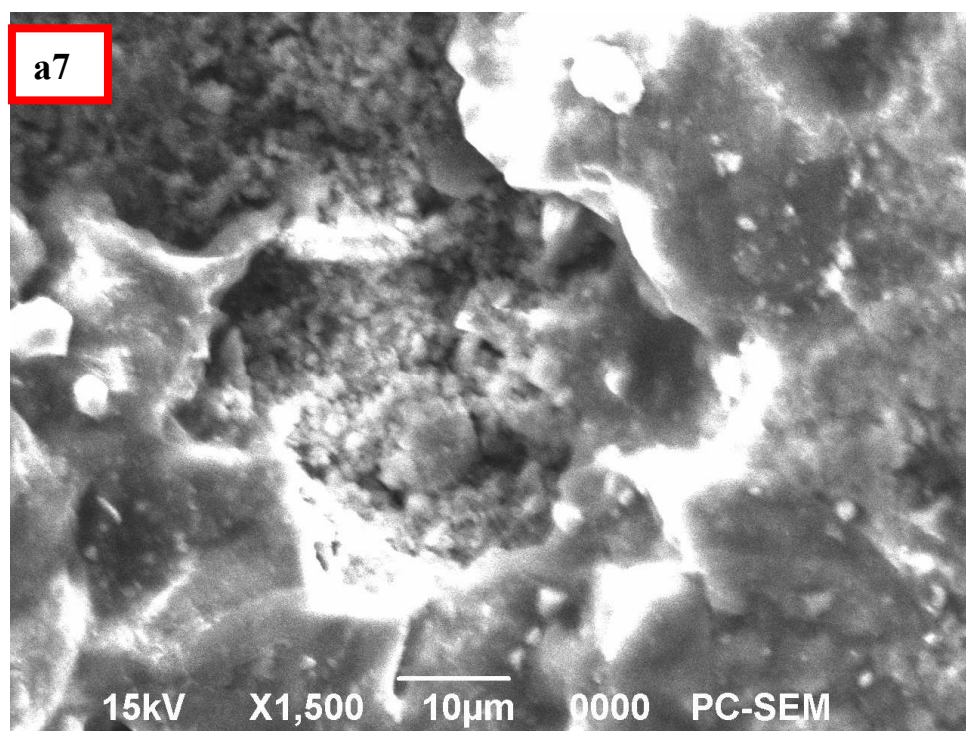


*Le degré de décollement à l'interface pour le béton ordinaire est toujours plus marqué.*

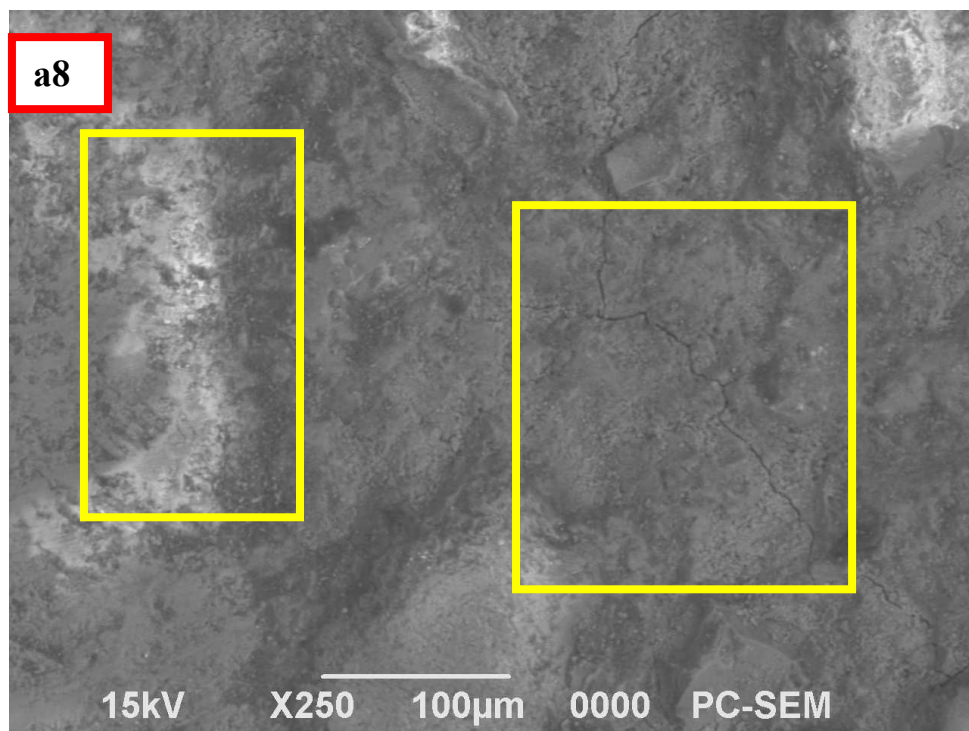
*La présence de la portlandite à l'interface mortier/gravier.*



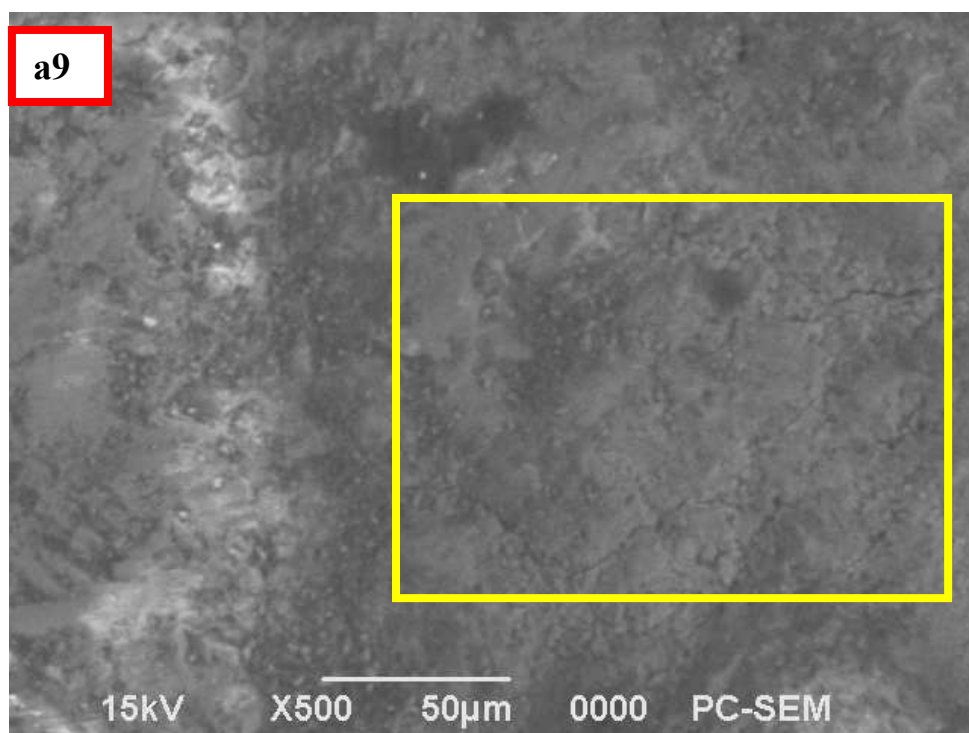
*Le degré de décollement à l'interface pour le béton ordinaire est toujours plus marqué.*



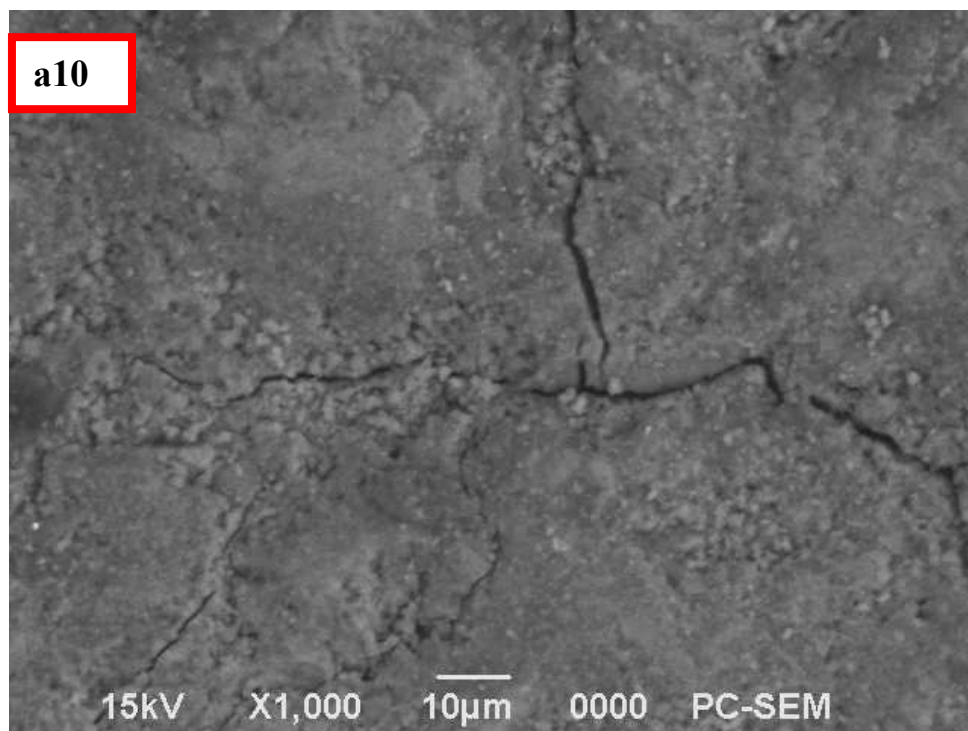
*Le degré de décollement à l'interface pour le béton ordinaire est toujours plus marqué.*



*La fissuration amorcée au sein du mortier.  
La portlandite cristallise à la surface des graviers.*

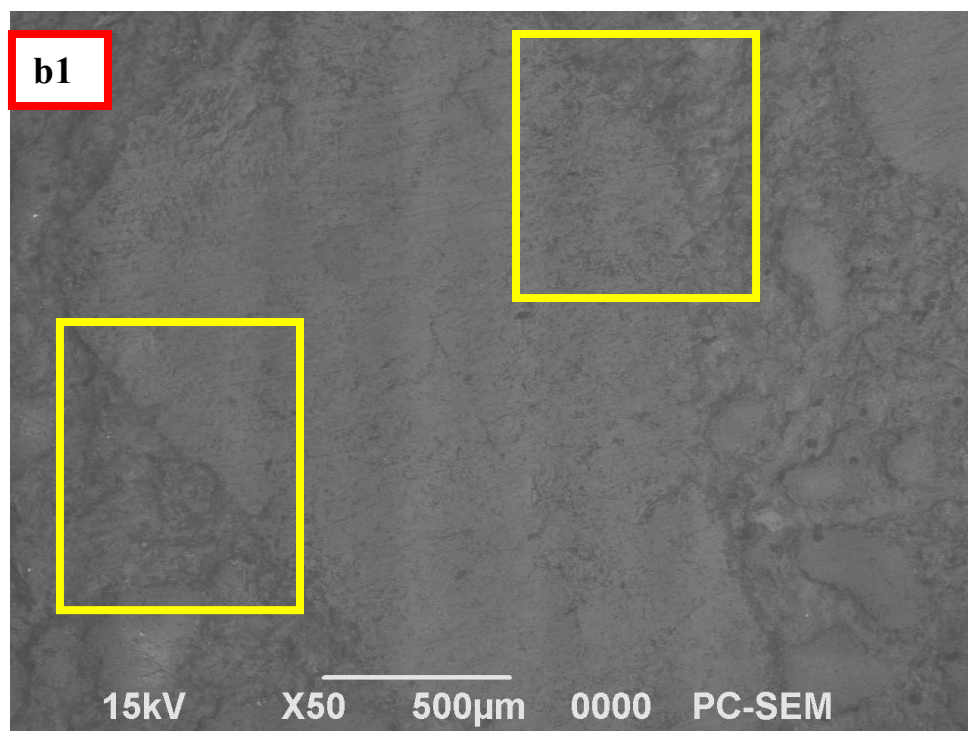


*La fissuration amorcée au sein du mortier.  
La portlandite cristallise à la surface des graviers.*

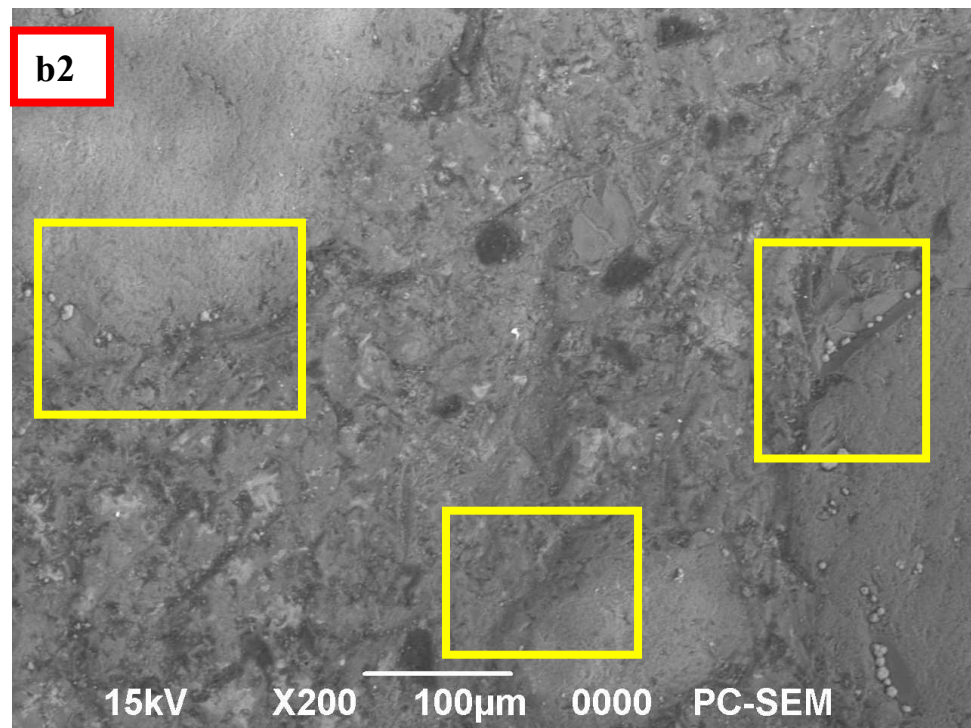


*La fissuration amorcée au sein du mortier.*

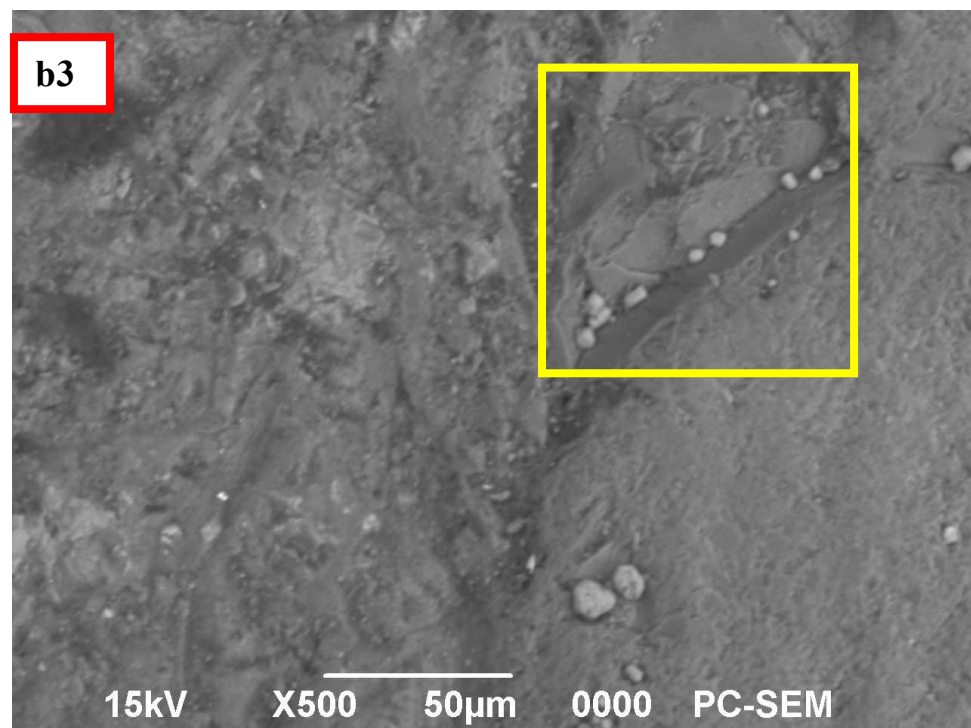
*a. Béton ordinaire BO à base de CPA*



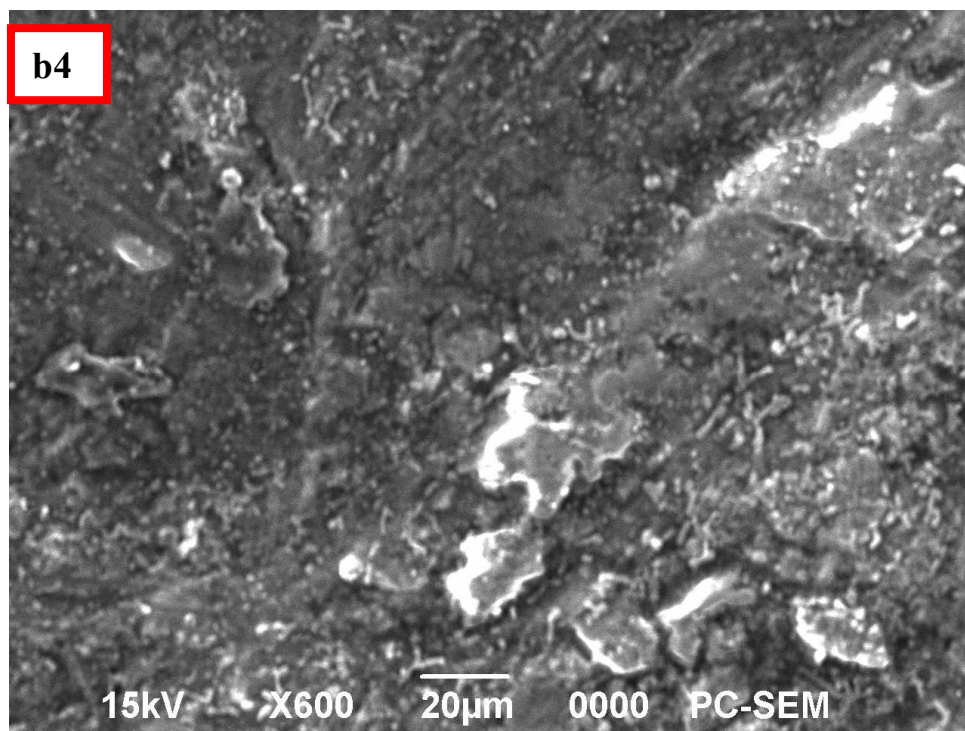
*La zone de transition interfaciale est presque inexistante pour le béton B10.*



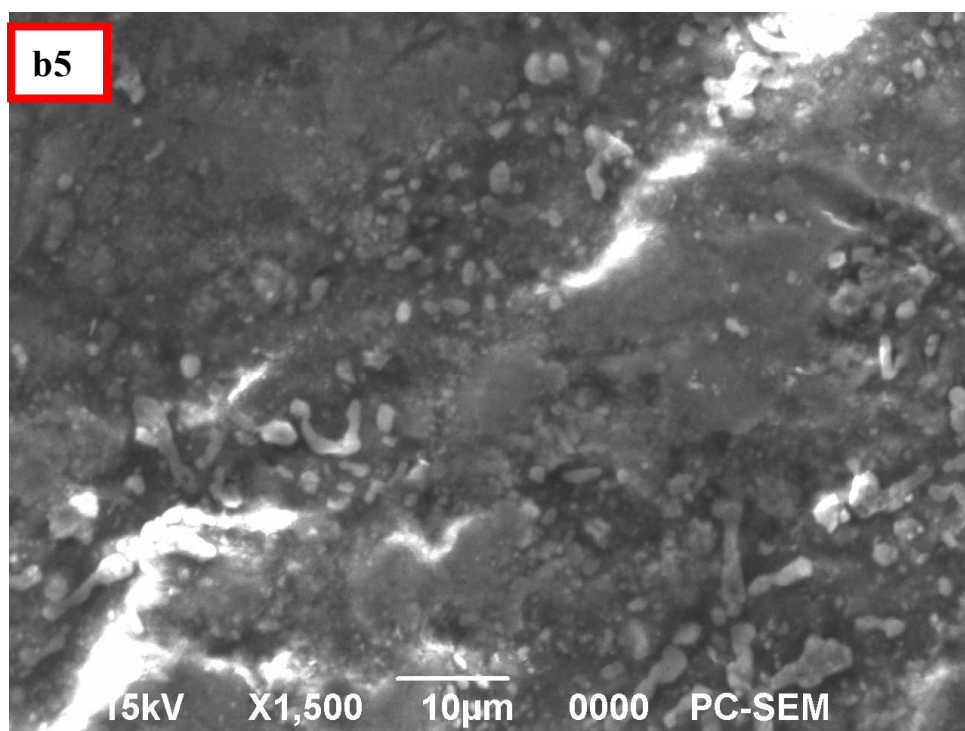
*La réaction pouzzolanique permet d'augmenter la résistance à l'interface mortier/gravier. En effet, la portlandite cristallise à la surface des graviers, la réaction avec le Sd permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type C-S-H II semi-cristallisé de deuxième génération bien liés aux graviers.*



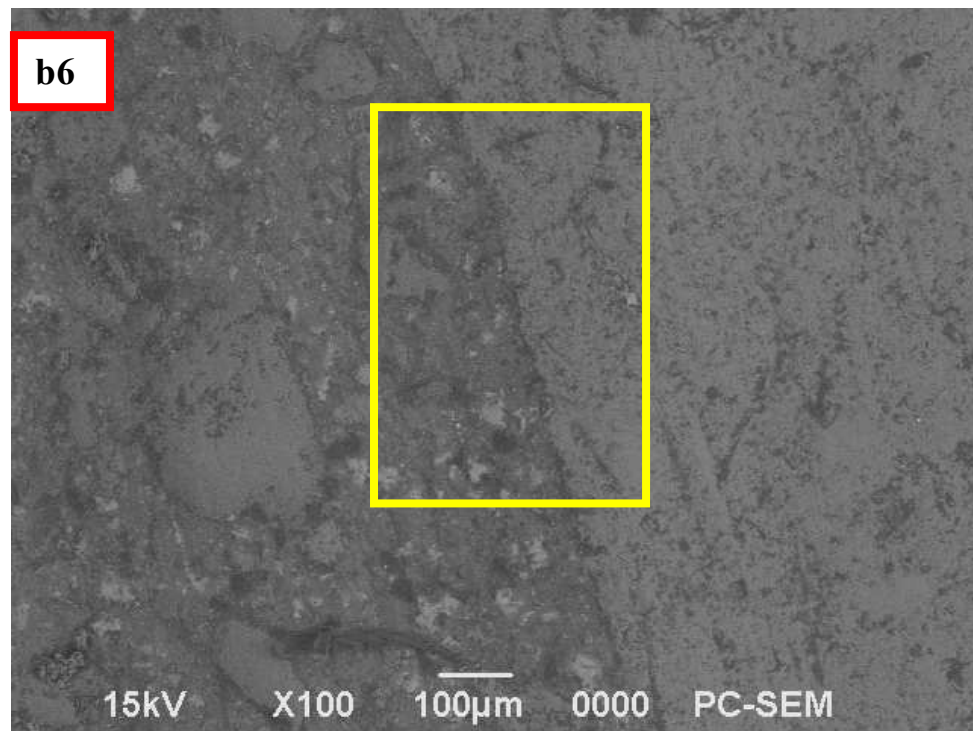
*Une microstructure relativement améliorée dans le béton B10 a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées.*



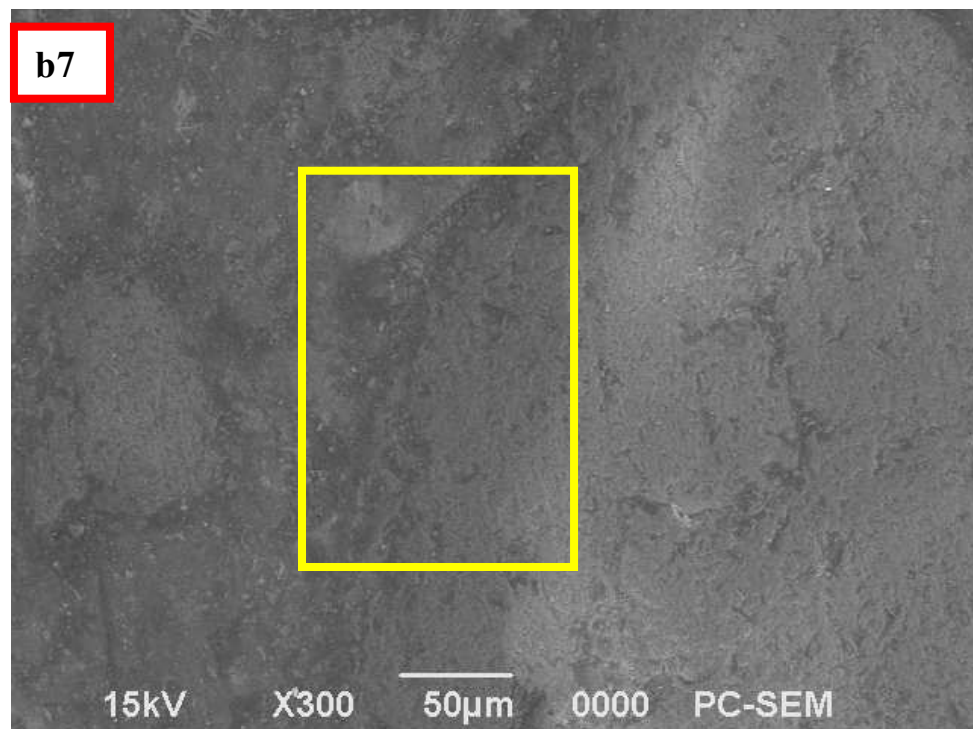
*La microfissure est littéralement freinée à l'interface mortier/gravier par la présence de Sd*



*La microfissure est littéralement freinée à l'interface mortier/gravier par la présence de Sd*



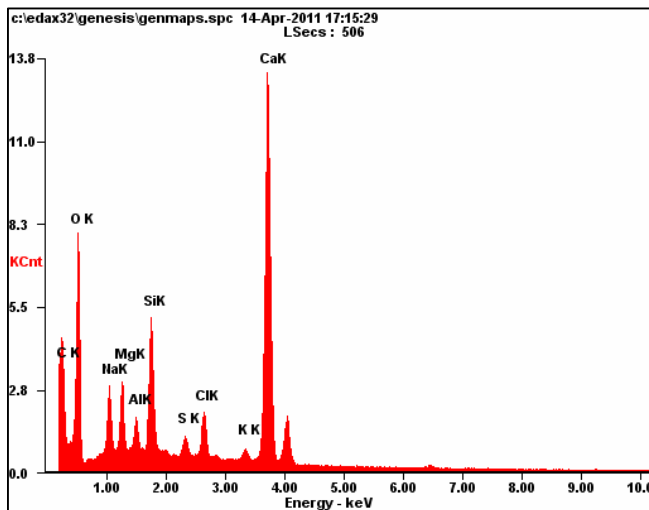
*Une microstructure relativement améliorée dans le béton B10 a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées.*



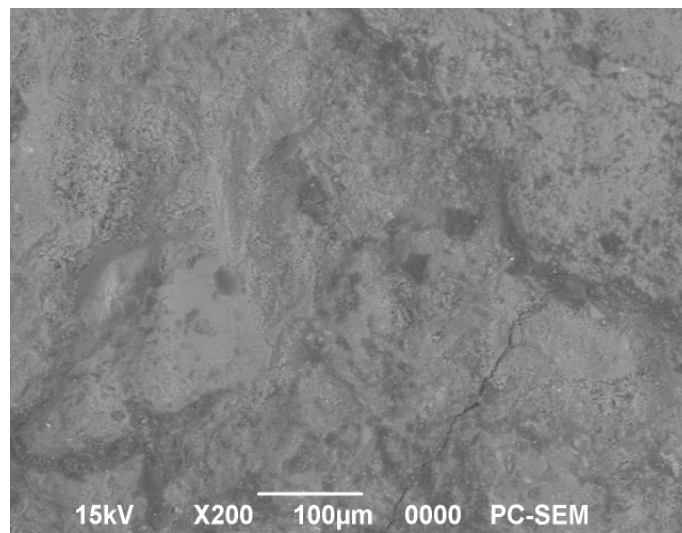
*La zone de transition interfaciale est presque inexistante pour le béton B10.*

*b. Béton B10 à base de CPA + 10% Sd*

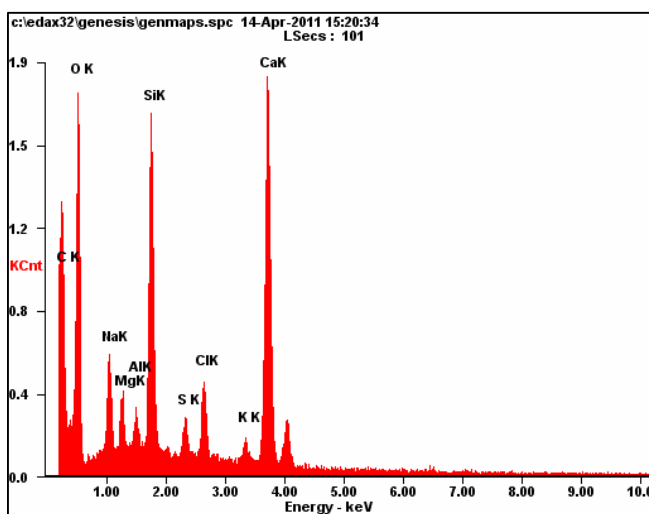
**Figure V.18** : Observation au MEB de la zone de transition interfaciale



<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>C</i>	10.04	20.83
<i>O</i>	20.03	31.19
<i>Na</i>	02.61	02.82
<i>Mg</i>	02.47	02.53
<i>Al</i>	01.27	01.17
<i>Si</i>	05.55	04.92
<i>S</i>	01.15	00.89
<i>Cl</i>	03.33	02.34
<i>K</i>	01.39	00.89
<i>Ca</i>	52.16	32.41

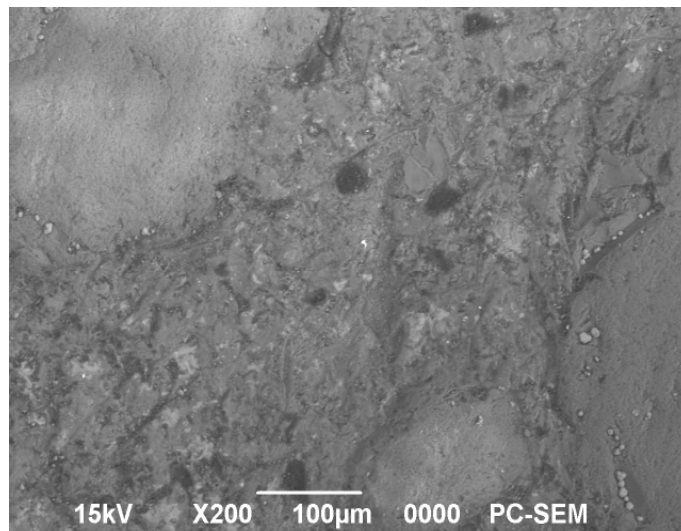


a. Béton ordinaire BO à base de CPA



<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>C</i>	17.29	31.69
<i>O</i>	21.91	30.14
<i>Na</i>	02.72	02.61
<i>Mg</i>	01.27	01.15
<i>Al</i>	01.13	00.92
<i>Si</i>	10.17	07.97
<i>S</i>	01.53	01.05
<i>Cl</i>	04.15	02.58
<i>K</i>	01.93	01.08
<i>Ca</i>	37.90	20.81





*b. Béton B10 à base de CPA + 10% Sd*

**Figure V.19 :** Microanalyse élémentaire par spectrométrie X

### ***Interprétation et discussion***

Les observations au microscope électronique à balayage et la microanalyse élémentaire par spectrométrie X ont permis de mettre en évidence les points suivants:

Les figures V.18a et V.18b représentent respectivement l'observation au MEB du point de contact mortier/gravier des bétons BO et B10. On peut voir que, la zone de transition interfaciale est presque inexistante pour le béton B10 (figures V.18b), le mortier est en contact direct avec le gravier. Inversement, une microfissure sépare le mortier du gravier pour le béton ordinaire (figures V.18a1 et a3) et la fissuration amorcée au sein du mortier (figures V.18a3, a4 et a8 - a10).

La microstructure des bétons se différencie essentiellement au niveau du degré de décollement à l'interface mortier/gravier. On constate que le degré de décollement à l'interface pour le béton ordinaire est toujours plus marqué que celui qui prévaut dans le cas de béton B10 (figures V.18a6 et a7).

Pour le béton B10, la microfissure est littéralement freinée à l'interface mortier/gravier par la présence de Sd (figures V.18b).

La réaction pouzzolanique permet d'augmenter la résistance à l'interface mortier/gravier. En effet, la portlandite cristallise à la surface des graviers, la réaction avec le Sd permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type C-S-H II semi-cristallisé de deuxième génération bien liés aux graviers. Ce qui est en accord avec [46, 53, 71, 104, 105 et 175].

Le cliché obtenu pour (figure V.18a1) est le plus intéressant car il met en évidence la présence d'une porosité fermée.

La présence de la portlandite CH dans la porosité fermée du mortier (figure V.18a2) et à l'interface mortier/gravier (figure V.18a5, a8 et a9).

Une bonne cohésion apparente entre le mortier et le gravier est constaté sur l'ensemble des photos (figures V.18b). Une microstructure relativement améliorée dans le béton B10 a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées.

La microanalyse élémentaire par spectrométrie X (figures V.19a et V.19b) montre que le rapport (CaO/SiO<sub>2</sub>) plus faible dans le cas du béton B10 de l'ordre de (1.11) par rapport à celui du béton ordinaire de l'ordre de (1.58). Selon (*Baron et Ollivier ; Carles-Gibergues et al ; Taylor*) [18, 53 et 176], cette diminution du rapport (CaO/SiO<sub>2</sub>) traduit parfaitement la fixation de la portlandite par le sable de dune finement broyé (réaction pouzzolanique).

Dans le même sens, le diagramme de *Verbeck et Copeland* cité par [163] des phases des produits d'hydratation des silicates montre les différentes phases de C-S-H formées sous un traitement thermique en fonction du rapport (CaO/SiO<sub>2</sub>) noté C/S (figure V.20).

A 20°C, le rapport C/S du ciment anhydre correspond à une valeur de 2,7 (point A) qui diminue à 1,75 (point B) durant l'hydratation et la formation des C-S-H. Si l'on ajoute de la fumée de silice, et grâce à la réaction pouzzolanique, on passe d'un rapport C/S de 1,75 à 1,25 (point C).

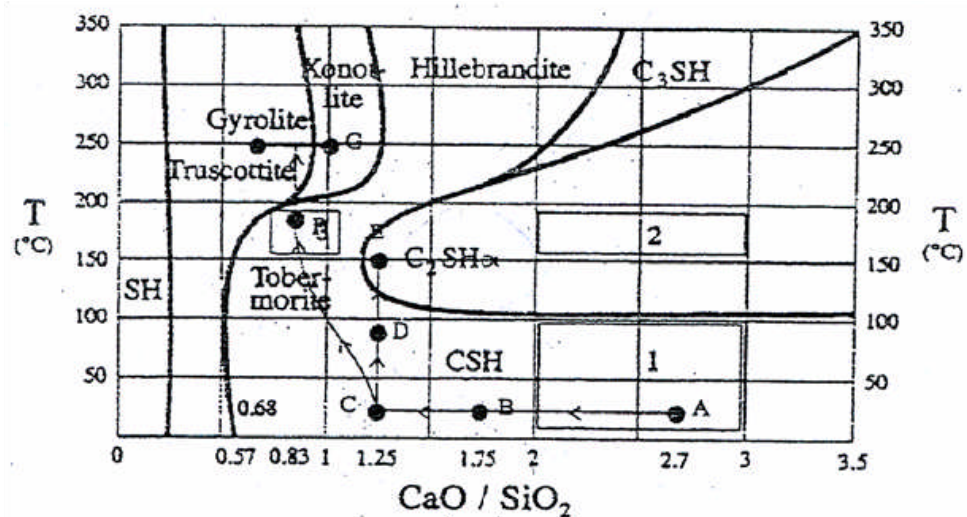


Figure V.20 : Diagramme de phase des C-S-H de Verbeck et Copeland cité par [163]

C'est essentiellement le type du ciment qui détermine le niveau de la perméabilité à l'eau du béton, le type du ciment détermine le degré de microfissures à l'interface mortier/gravier, principal responsable de la percolation d'eau à travers le béton, la présence de ces microfissures facilite le parcours d'eau à travers le réseau des pores capillaires les plus grossiers.

## CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence du sable de dune finement broyé sur le comportement du béton et de préciser un certain nombre de points:

- À 28 jours, la porosité du béton B10 est inférieure à celle des autres bétons, ce qui est expliqué du fait d'une meilleure hydratation entre les composants du ciment et l'addition du sable de dune broyé. Ce qui est en accord avec [25, 50, 85, 150 et 182], en plus par la bonne qualité de l'interface mortier/gravier. À 180 jours, l'addition de 10% Sd a provoqué une réduction de l'ordre de 32% de la porosité par rapport à celle du béton ordinaire.
- La présence du sable de dune finement broyé accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur sur l'hydratation, combiné à l'effet de remplissage dû à leur finesse et l'effet pouzzolanique, peut conduire à de meilleures résistances mécaniques des bétons. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par [1, 2, 3, 4, 26, 29, 45, 46, 55, 71, 112, 143 et 182].
- La résistance à la compression, montre que le béton B10 est clairement supérieur aux bétons BO et B20. Ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton.
- Un autre avantage est qu'il permet au béton de poursuivre l'amélioration de ses performances mécaniques même après la période de 28 jours. Ce qui est en accord avec [3, 4, 112 et 143]. L'effet du sable de dune finement broyé sur la résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. On a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression.
- Les résistances en compression des bétons sont inversement proportionnelles à la porosité volumique. Ce qui est en accord avec [13, 15, 16, 86, 109, 132, 118 et 157]. La contribution du sable de dune finement broyé à l'amélioration de la résistance en compression est beaucoup plus significative que celle sur le remplissage de la porosité. Le sable de dune finement broyé influe sur cette contribution qui semble être le résultat d'un effet structurant améliorant la solidité mécanique des liaisons mortier/gravier que le résultat d'un effet quantitatif sur le volume des produits hydratés formés.

- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées des bétons revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle  $\eta = 0.1-0.6$ , ce qui indique un comportement élastique linéaire.
- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées des bétons est curviligne dans l'intervalle  $\eta = 0.6-0.9$ , ce qui signale le développement dans les bétons de déformations irréversibles, où le comportement devient non-linéaire.
- Les valeurs les plus basses de la déformation relative totale sont propres au béton B10, dont macrostructure est très compacte.
- Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative: au fur et à mesure que la contrainte relative augmente, le module de déformabilité du béton B10 reste supérieur à celui des bétons BO et B20.
- Le module d'élasticité du béton B10 est supérieur à celui des bétons BO et B20.
- À 28 jours, le béton B10 à base de ciment CPA + 10% Sd est moins perméable que les autres bétons. Cet effet s'explique par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l'hydratation de ciment prémélangé au sable de dune finement broyé. Ce qui est en accord avec [25, 50, 85, 150 et 182].
- À 180 jours, l'addition de 10% Sd a réduit la perméabilité à l'eau de l'ordre de 35.5% par rapport au béton ordinaire. L'augmentation considérable de la durabilité à travers la perméabilité à l'eau du béton à base d'un ciment prémélangé au sable de dune finement broyé par rapport au béton ordinaire s'explique par une plus fine répartition des pores, mais la réduction de la perméabilité à l'eau peut également être due à une meilleure liaison mortier/gravier.
- La résistance en compression se manifeste d'une façon générale avec le sens inverse de la perméabilité à l'eau et de la porosité c'est-à-dire l'augmentation de la résistance en compression entraîne une diminution de la perméabilité à l'eau et de la porosité du béton. Ce qui est en accord avec [13, 15, 16, 86, 109, 132, 118 et 157].
- À la température ambiante (à 133 jours), l'addition de 10% Sd a réduit la perméabilité à l'eau de l'ordre de 28.5% par rapport au béton ordinaire, et de l'ordre de 48.5% à 171 jours avec une séquence de dessiccation progressive.
- Mettre en évidence une augmentation continue de la perméabilité. Ceci montre qu'une microfissuration grave a été générée et qu'un réseau de microfissures interconnectées a été engendré, provoquée par la dilatation thermique différentielle de mortier et de gravier.

- La microfissuration s'accompagne d'un élargissement des pores. Nous pouvons admettre que l'augmentation de la perméabilité est probablement liée à un élargissement des pores par dilatation. Cela signifie de plus que la distribution de la taille des pores est également modifiée sous température entre (27 et 105°C), l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évacuent des bétons.
- La zone de transition interfaciale est presque inexistante pour le béton B10, le mortier est en contact direct avec le gravier. Inversement, une microfissure sépare le mortier du gravier pour le béton ordinaire et la fissuration amorcée au sein du mortier.
- La microstructure des bétons se différencie essentiellement au niveau du degré de décollement à l'interface mortier/gravier. On constate que le degré de décollement à l'interface pour le béton ordinaire est toujours plus marqué que celui qui prévaut dans le cas de béton B10.
- Pour le béton B10, la microfissure est littéralement freinée à l'interface mortier/gravier par la présence de Sd. La réaction pouzzolanique permet d'augmenter la résistance à l'interface mortier/gravier. En effet, la portlandite cristallise à la surface des graviers, la réaction avec le Sd permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type C-S-H II semi-cristallisé de deuxième génération bien liés aux graviers. Ce qui est en accord avec [46, 53, 71, 104, 105 et 175].
- Le rapport (CaO/SiO<sub>2</sub>) plus faible dans le cas du béton B10 de l'ordre de (1.11) par rapport à celui du béton ordinaire de l'ordre de (1.58). Selon (**Baron et Ollivier ; Carles-Gibergues et al ; Taylor**) [18, 53 et 176], cette diminution du rapport (CaO/SiO<sub>2</sub>) traduit parfaitement la fixation de la portlandite par le sable de dune finement broyé (réaction pouzzolanique).
- C'est essentiellement le type du ciment qui détermine le niveau de la perméabilité à l'eau du béton, le type du ciment détermine le degré de microfissures à l'interface mortier/gravier, principal responsable de la percolation d'eau à travers le béton, la présence de ces microfissures facilite le parcours d'eau à travers le réseau des pores capillaires les plus grossiers.

## CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES

### CONCLUSION GÉNÉRALE

**A** la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du ciment prémélangé au sable de dune finement broyé est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , améliorer les propriétés physico-mécaniques, la déformabilité et la durabilité du béton sans augmentation notable des coûts. (Surtout à l'échelle industrielle).

De ce fait, participer à l'obtention d'ouvrages en béton de plus longue durée de vie, et d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles de notre pays, la consommation du ciment et par conséquent du béton, augmente avec l'augmentation de la population et consomme de plus en plus d'énergie.

Le développement de nouveaux matériaux de construction est une question d'actualité, que les chercheurs tentent de trouver des matériaux adaptés à chaque région. Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment combinée à l'effet physique, tandis que celles à moyen et surtout à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement de la chaux CH provenant de l'hydratation du ciment par du silicate de calcium hydraté C-S-H II semi-cristallisé de deuxième génération. Par transformation des gros cristaux de chaux en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).
- Le sable de dune finement broyé joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10%. Au-delà d'une teneur de 20%, l'effet de dilution devient prépondérant et conduit à des résistances à la compression plus faibles qu'avec le ciment de référence CPA.
- Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle. Ce qui est en accord avec [1, 29 et 55].
- Le ciment prémélangé au sable de dune finement broyé présente une meilleure résistance aux chlorures et aux sulfates, cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité, et à une diminution de la quantité de CH, ainsi qu'à la formation additionnelle des hydrates de C-S-H. Ce qui est en accord avec [11 et 120].

- La résistance en compression se manifeste d'une façon générale avec le sens inverse de la perméabilité à l'eau et de la porosité c'est-à-dire l'augmentation de la résistance en compression entraîne une diminution de la perméabilité à l'eau et de la porosité du béton. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par [13, 15, 16, 86, 109, 132, 118 et 157].
- L'utilisation du sable de dune finement broyé améliore globalement la structure poreuse du béton et contribue aussi à la densification de l'interface mortier/gravier. De ce fait, le sable de dune finement broyé modifie les caractéristiques de rupture (déformabilité), ce qui permet une nette augmentation de la durabilité du béton. Ces résultats justifient bien l'intérêt que présente la valorisation du sable de dune.

## PERSPECTIVES

**L**e monde autour de nous change à vitesse **V** majuscule, comme les matériaux que nous utilisons et la technologie mise en œuvre pour les produire. Les progrès suscitent de nouveaux besoins et imposent de nouvelles exigences. Les propriétaires d'aujourd'hui demandent des structures qui nécessitent un minimum d'entretien pour une durée de vie plus longue avec une économie sur le plan des coûts.

Les propriétés du ciment prémélangé au sable de dune finement broyé s'améliorent avec la technologie et nous comprenons mieux comment les utiliser rentablement dans les bétons, en améliorant les caractéristiques structurales et pousse la performance de la durabilité des bétons encore plus loin pour contribuer à protéger l'environnement. C'est une situation où tout le monde gagne.

### ***Pour compléter ce travail nous recommandons de:***

- Voir la possibilité d'améliorer la réactivité pouzzolanique du sable de dune, par un broyage poussé au point d'atteindre des surfaces spécifiques supérieures.
- Faire des analyses au microscope électronique à balayage pour déterminer la morphologie des hydrates formés.
- Étudier l'interaction ciment prémélangé au sable de dune finement broyé/superplastifiant.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **ARROUDJ K.**, «*Influence des ajouts sur la prise et le durcissement des bétons*». Magister, USTHB, Alger, 2001.
2. **ARROUDJ K. et OUDJIT M.N.**, «*Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments*». 2<sup>ème</sup> Colloque Maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie les 10 et 11 Décembre, 119-127, 2002.
3. **ARROUDJ K., OUDJIT M.N., LANEZ M. et CARAYON M.T.**, «*Influence des ajouts siliceux sur la compacité des mortiers et bétons*». Séminaire CETEDUB I. 24, 25, 26 Mai à L'USTHB, 291-298, 2004 a.
4. **ARROUDJ K., OUDJIT M.N., LANEZ M. et CARAYON M.T.**, «*Mise en évidence par diffractométrie aux rayons X des C-S-H de seconde génération*». 1<sup>ère</sup> séminaire sur les technologies du béton, le béton, perfection et incertitudes, 18-19 Septembre - Hôtel Hilton Alger, 1-8, 2004 b.
5. **AÏTCIN P.C.**, «*Bétons, Hautes Performances*». Édition EYROLLS, Paris, 2001, 683.
6. **AREZKI TAGNIT- HAMOU.**, Cours 2003 (chapitre 7). «*Ajout dans le ciment*». Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
7. **ALEXANDER M. G.**, «*Two experimental techniques for studying the effects of the interfacial zone between cement paste and rock*». Cement and Concrete Research, vol.23(3), p.567-575, 1993.
8. **AFPC-AFREM.**, Compte rendu des journées techniques du 11 et 12 Décembre 1997, «*Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*». Toulouse, 238.
9. **APPA RAO G.**, «*Development of strength with age of mortars containing silica fume*». Cement and Concrete Research, vol.31(81), p.1141-1146, 2001.
10. **AKLI A.**, «*Intégration des préoccupations environnementales dans de développement industriel*». La revue de l'environnement symbiose, n°8, pp.15-18, 2000.
11. **ALI A., AMINE A.M., SHARARA A.M. and EL-DIDAMONY H.**, «*The behaviour of different cement pastes in various sulphate solutions* ». Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol.1, pp. 169-172, 1994.
12. **AKÇAOĞLU T., MUSTAFA T. and TAHIR Ç.**, «*Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete*». Cement and Concrete Research, vol.35(2), p.358-363, 2005.
13. **BESSA A.**, «*Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers*». Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2004.
14. **BESSA A.**, «*Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers*». XXI<sup>èmes</sup> rencontres universitaires de génie civil - Prix «Rene Houpert», Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac, 95031 Cergy-Pontoise cedex, 2003, 39-48.
15. **BESSA A., BIGAS J.P. et GALLIAS J.L.**, «*Evaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers*». Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise cedex. XXII<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil 2004 - VILLE & GENIE CIVIL. 1-8.
16. **BESSA A., BIGAS J.P. et GALLIAS J.L.**, «*Influence des additions minérales naturelles et industrielles sur les principaux paramètres de formulation des mortiers*», AUGC, Rochelle. 2003.
17. **BARON J. et OLLIVIER J.P.**, «*Les bétons, bases et données pour leur formulation*». Editions Eyrolles, 1997, 522.
18. **BARON J. et OLLIVIER J.P.**, «*La durabilité des bétons*». Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.



19. **BARON J.**, Introduction à la durabilité des bétons, in «*La durabilité des bétons*». J. Baron et J.P. Ollivier éditeurs; Editions Eyrolles, Paris, 1997.
20. **BARON J.**, «*Comportement du béton hydraulique: Fissuration et Fragilité*». Rapport de recherche LPC N°69, Octobre 1997.
21. **BARON J. et SAUTREY R.**, «*Le béton Hydraulique: connaissance et pratique*». Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1995.
22. **BENEZET J.C. and BENHASSAINE A.**, «*The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder*». Powder Technology, vol.103(1), p.26-29, 1999.
23. **BENEZET J.C.**, «*Réactivité pouzzolanique dans la système quartz-oxyde de calcium-eau*». Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 1997.
24. **BENEZET J.C. et BENHASSAINE A.**, «*Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz*». Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 219, janvier-février 1999, pp.17-28.
25. **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.
26. **BUIL M.**, «*Comportement physico-chimique du système ciment-fumées de silice*». Annales de l'ITBTP, Paris 1990, 483, 19-29.
27. **BAROGHEL-BOUNY V.**, «*Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons; méthodes, analyse, interprétations*». Edition du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1994, 468.
28. **BOGUE R.H.**, «*Chemistry of Portland cement*». (New York, Reinhold), 1955, 790.
29. **BOUCHOUKA A.**, «*Etude physico-chimique et mécanique des bétons à hautes performances à base de matériaux locaux*». Magister. ENTP, 2002.
30. **BRETON D., CARLES-GIBERGUES A., BALLIVY G. and GRANDET J.**, «*Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste*». Cement and Concrete Research, vol.23(2), p.335-346, 1993.
31. **BENCHEIK M. et BAALI L.**, «*La perméabilité, la porosité et la résistance d'un béton à base de matériaux locaux comme critères de sa durabilité*». Séminaire International, GEOMAT 02 Université de M'sila, les 10-11 Mars 2003. 1-9.
32. **BLAKEY F.A.**, «*Some considerations of the cracking or fracture of concrete*». Civil engineering and public works review, vol.50, Apr. 1955.
33. **BARNES B.D., DIAMOND S. and DOLCH W.L.**, «*The contact zone between Portland cement paste and glass "aggregate" surfaces*». Cement and Concrete Research, vol.8(2), p.233-244, 1978.
34. **BAJOU L., YOUJUN X. and QIANLIAN Y.**, «*Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete*». Cement and Concrete Research, vol.30(9), p.1489-1493, 2000.
35. **BYFORS K.**, «*Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and PH values in cement paste*». Cement and Concrete Research, vol.17(1), p.115-130, 1987.
36. **BASHEER L., BASHEER P.A.M. and LONG A.E.**, «*Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete*». Construction and Building Materials, vol.19(9), p.682-690, 2005.
37. **BASCOUL A.**, «*State of the art report - Part 2: Mechanical microcracking of concrete*». Materials and Structures, vol.29(2), p.67-78. 1996.
38. **BOUDCHICHA A.**, «*Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons*». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.

39. **CYR M.**, «*Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologiques des matrices*». Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, 1999.
40. **CYR M., LAWRENCE P. and RINGOT E.**, «*Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*». Cement and Concrete Research, vol.36(2), p.264-277, 2006.
41. **CYR M., LAWRENCE P. and RINGOT E.**, «*Mineral admixtures in mortars, quantification of the physical effects of inert materials in relation on short term hydration*». Cement and Concrete Research, vol.35(4), p.719-730, 2005.
42. **CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E. and CARLES-GIBERGUES.**, «*Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales*». Matériaux and Structures, vol.33(7), p.466-472, 2000.
43. **COSTA U., FACOETTI M. and MASSAZA F.**, Dans Proc. Of the Int. RILEM Symp., «*Admixtures for concrete improvement properties*», Édité par ; E. Vazquer, Chapman et Hall, Barcelona, Spain, 392-401, 1990.
44. **COSTA U. and MASSAZA F.**, «*From materials science to construction materials engineering*», Proc. 1<sup>st</sup> Int. Rilem congress, vol. 1 (Versailles, 1987), 159.
45. **CHEIKH-ZOUAOUI M.**, «*Contribution à l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons à hautes résistances*». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008.
46. **CHENG-YI HUANG. and FELDMAN R.F.**, «*Hydration reactions in Portland cement silica fume blends*». Cement and Concrete Research, vol.15(4), p.585-592, 1985.
47. **COURARD L.**, «*Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation*». Thèse de Doctorat, Université de Liège, Liège, 198 p.1999.
48. **COLLINS F. and SANJAYAN J.G.**, «*Effect of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder*». Cement and Concrete Research, vol.29(3), p.459-462, 1999.
49. **CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F. and CHARONNAT Y.**, «*Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique*». LCPC, Ouvrages d'art OA 33, Février 2002.
50. **CRUMPTON C.F. and BUKOVATZ J.E.**, «*Corrosion and Kansas bridges, Transportation Research Record N500*», Washington, D.C, 1974, p.25-31.
51. **CWIRZEN A. and PENTTALA V.**, «*Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frost damage of high-performance concretes*». Cement and Concrete Research, 35(4), p.671-679, 2005.
52. **CHEYREZY M., MARET V. and FROUIN L.**, «*Microstructural analysis of RPC (REACTIVE POWDER CONCRETE)*». Cement and Concrete Research, vol.25(7), p.1491-1500. 1995.
53. **CARLES-GIBERGUES A., GRANDET J. et OLLIVIER J. P.**, «*Evolution dans le temps de l'auréole de transition de pâtes contenant des ajouts*». Laboratoire de Génie Civil I.N.S.A. Colloque international Toulouse France. 17-18-19 novembre, liaisons pâtes de ciment- matériaux associés. R.I.L.E.M. 1982.
54. **DREUX G. et FESTA J.**, «*Nouveau guide du béton et de ses constituants*», 8<sup>ème</sup> édition, Édition Eyrolles, 1998. p.409.
55. **DE LARRARD F.**, «*Formulation et propriétés des bétons à très hauts performances*». Rapport de Recherche L.P.C n°149. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars 1988.
56. **DARCY H.**, «*Fontaine publiques de la ville de Dijon*». Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, 1865.

57. **DAMIDOT D., NONAT A., BARRET P., BERTRANDIE D., ZANNI H. and RASSEM R.**, «*C<sub>3</sub>S hydration in diluted and stirred suspensions, 3. NMR study of C-S-H precipitated during the two kinetic steps*». *Advances in cement Research*, vol.7(25), p.1-8, 1995.
58. **DIAMOND S.**, «*The Microstructure of Cement Paste in Concrete*». *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Cong. On the Chem. Of Cement*, pp.122- 147, Rio de Janeiro 1986.
59. **DENIS TREMBLAY.**, «*Béton de ciment, modulo éditeur*», Mont Réal, Québec, Canada, 1983.
60. **DEMIRBOGA R.**, «*Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar*». *Energy and Buildings*, vol.35(2), p.189-192, 2003.
61. **DULLIEN F.A.L. and POROUS MEDIA.**, «*Fluid transport and pore structure*», Academic Press. 1979.
62. **DIAMOND S. and HUANG J.**, «*The ITZ in concrete-a different view based on image analysis and SEM observations*». *Cement and Concrete Composites*, vol.23(2-3), p.179-188, 2001.
63. **ELKEM MICROSILICA FOR SUPERIOR CONCRETE.** «*How to improve strength and durability of concret*», P.O.Box 8126 Vaagsbygd, N-4602 Kristian Sand S .NORWAY.
64. **FARRAN J., cité par J.C. MASO.**, 7<sup>th</sup> Int. Cong. On the Chem. Of Cement, 3-15, 1980.
65. **FU Y. and BEAUDOIN J.J.**, «*Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems*». *Cement and Concrete Research*, vol.26(10), p.1493-1498,1996.
66. **FELEKOGLU B., TOSUN K., BARADAN B., ALTUN A. and UYULGAN B.**, «*The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars*». *Cement and Concrete Research*, vol.36(9), p.1719-1726, 2006.
67. **FARRAN J.**, «*Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydrates des ciments et les matériaux enrobés*». *Revue des Matériaux de Constructions*, 490(91), p.155-172, 1956.
68. **GAGNÉ R.**, GCI 714, «*Durabilité et réparations du béton*». Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Québec, 2000, 338 p.
69. **GAGNÉ and AİTCIN P.C.**, «*Superplasticizers for durable concrète, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton*», Monterrey, Octobre, Mexique, p.200-217, 1993.
70. **GRZESZCZYK S. and LIPOWSKI G.**, «*Effect of content and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes*». *Cement and Concrete Research*, vol.27(6), p.907-916, 1997.
71. **GOLDMAN A. and BENTUR A.**, «*Bond effects in high silica-fume*». *ACI Journal of Materials*, vol.86, 440, 1989.
72. **GABRYSIAK F.**, Cours (chapitre 4). «*Matériaux - Les bétons*».
73. **GROUPE D'EXPERTS SCIENTIFIQUES DE L'OCDE.**, «*Durabilité des ponts routiers en béton, Organisation de Coopération et de Développement Economique*», Paris, 1989.
74. **GAO J.M., QIAN C.X., LIU H.F., WANG B. and LI L.**, «*ITZ microstructure of concrete containing GGBS*». *Cement and Concrete Research*, vol.35(7), p.1299-1304, 2005.
75. **GOLDMAN A. and BENTUR A.**, «*The influence of microfillers on enhancement of concrete strength*». *Cement and Concrete Research*, vol.23(4), p.962-972, 1993.
76. **GUINEA G.V., EL-SAYED K., ROCCO C.G., ELICES M. and PLANAS J.**, «*The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete*». *Cement and Concrete Research*, vol.32(12), p.1961-1970, 2002.
77. **GALLÉ, C.**, «*Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vaccum-, and freeze-drying*». *Cement and concrete Research*, vol.31(10), p.1467-1477. 2001.

78. **HERMANN K.**, «*Perméabilité au gaz des bétons*». Bulletin du ciment, November 2000.
79. **HERMANN K.**, «*Les ajouts: Les fumées de silice*», Bruxelles, n°7/Juillet 1995.
80. **HEARN N. and LOK G.**, «*Measurement of permeability under uniaxial compression-a test method*». ACI Materials Journal, vol.95, p.691-694, 1998.
81. **HASSAN K.E., GABRERA J.G. and MALIEHE R.S.**, «*The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete*». Cement and Concrete Research, vol.22(4), p.267-371, 2000.
82. **HOSHINO M.**, «*Difference of the W/C Ratio, Porosity, and Microscopical Aspect Between the Upper Boundary Paste and the Lower Boundary Paste of the Aggregate in Concrete*». Materials and Structures, vol.21(5), p.336-340, 1988.
83. **HANSEN.**, «*Physical structure of hardened cement paste*». A classical approach, materials and structures. RILEM, vol.19, p.423- 436, 1986.
84. **HANSEN.**, «*Physical composition of hardened Portland cement paste*», ACI Materials Journal, p.404-407, Mai 1970.
85. **HOOTON R.D.**, «*Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to surface attack, freezing and alkali-silica reactivity*». ACI Materials Journal, vol.90, n°2, pp.143-151, 1993.
86. **HARPER E.J. and BONFIELD W.**, «*Tensile characteristics of ten commercial acrylic bone cements*». Journal of Biomedical Materials Research, vol. 53(5), p.605-616, 2000.
87. **HSU T.T.C., SLATE F.O., STURMAN G.M. and WINTER G.**, «*Microcracking of plain concrete and the shape of the stress - strain curve*». ACI Materials Journal, vol.60(2), p.209-224. 1963.
88. **HARSH S., SHEN Z. and DARWIN D.**, «*Strain-rate sensitive behavior of cement paste and mortar in compression*». ACI Materials Journal, vol.87, N°5, p.508-516. 1990.
89. **JACOBSEN S., MARCHAND J. and GÉRARD B.**, «*Concrete crack I: Durability and self healing*». Proceedings of Concrete Under Severe Conditions 2 Environment and Loading, O.E. Gjørv, K. Sakai and N. Banthia Editors, E&FN Spon, Tromso, pp.217-231, June, 1998.
90. **JIA W.**, «*Mechanism of orientation of Ca(OH)<sub>2</sub> crystals in interface layer between paste and aggregate in systems containing silica fume*». Materials Research Society. Symp. Proc., vol.114, p. 127-132, 1988.
91. **JOOSS M. and REINHARD H.W.**, «*Permeability and diffusivity of concrete as fonction of temperature*». Cement and Concrete Research vol.32(9), p.1497-1504, 2002.
92. **JIANG S. et VAN DAMME H.**, «*Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C<sub>3</sub>S*». Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, 1996.
93. **KARA Ali R.**, «*Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires*». Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2002.
94. **KARA Ali R. et GALLIAS J.L.**, «*Une approche méthodologique des problèmes de formulation des bétons avec additions minérales fines et ultra fines*». 16<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil - Les ouvrages dans leur environnement, Remis, 28-29 avril 1998. Actes édités par l'association universitaire du génie civil, vol.1, p.106-113, 1998.
95. **KRONLOF A.**, «*Effect of very fine aggregate on concrete strength*». Materials and Structures, vol.27(1), p.15-25, 1994.
96. **KWAN A.K.H.**, «*Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidates concrete*». Canadian Journal of Civil Engineering, vol.27(4), p.620-627, 2000.
97. **KHAYAT K.**, «*Les ciments*». Béton Canada. Technologie du béton, 1995.

98. **KAPLAN M.F.**, «*Strains and stresses of concrete at initiation of cracking and near failure*». Journal of the American Concrete Institute July 1963, pp. 853-880.
99. **KONECNY L. and FROST.**, «*Leaching of concrete*». Advances in cementitious materials, C T, vol. 16, pp.477-487, 1991.
100. **KJELLENSEN K.O., WALLEVIK O.H. and FJALBERG L.**, «*Microstructure and microchemistry of the paste aggregate interfacial zone of high performance concrete*». Advance in Cement Research, vol.10(1), p.33-40, 1998.
101. **LAWRENCE P., CYR M. and RINGOT E.**, «*Minéral admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration*». Cement and Concrete Research, vol.33(12), p.1939-1947, 2003.
102. **LAWRENCE P.**, «*Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires*». Thèse de Doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.
103. **LAWRENCE P., CYR M. and RINGOT E.**, «*Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength*». Cement and Concrete Research, vol.35(6), p.1092-1105, 2005.
104. **LARBI J.A. and BIJEN J.M.**, «*Orientation of calcinm hydroxyde at the Portland cement paste-aggregate interface in mortars in the presence of silica fume = a contribution*». Cement and Concrete Research, vol.20(3), p.461-470, 1990.
105. **LARBI J.A.**, «*Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete*». Heron, Delft, the Netherlands, 38, 1993.
106. **LEWANDOWSKI R.**, «*Versuchsreihe mit flugasche-einfluss von flugasche-stäuben unterschiedlicher qualität auf die betoneigenen schafften*». Baugewerbe, p.44-49, 1983.
107. **LANGE F., MORTEL N. and RUDERT V.**, «*Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties*». Cement and Concrete Research, vol.27(10), p.1481-1488, 1997.
108. **LILKOV V., DIMITROVA E. and PETROV O.**, «*Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: The first 24 hours*». Cement and Concrete Research, vol.27(4), p.577-592, 1997.
109. **LEWIS G.**, «*Properties of acrylic bone cement: state of the art review*». J. Biomed Mater Res (Appl Biomater), vol.38(2), p.155-182, 1997.
110. **LEGRAND C.**, «*Le béton hydraulique*». Édité par J. BARON et R. SAUTEREY, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, chap. 6, Paris, 1982.
111. **LE CHATELIER H.**, «*Les changements de volume qui accompagne le durcissement des ciments*». Bull. Société de l'encouragement pour l'industrie Nationale, 5<sup>ème</sup> série, tome 5, 1900.
112. **LANEZ M.**, «*Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives*». Magister, USTHB/FGC, Alger. 129, 2005.
113. **LOCHER F.W.**, «*Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack*», Proc.5<sup>th</sup> international symposium on the chemistry of cement, Tokyo. vol. 3, pp. 328-335, 1968.
114. **LIAO K.Y., CHANG P.K., PENG Y.N. and YANG C.C.**, «*A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete*». Cement and Concrete Research, vol.34(6), p.977-989, 2004.
115. **MEZGHICHE B.**, «*Les essais de laboratoire des matériaux de construction*». Publication universitaire Biskra, 120, 2005.
116. **MEZGHICHE B.**, «*Technologie des bétons aux laitiers basiques pour R.A.D.P*». Résumé de thèse de PHD, Kiev, 169, 1989.
117. **MEZGHICHE B.**, «*Résistance et déformabilité de Béton Basique*». Premier séminaire national en génie civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.

118. **MEHTA P.K.**, «*Concrete: Structure, Properties and Materials*». Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J., 1986, 450 p.
119. **MEHTA P.K.**, «*Concrete technology for sustainable development*». Concrete International, vol. 21, n°11, 1999.
120. **MEHTA P.K.**, «*Sulfate resistance of blended cements*». Concrete workshop, Sydney 1988.
121. **MEHTA P.K. and MONTEIRO P.J.M.**, «*Blended and Modified Cements*». State of the Art 1987, Cement Research Progress, American Ceramics Society, 1988.
122. **MASO J.C.**, «*La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydraté*». 7<sup>th</sup> Int. Cong. On the Chem. Of Cement, 3-15, Paris, 1980.
123. **MASO J.C.**, 1969, «*La nature minéralogique des agrégats, facteur essentiel de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel*». Revue des Matériaux de Constructions, 647, 648, et 649, pp. 247, 276 et 321, 330.
124. **MASO J.C.**, 1982, «*La liaison pâte/granat, le béton hydraulique*», Presses l'ENPC, chap. 14, pp.247-259.
125. **MAHMOUD ISMAIL.**, «*Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires)*». Thèse de Doctorat de l'INSA, soutenue le 06 Avril 2006, n° d'ordre: 829, Toulouse cedex 4, 234p.
126. **MORANVILLE-REGOURD M.**, «*Microstructures des bétons à hautes performances*», dans: Les bétons à hautes performances: du matériau à l'ouvrage, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.1992.
127. **MASSAZA F. and COSTA U.**, «*Bond: Paste-Aggregate, Paste-Reinforcement and Paste-Fibres*», Proc. of 8<sup>th</sup> International Conference on the Chemistry of Cement, vol. 1, Rio de Janeiro, pp. 158-180, 1986.
128. **MONTEIRO P.J.M., MASO J.C. and OLLIVIER J.P.**, «*The aggregate-mortar interface*». Cement and Concrete Research, vol.15(6), p.953-958, 1985.
129. **MEMON A.H., RADIN S.S., ZAIN M.F.M. and TROTTIER J.F.**, «*Effect of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater*». Cement and Concrete Research, vol.32(3), p.373-377, 2002.
130. **MOUDILOU E.**, «*Cinétiques et mécaniques de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires*». CTG, Italcementi. Université d'orleans. Thèse d'état, Déc. 2000.
131. **MENÉNDEZ G., BONAVETTI V. and IRASSAR E.F.**, «*Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag*». Cement and Concrete Composites, vol.25 (1), p.61-67, 2003.
132. **MURPHY B.P. and PRENDERGAST P.J.**, «*Quantification of the variability in fatigue life of PMMA bone cement in relation to mixing technique*». 46<sup>th</sup> annual Meeting of Orthopaedics Research Society, March, Orland, Florida, USA, pp.252, 2002.
133. **MONTEIRO P.J.M.**, «*Improvement of the aggregate-cement paste transition zone by grain refinement of hydration products*». 8<sup>th</sup> Int.Cong. On the Chem of Cement, Rio - Brasil, 1986.
134. **MATTE V. and MORANVILLE M.**, «*Durability of Reactive Powder Composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes*». Cement and Concrete Composites, vol. 21(1), p.1-9. 1999.
135. **NEVILLE A.M.**, «*Propriétés des bétons*». Traduction CRIB, Editions Eyrolles, 2000. Paris, 806.
136. **NEVILLE A.M. and BROOKS J.J.**, «*Concrete technology*», Longman scientific and technical, UK, 438, 1987.
137. **NF.**, «*Béton- Essai d'étude, de convenue et de contrôle, confection des éprouvettes*» AFNOR Paris 1981.

138. **NE EN 196-3.**, «*Méthodes d'essais des ciments, partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité*», Août 1995.
139. **NF EN 196-1.**, «*Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: Détermination des résistances mécaniques*». Indice de classement : P15-471. Statut: Norme homologuée. Août 1995.
140. **NONAT A.**, «*Interaction between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) In the case of tricalcium silicate*». *Materials and Structures*, vol.27(168), p.187-195, 1994.
141. **NEHDI M.**, «*Mécanismes de transfert de masse dans le béton comme critère de durabilité: application in situ aux bétons de barrage*». Thèse de Maîtrise, Université de Sherbrooke, 127, 1993.
142. **NGAB A.S., SLATE F.O. and NILSON A.H.**, «*Microcracking and time - dependent strains in high strength concrete*». *ACI Materials Journal*, vol.78, n°4, p.262-268. 1981.
143. **OUDJIT M.N. et LANEZ M.**, «*Contribution a l'étude des bétons de poudres réactivés*». Faculté de Génie Civil/U.S.T.H.B, Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005, 1-8.
144. **OLLIVIER J.P.**, «*Etude de la liaison entre la pâte de ciment et les granulats par observation directe au microscope électronique par transmission*». Thèse Doct. Ing., Toulouse III, 99p, 1975.
145. **OLLIVIER J.P., CARLES-GIBERGUES A. et HANNA B.**, «*Activité pouzzolanique et action de remplissage d'une fumée de silice dans les matrices et bétons de haute résistance*». *Cement and Concrete Research*, vol.18(3), pp.438-448, 1988.
146. **OLLIVIER J.P., MASO J.C. and BOURDETTE B.**, «*Interfacial transition zone in concrete*». *Advanced Cement Based Materials*, vol.2(1), p.30-38, 1995.
147. **OLLIVIER J.P. and GRANDET J.**, «*Processus de formation de l'auréole de transition*». L.P.C.M. associés, Ed., Colloque international, Toulouse (France), 1982. A14-A22.
148. **PERRATON D.**, «*Perméabilité aux gaz des bétons hydrauliques*». Thèse de l'INSA, Toulouse.1992.
149. **PERRATON D., AÏTCIN P.C. et CARLES-GIBERGUES A.**, «*Mesure de la perméabilité au gaz des bétons: perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque*». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 221, pp 69-87, 1999.
150. **PERRATON D., AÏTCIN P.C. and VÉZINA D.**, «*Permeabilities of silica fume concrete*». *ACI Spécial publication SP-108*, Detroit, p.63-84, 1988.
151. **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.
152. **PICANDET V.**, «*Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydraulique des bétons*». Thèse, Université de Nantes, 2001.
153. **PANDEY S.P. and SHARMA R.L.**, «*The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortars*». *Cement and Concrete Research*, vol.30(1), p.19-23, 2000.
154. **PIGEON.**, «*Composition et hydratation du ciment Portland, Séminaire progrès dans le domaine du béton*». Québec, septembre 1981, p.36-72.
155. **PASCAL P.**, «*Nouveau traité de chimie minérale (Silicium)*». Tome VIII, 2<sup>ème</sup> fascicule. Paris, Masson, 1965, pp.2-90 et 423-445.
156. **PING X., BEAUDOIN J.J. and BROUSSEAU R.**, «*Flat aggregate-Portland cement paste interfaces, II. Transition zone formation*». *Cement and Concrete Research*, vol.21(5), p.718-726, 1991.
157. **PLASSAIS A.**, «*Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments*». Thèse de Doctorat. Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris 6, 167, 2003.
158. **PROPOSED R.**, «*Use of natural pozzolan in concrete*». *ACI Materials Journal*, vol. 91, n°4, pp. 410-426, 1994.

159. **QUENARD D. et SALLEE H.**, «*Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment*». Cahiers de CSTB, n°2525, 1991.
160. **QUENARD D. et CARCASSES M.**, «*Les résultats des essais croisés AFRAM: Perméabilité*». Compte-rendu des journées technique AFPC-AFRAM, «*Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*», Toulouse, 11-12 Décembre, pp. 41-58, 1997.
161. **QUENARD D., KALIFA P. et PARD O.**, «*Mesure du facteur de formation et de la perméabilité dans des pâtes de ciment*». Thème de recherche OA9 du L.C.P.C, CSTB, Paris, février 1999, 24p.
162. **QUEISSER A.**, Cours matériaux de construction «*Matériaux pierreux: les minéraux*». École polytechnique fédérale de Lausanne.
163. **RICHARD P. and CHEYREZY M.H.**, «*Composition of reactive powder concretes*». Cement and Concrete Research, vol.25(7), p. 1501-1511, 1995.
164. **ROSSI P. and TOUTLEMONDE F.**, «*Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: description of the physical mechanisms*». Materials and Structures, vol.29(2), pp. 116-118, March 1996.
165. **ROY D.M.**, «*Hydration of blended cements containing slag, fly ash, or silica fume*». Proc. Of meeting institute of concrete technology, Coventry, UK, 29 pp, 1987.
166. **RICCARDO S. and GIUSEPPE F.**, «*The action of some aggressive solutions on Portland, pozzolanic and blast furnace slag cement mortar*», Cement and concrete Research, vol.19(6), p. 885-893, 1989.
167. **SCRIVENER K.**, «*Cours on-line*», EPFL, 2001.
168. **SCRIVENER K.L. and PRATT P.L.**, «*Characterization of Interfacial Microstructure*». In Interfacial Transition Zone in Concrete, Ed. J.C. Maso, P. 3-17, E & FN Spon, London, 1996.
169. **SAID-MANSOUR M., GHRICI M. et KENAI S.**, «*Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et des bétons*». Congrès International réhabilitation des constructions et développement durable, Alger, 2005.
170. **SÀNCHEZ M.I. and FRIAS M.**, «*The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars*». Cement and Concrete Research, vol.26(2), p.203-213, 1996.
171. **SITUATION ENVIRONNEMENTALE DES INDUSTRIES.**, «*L'industrie cimentière*», Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.
172. **SMADI M.M. and SLATE F.O.**, «*Microcracking of high and normal strength concretes under short and long-term loadings*». ACI Materials Journal, vol. 86, n°2, p.117-127. 1989.
173. **SHAH S.P. and SANKAR R.**, «*Internal Cracking and Strain Softening Response of Concrete under Uniaxial Compression*». Journal of American Concrete Institute, pp.200-212. 1987.
174. **TOGNAZZI-LAWRENCE C.**, «*Couplage fissuration-dégradation chimique dans les matériaux cimentaires: Caractérisation et modélisation*». Thèse de l'INSA de Toulouse, 1998.
175. **TOUTANJI H.A. and EL-KORCHI T.**, «*The influence of silica fumes on the compressive strength of cement paste and mortar*». Cement and Concrete Research, vol.25(7), p. 1591-1602, 1995.
176. **TAYLOR H.F.W.**, «*Cement chemistry*», Academic Press, London, 1990.
177. **TASONG W.A., LYNSDALE C.J. and CRIPPS J.C.**, «*Aggregate-cement paste interface: Part I Influence of aggregate geochemistry*». Cement and Concrete Research, vol.29(7), p.1019-1025, 1999.
178. **VERNET C.**, «*Introduction to Portland cement chemistry*», In P. Colombet and A.R. Grimmer, editors, Application of NMR spectroscopy to cement science, pages 29-53. Gordon and Breach, London, 1994.
179. **VENUAT M.**, «*La pratique des ciments mortiers et béton*». Tome 1, et Tome 2, deuxième édition.



- 180. VIVEKANANDAM K. and PATNAIKUNI I.**, «*Transition zone in high performance concrete during hydration*». Cement and Concrete Research, vol.27(6), p.817-823, 1997.
- 181. WINSLOW D.N., COHEN M.D., BENTZ D.P., SNYDER K.A. and GARBOCZI E.J.**, «*Percolation and pore structure in mortars and concrete*». Cement and Concrete Research, vol.24(1), p.25-37, 1994.
- 182. WANG Y. and YE G.**, «*Influence on microstructure of micronized sand as cement replacement in cementitious materials*». Journal of Wuhan University of Technology, vol.32(17), p.152-157. Sept. 2010.
- 183. YIJIN L.S., CHIQIONG Z. and YINGLI G.**, «*The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar and concrete*». Proceeding of the international work shop of sustainable development and concrete technology, p.339-345, Beijing 2004.

## LISTE DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THÈSE

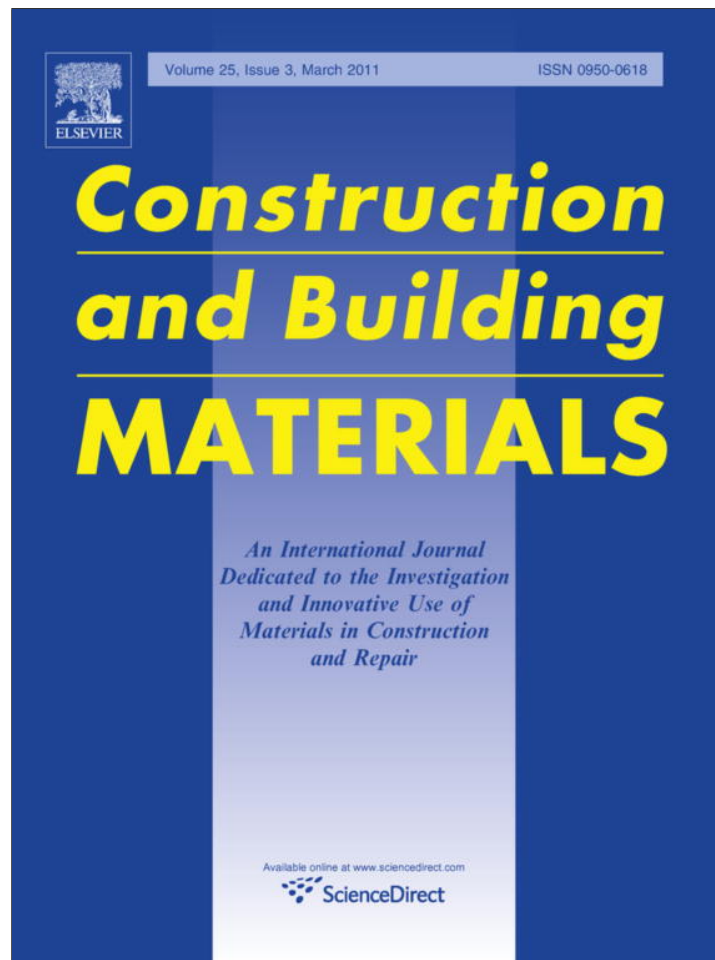
### PUBLICATIONS DANS DES REVUES

1. <sup>S</sup> **GUETTALA** and <sup>B</sup> **MEZGHICHE**, 2011. *Compressive Strength and Hydration with Age of Cement Pastes Containing Dune Sand Powder*. **Construction and Building Materials - Elsevier** vol. 25, N<sup>O</sup>. 3, p. 1263-1269.
2. <sup>S</sup> **GUETTALA** et <sup>B</sup> **MEZGHICHE**, 2011. *Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons*. **European Journal of Environmental and Civil Engineering** vol.15, N<sup>O</sup>.10, p. 1483-1507.
3. <sup>S</sup> **GUETTALA**, <sup>B</sup> **MEZGHICHE** and <sup>M</sup> **MELLAS**, 2010. *Adding Finely Crushed Dune Sand to Cement on the Evolution of Hydration of Portland Cement Paste*. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)** vol.11, N<sup>O</sup>. 2, p. 241-251.
4. <sup>S</sup> **GUETTALA**, <sup>B</sup> **MEZGHICHE** and <sup>M</sup> **MELLAS**, 2012. *Influence of Addition Dune Sand Powder to Cement, on the Properties Physical-Mechanical and Deformability of Concrete*. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)** vol. 13, N<sup>O</sup>. 6, p. 765-781.

### COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

1. <sup>S</sup> **GUETTALA**, <sup>B</sup> **MEZGHICHE** et <sup>M</sup> **MELLAS**, 2008. *Performances physico-mécaniques et la durabilité du ciment prémélangé du sable de dune finement broyé*. Troisième **Conférence International** à Biskra sur l'Architecture et la durabilité (**BASC 2008**), «Stratégies et Perspectives», Université Mohamed Khider Biskra, 8-10 Avril. Thème 4: La recherche et le transfert technologique. 396-407.
2. <sup>S</sup> **GUETTALA**, <sup>B</sup> **MEZGHICHE** et <sup>M</sup> **MELLAS**, 2009. *Effet de l'ajout du sable de dune en poudre au ciment Portland*. **Congrès International Algérien de Mécanique** à Biskra (**CAM 2009**), Université Mohamed Khider Biskra, 16-19 Novembre., Réf: 0028-C02. Thème 2/ Comportement mécanique des matériaux destinés au génie civil. Session 3/ Structures mixtes et effet des ajouts. 22-32.

Provided for non-commercial research and education use.  
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

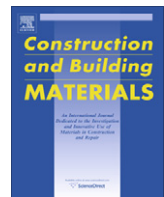
In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

## Construction and Building Materials

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat)

## Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder

Salim Guettala<sup>a,\*</sup>, Bouzidi Mezghiche<sup>b</sup><sup>a</sup> Civil Engineering Department, University of Djelfa, 17000 Djelfa, Algeria<sup>b</sup> Research Laboratory Civil Engineering, University of Biskra, 07000 Biskra, Algeria

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 23 April 2009

Received in revised form 12 August 2010

Accepted 2 September 2010

Available online 12 October 2010

## Keywords:

Ordinary Portland cement

Pure lime

Dune sand powder

Compressive strength

Hydration

## ABSTRACT

This experimental work has focused on studying the possibility of using dune sand powder (DSP) as a part mass addition to Portland cement. Studying the effect of addition dune sand powder on development of compressive strength and hydration with age of cement pastes as a function of water/binder ratio, was varied, on the one hand, the percentage of the dune sand powder (physico-chemical and chemical effect) and on the other, the fineness of dune sand powder (physical effect). In order to understand better the chemical effect (pozzolanic effect) of dune sand powder in cement pastes, we followed the mixtures hydration (50% pure lime + 50% DSP) by X-ray diffraction. These mixtures pastes present a hydraulic setting which is due to the formation of a C–S–H phase (calcium silicate hydrate). The latter is semi-crystallized. This study is a simplified approach to that of the mixtures (80% ordinary Portland cement + 20% DSP), in which the main reaction is the fixing of the lime coming from the cement hydration in the presence of the dune sand powder (pozzolanic reaction), to form calcium silicate hydrate C–S–H semi-crystallized of second generation. The results proved that up to 20% of dune sand powder as Portland cement replacement could be used with a fineness of 4000 cm<sup>2</sup>/g without affecting adversely the compressive strength. The dune sand powder, despite its crystalline nature, presents a partial pozzolanic reactivity.

Published by Elsevier Ltd.

## 1. Introduction

Searching for cheaper cement made of local natural resources has become a major concern to compensate the deficit in the manufacture of cement. Since 1970, a major research effort has been provided on the use of the cementing additions as a partial substitution to Portland cement. These additions come from natural sources, or by-products of other industries [1]. The additions present an increasing binding activity with their amount, their fineness, their mineralogical composition and the type of cement also influence into practical terms, this activity results in a profit of strength [2]. The compactness of the cement paste can be improved by the formation of calcium silicate hydrates. The latter are obtained by the introduction of fine siliceous particles, equipped with a certain pozzolanic role and contribute to the increase in the strength and the durability of the concretes to which they are built-in [3,4]. The recent studies which considered the influence of the mineral additions on the properties of cementing materials showed that those additions by their fineness are more

or less significant reactivity with the cement can generate in certain cases significant modifications in the rheological and mechanical properties. The mechanisms at the origin of these modifications appear particularly complex, but several studies in this field agree to distinguish three principal effects which are superimposed to influence the properties of the cementing materials in the fresh or hardened state: a granular effect, a physico-chemical effect and a chemical effect [5–17].

A granular effect relates to all the modifications, induced by the presence of the mineral additions in the granular structure, of cementing materials in a fresh state. These modifications can result from the capacity of stacking fine or ultra-fine particles of the addition, with other solid components of the mixture and/or the intensity of frictions between particles. Several studies showed the existence of an optimisation of the granular structure properties by the incorporation of mineral additions, of different natures and amount. A granular effect becomes positive and leads either to improve the consistency of fresh mixture to constant content of water or decrease the water content for a given consistency by improving the compactness of the mixture and the mechanical performance of hardened material [18]. Similarly Kronlof [19] showed by studying the effect of ultra-fine aggregates on concrete strength, the incorporation in concrete three additions of different fineness of quartz leads to the decrease of water requirement in

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [guettalasalim@yahoo.com](mailto:guettalasalim@yahoo.com) (S. Guettala), [bmezghiche@yahoo.fr](mailto:bmezghiche@yahoo.fr) (B. Mezghiche).

relation to the amount and fineness. Kwan [20] showed that the workability of a concrete increases with the percentage of silica fume for the constant water/binder ratio. In the same way De Larrard [21] showed that the workability of a mortar varies according to the amount of built-in silica fume. Similarly Bessa [5] showed that the granular effect of the mineral additions on the formulations of mortars could involve an increase or decrease of the water requirement with standardised workability and depends initially on the fineness and amount of the introduced addition. In the same way Kara [12] showed that the introduction of additions with great proportions into the cement pastes with a standardised workability generates a higher water requirement. Then, when the addition particles modify lightly the frictions between the grains and fill the porosities of the granular structure (cement and aggregates) by releasing the water in these pores, the granular effect becomes favourable and leads to improving the workability of the fresh mixtures with a constant amount of water, or to the reduction of water for a given workability and to improving the compactness of the mixture and the mechanical performances. However, when the particles of the addition modify considerably the frictions between the grains in the cementing mixtures or do not fill porosities of the granular structure, the granular effect becomes unfavourable.

A physico-chemical effect relates to all the modifications generated by the multiple interactions between the mineral additions particles on the hydration process of cement, and on structuring the hydrated products. Other authors argue that the presence of mineral additions in a cement mixture leads to the acceleration of hydration process, or that it provided a better dispersion of cement grains, leading to a structure of cement matrix more efficiently [5,16]. Similarly Lilkov et al. [22] have showed that the amount of the hydrates formed during the first 24 h in a cementing paste is more significant in mixtures with additions of silica fume and fly ashes than in mixtures without additions. Similarly Jiang and Van Damme [23] have confirmed these results by studying the action of the siliceous and limestone additions on the process of hydration of the pure  $C_3S$ . In the same way Cheng-Yi and Feldman [24] have showed that the mineral additions play a role of preferential sites of nucleation during the cement reactions, allowing a better distribution of the hydrated products and thus lead to more effective structuring the cementing matrix. Thus, it results that the physico-chemical effect of the mineral additions acts primarily on the evolution of the mechanical strengths at early-age and on the physical and microstructural properties of the hardened cementing materials. In the same way Care et al. [25] have also shown by studying the effect of inert mineral additions on hydration of mortars, the degree of hydration for short-term of mortars containing chemically inert additions were always higher than that of the reference mortars and have confirmed the improvement of the hydration of cement with inert additions. In the same context the mineral additions play a role of nucleation sites during reactions of cement, this nucleation is a physical process, causes a chemical activation of cement hydration and depends on the fineness of particle additions, the content addition into the mixture and nature of the addition powder with the cement hydrates [14,24]. The physico-chemical effect concerns on a general all additions of their mineralogical nature.

A chemical effect relates to the capacity of the additions characterised by pozzolanic and/or hydraulic properties, to react with water and the anhydrous or hydrated components of cement, to form new mineral phases which can contribute to the evolution of the mechanical strengths, as well as the hydrated products of cement [12]. Similarly Appa Rao [26] showed that for a constant water/binder ratio equal to 0.5 the incorporation of a silica fume in a mortar in the limit of 30% of the cement substitution by the addition, leads to an increase in the compressive strengths independently of the age of mortar. Similarly Kwan [20] showed that

independently of the water/binder ratio, the incorporation of a silica fume in a mortar in the limit of 15% of the cement substitution by the addition, leads to an increase in the compressive strengths in 28 days. In the same way Benezet and Benhassaini [27] have shown by studying the influence of particle size of quartz in the pozzolanic reaction the quartz crystal powder can react with portlandite to form stable hydrates. The reactivity of quartz powder measured in a static medium (not activated) heat (test at 20 °C), hitherto attributed to amorphization of the grain surface, resulting from the presence of very fine grains adsorbed on the surface of larger grains. In the same way Lawrence et al. [14] have shown that the degree of hydration of mortars containing additions of quartz was more significant than that of the mortars without additions. Similarly Cyr et al. [11] have confirmed the chemical reactivity of the limestone additions by comparing the evolution of the mechanical strengths of mortars, made with two fly ashes and a limestone addition. It results that the chemical effect, when it is favourable, is complementary to the physico-chemical effect. Similarly the analysis by X-ray diffraction highlighted the role of pozzolanic dune sand powder. Indeed, the small content of portlandite detected in the cement pastes in the presence of dune sand powder, translated the partial pozzolanic reaction, which contributes to increasing the strength and improves the compactness of the paste, and also shows that the DSP consists of  $SiO_2$  quartz well crystallized type low-quartz [28,29].

The dune sand is a material of a great availability in Algeria. This material is practically not exploited, in spite of the possible characteristics which it presents. The contribution of addition dune sand powder on the cement binding activity results primarily from two effects: a physico-chemical effect and a chemical effect. On the one hand it changes the hydration process of cement as well as the structuring of hydrated products; on the other, it reacts in the cementing medium and develops new hydrated products. These effects act simultaneously and in a complementary way on the final properties of cement pastes. A third physical effect which is the granular effect related to the changes induced by the presence of the fine particles in the solid skeleton of the mixture. However, to ensure the development of this vital building material, the approach of sustainable development should be incorporated into the production of cement, which will enable it to reach a balance between the constraints of environmental protection and the economic, technical and social considerations.

In the light of what was evoked previously, the required objective is to evaluate through experiments the combined contribution of the physical, physico-chemical and chemical effect of addition dune sand powder to cement, on development of compressive strength and hydration with age of cement pastes.

## 2. Experimental program

Studying in parallel the effect of different percentages of dune sand powder, effect of fineness ( $F_1 = 3000$  and  $F_2 = 4000$   $cm^2/g$ ) and the effect of the water/binder ratio ( $w/b = 0.40, 0.30$  and  $0.25$ ) on the compressive strength of cement pastes, we selected four mass percentages (5%, 10%, 15% and 20%) for addition to ordinary Portland cement (OPC) and obtain a new variety of compound cement (optimisation of the cement content in dune sand powder). We used cubic specimens ( $20 \times 20 \times 20$  mm) pure pastes for six specimens per test. The cement pastes were prepared in a mixer standard EN 196-1 by following the procedure described by EN 196-3 relative the normal consistency of pure pastes. The hardening was under natural conditions, the specimens are subjected to a curing in drinking water at  $20 \pm 1$  °C [30].

This work is to analyse by X-ray diffraction (XRD), using the powder method, its main use is identifying minerals. Each body

crystalline product indeed is a spectrum or X diffractogram, which reflects its internal structure and nature of minerals. You can treat any X diffractogram which is a specific kind of (fingerprint), which can distinguish another mineral. To identify a body from its X diffractogram, it has a file or ASTM minerals are classified according to their three main line, the intensity of the strongest line being set at 100. If several mineral species are combined in the powder studied, the diagram is the juxtaposition of elementary diagrams. To this end, we analysed by X-ray diffraction:

- a. Firstly, the dune sand powder, to highlight its mineralogical nature.
- b. Thereafter, we followed the fixing kinetics of lime as a function of time in pastes mixtures, previously stored in PVC tubes at  $20 \pm 1$  °C sealed hermetically. In order to understand better the pozzolanic effect of this addition in the cement pastes, we followed the mixtures hydration (50% pure lime + 50% DSP). This study is a simplified approach to that of the mixtures (80% OPC + 20% DSP), in which the main reaction is the fixing of the lime coming from the cement hydration in the presence of the dune sand powder (pozzolanic reaction), to form calcium silicate hydrate C–S–H semi-crystallized of second generation. At a given age, a portion of the paste is crushed into a fine powder, whose maximum diameter of grain is less than 40  $\mu\text{m}$ , to be tested by XRD. For reactivity analysing dune sand powder, we studied: the evolution of mixtures hydration (50% pure lime + 50% DSP) and (80% OPC + 20% DSP) as a function of time.

### 3. Materials and mix proportions

This is a crushing of dune sand and clinker. The crushing is carried out using a conventional ball crusher (horizontal metal cylinder rotated and filled with 1/3 steel balls that crush the material into a cascade movement). After that, sifting is carried out.

#### 3.1. Dune sand powder

The choice of an addition relative to another is generally following the local availability at acceptable costs, focused on the high silica content. We used dune sand in the region of Biskra. Apparent density = 1300  $\text{kg}/\text{m}^3$  and specific density = 2770  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

**Table 1**  
Chemical analysis of dune sand powder (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Cl	LOI
74.61	1.35	0.86	17.3	0.29	0.04	0.47	0.005	5.04

#### 3.1.1. Chemical analysis

Table 1 contains the chemical analyses which were carried out in the laboratory of the cement factory of Ain Touta (Batna, Algeria). From a chemical stand point, the important observation to note is the presence of a high percentage of silica SiO<sub>2</sub>; is greater than 74%, and therefore the dune sand is siliceous sand.

#### 3.1.2. Mineralogical nature

Fig. 1 shows that the DSP presents a crystalline structure siliceous (low-quartz). The crystalline silica presents a regular three-dimensional structure; the basic reason is a tetrahedron, an oxygen atom and the centre occupies each summit by a silicon atom. Its atomic structure is changed if the temperature reaches over 870 °C. (the passage of quartz to tridymite) [31]. According to De Larrard [21] (nothing is ultra-fine inert. Thus quartzes crushed deemed crystal, are amorphised on surface. They can therefore be associated with lime according to reactivity pozzolanic classic). The dune sand powder is siliceous, can have the same physical benefits and pozzolanic than other additions, despite its crystalline character [32].

#### 3.2. Portland cement

The Cement that was used is an ordinary Portland cement (OPC) class 42.5 Mpa; it is composed of 95% clinker and 5% gypsum, for the regularization of the setting. The clinker is from the cement factory of Ain Touta (Batna). Apparent density = 1120  $\text{kg}/\text{m}^3$  and specific density = 3050  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

#### 3.2.1. Chemical and mineralogical analysis

The potential mineralogical composition of the clinker is calculated according to the empirical formula of Bogue [33]. The chemical analysis of cement shows that it is in conformity with standard NFP 15-301. Chemical and mineralogical compositions of clinker are presented in Tables 2 and 3, respectively.

#### 3.3. Water

The water is drinking water that contains little sulphate and having a temperature of  $20 \pm 1$  °C. Its quality conforms to the requirements of standard NFP 18-404.

#### 3.4. Mix proportions

Details of the mixtures proportions are given in Table 4.

**Table 2**  
Chemical composition of clinker (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Free CaO	IR	LOI
22.00	5.02	2.94	64.36	2.07	1.94	0.30	0.73	0.64

IR: insoluble residue, LOI: loss on ignition.

**Table 3**  
Mineralogical composition of clinker (%).

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
51.28	24.68	8.33	8.94

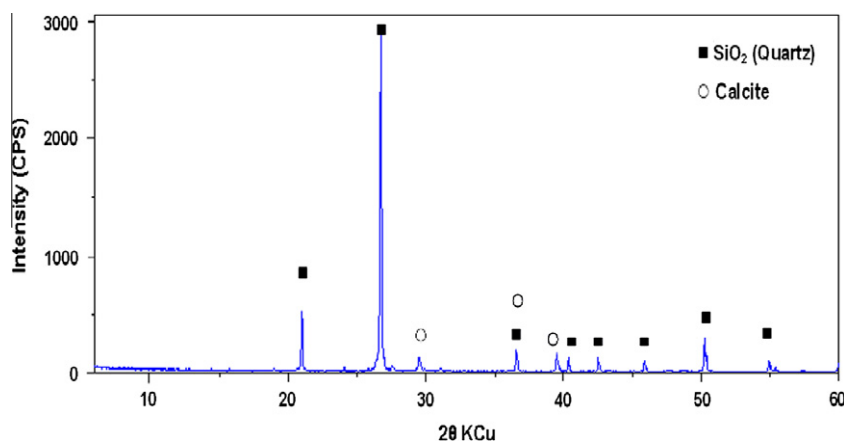


Fig. 1. X diffractogram (dune sand powder).

**Table 4**  
Mixtures proportions.

Mixture code	w/b ratio	Fineness DSP (cm <sup>2</sup> /g)	Cement type	Mass dosage (%)		
				Clinker	Gypsum	DSP
M1	0.25	–	OPC fineness 3200 cm <sup>2</sup> /g	95	5	0
M2	0.30	–				
M3	0.40	–				
M4	0.25	F <sub>1</sub> = 3000	95% OPC + 5% DSP	90	5	5
M5	0.25	F <sub>2</sub> = 4000				
M6	0.30	3000				
M7	0.30	4000				
M8	0.40	3000				
M9	0.40	4000				
M10	0.25	3000	90% OPC + 10% DSP	85	5	10
M11	0.25	4000				
M12	0.30	3000				
M13	0.30	4000				
M14	0.40	3000				
M15	0.40	4000				
M16	0.25	3000	85% OPC + 15% DSP	80	5	15
M17	0.25	4000				
M18	0.30	3000				
M19	0.30	4000				
M20	0.40	3000				
M21	0.40	4000				
M22	0.25	3000	80% OPC + 20% DSP	75	5	20
M23	0.25	4000				
M24	0.30	3000				
M25	0.30	4000				
M26	0.40	3000				
M27	0.40	4000				

**4. Results and discussions**

**4.1. Compressive strength**

The results obtained are clearly exposed on the (Figs. 2–5). According to these results one notices that the evolution of compressive strengths as function of time (7, 28 and 90 days) shows that during the first seven days, the compressive strengths is low for all samples, whereas the following periods, the compressive strengths increases significantly. This is due to the kinetics of the reaction of cement hydration and reaction of dune sand powder with portlandite as a function of time.

The rate of development of the compressive strength of the OPC alone of 28 and 90 days, compared to 7 days, is 56% and 68% respectively, the compressive strengths of the binders to 5 and 20% of dune sand powder develop a rate equal to 69% for 28 days and 97% to 90 days respectively, that translated the chemical effect played by dune sand powder in the long-term, therefore confirms the pouzzolanic activity.

The results obtained show that the contribution of addition dune sand powder to the cement binding activity resulted primarily from three effects: physical, physico-chemical and chemical. These effects act simultaneously and in a complementary way on the compressive strengths of cement pastes: [34,35].

Physical effect: an improvement of the compressive strengths by a thickening of the cement pastes.

Physico-chemical effect: a physical process produces a chemical activation of cement hydration and depends on the content and fineness of the dune sand powder, which acts on the evolution

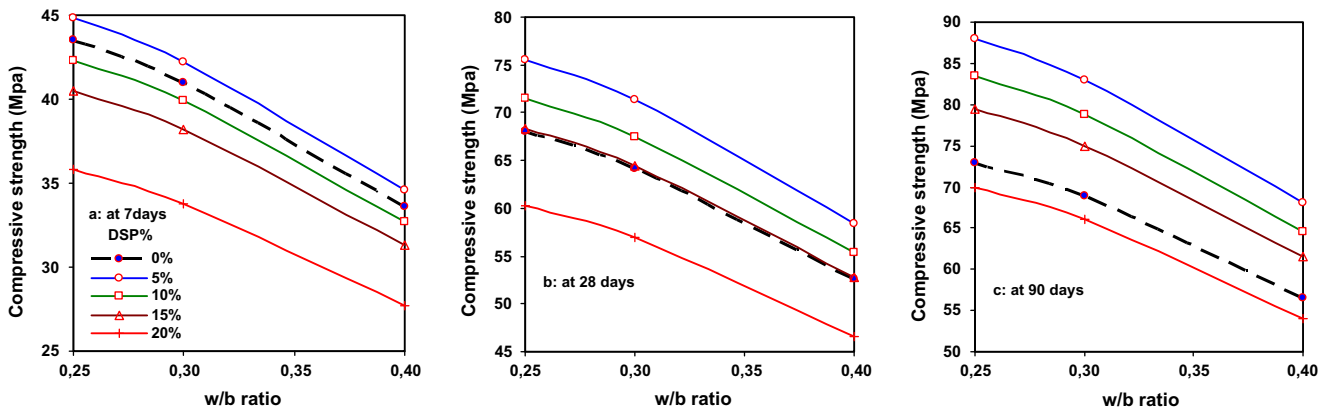


Fig. 2. Variation in compressive strength as a function of time and water/binder ratio (F<sub>1</sub> = 3000 cm<sup>2</sup>/g).

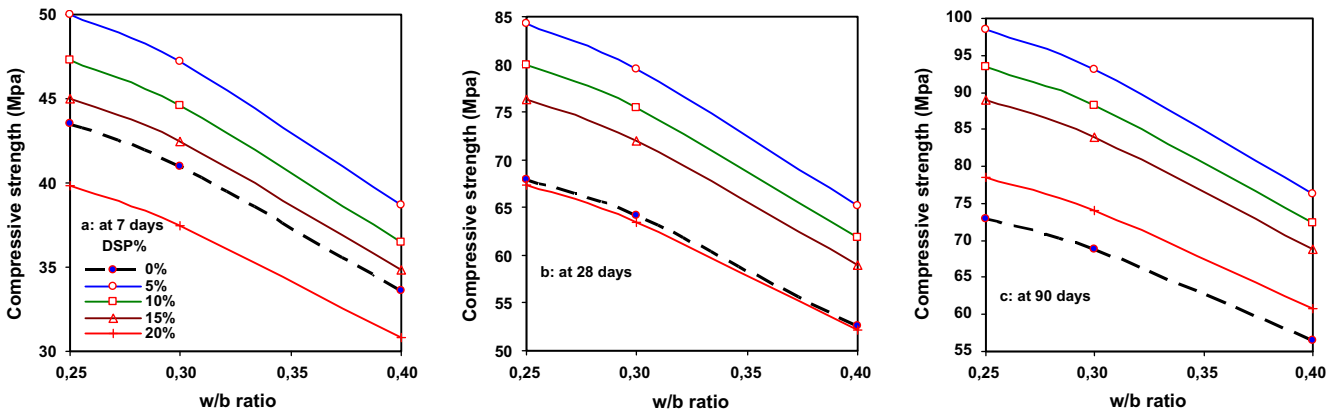


Fig. 3. Variation in compressive strength as a function of time and water/binder ratio (F<sub>2</sub> = 4000 cm<sup>2</sup>/g).

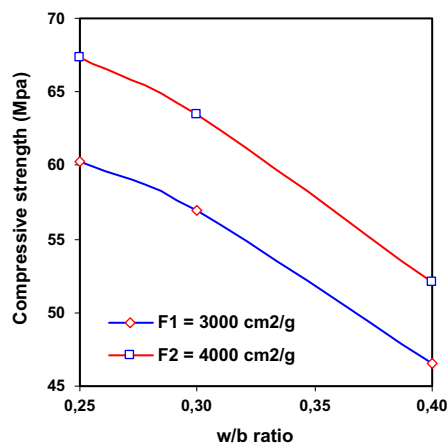


Fig. 4. Variation in compressive strength at 28 days of cement pastes with 20% DSP as a function of fineness and water/binder ratio.

the compressive strengths at early-age. The presence of dune sand powder accelerates the reaction of cement hydration. This accelerating effect of dune sand powder on the hydration combined with the physical effect, due to their fineness, can lead to better short-term compressive strengths.

Chemical effect: lime provided in the case of Portland cement and consumed by the pozzolanic reaction, caused by the addition of dune sand powder to cement, it improved the compressive strengths of cement pastes at average and especially at long-term.

This also makes it possible to reduce the content of cement for strength and a given slump. This last characteristic is very interesting from an economic standpoint seeing that cement is the most expensive ingredient in the composition of the concrete.

Another advantage is that it makes it possible for cement to continue its development of compressive strength even after the 28 days period.

Concerning the influence of water/binder ratio (*w/b*), we see clearly that the compressive strength of all hardened cement pastes at any age, decreased with the increase of *w/b* ratio. The *w/b* ratio exerts a great influence on the porosity of the cement paste hydrated (network of pores finer and more discontinuous). That is why cement pastes with *w/b* ratio low: developing very

quickly their compressive strength by a high concentration in C–S–H.

The dune sand powder can change the structure of pores, to reduce the number of large pores and increase the small pores. This change is a function of fineness, more particles are fine and their role is more effective. The results showed that by increasing the fineness of 3000 cm<sup>2</sup>/g at 4000 cm<sup>2</sup>/g, the compressive strengths at all ages were improved by 12%.

One can generally observe that after 28 days, the compressive strength at 5, 10 and 15% of the dune sand powder is superior to the Portland cement, with an optimum effect for a percentage of the order of 5% to 10% irrespective of the water/binder ratio and fineness of the dune sand powder.

The incorporation of 20% dune sand powder with a fineness of 4000 cm<sup>2</sup>/g, substitution form to Portland cement provides a new variety of compound cement with a compressive strength comparable to those of ordinary Portland cement.

#### 4.2. Consistency and setting time

Table 5 gives the consistency and initial and final setting time of mixtures. According to the results obtained one notices that the content of addition, of DSP% did not generate significant modifications on the setting time of mixtures. Whereas the addition significantly decreased their initial consistency (the pastes become more fluid). Because of their superior fineness than that of cement OPC the intergranular vacuum reduce, therefore dune sand powder plays a role of lubricant.

The amount of water necessary to obtain a normal consistency of the ASTM C 187–86 cement paste varies from 23% to 35%. The granulometry has a prevalent influence on the demand for water of the cement. More the granulometry distribution is (tight), with

Table 5  
Consistency and setting time of mixtures.

Tests (T = 27 °C)	Mixture				
	M1	M5	M11	M17	M23
Normal consistency (%)	27	26.7	26.5	26.3	26
Setting initial (min)	95	100	105	105	105
Setting final (min)	240	229	227	225	225

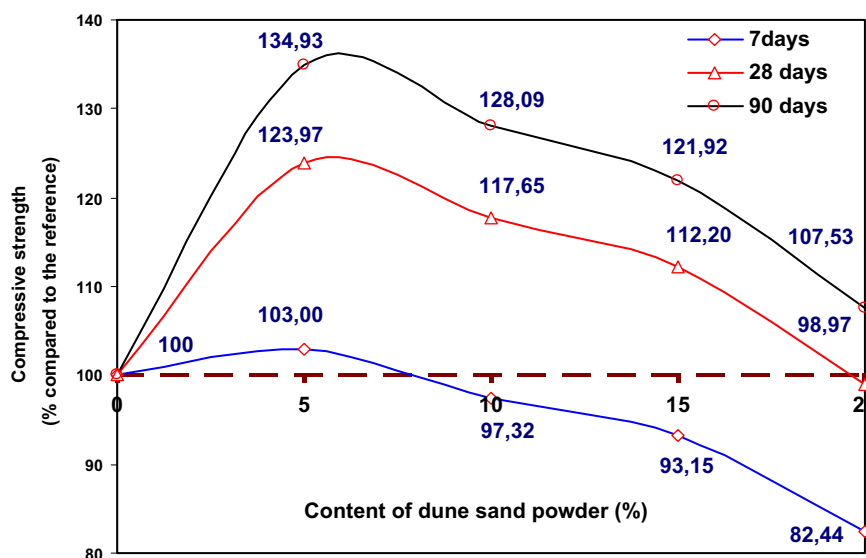


Fig. 5. Effect of content of dune sand powder on the compressive strength (F<sub>2</sub> = 4000 cm<sup>2</sup>/g, w/b = 0.25).



few particles of small and of large dimensions; higher is the demand for water.

This cement comprises a great proportion of vacuums, which should be filled by water before setting part in the handiness of the cement paste. Therefore, for decrease the demand for water of cement, it is necessary to increase the proportions in small and large particles in order to decrease the intergranular vacuum.

According to Table 5 one notices that the dune sand powder will fill the intergranular vacuums and will decrease the demand for water.

#### 4.3. Reactivity pozzolanic of dune sand powder

##### 4.3.1. Evolution of mixtures hydration (50% pure lime + 50% DSP) as a function of time

The evolution of the pozzolanic reaction as a function of time was considered by X-ray diffraction on pastes containing (50% pure lime + 50% DSP).

An examination of X diffractograms (Fig. 6) shows that:

The line intensities of lime (4.90 Å, 2.62 Å and 1.92 Å) decreased as a function of time, which explains the fixing of the lime by the grains of silica, to form the calcium silicate hydrate C-S-H semi-crystallized (partial pozzolanic reactivity of dune sand powder).

##### 4.3.2. Evolution of mixtures hydration (80% OPC + 20% DSP) as a function of time

In the same way, we followed by XRD the evolution mixtures hydration pastes (80% OPC + 20% DSP) as a function of time. The

changes in hydration kinetics of Portland cement, in the presence of dune sand powder are highlighted by X-ray diffraction.

An examination of X diffractograms (Fig. 7) presents the following observations:

At 28 days of hydration, the line intensities of lime and calcium silicate hydrate C-S-H appearances and the line intensities of C<sub>3</sub>S and βC<sub>2</sub>S decreased which explains the hydration of calcium silicate. In the presence of dune sand powder and at 28 days of hydration, the line intensities of quartz decreased, as compared to that of powder mixture, so the partial pozzolanic reaction of dune sand powder, which confirmed the results found previously.

At 90 days of hydration, the line intensities of lime and cement minerals, as well as that of quartz, decreased significantly, this shows the partial pozzolanic effect.

#### 5. Conclusion

The development of new building materials is a topical issue, which researchers are trying to find materials suitable for each region. Based on the results of this experimental study, the following conclusions could be drawn:

- The DSP presents a crystalline structure siliceous (low-quartz).
- The use of the dune sand powder in substitution of the clinker in Portland cement is an excellent example of reducing carbon dioxide CO<sub>2</sub> emissions; improve the compressive strengths and even the consistency of fresh mixture (the pastes become more fluid). This change is a function of fineness, more particles

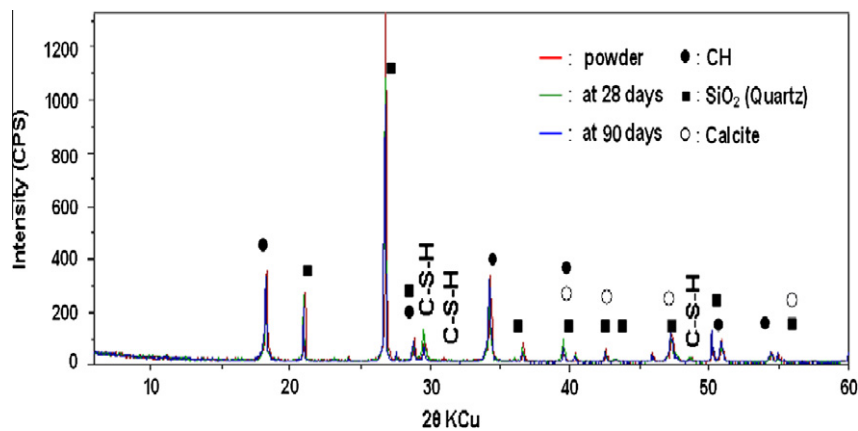


Fig. 6. X diffractograms of mixtures hydration (50% pure lime + 50% DSP) as a function of time.

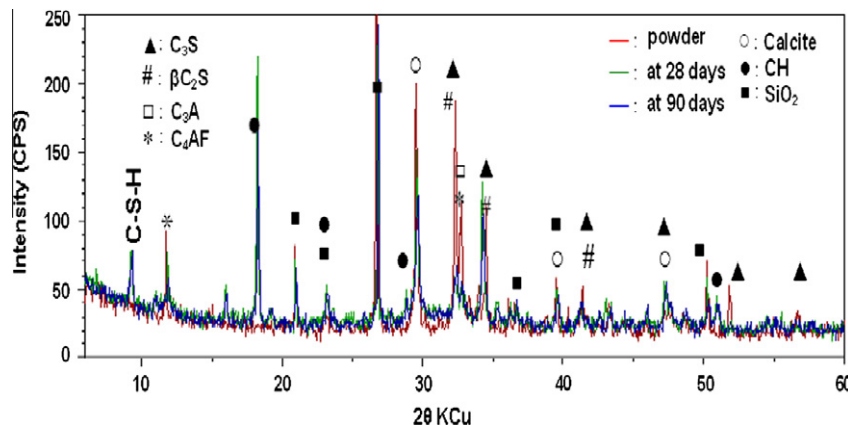


Fig. 7. X diffractograms of mixtures hydration (80% OPC + 20% DSP) as a function of time.

are fine and their role is more effective. The results showed that by increasing the fineness of 3000 cm<sup>2</sup>/g at 4000 cm<sup>2</sup>/g, the compressive strengths at all ages were improved by 12%.

- It is noticed, that the compressive strength of all hardened cement pastes at any age, decreased with the increase of water/binder ratio.
- One can generally observe that after 28 days, the compressive strength at 5, 10 and 15% of the dune sand powder is superior to the Portland cement, with an optimum effect for a percentage of the order of 5% to 10% irrespective of the water/binder ratio and fineness of the dune sand powder.
- The results proved that up to 20% of dune sand powder as Portland cement replacement could be used with a fineness of 4000 cm<sup>2</sup>/g without affecting adversely the compressive strength.
- The dune sand powder, despite its crystalline nature, presents a partial pozzolanic reactivity.
- The compressive strengths at early-age develop due to the acceleration of cement hydration, combined with the physical effect, while those at average and especially long-term develop through the partial pozzolanic effect, which cause the replacement of lime by the calcium silicate hydrate C–S–H semi-crystallized of second generation and transformation of large crystals of lime CH into a product of hydration slightly crystallized (refining of the grains).

## References

- [1] Menéndez G, Bonavetti V, Irassar EF. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag. *Cem Concr Compos* 2003;25(1):61–7.
- [2] Bessa A. Assessing the contribution of mineral additions in cement binding activity in mortars. XXI<sup>èmes</sup> rencontres universitaires de génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac, 95031 Cergy-Pontoise Cedex; 2003. p. 39–48.
- [3] Aïtcin PC. High performance concrete. Paris (France): Edition Eyrolles; 2001. p. 683.
- [4] Buil M. Physico-chemical system of cement–silica fume. Paris 483: Annales de l'ITBTP; 1990. p. 19–29.
- [5] Bessa A. Study of the contribution of mineral additions to the physical and mechanical durability of mortars. Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise; 2004.
- [6] Baron J, Olivier JP. Concrete, bases and data for their formulation. Edition Eyrolles; 1997. p. 522.
- [7] Benezet JC. Pozzolanic reactivity in the system calcium oxide–quartz–water. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II; 1997.
- [8] Cyr M. Contribution to the characterization of fine mineral and understanding of their role in the rheological behavior of the matrices. Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse; 1999.
- [9] Cyr M, Lawrence P, Ringot E. Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cem Concr Res* 2006;36(2):264–77.
- [10] Cyr M, Lawrence P, Ringot E. Mineral admixtures in mortars, quantification of the physical effects of inert materials in relation on short-term hydration. *Cem Concr Res* 2005;35(4):719–30.
- [11] Cyr M, Lawrence P, Ringot E, Carlesgibergues A. Variability of efficiency factors characterising mineral admixtures. *Mater Struct* 2000;33(7):466–72.
- [12] Kara Ali R. Influence of mineral additions on the water requirement and the mechanical strengths of cementations mixtures. Thèse de Doctorat de l'université de Cergy Pontoise; 2002.
- [13] Kara Ali R, Gallias JL. Methodological approach to problems of formulation of concrete with mineral additions fine and ultra-fine. 16<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil – les ouvrages dans leur environnement, Remis, 28–29 April 1998. Actes édités par l'association universitaire du génie civil, vol.1; 1998. p. 106–13.
- [14] Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Minéral admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration. *Cem Concr Res* 2003;33(12):1939–47.
- [15] Lawrence P. The activity of fly ash and chemically inert mineral additions in cement materials. Thèse de Doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse; 2000.
- [16] Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength. *Cem Concr Res* 2005;35(6):1092–105.
- [17] Nonat A. Interaction between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate. *Mater Struct* 1994;27(168):187–95.
- [18] Felekoglu B, Tosun K, Baradan B, Altun A, Uyulgan B. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars. *Cem Concr Res* 2006;36(9):1719–26.
- [19] Kronlof A. Effect of very fine aggregate on concrete strength. *Mater Struct* 1994;27(1):15–25.
- [20] Kwan AKH. Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidates concrete. *Can J Civ Eng* 2000;27(4):620–7.
- [21] De Larrard F. Formulation and properties of concrete with high performance. Rapport de Recherche L.P.C n °149, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées: Paris, France Mars; 1988.
- [22] Lilkov V, Dimitrova E, Petrov O. Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: the first 24 hours. *Cem Concr Res* 1997;27(4):577–88.
- [23] Jiang S, Van Damme H. Influence of different types of fillers on hydration and texture of C<sub>3</sub>S pastes. Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans; 1996.
- [24] Cheng-Yi H, Feldman RF. Hydration reactions in Portland cement silica fume blends. *Cem Concr Res* 1985;15(4):585–92.
- [25] Care S, Linder R, Baroghel Bouny V, De Larrard F, Charonnat Y. Effect of mineral additions on the properties of use of concrete – experimental design and static analysis. LCPC, Ouvrages d'art OA 33, Février; 2002.
- [26] Appa Rao G. Development of strength with age of mortars containing silica fume. *Cem Concr Res* 2001;31(81):1141–6.
- [27] Benezet JC, Benhassaine A. The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder. *Powder Technol* 1999;103(1):26–9.
- [28] Arroudj K, Oudjit MN. Influence of the sand of dune finely crushed on the hydration of cements. 2<sup>ème</sup> Colloque Maghrébin en Génie Civil, Biskra, Algérie; 10 et 11 Décembre 2002. p. 119–27.
- [29] Arroudj K, Oudjit MN, Lanez M, Carayon MT. Demonstration by X-ray diffraction C–S–H second generation. 1<sup>ère</sup> Séminaire sur les Technologies du Béton, le Béton Perfection et Incertitudes, Algérie; 18–19 Septembre 2004. p. 1–8.
- [30] Mezghiche B. Laboratory testing of construction materials. Algérie: Publication Universitaire Biskra; 2005. p. 120.
- [31] Bouchouika A. Physico-chemical and mechanical high-performance concretes made from local materials. Algérie: Thèse de Magister ENTP; 2002.
- [32] Pascal P. New treaty of inorganic chemistry (silicium). Tome VIII, 2<sup>ème</sup> Fascicule, Paris (France); 1965. p. 2–90 et 423–45.
- [33] Bogue RH. The chemistry of Portland cement. 2nd ed. New York: Reinhold Publishing Corp.; 1955.
- [34] Guettala S, Mezghiche B, Belounnar B. The influence of the content of cement the sand of dune finely crushed, on the characteristics of the concrete. Séminaire National sur la Gestion Intégrée des Déchets, Thème III, 29 et 30 Mai, ENSET d'Oran; 2007. p. 195–202.
- [35] Guettala S, Mezghiche B, Chebili R. Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete. *World J Eng* 2007;4(1):45–53.

## ANNEXES

**Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ( $F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,4$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA+0% Sd	33.6	40.4	52.6	55.6	56.5
CPA+5% Sd	34.6	44.3	58.4	63.6	68.0
CPA+10% Sd	32.7	42.2	55.3	60.3	64.6
CPA+15% Sd	31.3	40.0	52.8	57.4	61.5
CPA+20% Sd	27.7	35.3	46.6	50.7	54.1
CPA+25% Sd	24.9	31.6	41.4	44.9	47.6

**Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ( $F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,4$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA+0% Sd	33.6	40.4	52.6	55.6	56.5
CPA+5% Sd	38.7	49.5	65.2	71.0	76.3
CPA+10% Sd	36.5	46.8	61.9	67.5	72.3
CPA+15% Sd	34.8	44.7	59.0	64.3	68.9
CPA+20% Sd	30.8	39.4	52.1	56.9	60.7
CPA+25% Sd	27.8	35.3	46.3	50.3	53.3

**Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ( $F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,3$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA+0% Sd	41.0	49.3	64.2	67.5	68.9
CPA+5% Sd	42.2	54.0	71.3	77.6	83.0
CPA+10% Sd	39.9	51.4	67.5	73.6	78.8
CPA+15% Sd	38.2	48.8	64.4	70.0	75.0
CPA+20% Sd	33.8	43.0	56.9	61.8	66.0
CPA+25% Sd	30.4	38.5	50.5	54.8	58.0

**Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ( $F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,3$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA+0% Sd	41.0	49.3	64.2	67.5	68.9
CPA+5% Sd	47.2	60.4	79.5	86.6	93.0
CPA+10% Sd	44.6	57.0	75.5	82.3	88.2
CPA+15% Sd	42.5	54.5	72.0	78.5	84.0
CPA+20% Sd	37.5	48.1	63.5	69.4	74.1
CPA+25% Sd	33.9	43.0	56.4	61.3	65.0

**Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ( $F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA+0% Sd	43.50	52.3	68.0	71.5	73.0
CPA+5% Sd	44.80	57.3	75.5	82.3	88.0
CPA+10% Sd	42.30	54.5	71.5	78.0	83.5
CPA+15% Sd	40.50	51.8	68.3	74.3	79.5
CPA+20% Sd	35.80	45.5	60.3	65.5	70.0
CPA+25% Sd	32.10	40.8	53.6	58.0	61.5

**Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ( $F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA+0% Sd	43.50	52.3	68.0	71.5	73.0
CPA+5% Sd	44.80	64.0	84.3	91.8	98.5
CPA+10% Sd	42.33	60.5	80.0	87.3	93.5
CPA+15% Sd	40.52	57.8	76.3	83.3	89.0
CPA+20% Sd	35.86	51.0	67.3	73.5	78.5
CPA+25% Sd	32.10	45.7	59.8	65.0	68.9

**Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du type de ciment ( $F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $E/(C+Sd) = 0,25$ )**

Type de ciment	Résistance à la compression (MPa)				
	7 jours	14 jours	28 jours	60 jours	90 jours
CPA	43.50	52.3	68.0	71.5	73.0
CPA+5% Sd	44.80	64.0	84.3	91.8	98.5
CPA+20% Sd	35.86	51.0	67.3	73.5	78.5
CPJ 42.5	40.80	50.5	66.0	70.8	74.3

**Coefficient de qualité de ciment immergé dans deux solutions agressives en fonction du temps et du type de ciment**

Ages	Type de ciment	Eau potable $R_{ep}$ (MPa)	Milieux agressifs			
			$MgCl_2$ (5%)		$Na_2SO_4$ (5%)	
			$R_s$	A	$R_s$	A
28 Jours	CPA	68.00	64.00	0.941	62.50	0.919
	CPJ	66.00	67.50	1.023	67.25	1.019
	CPA+20% Sd	67.30	69.45	1.032	66.50	0.988
90 Jours	CPA	73.00	65.85	0.902	63.60	0.871
	CPJ	74.30	81.00	1.090	79.80	1.074
	CPA+20% Sd	78.50	86.15	1.097	85.20	1.085

**Résistances mécaniques à 28 jours du mortier en fonction du type de ciment**

Type de ciment	Résistance à la compression à 28 j (MPa)	Résistance à la flexion à 28 j (MPa)	Résistance à la traction par flexion à 28 j (MPa)
MR	46.00	8.30	7.20
M20	43.30	7.80	6.75
M10	49.70	8.95	7.90

**Variation linéaire du mortier en fonction du temps et du type de ciment**

Type de ciment	La variation de longueur $\Delta L/L$ (mm/m)			
	Les jours	3 j	7 j	28 j
MR	retrait	230	300	520
	gonflement	82	100	129
M20	retrait	190	260	450
	gonflement	78	93	122
M10	retrait	140	240	425
	gonflement	73	90	115

**Variation de la masse du mortier en fonction du temps et du type de ciment**

Type de ciment	La variation de masse $\Delta M/M$ (g/kg)			
	Les jours	3 j	7 j	28 j
MR	retrait	34.5	37.5	39.5
	gonflement	10.8	14.3	19.6
M20	retrait	33.5	35	36.5
	gonflement	10.6	12.5	17.8
M10	retrait	31	33	34
	gonflement	7.2	10.5	16.3

**Porosité accessible à l'eau des bétons en fonction du temps et du type de ciment**

bétons	$P_{28j}$ (%)	$P_{180j}$ (%)
BO	9.4	8.8
B20	10.3	7.7
B10	9.0	6.0

**Propriétés mécaniques des bétons**

bétons	Résistance à la compression (Mpa)				Résistance à la flexion (Mpa)				Résistance à la traction par fendage (Mpa)			
	7	28	90	180 j	7	28	90	180 j	7	28	90	180 j
BO	27.4	41.5	44.0	45.0	4.6	7.5	8.0	8.2	2.4	3.8	4.1	4.2
B20	25.0	37.2	40.9	46.0	4.3	6.5	7.1	8.3	2.2	3.3	3.7	4.3
B10	26.6	44.7	51.0	55.0	4.9	8.1	9.3	9.9	2.5	4.2	4.8	5.1

**Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton ( $\epsilon_{1e}$ ) en fonction des contraintes relatives ( $\eta$ ) pour les séries de prismes**

$\times 10^{-5}$

$\eta$	B20	BO	B10
0,1	3,25	4,75	2,25
0,2	11,5	12,5	6,1
0,3	21,5	20	11,5
0,4	29,75	28,75	19
0,5	41	41,25	26,5
0,6	52,25	53,75	36,5
0,7	64	85	47,5
0,8	82	140	59,5
0,9	107,5	250	74,5

**Déformations élasto-instantanées totales longitudinales ( $\epsilon_{ITe}$ ) en fonction des contraintes relatives ( $\eta$ ) pour les séries de prismes**

$\times 10^{-5}$

$\eta$	B20	BO	B10
0,1	6,75	5,25	2,5
0,2	13,5	13,5	6,75
0,3	22	21	12,5
0,4	31	30,25	19,5
0,5	43,25	43	27,5
0,6	55	59	37,5
0,7	71,5	85	50
0,8	87,25	140	62,5
0,9	115	260	78

**Module de déformabilité (E) du béton en fonction des contraintes relatives ( $\eta$ ) pour les séries de prismes**

(MPa)  $\times 10^{-3}$

$\eta$	B20	BO	B10
0,1	51,5	65,26	87
0,2	46,5	52,5	78
0,3	42	46,5	60
0,4	38,5	43,13	51
0,5	35,75	38,5	46,5
0,6	32,5	34,61	42,5
0,7	30	29,5	39
0,8	27	23,62	35
0,9	21	11,16	29

**Module d'élasticité des bétons**

(MPa)  $\times 10^{-3}$

B20	BO	B10
42.80	44.20	47.00

**Perméabilité des différents bétons après 28 et 180 jours de durcissement**

bétons	$K_{28j} (m/s) \times 10^{-12}$	$K_{180j} (m/s) \times 10^{-12}$
BO	4.00	3.10
B20	4.45	2.55
B10	3.35	2.00

## *TABLE DES MATIÈRES*



## *LISTE DES FIGURES & TABLEAUX*

## *INTRODUCTION GÉNÉRALE*

## *PREMIERE PARTIE: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE*

## *CHAPITRE I : MATÉRIAUX CIMENTAIRES*

*CHAPITRE II : STRUCTURE POREUSE,  
LA DÉFORMABILITÉ & LA DURABILITÉ DU BÉTON*

## *DEUXIEME PARTIE: ÉTUDE EXPÉRIMENTALE*

## *CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES*

## *CHAPITRE IV : ÉTUDE DU LIANT & MORTIER NORMALISÉ*



*CHAPITRE V : PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES,  
LA DÉFORMABILITÉ & LA DURABILITÉ DU BÉTON*

## *CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES*

## *RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

*LISTE DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS  
ISSUES DE LA THÈSE*

## *ANNEXES*

## RÉSUMÉ

**E**n Algérie, la demande du marché pour le ciment a fortement augmenté, suivant le développement de l'industrie et les besoins de l'urbanisation croissante. La recherche d'un ciment moins coûteux en utilisant des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour pallier au déficit dans la fabrication du ciment.

La contribution de l'ajout du sable de dune finement broyé (Sd) à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets: un effet physico-chimique et un effet chimique. Son rôle est d'une part de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, de réagir en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances physico-mécaniques du ciment et du béton. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

Les résultats ont démontré que jusqu'à 20% Sd pour remplacer le ciment Portland peut être utilisé avec une finesse de 4000 cm<sup>2</sup>/g sans affecter négativement la résistance à la compression, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10 %. Au-delà d'une teneur de 20%, l'effet de dilution devient prépondérant et entraîne une diminution des résistances à la compression. Le sable de dune finement broyé, malgré sa nature cristalline, présente une réactivité pouzzolanique partielle.

L'utilisation du sable de dune finement broyé améliore globalement la structure poreuse du béton et contribue aussi à la densification de l'interface (mortier/gravier). De ce fait, le sable de dune finement broyé modifie les caractéristiques de rupture (déformabilité), ce qui permet une nette augmentation de la durabilité du béton.

Ces résultats justifient bien l'intérêt que présente la valorisation du sable de dune. Toutefois, afin d'assurer le développement de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et techniques.

**Mots clés:** Ciment, Béton, Sable de dune finement broyé, Performances physico-mécaniques, Déformabilité et Durabilité.

## ABSTRACT

**I**n Algeria, the market demand for cement has strongly increased, because of the industrial development and the needs for the increasing urbanization. Searching for cheaper cement made of local natural resources has become a major concern to compensate the deficit in the manufacture of cement.

The contribution of the addition the finely crushed dune sand (Ds) on the cement binding activity results primarily from two effects: a physico-chemical effect and a chemical effect. Its role is on the one hand it changes the hydration process of cement as well as the structuring of hydrated products, on the other; it reacts in the cementing medium and develops new hydrated products. These effects act simultaneously and in a complementary way on the physico-mechanical performances of cement and concrete. The third physical effect which is the granular effect related to the changes induced by the presence of the fine particles in the solid skeleton of the mixture.

The results proved that up to 20% Ds as Portland cement replacement could be used with a fineness of 4000 cm<sup>2</sup>/g without affecting adversely the compressive strength, with an optimum effect for a percentage of the order of 5% to 10%. Beyond a content of 20%, the dilution effect becomes dominant and leads to decreased compressive strengths. The finely crushed dune sand, despite its crystalline nature, presents a partial pozzolanic reactivity.

The use of the finely crushed dune sand improves overall porous structure of concrete and also contributes to the thickening of the interface (mortar/gravel). Thus, the finely crushed dune sand change the fracture characteristics (deformability), this allows an increase net in durability of concrete.

These results justify well the interest that presented valorization of the dune sand. However, to ensure the development of this vital building material, the approach of sustainable development should be incorporated into the production of cement and concrete, which will enable it to reach a balance between the constraints of environmental protection and the economic and technical considerations.

**Key words:** Cement, Concrete, Finely crushed dune sand, Physico-mechanical performances, Deformability and Durability.

---

**Université Mohamed Khider Biskra**  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil & Hydraulique

*Thèse de doctorat en sciences*

Spécialité : **Génie civil**

Option : **Matériaux de Construction**

Présenté par

*Salim Guettala*

*Thème*

**Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton**

---