
UNIVERSITÉ MOHAMED KHEIDER BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

N° d'ordre:.....

Série:.....



MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : **GÉNIE CIVIL**

Option : **M.D.C**

Présenté par

SALIM GUETTALA

- Thème -

**Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune
finement broyé au ciment, sur la stabilité de béton**

Soutenue le : *08/03/2007*

Devant le jury:

- | | | | |
|----------------|---------------------|---------------|-----------------------|
| □ Président : | R. CHEBILI | M. C | UNIVERSITE DE BISKRA. |
| □ Rapporteur : | B. MEZGHICHE | M. C | UNIVERSITE DE BISKRA. |
| □ Examineurs : | M. MELLAS | Pr. Ha | UNIVERSITE DE BISKRA. |
| | A. ZATAR | M. C | UNIVERSITE DE BISKRA. |

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur B. Mezghiche pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour ce travail qu'il a guidé par de judicieux conseils.

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

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur R.Chebili, Président de jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en président 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.

- ✓ M. Mellas.
- ✓ A. Zatar.

Je remercie très chaleureusement mes parents, mes sœurs, mes frères, mes collègues, et tous ceux qui m'ont aidé à finaliser ce travail.

RÉSUMÉ

L'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur la stabilité de béton résulte essentiellement de deux effets : un effet physico-mécanique 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 sur les performances des matériaux : résistance mécanique, propriétés physiques et performances de durabilité. Aussi un troisième effet physique, Il s'agit de l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

La prise en compte de l'influence des additions minérales sur les caractéristiques physico-mécaniques, de béton, devrait avoir une valeur variable en fonction de l'âge et des paramètres de formulation.

Mots clés

Ciment, Béton, Résistance mécanique, Durabilité, Caractéristiques physico-mécaniques et Sable de dune.

ملخص

إضافة رمل الكثبان الذاعم و المسحوق للإسمنت له تأثير على إستقرار الخرسانة الناتج خاصة عن فعلين: فعل فيزيوميكانيكي و فعل كيميائي متولد عن إعادة النشاط الكيميائي في الوسط الإسمنتي، في بعض المراحل المعدنية، متميزة بخواص بوزولانية أو مائية، هذه الأفعال تؤثر أيضا على جودة المواد: المقاومة الميكانيكية، الخواص الفيزيائية و جودة الديمومة. وهناك أيضا فعل ثالث فيزيائي متعلق بالفعل الحبيبي الخاص بالتغيرات المحدثة بوجود جزيئات دقيقة في الهيكل الصلب للخليط.

الأخذ بعين الاعتبار تأثير الإضافات المعدنية على الخواص الفيزيوميكانيكية، للخرسانة، يجب أن يكون له قيمة متغيرة بدلالة العمر و عناصر التركيبية.

كلمات المفاتيح

إسمنت, خرسانة, مقاومة ميكانيكية, الديمومة, خواص فيزيوميكانيكية و رمل الكثبان.

ABSTRACT

The influence of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the stability of concrete results primarily from two effects: a physic-mechanical effect and a chemical effect generated by the chemical reactivity in cementing medium, certain mineral phases, characterized by pouzzolanics or hydraulics properties. These effects act simultaneously on the performances of materials: mechanical resistance, physical properties and performances of durability. Also a third physical effect, it acts of the granular effect relating to the modifications induced by the presence of the fine particles in the solid skeleton of the mixture.

The taking into account of the influence of the mineral additions on the physic-mechanical characteristics, of concrete, should have a variable value according to the age and of the parameters of formulation.

Key words

Cement, Concrete, Mechanical resistance, Durability, Characteristics physic-mechanical and Sand of dune.

TABLE DES MATIERES

<i>SOMMAIRE</i>	<i>PAGE</i>
<u>TABLE DES MATIERES</u>	1
<u>Liste des figures, tableaux et photos</u>	6
<u>INTRODUCTION GÉNÉRALE</u>	10
1/- Contexte.	
2/- Objectifs visés.	11
3/- Méthodologie de travail.	
<u>CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	
I.1. INTRODUCTION	13
I.2. HISTORIQUE.	
I.3. CONSTITUANTS ET FABRICATION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES ..	14
I.3.1 CONSTITUANTS	15
I.3.1.1. CIMENT.	
I.3.1.2. SQUELETTE GRANULAIRE	16
I.3.1.3. EAU.	
I.3.1.4. ADJUVANTS	17
I.3.1.4.1. Définition.	
I.3.1.4.2. Mode d'action.	
I.3.1.4.3. Caractères généraux.	
I.3.1.4.4. Avantages.....	18
I.3.1.5. LES AJOUTS.	
I.3.1.5.1. Définition.	
I.3.1.5.2. Classification des ajouts.	19
I.3.1.5.3. Effet.	
I.3.1.5.4. Le Comportement du ciment avec ajout.	20
I.3.1.5.5. Les enjeux environnementaux.	
I.3.1.5.6. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux.	21
I.3.1.5.7. LA POUZZOLANE.	22
I.3.1.5.7.1. Définition.	
I.3.1.5.7.2. La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes.	
I.3.1.5.8. LE LAITIER	23

I.3.1.5.8.1. Définition.	
I.3.1.5.8.2. Effet.	
I.3.1.5.9. LES CENDRES VOLANTES.	
I.3.1.5.9.1. Définition.	
I.3.1.5.9.2. Effet.....	24
I.3.1.5.9.3. Les cendres volantes confèrent aux bétons les propriétés suivantes.	
I.3.1.5.10. LES FILLERS.	
I.3.1.5.10.1. Définition.	
I.3.1.5.10.2. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes.	25
I.3.1.5.11. POUDRE DE SILICE.	
I.3.1.5.11.1. Définition.	
I.3.1.5.11.2. Effet.....	27
I.3.1.5.11.3. La fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes.....	31
I.3.1.5.11.4. Le sable de dune finement broyé.	
I.3.2. FABRICATION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES	33
I.3.2.1. Composition.	
I.3.2.2. Malaxage.	
I.3.2.3. Traitement de cure.	
I.4. MATURATION DU BÉTON	34
I.4.1 Hydratation.	
I.4.1.1. Définition.	
I.4.1.2. Aspects cinétiques et prise.	
I.4.1.3. Chimie d'hydratation du ciment portland avec ajouts.....	35
I.4.1.3.1. Définition.	
I.4.1.3.2. Hydratation et réaction pouzzolanique.....	36
I.4.1.3.2.1. Chaleur d'hydratation de la pouzzolane.....	37
I.4.1.3.2.2. Influence de la finesse de mouture sur l'activité de pouzzolane.....	39
I.4.1.3.3. Hydratation du laitier.	
I.4.1.3.3.1. Chaleur d'hydratation du laitier.....	40
I.4.1.3.3.2. Influence de la finesse de mouture sur l'activité du laitier.	
I.4.2. Le degré d'hydratation.	
I.4.3. Microstructure des matériaux cimentaires.	
I.4.3.1. La composition du ciment hydraté.	41
I.4.3.2. La composition des hydrates.	

I.4.3.2.1. Les silicates de calcium hydraté (CSH).	
I.4.3.2.2. La chaux hydraté (CH ou portlandite).....	42
I.4.3.2.3. Les aluminates hydraté.	
I.4.4. Les pores.	
I.4.4.1. Définition.	
I.4.4.2. L'état de l'eau dans les matériaux cimentaires.	43
I.4.4.3. L'influence de rapport E/C sur la porosité.	
I.4.5. Le ressuage	46
I.4.6. Retraits et gonflements.	
I.4.6.1. Définition.	
I.4.6.2. Recommandation.....	47
I.4.7. La perméabilité.	
I.4.7.1. Définition.	
I.4.7.2. L'influence de rapport E/C sur la perméabilité.....	48
I.4.7.3. L'influence de la durée de cure humide sur la perméabilité.	
I.5. LA DURABILITÉ	54
I.5.1. Résistances aux eaux agressives.	
I.5.1.1. Définition.	
I.5.1.2. Eaux pures et eaux douces.	55
I.5.1.3. Eaux contenant des sulfates.....	57
I.5.1.4. Eaux contenant des chlorures.....	59
I.5.1.5. Eau de mer.....	61
I.5.2. Action des chlorures seuls	63
I.5.3. Action des sulfates seuls	66
I.5.4. Conception de bétons chimiquement résistants	72
I.6. LA DÉFORMABILITÉ.	
I.6.1. Les déformations instantanées -courbe expérimentale	73
CONCLUSION	75
 <u>CHAPITRE II : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX</u> <u>UTILISÉES</u> 	
II. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES	76
II.1. SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ.	

II.1.1. Analyse chimique.	
II.1.2. Propriété physique.....	77
II.2. CIMENT.	
II.2.1. Ciment portland.	
II.2.1.1. Analyse chimique et minéralogique.	
II.2.1.2. Propriété physique.	
II.2.2. Ciment portland avec ajout.	78
II.2.2.1. Analyse chimique et minéralogique.	
II.2.2.2. Propriété physique.	
II.3. LE SABLE.	
II.3.1. Analyse granulométrique.	
II.3.2. Propriété physique.	79
II.4. LA PIERRE CONCASSÉE.	
II.4.1. Analyse granulométrique.	
II.4.2. Propriété physique.	
 <u>CHAPITRE III : ETUDE DU LIANT ET MORTIER DE CIMENT</u> <u>AVEC SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ</u> 	
III.1. CARACTÉRISTIQUE DE LA PÂTE	81
III.1.1. Propriétés mécaniques du liant.	
III.1.2. Propriétés physiques du liant.....	89
III.1.2.1. La consistance et la prise.	
III.1.2.2. Le gonflement.....	91
III 1.3. Action des eaux agressives.	
III.2. ETUDE DU MORTIER NORMALISÉ (SABLE/ CIMENT = 3)	94
III.2.1. Comportement mécanique.	
III.2.2. Retrait et gonflement.....	95
III.3. CONCLUSION	97
 <u>CHAPITRE IV : ETUDE DU BÉTON À BASE DU CIMENT AVEC</u> <u>SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ</u> 	
IV.1. INTRODUCTION	100
IV.2. COMPOSITION ET DOSAGE DU BÉTON.	

IV.3. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON	102
IV.4. LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON	105
IV.5. ABSORPTION D’EAU PAR IMMERSION	106
IV.5.1. Coefficient de ramollissement.....	107
IV.6. LA DÉFORMABILITÉ DU BÉTON	108
IV.7. CONCLUSION	111
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	114
<u>RECOMMANDATIONS</u>	115
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	116

LISTE DES FIGURES

<i>FIGURE</i>	<i>PAGE</i>
Figure (I.1) : Microsilica.....	26
Figure (I.2) : Effet de la fumée de silice sur l'hydratation du ciment.....	27
Figure (I.3) : Effet de la fumée de silice sur le compactage d'un mélange liant-granulats....	27
Figure (I.4) : Effet de la fumée de silice sur la compacité du béton.....	28
Figure (I.5) : Effet de la fumée de silice sur le ressuage.....	28
Figure (I.6) : Effet de la fumée de silice sur la cohésion interne.....	28
Figure (I.7) : Effet de la fumée de silice sur la réaction d'hydratation.....	30
Figure (I.8) : Effet de la fumée de silice sur la structure de la pâte de ciment.....	30
Figure (I.9) : Effet de la fumée de silice sur la perméabilité à l'eau.....	30
Figure (I.10) : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression.....	30
Figure (I.11) : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction.....	31
Figure (I.12) : Effet de la fumée de silice sur la résistance contre les agressions chimiques.	32
Figure (I.13) : Architecture atomique de silice cristallisée (ex : quartz)	32
Figure (I.14) : Architecture atomique de silice amorphe (ex : verre)	33
Figure (I.15) : L'analyse par (DRX) du sable de dune finement broyé.....	37
Figure (I.16) : Hydratation du clinker de ciment portland.....	37
Figure (I.17) : Hydratation du ciment à la pouzzolane.....	38
Figure (I.18) : Effet de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation de ciment portland.....	38
Figure (I.19) : Chaleur d'hydratation en fonction du temps.....	42
Figure (I.20) : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité.....	43
Figure(I.21): Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci.	45
Figure (I.22) : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80 % d'hydratation dans l'eau.....	45
Figure (I.23) : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau.....	48
Figure (I.24) : Influence de l'addition de laitier ou de cendres volantes sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps.....	48
Figure (I.25) : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C.....	49
Figure (I.26) : Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité de bétons réalisés avec diverses catégories de ciments.....	49
Figure (I.27) : Evolution dans le temps des pores des pâtes de ciment pouzzolanique.....	50
Figure (I.28) : Evolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure.....	50
Figure (I.29) : Nombre minimal de jours de cure pour le béton compact.....	56
Figure(I.30): Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h.	51
Figure (I.31) : Perméabilité à l'air du béton en fonction du E/C et de la durée du mûrissement humide.....	51

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET PHOTOS

Figure (I.32) : Perméabilité à l'oxygène de bétons fabriqués avec et sans ajouts minéraux (fumée de silice et cendres volantes).....	52
Figure (I.33) : Effet du remplacement du ciment par de la fumée de silice sur perméabilité à l'air du béton.....	52
Figure (I.34) : Effet du remplacement du ciment par une cendre volante sur la perméabilité à l'air du béton.....	53
Figure (I.35) : Influence des additions minérales sur le coefficient de diffusion relatif.....	53
Figure (I.36) : Influence des cendres volantes sur le coefficient de diffusion des ions chlore dans le béton.....	54
Figure (I.37) : Lessivage de la chaux dans une éprouvette de béton en fonction d'eau percolée et la teneur en pouzzolane du ciment.....	56
Figure (I.38) : Pertes de masse en fonction du temps d'éprouvettes de mortier confectionné avec différents ciments, conservées dans une eau douce de PH 5 à 5.5.....	57
Figure (I.39) : L'efficacité de laitiers à réduire les expansions dues aux sulfates.....	58
Figure (I.40) : Expansion d'un béton à base de ciment portland (-) et ciment pouzzolanique (---) En fonction de la durée d'immersion dans les eaux agressives.....	59
Figure (I.41) : Pénétration de quelques sels de dégivrage dans les ciments portlands et pouzzolanique.....	60
Figure (I.42) : Coeff. de diffusion d'ions Cl^- en fonction de E/C pour des pâtes exposées à une solution de Na Cl.....	61
Figure (I.43) : Effet du type de ciment sur la pénétrabilité d'ions de chlorure après mois D'exposition à l'eau de mer.....	62
Figure (I.44) : Variation de la concentration des chlorures libre en fonction de la quantité de C_3A contenue dans le ciment.....	63
Figure (I.45) : Chute de la résistance à la compression de différents types de ciment Après la percolation des sulfates.....	69
Figure (I.46) : Effet de la substitution de ciment portland avec de la pouzzolane naturelle sur l'expansion de mortiers.....	70
Figure (I.47) : La variation de la résistance à la compression des pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatique en fonction de la durée de cure.....	71
Figure (I.48) : La courbe expérimentale [contrainte-déformation].....	74
Figure II.1 : Représentation schématique d'un broyeur à boulets.....	76
Figure II.2 : Courbe granulométrique du sable.....	80
Figure II.3 : Courbe granulométrique de la pierre concassée.....	80
Figure III.1 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,4$).....	82
Figure III.2 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,4$).....	82
Figure III.3 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,3$).....	83

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET PHOTOS

Figure III.4 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,3$).....	83
Figure III.5 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$).....	84
Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$).....	84
Figure III.7 : La variation de La résistance à la compression de ciment en [%] par rapport au pâte de référence en fonction de la durée de cure et de la teneur en sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$).....	85
Figure III.8 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du type de ciment ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$).....	85
Figure III.9 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage de sable de dune broyé et du rapport $E/(C+Sd)$, $F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$	85
Figure III.10 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage du sable de dune broyé et du rapport $E/(C+Sd)$, $F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$	86
Figure III.11 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage et de la finesse de mouture du sable de dune broyé, $E/(C+Sd) = 0,4$	86
Figure III.12 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage et du de la finesse de mouture du sable de dune broyé, $E/(C+Sd) = 0,3$	86
Figure III.13 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage et de la finesse de mouture de sable de dune broyé, $E/(C+Sd) = 0,25$	87
Figure III.14 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment a 20 % de sable de dune broyé en fonction de la finesse de mouture et du rapport $E/(C+Sd)$	87
Figure III.15 : Variation de la consistance de la pâte en fonction du type de ciment.....	89
Figure III.16 : Temps de début et de fin de prise de la pâte en fonction du type de ciment..	90
Figure III.17 : Gonflement (à chaud et à froid) de la pâte en fonction du type de ciment...	91
Figure III.18 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution MgCl_2 en fonction du temps et du type de ciment.....	92
Figure III.19 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution Na_2SO_4 en fonction du temps et du type de ciment.....	93
Figure III.20 : Résistance du mortier à la (compression, flexion, traction) à 28 jours en fonction du type de ciment.....	94
Figure III.21 : Variation linéaire du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de retrait.....	96
Figure III.22 : Variation linéaire du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de gonflement.....	96
Figure III.23 : Variation massique du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de retrait.....	96
Figure III.24 : Variation massique du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de gonflement.....	97

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET PHOTOS

Figure IV.1 : Résistance à la compression du béton en fonction du temps et du type de ciment.....	103
Figure IV.2 : Résistance à la flexion du béton en fonction du temps et du type de ciment..	103
Figure IV.3 : Résistance à la traction par fendage du béton en fonction du temps et du type de ciment.....	103
Figure IV.4 : Variation du coefficient de perméabilité du béton en fonction du temps et du type de ciment.....	106
Figure IV.5 : Variation du coefficient d'absorption d'eau du béton en fonction du type de ciment.....	107
Figure IV.6 : Variation du coefficient de ramollissement du béton en fonction du type de ciment.....	107
Figure IV.7 : Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton (ϵ_{1el}) en fonction des contraintes relatives (η) pour les séries de prismes (CPJ, CPA et CPA + 20%).....	109
Figure IV.8 : Déformation élasto-instantanées totales longitudinales (ϵ_{1Tel}) en fonction des contraintes relatives (η) pour les séries de prismes (CPJ, CPA et CPA + 20%).....	110
Figure IV.9 : Module de déformabilité (E) du béton en fonction des contraintes relatives (η) pour les séries de prismes (CPJ, CPA et CPA + 20%).....	110
Figure IV.10 : Module d'élasticité des bétons (CPJ, CPA et CPA + 20%).....	110

LISTE DES TABLEAUX

<i>TABLEAU</i>	<i>PAGE</i>
Tableau (I.1) : Classification des ajouts selon leur réactivité.....	19
Tableau (I.2) : Coefficient de diffusion des différents types de ciment.....	65
Tableau (I.3) : Composition des bétons en fonction du niveau d'agressivité.....	72
Tableau II.1 : Analyse chimique du sable de dune finement broyé.....	77
Tableau II.2 : Composition chimique et minéralogique de clinker.....	77
Tableau II.3 : Composition chimique et minéralogique de (CPJ-CEM II/42.5A).....	78
Tableau II.4 : Analyse granulométrique du sable.....	78
Tableau II.5 : Analyse granulométrique des pierres concassées.....	79
Tableau IV.1 : Récapitulation de la composition du béton.....	102

LISTE DES PHOTOS

<i>PHOTO</i>	<i>PAGE</i>
Photos (I.1) : Micrographies de l'ettringite.....	66
Photos (IV.1) : Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10×10×40) cm ³	109

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1/- CONTEXTE

Aujourd'hui, le béton occupe la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en oeuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son coût faible.

Toutefois, le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences et à de nouveaux besoins. [71].

- ☞ La 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.
- ☞ Les besoins des divers intervenants dans un projet de construction ont évolué. Ainsi, les maîtres d'ouvrages exigent un béton durable.

Face à ces besoins, une des caractéristiques les plus importantes des ciments est la texture, c'est à dire la façon dont s'arrangent la matière et les 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,...). 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. [77].

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-mécanique 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 sur les performances des matériaux : résistance mécanique, propriétés physiques et performances de durabilité. Aussi un troisième effet physique, Il s'agit de l'effet

granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

A l'heure actuelle, les cimentiers, qui sont généralement équipés de laboratoires de recherche, essaient de mettre au point des ciments de plus en plus performants. La recherche d'un liant le moins coûteux en utilisant des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment.

Le sable de dune (SD) est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est composé de minuscules grains de quartz. L'analyse par diffractométrie aux rayons (X) a mis en évidence le rôle pouzzolanique du (SD). En effet, la faible quantité de portlandite détectée par (DRX) dans les pâtes de ciment en présence de (SD), traduit la réaction pouzzolanique partielle de cet ajout, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte. Et montre aussi que le (SD) est constitué de (SiO_2) bien cristallisé du type "Low-Quartz". [51], [53].

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, et permet d'obtenir une nouvelle variété de [CPJ], ainsi d'établir la possibilité de la diminution du prix de revient du ciment.

2/- OBJECTIFS VISÉS

A la lumière de ce qui a été évoqué précédemment, et dans le but d'allonger la durée de vie des gisements des matières premières et d'augmenter la production du ciment, l'objectif recherché dans notre travail est d'évaluer donc expérimentalement la contribution combinée des effets physico-mécaniques, et éventuellement chimiques de l'ajout du sable de dune finement broyé sur les performances mécaniques et de durabilité du ciment, mortier et béton.

3/- MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique, qui comporte une synthèse bibliographique sur les méthodes de productions des ajouts naturels ou artificiels, suivie par une bibliographie concernant l'hydratation de ciment portland avec les différents ajouts, ainsi que la composition des hydrates obtenus, clôturée par un certain nombre de connaissance de base sur les performances de durabilité et la déformabilité.

- Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques des matériaux utilisés (ciment, sable de dune finement broyé, sable, gravier).
- Le troisième chapitre concerne l'étude du liant et mortier du ciment avec sable de dune finement broyé.
- Le quatrième chapitre consiste à l'étude de béton à base du ciment avec sable de dune finement broyé.
- Enfin, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

CHAPITRE I**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE****I.1. INTRODUCTION**

La connaissance du matériau béton fait appel à diverses disciplines scientifiques : (la chimie, la physique et la mécanique) pour améliorer sa qualité et son développement durable. Ce chapitre bibliographique décrit en premier lieu les caractéristiques physico-chimiques des composants du béton : l'eau, les granulats, le ciment, les adjuvants et les ajouts. Les ressources de ces ajouts naturels ou artificiels avec leur historique, les méthodes de production de ces ajouts et leur classification, et une bibliographie concernant les principales réactions chimiques, les facteurs qui affectent la réactivité des ajouts, ainsi que les transformations physico-mécaniques liées aux processus d'hydratation, telle que la porosité, l'état de l'eau présente dans le matériau, le ressuage, le retrait et la perméabilité, suivi par des synthèses bibliographiques sur les performances de durabilité et la déformabilité.

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» Ca(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 [22, 27, 45].

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. Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile.

En 1817, 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 seulement 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. [84].

Mais 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.

Les fours rotatifs firent leur apparition vers 1880 et sont toujours utilisés. 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 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. [33].

Bien que toujours composés de ciment, de granulats et d'eau, les bétons à hautes performances sont des matériaux nouveaux qui possèdent des propriétés mécaniques élevées, associées à une grande durabilité.

Les améliorations apportées par l'industrie des liants hydrauliques à la qualité des ciments, la mise au point d'adjuvants spécifiques de synthèse ainsi que l'emploi d'ultrafines ont permis ce progrès spectaculaire.

I.3. CONSTITUANTS ET FABRICATION 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, écoulement, etc.).

I.3.1. CONSTITUANTS

Les trois composants de base d'un béton sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés 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.3.1.1. 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 (CaSO_4) finement broyé et d'ajouts éventuels. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) 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 cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de 3000 cm^2/g , elle passe à 4000 cm^2/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 (CaCO_3) et 20 % d'argile. L'argile est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'autres phases qui sont présentes à de faibles proportions telles que l'oxyde de fer (Fe_2O_3), le magnésium (MgO), l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O). Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique C_3S dénommé alite, de silicate bicalcique C_2S ou bélite, d'aluminate C_3A ou célite, d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF ou Felite, et d'autres phases mineures. Le C_3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70 % de sa masse. Le C_2S , le C_3A et le C_4AF représentent respectivement 15 à 30 %, 5 à 10 % et 5 à 15 % du clinker classique. (Pour plus de détails voir [89]). Ces composés sont refroidis, broyés et mélangés au gypse pour former le ciment.

I.3.1.2. 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. Il permet aussi de diminuer la quantité de ciment utilisée. Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur 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.[8]. 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. [Neville, 2000]. La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive (développement d'un lien avec le ciment sans influence significative sur le procédé de durcissement ni la solidité). 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-flexion du béton. Plus la résistance des granulats est importante, meilleure sera la résistance définitive du béton.

I.3.1.3. 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 H₂O 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 inter-granulaires. 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 et fines) avec elle. [33].

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 : [33].

- Risque de ressuage.
- Augmentation de la porosité.
- Risque de ségrégation des constituants du béton.
- Diminution de la compacité et corrélativement des résistances.
- Augmentation du retrait.

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.3.1.4. ADJUVANTS

I.3.1.4.1. Définition

On distingue essentiellement les adjuvants hauts réducteurs d'eau (superplastifiants). Le dosage en adjuvants n'excède pas 5 % de la masse du ciment. Ils ont pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. A titre indicatif, les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35 % tout en gardant une même maniabilité. [47].

I.3.1.4.2. Mode d'action

En contact des grains de ciment, et d'une manière générale, les superplastifiants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment. [47]. L'adjonction d'un superplastifiant peut se traduire également par une augmentation notable de la vitesse de durcissement, à 24 h après le gâchage, le mortier a atteint plus de la moitié de sa résistance à 28 jours.[81].

I.3.1.4.3. Caractères généraux

- ✧ Mise en œuvre : Augmente la maniabilité du béton et le maintien de la rhéologie.
- ✧ Performances mécaniques : Réduction d'eau importante, augmente considérablement les résistances mécaniques à court et moyen termes.

- ✧ Compacité du béton et durabilité.
- ✧ Augmentent la viscosité du béton afin d'éviter toute ségrégation.
- ✧ Modifier la viscosité du béton afin d'éviter tout effet de lessivage pour le cas des bétons coulés dans l'eau.

(D'après la Notice technique, Edition avril 2004 ; Sika France S.A.).

I.3.1.4.4. Avantages

A/- Avantages économiques

La propriété de la plupart des adjuvants chimiques de réduire l'eau est recherchée pour deux raisons. En abaissant la quantité d'eau de gâchage nécessaire, ils augmentent la résistance à la compression pour une teneur en ciment et un affaissement donnés. Ceci 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.[18].

B/- Avantages écologiques

Les superplastifiants peuvent réduire la porosité du matériau en rendant le béton maniable avec moins d'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 du secteur de la construction. [18].

C/- Avantages architecturaux

Le béton, bien qu'il soit relativement bon marché, est unique comme matériau de construction parce qu'il peut être coulé dans différentes formes et tailles. Par ailleurs, comme l'utilisation de superplastifiants améliore la maniabilité et les propriétés mécaniques par réduction d'eau, les architectes peuvent désormais exploiter des modèles complètement nouveaux pour des structures élégantes possédant des capacités portantes normales. [18].

I.3.1.5. LES AJOUTS

I.3.1.5.1. Définition

Les ajouts 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 ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc..., 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, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz. [37].

I.3.1.5.2. Classification des ajouts

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des ajouts qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs [81]. Les ajouts 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 ajouts selon leur réactivité, d'après [44].

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

I.3.1.5.3. Effet

En principe les matériaux hydrauliques, hydrauliques latentes et pouzzolaniques contiennent les mêmes composants chimiques. Les proportions sont toute fois différentes. Les liants hydrauliques sont des matières qui durcissent dans et avec l'eau et qui sont ensuite insolubles dans l'eau (ciment Portland, chaux hydraulique).

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif. Les substances pouzzolaniques contiennent encore moins, voire pas d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif. Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton. La fumée de silice représente dans ce groupe l'activité la plus importante, parce qu'elle possède la plus faible part cristalline et la plus grande surface spécifique. Les substances inertes ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins. L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton. [44]

Les ajouts présentent une activité liante croissante 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. [9]. Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique des ajouts. 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.

I.3.1.5.4. Le comportement du ciment avec ajout

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout : [37].

- 1/- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- 2/- 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.
- 3/- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons.

I.3.1.5.5. Les enjeux environnementaux

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_2) 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 pour ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets à l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Les principaux rejets en terme de volume sont le dioxyde de carbone (CO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2) et les poussières. Dans le secteur cimentier, les émissions de (CO_2) 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_2) contenu dans le calcaire. Les sources d'émissions de (CO_2) comprennent donc l'utilisation de combustibles pour la production d'énergie et la décarbonatation du calcaire. [84].

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. [84].

I.3.1.5.6. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux

A/- Bénéfices fonctionnels

- ✓ L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- ✓ Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- ✓ Prise et durcissement pour les ajouts 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.

B/- Bénéfices économiques

- ✓ La plupart des ajouts minéraux 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 béton.

C/- Bénéfices écologiques et environnementaux

- ✓ Diminution de l'émission du (CO_2) par l'industrie cimentière.
- ✓ Élimination des sous-produits de la nature.

I.3.1.5.7. LA POUZZOLANE

I.3.1.5.7.1. Définition

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. [11, 58]. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers : Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins-agrégats et du retrait au séchage. [64]. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment [12-13]. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



I.3.1.5.7.2. La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes

A l'état frais, les pouzzolanes 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. [2].

A l'état durci, les pouzzolanes 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 :

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques :
 - ↳ Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
 - ↳ Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

I.3.1.5.8. LE LAITIER

I.3.1.5.8.1. Définition

Dans le procédé de production de fonte dans les hauts fourneaux, le laitier qui surnage au dessus de la fonte est tout de suite refroidi après la coulée et par conséquent il est rapidement vitrifié. La majorité des éléments tels que Ca, Mg, Si, et Al sont sous forme de phase non cristalline. Une fois broyé à environ 400 m²/kg et 500 m²/kg, ce produit développe de bonnes propriétés cimentaires. Les laitiers de haut fourneau trouvent leur utilisation surtout dans les ciments et pour les travaux routiers. Il existe d'autres laitiers métallurgiques provenant de métaux non ferreux qui pourraient être utilisés. [59].

I.3.1.5.8.2. Effet

Le laitier fondu a une densité plus faible (de l'ordre de 2,8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7) de telle sorte que le laitier fondu flotte au dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément [1]. La quantité de laitier recueillie par tonne de fonte varie suivant les minerais utilisés et les régions de production [59]. Puisque les compositions chimiques des matières premières et des fondants pour la production de la fonte doivent être très bien ajustée pour baisser la température de la fonte, la composition chimique des laitiers est relativement constante. La composition minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement. [54].

Plus rapide est le refroidissement (la trempe), plus vitreux est le laitier. Le laitier refroidi est en forme de granules ou boulettes et demande un broyage pour être utilisé comme ajout minéral. En général, le laitier s'hydrate de la même manière que les cendres volantes de la classe [C]. Cependant, son effet sur la résistance commence à se faire sentir à partir de 7 jours, tandis que les cendres de la classe [F] ne développent des résistances qu'à partir de 4 semaines. [37]. Les particules de laitier < 10 µm contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules > 45 µm ont de la difficulté à s'hydrater.

I.3.1.5.9. LES CENDRES VOLANTES

I.3.1.5.9.1. Définition

Lors de sa combustion dans les centrales thermiques, le charbon pulvérisé passe à travers une zone de très haute température dans le four. Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales tel que l'argile, le quartz et le feldspath passent en fusion. Les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères de verre. La majorité de ces sphères sont emportées par le

courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans une précipiteuse électrostatique. [37]. Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1 μm à 100 μm (50 % < 20 μm). La forme et la granulométrie ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.

I.3.1.5.9.2. Effet

Les cendres volantes commencent à réagir après environ une semaine et se transforment en silicate de calcium hydraté en raison de l'hydroxyde de calcium produit lors de l'hydratation du ciment. La réactivité pouzzolane des cendres volantes de charbon repose essentiellement sur leur teneur en verre. De surcroît, une connaissance exacte de la composition des grains est nécessaire. L'hydratation est principalement déterminée par la partie de grains plus petits que 10 μm . Cette partie ne devrait pas excéder 50 %. La petite taille des particules améliore l'échelonnement des grains fins pour ce qui concerne la composition granulométrique avec une faible part de cavités creuses. Les cendres volantes se caractérisent par une surface lisse non-absorbante, ce qui réduit les besoins en eau. L'effet "roulement à billes" des particules sphériques améliore de surcroît l'ouvrabilité. [37].

I.3.1.5.9.3. Les cendres volantes confèrent aux bétons les propriétés suivantes

- ❑ Le remplacement du ciment par des cendres volantes dans le béton réduit de façon significative la chaleur d'hydratation.
- ❑ La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.
- ❑ Démoulage amélioré.
- ❑ Diminue le ressuage.
- ❑ Réduit les risques de ségrégations.
- ❑ Améliore les performances mécaniques à longs termes.
- ❑ Réduit le coût des ciments, la quantité de fissures et de défauts.
- ❑ Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- ❑ Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- ❑ Un mariage avantageux pour l'environnement.

I.3.1.5.10. LES FILLERS

I.3.1.5.10.1. Définition

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les

graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bomblet: [10]. IL y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

I.3.1.5.10.2. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment :

- ❑ Accroissement de la maniabilité.
- ❑ Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- ❑ Réduction de la fissuration.
- ❑ Limite le ressuage.
- ❑ Augmente la cohésion.
- ❑ Facilite le démoulage immédiat.
- ❑ Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

I.3.1.5.11. POUDRE DE SILICE

I.3.1.5.11.1. 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.

- ☒ Production mondiale estimée à 600 000 t /an. N°1 mondial : Elkem Chemical (Norvège).
- ☒ En France, Pechiney Électrométallurgie a produit en 1992, 40 000 t sur 8 sites de production. [30].
- ☒ Utilisée dans les bétons hautes performances : Augmente la fluidité, la résistance à la compression (qui passe, à 28 jours, de 20-40 MPA à 60-120 MPA) et diminue la perméabilité. [30].

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 étaient remplacés par la fumée de silice dont le prix de vente était initialement bas. Dans les années 1990, la dégradation des infrastructures a placé l'accent sur

des préoccupations au niveau de la durabilité du béton et ainsi, la fumée de silice a trouvé application dans la production de 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.

Les fumées de silice jouent un rôle particulier du fait, de leur composition (taux de silice) à (70 %) et, d'autre part de leur finesse (supérieure à $10\,000\text{ m}^2/\text{Kg}$).

Pierre-Claude Aïtcin explique: La dernière génération de (BHP), les bétons de poudres réactives (BPR) faits de sable, de quartz et de fumée de silice broyés, le tout soigneusement dosé, pousse la performance encore plus loin. La maîtrise de cette technologie permet d'obtenir des bétons dont la résistance à la compression varie de 200 à 800 MPA, ce qui se compare aux meilleurs aciers et composites sur le marché. Les BPR sont déjà très compacts, beaucoup moins poreux que les autres BHP et ils constituent une barrière quasi impénétrables contre le sel.

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'ajout et de stabilisateur. Les microsílices sont un sous-produit de la fabrication du silicium et du ferro-silicium. 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 composés à 85-95 % d'oxyde de silicium vitreux / hyalin (SiO_2 amorphe), ont une très grande surface spécifique, qui est du même ordre de grandeur que la fumée de cigarettes. [44].

Qu'on l'appelle microsíllica, fumée de silice condensée ou plus régulièrement fumée de silice, tous ces termes représentent la même pouzzolane et celle-ci possède des propriétés qui sont bénéfiques au béton.



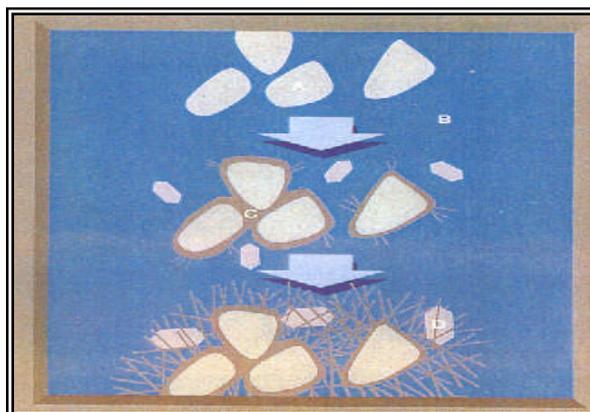
Figure (I.1) : Microsíllica, d'après [31].

Les nanosílices sont un précipité siliceux avec une surface spécifique d'environ $200\text{ m}^2/\text{g}$. Ils se composent de SiO_2 amorphe dont les particules ont un diamètre environ $10\times$ inférieur à celui des microsílices et sont utilisées en qualité de stabilisateur et d'agent de pompage. [44].

I.3.1.5.11.2. Effet

La fumée de silice est l'ajout pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, le SiO_2 amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté (CSH-Gel) avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation du ciment. Figure (I.2).

Figure (I.2) : Effet de la fumée de silice sur l'hydratation du ciment
 A : ciment portland, B : l'eau, C : (CSH), D : C-H, d'après [31].



La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolane 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 de poussières de silice admissibles, par exemple à 11% 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. 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. [5]. Figure (I.3), (I.4).

Figure (I.3): Effet de la fumée de silice sur le compactage d'un mélange liant-granulats,
 d'après [5].

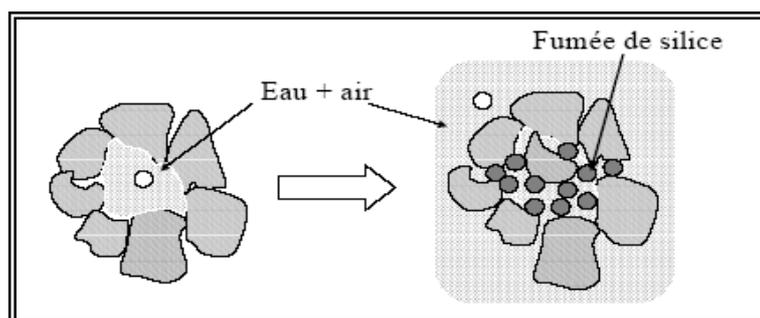
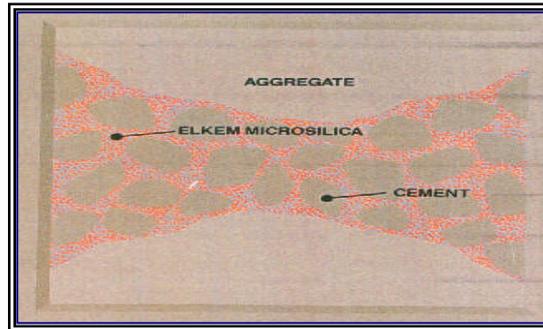


Figure (I.4) : Effet de la fumée de silice sur la compacité du béton, d'après [31].



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

- ☺ Faible tendance au ressuage, à la sédimentation. Figure (I.5).
- ☺ Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope. Figure (I.6).
- ☺ 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.5) : Effet de la fumée de silice sur le ressuage, d'après [31].

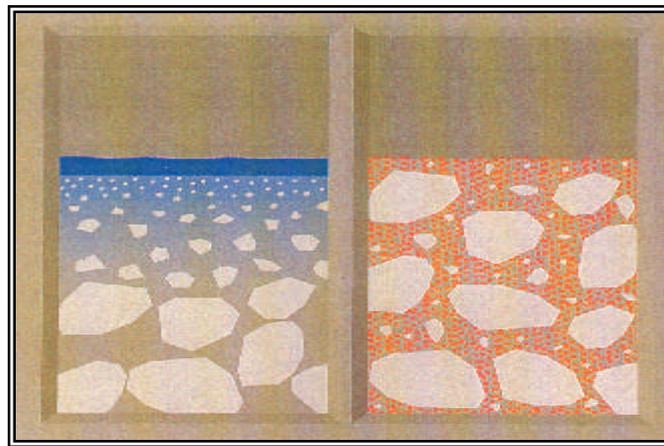
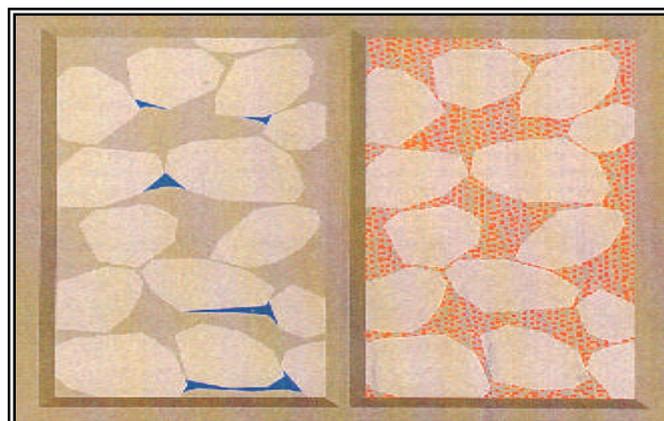


Figure (I.6) : Effet de la fumée de silice sur la cohésion interne, d'après [31].



- ⊙ 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. (Morency & Paradis, 2001).

Plusieurs études (Bentur et Goldman, 1989 ; Meland, 1983 ; Buil et al, 1984; Huang cheng-yi et Feldman, 1985 ; Sellevod et al, 1982) 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.7).

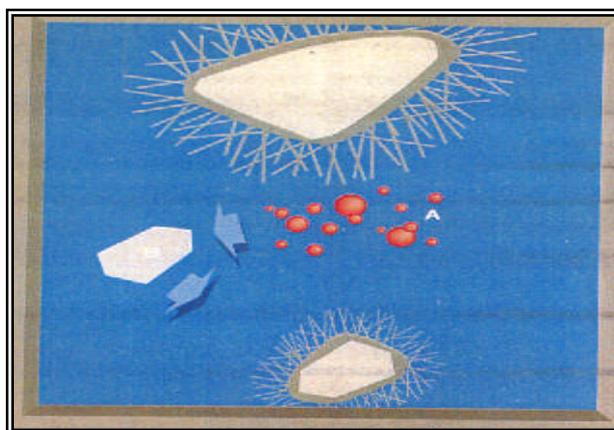


Figure (I.7) : Effet de la fumée de silice sur la réaction d'hydratation, d'après [31].

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.8). La diminution de la perméabilité à l'eau par la fixation de C-H. Figure (I.9). Améliore les performances mécaniques à longs termes : (Résistances en compression et traction). Figure (I.10), (I.11). Augmente la résistance contre le gel et/ou les produits de déverglaçage et améliore la résistance contre les agressions chimiques (sulfates, chlorures, etc.). Figure (I.12), et la résistance à la réaction alcali-granulat. [Neville, 2000].

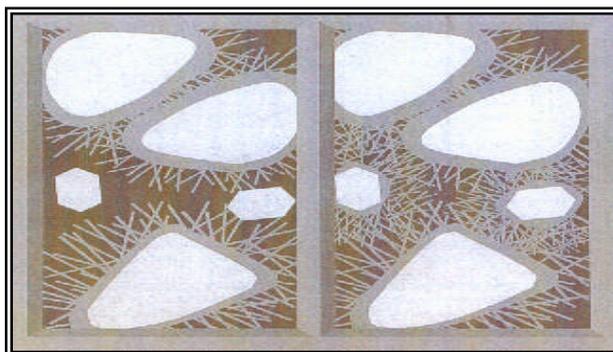


Figure (I.8) : Effet de la fumée de silice sur la structure de la pâte, d'après [31].

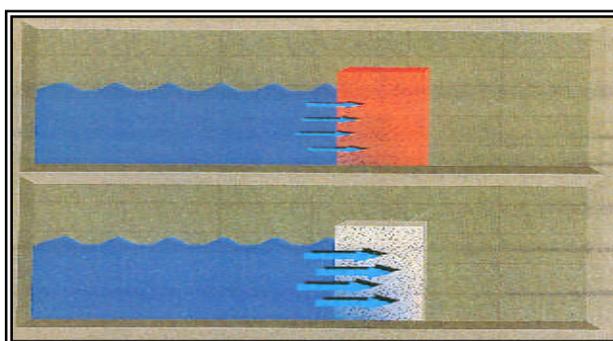


Figure (I.9) : Effet de la fumée de silice sur la perméabilité à l'eau, d'après [31].

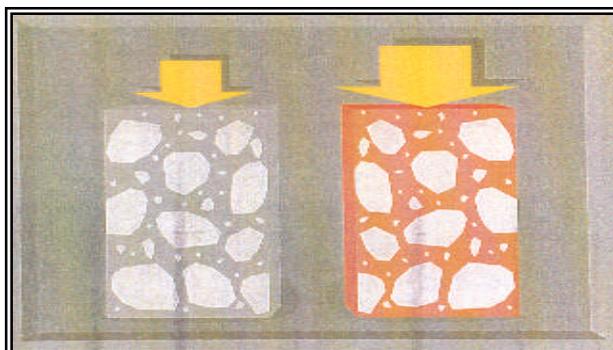


Figure (I.10) : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression, d'après [31].

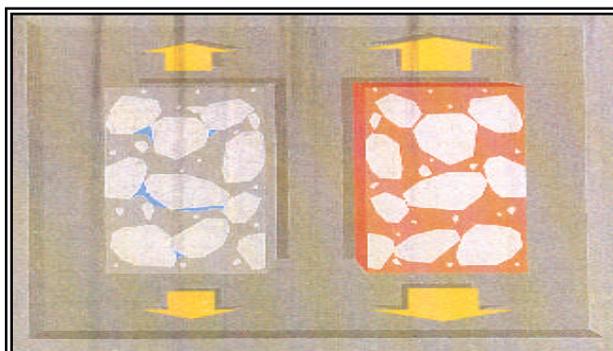


Figure (I.11) : Effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction, d'après [31].

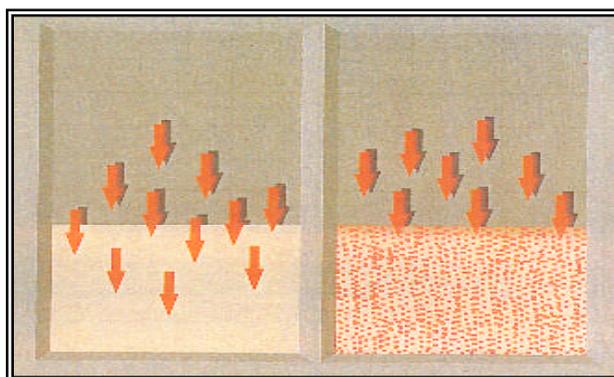


Figure (I.12) : Effet de la fumée de silice sur la résistance contre les agressions chimiques, d'après [31].

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 de bétons avec la fumée de silice augmente même au delà de 450 jours. [31].

I.3.1.5.11.3. La fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes

- ❑ Améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction.
- ❑ Augmente le module d'élasticité.
- ❑ Réduit le fluage.
- ❑ 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.
- ❑ Facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment.
- ❑ Réduit les risques de ségrégations et la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.

(D'après la Notice technique, Edition avril 2004 ; Sika France S.A.).

I.3.1.5.11.4. Le sable de dune finement broyé

Les caractéristiques des bétons sont régies par l'hydratation du ciment, cette dernière peut être modifiée par l'incorporation d'ajout du sable de dune finement broyé qui conduisent à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet au béton de diminuer les possibilités de pénétration des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus durables.

Le sable de dune est composé de minuscules grains de quartz. Le quartz (c-à-d. du SiO_2 , soit du dioxyde de silicium ou de la silice) est l'un des minéraux les plus répandus sur terre. L'analyse par (DRX) montre que le (SD) ont constitué de (SiO_2) bien cristallisé du type "Low-Quartz", contrairement au (SD), la (FS) à une structure amorphe (vitreux). [51]. Figure (I.15).

L'analyse par diffractométrie aux rayons (X) a mis en évidence le rôle pouzzolanique de (SD). En effet, la faible quantité de portlandite détectée par (DRX) dans les pâtes de ciment en présence de (SD), traduit la réaction pouzzolanique partielle de cet ajout, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte. [51, 53].

Contrairement aux jeunes âges (7 j), les résistances mécaniques aux âges avancés (90 j), des bétons à base d'ajout (SD) par substitution dépassent celles du béton témoin à base de CPJ 42.5, ce qui signifie que cet ajout a un rôle pouzzolanique qui se traduit par la formation de CSH II de deuxième génération.

La cinétique de formation de ces CSH II par les ajouts dépend de leurs finesses de leurs teneurs en silice et plus particulièrement de leurs structures ^(*) [52, 53, 67].

(*) **Nota**

* **Structure cristalline**

Solide homogène constitué d'atomes ou molécules présentant un arrangement organisé qui se répète de façon périodique dans les trois dimensions de l'espace.

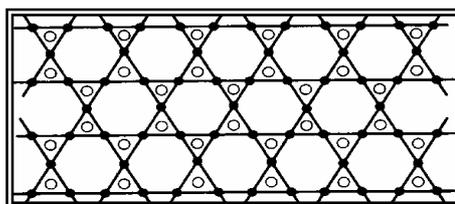


Figure (I.13) : Architecture atomique de silice cristallisée (ex : quartz).

* **Structure amorphe**

Atomes ou molécules qui ne sont pas arrangés de façon régulière, même si leur composition chimique est proche d'un minéral.

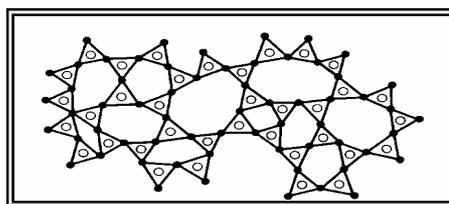


Figure (I.14) : Architecture atomique de silice amorphe (ex : verre).

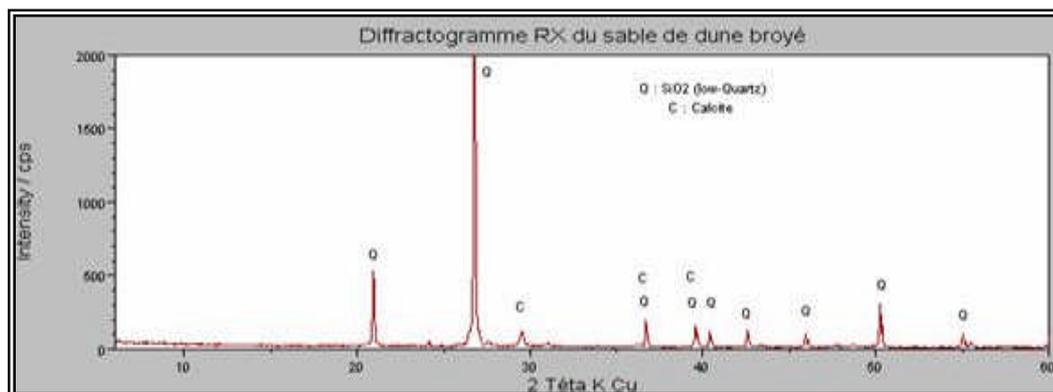


Figure (I.15) : L'analyse par (DRX) du sable de dune finement broyé, d'après [51].

I.3.2. FABRICATION DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

I.3.2.1. COMPOSITION

Le mélange de ciment et d'eau (et éventuellement avec des ajouts) constitue ce qu'on appelle «la pâte de ciment». En y rajoutant du sable, on obtient «un mortier». En y additionnant du sable et un granulat plus gros on obtient «un béton». La pâte présente à l'intérieure du béton joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. C'est l'élément actif du béton et elle représente environ 30 % du volume d'un béton. Les granulats constituent un squelette inerte dispersé dans cette pâte. La présence des granulats dans le mélange limite la propagation des fissures de la pâte due au retrait. Le choix de la formulation d'un béton impose un compromis entre trois objectifs : une facilité de mise en oeuvre définie par son ouvrabilité, une résistance visée à différents stades de maturation du béton et une durabilité vis-à-vis des agressions physico-chimiques du milieu ambiant.

I.3.2.2. 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. Lors d'un essai en laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux ayant des propriétés quasi constantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur. Selon Neville [8], ces paramètres influent de manière significative sur la teneur en air du mélange.

I.3.2.3. TRAITEMENT DE CURE

On entend par traitement ultérieur d'un béton toutes les mesures appropriées visant à protéger le béton mis en oeuvre jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance suffisante. Les principaux objectifs du traitement ultérieur sont la protection contre [91, 92]:

- ✧ La dessiccation prématurée du béton liée au vent, au soleil et à l'humidité de l'air.
- ✧ Les températures extrêmes et les changements de température rapides.
- ✧ Les précipitations.
- ✧ Les vibrations, secousses et autres sollicitations mécaniques.
- ✧ L'effet prématuré des substances nuisibles.

Les traitements de cure appropriés sont [66, 92]:

- ◇ 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.
- ◇ Ajout d'un produit de cure interne comme dans le béton frais.

La cure du béton est nécessaire dans tous les cas. Les conditions atmosphériques ayant une action sur la vitesse d'évaporation de l'eau du béton, il faut adapter en conséquence les modalités de cure. 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 nanoporosité est légèrement modifiée : la grosse porosité a tendance à augmenter. [77].

I.4. MATURATION DU BÉTON

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.

I.4.1.2. 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 N/mm^2) on parle de béton durci. [44].

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. [26].

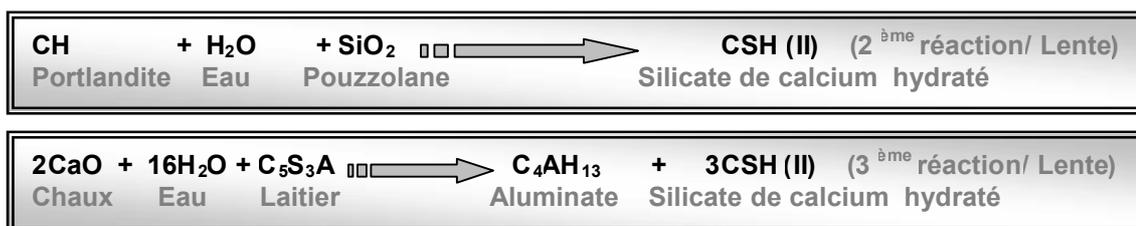
L'hydratation d'un matériau cimentaire fait référence à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) et l'eau de gâchage. Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires. La vitesse d'hydratation 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 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. [26].

I.4.1.3. Chimie d'hydratation du ciment portland avec ajouts

I.4.1.3.1. Définition

Les différents ajouts minéraux affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que la forme de leur élément. La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, la fumée de silice (SiO_2) permet une réduction de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange. En même temps que l'on mélange le clinker portland et le laitier de haut fourneau, une petite réaction immédiate du laitier se produit et libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite, le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker Portland pour former alors les CSH.





Les bétons dans lesquels des pouzzolanes remplacent une partie du ciment portland témoignent d'un développement de la résistance plus lent que les bétons avec clinker portland, et d'un plus fort durcissement ultérieur en prenant de l'âge, et exige un apport d'humidité suffisant pendant plus long temps [4].

Parmi les facteurs qui caractérisent l'influence des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et du béton durci : La réaction relativement lente, la consommation d'hydroxyde de calcium et l'action sur la structure poreuse de la pâte de ciment durcie [2].

I.4.1.3. 2. Hydratation et réaction pouzzolanique

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Il ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO, ce qui le contraire pour le ciment portland. Par conséquent, 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 SiO₂ du pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca (OH)₂ créée par l'hydratation du ciment portland [15]. Les pouzzolanes ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et aluminate de calcium hydraté développant des résistances.

La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker portland (CSH, C₄AH₁₃, C₈AFH₂₆, C₆AS₃H₃₂) [60].

Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée dans les figures (I.16) et (I.17).

Au cours de l'hydratation du ciment portland (figure (I.16)), il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du CSH), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes [2]. La situation est différente en présence de pouzzolanes (figure (I.17)), Le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminate de calcium hydraté (CAH).

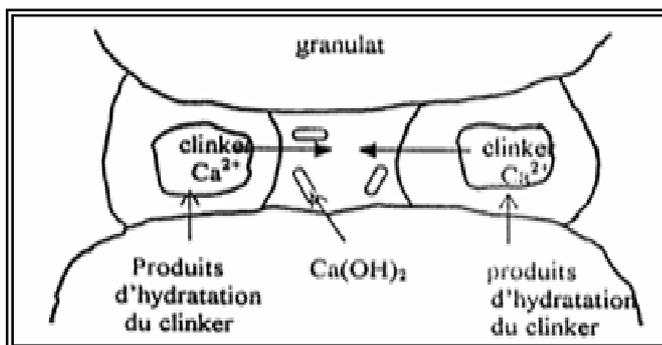


Figure (I.16) : Hydratation du clinker de ciment portland, d'après [39].

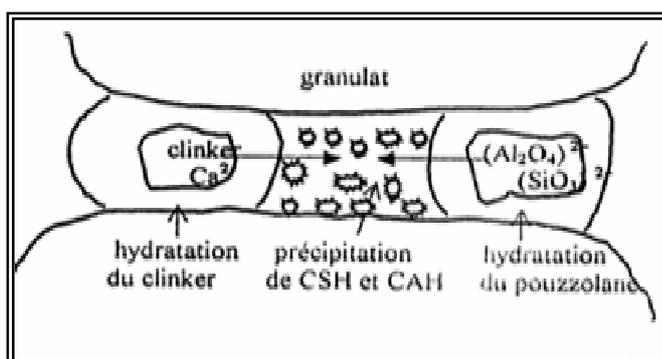
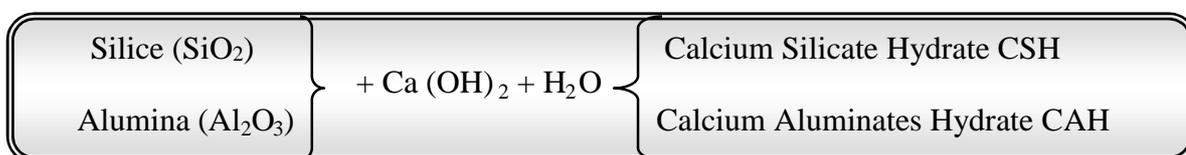


Figure (I.17) : Hydratation du ciment à la pouzzolane, (modifié selon [39])

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes.



I.4.1.3.2.1. Chaleur d'hydratation de la pouzzolane

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. [37].

Des valeurs de chaleur d'hydratation après 7 jours étaient déterminées à partir des pâtes de ciment portland mélangé avec 25 % et 35 % d'ajout pouzzolanique (voir figure (I.18)).

Les additions pouzzolaniques provoquent une diminution quasi linéaire dans la chaleur d'hydratation des pâtes. Elles réduisent la chaleur d'hydratation à 7 jours de 9 % et 17 % pour 25 % et 35 % d'additions pouzzolaniques, respectivement. [62].

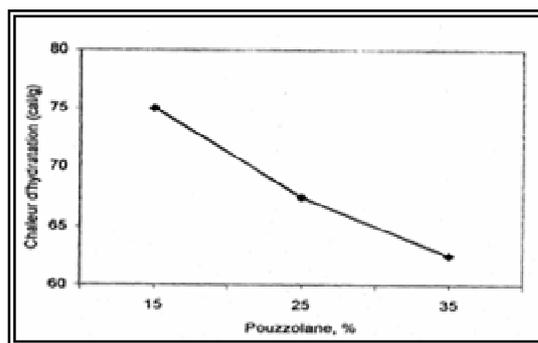


Figure (I.18): Effet de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation de ciment portland, d'après [46].

La chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment à la pouzzolane, durant les premières heures, augmente avec l'activité pouzzolanique de l'ajout de pouzzolane. Alors qu'après 5 heures la chaleur est inférieure à celle de mortiers de base, parce que le pourcentage de substitution de ciment neutralise la chaleur de la réaction pouzzolanique et l'influence de la substitution prédomine sur l'effet de l'activité pouzzolanique [55].

La figure (I.19) représente le comportement de différents mortiers fabriqués par différents matériaux pouzzolaniques, avec une référence zéro qui montre la chaleur développée par les mortiers à base de CPA. Ce tracé couvre les premières 14 heures de l'essai, puisque après 48 heures, la chaleur commence à se stabiliser.

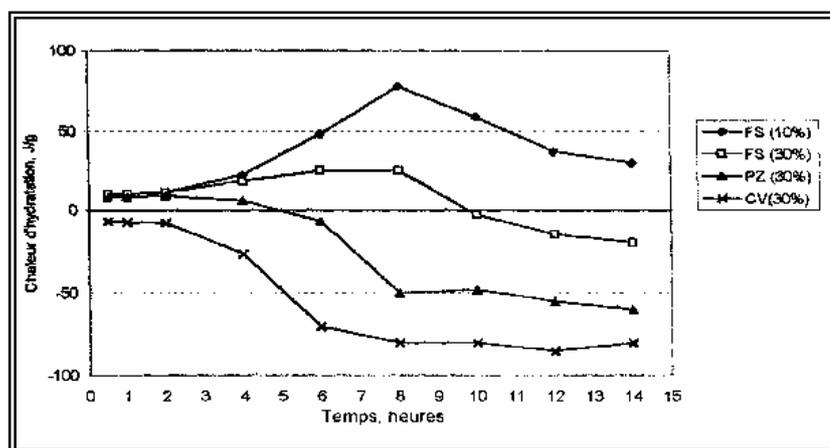


Figure (I.19): Chaleur d'hydratation en fonction du temps, d'après [82].

Après 5 heures la pouzzolane naturelle, d'origine sédimentaire (87.7 % de SiO_2), montre une diminution dans la chaleur d'hydratation mais cette diminution reste plus faible que celle due à la cendre volante (pouzzolane artificielle, 41.5 % SiO_2). Alors que le mortier à base de fumée de silice retarde ce phénomène jusqu'à 10 heures à cause de sa grande activité pouzzolanique.

Quand 10 % de substitution de ciment par la fumée de silice (93.3 % de SiO₂) le phénomène précédant n'est pas vu, puisque le degré de substitution n'est pas suffisant pour compenser la chaleur dégagée durant la réaction pouzzolanique [55].

I.4.1.3.2. Influence de la finesse de mouture sur l'activité du pouzzolane

Les résultats d'une série d'expériences ont montré que par l'augmentation de la finesse du 25 % d'ajout de 3650 cm²/g à 5000 cm²/g les résistances à tous les âges étaient améliorées de 24 %, [62]. L'ajout pouzzolanique peut changer la structure des pores, fait diminuer le nombre de gros pores et augmente celui de petits pores. Ce changement est fonction de la finesse du pouzzolane, plus les particules sont fines, plus leur rôle est efficace [20].

I.4.1.3.3. Hydratation du laitier

Les laitiers du haut fourneau sont des matériaux hydrauliques les plus utilisés car leur production est très importante et leurs propriétés sont stables, comparées à celles des autres sous produits industriels [35].

Plus de cent ans d'expérience sur les ciments aux laitiers du haut fourneau a montré clairement leur efficacité dans la confection des structures en béton, et en particulier les structures maritimes [16].

Seul le laitier granulé est utilisé en cimenterie. Il est ajouté au moment du broyage aux autres constituants (clinker, gypse). Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (90 % et plus) de quatre oxydes (SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO) et contenant en quantité insignifiante des oxydes : TiO₂, MnO, FeO et les sulfures : CaS, MnS, FeS. [16, 61].

Les oxydes (Al₂O₃ et CaO) augmentent l'activité hydraulique des laitiers tandis que l'oxyde (SiO₂) la fait diminuer, l'augmentation de MgO jusqu'à 18 % est favorable, car il n'y a pas le risque de gonflement de MgO libre pendant l'hydratation, contrairement au ciment portland. La teneur élevée des (Al₂O₃) donne un développement de la résistance, celle des oxydes de titane et de protoxyde de manganèse est limité et la teneur en (FeO) est assez petite, n'ayant pas d'effet considérable sur la qualité du laitier, Une faible quantité des sulfures de calcium jusqu'à 7 % accroît peu l'activité du laitier [90].

La composition chimique du laitier est schématisée par la formule C₅S₃A reflétant la répartition courante des 3 oxydes. [90]. L'hydratation du ciment au laitier est étudiée suivant les cas : absence de gypse, par activation sulfatique et par activation alcaline.

Les différents types d'activation conduisent à des produits d'hydratation stables :

- ✧ Le contenu du ciment au laitier en CSH est considérablement supérieur par rapport au ciment portland, à cause de la production inférieure de la chaux, cette dernière présente dans le ciment au laitier durci seulement en quelques points, tandis qu'elle représente 25% dans le ciment portland [16]. Se sont des gels denses. Constitue une matière de remplissage, où il y a une augmentation de la compacité. La présence élevée de ces gels dans ce ciment conduit à une différence de taille des pores, engendre une diminution relative de la porosité capillaire qui est due de la précipitation des CSH [14].
- ✧ L'aluminate tétracalcique apparaît dans les milieux riches en chaux et exempts de sulfate, il se forme également à partir de l'activation sodique, grâce à la chaux libérée par le laitier.

I.4.1.3.3.1. Chaleur d'hydratation du laitier

Le ciment au laitier a un développement de chaleur lent sous les conditions adiabatiques que le ciment portland, ce qui est bénéfique pour protéger le jeune béton de l'apparition des fissures thermiques [35, 56]. La forme de courbes de l'évolution de la chaleur dépend fortement de l'activant utilisé, le verre soluble est le meilleur activant, il accélère le processus de l'évolution de la chaleur, qui signifie l'occurrence rapide de l'hydratation pendant les quelques premières heures du traitement thermique [49].

I.4.1.3.3.2. Influence de la finesse de mouture sur l'activité du laitier

L'activité du liant remonte avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 2000 cm²/g à 4800 cm²/g [49]. Il a été établi que le laitier trop broyé, ne se prête pas à un stockage de longue durée. Il demande des quantités accrues d'eau lors de la fabrication du liant, d'où l'utilité d'utiliser des laitiers broyés ayant une surface spécifique de 2200 cm²/g à 3000 cm²/g qui est rentable du point de vue économique [3].

I.4.2. Le 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. [71].

I.4.3. 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 : [38].

- ↗ 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 [23].

I.4.3.1. La composition du ciment hydraté

La pâte de ciment hydraté est formée par :

- ☞ Les hydrates (CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfoaluminates).
- ☞ Les grains de ciment non hydraté.
- ☞ Des espaces capillaires.
- ☞ Des bulles d'air.

I.4.3.2. La composition des hydrates

Les hydrates comprennent :

- ☞ Les silicates de calcium hydratés (C-S-H).
- ☞ La chaux hydratée (portlandite).
- ☞ Les aluminates hydratés.
- ☞ De l'eau adsorbée sur certains cristaux.
- ☞ Des impuretés.

I.4.3.2.1. Les silicates de calcium hydraté (CSH)

- * Le C-S-H est un gel solide poreux ayant une structure en feuillet.
- * 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 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 [38]).
- * Pour des 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 [38]) 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 [38] ou les C-S-H (α) et C-S-H (β) pour Nonat [28]. Toutefois, leur différenciation dans une pâte n'a pas encore été démontrée.

I.4.3.2.2. La chaux hydratée (CH ou portlandite)

- * 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 du béton).
- * Elle est produite à la suite de l'hydratation du C_3S et C_2S .
- * Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable lorsque le PH devient « < 12,5 ».
- * Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté.
- * On les retrouve généralement sous deux formes :
 - ✓ Ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques.
 - ✓ Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales).

I.4.3.2.3. Les aluminates hydratés

Ils occupent de 15 à 20 % du volume de la pâte hydraté. On les retrouve généralement sous deux formes : [4].

- ◇ Ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques.
- ◇ Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales).

I.4.4. Les pores

I.4.4.1. Définition

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 (I.20)).

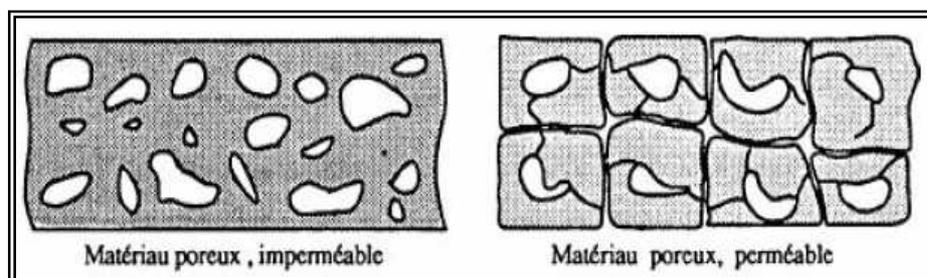


Figure (I.20) : Illustration de la différence entre la porosité et la perméabilité. [70].

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, CO_2 , Cl^- , etc....).

Une cure à température trop élevée ou avec un rapport E/C trop grand augmente la porosité et diminue les propriétés mécaniques, l'ajout de fumée de silice densifie le matériau. [77]. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante du volume et de la taille de ces pores capillaires. Les pores capillaires peuvent être réduits à l'aide de superplastifiant, qui pour une ouvrabilité équivalente, permettent d'obtenir un rapport E/C inférieur.

I.4.4.2. L'état de l'eau dans les matériaux cimentaires

L'eau présente dans un matériau cimentaire se montre sous différents états suivant l'énergie mise en jeu. Un suivi de l'augmentation de la quantité d'eau chimiquement liée permet de déterminer l'état d'hydratation des 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. [71].

I.4.4.3. L'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 (I.21), on voit clairement 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.

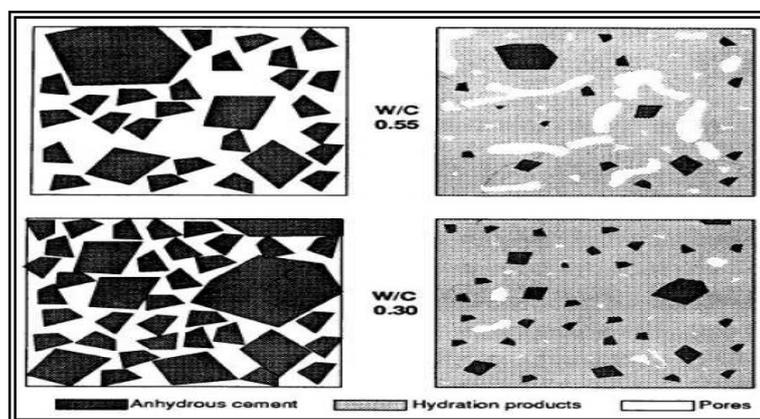


Figure (I.21) : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, [36].

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.

L'influence du paramètre E/C sur l'avancement de l'hydratation est très complexe. D'après Boivin [83], 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 [74] 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 Acker [76] et Barognel-Bouny [89], 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. Selon Barognel-Bouny [89], 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 (composition et hydratation du ciment Portland [Pigeon, 1981]). 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.
- ✓ 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. Cependant, Powers a montré que pratiquement, et d'un point de vue physicochimique, 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.

La figure (I.22) 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).

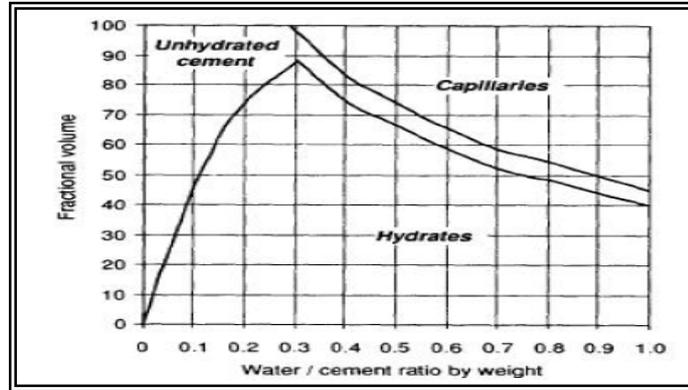


Figure (I.22) : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80 % d'hydratation dans l'eau, [43].

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 (I.23).

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.

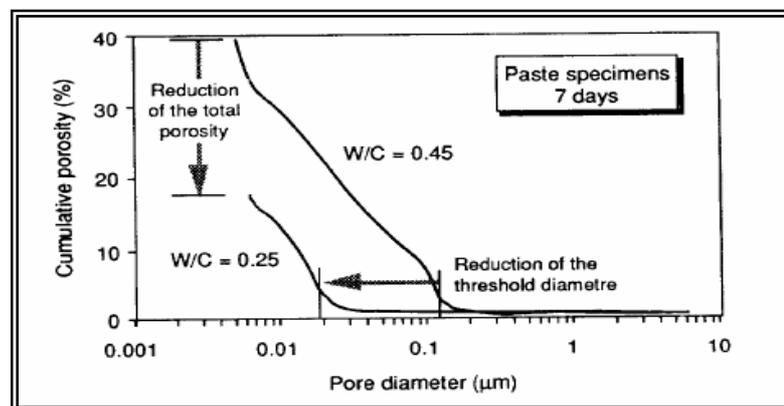


Figure (I.23) : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau, [36].

I.4.5. Le ressuage

Le ressuage est une forme de ségrégation du béton frais. On entend par ressuage ou séparation/rejet d'eau, 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 de béton frais. Le risque de ségrégation est d'autant plus important que la teneur en eau du béton est 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. Le ressuage entraîne une détérioration de l'homogénéité du béton, étant donné que l'eau de gâchage refoulée contient de fines particules de ciment et de sable très fin. La solution aqueuse constituée de ciment et «d'eau de ressuage» stagne à la surface. La réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium dissous et dans «l'eau de ressuage» et le dioxyde de carbone contenu dans l'air provoque un dépôt calcaire à la surface (carbonatation). Les dépôts (calcaire, ciment et sable très fin), également appelés lait de ciment, sont reconnaissables par une coloration grise/blanche visible à la surface du béton et indiquent une résistance inférieure à celle d'une surface en béton standard. [44]

Il est possible de réduire la tendance au ressuage du béton en augmentant le pouvoir de rétention d'eau. Par ailleurs, une modification du déroulement de la construction et de la géométrie de l'élément peut avoir des influences favorables. Plusieurs mesures basées sur la technologie du béton et permettant la diminution du ressuage sont : [44].

- ✓ Augmentation de la surface spécifique par l'emploi d'un ciment plus fin.
- ✓ Augmentation de la teneur en matières fines par une teneur en ciment plus importante (rapport eau/fines < 0.40).
- ✓ Augmentation de la teneur en matières fines par l'adjonction d'ajouts ayant une granulométrie très fine (rapport eau/fines < 0.40).
- ✓ Réduction de la teneur en eau par adjonction d'un superplastifiant.

I.4.6. Retraits et gonflements

I.4.6.1. Définition

Le retrait et le gonflement sont des modifications lentes du 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. Le retrait constitue une diminution du volume consécutive à l'évacuation d'humidité, on distingue un retrait exogène, due à des gradients hydriques ou thermiques régnant entre le matériau et le milieu environnant, et un retrait endogène générée par le matériau lui-même sans échange avec l'extérieur, et aussi un retrait de carbonatation et un retrait autogène. Le volume des hydrates formés est inférieur au volume des composants initiaux eau et ciment (Chatelier [42], Boivin [83]). L'eau qui s'évapore d'un béton conservé dans l'air non saturé provoque le retrait de séchage. [8].

I.4.6.2. Recommandation

Les mesures technologiques suivantes ont été validées pour obtenir un béton présentant une faible tendance au retrait: [44].

- ✓ Fabrication d'un béton avec un rapport E/C faible en utilisant un superfluidifiant.
- ✓ Traitement de cure long et excellent.
- ✓ Compactage ultérieur des fissures de retrait capillaire.

I.4.7. La perméabilité

I.4.7.1. Définition

La perméabilité du béton est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. C'est l'aptitude d'un corps à se laisser pénétrer et traverser par l'air, par la vapeur d'eau ou par l'eau à l'état liquide. Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.).

Des résultats d'études effectuées sur les pâtes permettent de mettre en évidence les propriétés des additions : Par substitution partielle du ciment par du laitier de haut fourneau (au moins 50 % du poids du ciment) et pour un même rapport E/L, on observe, après 28 jours, une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre 10, par comparaison avec un CPA ordinaire. La substitution partielle du ciment par environ 30 % de cendres volantes conduit, pour un même rapport E/L, à une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre de 2 à 5, après 28 jours.

Les courbes porosimétriques de la figure (I.24) suivante montre que les cendres volantes et le laitier entraînent un accroissement de la porosité et de la taille des pores aux premiers ages consécutifs à un ralentissement initial des processus d'hydratation, la réactivité de ces additions minérales, pouzzolanique ou hydraulique, qui se développe après quelques semaines, vient renforcer les effets de l'hydratation du clinker et conduit à long terme à une porosité du même ordre de grandeur et à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats dépendent fortement de la réactivité des additions et de la durée de cure [32].

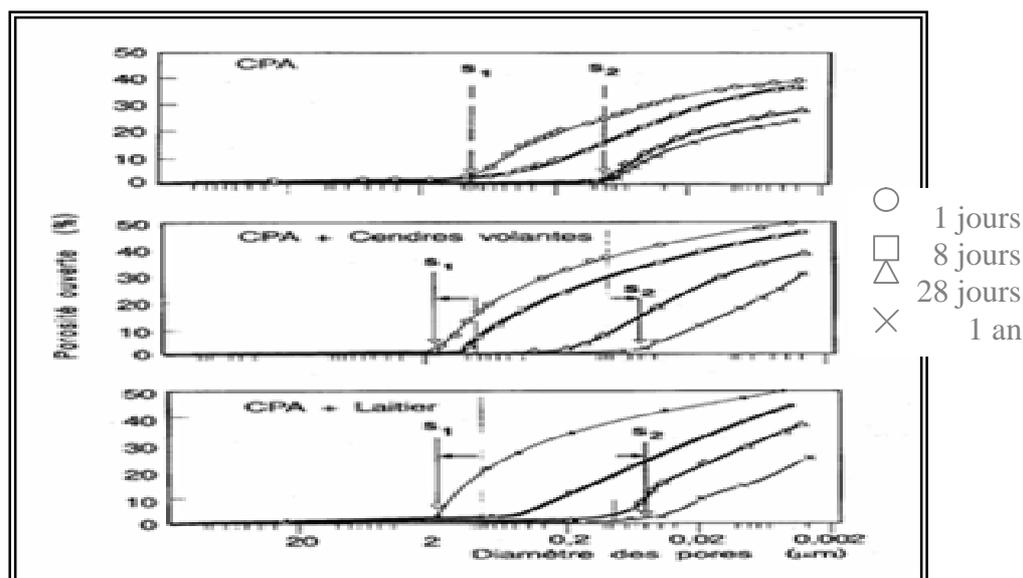


Figure (I.24): Influence de l'addition de laitier ou de cendres volantes sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d'après [32].

Les caractéristiques (le degré de protection) de la peau du béton sont fonction de très nombreux paramètres: paramètres de composition du béton (e/c, ajouts minéraux,...), techniques de mûrissement et de mise en place, fissuration due au retrait et fissuration due aux charges de service.

I.4.7.2. L'influence de rapport E/C sur la perméabilité

Le rapport E/C exerce une très grande influence sur la perméabilité à l'eau de la pâte de ciment hydraté (Figure (I. 25)).

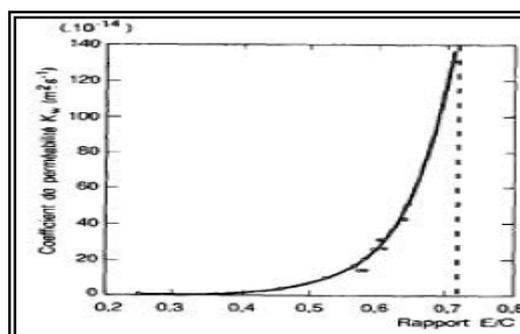


Figure (I.25): Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C, d'après [74].

Plus le 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.

I.4.7.3. L'influence de la durée de cure humide sur la perméabilité

L'importance de la durée de cure humide sur la perméabilité des bétons est illustrée à la figure (I.26), son allongement a des effets bénéfiques marqués avec les ciments composés.

Ce résultat s'explique par la plus faible hydraulicité des laitiers, comparée à celle du clinker, et par la relative lenteur de la réaction pouzzolanique des cendres volantes. [57].

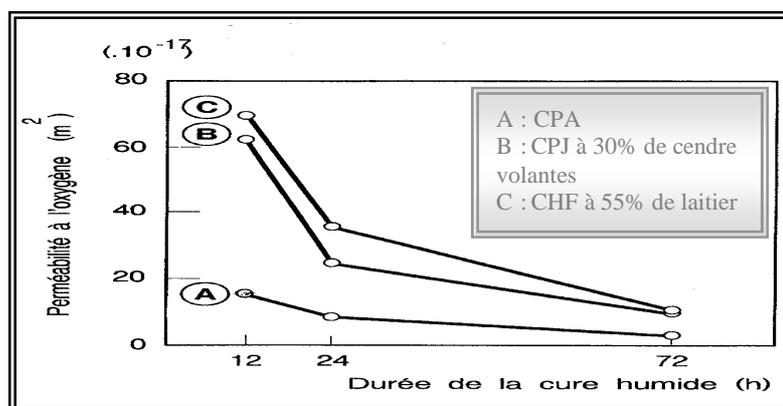


Figure (I.26): Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité de bétons réalisés avec diverses catégories de ciments, d'après [57].

La faible perméabilité des pâtes de ciment pouzzolanique peut être expliquée sur la base du schéma donné dans la figure (I.27). [46]. Durant les premiers jours (7 à 15 jours) seulement les fractions de (clinker + gypse) qui sont mises en jeu pendant l'hydratation et le durcissement. La pouzzolane s'hydrate plus tard, et seulement après que le CH sera formé. Une partie des produits d'hydratation se forme sur place, alors qu'une partie, par l'effet de dissolution et les phénomènes de transport et de précipitation, se dépose dans les pores capillaires formés au début durant l'hydratation du clinker. La masse qui se précipite dans les pores est petite et par conséquent elle est incapable de remplir complètement les pores larges, mais elle est suffisante pour stopper les passages entre les pores ou, au moins, de réduire considérablement leur largeur. Comme conséquence, la porosité des pâtes des ciments mélangés est plus grande ou, au mieux, la même que celle des ciments portlands, mais leur perméabilité devient plus faible. [40].

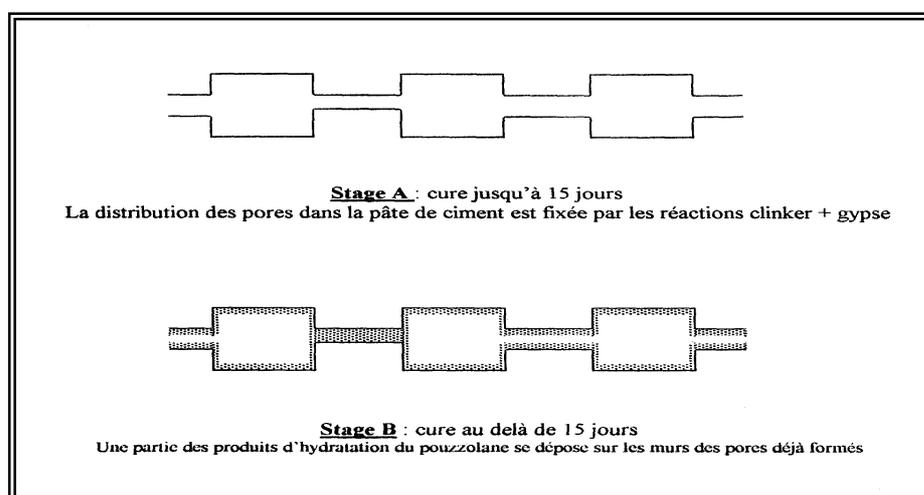


Figure (I.27) : Evolution dans le temps des pores des pâtes de ciment pouzzolanique, d'après [21].

L'augmentation considérable de la résistance et de la durabilité des bétons contenant de la pouzzolane par rapport aux bétons sans ajout, 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 [40]. La perméabilité décroît au cours de l'hydratation du ciment en raison de la porosité capillaire, comme l'illustre la figure (I.28). Une cure adéquate est donc très importante pour que l'hydratation soit la plus complète possible. Le temps minimum prescrit pour la cure des bétons ayant divers rapports E/C est indiqué à la figure (I.29).

Figure (I.28) : Evolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure, d'après [24].

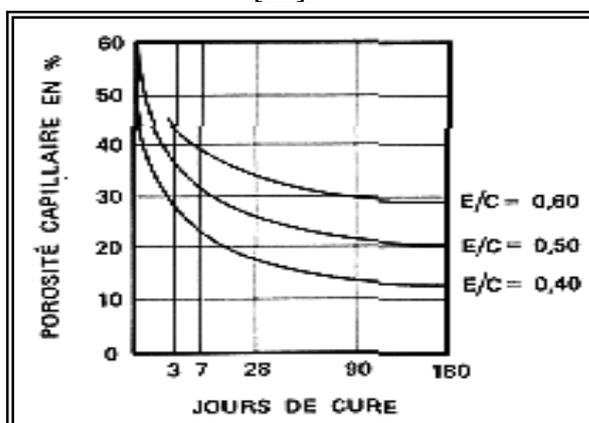
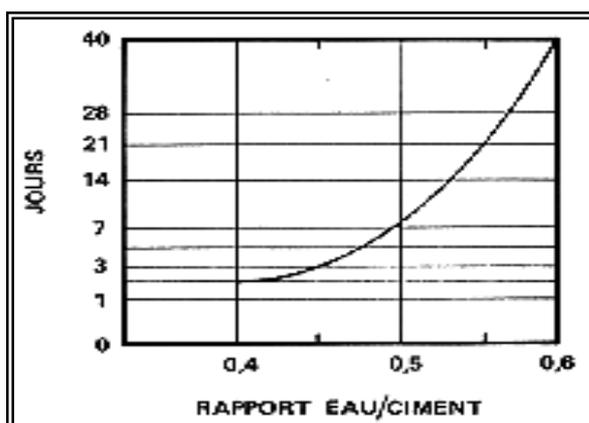


Figure (I.29) : Nombre minimal de jours de cure pour le béton compact, d'après [24].



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 fabriqué avec un rapport E/L de 0,45.

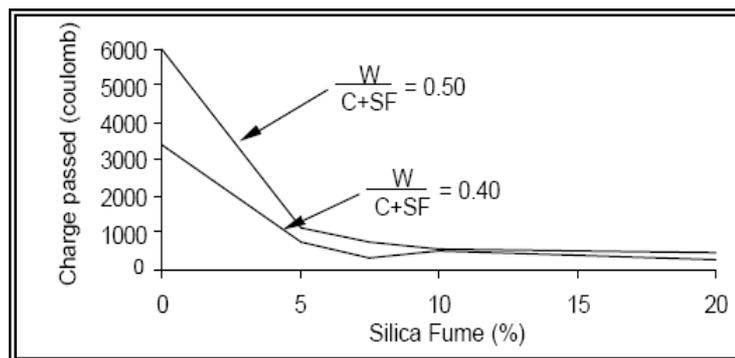


Figure (I.30) : Influence du dosage en fumée de silice sur la charge totale mesurée après 6h. D'après [75].

La fumée de silice diminue très significativement la charge totale après 6h (figure (I.30)). 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.

La perméabilité des bétons avec un E/C faible est beaucoup moins sensible à la durée du mûrissement humide (figure (I.31)). Du point de vue de la perméabilité à l'air, les bétons avec un E/C faible sont moins pénalisés par des conditions de mûrissement défavorables.

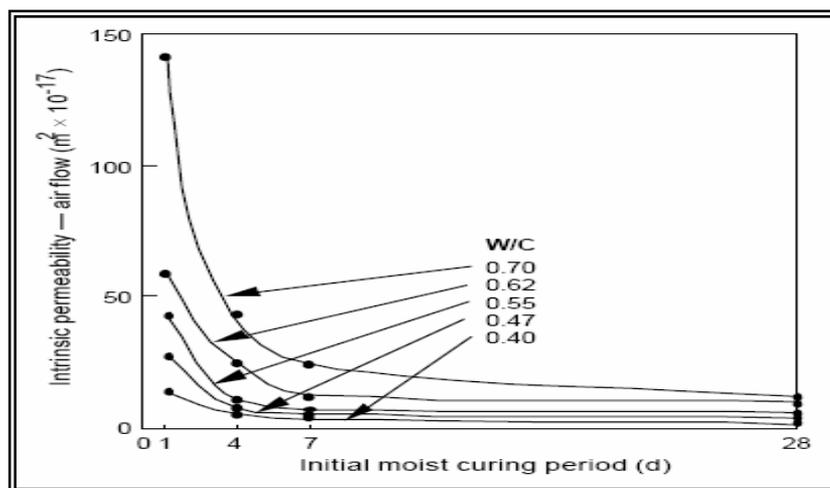


Figure (I.31) : Perméabilité à l'air du béton en fonction du E/C et de la durée du mûrissement humide, d'après [29].

Puisque que la résistance à la compression est étroitement liée à la valeur du E/C, on trouve aussi qu'il existe une relation très nette entre la perméabilité à l'air et la résistance à la compression.

La figure (I.32) présente des résultats obtenus avec tout un ensemble de bétons fabriqués avec ou sans ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes) et avec des rapports E/L compris entre 0,26 et 0,80.

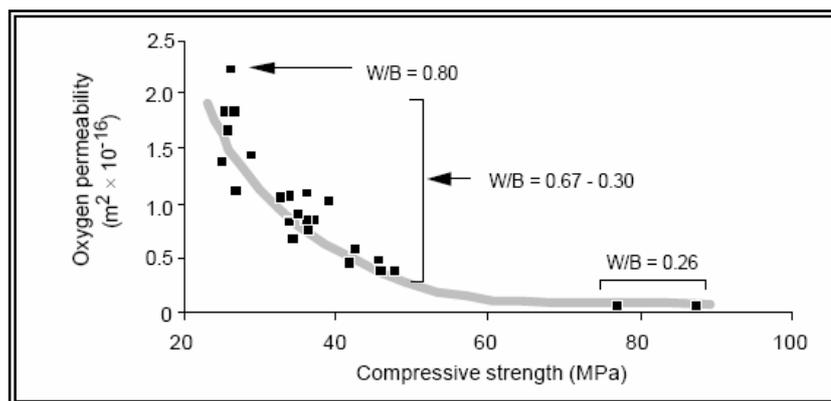


Figure (I.32) : Perméabilité à l'oxygène de bétons fabriqués avec et sans ajouts minéraux (fumée de silice et cendres volantes) Note : $W/B = E/L$, d'après [87].

La perméabilité à l'air diminue très peu et semble atteindre une valeur minimale lorsque le rapport E/L devient inférieur à environ 0,30, ou lorsque la résistance à la compression dépasse 60 MPa. (Figure (I.32)). Le remplacement ciment par de la fumée de silice peut réduire la perméabilité à l'air du béton. (Figure (I.33)).

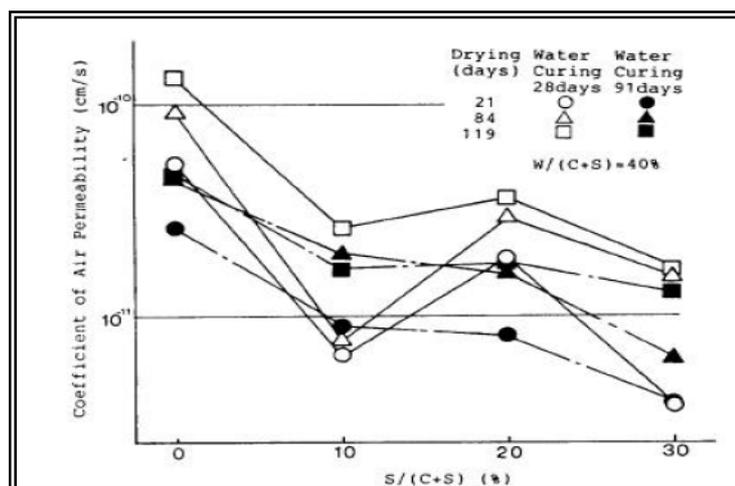


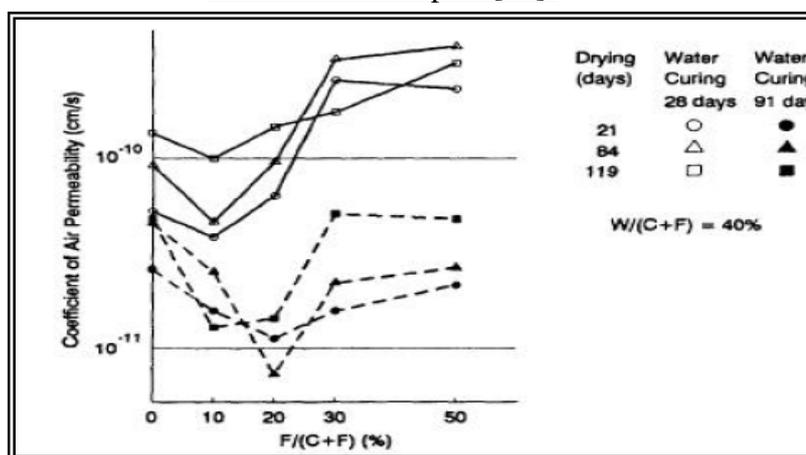
Figure (I.33): Effet du remplacement du ciment par de la fumée de silice sur perméabilité à l'air du béton, d'après [69].

Cet effet peu s'expliquer par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrés par l'hydratation des sphères de fumée de silice (germes de cristallisation). Le taux de remplacement optimal se situe aux environs de 10 %. Pour des taux de remplacement plus élevés, l'effet sur la perméabilité devient très faible.

Les cendres volantes « CV » : (20 % à 30 %) provoquent généralement une augmentation de la perméabilité à l'eau (par rapport à un béton de référence). Cependant, à plus long terme (quelques mois), la perméabilité des bétons avec CV devient généralement plus faible que celle du béton de référence. Il faut s'attendre à ce que l'efficacité des CV soit très variable en fonction du taux de remplacement, de l'origine et du type de cendres.

Selon Nagataki et Ujike, les cendres volantes diminuent la perméabilité à l'air si le taux de remplacement du ciment est inférieur à 10 % ou 20 % (figure (I.34)). Pour des taux de remplacement plus élevés (30 % et 50 %), les cendres volantes ont plutôt pour effet d'augmenter la perméabilité à l'air.

Figure (I.34) : Effet du remplacement du ciment par une cendre volante sur la perméabilité à l'air du béton, d'après [69].



Les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers diminuent très significativement le coefficient de diffusion des ions chlore. (Figure (I.35) et (I.36)).

Le remplacement de 10 % à 20 % du ciment par de la fumée de silice peut réduire de coefficient de diffusion par un facteur de 5 à 10, particulièrement si le E/L est relativement élevé.

L'effet des cendres volantes est plus faible. Elles ont néanmoins un effet très significatif pour des taux de remplacement supérieurs à 20 %. L'effet des cendres volantes est d'autant plus grand que le rapport E/C est élevé (ou la résistance en compression est faible). (Figure (I.36)).

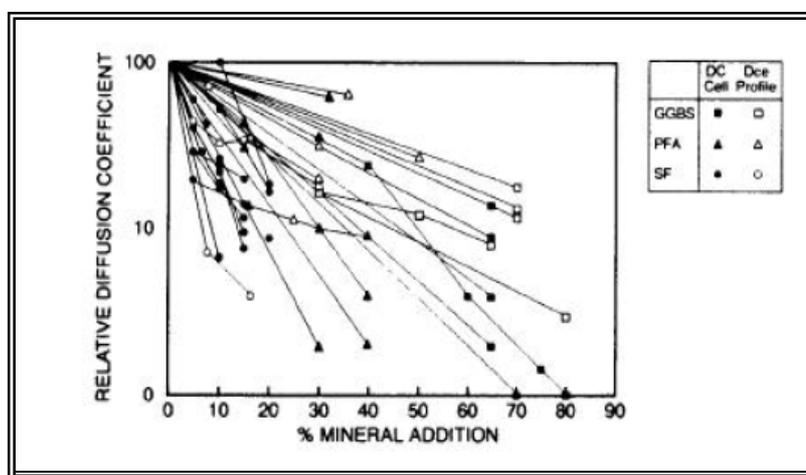


Figure (I.35) : Influence des additions minérales sur le coefficient de diffusion relatif, [19].

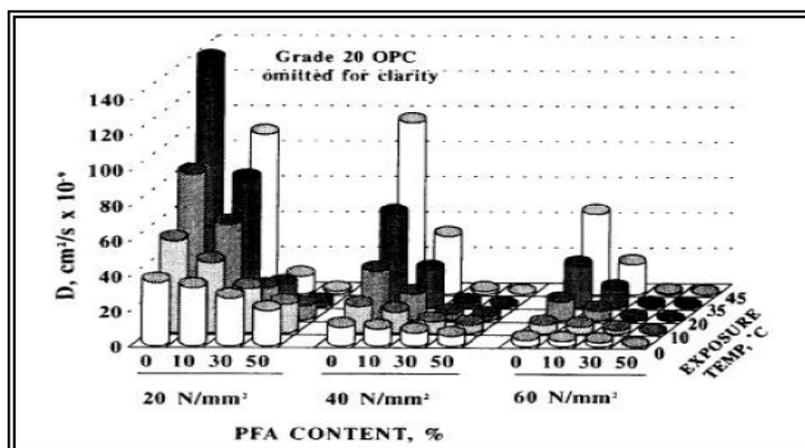


Figure (I.36) : Influence des cendres volantes sur le coefficient de diffusion des ions chlore dans le béton, d'après [48].

I.5. LA 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.

I.5.1. RÉSISTANCES AUX EAUX AGRESSIVES

I.5.1.1. Définition

Les substances nuisibles sous forme gazeuse ou solide n'agissent qu'en présence d'humidité, étant donné que les réactions nuisibles ne peuvent se produire qu'en solution. Le plus souvent, les substances nuisibles entrent en contact avec le béton sous forme dissoute. L'intensité de la corrosion du béton est déterminée par l'interaction des facteurs suivants: d'après [44].

- ◆ Nature, concentration et durée d'action des agents agressifs.
- ◆ Vitesse de transport des produits chimiques et de démolition (modes de transport : écoulement sous pression, "aspiration" capillaire, diffusion).
- ◆ Vitesse de réaction et température.
- ◆ Solubilité dans l'eau des composants du béton transformés ou détruits.
- ◆ Effets mécaniques additionnels (corrosion des fissures liées aux tensions).
- ◆ Propriétés de la structure en béton poreuse.

L'enquête OCDE [34] ; indique que les plus importantes causes de dégradation relevées sur 800 000 ponts de par le monde, sont :

- Contaminations par les chlorures.
- Attaque par les sulfates.

L'utilisation de ciments contenant des ajouts cimentaires semble être aujourd'hui une approche prometteuse. L'incorporation de ces ajouts 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. [85].

I.5.1.2. 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 [50]. L'eau douce peu théoriquement causer de très gros dégâts au béton. Heureusement, elle n'attaque pratiquement pas un béton étanche à l'eau avec un rapport $E/C < 0,60$. [5]. L'attaque d'un béton par des eaux pures faiblement agressives ne peut s'effectuer que s'il est peu compact : dans ces conditions, elle consiste surtout en une dissolution de la portlandite et par conséquent le lessivage.

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 $[CaO/SiO_2]$ décroît. Les ions alcalins Na^+ et K^+ , particulièrement mobile, sont également lessivés par les eaux. [50].

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 de la perméabilité. Il peut se traduire également par une diminution de la cohésion et une chute des résistances mécaniques du béton. 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 (Laitiers, pouzzolanes naturelles, fumée de silice,...) dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des CSH de rapport CaO/SiO_2 faible.[17].

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 [17] : 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 CSH, 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 :



La précipitation de carbonate de calcium permet à nouveau la formation de bicarbonate et le processus se répète :



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 des ciments portlands 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 (figure (I.37)). Dans ce cas, La résistance à la lixiviation des ions Ca^{2+} est d'autant plus grande que le ciment contient moins de chaux, les bétons de CPA, riche en chaux, sont plus sensibles à l'altération que les bétons de ciments au laitiers, pouzzolane, et les bétons de ciment alumineux [40].

Dans ce cas, les ciments pouzzolanique se comportent mieux que les ciments portlands, 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 [17].

La teneur en CaO est environ 64 % dans le CPA et 45 % dans les ciments pouzzolaniques, mais principalement c'est la grande quantité de CH et la faible quantité de C-S-H qui étaient à l'origine de leur faible résistance au lessivage. [40].

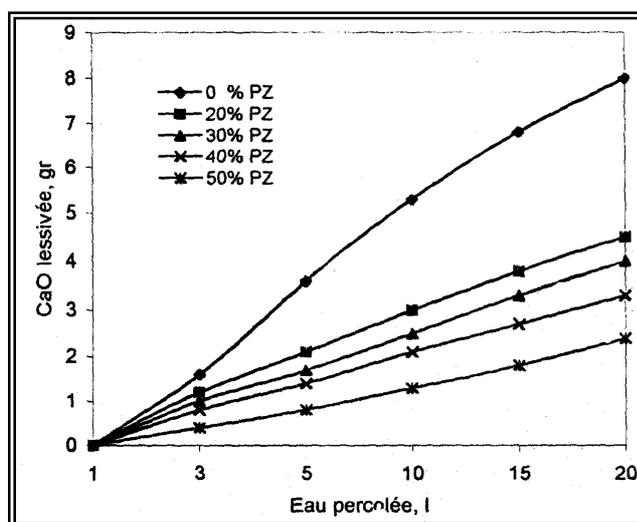


Figure (I.37) : Lessivage de la chaux dans une éprouvette de béton en fonction d'eau percolée et la teneur en pouzzolane du ciment, d'après [55].

Pour les ciments au laitier, la relation entre le type de ciment et l'intensité de l'attaque est illustrée par la figure (I.38) ; dans le cas d'un CPA, d'un CHF, et d'un ciment alumineux fondu [2]. Comme le montre la figure, où les pertes de masses des mortiers diminuent quand la teneur en laitiers augmente (supérieure à 40 %). Les pertes de masses observées sont accompagnées d'une détérioration des caractéristiques mécaniques : résistance à la flexion et à la compression et module de déformation.

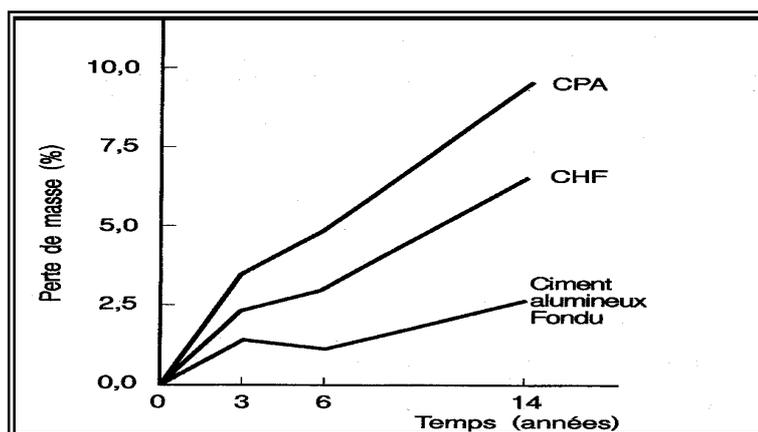


Figure (I.38) : Pertes de masse en fonction du temps d'éprouvettes de mortier confectionné avec différents ciments, conservées dans une eau douce de PH 5 à 5.5, d'après [6].

I.5.1.3. Eaux contenant des sulfates

Quand le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfate 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 CaSO_4 attaque le béton à cause de la réaction entre 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 CaSO_4 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$, comme le cas des pâtes de ciment portland. [44].

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que 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 [40].

Les additions minérales de laitiers, de pouzzolanes naturelles et de 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, au moins pour les bétons âgés.

- Les ciments avec ajout de laitier ont généralement un bon comportement dans les eaux sulfatées. Ce bon comportement est dû :
 - ↗ A la réduction de la teneur en chaux et C_3A du mélange.
 - ↗ L'accroissement de la compacité des hydrates, en relation avec une diminution du volume poreux pouvant atteindre 25 % dans le cas d'additions de laitiers importantes, ces modifications de la structure poreuse entraînent une réduction de la perméabilité.
 - ↗ Au mode de cristallisation de l'ettringite, formée par précipitation à partir de la phase liquide et non expansive.

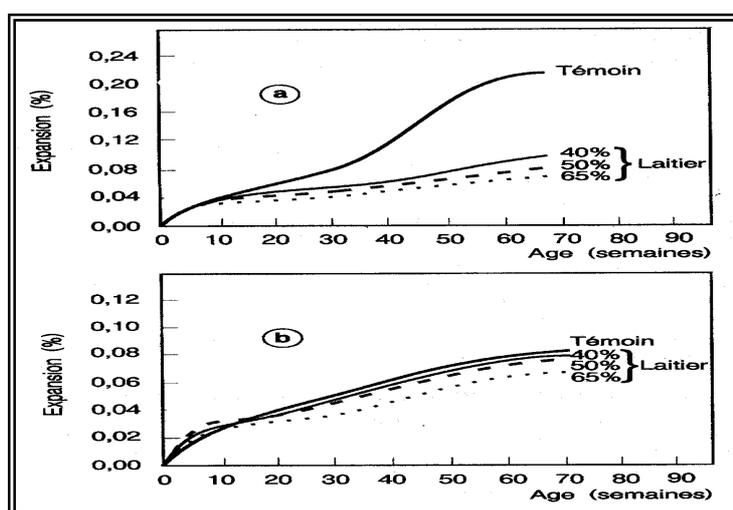


Figure (I.39) : L'efficacité de laitiers à réduire les expansions dues aux sulfates, d'après [25].

(a): le témoin est un ciment portland (type ASTM II) avec 6,4 % de C_3A .

(b): le témoin est un ciment portland (type ASTM V) avec 3,7 % de C_3A .

Les ciments pour lesquels la teneur en laitiers est supérieure ou égale à 60 % (CHF, CLK) sont considérés comme résistant aux sulfates, indépendamment du clinker de base avec lequel ils ont été fabriqués.

Lorsque la teneur en laitier est inférieure à 60 %, et dans le cas des ciments avec ajout de pouzzolane, c'est le clinker de base qui détermine la tenue du ciment aux sulfates. Ce clinker doit satisfaire aux critères exigés pour les ciments portland, en ce qui concerne les teneurs en C_3A et en SO_3 (voir figure (I.39)). [17].

- Les pouzzolanes au taux de substitution de 20 à 30 %, ont un effet bénéfique sur la tenue des bétons aux sulfates, il est dû également aux modifications de microstructure, (voir figure (I.38)).

- La fumée de silice offre également une bonne protection contre l'agressivité des sulfates du fait de leur forte consommation en portlandite et de la structure compacte des CSH qu'elles forment.

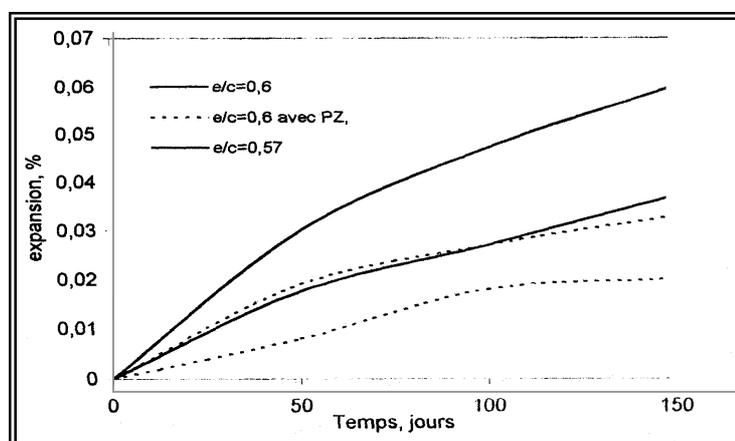


Figure (I.40) : Expansion d'un béton à base de ciment portland (-) et ciment pouzzolanique (---) En fonction de la durée d'immersion dans les eaux agressives, d'après [55].

I.5.1.4. 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. Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont les chlorure de sodium et calcium, qui sont largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif.

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 [40].

Le lessivage de CH est plus faible dans les ciments pouzzolaniques, ou les ciments contenant de la fumée de silice, que dans les ciments portlands. Dans ces derniers le CH qui peut seulement être lessivé est celui qui n'a pas été déjà combiné comme CSH avant l'exposition aux sels, comme conséquence, la porosité des mortiers exposés à l'action des sels augmente dans les ciments portlands et diminue dans ceux qui contiennent de la fumée de silice ou de la pouzzolane [40].

Une solution concentrée de 30 % 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 [40].

L'attaque indirecte se produit sous certaines conditions de concentration et de PH si les ions des chlorures conduisent à atteindre le ferrailage. Sous ces conditions, le ferrailage s'oxyde. Comme conséquence, le béton est soumis à des contraintes qui conduisent à la fissuration et à la désagrégation. Un autre exemple de l'attaque indirect se produit quand les chlorures sont utilisés comme des sels de dégivrage. Dans ce cas, des chocs thermiques produisent avec déplacement de la formation du front de gel qui peut causer des contraintes nuisibles pour la solidité du béton.

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.

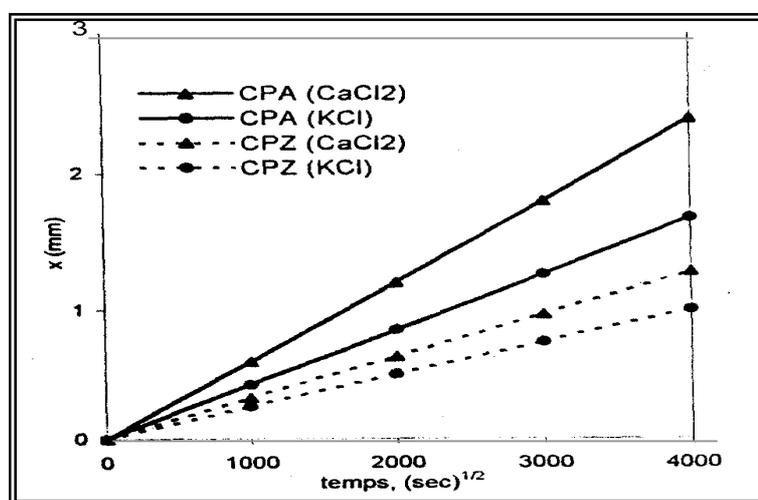


Figure (I.41): Pénétration de quelques sels de dégivrage dans les ciments portlands et pouzzolanique, d'après [55].

La profondeur de pénétration d'ions des chlorures dépend de tous les facteurs qui influencent la perméabilité des pâtes et bétons. Parmi ces facteurs nous avons le type de ciment. (Figure (I.41)).

Les bétons à base des ciments pouzzolaniques, au laitiers et cendres volantes 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 Cl⁻ plus grand que celle dans le ciment portland, ainsi que la diffusion de Cl⁻ dans les ciments pouzzolaniques est ralentie. (Voir figure (I.42)), [63].

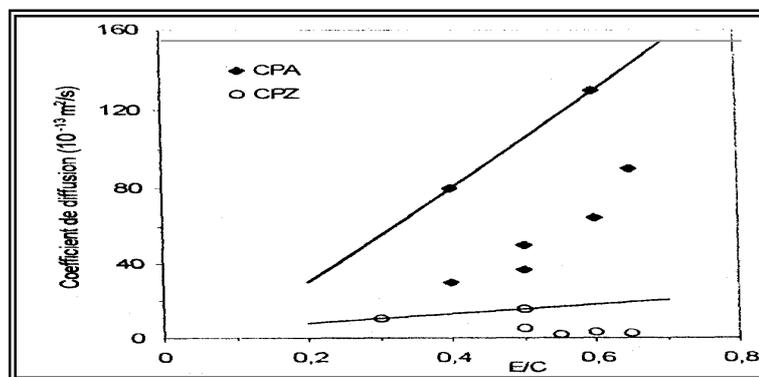


Figure (I.42): Coeff. de diffusion d'ions Cl⁻ en fonction de E/C pour des pâtes exposées à une solution de NaCl, d'après [41].

I.5.1.5. Eau de mer

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

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

A/- 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 hydratés, une autre partie se combine au C₃A sous forme de monochloroaluminate de calcium C₃A.CaCl₂.10H₂O. 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 CaCl₂ réagit avec les aluminates pour former du monochloroaluminate.

B/- Action des sulfates de magnésium

Cette réaction conduit à la formation d'ettringite expansive et à la substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺, soit dans les C-S-H, soit dans la portlandite (formation de brucite).

C/- 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 : $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$.

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 [17]. En revanche, pour certains auteurs, cette réduction d'agressivité est liée à la présence des chlorures. Ceux-ci accroissent la solubilité du gypse et de l'ettringite qui cristallise alors, au moins partiellement, sous une forme non expansive à partir de la solution.

Selon Mehta [63], le remplacement des ions OH^- par des ions Cl^- 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 [54], 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.

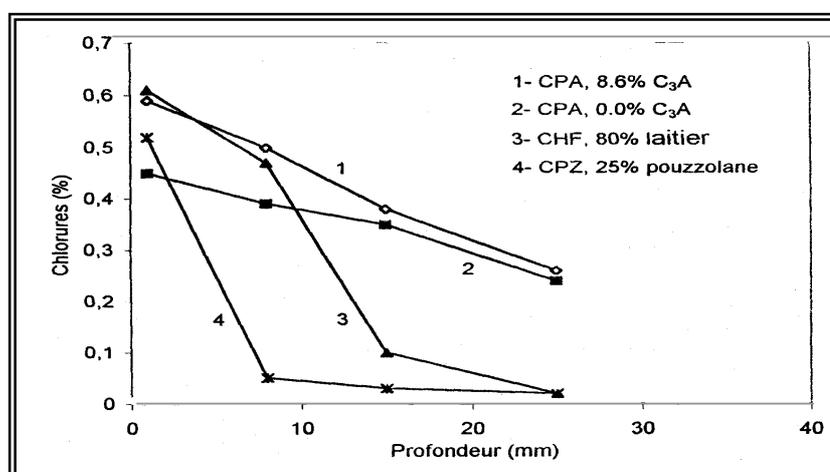


Figure (I.43) : Effet du type de ciment sur la pénétrabilité d'ions de chlorure après mois d'exposition à l'eau de mer, d'après [55].

Toutefois 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 (voir figure (I.43)). 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 C-H, empêchent la pénétration d'ions de sulfate et résistent intrinsèquement mieux que les ciments portlands à l'attaque des sulfates. [21].

I.5.2. 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 $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$.

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 comme le montre la figure (I.44).

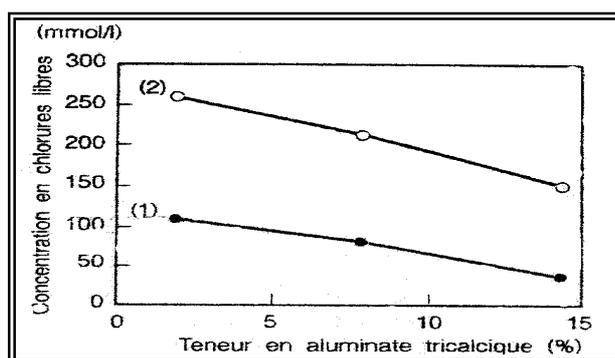


Figure (I.44) : Variation de la concentration des chlorures libre en fonction de la quantité de C_3A contenue dans le ciment, d'après [86].

Courbe 1 : 0,4 % de Cl^- sous forme de NaCl

Courbe 2 : 0,4 % de Cl^- + 1,5 % SO_3^{2-} sous forme de NaCl + Na_2SO_4

Ces résultats expliquent que le CPA à forte teneur en C_3A serait résistant aux milieux chlorurés, mais pas à l'eau de mer à cause de la présence de sulfate.

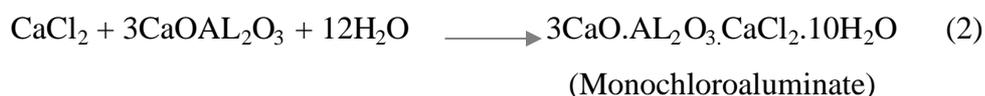
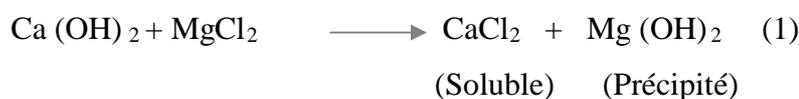
La pénétration des chlorures de la structure poreuse de béton : le pourcentage des chlorures libres s'accroît avec le rapport E/C (alors que la quantité de chlorures liés reste sensiblement constante) et avec la concentration en sels du milieu environnant. [72, 73].

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. [38].

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. [15].

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]. Ces mêmes ions chlores peuvent s'insérer dans le réseau cristallin de CSH 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.

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 au cations divalents (par exemple $CaCl_2$) soit plus rapide que celle correspondant aux cations monovalents comme NaCl [4, 72, 78]. Par contre les chloroaluminates se forment en quantité plus importante à partir de $CaCl_2$ que de NaCl. [68, 72].

On peut relever trois conséquences relatives à l'incorporation d'addition 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. Or, les informations rapportées par certains auteurs.[79, 80] ; montrent qu'au contraire, la quantité de chlorure liée est plus élevée dans les ciments composés au laitier et aux cendres volantes que dans le ciment portland.
- ✓ 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.
- ✓ Le coefficient de diffusion apparent est dépendant des additions minérales. A condition de respecter une cure humide prolongée, l'ajout de laitiers, de cendres volantes ou de fumée de silice réduit dans des proportions sensibles les coefficients de diffusion des chlorures dans le béton, dont les valeurs moyennes sont reportés dans le tableau (I.2).

Tableau (I.2) : Coefficient de diffusion des différents types de ciment, d'après, [17].

Nature du ciment E/C = 0,5- 0,6	Coefficient de diffusion $D_a (10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$
Ciment portland	5
Ciment au laitier	0,5
Ciment aux cendres	1,5

F. HUNKELER, 2002 ; explique que la résistance aux chlorures élevée à très élevée peut être obtenue par la réduction du facteur E/C (≤ 0.4), et pour les facteurs E/L (L = C + ajout) entre 0.4 et 0.5;

- L'ajout de fumée de silice, même à faible dosage de 7 % / masse de la teneur en ciment.
- De cendres volantes à plutôt haut dosage (supérieur à environ 30 % / masse). Ou de laitier (environ 60 % / masse).

BENTZ et GARBOCZI [1992] ; ont de plus montré que la dissolution de la portlandite peut significativement accroître les propriétés de transport des pâtes de ciment hydraté. Une étude sur des pâtes de ciment hydratée immergées dans des solutions plus ou moins acides montre que plus le PH de la solution d'essai est bas, plus la porosité totale augmente. [DELAGRAVE, 1996].

I.5.3. 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 portlands par réaction du gypse, car cette ettringite n'est jamais expansive. [17].

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 :



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

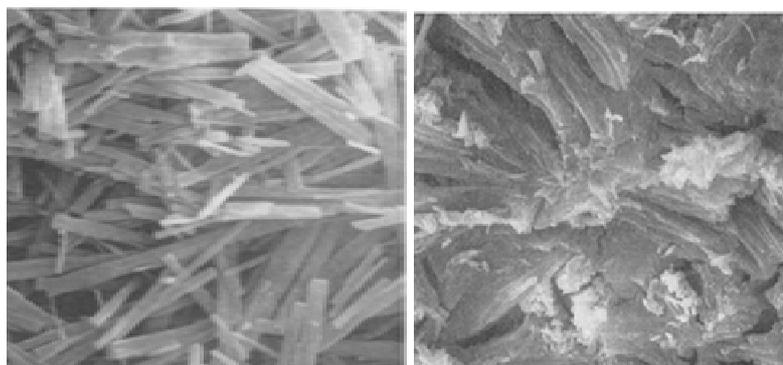
- Soit à partir de reliquat de C_3A anhydre :



- Soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C_4AH_{13} ou de monosulfoaluminate de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$.

(a)

(b)



Photos (I.1) : Micrographies de l'ettringite, d'après [17].

(a) : Cristaux bien formés d'ettringite non expansive précipités à partir de la solution

(b) : Ettringite massive mal cristallisée expansive formée topochimiquement.

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 études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- ✓ Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- ✓ Pénétration des anions SO_4^{-2} par diffusion limitée à une zone superficielle.
- ✓ Pénétration du cation associé et réaction de substitution : Cation (Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , ...) \longrightarrow Ca^{2+} et formation du gypse en solution ou cristallisé suivant réaction ponctuelle des ions sulfate avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydrates (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$) avec formation, in situ, d'ettringite expansive.
- ✓ Cristallisation par « effet de coin » due à la pression de cristallisation de l'ettringite.
- ✓ Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- ✓ Progression de l'attaque suivant un front de dégradation dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- ✓ Destruction plus ou moins complète du béton.

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^{2+} qui s'échange avec Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} suivant les réactions :



Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduisent à la formation de brucite Mg(OH)_2 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.

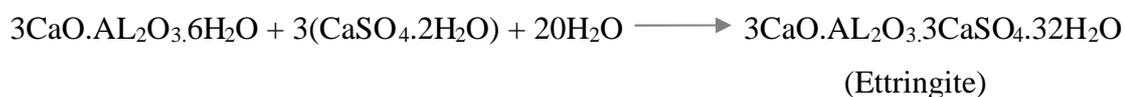
De plus, la cristallisation d'ettringite, instable en présence de sulfate de magnésium, intensifie la réaction de formation du gypse [82].

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.

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 SO_4^{2-} et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment. L'action des eaux sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment. Réaction avec la chaux et formation du gypse secondaire.



Une partie du gypse secondaire formé au cours de cette réaction précipite et provoque une expansion, l'autre partie soluble entraîne une érosion et une réaction avec l'aluminate tricalcique d'après le schéma de la réaction suivante:



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 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ et le CaSO_4).

Les CSH, 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.

Le sulfate de potassium, a une action voisine de celle du sulfate de sodium, mais la vitesse d'attaque est un peu plus lente. La plupart des sulfates métalliques solubles sont agressifs vis-à-vis du béton, à l'exception des sulfates de plomb et de baryum très peu soluble.

Les phases solides dans le ciment portland bien hydraté, sont C-S-H, C-H et les produits d'hydratation contenant l'alumine, ces deux derniers sont les plus vulnérables contre l'attaque des ions de sulfates.

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 C_3S , l'action des sulfates sera beaucoup moins agressive que si on utilise le mélange $\text{C}_3\text{S} + 10\% \text{C}_3\text{A}$. (Figure (I.45)).

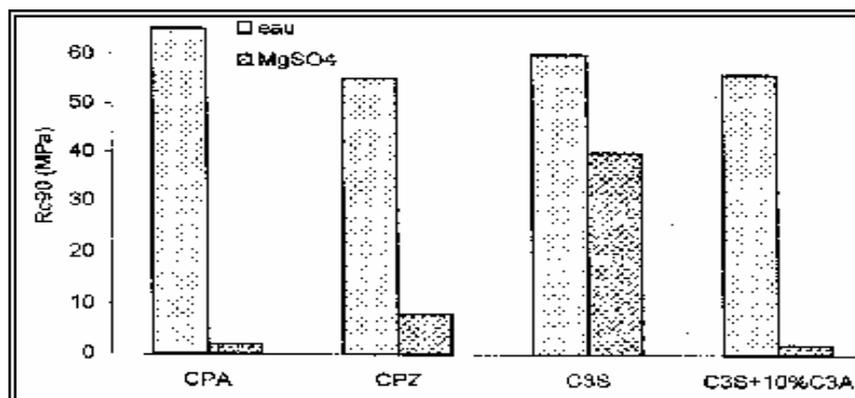


Figure (I.45) : Chute de la résistance à la compression de différents types de ciment Après la percolation des sulfates, d'après [80].

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 MgSO_4 en comparaison à la pouzzolane qui contient $17,58 \%$ Al_2O_3 . Evidemment, 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 aluminat hydraté vulnérable aux sulfates dans la pâte de ciment. [63]. Donc, on peut conclure que l'attaque sulfatique peut être réglée quand la présence d'aluminat hydraté dans la pâte de ciment est réduite ou même éliminée par la réduction de la teneur en C_3A ou par la substitution d'une partie de ciment par un matériau convenable.

Mehta [63], remarque que cette dernière méthode est effectivement employée pour réduire mieux la quantité de CH due à l'hydratation de ciment (le cas des matériaux pouzzolaniques). Ce n'est que récemment que la formation de thaumasite a été également reconnue comme un mécanisme entraînant des dégâts. La thaumasite est également un produit expansif, qui est du à la réaction de la pâte de ciment durcie avec les ions de sulfate. Sa formule ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) indique qu'elle n'a pas besoin de C_3A hydratée pour se former. Il en résulte que dans des circonstances défavorables, même les bétons avec des ciments portlands résistant aux sulfates, qui se caractérisent par une faible teneur en C_3A , peuvent être détruits par des ions de sulfate. [5].

La réduction de la perméabilité est assurée par l'utilisation des ajouts pouzzolaniques, qui devient un facteur majeur dans l'amélioration de la durabilité du béton exposé aux solutions sulfatiques.

Les essais de laboratoire ainsi que les tests in situ montrent que la plupart des pouzzolanes naturelles améliorent la résistance de béton contre l'attaque des sulfates quand elles sont utilisées comme remplacement partiel.

Massaza et Costa [20], ont confectionné des ciments composés de ciment portland avec ajout de 10, 30 ou 40 % de pouzzolane naturelle de l'Italie. Les mesures d'expansion sur des prismes standards de mortiers exposés à une solution de 1 % de $MgSO_4$ pour une période de 5 ans (figure (I.46)), prouvent que l'expansion engendrée par les sulfates est légèrement réduite par l'addition de 10 % de pouzzolane, mais elle est considérablement réduite quand la proportion ajoutée est de 30 ou 40 %.

Les auteurs ont attribué ces résultats à la haute imperméabilité et à la faible teneur en CH 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, le CH est présent non seulement en petite quantité mais encore entouré par les produits imperméables de réactions pouzzolaniques.

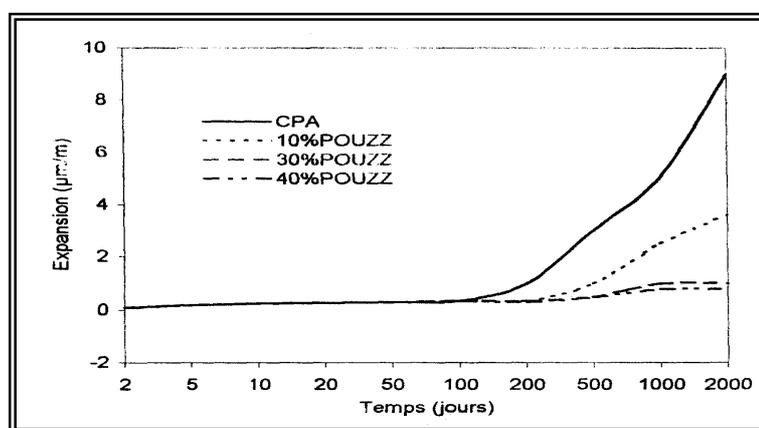


Figure (I.46) : Effet de la substitution de ciment portland avec de la pouzzolane naturelle sur l'expansion de mortiers, d'après [55].

Mehta [63] 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 %. Pour étudier l'influence des sulfates sur la résistance à la compression, des pâtes durcies de ciment portland ordinaire, de ciment résistant aux sulfates et de ciment pouzzolanique (80 % CPA+20 % pouzzolane) sont immergées séparément dans des solutions de 5 % ($MgSO_4$ et Na_2SO_4) jusqu'à un 1 an. [6].

La résistance à la compression est mise en corrélation autant que possible avec la composition chimique et minéralogique des ciments utilisés et les cations attachés aux ions des sulfates.

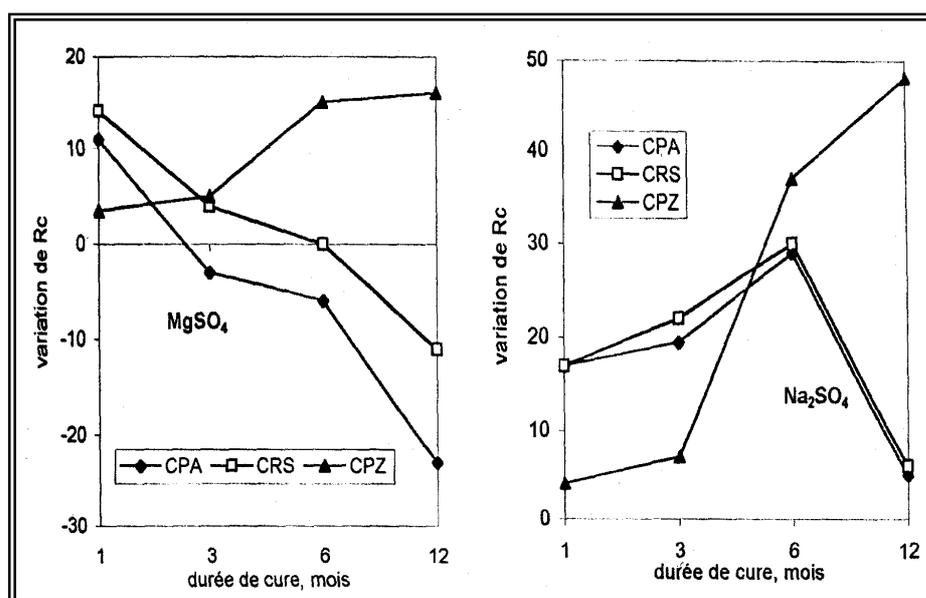


Figure (I.47) : La variation de la résistance à la compression de pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatiques en fonction de la durée de cure, d'après [6].

D'après la figure (I.47) la résistance de la pâte de ciment pouzzolanique augmente avec la durée de cure, pour les deux autres ciments la résistance diminue jusqu'à 1 an (pour les pâtes immergées dans $MgSO_4$), mais elle augmente jusqu'à 6 mois (le cas de Na_2SO_4), après elle diminue d'une manière aiguë jusqu'à 1 an.

Le comportement de la résistance des différentes pâtes de ciment dans les solutions de sulfates est principalement attribué à la pénétration des sulfates et leurs réactions avec les constituants des ciments [6].

Le ciment pouzzolanique est durable dans toutes les solutions sulfatiques à cause de la formation supplémentaire de C-S-H. Ces hydrates précipitent dans les pores et causent la diminution de la porosité. D'un autre côté les pâtes immergées dans la solution Na_2SO_4 montrent une augmentation de résistance jusqu'à 6 mois, ceci s'explique par le fait de l'augmentation de PH due à la formation de NaOH qui stabilise la formation de C-S-H. [6].

En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation des ciments [20], ce qui explique l'augmentation de la résistance de la pâte de ciment aux jeunes âges.

I.5.4. CONCEPTION DE BÉTONS CHIMIQUEMENT RÉSISTANTS

La conception de bétons durables exposés aux milieux chimiques dépend du degré d'agressivité de l'environnement. Un béton compact, peu perméable, s'oppose à la pénétration des espèces chimiques agressives. A cet égard les recommandations générales du fascicule «P18-01» présentées dans le tableau (I.3) suivant sont importantes. Elles fournissent les caractéristiques essentielles de conception de bétons durables en fonction du type de ciment, de son dosage et du rapport E/C.

Tableau (I.3) : Composition des bétons en fonction du niveau d'agressivité, selon le fascicule «P 18-011».

Niveau d'agressivité		A ₂	A ₃	A ₄ [*]
AFNOR	E/C	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,50
	Dosage en ciment (Kg/m ³)	$\frac{550}{\sqrt[3]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[3]{D}}$	$\frac{700}{\sqrt[3]{D}}$

[*] : Protection supplémentaire indispensable pour le béton
D : Dimension maximale des granulats (en mm).

Bien entendu, il faut éviter tout ce qui peut contribuer à accroître la porosité du béton (mauvais compactage, cure insuffisante, fissures, défauts structurels, ...) et à faciliter, ainsi l'accès des solutions agressives. Un autre élément à prendre en compte relève de la disposition des différentes parties d'un ouvrage vis-à-vis du flux agressif.

I.6. LA DÉFORMABILITÉ

Le béton est un matériau en évolution : ses propriétés se modifient constamment au cours de son existences, l'hydrations du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques et les modules de déformation. [88]. 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 :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Avec:

- σ : Contrainte appliquée.
- E : Module d'élasticité (1/E est le module de rigidité).
- ε : 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. [88].

Certains chercheurs ont même remarqué que pratiquement le fluage ε_f variait comme le carré du rapport en poids (E/C), soit : $\varepsilon_f = K (E/C)^2$. C'est ainsi que le fluage serait doublé en passant d'un rapport E/C = 0.45 à un rapport E/C = 0.65. 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. [88].

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. [61]. Et 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 prêté 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 de béton.

I.6.1. Les déformations instantanées - courbe expérimentale

Cette courbe [Contrainte-Déformation] s'obtient par enregistrement de $F_{bc} - \varepsilon_{bc}$ au cours d'un essai de compression sur éprouvette (16×32) cm² :

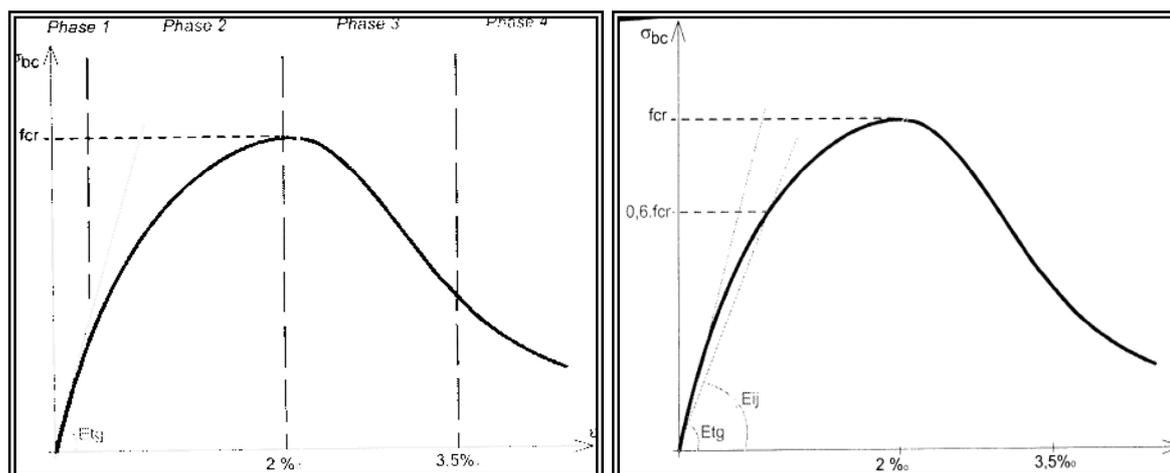


Figure (I.48) : La courbe expérimentale [Contrainte-Déformation] au cours d'un essai de compression sur éprouvette (16×32) cm², d'après [33].

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

Phase 2 : Une micro-fissuration 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 $\epsilon_b = 2 \text{ ‰}$ (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 [33], on définit un module de déformation instantanée sécant E_{ij} pour une contrainte de courte durée ($t < 24 \text{ h}$) et au plus égal à $0.60.f_{cj}$: $E_{ij} = 12000 \cdot \sqrt[3]{F_{cj}}$.

CONCLUSION

A l'origine, les ajouts ont été lancés 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 ajouts influant positivement sur certaines des propriétés du béton à l'état frais mais surtout à l'état durci.

Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques.

L'utilisation des ajouts minéraux 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 (CO₂).

Explique le «chercheur sherbrookoïse»: D'une part, nous utilisons des résidus industriels. Ensuite, en réduisant la quantité de ciment, nous diminuons le volume de gaz à effet de serre émis. Enfin, nous obtenons des bétons beaucoup plus performants et durables.

La raison derrière l'ajout de la fumée de silice est d'amener une augmentation des performances mécaniques, augmente le module d'élasticité, diminue le risque de lixiviation, et diminue la perméabilité. Il est important de noter qu'un superplastifiant est utilisé pour ajuster la maniabilité du béton sur une période de temps qui permet la mise en place.

A la lumière de l'examen de la documentation, le recours aux ajouts est certainement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie du ciment et du béton.

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 (FS), coûteuse, le présent travail traite l'influence de sable de dune finement broyé sur la stabilité de béton.

CHAPITRE II

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES

II. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉES

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. Le broyage est effectué à l'aide d'un broyeur conventionnel à boulets (Figure II.1) «Cylindre métallique horizontal mis en rotation et rempli au 1/3 de boulets d'aciers qui broient la matière en se heurtant et en se frottant dans un mouvement de cascade », après en procède au tamisage.

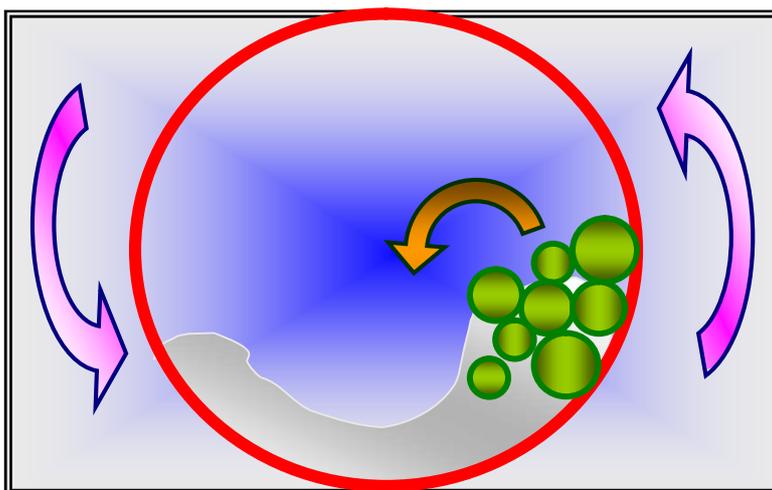


Figure II.1: Représentation schématique d'un broyeur à boulets

II.1. SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ

Nous avons utilisé un sable de dune finement broyé de la région de Biskra. Après que les grains de silice ont été réduits à la taille voulue, ils peuvent être soumis à divers procédés de valorisation visant à éliminer les impuretés qui sont généralement composées d'argile, de carbonates et de minéraux contenant du ferromanganèse.

II.1.1. Analyse chimique

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie de AIN-TOUTA, elle est contenue dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Analyse chimique du sable de dune finement broyé

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	PAF
(%)	74.61	1.35	0.86	17.3	0.29	0.04	0.47	0.005	5.04

II.1.2. Propriété physique

- ✓ Masse volumique apparente = 1300 kg/m³
- ✓ Masse volumique absolue = 2770 kg/m³
- ✓ Surface spécifique (Fs₁) = 3000 cm²/g
- ✓ Surface spécifique (Fs₂) = 4000 cm²/g

II.2. CIMENT

II.2.1. Ciment portland

Le ciment qu'on a utilisé est un ciment Portland artificiel (CPA), il est composé de 95 % de clinker et 5 % de gypse, pour la régularisation de la prise. Le clinker qu'on a utilisé est celui de la cimenterie de AIN-TOUTA.

II.2.1.1. Analyse chimique et minéralogique

La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de [BOGUE, 1950], elle est contenue dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Composition chimique et minéralogique de clinker

Composition chimique (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Chaux libre	Résidu insoluble	PAF
22,00	5,30	3,38	65,16	1,77	2,32	1,40	0,48
Composition minéralogique (%)							
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF				
58,09	23,32	8,32	10,27				

- L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301 à savoir : % [MgO + CaO (libre)] < 5 %.

II.2.1.2. Propriété physique

- ✓ Masse volumique apparente = 1120 kg/m³
- ✓ Masse volumique absolue = 3050 kg/m³
- ✓ Surface spécifique = 3200 cm²/g

II.2.2. Ciment portland avec ajout

Le ciment qu'on a utilisé est un ciment portland avec ajout (CPJ-CEM II/42.5A) de la cimenterie de AIN-TOUTA.

II.2.2.1. Analyse chimique et minéralogique

Elle est contenue dans le tableau II.3.

Tableau II.3: Composition chimique et minéralogique de (CPJ-CEM II / 42.5A)

Composition chimique (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Résidu insoluble	SO ₃	Chaux libre	Cl ⁻	PAF
20.43	5.37	3.00	61.69	1.80	1.12	2.20	0.97	0.027	5.03
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF						
64.14	10.54	9.16	9.12						

- L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301 à savoir : % [MgO + CaO (libre)] < 5 % et faible taux de (Cl⁻ < 3.5 %).

II.2.2.2. Propriété physique

- ✓ Masse volumique apparente = 1080 kg/m³
- ✓ Masse volumique absolue = 3150 kg/m³
- ✓ Surface spécifique = 3300 cm²/g

II.3. LE SABLE

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

II.3.1. Analyse granulométrique

Tableau II.4: Analyse granulométrique du sable

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5,000	0,00	0,00	0,00	100,00
2,500	190,00	190,00	9,50	90,50
1,250	210,00	400,00	20,00	80,00
0,630	480,00	880,00	44,00	56,00
0,315	610,00	1490,00	74,50	25,50
0,160	290,00	1780,00	89,00	11,00
0,080	120,00	1900,00	95,00	5,00
le fond	98,00	1998	99,90	0,10

II.3.2. Propriété physique

- ✓ Masse volumique apparente = 1440 kg/m³
- ✓ Masse volumique absolue = 2500 kg/m³
- ✓ Module de finesse = 2,37 (Préférentiel).
- ✓ Equivalent de sable = 68 (Sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante).
- ✓ Il est à noter que la courbe granulométrique de notre sable s'inscrit dans le fuseau recommandé par le béton courant. (Figure II.2).

II.4. LA PIERRE CONCASSÉE

Nous avons utilisé des pierres concassées de fraction 7/15 et 15/25 de la région de AIN-TOUTA.

II.4.1. Analyse granulométrique (Figure II.3).

Tableau II.5: Analyse granulométrique des pierres concassées

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	805,00	805,00	16,10	83,90
16,00	1915,00	2720,00	54,40	45,60
12,50	950,00	3670,00	73,40	26,60
10,00	753,00	4423,00	88,46	11,54
8,00	410,00	4833,00	96,66	3,34
6,30	160,00	4993,00	99,86	0,14
5,00	4,00	4997,00	99,94	0,06
le fond	3,00	5000,00	100,00	0

II.4.2. Propriété physique

- ✓ Masse volumique apparente = 1420 kg/m³
- ✓ Masse volumique absolue = 2610 kg/m³
- ✓ Coefficient de Los Angeles = 21 % (Dur).

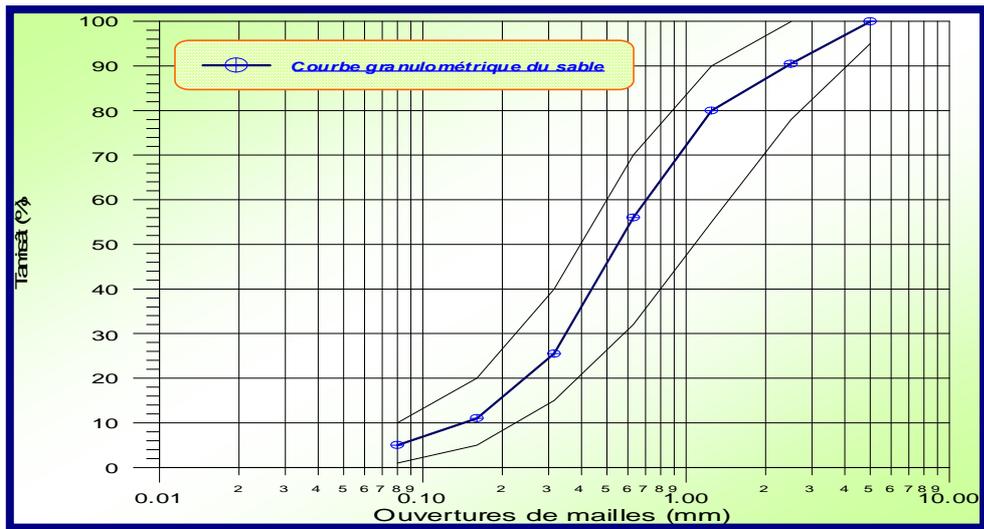


Figure II.2 : Courbe granulométrique du sable

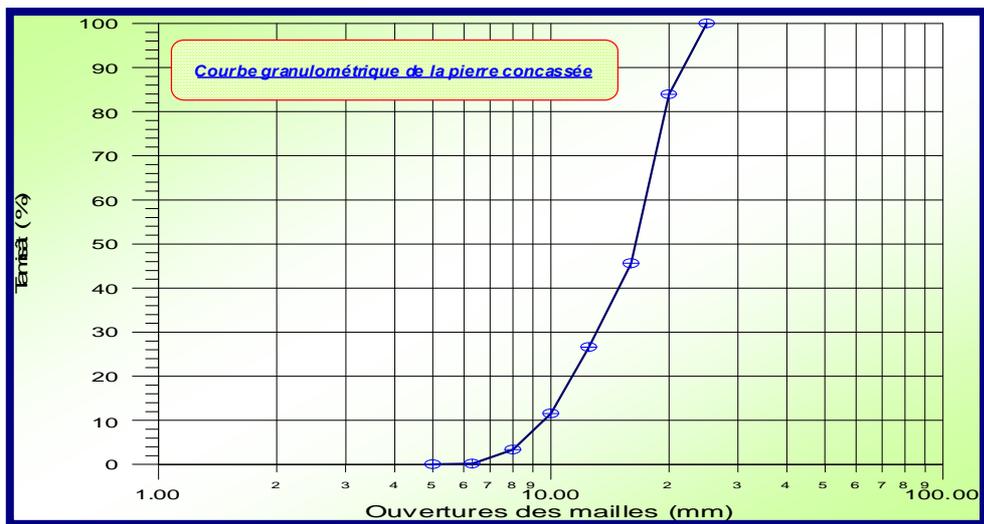


Figure II.3 : Courbe granulométrique de la pierre concassée

CHAPITRE III

ETUDE DU LIANT ET MORTIER DE CIMENT AVEC SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ

III.1. CARACTÉRISTIQUE DE LA PÂTE

A/- Conduite des essais

Tous les essais sont réalisés dans les mêmes conditions.

B/- Préparation des mélanges

Tous les mélanges sont réalisés dans les mêmes conditions.

III.1.1. Propriétés mécaniques du liant

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages du sable de dune finement broyé et l'influence de la finesse de mouture ($F_s = 3000$ et $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$), ainsi que l'influence du rapport ($E/(C+S_d) = 0.4, 0.3$ et 0.25) sur la résistance mécanique de la pâte du ciment, on a choisi six pourcentages (5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 30 % et 40 %) pour les additionner au ciment CPA et obtenir un nouveau ciment avec ajout [Optimisation de la teneur du ciment en sable de dune finement broyé], et tirer le pourcentage du sable de dune broyé qui donne des résistances mécaniques comparables à celui du ciment «CPJ 42.5».

On a utilisé des éprouvettes cubiques de $(2 \times 2 \times 2) \text{ cm}^3$ en pâte pure à raison de six éprouvettes par essai.

Le durcissement des éprouvettes se fait dans les conditions naturelles, on soumet les éprouvettes à une cure normale dans l'eau potable à 20°C .

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

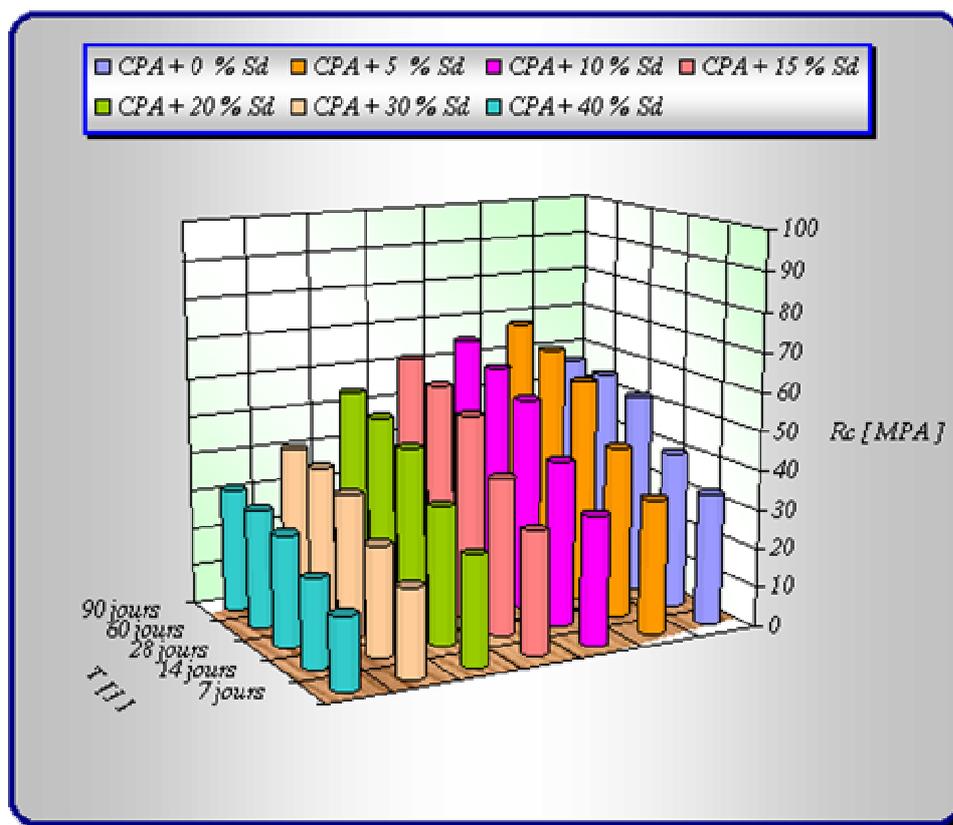


Figure III.1: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,4$)

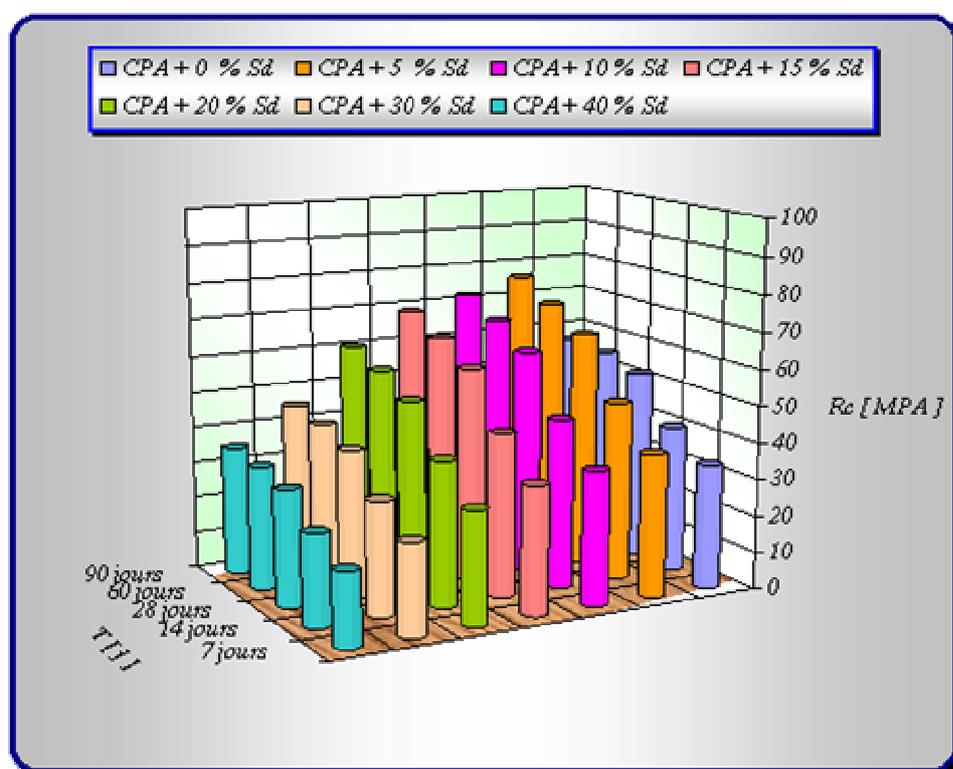


Figure III.2: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,4$)

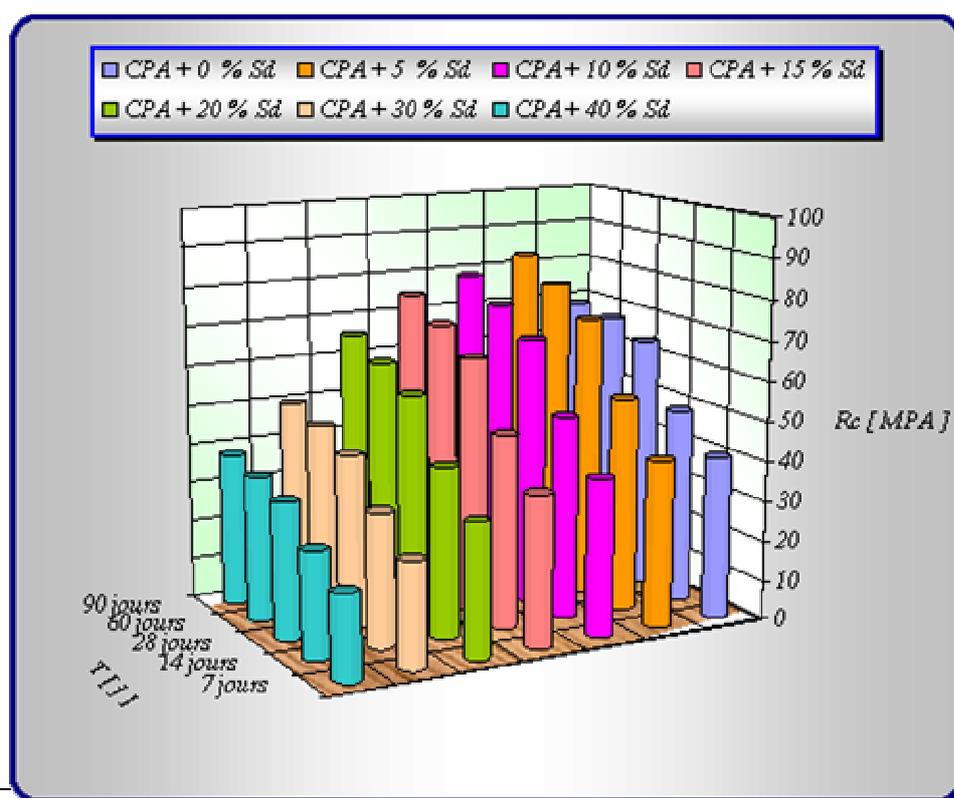


Figure III.3: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,3$)

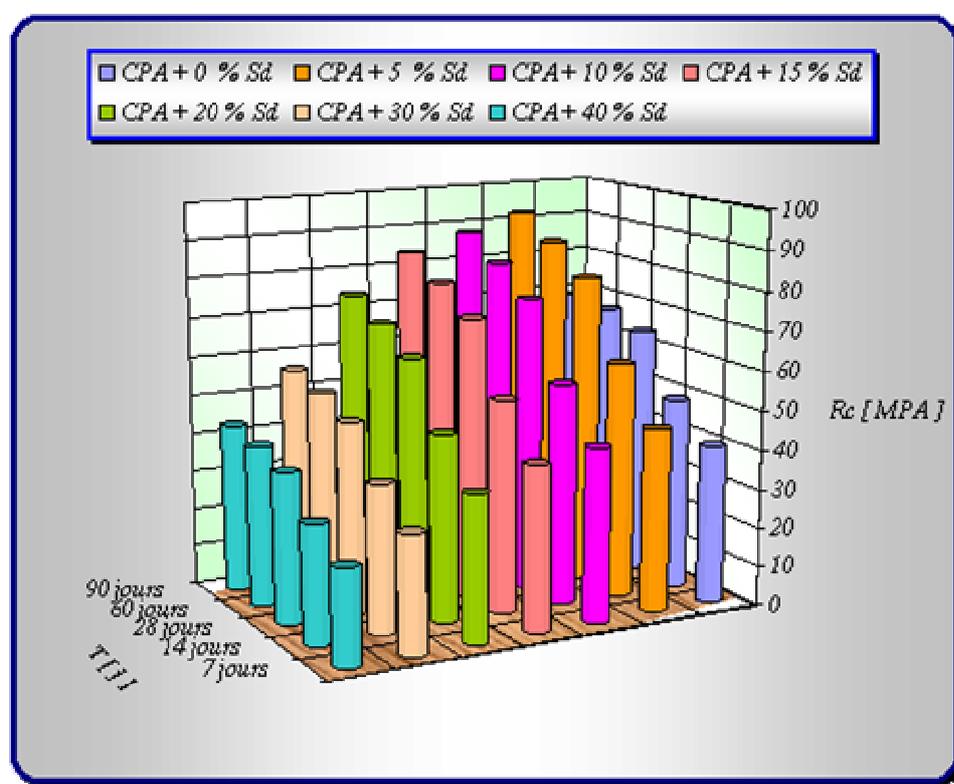


Figure III.4: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,3$)

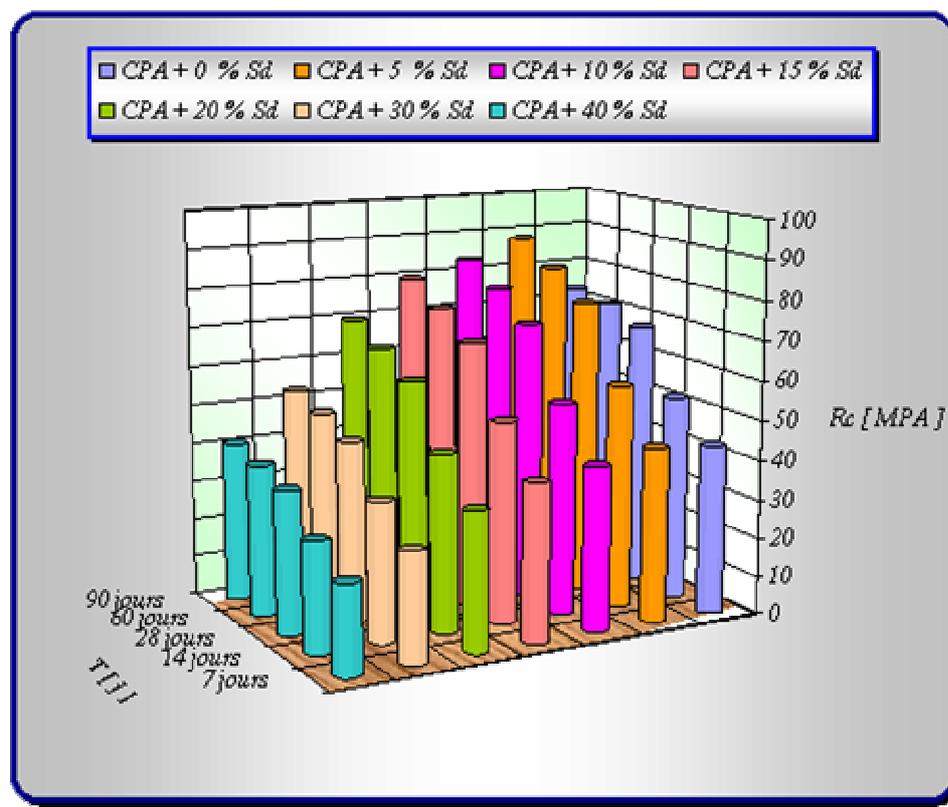


Figure III.5: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$)

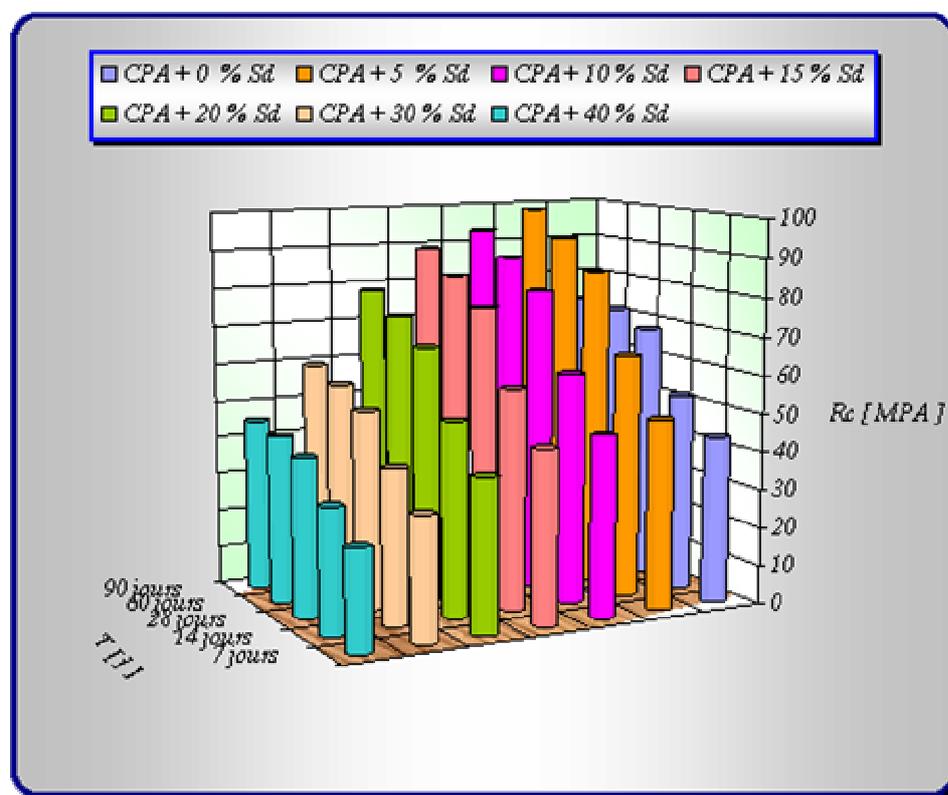


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$)

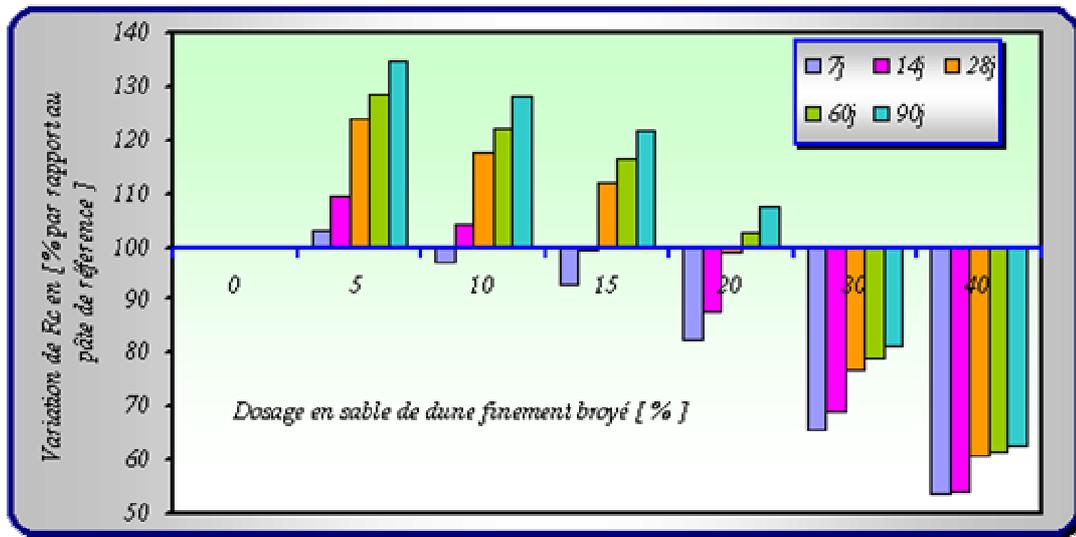


Figure III.7 : La variation de La résistance à la compression de ciment en [%] par rapport au pâte de référence en fonction de la durée de cure et de la teneur en sable de dune broyé ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$)

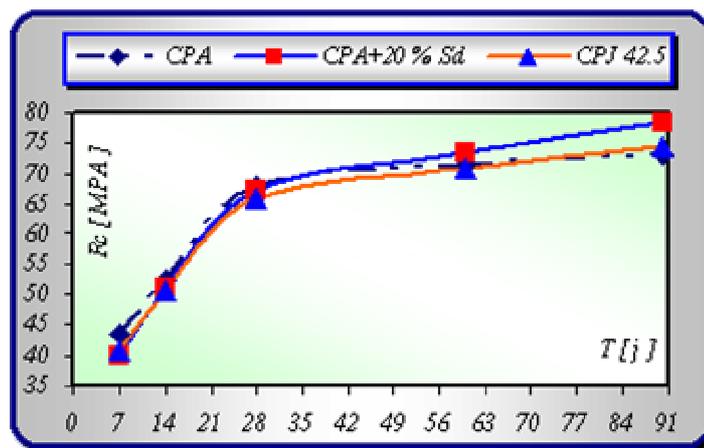


Figure III.8 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du type de ciment ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, $E/(C+Sd) = 0,25$)

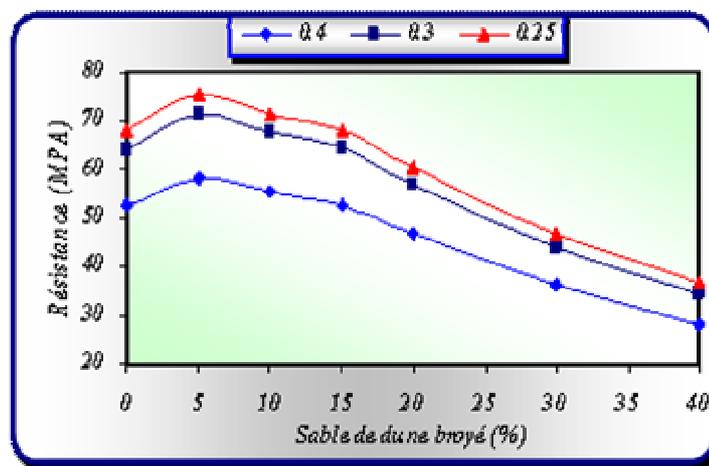


Figure III.9 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage du sable de dune broyé et du rapport $E/(C+Sd)$, $F_s = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

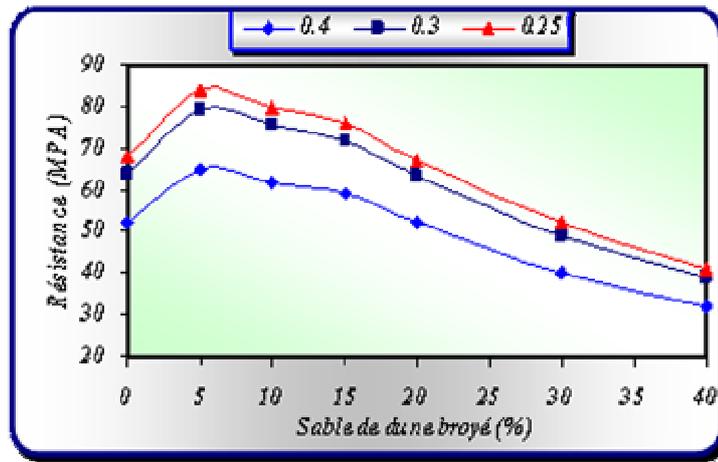


Figure III.10 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage du sable de dune broyé et du rapport $E/(C+Sd)$, $F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$

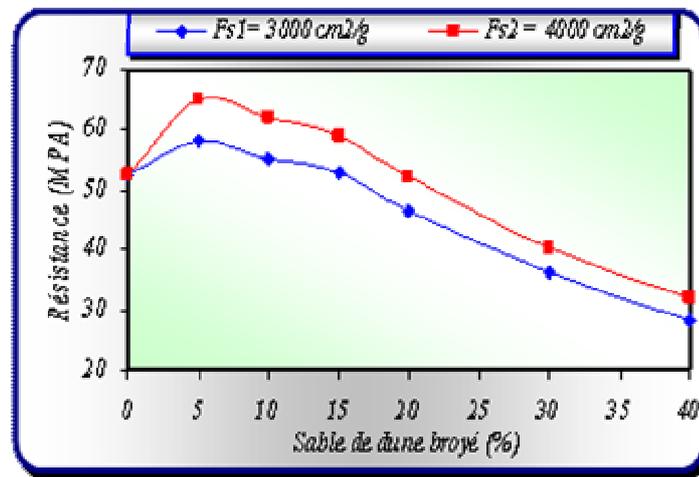


Figure III.11 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage et de la finesse de mouture du sable de dune broyé, $E/(C+Sd) = 0,4$

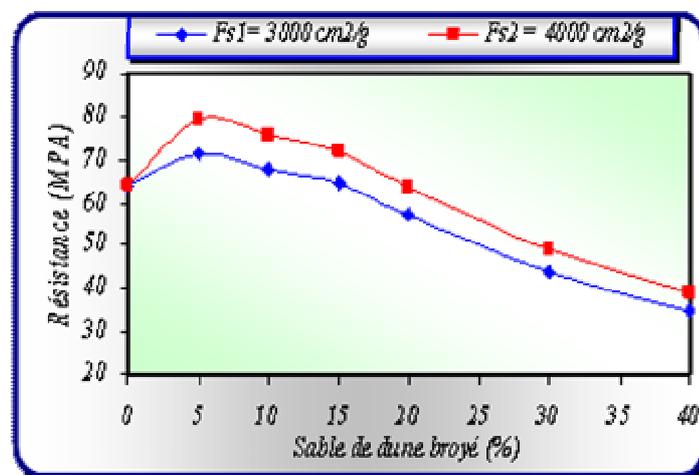


Figure III.12 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage et de la finesse de mouture du sable de dune broyé, $E/(C+Sd) = 0,3$

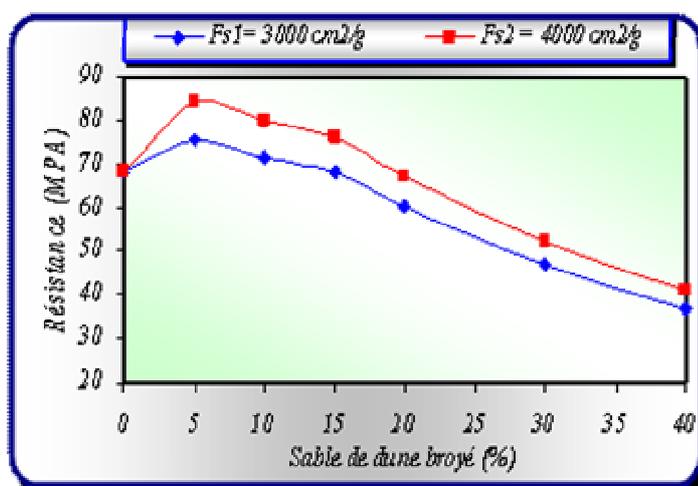


Figure III.13 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du pourcentage et de la finesse de mouture du sable de dune broyé, $E/(C+Sd) = 0,25$

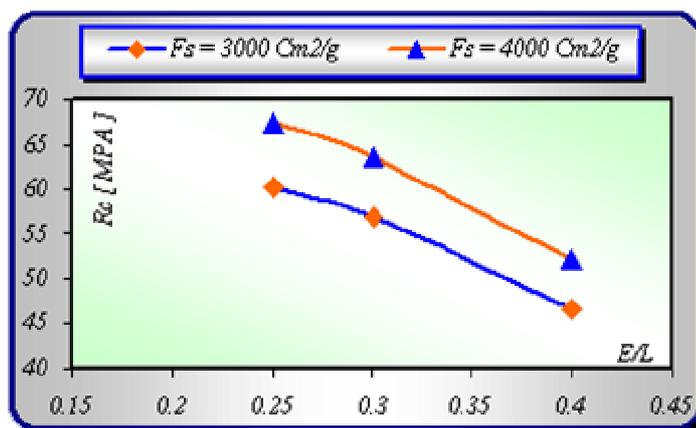


Figure III.14 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment a 20 % du sable de dune broyé en fonction de la finesse de mouture et du rapport $E/(C+Sd)$

III.1.1.1. Commentaires

A partir des résultats obtenus des essais de compression des éprouvettes cubiques on a pu construire des graphiques présentant l'évolution dans le temps de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel 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 durcies. Tandis que pour celles de [28 jours] les résistances augmentent sensiblement. Cela est du 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 le taux de développement de la résistance du CPA seul à 28 et 90 jours, par rapport à 7 jours, est de 56 % et 68 % respectivement, les résistances des liants à 5 et 40 % en sable de dune finement broyé développent un taux égal à [69 %, 58 %] à 28 j et [97 %, 76 %] à 90 j respectivement, cela traduit le rôle chimique joué par le [Sd] à long terme, et confirme donc l'activité pouzzolanique du [Sd].

Les résistances en compression augmentent lors de la substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des pâtes du ciment par double effet : filler et pouzzolanique.

Un effet filler : Une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice cimentaire.

Un effet pouzzolanique : Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore les performances mécaniques à long terme des pâtes du ciment. Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de C-H en un produit d'hydratation faiblement cristallisé [affinage des grains].

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

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

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

On ajoute (20 %) du sable de dune finement broyé du poids total du ciment pour avoir une résistance à 28 jours proche de celle obtenue à partir de ciment CPJ 42.5.

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 $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ les résistances à tous âges sont amélioré de 12 %.

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 de ciments avec $E/(C+Sd)$ faible développent très rapidement leur résistance à la compression par une concentration élevée en C-S-H.

III.1.2. Propriétés physiques du liant

Le choix de la composition optimale du ciment avec sable de dune finement broyé est fonction des critères physico-mécaniques.

Vu les caractéristiques mécaniques que représentent les liants (avec une substitution allant jusqu'à 40 % du sable de dune finement broyé) étudiés précédemment, on a tiré le pourcentage de (20 %) pour le sable de dune broyé à une finesse de mouture de ($4000 \text{ cm}^2/\text{g}$), avec ce pourcentage on a réalisé les différents essais de contrôle et la comparaison avec le ciment «CPJ 42.5», qui sont présentés sur des tableaux et des courbes dans ce chapitre.

III.1.2.1. La consistance et la prise

Il y a lieu de connaître deux choses :

- ☞ La quantité d'eau nécessaire au gâchage (par l'essai de consistance).
- ☞ La durée de prise (par l'essai de prise).

La consistance ainsi que les temps de début et de fin de prise ($T=27^\circ\text{C}$) de la pâte de ciment sont illustrés dans les figures ci-dessous :

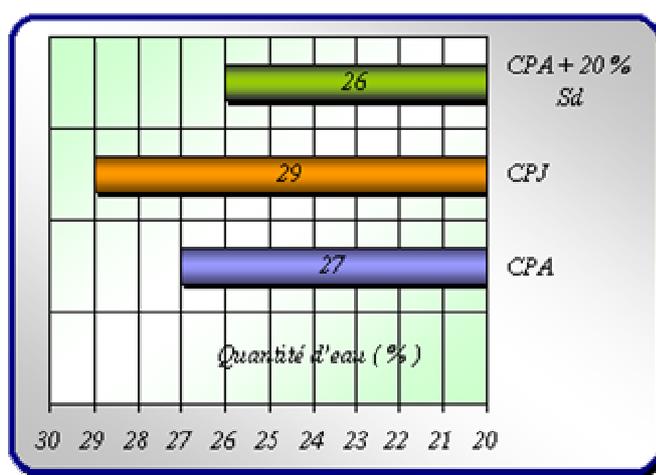


Figure III.15 : Variation de la consistance de la pâte en fonction du type de ciment

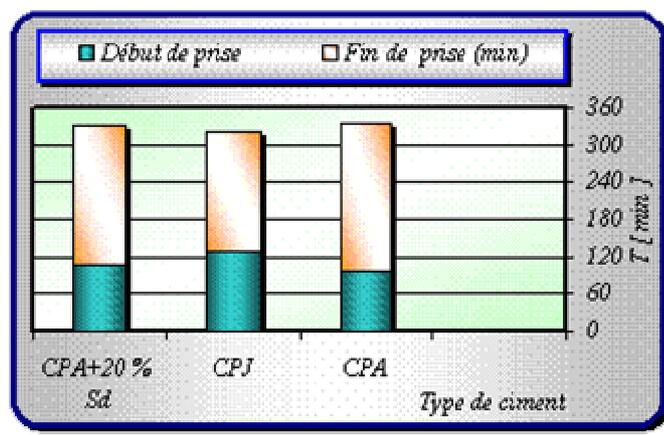


Figure III.16: Temps de début et de fin de prise de la pâte en fonction du type de ciment

III.1.2.1.1. Commentaires

D'après les résultats obtenus on remarque que la teneur en ajout, de 20 % n'a pas engendré de modification significative sur le temps de prise des pâtes de ciment. Par contre l'ajout diminue considérablement leurs consistances initiales (les pâtes deviennent plus fluides). Du fait de leur finesse supérieure à celle de ciment (CPA), donc le (Sd) joue un rôle de lubrifiant.

La quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance normale de la pâte de 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 de ciment. Donc, pour diminuer la demande en eau du ciment, il faut augmenter les proportions en petites et grosses particules afin de diminuer le vide intergranulaire.

D'après la (figure III.15), on remarque que l'ajout de "sable de dune finement broyé" va remplir les vides intergranulaires et diminuer la demande en eau.

D'après la (figure III.16), on voit nettement que le temps de fin de prise de ciment (CPA+20 % Sd) est plus retardé que celui de ciment (CPJ 42.5). Cela s'explique par le fait que la réaction est relativement lente. Ceci peut être une qualité recherchée pour les gâchages en temps chaud. Par contre une accélération de temps de début de prise.

III.1.2.2. Le gonflement

Le gonflement est engendré par l'expansion de certains éléments provoquant à long terme des anomalies à la résistance et présente, après la prise, des fissures dans la masse du liant. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure III.17 :

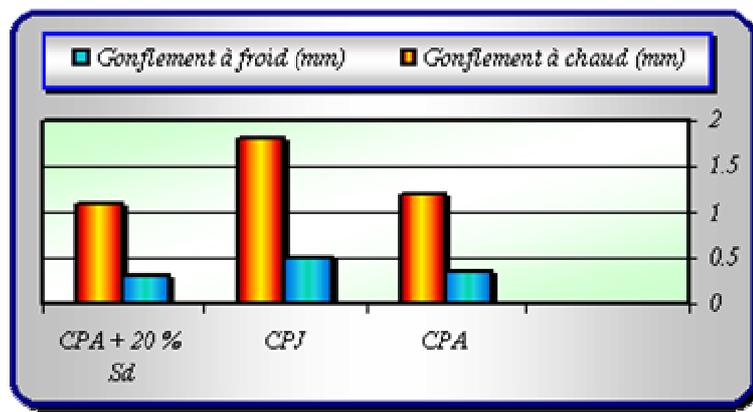


Figure III.17 : Gonflement (à chaud et à froid) de la pâte en fonction du type de ciment

III.1.2.2.1. Commentaires

D'après les résultats obtenus (figure III.17), on voit que le ciment avec sable de dune broyé présente une stabilité de volume parce que les valeurs de gonflement, soit à froid ou à chaud, sont inférieures à 5 mm d'allongement d'après (NF EN 196-3) et (la norme NF P 15-301, limite cette expansion à 10 mm).

On constate que l'addition du sable de dune broyé fait diminuer le gonflement à chaud et à froid du liant.

III.1.3. Action des eaux agressives

Le comportement du béton, placé dans un environnement chimiquement agressif, dépend de facteurs complexes et multiples liés, d'une part, à l'environnement (nature, concentration, renouvellement ou non des éléments agressifs), d'autre part, au béton lui-même (nature et dosage des constituants, condition de fabrication).

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 sulfatiques. Ces altérations d'origine chimique peuvent être amorcées ou renforcées par des actions physiques (chocs thermiques, cycles d'humidification-dessiccation, ...) ou mécaniques.

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 SO_4^{2-} et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment.

La dissociation de MgCl_2 , l'agent le plus actif dans l'attaque des ciments, libère Mg^{2+} qui substitue 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]. Ces mêmes ions chlores 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.

Il faut déterminer le coefficient de qualité (A) qui est défini par la formule suivante :

$$A = R_s / R_{ep}$$

R_s : Résistance à la compression de ciment immergé dans différentes solutions agressives.

R_{ep} : Résistance à la compression de ciment immergé dans l'eau potable.

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

La résistance aux eaux agressives est déterminée à partir des éprouvettes cubiques ($2 \times 2 \times 2$) cm^3 en pâte pure avec un rapport fixe $E/(C+Sd) = 0,25$, et la finesse du sable de dune broyé ($4000 \text{ cm}^2/\text{g}$).

Le durcissement des éprouvettes se fait dans les conditions naturelles [cure sous l'eau] pendant 7 jours (temps zéro), puis les pâtes de ciment durcie sont immergées séparément pendant 28 j et 90 j dans les solutions suivantes : Eau potable, MgCl_2 (5 %) et Na_2SO_4 (5 %).

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

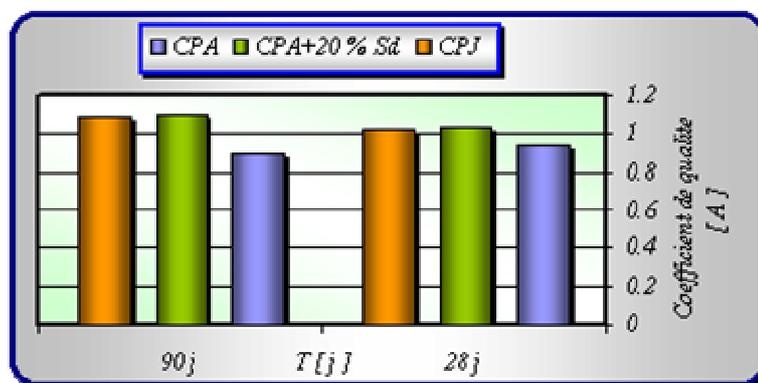


Figure III.18 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution MgCl_2 en fonction du temps et du type de ciment

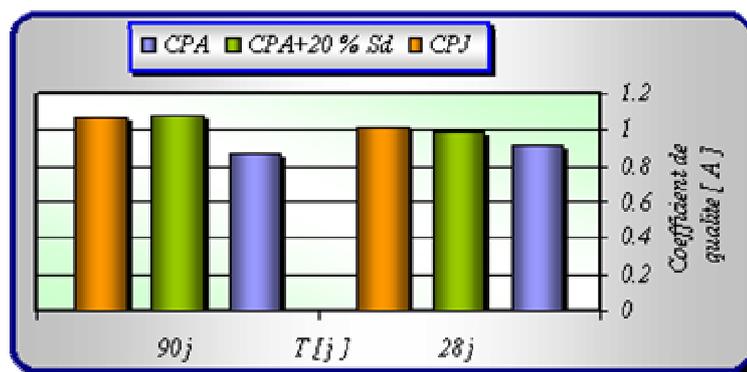


Figure III.19 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution Na_2SO_4 en fonction du temps et du type de ciment

III.1.3.1. Commentaires

L'une des raisons initiales pour utiliser divers ajouts minéraux 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 de ciment hydraté, mais aussi à sa microstructure.

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que le coefficient de qualité (A), dans les deux solutions agressives, explique nettement la résistance au lessivage du ciment à sable de dune broyé aux agents agressifs.

Les ciments (CPA+20 % Sd) et (CPJ 42.5) se comporte 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.

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. Donc 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 du 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 de ciment.

Pour la solution de 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.

En comparant l'effet du milieu agressif de chlorures à celui de sulfates, on remarque que les sulfates influents plus que les chlorures sur le ciment à sable de dune broyé. Par conséquent, le ciment à sable de dune broyé est plus durable dans les milieux où les chlorures sont prédominants.

D'après tout ce qui précède, on peut conclure que le ciment à sable de dune broyé est durable dans les deux solutions agressives. Cela peut être dû à la forte imperméabilité des pâtes de ciments 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 de ciment.

III.2. ETUDE DU MORTIER NORMALISÉ : (SABLE/ CIMENT = 3)

Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, de flexion et de retrait. Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable normalisé. Les essais se sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, à raison de trois éprouvettes par essai. Concernant les conditions de durcissement, dans cette partie on a procédé à un durcissement naturel (conservation des éprouvettes dans de l'eau à température ambiante (20°C en moyenne)) jusqu'à leur test.

III.2.1. Comportement mécanique

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction du type de ciment à 28 jours, sont illustrés dans la figure III.20 :

Pour que nos conclusions soient justifiées, nous avons gardé constants les paramètres suivants : Finesse du [CPA : $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$], [CPJ 42.5 : $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$] et [sable de dune : $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$].

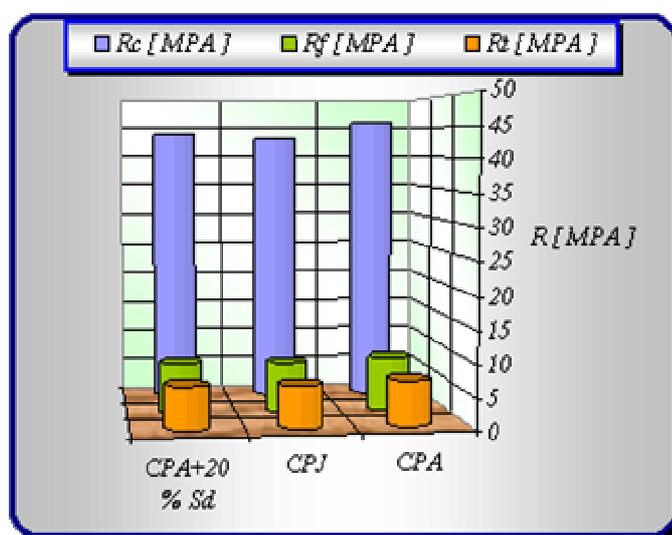


Figure III.20 : Résistance du mortier à la (compression, flexion, traction) à 28 jours en fonction du type de ciment

III.2.1.1. Commentaires

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que : La résistance mécanique à 28 jours, tant en flexion et traction par flexion qu'en compression, augmentent avec le dosage en clinker.

Le mortier à base de (CPA+20 % Sd) présente presque la même résistance à la compression que celle d'un mortier à base d'un (CPJ 42.5).

III.2.2. Retrait et gonflement

On sait que l'hydratation du ciment s'accompagne, du fait de la contraction le chatelier, de la création d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de 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 (capillaires ou autres) qui se développent de ce fait à l'intérieur des capillaires les plus fins.

La pâte de ciment ou le béton mûri continuellement dans l'eau après leur mise en place augmentent en volume et en masse. Ce gonflement est du 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 provoque le ciment étudié 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 $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, par rapport à sa longueur et sa masse à un temps t_0 pris pour origine.

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

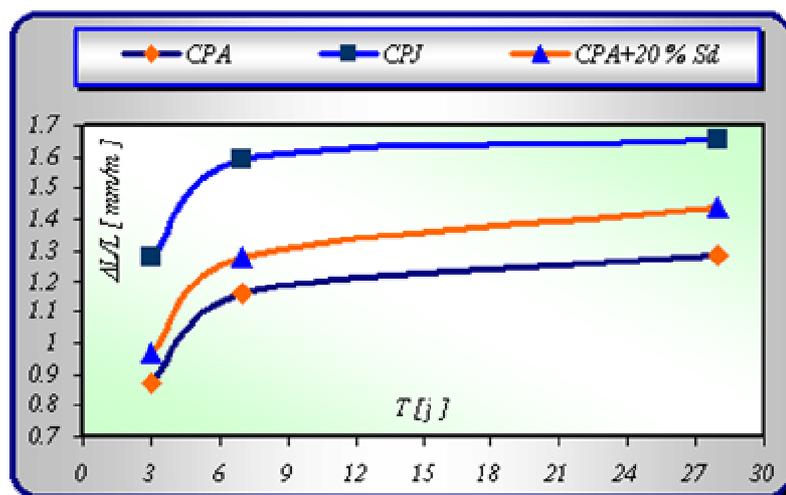


Figure III.21 : Variation linéaire du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de retrait

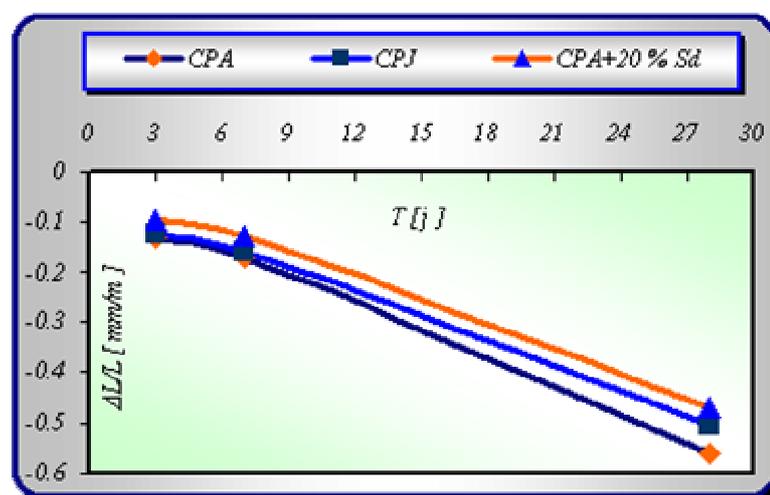


Figure III.22 : Variation linéaire du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de gonflement

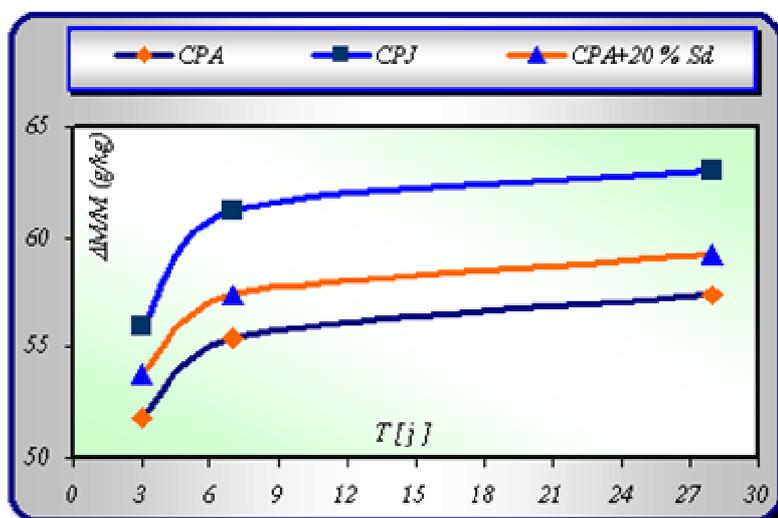


Figure III.23 : Variation massique du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de retrait

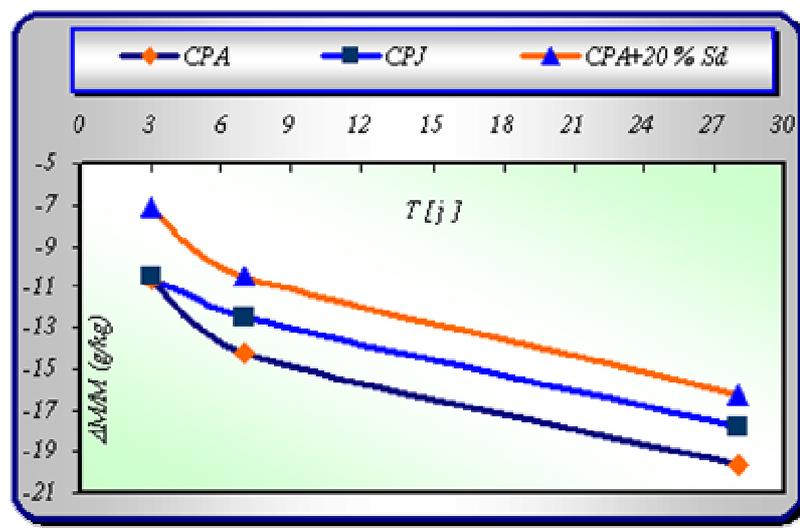


Figure III.24 : Variation massique du mortier en fonction du temps et du type de ciment dans le cas de gonflement

III.2.2.1. Commentaires

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le mortier avec sable de dune finement divisé renferme des déformations libres plus importants que celles du mortier sans ajout, lorsque ces mortiers sont conservés à l'air. Cela s'explique par le fait que l'ajout fait diminuer la quantité de la chaux libre dans le mortier. Contrairement au retrait, le gonflement de [CPA+20% Sd] est inférieur à celui de [CPA]. Le retrait linéaire est inférieur à celui de [CPJ 42.5], et la même remarque pour le gonflement linéaire.

Nous remarquons que le mortier avec sable de dune finement divisé renferme des variations massiques plus importants que celles du mortier sans ajout. Contrairement au retrait, le gonflement de [CPA+20% Sd] est inférieur à celui de [CPA]. Le retrait et le gonflement massique de [CPJ 42.5] sont légèrement plus importants que dans le cas de [CPA+20 % Sd].

III.3. Conclusion

A la lumière des essais réalisés dans le cadre de cette étude nous avons permis d'extraire certains nombres de points :

- ⊕ Les résistances en compression augmentent lors de la substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des pâtes du ciment par double effet : filler et pouzzolanique.

- ⊕ D'après les résultats obtenus, on remarque que le ciment avec 5 % du sable de dune finement broyé a présenté la résistance maximale à la compression avec une finesse de mouture de ($F_s = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$) et du rapport $E/(C+S_d) = 0.25$.
- ⊕ On ajoute (20 %) du sable de dune finement broyé du poids total du ciment pour avoir une résistance à 28 jours proche de celle obtenue à partir de ciment CPJ 42.5.
- ⊕ Les résultats ont montré que par l'augmentation de la finesse de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ les résistances à tous âges sont amélioré de 12 %.
- ⊕ Concernant l'influence de $E/(C+S_d)$ on voit nettement que la résistance de toutes les pâtes de ciment durcies à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport $E/(C+S_d)$.
- ⊕ On remarque que la teneur en ajout, de 20 % n'a pas engendré de modification significative sur le temps de prise des pâtes de ciment. Par contre l'ajout diminue considérablement leurs consistances initiales (les pâtes deviennent plus fluides). Du fait de leur finesse supérieure à celle de ciment (CPA), donc le (S_d) joue un rôle de lubrifiant.
- ⊕ On remarque que l'ajout de "sable de dune finement broyé" va remplir les vides intergranulaires et diminuer la demande en eau.
- ⊕ On voit nettement que le temps de fin de prise de ciment (CPA+20 % S_d) est plus retardé que celui de ciment (CPJ 42.5). Cela s'explique par le fait que la réaction est lente. Ceci peut être une qualité recherchée pour les gâchages en temps chaud. Par contre une accélération de temps de début de prise.
- ⊕ Le ciment avec sable de dune broyé présente une stabilité de volume parce que les valeurs de gonflement, soit à froid ou à chaud, sont inférieures à 5 mm d'après (NF EN 196-3) et (la norme NF P 15-301, limite cette expansion à 10 mm).
- ⊕ Le ciment avec sable de dune broyé présente une meilleure résistance aux chlorures et aux sulfates. Cela est du à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité, et à une diminution de la quantité de C-H, 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 de ciment.

- ⊕ En comparant l'effet du milieu agressif de chlorures à celui de sulfates, on remarque que les sulfates influent plus que les chlorures sur le ciment à sable de dune broyé. Par conséquent, le ciment à sable de dune 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. Donc le sable de dune finement broyé offre également une bonne protection contre l'agressivité des sulfates.
 - ⊕ Le mortier à base de (CPA+20 % Sd) présente la même résistance à la compression à celle d'un mortier à base d'un (CPJ 42.5). L'effet de sable de dune broyé sur la résistance à la flexion et la traction par flexion est similaire à celui sur la résistance à la compression.
 - ⊕ D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le mortier avec sable de dune finement divisé renferme des déformations libres plus importantes que celles du mortier sans ajout, lorsque ces mortiers sont conservés à l'air. Cela s'explique par le fait que l'ajout fait diminuer la quantité de la chaux libre dans le mortier. Contrairement au retrait, le gonflement de [CPA+20 % Sd] est inférieur à celui de [CPA]. Le retrait linéaire est inférieur à celui de [CPJ 42.5], et la même remarque pour le gonflement linéaire.
 - ⊕ Nous remarquons que le mortier avec sable de dune finement divisé renferme des variations massiques plus importants que celles du mortier sans ajout. Contrairement au retrait, le gonflement de [CPA+20% Sd] est inférieur à celui de [CPA]. Le retrait et le gonflement massique de [CPJ 42.5] sont légèrement plus importants que dans le cas de [CPA+20 % Sd].
- ↗ Pour compléter notre programme d'essais, et évaluer la capacité de ciment avec sable de dune finement broyé on a confectionné des éprouvettes cubiques, prismatiques et cylindriques dans le chapitre prochain pour tester les caractéristiques suivantes : la résistance de compression, de flexion et de traction par fendage, la perméabilité, l'absorption d'eau par immersion et la déformabilité du béton.

CHAPITRE IV

ETUDE DU BÉTON À BASE DU CIMENT AVEC SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉ

IV.1. INTRODUCTION

Le béton à base de ciment avec 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 de ciment hydratée. L'étude de la technique du béton amène à celle de la structure du mélange et des facteurs déterminant la résistance, la durabilité du béton.

Les principaux paramètres de la structure sont :

- ☆ Le rapport eau/ciment.
- ☆ La qualité et la quantité du liant, des agrégats et de l'ajout.

On doit rechercher un mélange compact, c'est-à-dire une haute compacité et une faible quantité d'eau de gâchage. Cette haute compacité est obtenue grâce à l'emploi du sable de dune finement broyé, qui, notamment par la taille de ses grains, comble les vides entre les grains de ciment.

Si l'on recherche une résistance à la traction, on devra en outre, s'assurer d'une bonne adhérence entre les liants et l'agrégat et d'un parfait enrobage. Une qualité qui paraît avoir aussi une grande importance est l'étanchéité, c'est elle qui s'oppose au passage des fluides et à la corrosion des armatures. Le béton est d'autant plus étanche, qu'il est plus compact et gâché avec moins d'eau.

IV.2. COMPOSITION ET DOSAGE DU BÉTON

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal de différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage en question. Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition du béton, on a utilisé celle qui donne des résultats exacts et 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.

A/- Données de base

- ✧ Dmax (diamètre des granulats).
- ✧ Résistance à la compression après 28 jours.
- ✧ Ouvrabilité (AC).
- ✧ Caractéristiques techniques des matières premières.

B/- 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, 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)

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**

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

C/- Composition du béton

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne R_{b28j} et dont la consistance soit telle que son affaissement au cône de 5 cm. Dans tous les essais le rapport $L/E \leq 2,50$, $A = 0.6$, $D_{max} = 20$ mm et $G/S = 2.39$.

Tableau IV.1 : Récapitulation de la composition du béton

Type de ciment	R_{b28j} (MPa)	R_{c28j} (MPa)	E/L	L (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S (kg/m ³)
CPJ	33.40	43.30	0.56	336.37	1280	536
CPA	39.30	46.00	0.52			
CPA+20 % Sd	40.30	44.00	0.49			

IV.3. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON

Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm³, prismatiques (10×10×40) cm³ et cylindriques (16×32) cm², respectivement.

On a confectionné trois sortes de béton (béton témoin (CPA), béton avec ajout (CPA + 20 % Sd) et CPJ 42.5), chaque série comprend trois échantillons.

Les éprouvettes ont été conservées à l'eau potable pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température a été maintenue constante à 20°C ± 1°C, car l'évaporation précoce de l'eau peut interrompre rapidement l'hydratation du ciment.

Les résultats obtenus des résistances à la compression, flexion et traction par fendage à 7 j, 28 j et 90 j, pour les trois sortes de béton, sont illustrés dans les figures ci-dessous :

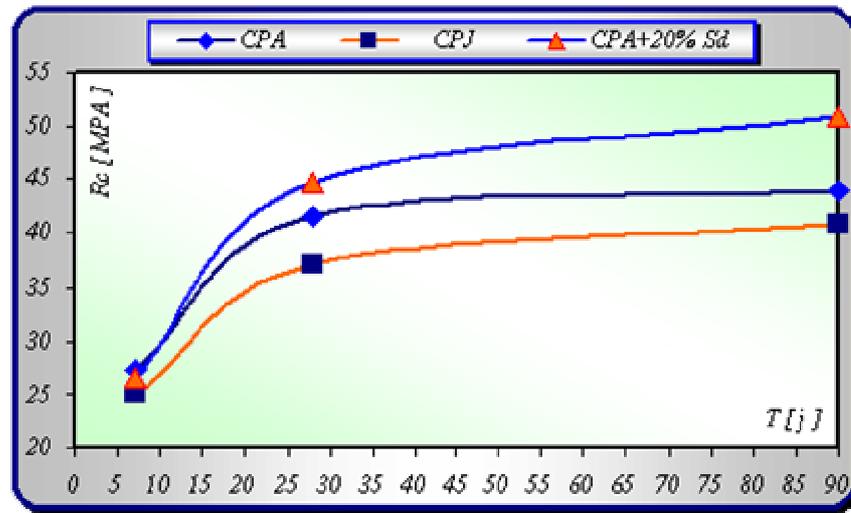


Figure IV.1 : Résistance à la compression du béton en fonction du temps et du type de ciment

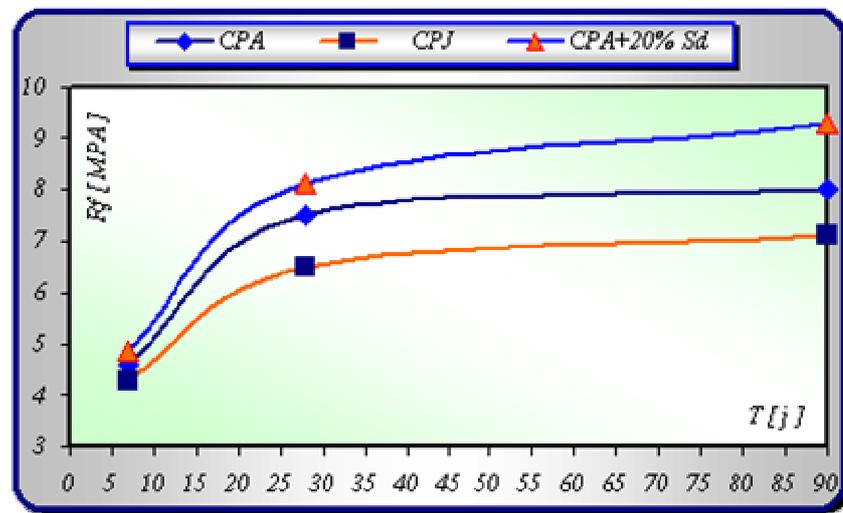


Figure IV.2 : Résistance à la flexion du béton en fonction du temps et du type de ciment

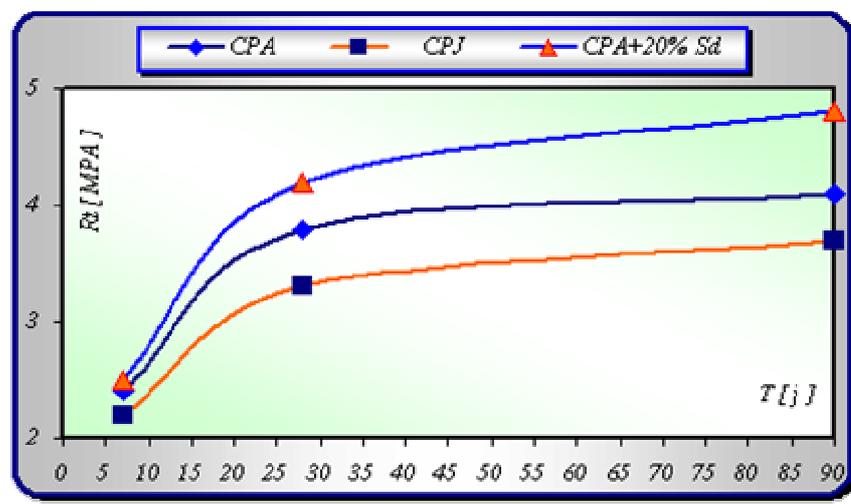
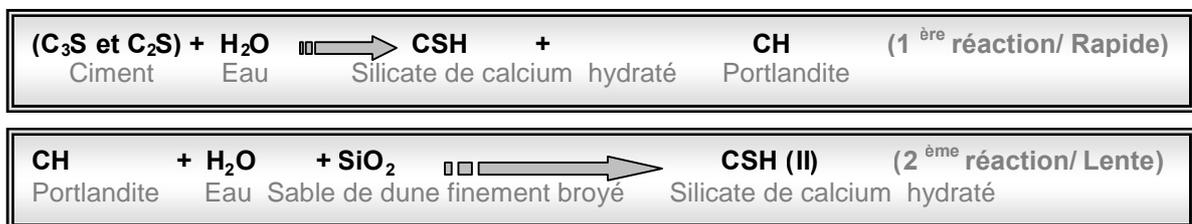


Figure IV.3 : Résistance à la traction par fendage du béton en fonction du temps et du type de ciment

IV.3.1. Commentaires

Pour confirmer le résultat de la pâte, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de béton qui ont donné par suite la même variation de résistance de compression que celle donnée par la pâte.

L'évolution des résistances en fonction de l'âge montre, que pendant les premiers âges, les résistances sont faibles pour tous les échantillons. Tandis que les périodes qui suivent, les résistances augmentent sensiblement (Figure IV.1, IV.2 et IV.3) Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du sable de dune broyé avec la portlandite selon le schéma des réactions suivantes :



La présence de sable de dune finement broyé accélère la réaction d'hydratation du ciment portland. Cet effet accélérateur de sable de dune finement broyé sur l'hydratation combinée à l'effet de remplissage dû à leur finesse, peut conduire à des meilleures résistances à court terme du béton.

Les résistances en compression augmentent lors de substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité de béton.

$$[R_{c28j} \{CPA+20\%Sd\} = 1.077.R_{c28j} \{CPA\}]$$

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que la résistance à la compression, montre que le béton à base d'un (CPA+20 % Sd) est nettement supérieur que le béton à base d'un (CPJ 42.5).

$$[R_{c28j} \{CPA+20\%Sd\} = 1.201.R_{c28j} \{CPJ 42.5\}]$$

Ceci 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 sa performance mécanique même après la période de 28 jours.

$$[R_{c90j} \{CPA+20\%Sd\} = 1.159.R_{c90j} \{CPA\}]$$

$$[R_{c90j} \{CPA+20\%Sd\} = 1.247.R_{c90j} \{CPJ 42.5\}]$$

$$[R_{c90j} \{CPA+20\%Sd\} = 1.141. R_{c28j} \{CPA+20\%Sd\}]$$

$$[R_{c90j} \{CPA\} = 1.060 R_{c28j} \{CPA\}]$$

$$[R_{c90j} \{CPJ\} = 1.099. R_{c28j} \{CPJ\}]$$

L'effet du sable de dune broyé sur la résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. Comme 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 sont meilleures.

IV.4. LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON

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 de béton (béton témoin (CPA), béton avec ajout (CPA+20 % Sd) et CPJ 42.5) à travers leur perméabilité à l'eau à 28 et 90 jours.

L'essai consiste à mettre une éprouvette cylindrique (15×15 cm) dans un appareil de perméabilité de manière à ce qu'elle soit traversée de haut en bas 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. Cependant, un bon béton est défini comme tel du point de vue perméabilité, lorsqu'il est susceptible de supporter une pression d'eau au minimum égale à 6 bars suivant la norme internationale «ISO». Le coefficient de perméabilité K_p est calculé à partir de la formule de «DARCY, 1856 »:

$$K_p = \frac{Q.H}{F(P_1 - P_2). \tau . \eta . k}$$

Les valeurs du coefficient de perméabilité en fonction du temps et du type de ciment sont illustrées dans la figure IV.4 :

[$P_1-P_2 = 10$ bars, $\tau = 9$ heures, $F = 176,72$ cm², $k = 1$, la viscosité (η) = 0,89].

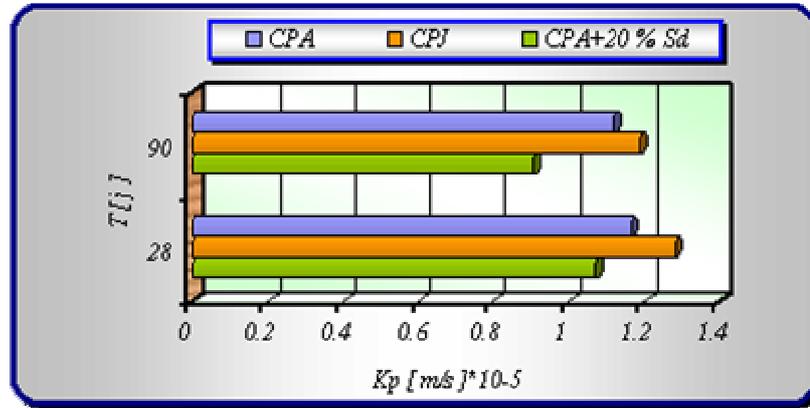


Figure IV.4 : Variation du coefficient de perméabilité du béton en fonction du temps et du type de ciment

IV.4.1. Commentaires

La figure IV.4, montre que le béton à base de ciment (CPA+20 % Sd) est moins perméable que le béton à base de CPJ 42.5, de sorte que la pression d'eau supportée par les éprouvettes a dépassé celle fixée par la norme «ISO» (6 bars). D'après les résultats obtenus, nous constatons qu'à 28 et 90 jours les valeurs du coefficient de perméabilité K_p se sont améliorées pour le béton contenant de 20 % du sable de dune broyé, cela s'explique du fait d'une meilleure hydratation entre les composants du ciment et l'ajout du sable de dune broyé, en plus du remplissage des gros pores qui améliore la perméabilité à l'eau du béton.

On note enfin, que l'augmentation considérable de la durabilité à travers la perméabilité de béton contenant le sable de dune broyé par rapport au béton sans ajout s'explique par une plus fine répartition des pores, mais la réduction de la perméabilité peut également être due à une meilleure liaison entre la pâte du ciment durcie et les granulats.

VI.5. ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION

La masse du béton durcie est truffée de capillaires : Vides très petits, généralement communicants, allant de 10 μm à 0,01 μm , capables d'absorber l'eau par succion, de la retenir et de ne la libérer que par évaporation très lente. L'absorption d'eau en masse (%) est :

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100$$

Les éprouvettes utilisées dans cette partie sont cubiques de dimensions (10×10×10 cm³) et sont conservées à l'eau (T = 21°C). Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de ciment sont illustrées dans la figure IV.5 :

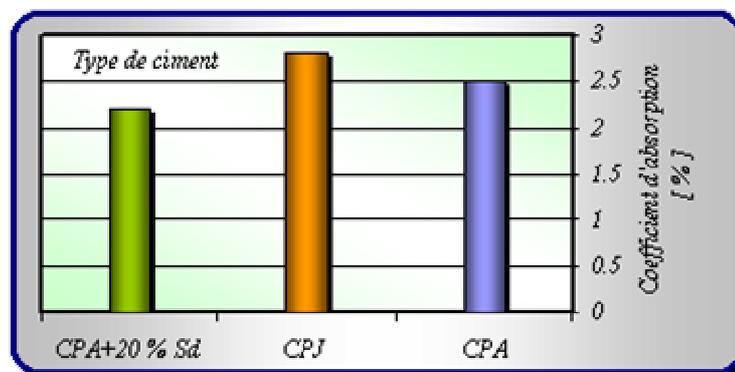


Figure IV.5 : Variation du coefficient d'absorption d'eau du béton en fonction du type de ciment

VI.5.1. Coefficient de ramollissement

Le coefficient de ramollissement caractérise la stabilité des matériaux à l'eau, Il représente le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau (R_{hum}) à la résistance de compression du matériau sec (R_{sec}). Les valeurs du coefficient en fonction du type de ciment sont clairement exposées sur le la figure IV.6.

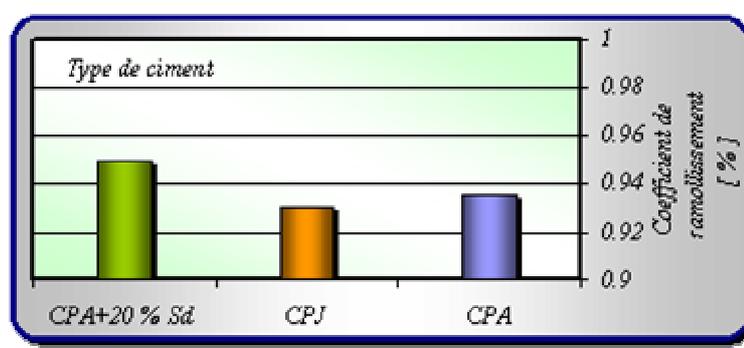


Figure IV.6 : Variation du coefficient de ramollissement du béton en fonction du type de ciment

VI.5.2. Commentaires

Nous constatons d'après les résultats obtenus, que les valeurs de coefficient d'absorption d'eau en masse (A %) restent inférieures à 5 %, d'après la Norme NBN B 15-211 (1989), notre béton à base de ciment (CPA+20 % Sd) est considéré comme un très bon béton. L'absorption de béton à base de CPA est inférieure à celui de béton à base de CPJ 42.5.

L'analyse des résultats obtenus montre que le béton à base de ciment (CPA+20 % Sd) se comporte mieux à l'eau que le béton à base de CPJ 42.5, cela peut être dû à la faible perméabilité de béton avec ajouts, ainsi que le coefficient de ramollissement est plus

important dans le cas de béton à base de ciment (CPA+20 % Sd). 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.

VI.6. LA DÉFORMABILITÉ DU BÉTON

Dans le but d'étudier l'influence du sable de dune broyé sur la déformabilité du béton à 28 jours, on a confectionné trois sortes de béton (béton témoin (CPA), béton avec ajout (CPA+20 % Sd) et CPJ 42.5), chaque série comprend trois échantillons prismatiques (10×10×40) cm³.

Les essais ont été effectués à 28 jours du durcissement, la déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 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). (Photos (IV.1)).

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 : L'air de la section de l'éprouvette.

Module d'élasticité du béton

Le module d'élasticité se détermine pour chaque éprouvette au niveau de la charge égal 30 % de la charge de destruction.

$$E_{el} = \sigma_1 / \varepsilon_{1el}, \quad \sigma_1 = P_1 / F$$

σ_1 : Accroissement de la contrainte de zéro conventionnel au niveau 30 % de la charge de destruction.

P_1 : Charge de destructions correspondante.

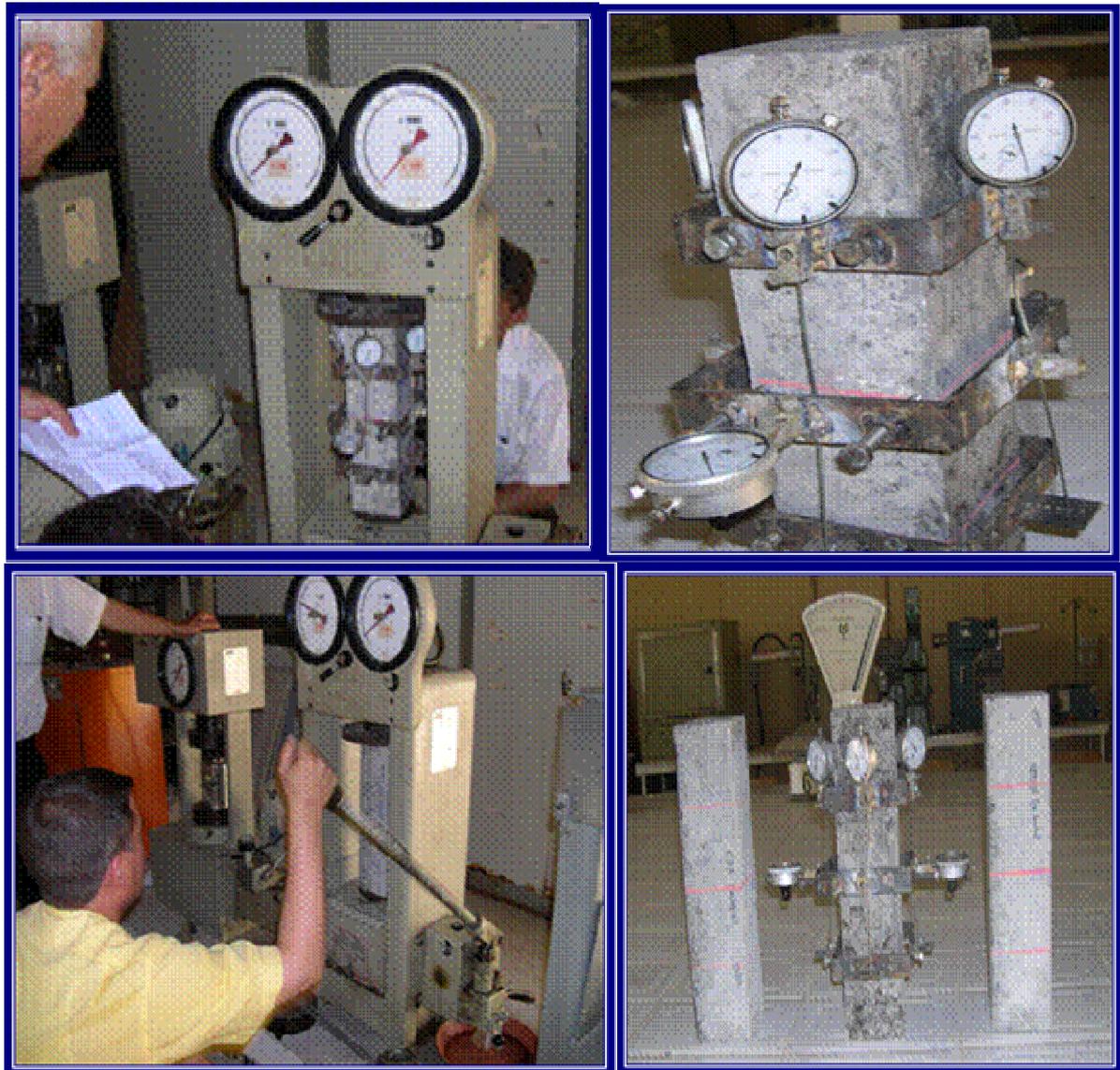
ε_{1el} : Accroissement des déformations relatives élasto-instantanées longitudinales, des éprouvettes correspondant à la charge $P_1 = 0.3 P$.

L'accroissement de déformation relative longitudinale se détermine comme la moyenne arithmétique des indicateurs des quatre cotés du prisme.

$$\varepsilon_{1el} = \Delta l_1 / l_1$$

Δl_1 : Accroissement absolu de déformation longitudinale des éprouvettes correspondant à l'accroissement des contraintes.

l_1 : Les bases fixes pour les mesures de déformation longitudinales des éprouvettes.



Photos (IV.1): Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10×10×40) cm³

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

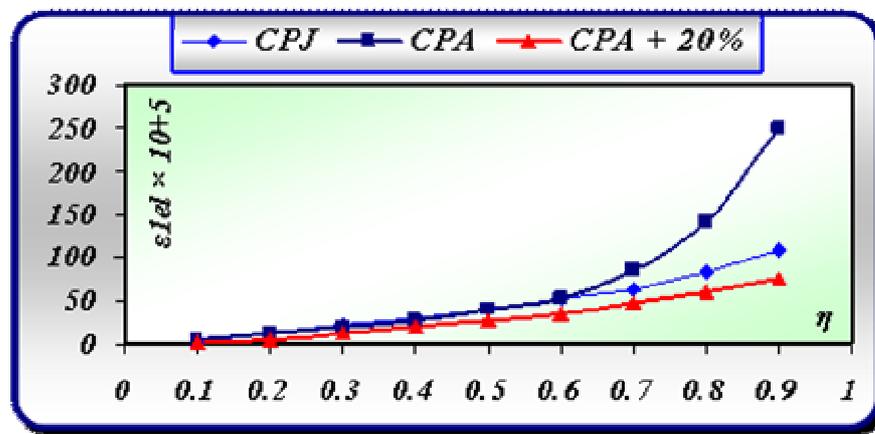


Figure IV.7: Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton (ϵ_{1el}) en fonction des contraintes relatives (η) pour les séries de prismes (CPJ, CPA et CPA + 20 %)

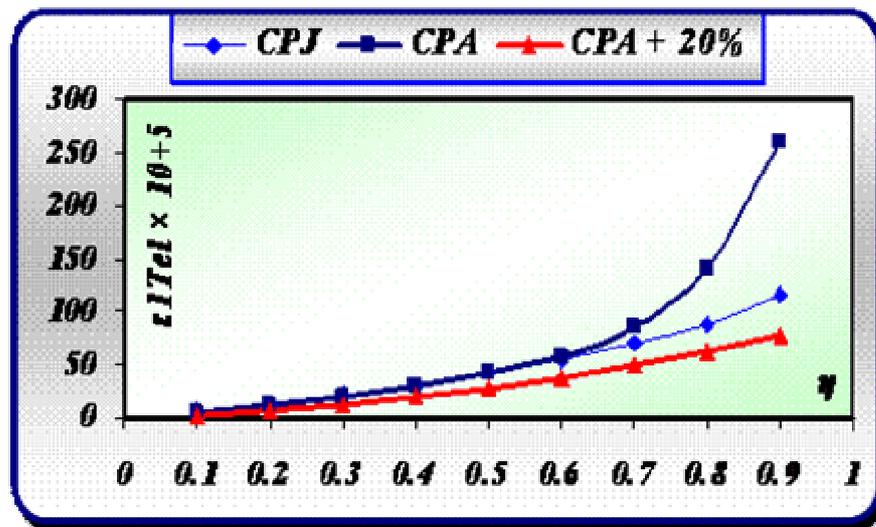


Figure IV.8: Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton (ϵ_{1Tel}) en fonction des contraintes relatives (η) pour les séries de prismes (CPJ, CPA et CPA + 20%).

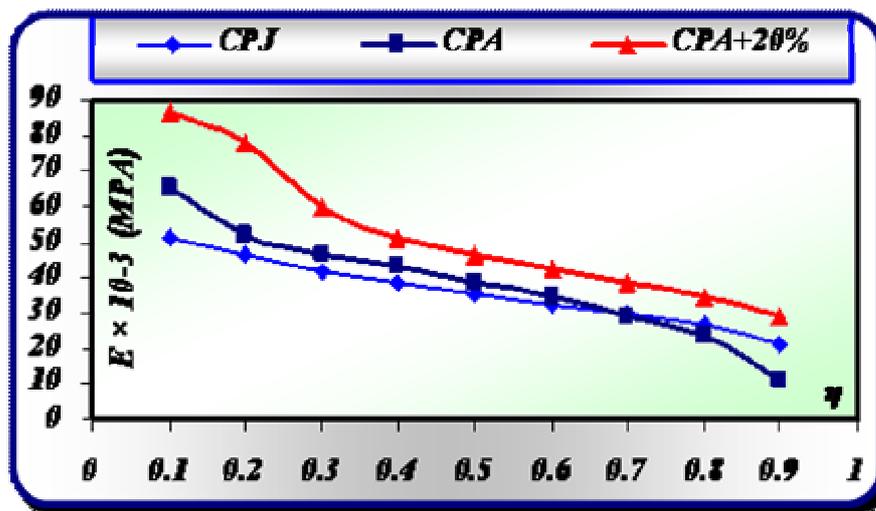


Figure IV.9: Module de déformabilité (E) du béton en fonction des contraintes relatives (η) pour les séries de prismes (CPJ, CPA et CPA+20%).

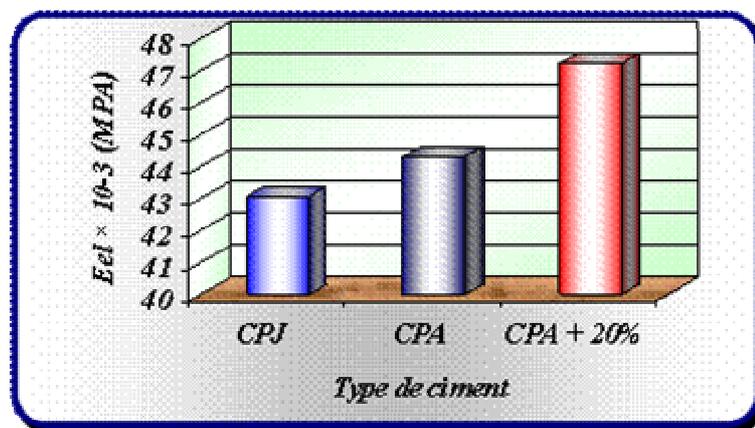


Figure IV.10 : Module d'élasticité des bétons (CPJ, CPA et CPA + 20%).

VI.6.1. Commentaires

Suivant les résultats des essais des prismes on a construit des graphiques présentant l'évolution de la relation entre le module de déformation du béton à la compression, les déformations élasto-instantanées longitudinales (t) et relatives totales ($t+\Delta t$) avec l'augmentation de la contrainte relative (Figure IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10). Ces figures donnent les résultats des essais de trois prismes identiques de chaque série (CPJ, CPA, CPA+20%).

Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence de sable de dune broyé sur la déformation du béton à la compression, et de préciser un certain nombre de point :

- ☞ La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle ($\eta = 0.1-0.5$). Un comportement élastique linéaire.
- ☞ La relation entre (η) et les déformations est curviligne dans l'intervalle ($\eta = 0.5-0.9$), ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.
- ☞ Nous constatons d'après les résultats obtenus, que le sable de dune broyé exerce une influence notable 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 à base de (CPA+20 % Sd), la macrostructure est très compacte.
- ☞ On voit que le module de déformation (E) diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.
- ☞ Au fur et à mesure que la contrainte relative augmente, le module de déformabilité du (CPA +20 % Sd) reste supérieur à celui du CPA et du CPJ 42.5.
- ☞ Le module d'élasticité de béton au (20 % Sd) est supérieur à celui du CPA et du CPJ 42.5.

IV.7. Conclusion

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

- ☐ Pour confirmer le résultat de la pâte, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de béton qui ont donné par suite la même variation de résistance de compression que celle donnée par la pâte.

- ❑ La présence de sable de dune finement broyé accélère la réaction d'hydratation du ciment portland. Cet effet accélérateur de sable de dune finement broyé sur l'hydratation combinée à l'effet de remplissage dû à leur finesse, peut conduire à des meilleures résistances à court terme du béton.
- ❑ Les résistances en compression augmentent lors de substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité de béton.
- ❑ Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que la résistance à la compression, montre que le béton à base d'un (CPA+20 % Sd) est nettement supérieur que le béton à base d'un (CPJ 42.5). Ceci permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donné. 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 sa performance mécanique même après la période de 28 jours.
- ❑ L'effet du sable de dune broyé sur la résistance à la flexion et la traction par fendage était similaire à celui de la résistance à la compression. Comme 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 sont meilleures.
- ❑ Le béton à base de ciment (CPA+20 % Sd) est moins perméable que le béton à base de CPJ 42.5. Nous constatons qu'à 28 et 90 jours les valeurs du coefficient de perméabilité K_p se sont améliorées pour le béton contenant de 20 % du sable de dune broyé, cela s'explique du fait d'une meilleure hydratation entre les composants du ciment et l'ajout du sable de dune broyé, en plus du remplissage des gros pores qui améliore la perméabilité de béton.
- ❑ D'une manière générale, une amélioration nette a été constatée vis-à-vis de la durabilité, à savoir :
 - ☆ La diminution de coefficient de perméabilité, et d'absorption.
 - ☆ L'augmentation du coefficient de ramollissement.

- ❑ Nous constatons d'après les résultats obtenus, que le sable de dune broyé exerce une influence notable 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 à base de (CPA+20 % Sd), la macrostructure est très compacte.
- ❑ Au fur et à mesure que la contrainte relative augmente, le module de déformabilité du (CPA +20 % Sd) reste supérieur à celui du CPA et du CPJ 42.5.
- ❑ Le module d'élasticité de béton au (20 % Sd) est supérieur à celui du CPA et du CPJ 42.5.

CONCLUSION GÉNÉRALE

A la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du sable de dune finement broyé en substitution du clinker dans le ciment portland est un excellent exemple de diminuer les émissions de [CO₂], d'obtenir des microstructures différentes qui permettent d'améliorer la durabilité de béton et ainsi de 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.

Les résultats d'essais découlant de cette étude indiquent clairement que l'utilisation du sable de dune finement broyé, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la résistance mécanique en compression, en traction, en flexion et du module élastique, propriétés physiques et la performance de durabilité du ciment, mortier et béton.

Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, 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 du C-H par du C-S-H.

- ☞ Les grains de silice comblent la porosité capillaire.
- ☞ L'augmentation de la quantité de C-S-H et la réduction en parallèle de la quantité de portlandite.

Le ciment prémélangé du 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 C-H, ainsi qu'à la formation supplémentaire des hydrates C-S-H.

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.

Enfin, on obtient une matrice cimentaire très dense et très imperméable avec l'accroissement des performances mécaniques et de durabilité du ciment, mortier et béton.

RECOMMANDATIONS

Le monde autour de nous change à vitesse V majuscule, comme les matériaux que nous utilisons et la technologie mise en oeuvre 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 du sable de dune finement broyé s'améliorent avec la technologie et nous comprenons mieux comment les utiliser efficacement dans le béton, en améliorant les caractéristiques structurales et pousse la performance de durabilité du ciment, mortier et béton 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 :

- 1/- Faire des analyses par diffraction aux rayons [x] sur des pâtes de (CPA+Sd) à long terme afin de voir l'évolution de la réaction pouzzolanique dans le temps.
- 2/- Voir la possibilité d'améliorer la réactivité pouzzolanique du sable de dune, par un broyage poussé au point d'atteindre des surfaces spécifiques supérieures.
- 3/- Faire des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) pour déterminer la morphologie des hydrates formés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. AITCIN P.C, « Béton haute performance », Edition Eyrolles, 2000, 800 P.
- [2]. ARYA C, Buenfeld N.R and Newman J.B, « Factors influencing chloride-binding in concrete », Cem. Concr. Res, 1990, 20, 2, 291-300.
- [3]. ANDERSON R, GRAM H.E, « Properties of alkali activated slag-concrete », 1987.
- [4]. AMINE N, « Incidence de l'adjonction de la pouzzolane sur les propriétés des bétons de haut résistance », Mémoire d'ingénieur, Boumerdes 1998.
- [5]. ASHBY M.F, JONES D.R.H, « Matériaux.2 », Dunod, édition 1991.
- [6]. ALI A, AMINE A.M, SHARARA A.M, EL-DIDAMONY H, « The behaviour of different cement pastes in various sulphate solutions », Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol.1, pp. 169-172, June 1994.
- [8]. ADAM M. NEVILLE, « Propriétés des bétons », Ed. Eyrolles, 1992, P.805.
- [9]. ANISSA BESSA, « Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers », Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac, 95031 Cergy-Pontoise cedex, 2004.
- [10]. BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment », Proceeding of RILEM, Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, P.1-169, 1973.
- [11]. BIDJOCKA C, TUSSET J, MESSI A, PERRA J, (1993), « Etude et évaluation de l'activité pouzzolanique des pouzzolanes de Djoungo (Cameroun) », Ann. Fac. Sc. HSI, Chimie et Sciences de la Terre, PP. 133-145.
- [12]. BUCHNER W, SCHILIEBS R, WINTER G, BUCHEL K.H, (1989), « Industrial Inorganic Chemistry », VCH, PP. 370-399.
- [13]. BAI J, CHAIPANICH KINUTHIA J. M, O'FARRELL M, SABIR B.B, WILD S. LEWIS M.A, (2003), « Compressive strength and hydration of waste paper sludge ash ground granulated blast furnace slag blended paste », Cement and Concrete Research 33, PP. 1189-1202.
- [14]. BAKKER. REM, « permeability of blended cement concretes », paper SP-79-30 from ACI sp 79, Detroit 1983, PP. 589-605.
- [15]. BYFORS K, « Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and PH values in cement paste », Cem. Concr. Res, 1987, 17, 1, 115-130.
- [16]. BIJEN J. PROF. DR, « Blast furnace slag cement », 1996.
- [17]. BARON J, OLLIVIER J.P, « La durabilité des béton », Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.

- [18]. BY ROBERT, J. FLATT, SIKA (SUISSE/SWITZERLAND), NICOS MARTYS, ET AND LENNART BERGSTROM, 2004 «La Rhéologie Des Matériaux Cimentaires », National institute of standards and technology gaithersburg, md 20899 USA.
- [19]. BAMFORTH, P.B. ET PRICE W.F. 1993, « Factors influencing chlorides ingress into marine structures », Concrete 2000, E&FN Spon, P. 1103-1118.
- [20]. CHANG Z, AIQIN W, MINGSHU T, « The filling role of pozzolanic material », Cement and Concrete Research, Vol. 26, N°. 6, PP. 943-947, 1996.
- [21]. COSTA U, MASSAZA F, « From materials science to construction materials engineering », Proc. 1st Int. Rilem congress, Vol. 1 (Versailles, 1987), 159.
- [22]. CIM BETON, « le ciment et ses applications », Technical Report, 2001.
- [23]. C.VERNET, « 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.
- [24].C.F. CRUMPTON ET J.E. BUKOVATZ, « Corrosion and Kansas bridges, Transportation Research Record N500 », Washington, D.C, 1974, P. 25-31.
- [25]. DOUGLAS E, « Mortier de ciment au laitier et béton de laitier : caractéristique de durabilité », Matériaux complémentaires en cimentation, CANMET, V. M. Malhotra Ed, Chapitre. 6, PP. 6, 1989.
- [26]. DREUX G, FESTA J, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8^{eme} édition, Eyrolles, 1998.
- [27]. D. MOORE.THE ROMAN PANTHEON, « The Triumph of Concrete ». 1995.
- [28]. D. DAMIDOT, A. NONAT, P. BARRET, D. BERTRANDIE, H. ZANNI, AND R. RASSEM, « C₃S hydration in diluted and stirred suspensions, 3. NMR study of C-S-H precipitated during the two kinetic steps », Advances in cement research, 7(25):1-8, 1995.
- [29] DHIR, R. K, HEWLETT, P. C. ET CHAN, Y. N, « Near Surface Characteristics of Concrete: Intrinsic Permeability », Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No 147, 1989, PP. 87-97.
- [30]. DOCUMENTS, « Pechiney Électrométallurgie », Tour Manhattan, Cedex 21, 92087 Paris la Défense.
- [31]. ELKEM MICROSILICA FOR SUPERIOR CONCRETE, «How to improve strength and durability of concret », P.O.Box 8126 Vaagsbygd, N-4602 Kristian Sand S .NORWAY.
- [32]. FELDMAN R.F, « significance of porosity measurements on blended cement performance », 1st Inter. Conf. On the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by products in concrete, Montebello, 1983, V.M. Malhotra, Ed., ACI, SP-79, 1,415-433.
- [33]. F. GABRYSIK – Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.

- [34]. GROUPE D'EXPERTS SCIENTIFIQUES DE L'OCDE, « Durabilité des ponts routiers en béton, Organisation de coopération et de développement économique », Paris, 1989.
- [35]. GALAL A, TAHA A.S, HELMY I.M, « Rice husk ash in Portland blended cement », Silicates industriels, Nr. 1-2, PP. 55-58, 1990.
- [36]. GAGNE ET AÏTCIN, 1993, « Superplasticizers for durable concrète, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton », Monterrey, Octobre, Mexique, P. 200-217.
- [37]. GCI 712 cours 2003, Chapitre 7, « Ajout dans le ciment », Professeur: Arezki Tagnit-Hamou - Université de Sherbrooke.
- [38]. H.F.W. TAYLOR, « Cement Chemistry », Academic Press, London, 1990.
- [39]. HERMANN K, « Les ajouts : Les cendres volantes », Bruxelles, N°6/Juin 1995.
- [40]. HERMANN K, « Les ajouts : Les fumées de silice », Bruxelles, N°7/Juillet 1995.
- [41]. HJORTH L, « Durability of concrete structures », (Copenhagen, 1983), 229.
- [42]. H. LE CHATELIER, Sur « les changements de volume qui accompagne le durcissement des ciments ». Bull. Société de l'encouragement pour l'industrie Nationale, 5ème série, tome 5, 1900.
- [43]. HANSEN, 1970, « Physical composition of hardened Portland cement paste », ACI Journal, mai 1970, p. 404-407.
- [44]. <http://as.degussa-cc.ch/dictionary/French/lexicon/hochl.htm>.
- [45]. http://www.enpc.fr/de/travelev/beton/Pages/histoire_beton_arme.htm. Historique.
- [46]. ILIENKO V. M, « Effektivnost ispolzovania chlako chtchelot chykx betono vchaknom stroitelstv chakhtno estritelstvo », N°. 10, PP. 15-18, 1969.
- [47]. JOURNEE D'INFORMATION, « ciments – bétons – adjuvants », Les adjuvants Définitions Et opportunités d'utilisation, 2004, Organisée par : ERCE- CTC- est – GRANITEX.
- [48]. JONES, M. R ET AL, 1993, « Chlorite résistant concrète », Concrète 2000, E&FN Spon, P. 1429-1444.
- [49]. KOBAYASHI K, UNO Y, « Influence of alkali on carbonation of concrete, 2. Influence of alkali in cement on rate of carbonatio of concrete », Cem. Concr. Res., 20, 4, PP. 619-622, 1990.
- [50]. KONECNY L, FROST, « Leaching of concrete », Advances in cementitious materials, Ceramic transactions, Vol. 16, PP. 477-487, 1991.
- [51]. K. ARROUDJ, M.N OUDJIT, « Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments », faculté de génie civil (U.S.T.H.B), Alger, 2002.

- [52]. K. ARROUDJ, M.N OUDJIT, M. LANEZ, M.T.CARAYON, « Influence des ajouts siliceux sur la compacité des mortiers et bétons », Séminaire CETEDUB I. 24, 25 et 26 Mai 2004 à L'USTHB.
- [53]. K. ARROUDJ, M.N OUDJIT, M. LANEZ, M.T.CARAYON, « Mise en évidence par diffractométrie aux rayons X des CSH de seconde génération », 1^{er} Séminaire sur les technologies du béton, le béton, perfection et incertitudes, 18-19 September 2004-Hôtel Hilton Alger.
- [54]. LOCHER, F.W, « Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack », Proc.5th international symposium on the chemistry of cement, Tokyo, Vol, 3, PP. 328-335, 1968.
- [55]. LEA F.M, « The chemistry of cement and concrete », Edward Arnold td, Ed., Londres, 1956, 2e. p. 637. LEA F.M., The chemistry of cement and concrete, Edward Arnold td, Ed, Londres, 1956, 2e. P. 637.
- [56]. LITVAN, G.G, Meyer. A, « Carbonation of granulated blast furnace slag cement concretes in structures », in: Proc. 2ndIntern. Conf. on Fly Ash, silica fume, Slag and naturel Pozzolans in concrete, Madrid, V.M. Malhotra, Ed., 1986, ACI, SP-91, 2, PP.1445-1462.
- [57]. LONGUET P., BURGLEN L. ET ZELWER A, « La phase liquide du ciment hydraté », Rev. Matér. Constr., 1973, 676, 35-41.
- [58]. MEASON M, (1981), « Etude de l'activité pouzzolanique des matériaux naturels et traités thermiquement en vue de la réalisation des liants hydrauliques », Thèse Doct. Université Paul Sabatier, Toulouse, PP. 133-145.
- [59]. MOLL H.L, « Uber die Korrosion von stahl in beton, Deutscher ausschuss fur Stahlbeton », 1964, 169, 23-61.
- [60]. MIDGLEY H.G. AND ILLSTON J.M, « The penetration of chlorides into hardened cement pastes, Cem, Concr, Res », 1984, 14, 4, 546-558.
- [61]. MEZGHICHE. B, « Résistance et déformabilité de Béton Basique », Premier séminaire national en génie civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.
- [62]. MASSAZA F, COSTA U, « Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements », II Cement, V. 76, PP. 3-18, 1979.
- [63]. MEHTA P. K, « Sulfate résistance of blended cements », Concrete workshop, Sydney 1988.
- [64]. MILLER E. W, « Blended cements - Applications and implications », Cement and Concrete Composites, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.
- [65]. MEHTA P. K, « Supplementary cementing materials for concrete », Ed. By V.Malhotra, Canada, 1, 1987.

- [66]. MEYER. B, « La cure du béton », Bulletin du ciment 59, No 14, 1991.
- [67]. M. LANEZ, « Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives », Magister 2005, USTHB/FGC, Alger.
- [68]. NASSER K. W. AND GHOSH S, « Durability properties of high strength concrete containing silica fume and lignite fly ash, in durability of concrete », Ed. V. M. Mlhotra, ACI SP-145, PP. 191-214(Detroit, Michigan, 1994).
- [69]. NAGATAKI ET UJIKE, 1986, « Air permeability of concrete mixed with fly ash and condensed silica fume », ACI SP-91, P. 1049-1068.
- [70]. NEHDI, M. 1993, « 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 P.
- [71]. NY RIANA ANDRIAMANANTSILAVO, 2003-131P, « Comportement Des Matériaux Cimentaires Dans Un Coffrage : Expérimentation, Modélisation et Simulation de la poussée et du processus de maturation, thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'université de Bretagne sud », Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux Centre de Recherche de Lorient, Rue St Maudé, 56325 Lorient cedex.
- [72]. PIGEON, « Composition et hydratation du ciment portland », Séminaire progrès dans le domaine du béton, PP. 36-72, Québec, septembre 1981.
- [73]. PROPOSED REPORT: « Use of natural pozzolan in concrete », ACI Materials, Vol. 91, No. 4, PP. 410-426, 1994.
- [74]. POWERS, T.C, COPELAND, L.E., HAYES, J.C. ET MANN, H.M. 1954 « Permeability of Portland cement paste », Journal of American Concrete Institute, Vol. 51, N°. 3, P. 285-298.
- [75]. PERRATON, D, AÏTCIN, P.C. AND VÉZINA, D. 1988, « Permeabilities of silica fume concrete ». ACI Spécial publication SP-108, Detroit, P. 63-84.
- [76]. P. ACKER, « Comportement mécanique du béton »: apports de l'approche physicochimique, Rapport de recherche LPC, N°152, 1988.
- [77]. PLASSAIS. ARNAUD, « Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments », thèse de doctorat, université paris 6, 2003- 167P.
- [78]. ROY D.M, « Hydration of blended cements containing slag, fly ash, or silica fume ». Proc. Of meeting institute of concrete technology, Coventry, UK, 29PP. (1987).
- [79]. RAZOUG R, ZINE-EDDINE W, « La technologie du béton ».
- [80]. RICCARDO S, GIUSEPPE F, « The action of some aggressive solutions on portland, pozzolanic and blast furnace slag cement mortar », Cement and concrete research, Vol. 19, pp. 885-893, 1989.

- [81]. R. DUPAIN ET R. LANCHON ET J. C. SAINT ARROMAN, « Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire (granulats, sols, ciment et bétons), castelle, 2000 ».
- [82]. SÀNCHEZ M.I., FRIAS M., « The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars », Cement and Concrete Research, Vol. 26, N°. 2, pp. 203-213, 1996.
- [83]. S.G. BOIVIN, « Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène », thèse de doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, P. 251, 1999.
- [84]. SITUATION ENVIRONNEMENTALE DES INDUSTRIES, « L'industrie cimentière », Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.
- [85]. SAID-MANSOUR. M, GHRICIM, 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 3 et 4 Mai 2005.
- [86]. TREADAWAY K. W, PAGE C.L. AND MACMLLAN G.L, « The prediction of reinforcement corrosion: from laboratory studies to exposure trials », Proc. 1st Intern. RILEM Congress, Versailles, 1987, 3, 1323-1329.
- [87]. TORRENT, R. J. ET JORNET, A, « The Quality of the 'Covercrete' of Low, Medium- and High-Strength Concretes », Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, Montreal, 1991, V.M. Malhotra Editor, PP. 1147-1161.
- [88]. VENUAT, M., « La pratique des ciments mortiers et béton », Tome 1, et Tome 2, deuxième édition.
- [89]. VERONIQUE BAROGHEL-BOUNY, « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétations », LCPC, 1994.
- [90]. VORNOVITCH L. V, DRON R, « Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé », bull. Liaison Labo. P. ET Ch -83 – mai-juin 1975 – Réf. 1810.
- [91]. WEIGLER H., KARL S, « Beton / Arten-Herstellungseigenschaften », Ernst, Berlin, 1989.
- [92]. WEBER, SCHWARA, TEGELAAR, SOLLER, « Guter Beton », Betonverlag, Düsseldorf, 1995.