

**UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA**  
**FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

N° d'ordre : . . . . .

Série : . . . . .

## **Mémoire de magister**

Présenté au département de génie civil en vue de l'obtention  
du diplôme de magister en matériaux de construction

**Par :**

**SALHI KAMEL**

- Thème -

**Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier  
granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton**

**SOUTENU LE : 03 juillet 2007**

**DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :**

Président :	<b>Dr/ R .CHEBILI</b>	<b>M.C</b>	Université de BISKRA
Rapporteur :	<b>Dr/ B. MEZGHICHE</b>	<b>M.C</b>	Université de BISKRA
Examineur :	<b>Dr/ M. MELLAS</b>	<b>Pr.Ha</b>	Université de BISKRA
Examineur :	<b>Dr/ A. GUETTALA</b>	<b>M.C</b>	Université de BISKRA

*A ma famille et surtout mes parents*

*A mes frères*

*A mes amis*

## **Résumé:**

Ce travail porte sur l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton , Les résultats obtenus à travers cette étude démontrent que l'ajout du sable de dune et du laitier granulé finement broyés au ciment contribuent positivement à l'amélioration des propriétés mécaniques, lorsque le sable de dune et le laitier introduit en proportions (5% et 15%) respectivement et offrent une meilleure stabilité au ciment vis-à-vis aux agressions chimiques, et une meilleure stabilité volumétrique au gonflement.

Les résultats obtenus par contre montrent que les mortiers à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier développent un retrait de séchage légèrement plus élevé que celui de mortier à base de ciment sans ajout (mortier de référence), aussi bien que la substitution du ciment par 5% du sable de dune et 15% du laitier à amélioré l'imperméable du béton à l'eau, par contre augmente l'absorption du béton à l'eau. Ainsi que les déformations transversales au bien longitudinales sont d'ordre inférieur pour le béton à base de ciment avec ajout de sable de dune et laitier (5%S, 15%L) que le béton sans ajout.

---

**Mots clés :** béton, liant, résistance mécanique, sable de dune, laitier granulé, microstructure, ajouts cimentaires, stabilité.

**Abstract:**

This work concerns the study of the influence of the addition of the dune sand and granulated slag crushed finely with cement on the concrete stability, the results obtained through this study show that, the addition of the dune sand and the granulated slag crushed finely with cement contributes positively to the improvement of the mechanical properties when the sand of dune and the introduced slag of proportion (5% and 15%) respectively and to offer a better stability to cement opposite the chemical aggressions and a better volumetric stability with swelling,

The results obtained show, that the mortars containing cement with sand addition of dune and slag develops shrinkage of slightly higher drying than that the mortar containing cement without addition (reference mortar), also show that the substitution of cement by 5% of the dune sand and 15% of the slag improved the in-permeability of the concrete to water on the other hand to increase the absorption of the concrete to water. The transversal or longitudinal deformations are lower for the concrete containing cement with sand addition of dune and slag (5%S, 15%L) that the concrete without addition.

---

**Key words:** concrete, binder, mechanical resistance, sand of dune, granulated slag, microstructure, additions cementing, stability.

## ملخص:

هذا العمل يتناول دراسة تأثير إضافة الرمل الكثبانى و الجفاء الزجاجى الناعم إلى الاسمنت على استقرار الخرسانة، النتائج المحصل عليها فى هذه الدراسة أظهرت أن إضافة رمل الكثبان والجفاء الزجاجى الناعم إلى الإسمنت يساهم إيجابيا فى تحسين الخصائص الميكانيكية للإسمنت، وهذا عندما يتم إضافة الرمل الكثبانى والجفاء الزجاجى بالنسب التالية: 5% رمل كثبانى و 15% جفاء الزجاجى، إضافة إلى ذلك يمنح الإسمنت استقرارا أفضل ضد التأثيرات الكيميائية و ضد الانتفاخ، من جهة أخرى أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الملاط الذى أساسه الإسمنت مضاف إليه الرمل الكثبانى والجفاء الزجاجى أعطى معدل انكماش أعلى بقليل من ذلك المسجل بالنسبة للملاط الذى أساسه اسمنت بدون إضافات(ملاط مرجعي)، النتائج أظهرت أيضا أن تعويض الإسمنت ( 5% رمل كثبانى و 15% جفاء الزجاجى) يحسن من اللانفاذية الخرسانة للماء، لكنه فى نفس الوقت يزيد من نسبة امتصاص الخرسانة للماء، أما التشوهات الطولية والعرضية بالنسبة للخرسانة التى أساسها اسمنت مع إضافات فهي بمعدل أقل من الخرسانة التى لا تحتوى على إضافات.

---

## مفاتيح الكلمات:

خرسانة، ملاط، المقاومة الميكانيكية، رمل كثبانى، جفاء الزجاج، إضافات معدنية، استقرار

## *Remerciement*

*Le présent travail à été effectuée au sein du Laboratoire de Génie civil au département de génie civil, faculté des sciences et science de l'ingénieur université de Mohamed Khider Biskra.*

*Je voudrais ici témoigner toute ma gratitude à Monsieur le docteur Mezghiche Bouzidi mon directeur de mémoire pour sa confiance sa disponibilité sa rigueur scientifique et ses encouragements.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur le docteur Chebili Rachid maître de Conférence au département de génie civil université de Mohamed Khider Biskra pour m avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.*

*Mes plus profonds remerciements vont à Monsieur le docteur M.Mellas Professeur habilité et maître de conférence au département de génie civil université de Mohamed Khider Biskra d'avoir accepter d'être examinateur de cette mémoire et membre du jury.*

*Egalement j'exprime ma gratitude à Monsieur le docteur Guettala Abdelhamid Maître de Conférence au département de génie civil université de Mohamed Khider Biskra pour l'intérêt qu'il à portée à ce travail en acceptant d'être examinateur et membre du jury.*

*J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur Belmebarek Professeur au département de génie civil université de Mohamed Khider Biskra pour son aide.*

*J'adresse mes remerciements à tous les membres du Laboratoire du Génie Civil pour leur aide sympathie et amitié qu'ils ont exprimée a mon égard ; ainsi Je ne sais comment exprimer ma reconnaissance à Monsieur Brahim belounnar et Rachid pour leur aide technique*

*J'adresse aussi mes plus vifs remerciements à Monsieur Adjel Septi chef service technique au niveau de unité de cimenterie d'aine touta Batna pour son aide.*

*Je remercie profondément toute ma famille et surtout mes parents pour m'avoir toujours apporté leur soutien durant mes études ainsi qu'à mes frères pour leur encouragement.*

*Enfin, j'adresse mes sentiments les plus respectueux à mes amis qui m'ont toujours soutenu et aidé.*

# Table des matières

Résume .....	i
Avant-propos.....	iii
Table des matières .....	v
Liste des tableaux.....	ix
Listes des figures .....	x
.....Introduction .....	1
.....Contexte et Méthodologie .....	2
.....Structure de Document.....	2
<b>PARTIE 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>CHAPITRE 1 CIMENT HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE</b>	
INTRODUCTION.....	4
1.1 LE CIMENT .....	5
1.1.1 Définition.....	5
1.1.2 Fabrication du ciment portland.....	5
1.1.3 Composition du ciment portland.....	7
1.1.3.1 Composition du ciment anhydre.....	7
1.1.4 Composition chimique générales des ciments.....	8
1.1.5 Classification du ciment portland.....	9
1.2 HYDRATATION.....	11
1.2.1 Introduction .....	11
1.2.2 Hydratation des composants du ciment.....	11
1.2.3 Effet des sulfates sur l'hydratation .....	14
1.2.4 Evolution de l'hydratation .....	15
1.2.5 Les phases hydratées du ciment .....	16
1.3 MICROSTRUCTURE DE PATE DE CIMENT HYDRATE.....	19
1.3.1 Les pores.....	20
1.2.2 L'état de l'eau dans les matériaux cimentaires .....	21
1.2.3 Récapitulations de l'état de l'eau.....	22
1.4 Récapitulations.....	22
<b>CHAPITRE 2 LES AJOUTE CIMENTAIRES</b>	
2.1 Introduction .....	24
2.2 Les ajoutes chimiques.....	24
2.3 Les ajouts minéraux .....	25
2.3.1 Définition.....	25
2.3.2 Les avantages d'utiliser les ajouts.....	25
2.3.3 Comportement du ciment avec ajout minéral.....	26
2.3.4 Classification des ajouts.....	28
2.3.4 Modes de réaction des ajouts.....	28



2.4 LE LAITIER .....	31
2.4.1 Définition.....	31
2.4.2 Origine, Formation et Elaboration .....	31
2.4.3 Caractéristiques physico-chimiques.....	34
2.4.4 Activation de laitier .....	36
2.4.5 Facteur influencent sur l'activité du laitier .....	38
2.4.6 Hydratation et Microstructure .....	39
2.4.6.1 Mécanisme d'hydratation.....	39
2.4.6.2 La microstructure de la pate de ciment de laitier.....	40
2.4.6.3 Chaleur d'hydratation.....	40
2.4.6.4 La structure poreuse de la pate de ciment de laitier .....	41
2.4.7 Propriétés de béton au ciment au laitier .....	
2.4.7.1 Influence du laitier sur les propriétés du béton frais.....	42
2.4.7.1.1 Temps de prise.....	42
2.4.7.1.2 Affaissement et ouvrabilité .....	43
2.4.7.1.3 Ressuage.....	43
2.4.7.2 Influence du laitier sur les propriétés du béton durci.....	43
2.4.7.2.1 Résistance a la compression.....	43
2.4.7.2.2 Retrait de séchage.....	43
2.4.7.2.3 Fluage .....	44
2.4.8 Caractéristiques liées à la durabilité.....	45
2.4.8.1 Résistance à la corrosion .....	45
2.4.8.2 Carbonatation.....	47
2.4.8.3 Résistance à l'attaque de sulfate.....	50
2.4.8.4 Influence du laitier sur la perméabilité du béton.....	52
2.4.8.5 Pénétration chlorures.....	54
2.5 Synergie des ajouts cimentaires dans les bétons .....	56
2.6 Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments.....	61
2.7 Conclusion.....	67

## PARTIE 2

## ETUDE EXPERIMENTALE

### CHAPITRE 3 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISE ET METHODES D'ESSAIS

INTRODUCTION.....	70
3.1 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	71
3.1.1 Le laitier.....	71
3.1.1.1 Analyse chimique du laitier .....	71
3.1.1.2 Propriété physique de laitier.....	71
3.1.2 Sable de dune.....	72
3.1.2.1 Analyse chimique du laitier .....	72
3.1.2.2 Propriété physique de laitier.....	72
3.1.3 Ciment .....	73
3.1.3.1 Analyse chimique du ciment.....	73
3.1.3.2 Propriété physique ciment.....	73
3.1.4 Sable.....	74
3.1.4.1 Analyse granulométrique .....	74
3.1.4.2 Propriété physique de sable.....	74
3.1.5 Granulats.....	74
3.1.5.1 Analyse granulométrique.....	75
3.1.5.2 Propriété physique .....	75
3.1.6 Eau de gâchage.....	75
3.2 METHODES D'ESSAIS .....	76
3.2.1 Les différents essais sur la pâte pure .....	76
3.2.2 Les différents essais sur mortier.....	76
3.2.3 Les différents essais sur le béton.....	77

### CHAPITRE 4 PROGRAMME EXPERIMENTALE ET RESULTATS D'ESSAIS

4.1 PROGRAMME EXPERIMENTALE.....	78
4.2 ETUDE PROPRIETES DE LIANT A BASE DE CLINKER (CPA) ET SABLE DE DUNE (S.D.B) ET LAITIER (L.G.H) .....	79
4.2.1. Propriété mécanique (résistance à la compression) du liant.....	79
4.2.1.1 Influence de la teneur en laitier.....	80
4.2.1.2 Influence de la teneur de sable de dune.....	86
4.2.1.3 Influence de variation de Finesse .....	92
4.2.1.4 Influences de variation de rapport E/L .....	95
4.2.1.5 Analyse de résultats.....	98
4.2.2 Propriétés physiques du liant.....	101
4.2.2.1 La consistance et début et fine de prise.....	101
4.2.2.2 Stabilité de liant (gonflement).....	102
4.2.3 Resistance aux actions des eaux agressives.....	103
4.2.4 Résumé d'analyse de résultats.....	106

4.3 ETUDE DES PROPRIETES DE MORTIER A BASE DU CIMENT AVEC AJOUTS SABLE DE DUNE ET LAITIER.....	107
4.3.1 Propriétés mécanique .....	107
4.3.1.1 Résistance a la compression.....	108
4.3.1.2 Résistance a la flexion.....	108
4.3.2.3 Résistance a la traction par flexion.....	109
4.3.3.4 Analyse du résultat .....	109
4.3.2 Changement volumétrique (retrait et gonflement).....	111
4.3.2.1 Mesures de retrait.....	112
4.3.2.1 Analyse du résultat .....	117
4.3.3 Résumé d'analyse résultats .....	117
 4.4 ETUDE DES PROPRIETES DE BETON A BASE DU CIMENT AVEC AJOUTS SABLE DE DUNE ET LAITIER.....	 119
4.4.1 Formulation et dosage du béton :.....	119
4.4.2 Paramètres de formulation.....	120
4.4.3 Méthode de malaxage.....	120
4.4.4 Propriétés mécaniques du béton .....	122
2.4.4.1 Analyse des résultats .....	123
4.4.3 Perméabilité.....	123
2.4.3.1 Dispositif expérimental et technique de mesure.....	124
2.4.3.2 Le coefficient de perméabilité spécifique (Kp).....	125
2.4.3.3 Analyse des résultats .....	127
4.4.4 Absorption d'eau par immersion .....	128
2.4.4.1 Analyse des résultats.....	129
4.4.5 Coefficient de ramollissement.....	129
2.4.5.1 Analyse des résultats.....	129
4.4.6 Déformabilité.....	130
4.4.6.1 Dispositif expérimental et technique de mesure.....	130
4.4.6.2 Résultats des essais.....	131
4.4.6.3 Analyse des résultats.....	134
4.5 CONCLUSION GENERAL.....	135
4.6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	137
4.7 ANNEXE .....	138

# Liste des tableaux

<b>N° tableau</b>	<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
1.1	<i>Composition du cru d'alimentation</i>	6
1.2	<i>Composition typique d'un clinker en % massique</i>	7
1.3	<i>Phase anhydres présentes dans un ciment portland artificiel</i>	8
1.4	<i>Proportions massiques des constituants (sulfate de calcium et additifs exclus) entrant dans la composition de quelques ciments courants, avec : S = Laitier granulé de haut fourneau, V = Cendres volantes siliceuses, Z = Pouzzolanes naturelles.</i>	9
1.5	<i>Classification du ciment portland selon l'association canadienne de normalisation (CSA).</i>	10
1.6	<i>Classification Du Ciment Portland Selon Norme ASTM C 150.</i>	10
1.7	<i>Récapitulative les différents états de l'eau dans le béton</i>	16
2.1	<i>Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaire</i>	26
2.2	<i>classification des ajoutes cimentaires selon Leur nature et activité (tiré de travaux de recherche D<sup>er</sup>.A.Guettala et D<sup>er</sup>. Mezghiche. B 2000 [36] )</i>	28
2.3	<i>Compositions des ajouts [36]</i>	29
2.4	<i>Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau (d'après Alexandre et Sebileau [40].).</i>	34
2.5	<i>Constituants des laitiers cristallisés d'après (Alexandre et Sebileau, [40].)</i>	36
2.6	<i>Composition de différent type de liants étudié</i>	56
2.7	<i>Résistance en compression des bétons a différents âges</i>	57
2.8	<i>Gain en compression des bétons a différents âges</i>	59
2.9	<i>Compositions chimiques des matériaux utilisés</i>	61
2.10	<i>Compositions minéralogique du ciment utilise (potentiel de GUE)</i>	61
2.11	<i>Variation du temps de prise en fonction du rapport E/C à <math>\theta=20^\circ</math></i>	63
2.12	<i>Influence du sable de dune sur le temps de prise</i>	64
3.1	<i>Composition chimique du laitier</i>	71
3.2	<i>Module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma).</i>	71
3.3	<i>Analyse chimique du sable de dune finement broyé</i>	72

3.4	<i>Composition chimique et minéralogique de clinker.</i>	73
3.5	<i>Composition minéralogique de clinker.</i>	73
3.6	<i>Différents essais sur la pâte pure.</i>	76
3.7	<i>Différents essais sur le mortier</i>	76
3.8	<i>Différents essais sur le béton</i>	77
4.1	<i>Les différentes combinaisons" sable broyé +laitier granule + CPA"</i>	79
4.2	<i>Temps de début et de fin de prise pour différents types de ciments étude.</i>	101
4.3	<i>Gonflement de la pâte de ciment.</i>	102
4.4	<i>Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives</i>	103
4.5	<i>Résistances mécaniques du mortier pour différents types de mortier études</i>	107
4.6	<i>Récapitulation des paramètres des formulations des mortiers</i>	113
4.7	<i>Variations de la masse des mortiers en fonction du temps cas de conservation a l'air</i>	113
4.8	<i>Variations de la masse des mortiers en fonction du temps cas de conservation a l'eau</i>	114
4.9	<i>Variations linéaires des mortiers en fonction du temps cas de conservation a l'air.</i>	114
4.10	<i>Variations linéaires des mortiers en fonction du temps cas de conservation a l'eau</i>	114
4.11	<i>Récapitulation des caractéristiques physiques du béton</i>	119
4.12	<i>Paramètres de formulation des bétons</i>	120
4.13	<i>Résistance du béton à la compression, flexion, et traction par flexion en fonction du temps pour différents types de béton étudié</i>	121
4.14	<i>Coefficient de perméabilité pour différents types des bétons études</i>	124
4.15	<i>Valeur coefficient de ramollissement pour différents type des bétons études.</i>	129

## **Liste des figures**

<i>N° figure</i>	<i>figure</i>	<i>page</i>
1.1	<i>Grains polycristallins d'un ciment portland anhydre (image obtenu par microscopie optique en lumière réfléchiée sur section polie légèrement attaquée par HNO<sub>3</sub>) : 1= C<sub>3</sub>S ; 3 = C<sub>2</sub>S ; 4 = C<sub>3</sub>A+ C<sub>4</sub>AF</i>	8
1.2	<i>Schéma situant les différents produits minéraux à base de calcium, silicium pouvant entrer dans la composition des ciments courants</i>	9
1.3	<i>Comparaison de la résistance a la compression des phases du ciment en cours d'hydratation [8]</i>	11
1.4	<i>Organigramme de mécanisme d'hydratation du C<sub>3</sub>S</i>	12

1.5	<i>Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment d'après Bensted [21].</i>	15
1.6	<i>illustration de la contraction le chatelier dans une pate de ciment et de l'auto dessiccation qui en résulte [3]</i>	17
1.7	<i>Représentation schématique de la pate de ciment hydraté [Pigeon 1981] [20]</i>	18
1.8	<i>Taille des pores et des solides dans les pates de ciment hydraté (d'après Metha [23])</i>	19
1.9	<i>Représentation schématique des feuillettes de C-S-H d'après le modèle Feldman et Sereda [40]</i>	20
2.1	<i>les ajouts cimentaire de droit à gauche cendre volante (type C), metakaoline, fume de silice, cendre volante (type F), laitier, sèche calcine.</i>	25
2.2	<i>Changements de distribution de grandeurs des pores des pâtes de ciment avec déférents contenu de pouzzolane [35].</i>	27
2.3	<i>Modèle d'une pâte de ciment Portland bien-hydratée (tiré de cours de génie civil université Sherbrooke 2006 [35].</i>	27
2.4	<i>Modèle d'une pâte a base de ciment pouzzolane bien hydratées (tiré de cours de génie civil université Sherbrooke 2006[35].</i>	27
2.5	<i>Représentation schématique d'un haut fourneau (tiré de civil marine 2006 [79]).</i>	31
2.6	<i>Principaux traitement de Laitier</i>	32
2.7	<i>Laitier cristallisé compact (Alexandre et Sebileau, [40]).</i>	33
2.8	<i>Laitier cristallisé poreux (Alexandre et Sebileau, [40]).</i>	33
2.9	<i>Laitier cristallisé tout-venant (Alexandre et Sebileau, [40])</i>	33
2.10	<i>Laitier bouleté (Alexandre et Sebileau, [40]).</i>	34
2.11	<i>Diagramme De Keil.</i>	35
2.13	<i>Représentation schématique de hydratation de ciment portland et hydratation de ciment avec laitier de haut fourneau (tiré de civil marine 2006 [79])</i>	39
2.14	<i>Effet de ciment au laitier sur la chaleur d'hydratation (tiré de ASC 2006 [54]</i>	41
2.15	<i>Effet ciment au laitier sur la chaleur d'hydratation (tiré de ASC 2006 [54])</i>	41
2.16	<i>L'effet d'accélérateur de prise sur le temps de début de prise de ciment avec ajout de laitier [54]</i>	42
2.17	<i>Effet de température sur le temps de début de prise de ciment avec ajout de laitier [54]</i>	42
2.18	<i>Influence de dosage de laitier sur la résistance a la compression</i>	43
2.19	<i>Influence de dosage de laitier sur le retrait de séchage.</i>	44
2.20	<i>Influence de dosage de gypse sur le retrait de séchage.</i>	44
2.21	<i>Influence de dosage de gypse sur le fluage</i>	45

2.22	<i>Influence de l'ajout de laitier sur fluage</i>	45
2.23	<i>Mécanisme de la carbonatation</i>	47
2.24	<i>Progression de la carbonatation dans les fissures</i>	47
2.25	<i>Influence des additions minérales et du temps de cure sur la carbonatation des bétons, d'après [75].</i>	49
2.26	<i>Exemple de l'attaque sulfatique</i>	50
2.27	<i>Effet d'utilisation de ciment de laitier sur la résistance aux sulfates [54]</i>	52
2.28	<i>Influence de l'addition de laitier sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d'après [67]</i>	53
2.29	<i>Influence ciment portland sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d'après [67]</i>	53
2.30	<i>Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité de bétons réalisés avec diverses catégories de ciments, d'après [72].</i>	54
2.31	<i>Pénétration de chlorure Smolezyk (tiré de civil marine 2006 [79])</i>	55
2.32	<i>Variation des températures dans les bétons</i>	57
2.33	<i>Variation des résistances en compression avec l'âge des bétons</i>	58
2.34	<i>Perméabilité aux ions chlorures des bétons</i>	59
2.35	<i>Diffractogramme de rayons X de fume de silice</i>	62
2.36	<i>Diffractogramme de rayons X de sable de dune.</i>	62
2.37	<i>Variation de la constance en fonction E/C</i>	62
2.38	<i>Variation du temps de fin de prise en fonction du temps du début de prise.</i>	63
2.39	<i>Cisaillement en fonction du temps</i>	65
2.40	<i>Effet du pourcentage du sable de dune sur la réaction pouzzolanique.</i>	66
2.41	<i>Effet de la nature des ajouts sur réaction pouzzolanique</i>	66
3.1	<i>Échantillon de laitier utilisé comme ajout cimentaire (a) laitier non broyé, (b) laitier broyé</i>	71
3.2	<i>Échantillon de sable de dune utilisé comme ajout cimentaire (a) sable de dune non broyé, (b) sable de dune broyé</i>	72
3.3	<i>Échantillon de clinker avant et après broyage</i>	73
3.4	<i>Courbe granulométrique du sable</i>	74
3.5	<i>Courbe granulométrique des gravillons concassés</i>	75
4.1	<i>Évolution de la résistance à la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 15%L, avec E/L=0, 30, SSB=3500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	80
4.2	<i>Évolution de la résistance à la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 25%L, avec E/L=0, 30, SSB=3500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	80
4.3	<i>Évolution de la résistance à la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 35%L, avec E/L=0,30, SSB=3500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	81

4.4	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 15%L , avec E/L=0,40 , SSB=3500 cm2/gr</i>	81
4.5	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 25%L , avec E/L=0,40 , SSB=3500 cm2/gr</i>	82
4.6	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 35%L , avec E/L=0,40 , SSB=3500 cm2/gr</i>	82
4.7	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 15%L , avec E/L=0,30 ,SSB=2500 cm2/gr</i>	83
4.8	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 25%L , avec E/L=0,30 ,SSB=2500 cm2/gr</i>	83
4.9	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 35%L , avec E/L=0,30 ,SSB=2500 cm2/gr</i>	84
4.10	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 15%L , avec E/L=0,40 ,SSB=2500 cm2/gr</i>	84
4.11	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 25%L , avec E/L=0,40 ,SSB=2500 cm2/gr</i>	85
4.12	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 35%L , avec E/L=0,40 , SSB=2500 cm2/gr</i>	85
4.13	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 5% S, avec E/L=0,30, SSB=3500 cm2/gr</i>	86
4.14	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de laitier 10 % S, avec E/L= 0,30, SSB=3500 cm2/gr</i>	86
4.15	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 15% S, avec E/L=0,30, SSB=3500 cm2/gr</i>	87
4.16	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 5% S, avec E/L=0, 40, SSB=3500 cm2/gr</i>	87
4.17	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 10% S, avec E/L= 0,40 , SSB=3500 cm2/gr</i>	88
4.18	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 15% S, avec E/L= 0,40, SSB=3500 cm2/gr</i>	88



4.19	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 5% S, avec E/L=0,30, SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	89
4.20	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 10% S, avec E/L= 0,30, SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	89
4.21	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 15% S, avec E/L=0,30, SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	90
4.22	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 5% S, avec E/L=0,40, SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	90
4.23	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 10% S, avec E/L=0,40, SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	91
4.24	<i>Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps pour teneur de sable 15% S, avec E/L=0,40, SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr</i>	91
4.25	<i>L'influence de variation de finesse sur' évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps et pour E/L=0,30 et 5%SDB</i>	92
4.26	<i>L'influence de variation de finesse sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps et pour E/L=0,30 et 10% SDB</i>	92
4.27	<i>L'influence de variation de finesse sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps et pour E/L=0,30 et 15%SDB</i>	93
4.28	<i>L'influence de variation de finesse sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps et pour E/L=0,40 et 5%SDB</i>	93
4.29	<i>L'influence de variation de finesse sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction de temps et pour E/L=0,40 et 10%SDB</i>	94
4.30	<i>L'influence de variation de finesse sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction de temps et pour E/L=0,40 et 15%SDB</i>	94
4.31	<i>L'influence de variation de rapport (E/L) sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction de temps pour SSB = 3500 cm<sup>2</sup>/gr et 5% SDB</i>	95
4.32	<i>L'influence de variation de rapport (E/L) sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction de temps pour SSB = 3500 cm<sup>2</sup>/gr et 10% SDB</i>	95
4.33	<i>L'influence de variation de rapport (E/L) sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en</i>	96

*fonction de temps pour SSB = 3500 cm<sup>2</sup>/gr et 15% SDB*

4.34	<i>L'influence de variation de rapport (E/L) sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction de temps pour SSB = 2500 cm<sup>2</sup>/gr et 5% SDB</i>	96
4.35	<i>L'influence de variation de rapport (E/L) sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction de temps pour SSB = 2500 cm<sup>2</sup>/gr et 10% SDB</i>	97
4.36	<i>L'influence de variation de rapport (E/L) sur évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction de temps pour SSB = 2500 cm<sup>2</sup>/gr et 15% SDB</i>	97
4.37	<i>stabilité volumétrique de la pâte de ciment pour déférent types de ciment étude.</i>	102
2.38	<i>Évolution du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution chlorure de magniseme 5% ( MgCl<sub>2</sub>)</i>	104
4.39	<i>Évolution du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution sulfate de sodium 5% (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</i>	104
4.40	<i>Évolution de la Résistance à la compression pour déférentes types des mortiers études en fonction de temps.</i>	108
4.41	<i>Évolution de la Résistance à la flexion pour déférentes types des mortiers études en fonction de temps.</i>	108
4.42	<i>Évolution de la résistance à la traction par flexion pour déférentes types des mortiers études en fonction de temps.</i>	109
4.43	<i>Schéma de dispositif utilise pour mesure le retrait de séchage</i>	112
4.44	<i>Variations de la masse des mortiers en fonction du temps cas de conservation à l'air</i>	115
4.45	<i>Variations de la masse des mortiers en fonction du temps cas de conservation à l'eau.</i>	115
4.46	<i>Variations linéaire des mortiers en fonction du temps cas de conservation à l'air.</i>	116
4.47	<i>Variations linéaire des mortiers en fonction du temps cas de conservation à l'eau.</i>	116
4.48	<i>Procédure de malaxage des mélanges</i>	120
4.49	<i>Évolution de résistance à la compression pour déférentes types des bétons études en fonction de temps</i>	121
4.50	<i>Évolution de la résistance à la flexion pour déférentes types des bétons études en fonction de temps.</i>	121
4.51	<i>Évolution de la résistance à la traction par flexion pour déférente types des bétons études en fonction de temps.</i>	122
4.52	<i>Dispositif expérimental utilise pour mesure la perméabilité de béton</i>	123

4.53	<i>Variation du coefficient de perméabilité pour différent types des bétons en fonction du temps</i>	125
4.54	<i>Variation du coefficient d'absorption d'eau pour différentes type des bétons étudiés.</i>	127
4.55	<i>Dispositif expérimental utilise pour mesure les déformations longitudinales et transversales de béton sous l'effet d'une contrainte croisent verticale</i>	130
4.56	<i>Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton <math>\varepsilon_{1el}</math> en fonction des contraintes relatives <math>\eta</math> pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]</i>	131
4.57	<i>Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton <math>\varepsilon_{1Tel}</math> en fonction des contraintes relatives <math>\eta</math> pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]</i>	131
4.58	<i>Déformation élasto-instantanées transversales du béton <math>\varepsilon_{2el}</math> en fonction des contraintes relatives <math>\eta</math> pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]</i>	132
4.59	<i>Déformation élasto-instantanées totales transversales du béton <math>\varepsilon_{2Tel}</math> en fonction des contraintes relatives <math>\eta</math> pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]</i>	132
4.60	<i>Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives <math>\eta</math> pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]</i>	133
4.61	<i>Module d'élasticité des bétons Béton [t], Béton [1] et Béton [2]</i>	133

---

## INTRODUCTION GENERALE

### 1.1. Contexte :

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés plus en plus dans le béton, ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires, pour plusieurs raisons soit pour des raisons économiques, soit pour améliorer certaines propriétés du béton frais ou durci, soit pour des raisons écologiques ( Les accords de Kyoto sont destinés à limiter les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement de la planète, l'Algérie s'est engagée à maintenir constantes ses émissions de gaz à effet de serre il a été demandé aux industriels de réduire émission de dioxyde de carbone, la production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de  $CO_2$  dans l'atmosphère le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de  $CO_2$  émise) ;

Le laitier vitreux est un ajout possédant plusieurs qualités (composition chimique proche de celle du ciment Portland, stabilité des caractéristiques pour une même source de laitier, réactivité latente mais activée en présence de ciment Portland), ce qui en fait un ajout très intéressant pour l'industrie du béton [90].

Le laitier de haut fourneau broyé a déjà est utilisé comme ajout minéral dans plusieurs cimenteries où son dosage est habituellement limité entre 20 et 25 % en remplacement de ciment à cause d'une diminution significative de la résistance initiale.

Le sable de dune est un matériau naturel très abondant au sud algérien son utilisation comme ajout minérale à fait l'objet des recherches expérimentale. Les résultats de ces recherches ont montré que le sable de dune est capable de développer une réaction pouzzolanique\* en milieu cimentaire, ainsi l'analyse par diffractométrie aux rayons x à mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune cette propriété lui permet d'utilise comme ajout minérale.

La combinaison avec le ciment portland plusieurs ajouts cimentaires (2 ou 3) permet de développer de nouveaux liants hydrauliques (ciment ternaire ou quaternaire) ayant des propriétés et durabilités très supérieur, ce mémoire à pour objectif d'étudier l'influence de l'interaction du sable de dune avec le laitier sur les propriétés de béton et comme objectif principale d'étudier l'influence de l'ajout de sable de dune et de laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton.

---

\* Réaction pouzzolanique : propriété de certaines phases minérales de réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liants.

---

## 1.2 Description de la méthodologie de travail

L'objectif de ce travail comme on a annoncé est d'étudier l'effet de l'ajout de sable de dune et le laitier finement broyés aux ciments sur la stabilité de béton, donc pour atteindre cette objectif, nous avons établi une méthodologie repose sur trois étapes principale, La première étape consiste à étudier l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier au ciment en premier temps sur propriétés mécaniques et physiques (temps de prise, consistance, stabilité volumétrique) du ciment et en deuxième temps sur la stabilité du ciment vis a vis aux agressions chimique deux types d'agression ont été testés (acide, sulfate), les essais portent pour cette étape sur la pâte pure; La deuxième étape consiste à étudier l'effet de l'ajout de sable de dune et le laitier au ciment sur propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la flexion et à la traction par flexion), et sur la stabilité volumétrique (retrait, gonflement) du mortier, les essais portent pour cette étape sur mortier normal; La troisième étape consiste à étudier l'effet de l'ajout du sable de dune et le laitier au ciment sur propriétés mécaniques et sur l'absorption, et à la stabilité à l'eau et finalement sur la perméabilité et déformabilité du béton.

### Structure du document :

Ce mémoire se compose de deux grandes parties :

La première partie comporte deux chapitres correspond à une revue de la documentation, le premier chapitre présente une revue de la littérature portant principalement sur le ciment, compositions chimiques et minéralogiques, mécanisme d'hydratation et de la microstructure de ciment hydrate, le deuxième chapitre présente une revue de la littérature sur les ajouts cimentaires il diviser en trois parties:

- La première partie présente une revue de la littérature sur les ajouts cimentaires : définition, classification, composition et mode d'action ;
- La deuxième partie à été consacrée à l'étude de laitier granulé et de leur propriété physique et chimique, mécanisme de leur hydratation, et leur influence sur les propriétés du béton frais et durci ;
- La troisième partie présente une revue de la littérature en premier lieu sur la synergie des ajouts cimentaires et en deuxième lieu sur l'influence de l'ajout de sable de dune finement broyée sur les propriétés de ciment ;

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à l'étude expérimentale, elle contient le chapitre 3 et 4, le troisième chapitre présente les caractéristiques des matériaux utiliser ainsi que les différents essais, le quatrième chapitre expose le travail expérimental entrepris dans cette étude, et présente tous les résultats obtenus dans le cadre des différents essais réalisés et une analyse et une discussion des résultats obtenus, et finalement, un résumé de principales conclusions tirées de ce travail.

## PARTIE 1

# ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## **Chapitre 1 :**

### **CIMENT : HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE**

#### **INTRODUCTION**

La majorité des propriétés du béton sont liées à la nature du ciment et à sa composition : rhéologie, résistance mécanique, résistance aux agressions chimiques, durabilité, la substitution d'une partie de ciment portland par des ajouts minéraux (laitier granulé, fumée de silice, cendre volante, pouzzolanes naturelles) contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois, il est donc utile de connaître les propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques et le mécanisme d'hydratation ainsi que la microstructure du ciment hydraté.

Le présent chapitre porte en premier temps une revue de connaissances sur la fabrication du ciment portland ainsi que leur composition chimique et minéralogique et en deuxième temps sur le mécanisme d'hydratation et de la microstructure de ciment hydraté.

## 1.1 CIMENT

---

### 1.1.1 Définition :

La découverte des ciments remonte à l'ère des Romains, il y a deux mille ans, qui furent les premiers à utiliser les propriétés hydrauliques de la chaux résultant de la décarbonatation des calcaires pour la construction de leur maçonnerie, routes et aqueducs [1].

L'invention du ciment portland est généralement attribuée à JOSEPH ASPDIN, un maçon anglais celui-ci obtient en 1824 un brevet pour son produit, qu'il nomma ciment portland parce qu'il produisait un béton qui avait la couleur de l'excellente pierre naturelle extraite de la presque île calcaire de **Portland** située sur la Manche, à l'ouest de l'île de Wright en Angleterre le nom a été conservé et est utilisé partout dans le monde.

La norme ASTM C-150 définit le ciment Portland comme un ciment hydraulique produit par la pulvérisation du clinker, essentiellement composé de silicates de calcium, avec une faible quantité de sulfate de calcium (qui peut être ajouté sous différentes formes).

Les ciments portland sont des liants hydrauliques, c'est-à-dire que leur prise et leur durcissement se fait en se combinant avec l'eau cette réaction, appelée hydratation.

### 1.1.2 Fabrication du ciment portland :

Le ciment Portland est fabriqué à partir de produits naturels qui sont extraits de carrières puis concassés, homogénéisés, cuits à très haute température dans un four pour former un clinker qui est finement broyé et associé à une faible proportion de gypse pour obtenir le ciment .

Ces matières premières sont composées essentiellement de chaux (CaO), de silice (SiO<sub>2</sub>), d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) la chaux est apportée généralement par les roches carbonatées qui représentent 80 % du cru d'alimentation (Tableau 1.1) Par contre, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles ou des schistes formant approximativement 20 % du cru d'alimentation. L'alumine, l'oxyde de fer, la magnésie (MgO) et des alcalis (Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O) peuvent exister dans les matières premières sous forme d'impuretés, il est nécessaire d'avoir les oxydes suivants : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO et les alcalis dans le mélange pour diminuer la température nécessaire pour la formation de silicate de calcium.



Quand les quantités de ces oxydes ne sont pas suffisantes dans les matières premières, d'autres matériaux comme la bauxite et l'oxyde de fer sont ajoutés pour l'ajustement de la composition [2].

**Tableau 1.1** Composition du cru d'alimentation

Matière première	Formule chimique	Abréviation	Proportion	Source de matière première
chaux	CaO	C	77%	Argile, calaires, calcite, craie, laitier, marbre, schiste, etc.
Silice	SiO <sub>2</sub>	S	10 à 15%	Argile, calaires, basalte, silicate de calcium, laitier, cendres quartzite, sable, schiste, etc.
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	5 à 10%	Argile, bauxite, laitier cendre volante, minerai d'aluminium, schistes
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	2 à 3%	Argile, minerai de fer, pyrite calcinée, schiste, etc.

On note quatre procédés de fabrication par voie humide, par voie semi humide, par voie sèche ou par voie semi sèche, dans le procédé par voie sèche, le broyage et l'homogénéisation se font sur des matériaux secs. Par contre, dans le procédé par voie humide, le broyage se fait sur une forme de pâte (slurry) qui contient à peu près 30 à 40% d'eau. Le procédé par voie sèche est plus économique parce qu'il n'y a pas d'eau à évaporer.

La «farine<sup>1</sup>», résultant du concassage, broyage et homogénéisation de la matière première, est introduite à l'extrémité supérieure d'un four en acier de forme cylindrique qui est incliné selon un angle de 3 à 4 degrés et qui tourne à une vitesse de rotation de 1 tr/min, le four peut être long (d'environ 75 m de longueur) ou court (d'environ 40 à 50 m de longueur) avec une précalcination, un gros brûleur est placé à l'extrémité inférieure du four.

Le mélange homogénéisé traverse lentement le four vers la partie inférieure où il y a plusieurs réactions chimiques conduisant à la formation du clinker de ciment portland :

à 100 C° : évaporation de l'ordre de 1% (eau) ;

à 450 C° : départ de l'eau combinée à l'argile ;

Entre 700 et 900 C° : calcination de CaCO<sub>3</sub>

Selon la réaction (1)



La chaux (CaO) obtenue réagit avec la silice, activée par la déshydratation de l'argile ou du schiste, et avec l'alumine;

<sup>1</sup> Farine ou mouture ; état du cru après broyage et avant cuisson

Jusqu'à 1200 C° : formation de C<sub>2</sub>S par combinaison de SiO<sub>2</sub> et CaO; à partir de 1250 C° : formation de C<sub>3</sub>S résultant de la combinaison de C<sub>2</sub>S et de la chaux résiduelle, au-dessus de 1300 C°, cette réaction est activée par l'apparition de la phase liquide qui contient les aluminates et les ferro-aluminates qui, par refroidissement, vont se cristalliser en composés bien définis le C<sub>3</sub>A et le C<sub>4</sub>AF. La matière son du four sous forme de billes de 5 a 25 mm de diamètre appelée clinker;

à 1450 C°, la clinkérisation est complète.

Pour contrôler la prise du ciment, le clinker est broyé avec un faible dosage en gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) généralement inférieur 5%, parfois l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>) est ajoutée au clinker au lieu du gypse, à la sortie du broyeur, on obtient une fine poudre de ciment Portland qui est acheminée vers des silos pour l'entreposage.

### 1.1.3 Composition du ciment portland :

#### 1.1.3.1 Composition du ciment anhydre :

Le clinker portland résulte de la cuisson, autour de 1450 C°, d'un mélange homogène de matières premières finement divisées (argiles, calcaires, marnes) en proportion convenable.

Son analyse chimique révèle en moyenne les teneurs massiques d'oxydes indiquées dans le tableau 1.2 ces oxydes sont combinés dans le four pour former quatre phases solides principales, avec essentiellement des silicates de calcium et des aluminates de calcium dans les proportions moyennes indiquées dans le tableau 1.2

**Tableau 1.2** Composition typique d'un clinker en % massique

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
62-67%	19-25%	2-9%	1-5%	0-3%	1-3%	0,6%	0,2%

La composition théorique des phases principales du ciment peut être calculée à partir d'une composition chimique faite en fluorescence X en utilisant les équations de BOGUE. Les équations de Bogue sont les suivantes :

$$\% C_3S = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times \% Al_2O_3) - (1,43 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3)$$

$$\% C_2S = (2,876 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times \% C_3S)$$

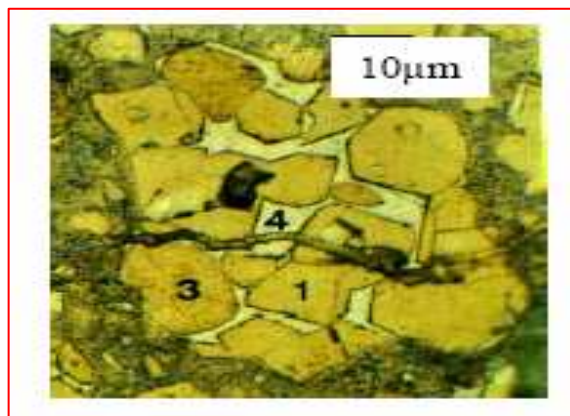
$$\% C_3A = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3)$$

$$\% C_4AF = (3,043 \times \% Fe_2O_3)$$

**Tableau 1.3** Phase anhydres présentes dans un ciment portland artificiel

Nom	Formule en oxydes	Notation cimentière	% massique
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60-65
Silicate dicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	20-25
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	8-12
Aluminoferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8-10
Gypse	$\text{CaO}.\text{SO}_3.2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CsH}_2$	ajouté
Divers (dont chaux libre)	$\text{CaO}$	$\text{C}$	1-3

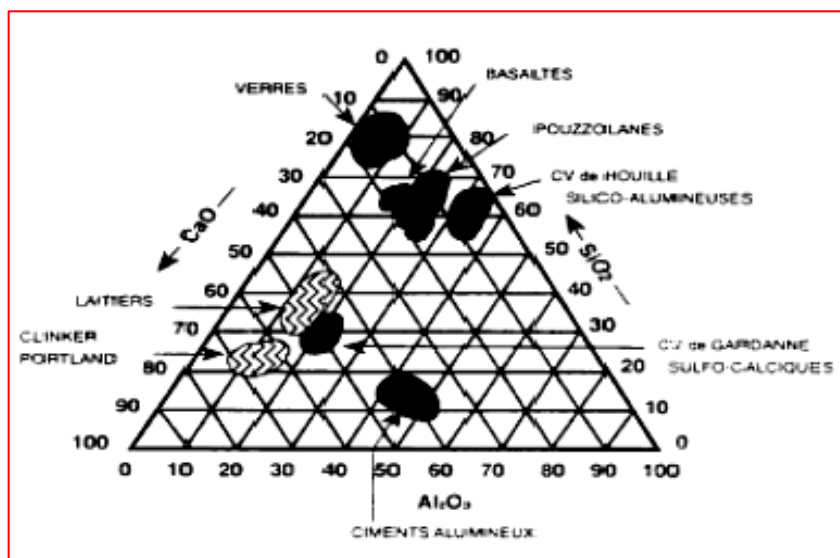
Le ciment Portland, ou plus exactement le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains polycristallins de quelques dizaines de microns (figure 1.1)



**Figure 1.1** Grains polycristallins d'un ciment portland anhydre (image obtenu par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par  $\text{HNO}_3$ ) : (1=  $\text{C}_3\text{S}$  ; 3 =  $\text{C}_2\text{S}$  ; 4 =  $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$ ) [3]

#### 1.1.4 Compositions chimiques générales des ciments :

Les ciments classiquement utilisés sont fabriqués par mélange et cobroyage de clinker Portland et d'autres constituants minéraux, avec une certaine quantité de gypse -sulfate de calcium (= 5 % du ciment) nécessaire pour réguler la prise. Le diagramme présenté sur la figure (1.2) permet de situer ces principaux constituants selon leur teneur massique en oxyde de calcium, de silicium et d'aluminium.



**Figure 1.2** Schéma situant les différents produits minéraux à base de calcium, silicium pouvant entrer dans la composition des ciments courants

Les compositions pondérales de quelques ciments courants normalisés [NF P 15-301] sont présentées dans le tableau 1.4.

**Tableau 1.4** Proportions massiques des constituants (sulfate de calcium et additifs exclus) entrant dans la composition de quelques ciments courants, avec : S = Laitier granulé de haut fourneau, V = Cendres volantes siliceuses, Z = Pouzzolanes naturelles

	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CEM I (CPA)	95 -100		0-5
Ciment de haut fourneau	CEM III/C (CLK)	5-19	81-95 [S]	0-5
Ciment au laitier et aux cendres	CEM V/A (CLC)	40-64	18-30 [S et (V ou Z)]	0-5
	CEM V/B (CLC)	20-39	31-50 [S et (V ou Z)]	0-5

### 1.1.5 Classification des ciments portland :

On fabrique plusieurs ciments portland possédant différentes caractéristiques physiques et chimiques et répondant à des besoins précis. L'association canadienne de normalisation (CSA) divise les différents types de ciment Portland en cinq catégories la composition typique des ciments de chaque catégorie est donnée au tableau 1.5

**Tableau 1.5** classification du ciment portland selon l'Association canadienne de normalisation (CSA).

Type	caractéristique	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Type 10	CP normal	50	24	11	8
Type 20	CP à Q modérée	42	33	5	13
Type 30	CP à haute R initiale	60	13	9	8
Type 40	CP à faible Q d'hydratation	26	50	5	12
Type 50	CP résistant aux sulfates	40	40	3 5	9
CP ciment portland		R résistance	Q chaleur		

Les ciments portland spécifiés et utilisés aux États-Unis sont normalement conformes à ASTM C 150, Standard Specification for Portland Cement, La norme ASTM est de loin la plus utilisée dans le domaine du ciment et du béton. La norme ASTM C 1157, Performance Specification for Hydraulic Cements, établit six types de ciment portland

La norme ASTM C 150 établit les huit types de ciment portland suivants, qu'elle désigne au moyen de chiffres romains :

**Tableau 1.6** classification du ciment portland selon norme ASTM C 150.

Type I	normal
Type IA	normal, à air entraîné
Type II	à résistance moyenne aux sulfates
Type IIA	à résistance moyenne aux sulfates, à air entraîné
Type III	à haute résistance initiale
Type IIIA	à haute résistance initiale, à air entraîné
Type IV	à faible chaleur d'hydratation
Type V	à haute résistance aux sulfates

## 1.2 HYDRATATION DE CIMENT PORTLAND

### 1.2.1 Introduction :

Comme le ciment portland est un mélange hétérogène de plusieurs composés, son processus d'hydratation est un ensemble de réactions simultanées des substances anhydres avec l'eau [4,5]. Tous les composés ne réagissent pas de la même manière: les aluminates sont réputés pour réagir plus rapidement que les silicates, c'est pourquoi la rigidité (perte de consistance) et la prise caractéristiques à la pâte de ciment portland sont généralement attribuées aux réactions des aluminates, alors que les silicates, constituant près de 75% du ciment ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le durcissement initial (Taux de développement de résistance) du matériau (fig 1.3).

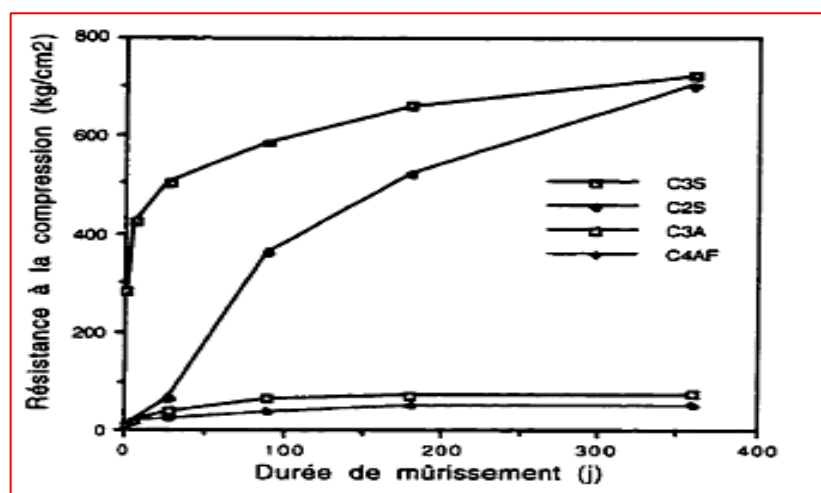


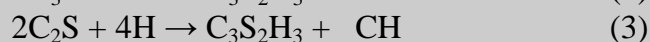
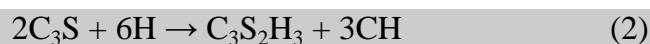
Figure 1.3 Comparaison de la résistance à la compression des phases du ciment en cours d'hydratation [8]

### 1.2.2 L'hydratation des composants du ciment

#### Hydratation des silicates $C_3S$ et $C_2S$ :

L'hydratation des silicates tricalcique et dicalcique produit une famille d'hydrates de structure semblable mais de rapport C/S très variable; il en est de même pour la teneur en eau combinée en général, les silicates de calcium hydratés produits sont peu cristallins et très poreux, présentant les caractéristiques d'un gel liquide. La stoechiométrie de ces composés est mal connue, leur structure varie avec la température, les proportions du mélange initial (rapport E/C) et l'âge d'hydratation.

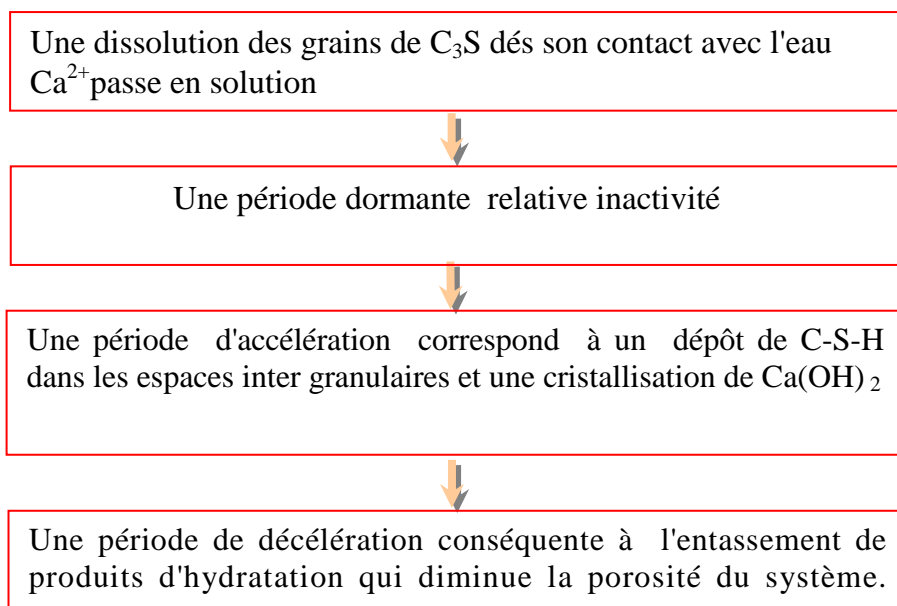
Les réactions d'hydratation complètes des pâtes de  $C_3S$  et  $C_2S$  seraient :



Quand le  $C_3S$  est mélangé à l'eau, à la température ambiante, la réaction se complète en plus d'un an selon sa finesse. Il est maintenant admis que deux types de réactions se produisent [7]:

- (1) Une réaction en solution où les réactifs se dissolvent pour donner des ions en solution, qui vont se combiner pour former par précipitation de nouveaux produits.
- (2) Une réaction topo chimique qui se produit à la surface du solide anhydre sans passage en solution des réactifs.

Le mécanisme d'hydratation du  $C_3S$  se subdivise en 4 principales étapes [4, 9,10]



**Figure 1.4** Organigramme de mécanisme d'hydratation du  $C_3S$

### L'hydratation des aluminates $C_3A$

Les aluminates réagissent immédiatement avec l'eau, les hydrates cristallins tels que le  $C_4AH_{13}$  et  $C_2AH_8$  sont formés rapidement avec libération d'une grande quantité de chaleur leur formation génère un raidissement de la pâte, si cette réaction n'est pas freinée, le ciment ne serait pas utilisable pour la plupart des travaux de construction c'est pourquoi on utilise le gypse (comme source de sulfate) qu'on ajoute lors du broyage, pour inhiber l'hydratation des aluminates.

En absence de gypse les aluminates réagissent avec l'eau comme suit équation (4) :

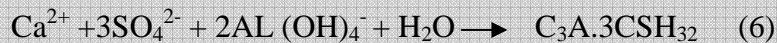


à température ambiante, les deux hydrates hexagonaux  $C_2AH_8$  et  $C_4AH_{13}$  subsistent pendant 24 heures ou plus avant de se transformer en  $C_3AH_6$  cubique en présence de la chaux, seul le  $C_4AH_{13}$  est formé et reste stable à température ambiante [4] :

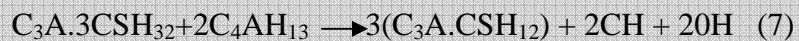


C'est cette réaction qui est la principale cause de la prise éclair des pâtes de ciment portland quand il y a peu ou pas de gypse [11].

En présence de gypse et de chaux, comme c'est le cas dans les pâtes de ciment, l'eau dissout une certaine quantité de  $CaSO_4$  et de chaux pour former une solution alcaline de sulfate de calcium. Une réaction entre le sulfate de calcium en solution et les ions aluminates résultant de la dissolution du  $C_3A$  se produit pour former l'ettringite ( $C_3A \cdot 3CSH_{32}$ ) selon la réaction (6) :



une fois tout le gypse consommé, ou s'il n'en reste pas assez pour former de l'ettringite, il y a beaucoup d'hydroxyde de calcium provenant du  $CaO$  libre et des phases silicates qui réagit avec l'ettringite pour produire le monosulfate selon l'équation (7) :



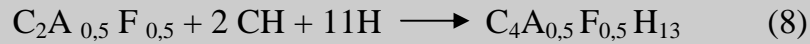
Tant qu'il y a encore du  $C_3A$  anhydre, le  $C_4AH_{13}$  ; continue à se former et le produit final de l'hydratation du  $C_3A$  du ciment est le monosulfate. [12]

### Hydratation du ferroaluminat tétracalcique $C_2A_pF_{1-p}$

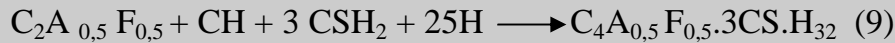
Les produits d'hydratation du  $C_2A_pF_{1-p}$  sont similaires à ceux du  $C_3A$ , avec les ions  $Al^{3+}$  partiellement remplacés par les ions  $Fe^{3+}$  les réactions d'hydratation sont cependant plus lentes et entraînent moins de dégagement de chaleur  $C_2A_pF_{1-p}$  ne s'hydrate jamais assez vite, au point de causer la "prise éclair". [13]

La réactivité du  $C_2A_pF_{1-p}$  croît avec l'augmentation de  $p$ , par rapport à ses produits d'hydratation, la phase ferrite est pauvre en chaux, en présence de chaux (comme dans le cas de l'hydratation du  $C_3S$  dans le ciment) elle s'hydrate pour former du  $C_4(AF)H_{13}$ .





En présence de gypse, la phase ferrite produit de l'ettringite contenant du fer dans sa structure.



Quand le gypse est consommé et que le  $\text{C}_2\text{A}_{0,5}\text{F}_{0,5}$  n'est pas complètement hydraté, alors l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate tétracalcique contenant du fer dans sa structure  $\text{C}_3\text{A}_{0,5}\text{F}_{0,5}.\text{CS.H}_{12}$ .

### 1.2.3 Effet des sulfates sur l'hydratation du ciment :

En général les sulfates jouent un rôle important comme régulateur de prise et d'hydratation du ciment leur présence à un effet sur la cinétique et la thermodynamique de l'hydratation du ciment.

Les sulfates réagissent avec les aluminates pour donner de l'ettringite si la quantité d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  en solution n'est pas suffisante, le  $\text{C}_3\text{A}$  va alors s'hydrater et donner lieu à une prise rapide, tandis que si la concentration en ions sulfates est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise [13].

#### a) Effet des sulfates sur l'hydratation des $\text{C}_3\text{S}$

Des études sur l'hydratation des alites en présence de gypse ont montré que le sulfate de calcium accélère l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  [26, 27,28]. Copeland et Kantro [14] reportent que l'hydratation à 1 jour est indépendante du degré de "gypsage", mais, à long terme 1 à 1,5% de  $\text{SO}_3$  donne le degré d'hydratation maximum Bennir [15] lui aussi a reporté que la résistance à la compression et le degré d'hydratation des  $\text{C}_3\text{S}$  jusqu'à 48 heures sont indépendants du pourcentage de gypse introduit.

Jawad et Skalny ont fait des études sur l'hydratation initiale des  $\text{C}_3\text{S}$  en présence de gypse, ils ont fini par conclure que la présence de  $\text{SO}_3$  favorise la dissolution des  $\text{C}_3\text{S}$  durant la première étape hydratation, le C-S-H peut inclure des ions sulfates [16].

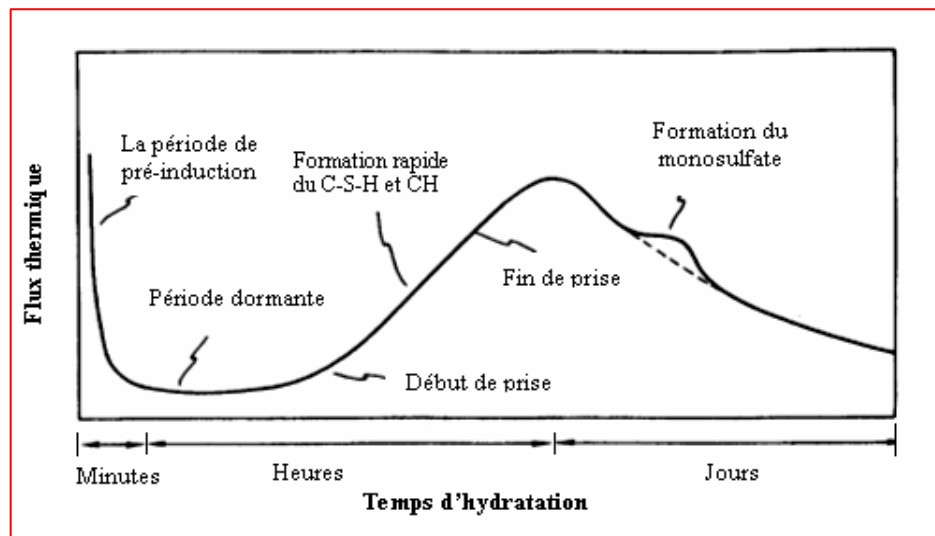
#### b) Effet des sulfates sur l'hydratation des aluminates:

Skalny et Young [9] ont montré qu'une faible teneur en sulfate retarde l'hydratation des aluminates sans précipiter l'ettringite. Bien que la formation d'ettringite soit la première étape de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$ , ils suggèrent que l'adsorption des sulfates sur la surface du  $\text{C}_3\text{A}$  est un facteur important.

Jawad et coll. [17] ont reporté que l'hydratation du  $C_3A$  et du  $C_4AF$  dans une solution saturée en gypse est retardée. Le ferroaluminate est très fortement affecté, l'émingite se forme initialement sur la surface du  $C_4AF$ , une chute de concentration des sulfates dans la solution engendre la formation de monosulfoaluminate et l'hydratation accélérée du ferret.

### 1.2.4 Évolution de l'hydratation :

L'évolution de la réaction d'hydratation dans le temps se divise en quatre principales périodes la figure 1.7 illustre ces différentes périodes de la cinétique d'hydratation



**Figure 1.5** Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment d'après Bensted [21].

#### La période de pré-induction

Correspond à la première période, lorsque le ciment est en contact avec l'eau, il y a un grand dégagement de chaleur à cause de la dissolution rapide des sulfates et des aluminates, cette période est aussi caractérisée par la formation d'une couche d'ettringite à la surface du  $C_3A$  qui permet d'en contrôler l'hydratation.

#### La seconde période,

La période dormante, est caractérisée par un faible taux de dégagement de chaleur durant laquelle la concentration d'ions calcium en solution augmente et celle des aluminates diminue. Cette période prend fin lorsque les CH commencent à précipiter et elle est suivie par la prise du ciment.

La prise qui est accompagnée d'un fort dégagement de chaleur, correspond à la période pendant laquelle le matériau change d'état, c'est-à-dire lorsqu'il passe de l'état de suspension à l'état solide. La prise est causée par la formation rapide de C-S-H et de CH.

Finalement la période de durcissement ou la période d'après prise correspond à la période d'évolution des propriétés mécaniques du matériau. Cette évolution est rapide dans les heures qui suivent la prise et elle se poursuit plus lentement pendant encore plusieurs mois en présence d'eau [22].

### 1.2.5 Les phases hydratées du ciment Portland

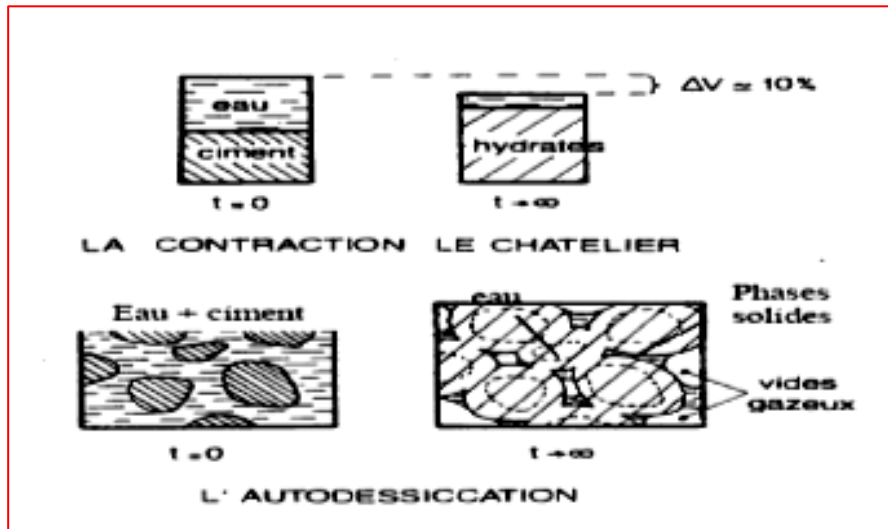
Dans la réaction d'hydratation, le volume molaire des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes molaires du ciment anhydre et de l'eau participant à la réaction, ce phénomène est appelé « contraction Le Chatelier ». Pour une hydratation complète, cette contraction est de l'ordre de 10 % du volume initial de la pâte si le matériau est isolé de toute source d'eau extérieure, la contraction le Chatelier provoque une auto-dessiccation de la pâte, c'est-à-dire une dessiccation interne progressive.

Après la prise, le squelette formé par les hydrates du ciment s'oppose, par sa rigidité, à la contraction le Chatelier. Il se forme ainsi progressivement des vides gazeux et des ménisques dans les capillaires de la pâte de ciment (figure 1.6). L'auto dessiccation d'une pâte de ciment augmente lorsque l'on diminue le rapport E/C.

La pâte de ciment durcie constitue donc un système hétérogène comprenant un solide poreux, une phase liquide et généralement une phase gazeuse (vapeur d'eau) présents dans les pores, le solide est formé de minéraux hydratés et éventuellement de ciment anhydre résiduel si la quantité d'eau initiale est insuffisante pour une hydratation complète, les principaux hydrates sont indiqués dans le tableau 1.7

**Tableau 1.7** Principaux hydrates d'une pâte de CEM1\* (Baron, [18]) (Harrisson, [19])

Nom	Notation cimentière	Formules chimiques
Silicate de calcium hydraté	C-S-H	$1,7\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2,4\text{H}_2\text{O}$
Portlandite	CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Ettringite	$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CSH}_{32}$ (Aft)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3(\text{CaO} \cdot \text{SO}_3) \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
Monosulfo-aluminate	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CSH}_{12}$ (Afm)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Katoïte	$\text{C}_3\text{AH}_6$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



**Figure 1.6** illustration de la contraction le chatelier dans une pate de ciment et de l'auto dessiccation qui en résulte [3]

Au bout d'un temps suffisamment long, l'hydratation est équivalente au système simplifié (en excluant les phases ferrifères) suivant :

- les silicates sont dissous et forment des C-S-H et de la portlandite,
- les aluminates sont dissous et forment de l'ettringite (AFt), du Monosulfoaluminate (AFm) et des aluminates hydratés ( $C_3AH_6$ ),
- une partie des anhydres restes non hydratée en fonction du temps du e/c, de la durée de la cure, de la nature de l'anhydre

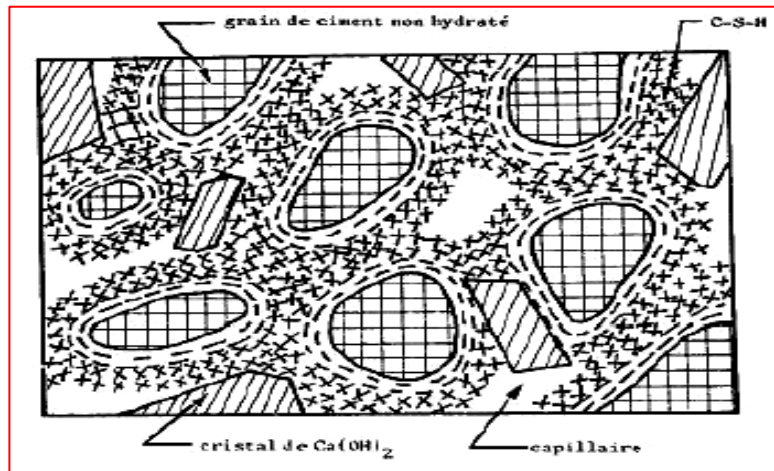
### La portlandite :

Elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique, dans la pâte du ciment, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5 elle participe peu au développement de la résistance du béton. , elle peut même être responsable du problème de la durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par l'eau.

### Les C-S-H :

Le CSH occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. C'est un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide, il a une structure en feuillet, formée de cristaux très petits et mal cristallisés, la cohésion des CSH est due aux forces de Van Der Walls entre les particules colloïdales des CSH.

Le PH de la solution interstitielle contenant le CSH est très alcalin (voisin de 13), a des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions  $\text{Ca}^{+2}$ . Les CSH subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques. Le gel de CSH est poreux, les pores de gel sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillettes, ils sont très petits ( $20 \text{ \AA}$  à  $30 \text{ \AA}$ ), la porosité du gel de CSH représente environ 28% du volume total du gel.



**Figure 1.7** Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [20]

#### **Le $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$ (l'ettringite) et le $\text{C}_3\text{AF} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$ (les phases AFt) :**

L'ettringite du ciment Portland a théoriquement la formule suivante  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$ . L'aluminium peut partiellement être remplacé par du fer et du silicium, le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) par du carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ou des hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) et le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) par du magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le rapport Fe/Al dans l'ettringite serait de 1/30, le rapport Si/Al de 1/60, le rapport Mg/Ca de 1/160 et le rapport S/Ca de 1/3 au lieu de 1/2, rapport stoechiométrie de la phase pure idéale.

#### **Le $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$ (monosulfoaluminate) et le $\text{C}_3\text{AF} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$ (les phases AFm) :**

Les phases solides  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$  et  $\text{C}_3\text{AF} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$  correspondent également à une solution solide le calcium peut être substitué par du magnésium, l'aluminium par du fer et le soufre par des hydroxydes et de la silice, une partie de la phase AFm faiblement cristallisée serait intimement mélangée aux C-S-H. [6]

#### **Les aluminates hydratés :**

Les aluminates de calcium hydratés sont fortement liés aux aluminosilicates de calcium, il existe deux types d'aluminosilicates de calcium stable : la gehlenite hydratée ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) et une solution solide d'hydrogrenat variant entre l'aluminate de calcium hydraté et l'aluminosilicate de calcium ces deux pôles sont  $\text{C}_3\text{AH}_6$  et  $\text{C}_3\text{AS}_3$  en présence de portlandite, la gehlenite hydratée est instable, elle réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former de l'hydrogrenat.

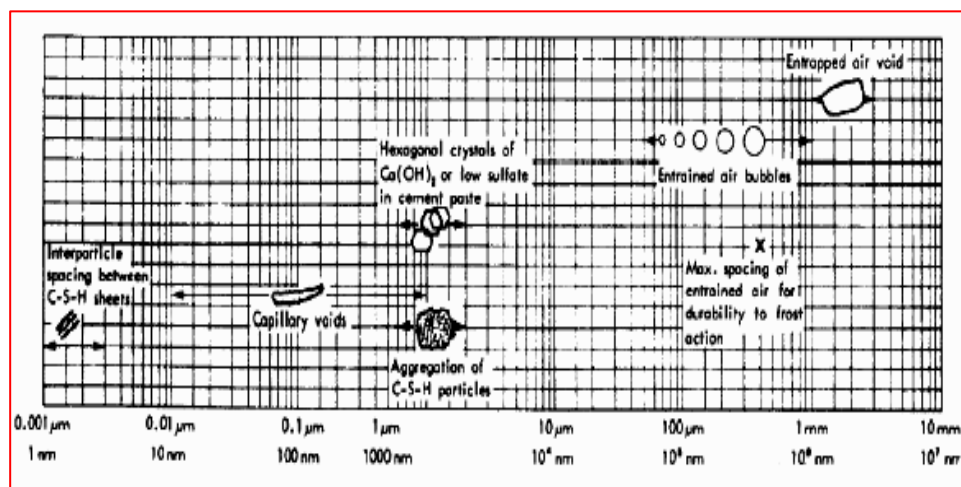
### 1.3 MICROSTRUCTURE DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

Au cours de l'hydratation, la pâte de ciment incluse dans le béton est composée d'hydrates, des grains de ciment anhydres et des espaces capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau. L'hydratation accroît le volume de solide et la quantité d'eau chimiquement liée dans la pâte et augmente en conséquence sa résistance.

#### 1.3.1 Les pores :

La porosité est une caractéristique importante des matériaux cimentaires qui lui confèrent plusieurs caractéristiques telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique. On distingue les pores contenus dans les granulats de ceux se trouvant dans la pâte de ciment. La taille et le volume des pores situés à l'intérieur des granulats n'évoluent pas avec le temps et influent sur la résistance du béton à la corrosion. Le volume des pores inclus dans la pâte diminue avec la progression d'hydratation et on distingue :

- Les pores capillaires ( $0,01 \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 0,5 \mu\text{m}$ ) qui occupent les espaces entre les grains de ciment en suspension dans l'eau. La taille et le volume de ces pores augmentent avec le rapport E/C du mélange. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante du volume et de la taille de ces pores capillaires.
- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ( $\varnothing < 40$  angströms) sont présents dans le gel de C-S-H. On distingue les pores inter-cristallites qui se situent entre les gels et les pores intra-cristallites présents à l'intérieur du gel lui-même. Le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport E/C du mélange. Aussi, ce type de pores n'affecte pas la perméabilité du matériau. La figure 1.8 ci-dessous donne une comparaison des tailles des différents pores et des constituants d'une pâte de ciment.

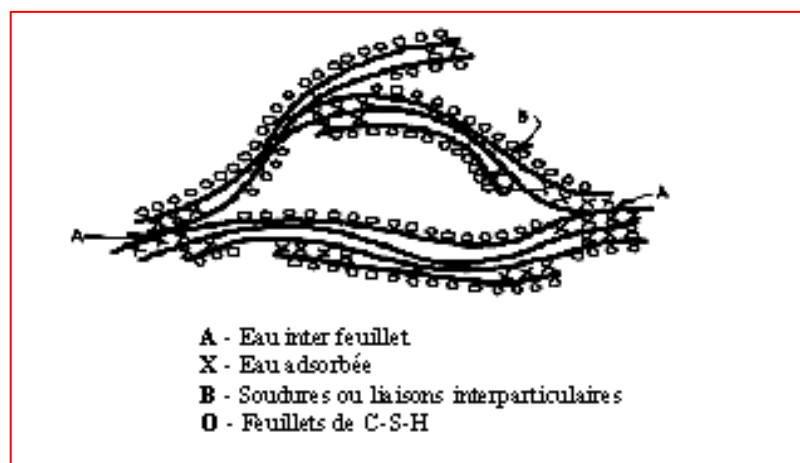


**Figure 1.8** Taille des pores et des solides dans les pâtes de ciment hydraté (d'après Metha) [23]

- Les bulles d'air occlus ( $\varnothing > 1$  mm) qui se trouvent piégées à l'intérieur du béton lors du malaxage du mélange. Ces bulles occupent 5 à 20% du volume du béton frais dans le coffrage [58], dans certains cas, où l'on veut limiter les dégâts causés par une gélification éventuelle de l'eau incluse dans le béton, il peut être utile d'introduire intentionnellement de l'air entraîné ( $10 \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 1$  mm) dans le béton. Ainsi, une augmentation du volume de l'eau lors d'une gélification peut s'échapper dans ces vides, des vides délaissés par l'eau de ressuage et de l'eau qui s'évapore sont aussi présents dans le béton.

### 1.3.2 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.



**Figure 1.9** Représentation schématique des feuillets de C-S-H d'après le modèle Feldman et Sereda [25]

#### A) L'eau combinée chimiquement

Cette eau fait partie intégrante des C-S-H elle représente environ 23% du poids de ciment qui a réagi, elle est très stable et on ne peut l'évaporer qu'en décomposant le C-S-H à haute température.

#### B) L'eau zéolitique

Cette eau n'est pas chimiquement combinée dans la structure des C-SH mais elle est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogène, pour l'évaporer il faut que le taux d'humidité s'abaisse au dessous de 30%, ce qui provoque un très fort retrait de la pâte.



**C) L'eau adsorbée**

Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides (sur tout sur les parois des capillaires ou des pores de gel) on croit qu'une couche d'environ 6 molécules d'eau (15 Å) peut être retenue par des liens hydrogène une grande partie de l'eau adsorbée peut être retirée si le taux d'humidité est inférieur à 50%. cette perte d'eau est en grande partie responsable du retrait de la pâte ou du béton.

**D) L'eau des capillaires**

Il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface.

**- Eau libre:**

L'eau libre est contenue dans les plus gros capillaires ( $>0,05 \mu\text{m}$ ). Son départ ne cause pas de changement de volume important (retrait).

**- Eau non libre:**

Cette eau est contenue dans les plus petits capillaires ( $0,05 \mu\text{m}$  à  $0,005 \mu\text{m}$ ), elle y est retenue par des tensions capillaires. Il faut abaisser le taux d'humidité en dessous de 90% pour qu'elle commence à s'évaporer.

**1.2. 3 Récapitulations de l'état de l'eau :**

Récapitulative les différents états de l'eau dans le béton

Etat de l'eau	Caractéristiques
Chimiquement liée	Entrent dans la composition des hydrates et faisant partie intègre du C-S-H
zéolitique	Eau retenue entre les feuilles de C-S-H par des liens hydrogènes.
Adsorbée à la surface des solides	eau Adsorbée a la surface des solides grâce aux forces intermoléculaires de van der waals (adsorption physique) et des force électrostatique (liaisons hydrogènes).
capillaire	Eau n'ayant pas réagi avec le ciment et se trouvant dans les capillaires, suivant la taille des pores capillaires, elle se trouve plus ou moins soumise a des forces superficielles, on distingue ainsi : - l'eau libre : conteuse dans les gros pores dont le diamètre est supérieur à $0,05\mu\text{m}$ . - l'eau non libre : retenu dans les pores grâce aux forces capillaires et se situant dans les plus petite pores ( $0,05 \mu\text{m}$ à $0,005 \mu\text{m}$ ).son départ influe sur le retrait du matériau.



#### 1.4 Récapitulations :

Le procédé de fabrication du ciment Portland et en particulier le processus de clinkérisation conduit aux émissions de  $\text{CO}_2$ , le remplacement d'une partie de ciment par un ajout peut contribuer positivement à la réduction de émissions de  $\text{CO}_2$ .

- L'hydratation du ciment est un phénomène physico-chimique très complexe car elle met en jeu un grand nombre de réactions chimiques parallèles ayant des cinétiques différentes, les pâtes de ciment hydratées sont principalement constituées :

- 1- Les hydrates ( $\text{CSH}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sulfoaluminate)
- 2- Les grains de ciment non hydraté.
- 3- Des espaces capillaires et des bulles d'air.

- La chaux hydratée  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite) est résulte essentiellement de l'hydratation de  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$  occupe de 20 à 25% il participe peu au développement de la résistance il devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5.

- L'hydratation du ciment Portland est un processus exothermique le  $\text{C}_3\text{A}$  et le  $\text{C}_3\text{S}$  contribuent très largement au développement de cette chaleur, si l'on désire obtenir une faible chaleur d'hydratation, on pourra diminuer le  $\text{C}_3\text{A}$  ou diminuer le  $\text{C}_3\text{S}$ .

## Chapitre 2 :

### LES AJOUTS CIMENTAIRES

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30% de la masse anhydre du ciment), cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte de ciment hydrate, il peut même être responsable du problème de la durabilité puisque peut être assez facilement lessivée par l'eau ; ce lessivage et ainsi de suite le seul aspect positif de la présence de la chaux dans un béton est qu'il maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche d'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures qui passive les armatures d'acier [91]

La plupart des ajouts cimentaire ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau peut se combiner avec la chaux libéré par l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui de ciment portland

Le présent chapitre présente une revue de la littérature portant principalement sur les ajouts cimentaires il subdivise en trois parties la première partie présente des connaissances générales sur les ajouts cimentaires, définition classification composition et mode action la deuxième partie a été consacrée à l'étude de laitier granulé leur propriété physique et chimique et mécanisme de leur hydratation ainsi leur influence sur les propriétés du béton frais et durci la troisième partie présente les résultats des travaux de recherche publiée le premier est sur la synergie d'ajouts cimentaires et le deuxième est sur l'influence de l'ajout de sable de dune finement broyé sur les propriétés de ciment .

## LES AJOUTS CIMENTAIRES

---

### 2.1 Introduction

Un ajout est tout ingrédient autre que l'eau ou le ciment qui est ajouté à ces deux composés pendant le malaxage pour améliorer leurs caractéristiques hydrauliques et rhéologiques (stabilité et fluidité), pour augmenter ou diminuer leur temps de prise ou pour assurer des critères de performance obtenus à long terme de la pâte de ciment (résistance, chaleur dégagée, etc.)

L'utilisation d'ajouts dans le ciment remonte à l'ère des Chinois et des Romains les premiers ont utilisé les œufs comme ajouts lors de la construction de la muraille de Chine et les seconds ont utilisé du sang ou du lait dans leur béton [29]. Actuellement, plus de 70% des mélanges produits contiennent au moins un ajout. On distingue généralement deux grandes familles d'ajouts: les ajouts chimiques (qui ne font pas l'objet de ce travail) appelés également adjuvants et les ajouts minéraux (appelés également les ajouts cimentaires).

### 2.2 Les ajouts chimiques :

#### 2.2.1 Définition :

On appelle adjuvant tout ingrédient, autre que le ciment portland, l'eau et les granulats, que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage. Les grains de ciment présentent sur leur surface un grand nombre de charges électriques, si bien qu'ils ont tendance à flocculer lorsqu'ils sont mis en présence d'un liquide aussi polaire que l'eau. Les conséquences de cette floculation sont une dispersion des particules non uniformes dans le matériau et une perte de maniabilité du béton causée par un emprisonnement de molécules d'eau à l'intérieur des flocculats formés [30].

Les ajouts chimiques peuvent être divisés en deux types: les uns agissent sur le système ciment-eau en influençant la tension superficielle et en s'adsorbant sur les surfaces de ciment alors que les autres utilisent leurs propriétés non ioniques pour affecter la réaction entre le ciment et l'eau [31]. Selon la norme AFNOR NF P 18-103, un adjuvant est un produit qui, incorporé à faible dose dans le béton, mortier au moment de leur malaxage, provoque des modifications recherchées de leurs propriétés rhéologiques. Leur emploi ne doit pas détériorer les caractéristiques du béton ou du mortier. Néanmoins, une faible diminution de certaines de ces caractéristiques peut éventuellement être acceptée sauf cas d'espèce, on entend par faible dose, un dosage inférieur à 5 % par rapport au poids du ciment.

## 2.3 Les ajouts cimentaires :

### 2.3.1 Définition :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice sont des exemples courants une pouzzolane est un matériau siliceux ou aluminosiliceux qui, finement divisé et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes [33].



**Figure 2.1** les ajouts cimentaire de droit à gauche cendre volante (type C), metakaoline, fumée de silice, cendre volante (type F), laitier, sèche calcine.

### 2.3.2 Les Avantages d'utiliser les ajouts :

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques

#### 2.3.2.1 Avantages techniques :

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux à très grande surface active, comme les fumées de silice), de plus, les ajouts cimentaires améliorent généralement les propriétés mécaniques l'imperméabilité et la ténacité et aux attaques chimiques enfin , par ce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation les ciments avec ajouts et en plus grande capacité d'allongement en traction, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration d'origine thermique [34].

### 2.3.2.2 Avantages économiques :

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux susceptibles de remplacer le ciment dans le béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels de même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. [34]

### 2.3.2.3 Avantages écologiques (émission de gaz à effet de serre) :

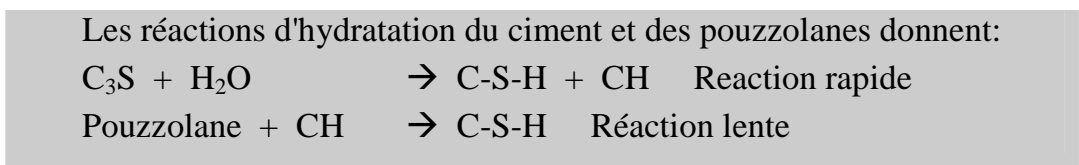
La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique de fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO<sub>2</sub> en général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie [34]

Tableau 2.1 Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires

Avantages techniques	Avantages économiques	Avantages écologiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>* améliore la maniabilité</li> <li>* réduit la demande en eau<sup>1</sup></li> <li>* amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton</li> <li>* diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton</li> <li>* diminue la fissuration d'origine thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.</li> <li>* réduit le prix du béton pour le coût du combustible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* diminution de l'émission du CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentière</li> <li>* élimination des sous-produits de la nature</li> </ul>

### 2.3.3 Comportement du ciment avec ajout minéral :

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout [35]:



<sup>1</sup> sauf pour les matériaux à très grande surface active, comme les fumées de silice

- 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 par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [35].

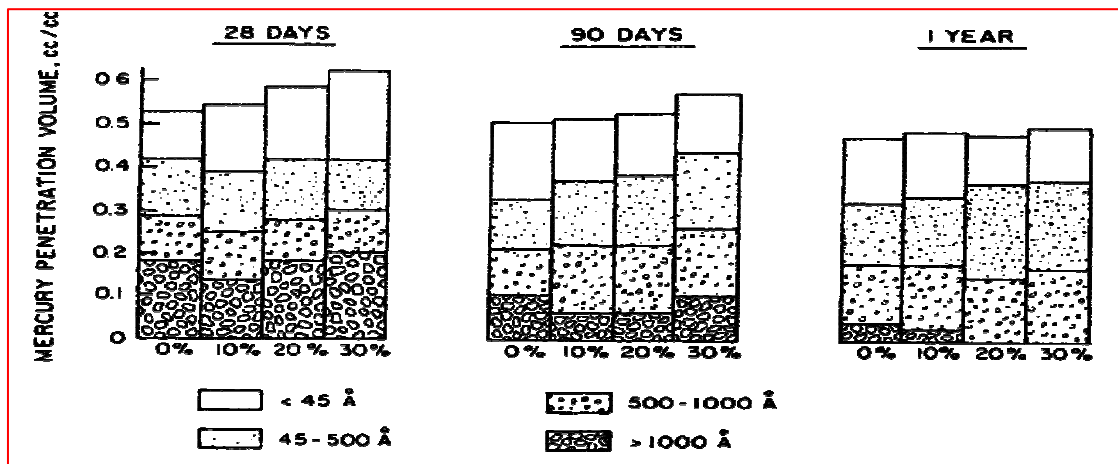


Figure 2.2 Changements de distribution de grandeurs des pores des pâtes de ciment avec différents contenus de pouzzolane [35].

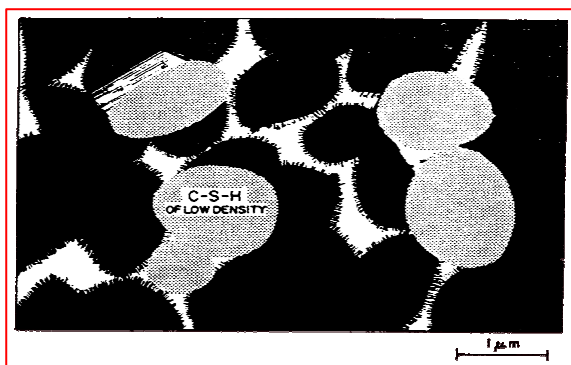


Figure 2.3 Modèle d'une pâte à base de ciment pouzzolane bien hydratées (tiré de cours de génie civil université Sherbrooke 2006 [35])

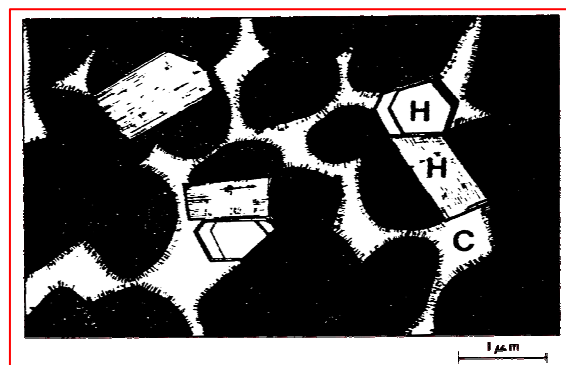


Figure 2.4 Modèle d'une pâte de ciment Portland bien-hydratée (tiré de cours de génie civil université Sherbrooke 2006 [35])

### 2.3.4 Classification des ajouts :

**Tableau 2.2** classification des ajouts cimentaires selon leur nature et activité (tiré de travaux de recherche D<sup>er</sup> Guettalla et D<sup>er</sup> Mezghiche 2001[36])

Genre de matières	Type	Activité	Exemples
Matières minérales	Hydraulique	Hautement actif	* ciments spéciaux * chaux hydraulique
	Hydraulique latente	Hautement actif	*laitier granulé (laitier de haut fourneau vitreux granulé) *cendres riches en calcium (cendres volantes calciques)
	Pouzzolanique	Hautement actif	*fumée de silice
		Moyennement actif	* cendres volantes pauvre en calcium (cendres siliceuses) * pouzzolanes naturelles telles que : - verres volcaniques, - tufs volcaniques, - trass, - phonolithe, - terre à diatomées
		Faiblement actif	* scories cristallines
	Filler	Inerte	* poudres minérales telles que : -farine calcaire, - poudre de quartz
	Fibres	inerte	* Fibres d'acier ou de verre
	Matières expansives	----	* ciments expansifs * oxyde de calcium * matières libérant des gaz
Pigments colorants	Inerte	* oxydes et sels métalliques,* terres colorantes, * craie, graphite, * sépia, carmin,* colorants dérivés des goudrons, *couleurs de l'aniline	
Matières organiques	Fibres	Inerte	* fibres synthétiques (polypropylène, polyamide)
	Dispersions synthétiques	----	* dispersions telles que : - polyvinyl propionate, polyvinylacétate, - polyacrélate, latex au styrène – butadiène, latex au néoprène * dispersion à base de résines époxydes

### 2.3.5 Modes de réaction des ajouts

Les ajouts sont très différentes parfois dans leur composition a celle de ciment portland le tableau 2.3 qui comprend également de ciment portland, donner un aperçu de cette différence, les différentes types d'ajouts peuvent être replacés dans un diagramme ternaire selon leur teneur massique en oxyde de calcium et de magnésium, en dioxyde de silicium, ainsi qu'en oxyde d'aluminium et de fer , les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers [36] .

**Tableau 2.3** compositions des ajouts [36]

Ajout	provenance	Forme d'utilisa	Composition chimique moyenne en %									Granulo moy	Surf spécifique	source
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	G v'			
Ciment Portland CEM I	Cimenterie	Poudre	22.5	5.5	2.0	62.5	1.5	2.7	0.4	1.0	3.0	----	2.89	Valeurs prev Ciment - suisse
			19.8	4.9	3.1	62.8	2.5	2.5	0.5	0.9	2.7			
Chaux hydrau	Chaufournerie	Poudre	11-27	3-8	2-3	40-59	2-3	1.5-3.5	----	----	11-20	----	7-9	(18)
Cdre vol Riches En Ca	Cendr.vol obtenues par dépoussièrage électrostatiques	Poudre	38	22	4	24	5	3	1	2	1	1-10	0.5-1	(1)
Cdre vol Pauv en Ca	Cendr.vol obtenues par dépoussièrage électrostatique	Poudre	48	28	9	4	2	1	1	2	5	1-10	0.5-1	(1)
Fumée Silice (μ Si)	Sous – produits provenant de la production de fer-SI	Poudre/ Bouillie	75-98	0.2-3	0.3-1	0.1-5	0.3-3.5	0.4-1.2	----	----	0.7-4	0.1-0.2	15-25	(15)
Si O2 Synth	Fabriqué artificiellement	Poudre/ Bouillie	>98	----	----	----	----	----	----	----	0	0.02	170-200	(15)
Farine Calcaire	Roche moulue	Poudre	----	----	----	----	----	----	----	----	>40	1-10	0.5-1	(1)
Poudre Quarz	Roche moulue	Poudre	>95	----	----	----	----	----	----	----	----	1-10	0.5-1	(1)
Trass Rhéna	Pouzzolane naturelle d'origine volcanique	Poudre	53	16	6	7	3	----	----	----	----	----	----	(16)
Terre Santorin	Pouzzolane naturelle d'origine volcanique	Poudre	65	14.5	5.5	3.0	1.1	----	----	----	3.5	----	----	(16)
Terre à Diatomé	Sédiments	Poudre	86	2	2	----	1	----	----	----	5	----	----	(16)



### **A) - 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 principaux responsables du comportement hydraulique d'un liant sont les composés d'oxyde de calcium (CaO), de dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) souvent appelé acide silicique; d'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alumine), aussi que d'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le plus important et le plus connu des liants hydrauliques est le ciment portland, qui se distingue des autres, principalement par sa résistance mécanique nettement plus élevée [36].

### **B) Les matériaux hydrauliques latents**

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de fait pas avec l'eau, ce n'est que lorsque le ciment Portland a formé suffisamment d'hydroxyde de calcium que le laitier et les cendres volantes riches en chaux peuvent être rendues hydrophobes dans le milieu alcalin on obtient alors les mêmes produits hydratés que pour le ciment Portland, seules les proportions sont différentes dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif [37].

### **C) Les matériaux pouzzolaniques**

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 par conséquent pas 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 [37].

### **D) Les matériaux inertes**

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, les pigments sont utilisés pour l'aspect esthétique [37].

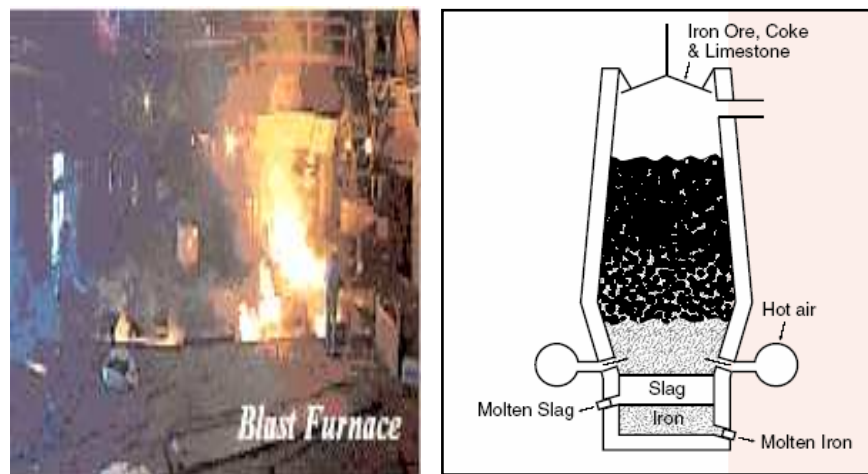
## 2.4 LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

### 2.4.1 Définition :

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés au cours de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer.

### 2.4.2 Origine :

Le haut-fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant [38]. Les deux réactions principales qui s'y déroulent sont des réactions de réduction des oxydes et d'échange entre le métal et le laitier. On introduit par le gueulard alternativement du coke, du minerai et du fondant, qui sont les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte.



**Figure 2.5** Représentation schématique d'un haut fourneau (tiré de civil marine 2006 [79]).

On peut signaler que la fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S...et que le laitier en fusion en bas du haut-fourneau contient les éléments  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , MnO, CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ...

### Formation

Aux températures atteintes, tous les constituants non métalliques et non gazeux de la charge se liquéfient : la densité du liquide ainsi obtenu (le laitier) est d'environ 3 alors que celle de la fonte est de 7. Il y a donc séparation par gravité du laitier et de la fonte : le laitier surnage à la surface du bain de fonte dans le creuset du haut-fourneau et rassemble les éléments provenant de la gangue, du fondant et des cendres de combustion.

### Méthode de refroidissement

Le type de refroidissement du laitier peut conduire à deux formes de laitier décrites ci-après.

### Laitier cristallisé:

Le laitier liquide à 1300°C /1500°C est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium. Les laitiers de haut-fourneau cristallisés permettent l'élaboration de granulats au sens de la norme XP P18-540. [39]

### Laitier vitrifié :

brutalement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques, comme le ferait un ciment. Les laitiers de haut-fourneau vitrifiés possèdent des propriétés hydrauliques mises à profit dans les cimenteries ou directement dans le traitement des assises de chaussées. Il existe deux types de laitier vitrifié :

- le laitier granulé, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression.

- le laitier bouleté qui est soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules, le laitier moulu peut être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou lui conférer des propriétés particulières comme le comportement aux milieux agressifs et à l'alcali-réaction, l'exothermicité ou la porosité. Il provient du broyage du laitier vitrifié (granulé ou bouleté).

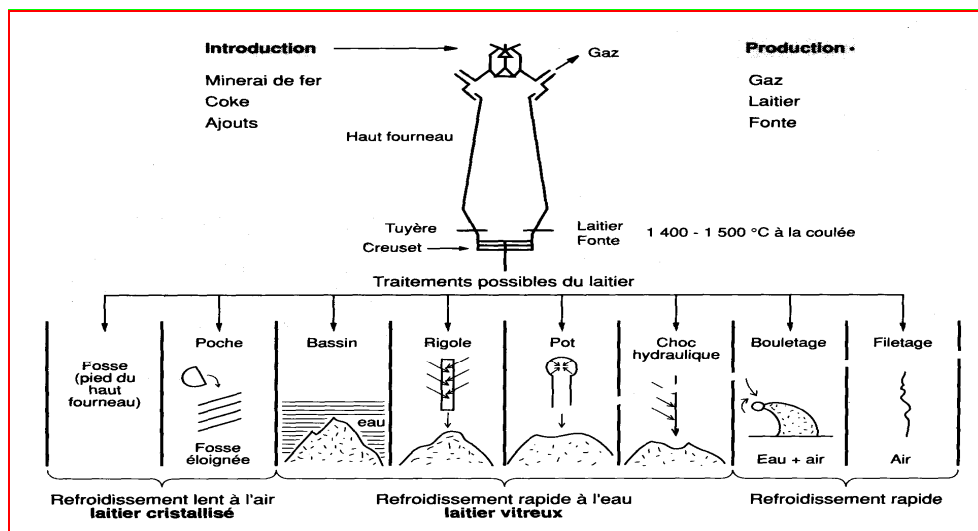


Figure 2.6 Principaux traitement de Laitier

**Elaboration :**

L'élaboration des laitiers de haut-fourneau produit toute une gamme de granulats (laitiers cristallisés, (figures 2.7 et 2.8) et de liants hydrauliques (laitiers vitrifiés), dont on rappelle ci-dessous les caractéristiques élémentaires telles que décrites en particulier par Alexandre et Sebileau [40].



**Figure 2.7 :** Laitier cristallisé compact (Alexandre et Sebileau, [40])



**Figure 2.8 :** Laitier cristallisé poreux (Alexandre et Sebileau, [40])

Le laitier cristallisé de haut-fourneau est élaboré selon différentes classes granulaires tout-venant, concassés O/D et d/D selon la demande on distingue :

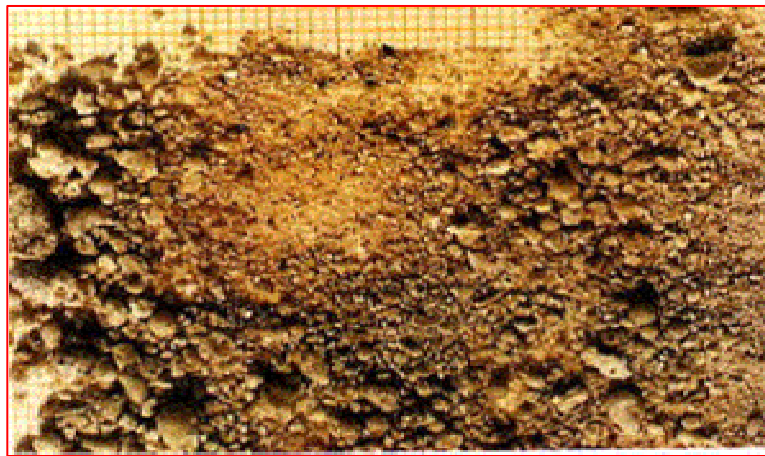
- le laitier tout-venant : C'est un laitier cristallisé, de fraîche production ou non, tel que repris à l'engin les granulométries sont de l'ordre de 0/300 mm, sans garantie de fuseau (figure 2.9). Il s'agit plutôt d'un matériau de remblais ou de couche de forme.
- le laitier concassé : C'est un laitier cristallisé concassé, livré en toutes granulométries (figure 2.10) Le laitier O/D est dit «de compactage», lorsqu'il est criblé et calibré, mélangé ou non en proportions variables, avec du laitier granulé ou tout autre liant hydraulique. La granulométrie maximale du O/D est de 0/50 mm ; il s'agit plutôt d'un matériau d'assises a prise lent.



**Figure 2.9 :** laitier cristallisé tout-venant (Alexandre et Sebileau, [40])

Le laitier vitrifié granulé correspond à un *sable* à prise hydraulique (0/5 à 0/6 mm), il peut être prébroyé, ce qui augmente sa teneur fine autour de 10 à 12 % et ainsi sa réactivité. Il peut être activé pour développer son hydraulicité, l'activation de type calcique ou sulfato-calcique étant effectuée selon la norme NF P 98-107. [41]

Le laitier bouleté, matériau à prise hydraulique, s'apparente en termes d'utilisation au laitier granulé ; la fraction granulométrique la plus grosse peut être utilisée comme granulat léger de laitier expansé à faible densité, notamment en construction d'ouvrages d'art [42].



**Figure 2.10** : laitier bouleté (Alexandre et Sebileau, [40]).

### 2.4.3 Caractéristiques physico-chimiques

a) Analyse chimique élémentaire :

Le laitier contient essentiellement quatre éléments dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO<sub>2</sub>), alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés. Le tableau 2 présente la composition chimique élémentaire du laitier :

Eléments	(%)
CaO	40 à 48
SiO <sub>2</sub>	32 à 41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9 à 18
MgO	1 à 9
MnO	0,4 à 0,7
FeO	0,2 à 1
S	0,6 à 1,5

**Tableau 2.4** : Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau (Alexandre et Sebileau [40].)

Diagramme de Keil, diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine (Figure 2.11), permet de situer le laitier de haut-fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulicité, alors que le laitier doit être activé.

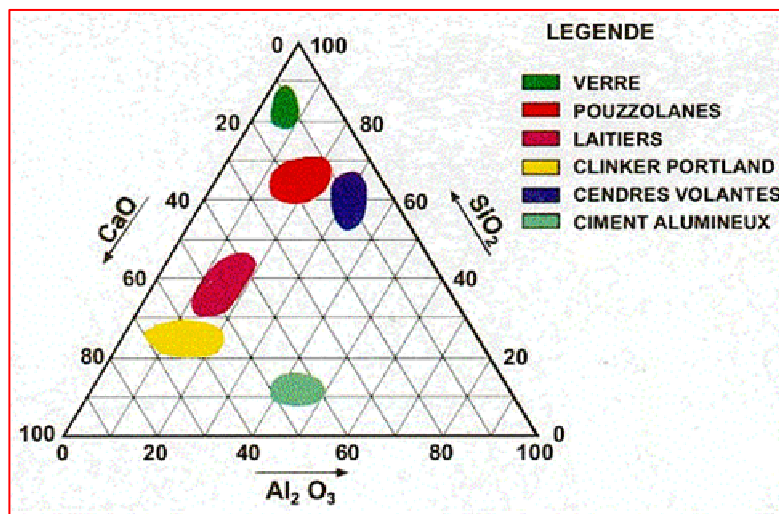


Figure 2.11 : Diagramme de Keil.

#### b) Caractéristiques minéralogiques :

D'un point de vue minéralogique, les constituants des laitiers de haut-fourneau sont essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Il s'agit d'une forme minéralogique stable.

-Laitier cristallisé : obtenu par refroidissement lent du laitier en fusion, le laitier cristallisé est composé de constituants cristallisés, essentiellement de silicate ou de silico-aluminate de chaux ainsi que des oxydes, des sulfures et exceptionnellement des nitrures issus essentiellement de la *gangue* et des fondants utilisés dans la matière première (minerai, fonte, acier,...). Le tableau 4 ci-dessous, présente les constituants des laitiers cristallisés.

- Laitier vitrifié : L'analyse des phases par diffraction des rayons X (Alexandre et Sebileau, [40].) fait apparaître, pour le laitier vitrifié, des raies de phases cristallisées (mélilite et merwinite). L'importance de la phase amorphe dépend du degré de vitrification : sur un laitier totalement vitrifié, seule la phase amorphe est représentée.



**Tableau 2.5** : Constituants des laitiers cristallisés d'après (Alexandre et Sebileau, [40].)

Désignation	Composition minéralogique	Formule simplifiée
<i>Classe des silicates</i>		
Ménilite (mélange cristallin) : Gehlenite Akermanite	2 CaO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub> 2 CaO – MgO – 2 SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> AS C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>
Merwinite	3 CaO – MgO – 2 SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>
Silicate bicalcique (α = Bredigite) (β = Larnite)	2 CaO – SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Rankinite	3 CaO - SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
Wollastonite { β α	CaO - SiO <sub>2</sub>	CS
Forsterite	2 MgO - SiO <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> S
Enstatite	MgO - SiO <sub>2</sub>	MS
Monticellite	CaO – MgO - SiO <sub>2</sub>	CMS
Anorthite	CaO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 2 SiO <sub>2</sub>	CAS <sub>2</sub>
Diopside	CaO – MgO – 2 SiO <sub>2</sub>	CMS <sub>2</sub>
Leucite	(K <sub>2</sub> O – Na <sub>2</sub> O) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 4 SiO <sub>2</sub>	(KN) AS <sub>4</sub>
Augite (silicate complexe)	(Ca – Mg – Fe – Ti – Al)	
<i>Classe des oxydes</i>		
Spinelles {	MgO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> FeO – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MA
Perovskite	CaO – TiO <sub>2</sub>	
<i>Classe des sulfures</i>		
Oldhamite	CaS MnS FeS	
Autres constituants possibles	Carbures – Nitrures - Thiosulfates alcalins,...	

#### 2.4.4 L'activité du laitier :

Le rapport entre la composition chimique, la structure et l'activité hydraulique du laitier ont été étudié par plusieurs chercheurs, les résultats ont montré que l'activité hydraulique du laitier dépend principalement de la structure qui dépend de la composition chimique du laitier est son traitement thermique [43]. Une grande attention a été donnée à la relation entre la composition chimique du laitier et la réactivité.

Plusieurs formules sont développées, tel que le rapport de basicité (module de basicité) donné par :

$$Mo1 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} \quad Mo2 = \frac{CaO}{SiO_2} \quad Mo3 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Le module de basicité du laitier présente le rapport entre la somme des oxydes basiques qu'il contient sur la somme des oxydes acides, la valeur idéale de l'indice, celle qui permettra d'obtenir le meilleur laitier s'établit (1,32 à 1,34). Lorsque  $Mo_3$  inférieur à 1,3 a une température de fusion plus élevée ce qui entraîne évidemment une dépense plus élevée de combustible [44].

Suivant le module de basicité les laitiers peuvent être classés en 3 catégories :

- laitier basique dont  $Mo > 1$ .
- laitier acide dont  $Mo < 1$ .
- laitier neutre dont  $Mo = 1$ .

Le module d'activité exprime le rapport entre la quantité d'alumine et celle de la silice dans le laitier.

$$Ma = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$$

Selon : Roque Joffre – seul l'indice :

$$\frac{CaO + MgO + 1/3Al_2O_3}{SiO_2 + 2/3Al_2O_3}$$

Serait valable pour tous les âges de résistances les formules les plus utilisées sont :

En Allemagne (la formule de Keil) [45].

$$F = \frac{CaO + CaS + 1/2(MgO) + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO}$$

Si  $F < 1,5$  : le laitier est médiocre.

Si  $1,5 < F < 1,9$  : le laitier est acceptable

Si  $F > 1,9$  : le laitier est excellent.

En France (la formule de C Langavant) [45].

$$i = 20 + CaO + Al_2O_3 + 1/2(MgO) - 2SiO_2$$

Si  $12 < i < 15$ , le laitier est médiocre.

Si  $15 < i < 20$ , le laitier est acceptable.

Si  $i > 20$ , le laitier est excellent



D'après [Gost 3476-74] L'hydraulicité des laitiers granulés du haut fourneau doit être estimée par le coefficient de qualité qui est défini comme étant le rapport entre les oxydes de calcium, d'aluminium et de magnésium et de bioxyde de silicium et de titane.

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + TiO_2} \quad : \quad \text{Cette formule est valable quand la teneur en MgO} < 10\%.$$

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO - 10)} \quad : \quad \text{Si MgO} > 10\%.$$

L'hydraulicité est élevée quand K est élevé [46].

#### 2.4.5 Facteur influent sur l'activité de laitier :

##### a) Influence de la vitesse de refroidissement sur l'activité du laitier

Le refroidissement long du laitier conduit à une baisse de l'activité de celui-ci vu la formation de la phase cristalline, tandis que le refroidissement rapide du laitier fondu donne une structure vitreuse métastable [47]. Seul le laitier suffisamment vitrifié est réactif.

##### b) Influence du temps de stockage sur l'activité du laitier

Si le laitier granulé est abandonné à l'air libre, et s'il subit l'effet des intempéries atmosphériques, il peut se conserver très longtemps sans altération d'où la possibilité de le stocker en tas sans précaution particulière [44], l'activité du laitier broyé, et le délai de prise du liant confectionné à sa base dépend généralement du temps de stockage.

Il a été établi que, après 1 à 2 mois de stockage du laitier finement broyé, il y a une augmentation de délai de prise du liant au laitier, son activité se baisse si la surface spécifique est plus grande [50]. Le stockage de 6 mois de laitier finement broyé n'entraîne pas de modification sur le liant à obtenir [48].

##### c) 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 cm<sup>2</sup>/g à 4800 cm<sup>2</sup>/g [46]. Il a été établi que le laitier trop broyé, ne se prête pas à un stockage de long 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 cm<sup>2</sup>/g à 3000cm<sup>2</sup>/g) qui est rentable du point de vue économique [49].

##### d) Influence de la vitesse de refroidissement sur l'activité du laitier

Le refroidissement long du laitier conduit à une baisse de l'activité de celui-ci vu la formation de la phase cristalline, tandis que le refroidissement rapide du laitier fondu donne une structure vitreuse métastable [47] seul le laitier suffisamment vitrifié est réactif.

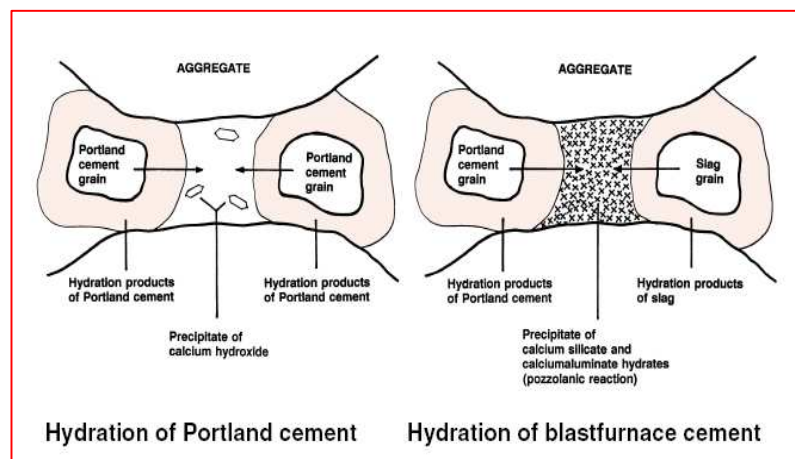
## 2.4.6 Hydratation et Microstructure

### 2.4.6.1 Mécanisme d'hydratation :

Le laitier de haut fourneau est un liant hydraulique, puisqu'il durcit en réagissant avec l'eau, cependant, son activité hydraulique, ou sa cinétique d'hydratation, est plus faible que celle du ciment portland.

Les laitiers de haut fourneau contiennent les mêmes oxydes majeurs que le ciment portland de type 10, c'est-à-dire le  $\text{SiO}_2$ , le  $\text{CaO}$ , le  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et le  $\text{MgO}$ , toutefois, les proportions des constituants sont différentes. Entre autres, la proportion de chaux est près de deux fois moindre dans les laitiers. En effet, alors que le rapport  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  est d'environ 3 pour le ciment portland, il est d'environ 1 pour le laitier de plus, les laitiers contiennent généralement plus de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de  $\text{MgO}$  que le ciment portland ordinaire

D'après HAKKINEN [51], quand les grains de laitier viennent en contact avec l'eau, une quantité de chaux passe en solution pendant que d'autres oxydes dégagés forment une couche<sup>1</sup> de faible perméabilité autour des grains, l'eau ne peut alors plus atteindre et dissoudre les grains de laitier ce phénomène ralentit considérablement la cinétique d'hydratation des laitiers pour contrer cette situation, on ajoute un activateur dont le rôle sera de dissoudre cette couche peu perméable.



**Figure 2.13** Représentation schématique de hydratation de ciment portland et hydratation de ciment avec laitier de haut fourneau (tiré de civil marine 2006 [79])

Le ciment portland, particulièrement grâce à sa teneur en chaux et en gypse, est un bon activateur, car la chaux hydratée et les ions sulfates provenant du gypse attaquent la couche qui recouvre les grains de laitier suite à quoi la structure vitreuse des grains est démantelée par les ions hydroxydes.

[1] couche gélifiante de faible basicité formée par la polymérisation des radicaux siliciques hydratés

L'hydratation des laitiers produit principalement des **C-S-H**, des aluminates et des silicoaluminates hydratés. Elle ne produit pas de portlandite. Il semble même qu'un processus réactif de type pouzzolanique' consomme une partie de la portlandite provenant de l'hydratation du ciment portland. Aussi, dans une pâte de ciment contenant du laitier, le rapport **Ca/Si** des **C-S-H** diminue et peut atteindre **1,2 à 1,5** [52].

#### 2.4.6.2 La microstructure de la pâte de ciment de laitier :

La structure des hydrates dans la pâte de ciment de laitier est similaire à celle qui caractérise la pâte de ciment ordinaire. Toutefois, on a remarqué que la composition de la pâte était légèrement modifiée par l'ajout de laitier. De fait, dans un béton avec laitier, les **C-S-H** sont les principaux hydrates formés. Ils se distinguent non seulement par leur faible rapport **Ca/Si**, mais aussi par leur plus grande teneur en alcalis [53]. D'après ces mêmes auteurs, les **C-S-H** riches en **Si**, qu'on retrouve dans les pâtes de ciment avec laitier, devraient être plus résistants que les **C-S-H** des pâtes de ciment ordinaires.

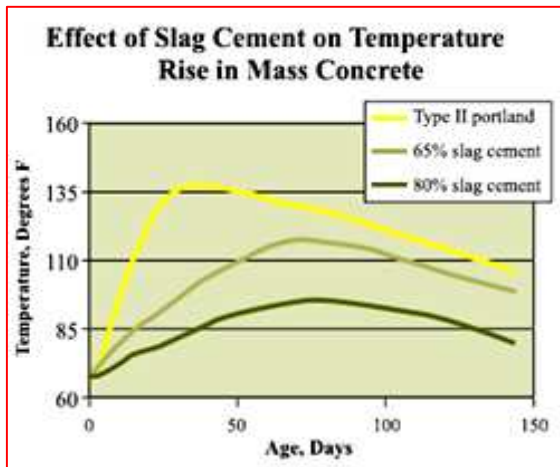
D'un point de vue microstructural, la seule différence significative qui caractérise le béton de laitier résulte de son faible contenu en portlandite, particulièrement après quelques mois, alors que la réaction pouzzolanique a fait son œuvre. D'après HAKKINEN [51], ceci entraîne une diminution significative de l'interface pâte-granulat, souvent occupée par des cristaux de portlandite orientés perpendiculairement à la surface des granulats. En fait, après quelques semaines, on y remarque presque plus de cristaux de portlandite. Ceux-ci sont remplacés par des **C-S-H** dont l'adhérence avec le granulat et la stabilité est meilleure.

#### 2.4.6.3 Chaleur de l'hydratation :

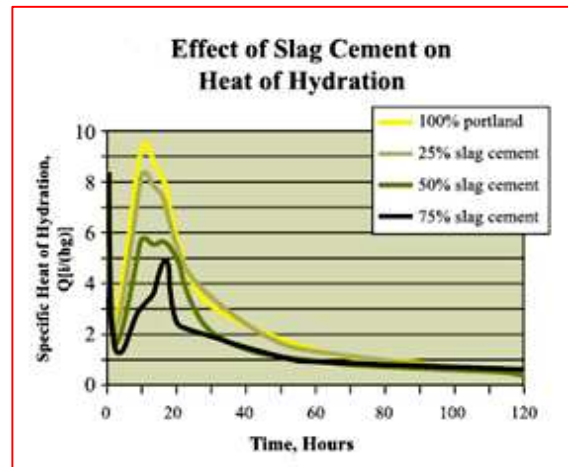
L'hydratation plus progressive du ciment de laitier évolue moins de chaleur que celle produite par le ciment portland, la figure 2.15 montre la chaleur spécifique d'hydratation de ciment portland ordinaire pour 25 à 75% de substitution du ciment par du laitier. [54]

Notent que chaque niveau croissant de substitution du ciment par du laitier réduit la chaleur maximale de l'hydratation.

D'une façon générale 65 à 80 % sont considérés une gamme optimum de substitution pour des applications de béton non armé, ces niveaux typiquement fournissent la réduction significative de la chaleur tout en réalisant des résistances souhaitées, les conséquences de la réduction de la température peut réduire au minimum le risque de fissuration d'origine thermique de contraction au jeune âge.



**Figure 2.14** Effet de ciment au laitier sur l'élévation de température du béton de masse (tiré de [54])



**Figure 2.15** Effet de ciment au laitier sur la chaleur d'hydratation (tiré de [54])

La figure 2.14 montre l'effet du ciment au laitier sur l'élévation de la température du béton non-armé, on note que la température maximale a chuté près 19 degrés Fahrenheit ( $5,92\text{ C}^\circ$ ) avec 65% de substitution du ciment par du laitier, et par 42 degrés de Fahrenheit ( $13,16\text{ C}^\circ$ ) pour la substitution 80% du ciment par du laitier.

#### 2.4.6.4 La structure poreuse de la pâte de ciment de laitier :

Plusieurs études ont été menées a fin de caractériser les effets de l'ajout de laitier sur la structure poreuse des matrices cimentaires bien qu'on y relève généralement des modifications quant à la distribution et au volume des pores, les résultats sont parfois contradictoires ceci peut être dû aux différentes conditions d'essai, comme le pourcentage de laitier utilisé, la durée de la cure et le traitement préalablement subi par les éprouvettes.

La plupart des résultats ont été obtenus par porosimètre au mercure sur des éprouvettes qui ont été mûries dans l'eau ou dans l'eau saturée de chaux et dont le liant était composé d'au moins 50 % de laitier or, de plus en plus de chercheurs prétendent, comme l'exprime FELDMAN [55], que l'intrusion du mercure sous pression lors de l'essai de porosimètre au mercure cause des dommages qui modifient les résultats de l'essai, particulièrement en ce qui concerne la distribution des pores. Il faut donc considérer les données suivantes avec prudence.

Pour un béton mûri durant moins de 28 jours, une majorité de chercheurs s'accordent pour dire que le diamètre moyen des pores augmente avec la teneur en laitier [52]. Toutefois, certaines études, comme celles de ROY et Coll. [56] et MALEK ET COLL. [57], semblent montrer qu'après seulement 7 jours ou 14 jours de cure.

On peut obtenir un raffinement de la porosité dû à la présence de laitier il est difficile d'expliquer la divergence de ces résultats, mais elle peut être causée par des variations dans la méthodologie, la composition des mélanges ou les conditions de mûrissement à long terme, cependant, soit après plus de 28 jours de cure, les études, revues par HAKKINEN [51], indiquent que le diamètre moyen des pores sembler diminuer en présence de laitier on croit que les gros pores sont donc spécialement raffiné cette tendance semble faire l'unanimité de même, la majorité des résultats paraissent confirmer que la présence de laitier fait croître la porosité totale, toutefois, certains résultats indiquent que cet effet peut être inversé après une cure de quelques mois on observe alors, dans certains cas, une diminution de la porosité totale.

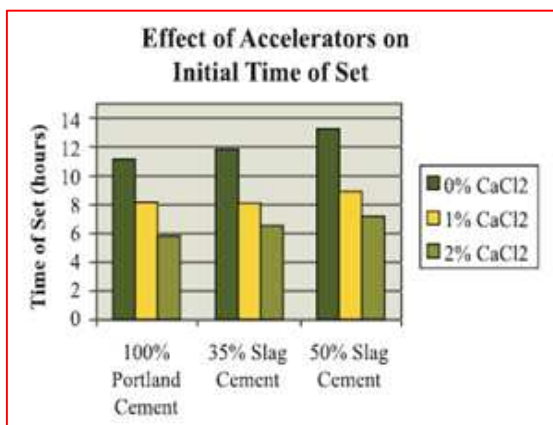
En définitive, si on compare un béton au laitier avec un béton de ciment portland, les pores y sont en moyenne plus gros initialement, mais plus petits à long terme. Aussi, ils sont probablement plus nombreux.

## 2.4.7 Propriétés de béton au ciment au laitier

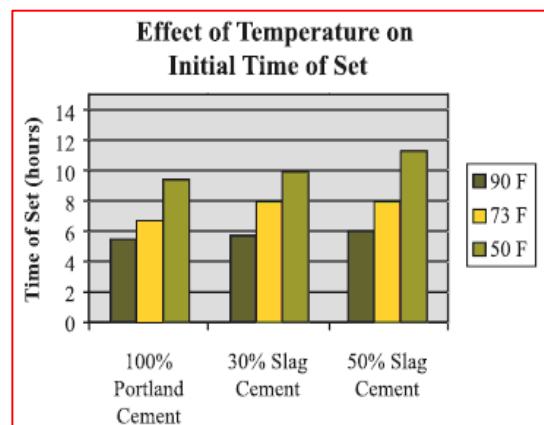
### 2.4.7.1 Influence de l'ajout de laitier sur les propriétés de béton frais :

**2.4.7.1.1 Temps de prise :** pour des températures moins de (26 C°), le temps de prise du béton contenant du laitier peut être plus long que celui du béton de ciment portland, en particulier par temps froid, la prise plus lente dépendra de la réactivité du laitier et de son pourcentage dans le mélange [54].

Plus les températures ambiantes sont basses, plus le temps de prise est plus lent figure 2.17. Le pourcentage de laitier utilisé peut également affecter le temps de début de prise, cependant, les taux de remplacement de moins de 30% généralement n'affecteront pas le temps de prise de manière significative [54].



**Figure 2.16** L'effet d'accélérateur de prise sur le temps de début de prise de ciment avec ajout de laitier [54]



**Figure 2.17** L'effet de température sur le temps de début de prise de ciment avec ajout de laitier [54]

### 2.4.7.1.2 Affaissement et ouvrabilité :

La présence de laitier améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton, la meilleure dispersion des grains de ciment explique ce phénomène et l'ampleur de cette amélioration va de pair avec la proportion de laitier utilisée. Le laitier à finesse élevée n'améliore pas l'ouvrabilité du béton [58].

### 2.4.7.1.3 Ressuage :

L'utilisation de laitier n'a pas d'incidence significative sur le ressuage du béton [59]

## 2.4.7.2 Influence de l'ajout de laitier sur les propriétés du béton durci :

### 2.4.7.2.1 Résistance a la compression :

En général, la résistance du béton contenant du laitier se développe plus lentement, est plus faible initialement et égale ou supérieure à long terme à celle du béton de ciment Portland et de résistance à la compression à 28 jours semblable [59]

Pour des taux de substitution plus élevé de ciment par de laitier fait diminué la résistance en compression pour tous les âges figure 2.18. Ceci semble être dû au teneur non - optimum de gypse en particulier pour dosage de remplacement au-dessus de 50% [60].

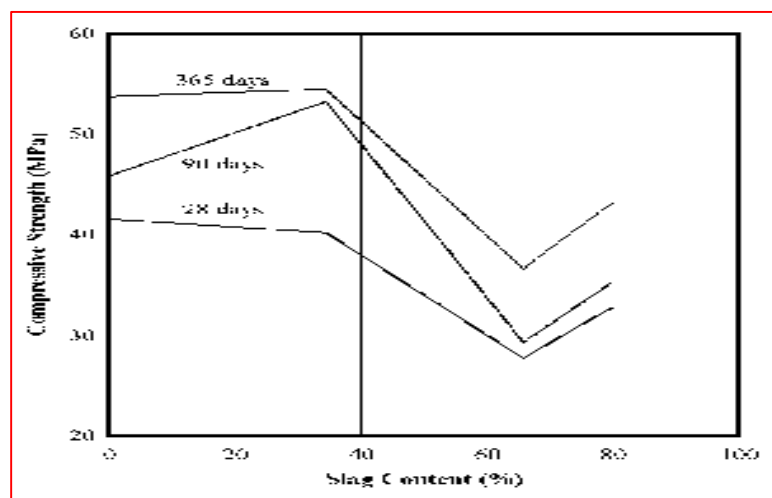


Figure 2.18 Influence de dosage du laitier sur la résistance à la compression [92]

### 2.4.7.2.2 Retrait de séchage :

Il est bien documenté en littérature [61] que le fluage et le retrait de séchage sont liés au teneur du ciment en (gypse), et à la composition chimique et à la finesse de ciment L'effet de dosage de laitier sur le retrait de séchage est montré sur la figure 2.19 pour un béton de 40 MPa et pour dosage en laitier varie entre 0% et 80% par rapport à la masse de liant, le retrait de séchage :

1. augmente par 11% à 14 jours;
2. augmente par 10% à 56 jours;
3. diminué par 7% à 365 jours

L'augmentation de taux de substitution du ciment par laitier conduit à une diminution de la teneur du ciment en gypse et par conséquent une augmentation plus élevée du changement de volume.

Le dosage optimum en gypse est lié aux changements de volume inférieur du béton contenu le ciment seul, la figure 2.20 montre l'effet de dosage en gypse sur le retrait de séchage pour un liant contenant 35% laitier [60].

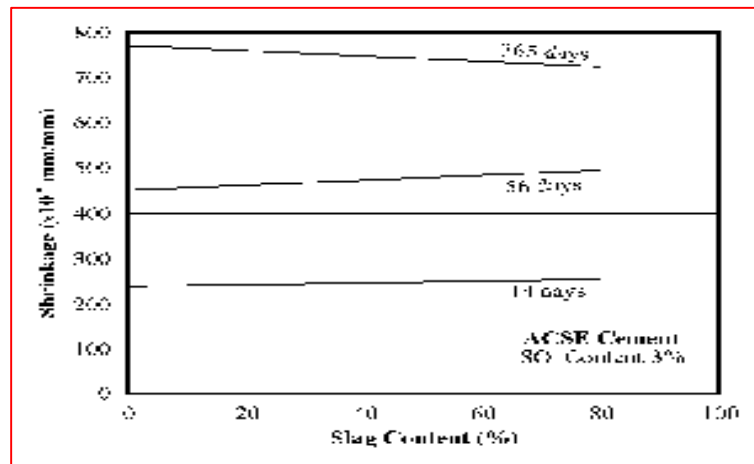


Figure 2.19 Influence de dosage de laitier sur le retrait de séchage. [92]

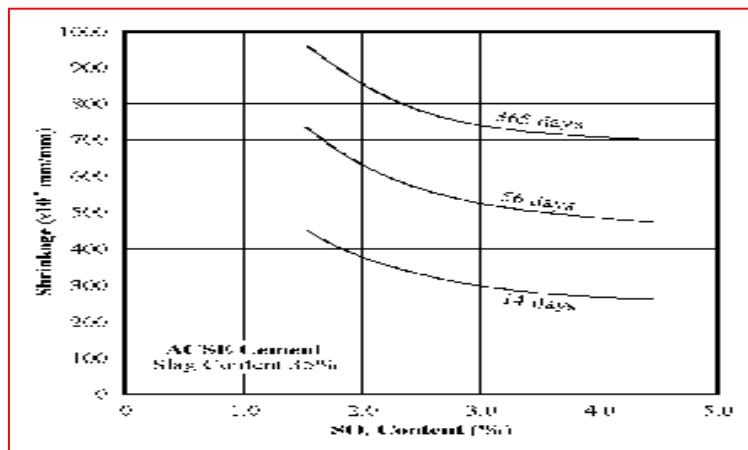


Figure 2.20 Influence de dosage de gypse sur le retrait de séchage. [92]

#### 2.4.7.23 Fluage :

L'influence de dosage en gypse sur le fluage est montrée sur la figure 2.21. Il peut voir qu'à mesure que le dosage en gypse augmente, le fluage diminue. Cependant, il ne semble pas il y a un dosage optimum en gypse pour le fluage comme à été suggéré par Alexander et autres [61]



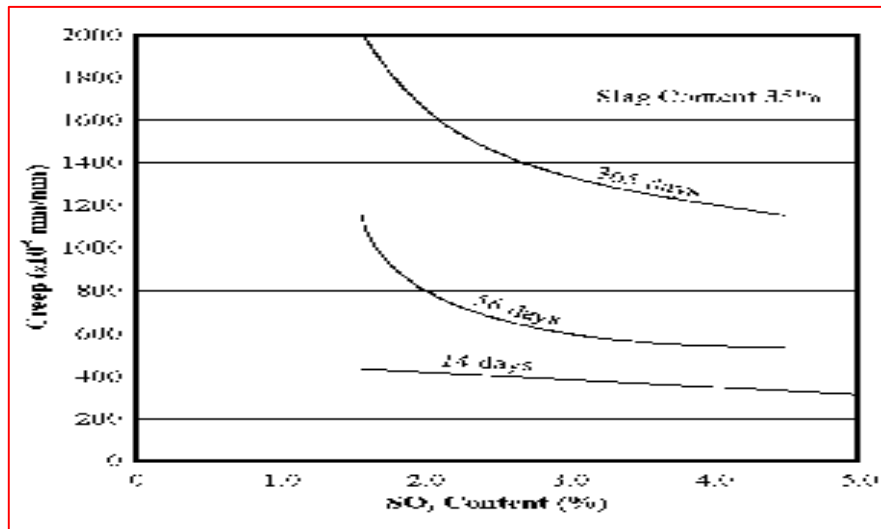


Figure 2.21 influence de dosage de gypse sur le fluage [92]

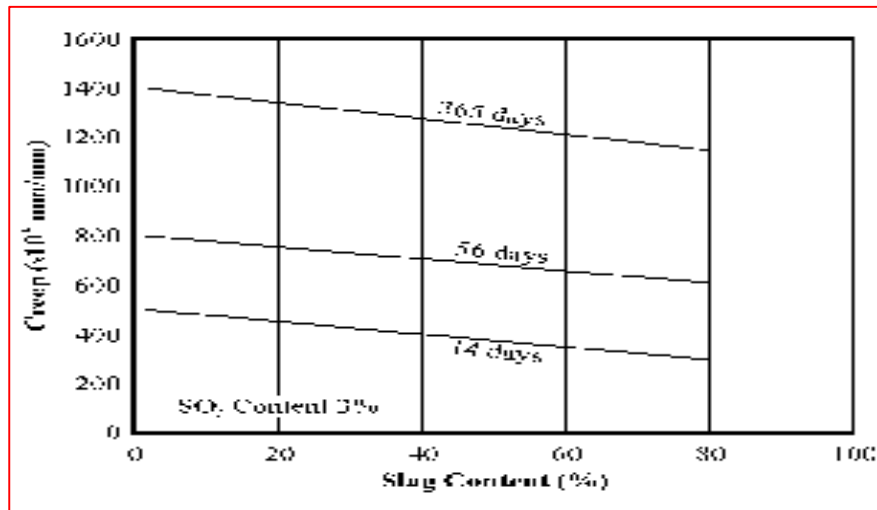


Figure 2.22 Influence de l'ajout de laitier sur fluage [92]

L'augmentation de la teneur de substitution de ciment par de laitier conduit à une diminution du fluage, l'influence de la teneur en laitier dans un béton de résistance 40 MPa est montré sur la figure 2.22.

## 2.4.8 Caractéristiques liées à la durabilité :

### 2.4.8.1 Résistance à la corrosion :

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère, Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ( $4.CaO. Fe_2O_3 . 13H_2O$ ) mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer  $[Fe (OH)_2]$  et de calcium  $[Ca(OH)_2]$ , Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13.



Il est à noter qu'au contact de la rouille initiale, l'hydratation du ciment est perturbée : il se forme localement une zone de transition, au-delà de laquelle le béton a des caractéristiques plus homogènes. La destruction de la couche passive et l'attaque du métal s'effectuent par la création de piles électrochimiques sur l'armature conduite progressivement à la dissolution du métal pour former la rouille, les facteurs qui influencent sur la corrosion des armatures sont :

- La propagation de la corrosion s'amorce pour une concentration en ions chlore de l'ordre de 0,5% en poids par rapport au ciment la vitesse de corrosion est alors sensiblement proportionnelle à la quantité de sels ajoutée jusqu'à 2 % en chlorure.
- La corrosion se propage pour un pH de l'ordre de 11,4 dans du béton carbonaté et s'accroît lorsque le pH diminue. En présence de chlorures, elle a lieu même en milieu très basique autour d'un pH de 12.
- Dans un environnement très sec, La vitesse de corrosion est aussi réduite à cause de la résistance électrolytique élevée du béton. Il est donc normal que la vitesse de corrosion dépende de l'humidité relative [62].
- l'influence de la composition du béton : La compacité du béton est aussi un critère à considérer dans la vitesse de corrosion, L'influence bénéfique de l'ajout de cendres volantes, de laitiers, de fumée de silice pour une même classe de résistance, diminue sensiblement la vitesse de corrosion par rapport à un ciment portland, les meilleurs résultats sont obtenus pour des ajouts de 70% de laitier, 30% de cendres volantes et 20% de fumée de silice, Les faibles coefficients de diffusion et de la résistivité élevée des bétons avec additions minérales expliquent la diminution de la vitesse de corrosion [73,74].

L'introduction d'addition minérale limite la propagation de la corrosion, les réactions pouzzolaniques entraînent la consommation d'hydroxyde de calcium. Des analyses prouvent que la valeur pH de la solution interstitielle n'est pas beaucoup plus basse que dans les bétons comparables sans ajouts, et qu'il y'a suffisamment d'hydroxyde de calcium pour la protection contre la corrosion parce que l'hydroxyde de calcium se trouvant dans l'eau interstitielle d'un béton est un facteur essentiel pour protéger l'armature contre la corrosion [63].

L'avantage du béton au laitier de ne pas corroder les armatures réside dans l'alcalinité suffisante offerte par le laitier pour protéger l'acier.

Les cendres volantes et le laitier de haut fourneau consomment tout ou partie de la portlandite fournie par le clinker lors de l'hydratation, on peut donc s'attendre à une légère diminution du pH de la solution interstitielle en sachant toutefois que ce sont les alcalis qui deviennent prépondérants au bout de quelques heures.

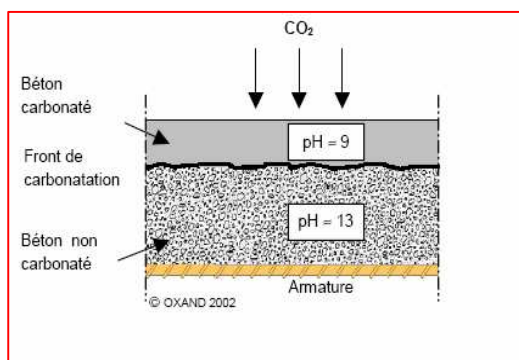
Le pH de la phase liquide est déterminé par le taux initial d'alcalis présents dans les cendres volantes utilisées qui peut atteindre 3 à 4 % suivant leur origine. Pour un pourcentage moyen de cendres, le pH n'est que légèrement affecté ne perdant que quelques dixièmes de point par rapport à un ciment portland [65].

Le laitier de haut fourneau consomme davantage les alcalins, mais le pH est encore suffisant pour assurer la stabilité de la couche passive [69].

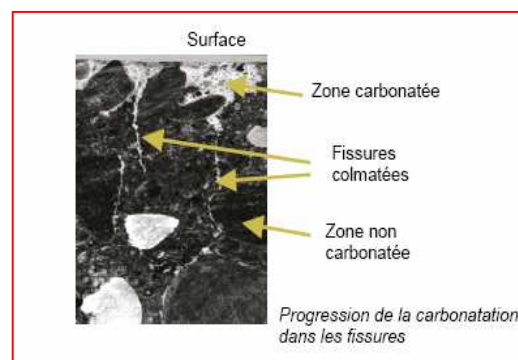
L'incorporation de laitier au béton accroît sa résistance à la pénétration des ions chlorure, à long terme plus particulièrement, et elle favorise la fixation des chlorures, il s'agit là d'importants avantages en ce qui concerne la protection contre la corrosion de l'armature en acier, pour que ces avantages se fassent sentir, toutefois, le béton contenant du laitier doit avoir fait l'objet d'une cure adéquate, tout comme le béton contenant des cendres volantes.

#### 2.4.8.2 Carbonatation :

L'air contient de dioxyde de carbone à un taux moyen de 0,03 % en volume ; cette teneur en dioxyde est plus importante dans les agglomérations urbaines qu'en milieu rural. La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air réduit le pH de la solution interstitielle des pores (d'environ 13 à 9) une destruction de la couche de passivation et l'initiation d'une corrosion généralisée des armatures.

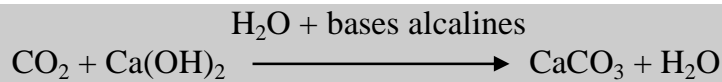


**Figure 2.23** Mécanisme de la carbonatation (tiré de Oxand 2002[80] )



**Figure 2.24** Progression de la carbonatation dans les fissures (tiré de Oxand 2002 [80])

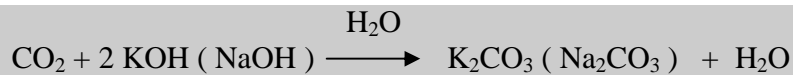
La carbonatation modifie la structure poreuse et les propriétés du béton, les carbonates de calcium sont insolubles et précipitent, colmatant partiellement la porosité ce qui diminue la vitesse de progression du front de carbonatation (auto-protection). Les résistances mécaniques et le module d'élasticité augmentent, et la perméabilité aux gaz et aux liquides diminue.



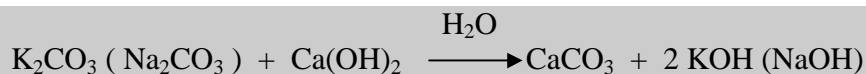
La cinétique du processus dépend de la facilité avec laquelle le dioxyde de carbone pénètre à l'intérieure des pores des bétons. Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit sur les différents hydrates et principalement sur la portlandite pour donner du carbonate de calcium comme produit final.

*En ce qui concerne la durabilité de l'ouvrage, le seul inconvénient de la carbonatation est la chute du PH au dessous du seuil de passivation.*

Le mécanisme rationnel est cependant relativement complexe. La carbonatation s'effectue à partir du dioxyde de carbone dissout dans l'eau qui réagit avec la chaux passée en solution, or la solubilité d'une solution saturée de chaux à 25°C et de l'ordre de 1,2 g/l et elle diminue lorsque le milieu s'enrichit en bases alcalines, mais les bases elles même se carbonatent rapidement au contact du dioxyde de carbone dissous :



La carbonatation des bases augmente alors la solubilité de la chaux qui peut réagir en quantité suffisante :



C'est la portlandite qui se carbonate le plus rapidement, mais les autres composés hydrates, aluminates et silicates de calcium, sont aussi sensibles à l'attaque par le dioxyde de carbone et donnent également du carbonate de calcium. On constate que la capacité de fixation de dioxyde de carbone dépend directement de la quantité d'alcalin présente dans le ciment [68].

Dans le processus de diffusion du dioxyde de carbone, l'humidité relative joue un rôle primordial. En effet, le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air est dix mille fois plus élevé que dans l'eau [64], la vitesse de carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est :

- Assez faible pour permettre la diffusion du  $\text{CO}_2$
- Assez importante pour permettre la réaction de Carbonatation

L'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps :  $A \propto \sqrt{t}$  [78]

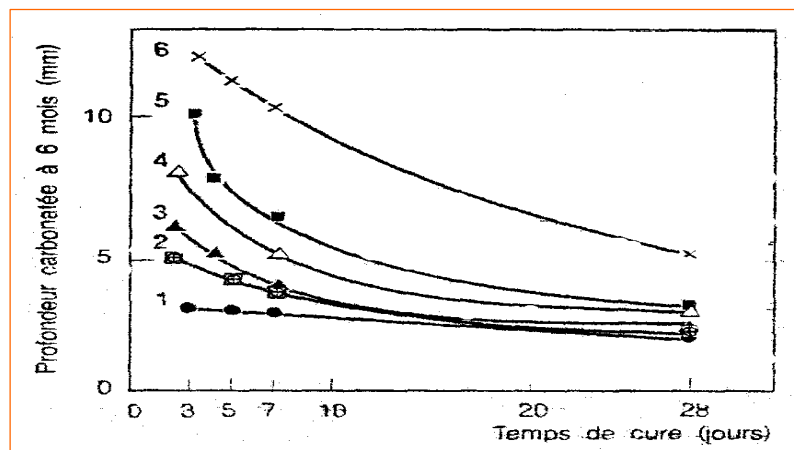
La profondeur de carbonatation s'accroît lorsque le dosage en ciment diminue ou lorsque le rapport E/C augmente [76,77], la carbonatation est également reliée à la porosité de la couche superficielle de béton. La structure de cette peau dépend directement des conditions de conservation.

Beaucoup d'auteurs signalent que les ajouts de laitiers et de cendres volantes dans le béton accroissent de façon significative la carbonatation par rapport à un béton de ciment portland [70].

Pour du béton incorporant du laitier, la carbonatation s'accroît avec le pourcentage de laitier ajouté ; en moyenne, elle est une fois et demie plus élevée pour un béton comportant 50% de laitier par rapport à un béton de ciment portland.

Pour les cendres volantes, l'accroissement de la carbonatation n'est sensible que si le pourcentage de cendres dépasse 30%.

L'importance de la durée de la cure sur le degré de carbonatation pour les bétons contenant du laitier ou des cendres volantes apparaît clairement sur la figure 2.25 [66].



**Figure 2.25.** Influence des additions minérales et du temps de cure sur la carbonatation des bétons, d'après [75].

Les pâtes de ciment sont soumises à une cure humide avant d'être carbonatées pendant 6 mois dans une atmosphère à 0,03 % de dioxyde de carbone, en volume. Les courbes correspondent respectivement à un ciment portland (1), un ciment portland avec 10 ou 20 % de cendres volantes (2), un ciment portland à 50% de laitier (3), à 30% de cendres volantes (4), à 75% de laitier (5) et à 50% de cendres

volantes (6), les pâtes ont évidemment des résistances mécaniques différentes. L'effet d'une cure humide prolongée est particulièrement bénéfique lorsque les ciments contiennent un pourcentage élevé de laitier ( $\geq 50\%$ ) et de cendres volantes ( $\geq 30\%$ ).

### 2.4.8.3 Résistance à l'Attaque de sulfate :

L'attaque de sulfate est une forme de détérioration de béton, il se produit quand le béton entre en contact avec l'eau contenant les sulfates ( $SO_4$ ), les sulfates peuvent être trouvés dans quelques sols (particulièrement quand les conditions arides existent), dans l'eau de mer, et aux usines de traitement des eaux résiduaires dans les eaux souterraines, les concentrations plus élevées en sulfates sont généralement dues à la présence de sulfates de magnésium ( $MgSO_4$ ) ou de sulfates alcalins ( $K_2SO_4-Na_2SO_4$ ).

#### a) Mécanismes de base :

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physicochimiques :

##### 1- Expansion

##### 2- Perte des propriétés liantes des C-S-H

Les sulfates portés par les eaux réagissent avec les produits d'hydrations de ciment portland l'aluminate tricalcique  $C_3A$  et avec de l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ) pour former un produit cristallin expansible appelé l'ettringite (l'ettringite primaire n'est pas expansive), l'expansion due à la formation d'ettringite fait développer des efforts de tension dans le béton, Quand ces efforts deviennent plus grands que la capacité de tension du béton, le béton commence à fissurer [54].

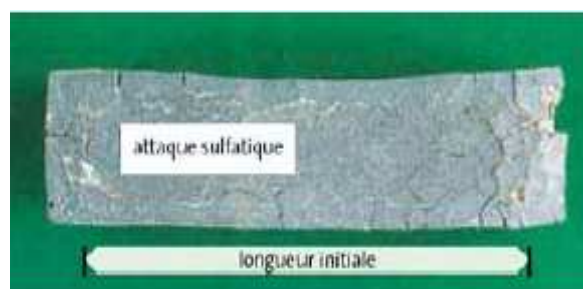


Figure 2.26 Exemple de l'attaque sulfatique

Ces fissures permettent la pénétration facile pour plus de sulfates dans le béton et la détérioration accélère ; les sulfates causent également la désintégration (dissolution) chimique de certains produits d'hydrations de ciment l'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse de béton en surface.

Les deux types d'interaction chimique :

**1) Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates), dans le cas du sulfate de sodium :**



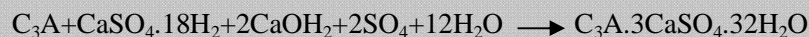
- NaOH: alcalinité élevée implique stabilisation des C-S-H
- CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O Produit expansif mais qui se forme uniquement dans l'espace interne de la pâte de ciment hydrate, dans la majorité des cas pas ou peu d'expansion.

**2) Formation d'ettringite secondaire**

a) à partir du C<sub>3</sub>A anhydre résiduel :



b) à partir des aluminates hydrates (Monosulfoaluminates) :



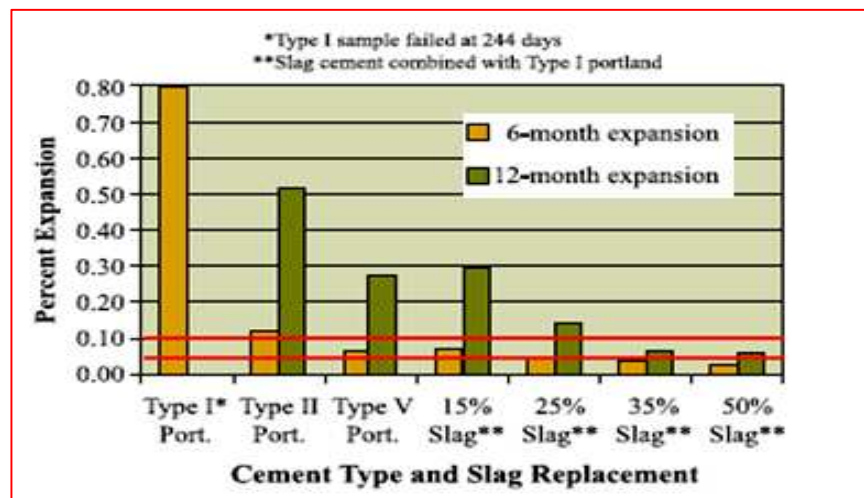
Les principaux facteurs qui affectent le taux et la sévérité de l'attaque de sulfate sont [54] :

- Perméabilité du béton.
- Concentration des sulfates dans la solution portée par les eaux.
- Contenu de C<sub>3</sub>A
- Contenu Ca (OH)<sub>2</sub>.

Une des manières les plus connues de la protection contre l'attaque de sulfate est de réduire le contenu d'aluminat en limitant le C<sub>3</sub>A dans le ciment portland.

Historiquement, le ciment portland Type II (avec C<sub>3</sub>A entre 5 % et 8 %) et ciment portland du type V (avec C<sub>3</sub>A moins de 5 %) ont été privilégiés pour les environnements modérés et fortement sulfatés respectivement, l'utilisation du ciment de laitier est également une manière très efficace pour réduire le potentiel de l'attaque du sulfate [54] L'utilisation du ciment de laitier réduit la possibilité de l'attaque de sulfate de trois manières:

1. Le ciment de laitier ne contient pas  $C_3A$ , ainsi son addition en béton réduit la teneur total de  $C_3A$  dans le béton.
2. Le ciment avec ajout de laitier réduit la perméabilité de béton, rendant la pénétration de sulfates plus difficile dans le béton.
3. Le ciment de laitier réagit avec l'excès de  $Ca(OH)_2$  pour formé de silicate calcium hydrate, ceci diminue la quantité totale de  $Ca(OH)_2$  dans le ciment.



**Figure 2.27** effet d'utilisation de ciment de laitier sur la résistance aux sulfates [54]

Utilisé avec des proportions appropriées, le ciment de laitier peut donner à un ciment portland type I les propriétés de résistance au sulfate d'un ciment de type II (remplacement de ciment portland par de laitier de 25 à 50 % habituellement), et peuvent donner un type I ou un ciment du type II les propriétés de résistance au sulfate d'un ciment portland du type V (pour le remplacement de ciment portland par de laitier habituellement 50 à 65 %) [54].

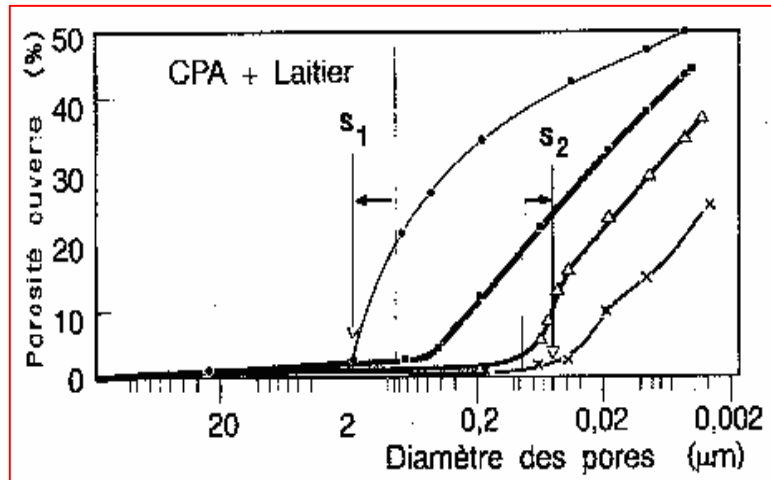
La résistance au sulfate des ciments portland du type I, II et V comparés aux combinaisons d'un ciment portland et de laitier, examinées dans les normes ASTM C1012, est montrée sur la figure 2.27

#### 2.4.8.4 Influence du laitier sur la perméabilité du béton :

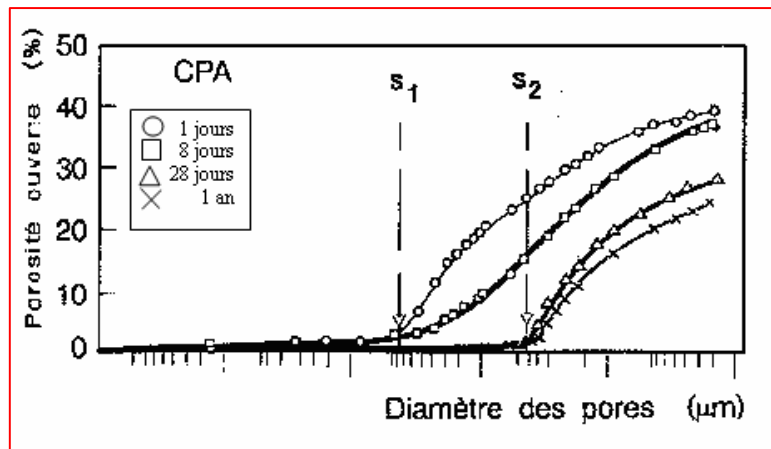
La pénétration des substances agressives au sein du béton dépend de sa perméabilité, par conséquent, par approximation, sur sa porosité, des résultats d'études effectuées sur les pâtes permettent de mettre en évidence les propriétés de ces additions :



- Par substitution partielle du ciment par du laitier de haut fourneau (au moins 50% du poids du ciment) et pour un même rapport eau/liant, 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.



**Figure 2.28** Influence de l'addition de laitier sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d'après [67]



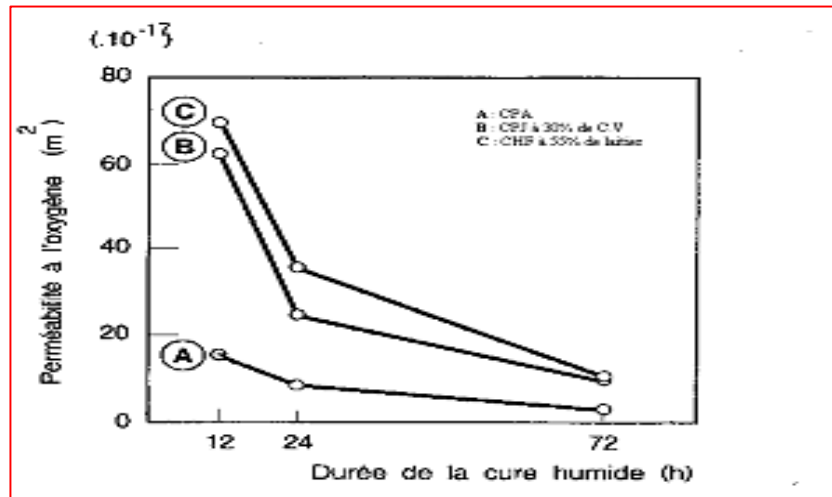
**Figure 2.29** Influence ciment portland sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d'après [67]

Les courbes porosimétriques de la figure 2.28 suivante montre que le laitier entraînent un accroissement de la porosité et de la taille des pores aux premiers âges 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 minérales et de la durée de cure [67].



#### 2.4.8.5 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 2.30 son allongement à des effets bénéfiques marqués avec les ciments composés. Ce résultat s'explique par la plus faible hydraulité de laitier, comparée à celle du clinker, et par la relative lenteur de la réaction pouzzolanique des cendres volantes [69].



**Figure 2.30** Influence de la durée de cure humide sur la perméabilité de bétons réalisés avec diverses catégories de ciments, d'après [72].

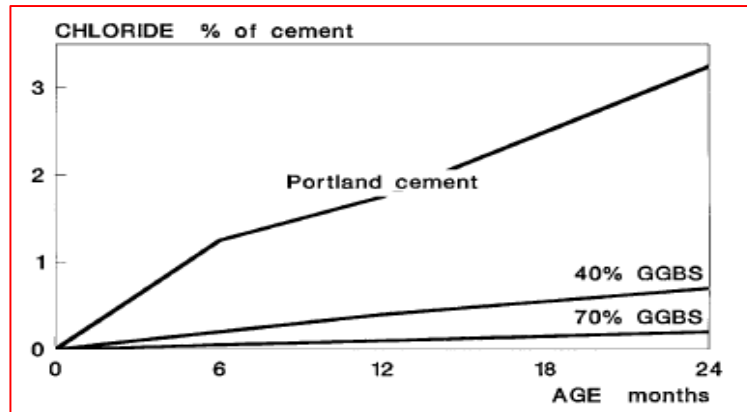
La faible perméabilité des pâtes de ciment pouzzolanique peut être expliquée sur la base du schéma donné dans la figure 2.30 [71], durant les premiers jours (7 à 15 jours) seulement les fractions de clinker + gypse qui sont mises en jeu pendant l'hydratation et le durcissement. La pouzzolane s'hydrate plus tard, et seulement après que le Ca (OH)<sub>2</sub> 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 laquelle se précipite dans les pores est petite et par conséquent 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 deviennent plus faible

#### 2.4.8.6 Pénétration des chlorures :

L'acier en béton est protégé par l'alcalinité de la pâte de ciment durcie, la pénétration des chlorures réduit cette protection essentielle et, en présence de l'oxygène et de l'humidité, la corrosion se produira. [79]



**Figure 2.31** Pénétration de chlorure Smolezyk (tiré de civil marine 2006 [79])

Plusieurs études ont été menées à fin de caractériser le effet de l'ajout de laitier sur pénétration chlorure en preuve que le ciment de laitier ont une résistance plus élevée à la diffusivité des ions de chlorure que le ciment portland [8, 16, 17, 18].

Il y a une suggestion que ce n'est pas dû simplement de la réduction de l'imperméabilité mais peut être dû à une certaine forme de résistance chimique ou d'interaction avec les ions entrants de chlorure sur la surface de la pâte d'hydratée cette augmentation de résistance à la pénétration de chlorure s'améliore à mesure que le pourcentage de laitier augmente.

## 2.5 SYNERGIE DES AJOUTS CIMENTAIRES DANS LES BETONS

### Introduction :

Afin d'étudier l'influence de l'ajout de laitier combiné avec différents ajouts connus (cendre volante ; fumée de silice) sur les propriétés de béton, nous exposons dans cette partie d'étude les résultats d'une étude réalisée par [S. LALDJI, A. PHITHAKSOUNTHONE - A.TAGNIT-HAMOU] qui a fait l'objet d'une publication scientifique « synergie des ajouts cimentaires dans les bétons » [82].

### 2.5.1 Résumé :

La combinaison avec le ciment Portland de plusieurs ajouts cimentaires (2 ou 3) permet de développer de nouveaux types de liants hydrauliques (ciments ternaires ou quaternaires) ayant des propriétés mécaniques et une durabilité de loin supérieure au ciment Portland seul, les bétons produits avec ces ciments présentent par exemple une nette diminution de la chaleur d'hydratation qui est largement exploitée dans les constructions en béton de masse; où les risques de fissuration attribuables à une variation thermique peuvent constituer un grave problème. Aussi, et de façon générale, à dosage en eau constant, on a noté une amélioration de la maniabilité, une réduction de la perméabilité en plus de meilleurs gains en résistance à long terme.

### 1) Composition de liant étudiée :

La composition de différents types de liant étudié est montrée par tableau 2.6

**Tableau 2.6** Composition de différent type de liants étudiés

Type de liant	Composition (%)				
	Clinker+gypse	Laitier	Cendre .V	Fumée. S	filler
Ciment type 10	95	-	-	-	5
Binaire laitier	75	25	-	-	-
Ternaire laitier	70	25		5	-
Ternaire CV	70	-	25	-	5
Quaternaire *	55	> 10	> 30	-	< 5

\* les proportions, pour des raisons confidentialité, sont données approximativement

## 2) Chaleur d'hydratation :

La réaction d'hydratation d'un ciment portland avec ou sans ajout s'accompagne toujours d'un dégagement de chaleur. Les variations du flux thermique résultantes peuvent être critiques à la durabilité des bétons. Nous remarquons d'après la Figure 2.32 que les liants ayant un taux de remplacement important du ciment portland par des ajouts cimentaires diminuent de façon significative la température interne des bétons; c'est le cas notamment du liant quaternaire.

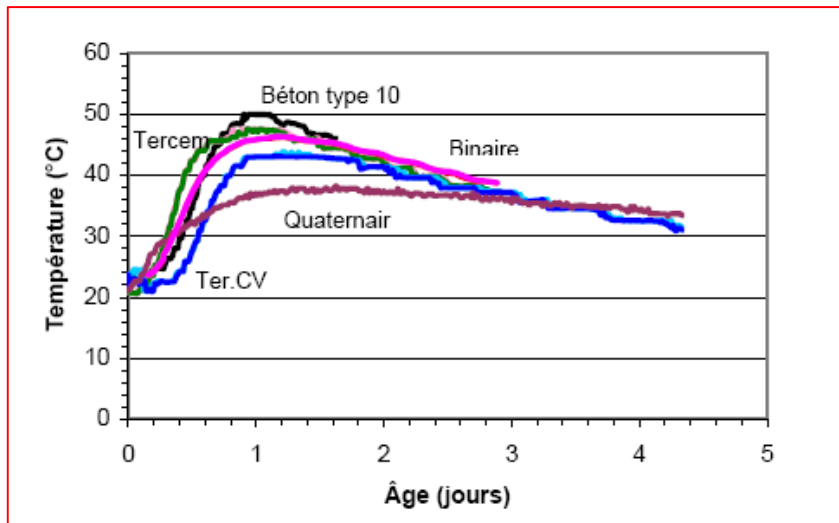


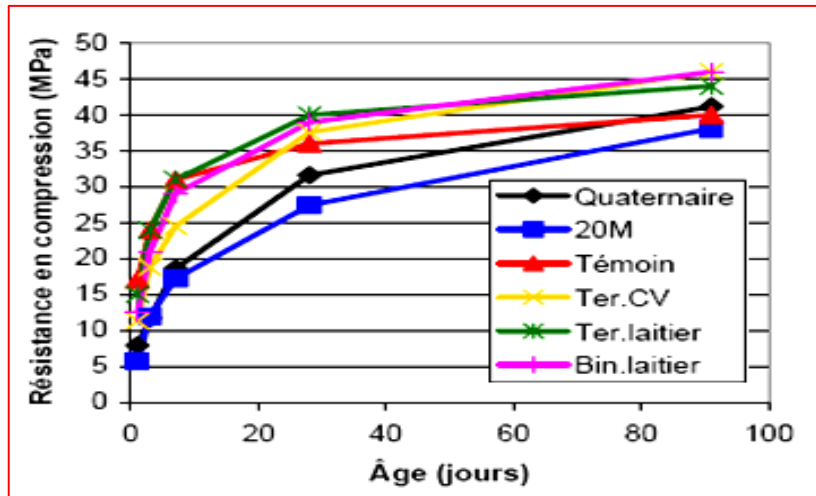
Figure 2.32 Variation des températures dans les bétons

## 3) Résistance en compression :

Les résistances en compression mesurées sur des cylindres de 100 × 200 mm ayant subi un mûrissement dans une chambre humide à 23°C sont présentées dans le Tableau 2.7 et la Figure 2.33.

	Résistance en compression (MPa)				
	1j	3j	7j	28j	91j
Quaternaire	7,9	11,7	18,6	31,6	41,2
Ter.CV	11,3	18,8	24,5	37,6	46
Ter. Laitier	15	24	31	40	44
20M	5,7	11,9	17,2	27,4	38,1
Type 10	16	24	27	34	37
Bin.laitier	12,5	21	29	39	46

Tableau 2.7 Résistance en compression des bétons a différents âges



**Figure 2.33** Variation des résistances en compression avec l'âge des bétons

- A jeune âge, le béton fait à base de ciment à usage courant (Type 10) développe des résistances en compression plus élevées que le reste des bétons faits avec des ciments composés et du ciment 20M qui, lui, a tendance à montrer le même comportement que les ciments composés.
- Aussi, l'interaction des ajouts dans différents systèmes binaires ou ternaires est clairement mise en évidence dans les bétons au laitier, à 1 jour, le béton ternaire composé du laitier, de fumée de silice et du ciment Portland développe une résistance en compression moyenne de 3,5 MPa supérieure à celle d'un béton binaire contenant du laitier et du ciment Portland et de 1 MPa inférieure à celle du béton de référence avec 100% de ciment Portland Type 10.
- La présence de fumée de silice dans le béton ternaire est en grande partie responsable de cet accroissement des résistances initiales. Grâce à la finesse de ses particules et à sa réactivité, la fumée de silice incorporée dans un mélange de pâte cimentaire contribue énormément à la construction d'une microstructure plus dense et moins poreuse.
- Le comportement mécanique observé dans le système quaternaire est différent. La synergie entre les différents ajouts a tendance à se manifester tardivement. En effet, à 28 jours et au-delà, les résistances du béton avec le ciment Type 10 ainsi que celle du béton ternaire avec le laitier se trouvent plafonnées alors que celles des bétons avec le 20M et avec les autres ciments composés continuent à performer.

Les gains, exprimés par la différence de la résistance en compression à une période donnée avec celle développée à un jour (donnés dans le Tableau 2.8), montrent que les bétons faits à partir de liant quaternaire, malgré des faibles performances à jeune âge, ont tendance à se rattraper dans le temps et à rejoindre le

ternaire avec cendre volante à 91 jours et même à dépasser le binaire et le ternaire avec laitier. La réaction d'hydratation qui se manifeste entre un ciment Portland et un ajout cimentaire est plus lente 7 jours.

**Tableau 2.8** Gain en compression des bétons a différents âges

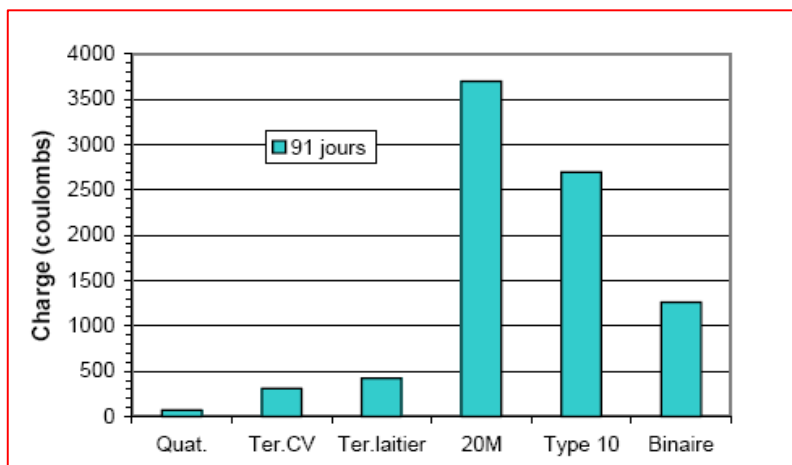
	Résistance en compression (MPa)			
	Gain à 3j	Gain à 7j	Gain à 28j	Gain à 91j
Quaternaire	3,8	10,7	23,7	33,3
Ter.CV	7,5	13,2	26,3	34,7
Ter. Laitier	9	16	25	29
20M	6,2	11,5	21,7	32,4
Type 10	8	11	18	21
Bin.laitier	8,5	16,5	25	29

#### 4) Perméabilité aux ions chlores :

La perméabilité d'un béton constitue un indicateur essentiel de durabilité. En effet, la pénétration des agents agressifs s'effectue dans le béton principalement par diffusion à travers la phase liquide interstitielle.

Une caractérisation des matériaux à matrice cimentaire à l'égard de la durabilité des structures passe ainsi par une évaluation de leurs capacités de résistance à l'agression d'agents chimiques atmosphériques.

L'essai de perméabilité aux ions chlorures donne un aperçu rapide sur la perméabilité du béton. Il consiste à déterminer le degré de résistance du béton à la conductivité électrique des ions chlorures. La perméabilité, exprimée en Coulombs, permet ainsi de connaître le facteur de perméabilité du béton : plus la charge de diffusion est grande, plus le béton est perméable. Les résultats des essais obtenus sur des échantillons de béton mûris pendant 91 jours dans une atmosphère à 100% RH sont donnés dans la Figure 2.34.



**Figure 2.34** Perméabilité aux ions chlorures des bétons

La présence d'ajouts dans la matrice cimentaire est, encore une fois, clairement mise en évidence. Les bétons fabriqués à base de ciments Portland tels que le 20M et le Type 10, qui selon la norme ASTM C1202 sont classés parmi les bétons modérément perméables, ont affiché des charges de 3700 et 2700 Coulombs respectivement.

À l'inverse, les bétons préparés avec des ciments composés présentent des charges allant de 70, 310, 474 et 1736 Coulombs pour le Quaternaire, le Ternaire CV, le Ternaire L et le Binaire L respectivement, qui selon la même norme sont classés imperméables pour les 3 premiers et peu perméables pour le quatrième.

La présence de la fumée de silice dans le quaternaire, le Ternaire CV et le Ternaire L ainsi que le taux de remplacement du ciment sont les deux paramètres importants dans l'amélioration de la perméabilité. En effet, les fines particules de la fumée de silice (200 fois inférieure à celle du ciment) et le remplacement du ciment par des ajouts avec une densité généralement plus faible que celle d'un ciment Portland, permettent une meilleure densification du béton.

Les réactions chimiques des systèmes cimentaires permettent aussi une remodelisation de la pâte offrant ainsi une microstructure avec un meilleur affinage des pores. La densification de la pâte et l'affinage des pores sont aussi des facteurs prépondérants dans le contrôle de la perméabilité des bétons 9,10.

---

## **2.6 ETUDE L'INFLUENCE DU SABLE DE DUNE FINEMENT BROYE SUR L'HYDRATATION DES CIMENTS.**

### **Introduction :**

L'utilisation des ajouts naturels comme ( cendre volcanique , pouzzolane, filler calcaire, ) a fait l'objet de plusieurs études dans différents pays ou monde dans le cadre de valorisation de leur ressources naturelle , l'étude d'utilisation de sable de dune comme ajouts naturels au niveau national sont rares , nous présentons dans cette partie une étude très récente a été réalisée au niveau de faculté de génie civil (U.S.T.H.B); Alger par Karima ARROUDJ et Mohamed Nadjib OUDJIT sur « l'influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments » [81]

### 2.6.1 Résumé :

Les propriétés des bétons sont régies par l'hydratation du ciment, cette dernière peut être modifiée par l'incorporation d'ajouts siliceux. Parmi les ajouts siliceux utilisés pour améliorer les propriétés des bétons, les fumées de silice sont les plus recommandées car elles densifient la matrice des bétons en formant des hydrosilicates (CSH) supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultra fines Particules de silice, cette étude consiste à remplacer la fumée de silice par un matériau très abondant au sud Algérien qui est le sable de dune et faire des analyses sur les différentes pâtes de ciment.

#### 1) Etude des pates de ciment:

**1.2) Matériaux utilisés:** Les matériaux utilisés sont:

- un ciment (CPJ 45) provenant de la cimenterie de RAIS-HAMIDOU d'Alger de finesse 3240 cm<sup>2</sup>/g.
- un sable de dune de BOUSAADA broyé à une finesse de 5280 cm<sup>2</sup>/g.
- Et à titre comparatif une quantité de CSF d'origine française (DUNKERQUE).

#### 1.3) Identification chimique et minéralogique des matériaux

**1.3.1- Analyse chimique:** Les tableaux 2.9 et 2.10 résument les résultats de l'analyse chimique des matériaux:

**Tableau 2.9** Compositions chimiques des matériaux utilise

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaO (libre)	SO <sub>3</sub>	PF	Insolubles
CPJ45	19,48	5,06	3,72	61,95	0,85	1,63	1,1	3,44	1,26
Sable de dune	86,04	1,35	0,86	6,63	0,08	.....	.....	5,00	....
CSF	94,76	.....	1,6	1,01	1,3	.....	.....	1,12	....

**Tableau 2.10** Compositions minéralogique du ciment utilise (potentiel de BOGUE)

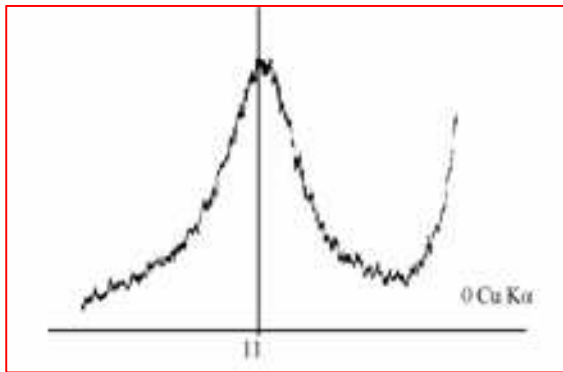
Elément	C <sub>4</sub> AF	C $\bar{S}$ H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S	βC <sub>2</sub> S	C (libre)
%	11,31	2,37	7,12	55,03	14,64	1,63

#### 1.3.2) Diffraction aux rayons X:

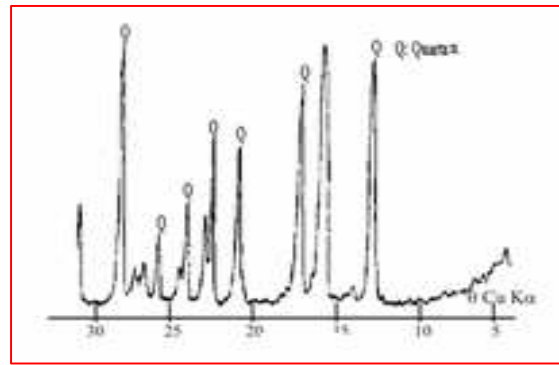
Les diffractogrammes X des deux ajouts sont représentés ci-après (voir figure 2.35 ; 2.36). L'analyse chimique des deux ajouts montre que leur nature est siliceuse (86.04 % de silice pour le sable de dune et 94.76 % pour la fumée de silice). L'analyse par D.R.X montre que le sable de dune est constitué de SiO<sub>2</sub> cristallisé sous forme de Quartz α à l'inverse du sable de dune, le CSF à une structure amorphe.



Cette dernière est caractérisée par un important halo centré à  $4.26 \text{ \AA}$  et  $4.08 \text{ \AA}$  correspondant aux pics principaux de la «cristobalite» et de la «trydimite ». La teneur en  $\text{SiO}_2$ , ayant une structure proche de celle de la cristobalite, est plus importante vu que le CSF a été obtenu à très haute température.



**Figure 2.35:** Diffractogramme de rayons X de fume de silice. [81]



**Figure 2.36:** Diffractogramme de rayons X de sable de dune. [81]

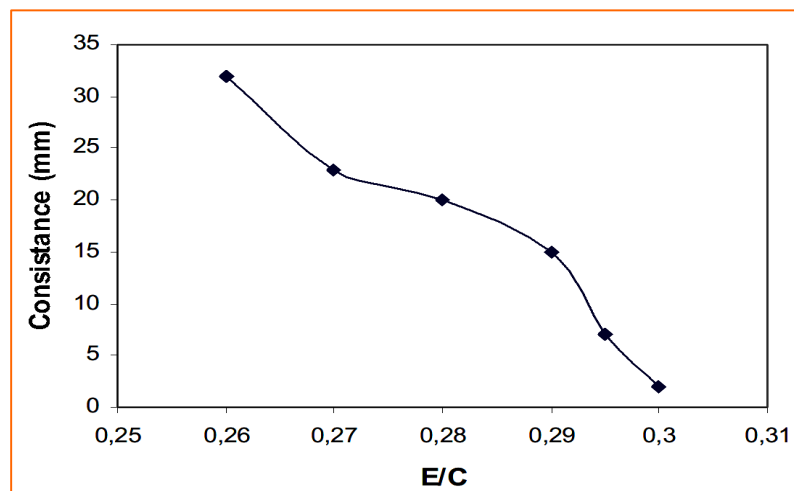
#### 1.4) Sable de dune broyé :

##### 1.4.1 Essai de Prise et de Consistance :

Les essais de prise et de consistance ont été réalisés conformément à la norme EN 196-3

##### 1.4.1.1 Détermination de la pâte normale:

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. La variation de la consistance VICAT en fonction du rapport E/C pour une pâte de ciment (CPJ45) sans ajouts est représentée par la courbe suivante:



**Figure 2.37** variation de la consistance en fonction E/C [81]

D'après cette courbe la consistance normale ( $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ ) est obtenue pour un rapport E/C égal à 0,295.

#### 1.4.1.2 Essais de prise:

##### a) Effet du rapport E/C sur le temps de prise:

Le tableau 2.11 montre que plus le rapport E/C augmente et plus le temps du début et de fin de prise est retardé.

**Tableau 2.11** Variation du temps de prise en fonction du rapport E/C à  $\theta = 20^\circ$

E/C	0,26	0,27	0,28	0,29	0,295	0,30
Temps du début de prise	4h10	4h20	4h38	5h00	5h15	5h20
Temps de fin de prise	5h20	5h30	5h39	6h00	6h20	6h20

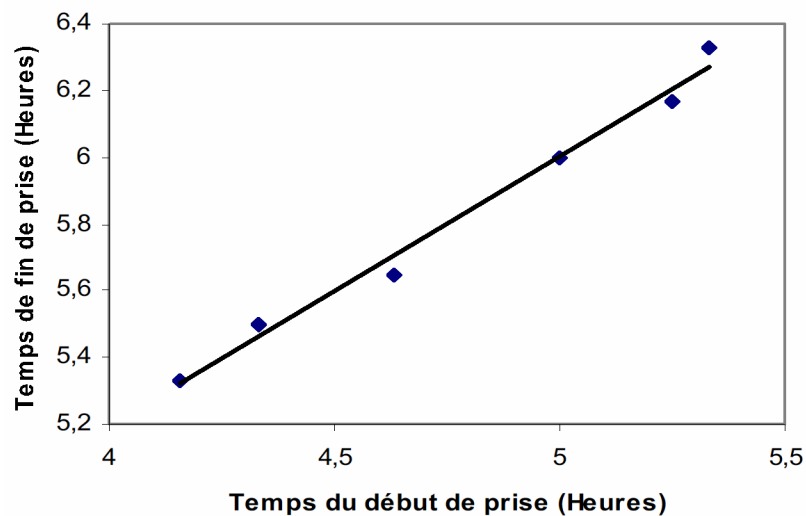
Ces résultats montrent que la variation du temps de fin de prise en fonction du début de prise suit une relation linéaire de forme :

$$y = ax + b$$

avec :

y: le temps de fin de prise (en heure) ; et x : le temps du début de prise (en heure) On déduit

$$y = 0.8098x + 1.955 \quad (\text{voir figure 2.38})$$



**Figure 2.38** Variation du temps de fin de prise en fonction du temps du début de prise. [81]

**b) Effet de l'ajout sur la prise:**

Cet essai a pour but de déterminer l'influence de l'ajout du sable de dune sur la prise et ceci pour un même rapport E/C = 0,295, les résultats trouvés sont représentés dans le tableau 2.12 :

**Tableau 2.12** Influence du sable de dune sur le temps de prise

% du sable de dune	0	5	10	15
Consistance d (mm)	7	0,5	0	0
Temps du début de prise	5h15	5h15	5h20	5h30
Temps de fin de prise	6h10	6h00	6h00	6h15

Ce tableau montre que l'ajout du sable de dune broyé 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 du ciment, le sable de dune joue un rôle de lubrifiant.

**1.4.1.3 Evolution du taux de cisaillement en fonction du temps:**

A l'aide de l'appareil VICAT, on a évalué le cisaillement  $t$  (Kpa) à partir de la formule suivante.

$$\tau = P / (S_1 + 10S_p)$$

avec:

P: le poids propre de la sonde (300g).

$S_1$ : surface latérale immergée de l'aiguille de diamètre  $\Phi$  ;  $S_1 = (40 \text{ mm} - d) \pi \Phi$

$d$  : distance entre le fond du moule et l'extrémité inférieure de l'aiguille.

$S_p$  : surface transversale de l'aiguille  $S_p = \pi \Phi^2 / 4$

La figure 2.39 montre que le cisaillement susceptible d'être repris par la pâte demeure faible et reste constant pendant 4h40min, au-delà de cette période, le cisaillement augmente plus rapidement pour s'accélérer brutalement vers 5h 15min; c'est le temps du début de prise et la période qui le précède est la période dormante.

Après cette période le cisaillement augmente très rapidement et atteint la valeur maximale vers 6h 10min qui correspond au temps de fin de prise, au delà de cette période de prise commence le durcissement.

L'ajout du sable de dune broyé ne modifie pas sensiblement l'allure de l'évolution du taux de cisaillement des pâtes testées.

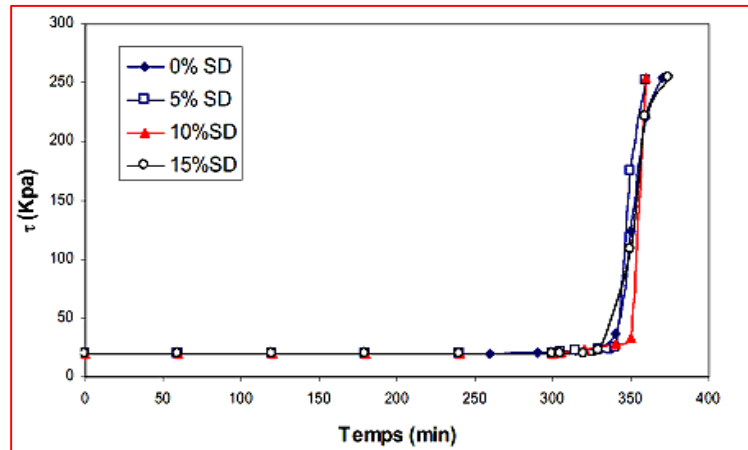
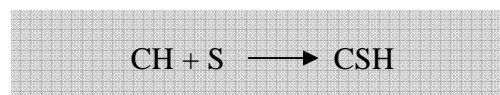


Figure 2.39: Cisaillement en fonction du temps [81]

#### 1.4.2 Etude des pâtes par diffractométrie aux rayons X :

Le but de l'essai est de mettre en évidence la réactivité pouzzolanique des ajouts utilisés à partir de la fixation de la chaux (portlandite) provenant de l'hydratation des silicates de calcium ( $C_3S$  et  $C_2S$ ) selon la réaction:

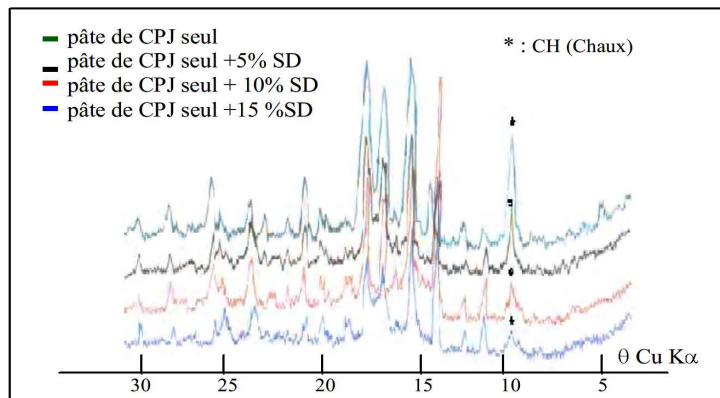


avec

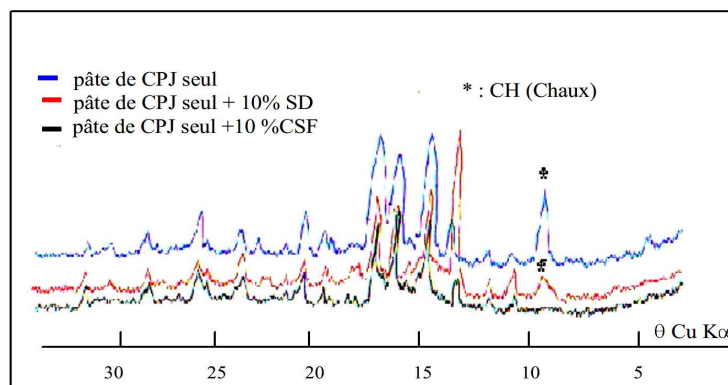
S: l'ajout siliceux (sable de dune ou CSF).

A cette effet, et compte tenu de la structure amorphe des CSH, nous nous sommes intéressé à l'intensité de la raie principale de la portlandite correspondant à la distance réticulaire  $d = 4.9 \text{ \AA}$  (centrée à  $9^\circ$  O Cu K $\alpha$ ). Le choix de cette raie ( $4.9 \text{ \AA}$ ) est lié au fait qu'elle soit distincte de celles des autres minéraux.

Les diffractogrammes x obtenus au 17ème jour d'hydratation sur cinq variétés des pâtes de ciment, en fonction de la teneur et de la nature de l'ajout, sont représentés sur la figure (2.40, 2.41)



**Figure 2.40** Effet du pourcentage du sable de dune sur la réaction pouzzolanique [81]



**Figure 2.41** Effet de la nature des ajouts sur réaction pouzzolanique [81]

• **Effet du % du sable de dune :**

Les diffractogrammes X (Fig 2.40) montrent que plus le pourcentage de sable de dune augmente l'intensité de la raie correspondante à  $4.9\text{\AA}$  diminue.

• **Effet de la nature de l'ajout :**

La figure 2.41 montre que l'ajout du sable de dune finement broyé a provoqué une réaction pouzzolanique partielle; ceci est traduit par la faible quantité de portlandite contenue dans la pâte de ciment + 10% de sable de dune comparativement à celle contenue dans le témoin. En présence de 10% de CSF nous remarquons une absence totale de la chaux ce qui explique que celle-ci a été totalement fixée par les grains de silice du CSF sous forme de CSH traduisant ainsi la forte réactivité pouzzolanique du CSF.

Nous venons de confirmer à partir des analyses par DRX que le sable de dune finement broyé fixe la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment sous forme de CSH (2<sup>ème</sup> génération) "qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliorent la compacité de la pâte". Cette réaction pouzzolanique est partielle comparée à celle issue de l'hydratation du ciment en présence du CSF.

La réactivité pouzzolanique du CSF est due à l'état vitreux de la silice qu'il contient contrairement à celle du sable de dune qui est cristallisé.

## **2.7 CONCLUSION:**

Comme il a été mentionné déjà au premier chapitre que lors d'hydratation et durcissement du ciment se forment divers types de hydrosilicates de calcium et se dégage l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui provenant en particulier de l'hydratation de silicate tricalcique  $\text{C}_3\text{S}$  et de silicate bicalcique  $\text{C}_2\text{S}$  cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte de ciment hydraté, elle peut même être responsable du problème de la durabilité puisqu'elle devient instable (lixiviation) et peut être assez facilement lessivée par l'eau.

Le laitier de haut fourneau granulé utilisé comme ajout minéral présente des compositions chimiques proches de celle de ciment Portland et un pouvoir hydraulique cependant, son activité hydraulique, ou sa cinétique d'hydratation, est plus faible que celle du ciment Portland, l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est un bon activateur pour le laitier ;

L'hydratation de laitier produit principalement des C-S-H, des aluminates et des silicoaluminates hydratés. Elle ne produit pas de portlandite, il semble même qu'un processus réactif de type pouzzolanique consomme une partie de la portlandite provenant de l'hydratation du ciment Portland.

Les effets combinés et synergétiques des ajouts minéraux offrent au béton un comportement mécanique amélioré et une meilleure durabilité, selon le type d'ajouts et le taux de substitution du ciment, les résistances en compression à long terme d'un béton préparé avec des ciments composés sont généralement meilleures que celles d'un béton avec un ciment Portland ordinaire.

La perméabilité, caractéristique essentielle pour assurer la durabilité d'une structure en béton, se trouve significativement améliorée avec l'incorporation des ajouts cimentaires.

L'ajout de sable de dune finement broyé (SD) ne modifie pas, de manière significative, le temps de début de prise. Par contre, de par sa finesse supérieure à celle du ciment, le SD provoque la fluidification des pâtes.

D'autre part L'analyse par diffractométrie aux rayons x à montré aussi que certaine constituant de sable de dune (silice) capable de développé une réaction pouzzolanique en milieu cimentaire. En effet, la faible quantité de portlandite détectée par DRX dans les pâtes de ciment en présence de sable de dune, traduit la réaction pouzzolanique de cet ajout

Nous étudions dans la deuxième partie de cette étude expérimentalement l'influence de l'ajout du sable de dune et de laitier granulé finement broyés au ciment, sur la stabilité de béton.

Deuxième partie

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE



## **Chapitre 3 :**

# **CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES ET LES METHODES D'ESSAIS**

## **INTRODUCTION**

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des caractéristiques de matériaux utilisés durant ce projet de recherche compositions chimique, minéralogiques et propriétés physiques, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés sur liant (la pâte pur), mortier et béton à l'état frais et durci, les essais expérimentaux réalisés au cours de cette étude sont donnés avec leurs normes

### 3.1 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES.

#### 3.1.1 Le Laitier :

Le laitier granulé utilisé dans notre étude comme ajout au ciment a prés leur broyage à la finesse désirée provienne de complexe sidérurgique d’El-Hadjar wilaya d’annaba, les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie d’AIN-TOUTA, la composition chimique du laitier est présentée dans le **Tableau 3.1**

##### 1.1.1.1 Analyse chimique du laitier :

**Tableau 3.1** Composition chimique du laitier

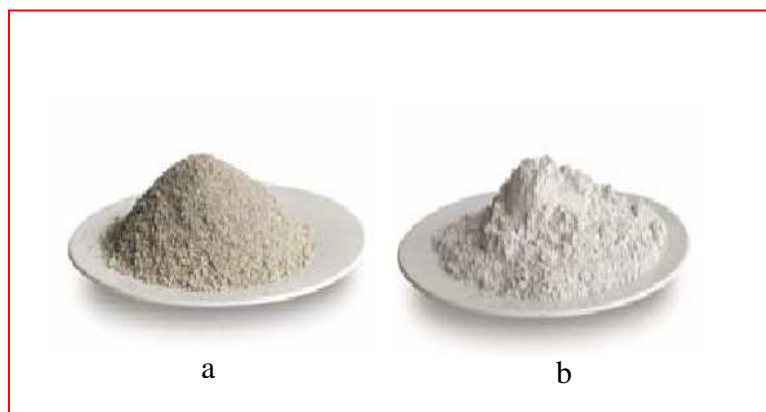
Les composantes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>
Teneur (%)	40,80	5,2	0,53	43,01	6,4	3,02	0,8

**Tableau 3.2** Module de basicité (Mb) et le module d’activité (Ma).

Module	Formule	Valeur	Remarque
Mb	$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$	1,074	Mb >1 donc le laitier est basique
Ma	$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	0,127	Acceptable

##### 3.1.1.2 Propriété physique de laitier :

Masse volumique apparente = 1080 kg/m<sup>3</sup>  
 Masse volumique absolue = 2733 kg/m<sup>3</sup>  
 Surface spécifique = (3500 et 2500) cm<sup>2</sup>/g



**Figure 3.1** : Echantillon de laitier utilisé comme ajout cimentaire (a) laitier non broyé, (b) laitier broyé.

### 3.1.2 Sable de dune finement broyé

Le sable de dune finement broyé destiner à utiliser comme ajout au ciment provient de la région de Biskra les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie d'AIN-TOUTA.

Le sable de dune a été lavé à l'eau puis sèche à l'air libre et afin d'éviter toute contamination avec les agents extérieurs, le sable a été entreposé dans des sacs bien fermés, jusqu'à au jour programmé à leur broyage voire le figure 3.2

#### 3.1.2.1 Analyse chimique sable de dune finement broyée

**Tableau 3.3.** Analyse chimique du sable de dune finement broyé

Teneur des composantes (%)								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Pert au feu	SO <sub>3</sub>	Cl
74,16	1,35	0,86	17,3 0	0,29	0,47	5,04	0,04	0,005

#### 3.1.2.2 Propriétés physiques du sable de dune finement broyé :

Masse volumique apparente. = 1300 kg/m<sup>3</sup>

Masse volumique absolue = 2770 kg/m<sup>3</sup>

Surface spécifique = (2500 et 3500) cm<sup>2</sup>/g



**Figure 3.2 :** Échantillon du sable de dune utilisé comme ajout cimentaire (a) sable de dune non broyé, (b) sable de dune broyé.

### 3.2.3 Ciment :

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland artificiel, préparé de clinker avec environ 5% gypse, le clinker qu'on a utilisé provient de la cimenterie d'AIN-TOUTA, dont la composition chimique et minéralogique est donnée par le tableau 3.4 et 3.5 respectivement.

#### 3.2.3.1 Analyse chimique et minéralogique du clinker

**Tableau 3.4.** Composition chimique et minéralogique du clinker.

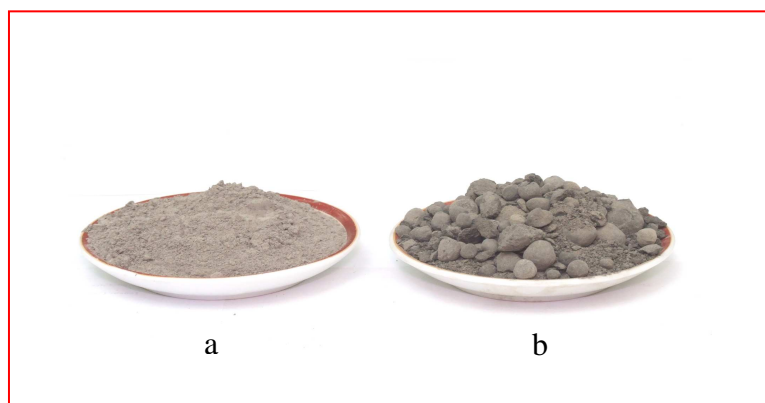
Composition chimique (%)							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaO libre	R.insoluble	P.F
22,0	5,30	3,38	65,16	1,77	2,32	1,40	0,48

**Tableau 3.5.** Composition minéralogique du clinker.

Composition minéralogique (%)			
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
58,09	23,32	8,32	10,27

#### 3.2.3.2 Propriétés physiques du clinker

- Masse volumique apparente = 1215 kg/m<sup>3</sup>
- Masse volumique absolue = 3030 kg/m<sup>3</sup>
- Surface spécifique = 3500 cm<sup>2</sup>/g



**Figure 3.3** Échantillon du clinker avant (a) et après broyage (b)

### 3.1.4 Le sable

Le sable utilisé pour formulation du mortier et de béton est sable siliceux de classe granulaire (0/5 mm) prélevé (d'Oued Djedi), de la région de Biskra,

#### 3.1.4.1 Analyse granulométrique :

La courbe granulométrique du sable est comprise dans le fuseau de contrôle pour le sable à béton selon la norme (EN 12620).

L'analyse granulométrique de ce sable, est représentée dans la figure (3.4)

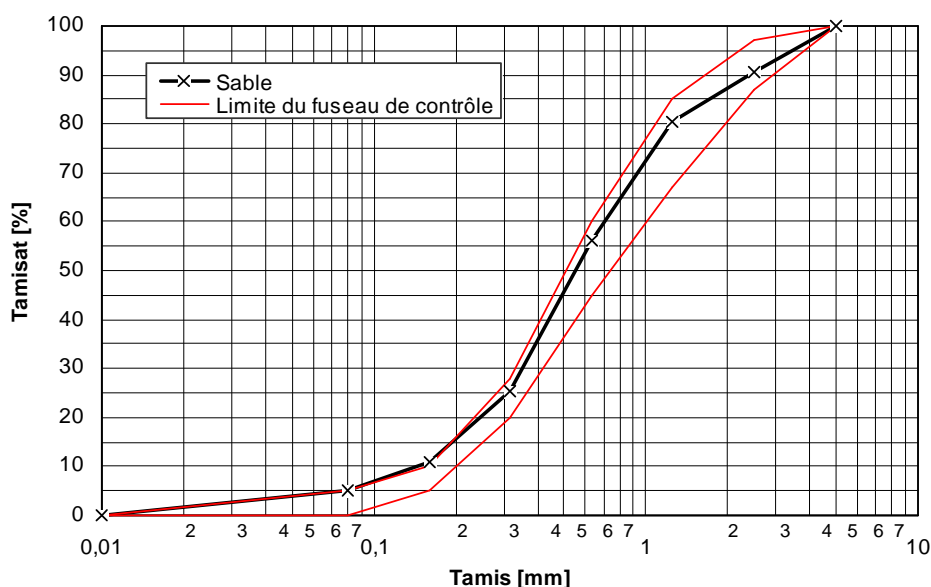


Figure 3.4 Courbe granulométrique du sable

#### 3.1.4.2 Propriété physique de sable :

- Masse volumique apparente =  $1440 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue =  $2500 \text{ kg/m}^3$
- Module de finesse = 2,37
- Equivalent de sable = 76,38

### 3.1.5 Les granulats :

Pour formulation du béton nous avons utilisé des gravillons concassés de nature calcaire de fraction (7/15 mm) et (15/25 mm), proviennent du gisement de Aïn-Touta située au nord de Biskra. Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de ces gravillons sont représentées dans la figure (3.5)

### 3.1.5.1 Analyse granulométrique :

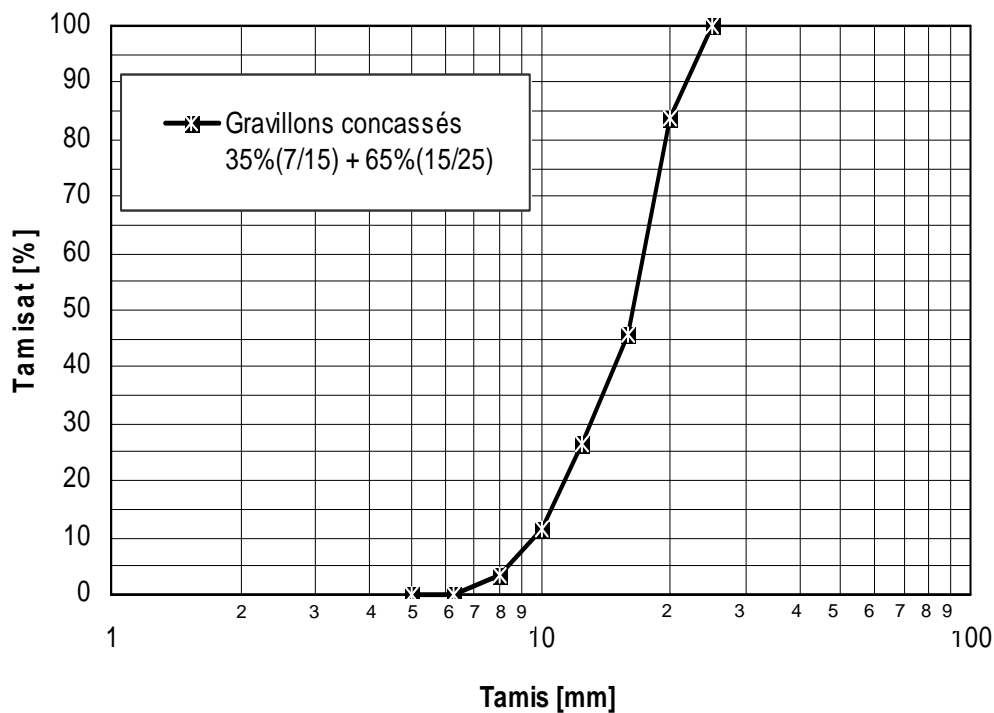


Figure 3.5 Courbe granulométrique des gravillons concassés

### 3.1.5.2 Propriété physique de pierre concassée

- Masse volumique apparente =  $1420 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue =  $2610 \text{ kg/m}^3$
- Coefficient de Los Angeles = 21,02 %

### 3.1.6 Eau de gâchage :

L'eau utilisée est eau potable, dont la température est comprise entre 18 et 20° C. par conséquent nous admettent qu'il répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

### 3.2 METHODES D'ESSAIS

Pour analyser les caractéristiques physico-mécaniques de la pâte, mortier et béton nous avons effectué différents essais, qui sont rapportés dans les tableaux ci-dessous.

#### 3.2.1 Les différents essais sur la pâte pure :

Tableau 3.6 Différents essais sur la pâte pure.

Type d'essai	Norme	Formule	Appareillage	Type de moule
Masse volumique Absolue	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$	Densimètre	_____
Masse volumique apparente	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V}$	Cylindre de Volume	_____
Finesse de mouture	NF-P 15-442	$SSB = K.Pt.G.\sqrt{t}$	Perméabilimètre de Blaine	_____
Consistance	NF-P 15-441	_____	Sonde de Vicat	_____
Prise	NF-P 15-432	_____	Aiguille de Vicat	_____
Expansion à chaud et à froid	NF-P 15-432	_____	Bouilloire de le Chatelier	aiguille
Résistance Mécanique	NF-P 451	$R_c = \frac{F}{S}$	Presse hydraulique	2×2×2 cm <sup>3</sup>
Action des eaux agressives	GOST 25 192-82	$A = \frac{Rs}{Re p}$	Presse hydraulique	2×2×2 cm <sup>3</sup>

#### 3.2.2 Les différents essais sur mortier normal (1 : 3)

Tableau 3.7 Différents essais sur le mortier.

Type d'essai	Norme	Formule	Appareillage	Type de moule
Résistance à la traction par flexion	GOST 310.4 - 76	R <sub>t</sub> , R <sub>t,fl</sub> directement données par l'appareil	Machine de flexion	4×4×16 cm <sup>3</sup>
Résistance à la compression	GOST 310.4- 76	$R_c = \frac{F}{S}$	Presse hydraulique	4×4×16 cm <sup>3</sup>
Retrait	NF-P 15-433	$\frac{\Delta L}{L_0}$	Dilatomètre à comparateur	4×4×16 cm <sup>3</sup>

### 3.2.3 Les différents essais sur le béton

Tableau 3.8 Différents essais sur le béton.

Type d'essai	Norme	Formule	Appareillage	Type de moule
Masse volumique absolue (sable, gravier)	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V_2 - V_1}$	Eprouvette graduée	_____
Masse volumique apparente (sable)	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V}$	Cylindre de volume 1L	_____
Masse volumique apparente (pierre Concassée)	GOST 6427-75	$\varphi = \frac{M}{V}$	Récipient de 14 L	_____
Coefficient Los angeles	NF-P 18-573	$L_A = \frac{m}{M} \cdot 100$	Appareil Los Angeles	_____
Equivalent de sable	NF-P 08-501	$\frac{h_2}{h_1} \times 100$	Eprouvettes graduées	_____
Analyse granulométrique	GOST 8736-77	Voir essai	Tamiseuse électrique et les Tamis	_____
Résistance à la compression	GOST 10180-78	$R_c = \frac{F}{S} \cdot \alpha$	Presse hydraulique	10×10×10 cm <sup>3</sup>
Résistance à la traction par flexion	GOST 10180-78	$R_{ft} = \frac{F \cdot L}{b^3} \cdot \delta$	Machine de flexion	10×10×40 cm <sup>3</sup>
Absorption d'eau	GOST 12730.3-78	$W_m = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$	_____	10×10×10 cm <sup>3</sup>
Perméabilité	GOST 12730.5-84	$K_p = \frac{Q \cdot H}{S \cdot (P_1 - P_2) \cdot \xi} \cdot \eta \cdot K$	Perméamétrie	15×30 cm <sup>2</sup>



## **Chapitre 4 :**

### **PROGRAMME EXPERIMENTALE ET RESULTATS D'ESSAIS**

#### **4.1 PROGRAMME EXPERIMENTALE**

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyé au ciment sur la stabilité de béton, pour atteindre cet objectif visé nous avons établi un programme expérimental qui diviser en trois parties :

##### **1) ESSAIS SUR LA PÂTE :**

La première partie est consacrée à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune et de laitier finement broyé au ciment sur les propriétés mécaniques (résistance en compression) et sur les propriétés physiques (temps de prise , consistance , gonflement ) et à la résistance chimique en milieu agressifs deux types d'agression ont été testés (acide , sulfate), les essais portent sur la pâte pure dans les principales variables de formulation sont le dosage de sable de dune broyé et de laitier ,la finesse de mouture et le rapport (eau /liant) ;

##### **2) ESSAIS SUR MORTIER NORMAL :**

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune et de laitier sur les propriétés mécaniques de mortier (résistance à la compression , résistance à la flexion , résistance à la traction par flexion ) , les essais portent sur des mortiers normaux dans les principales variables de formulation sont le dosage du sable de dune et de laitier.

##### **3) ESSAIS SUR BETON DURCI :**

La troisième partie est consacrée à l'étude de l'influence de l'ajout de laitier et de sable de dune sur les propriétés du béton à savoir les propriétés mécaniques (résistance à la compression , résistance à la flexion , résistance à la traction par flexion ) ,et d'outre par sur l'absorption , la stabilité a l'eau (coefficient de ramollissement ) , perméabilité et déformabilité de béton .

## 4.2 ETUDE DES PROPRIETES DE LIANT A BASE DE CLINKER (CPA) ET SABLE DE DUNE (S.D.B) ET LAITIER (L.G.H)

### 4.2.1 Propriétés mécaniques du liant :

L'étude des propriétés mécanique de chaque type de ciment au sable de dune et de laitier granulé nous à conduit à préparer une série d'échantillons de ciments contenant de: (5% à 15%) de sable de dune et de (15% à 35 %) Laitier granulé d'où neuf (09) combinaisons ont été étudiées :

**Tableau 4.1** : Les différentes combinaisons" sable de dune +laitier granule + CPA"

Type de ciment		
Sable de dune %	Laitier %	CPA <sup>[1]</sup> %
0	0	100
5	15	80
	25	70
	35	60
10	15	75
	25	65
	35	55
15	15	70
	25	60
	35	50

Le clinker et le sable de dune et le laitier sont broyés séparément jusqu'à la finesse de mouture désirée à l'aide d'un broyeur à boule de capacité de 2 kg à près dosage et ajout de 5% de gypse (en poids du clinker), les mélanges sont homogènes.

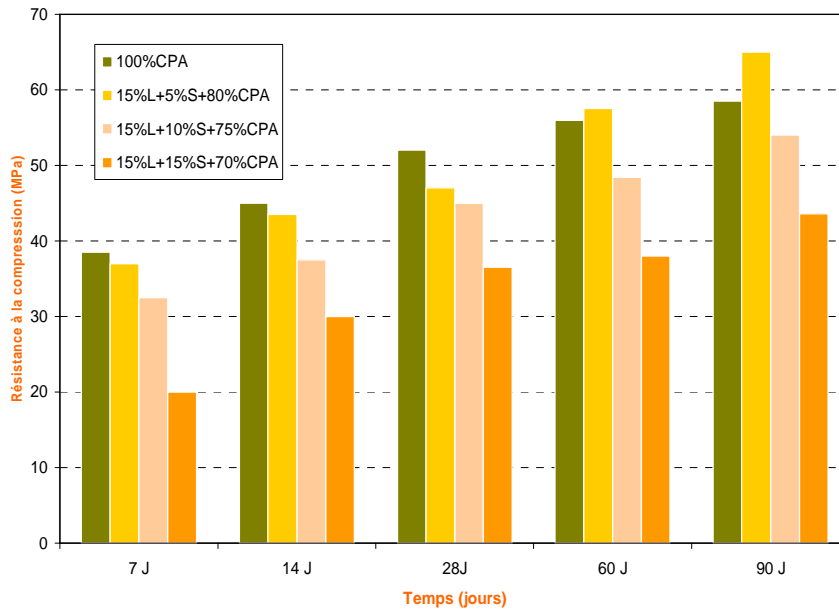
Afin de mieux apprécier l'influence de la teneur en sable de dune et laitier et ces finesse de moutures ainsi que le rapport eau - liant (E/L) sur les propriétés mécaniques (résistance en compression) de divers types de ciments on a retenu deux surface spécifiques pour le sable de dune et laitier (2500, 3500 cm<sup>2</sup>/gr), pour le rapport E/L on a retenu 0,30 et 0,40.

Donc on a confectionné des éprouvettes en pâte pure de l'ordre six (06) éprouvettes par essai de forme cubique (2×2×2) cm<sup>3</sup> à base des ciments de différents teneurs en sable de dune et en laitier.

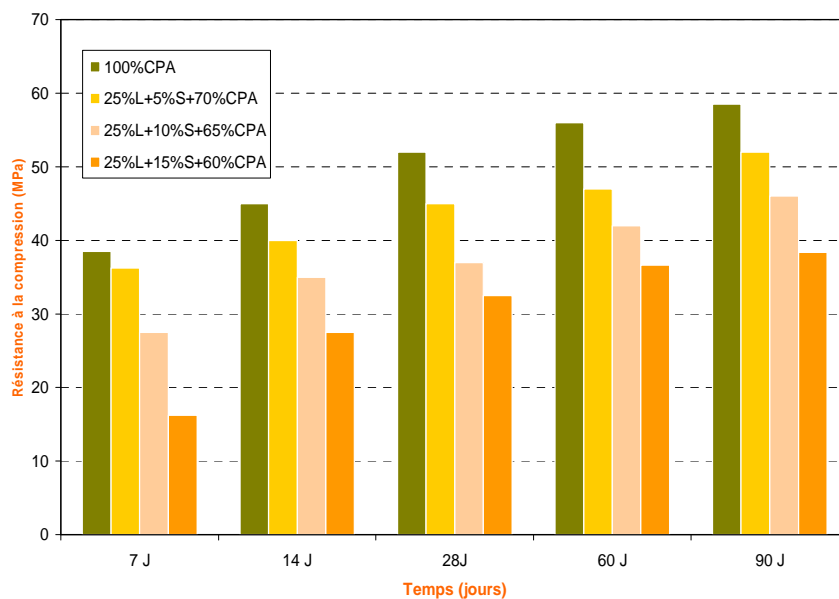
[1] : le terme CPA sera utilise pour désigné (95 % clinker + 5 % gypse)

### 4.2.1.1 Influence de la teneur en laitier :

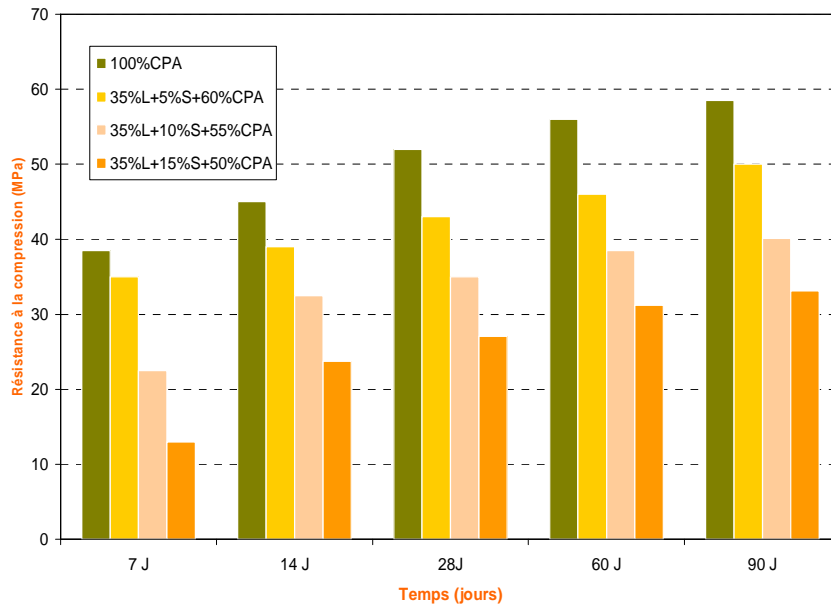
L'étude de l'influence de variation de la teneur de laitier granulé finement broyé sur les propriétés mécaniques résistance à la compression de la pâte de ciment a base de (CPA, Laitier.G , sable de dune broyé ) , nous a conduit de varier la teneur de laitier de : 15%, 25% , 35% et sa pour des teneurs de sable de dune de : 5%, 10% ,15% respectivement , les résultats des essais mécaniques des éprouvettes après (7,14,28,60,90 ) jours de durcissement est représentées par les figures sous dessous.



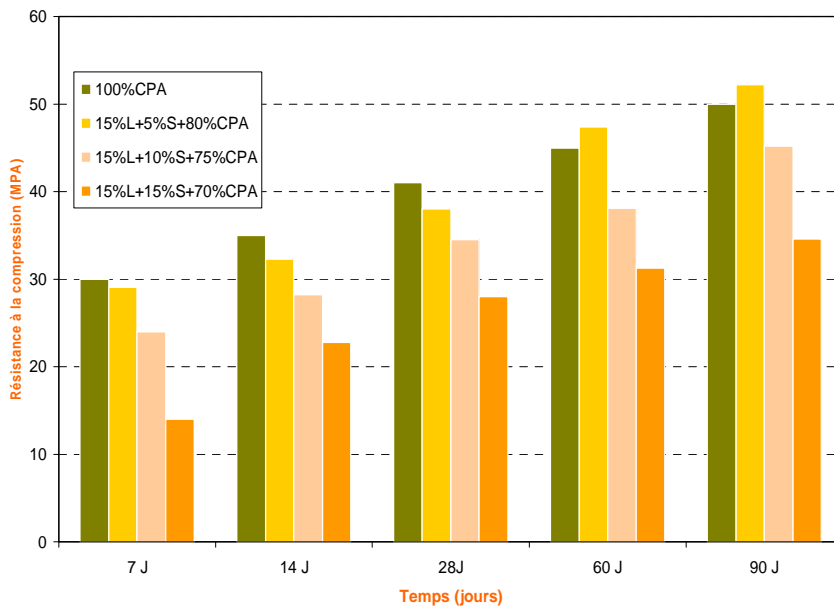
**Figure 4.1:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 15%L, avec E/L= 0,30, SSB=3500 cm<sup>2</sup>/gr



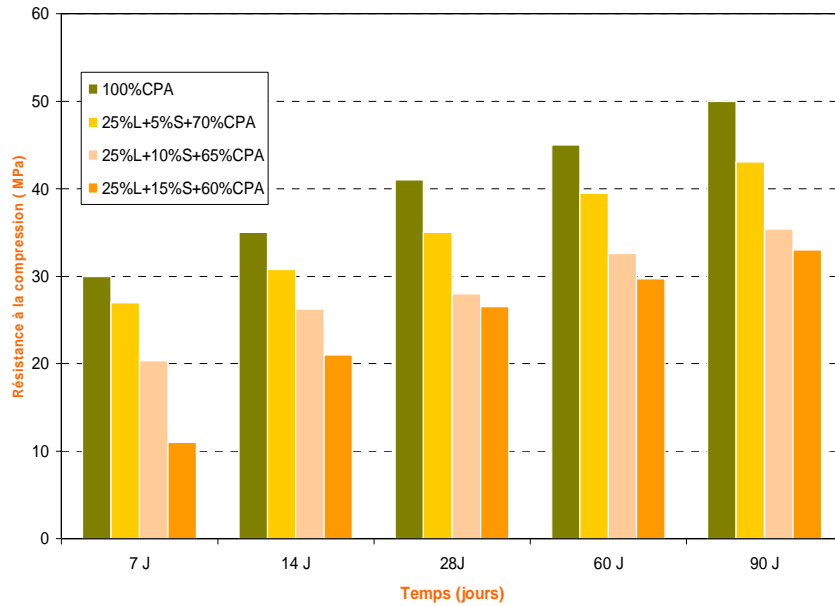
**Figure 4.2:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 25%L, avec E/L= 0,30, SSB=3500 cm<sup>2</sup>/gr



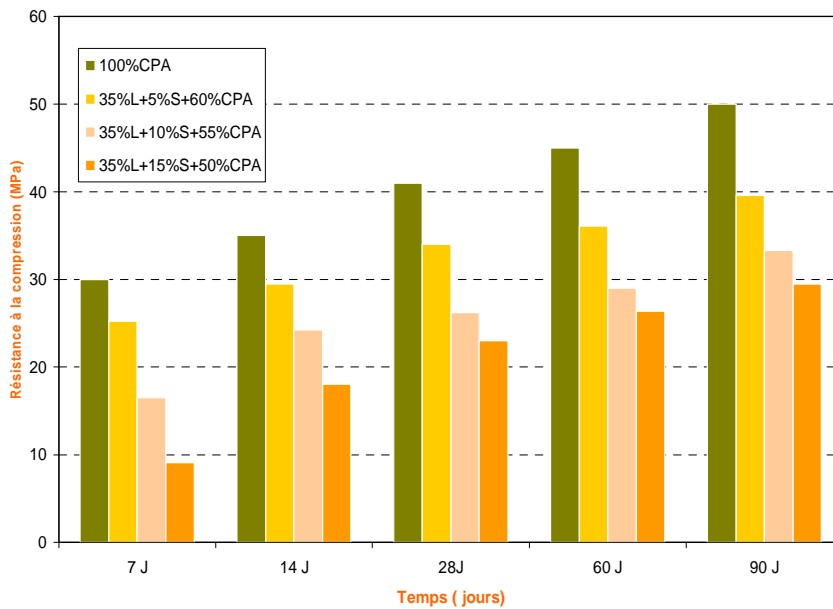
**Figure 4.3:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 35%L, avec  $E/L= 0,30$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



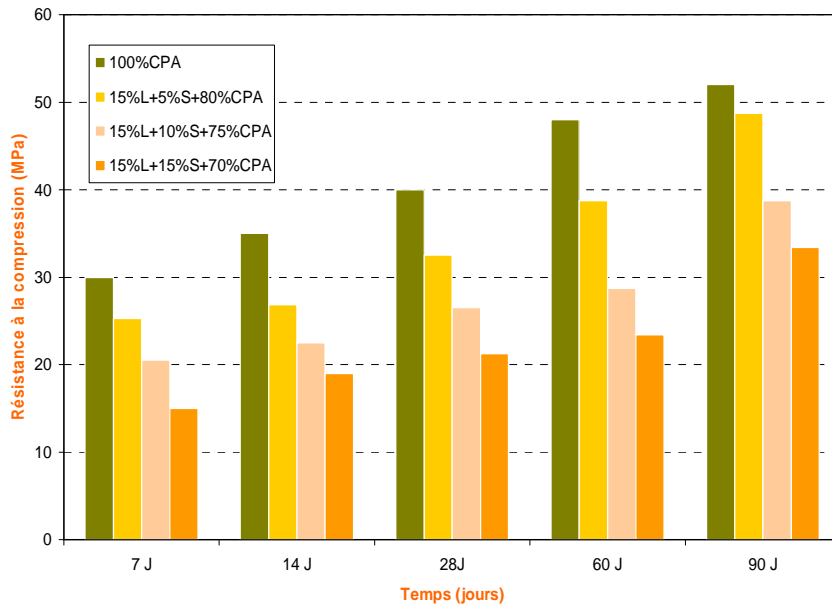
**Figure 4.4:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 15%L, avec  $E/L= 0,40$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



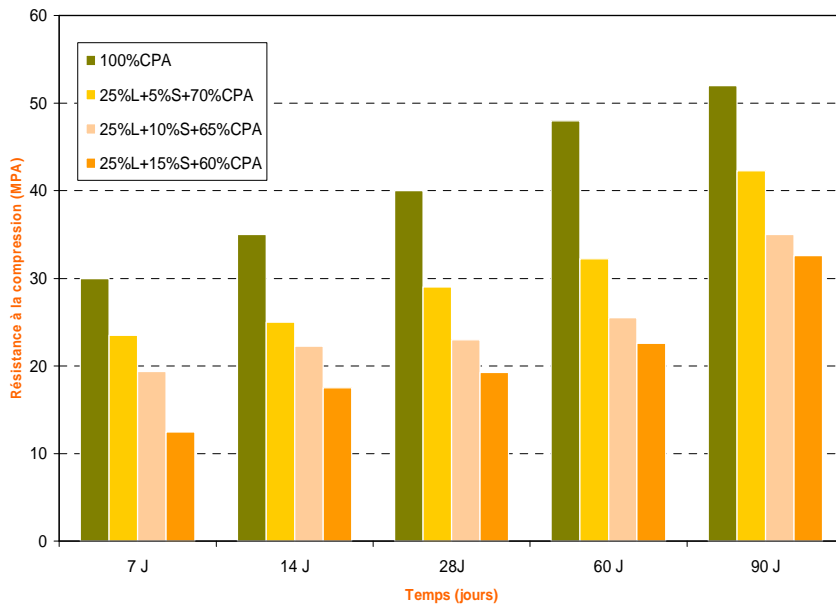
**Figure 4.5:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 25%L , avec  $E/L=0,40$  ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



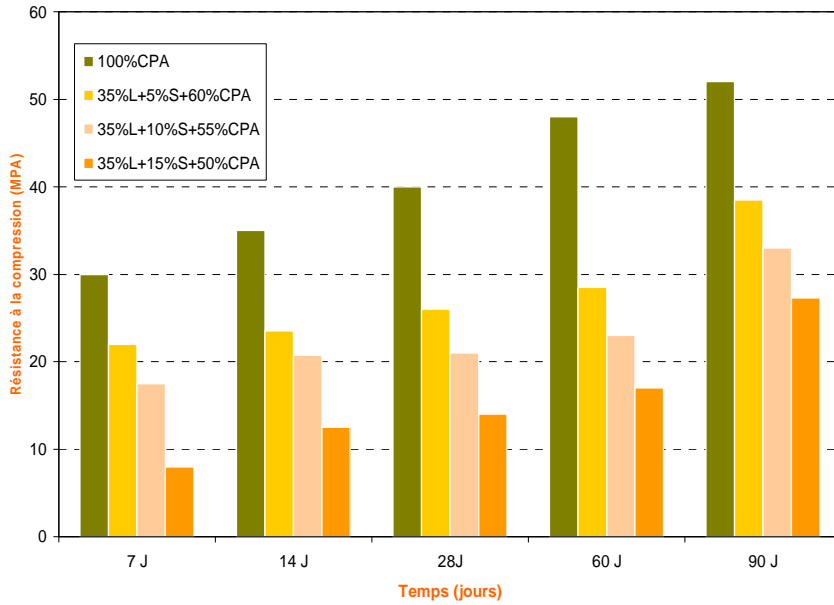
**Figure 4.6:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 35%L , avec  $E/L=0,40$  ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



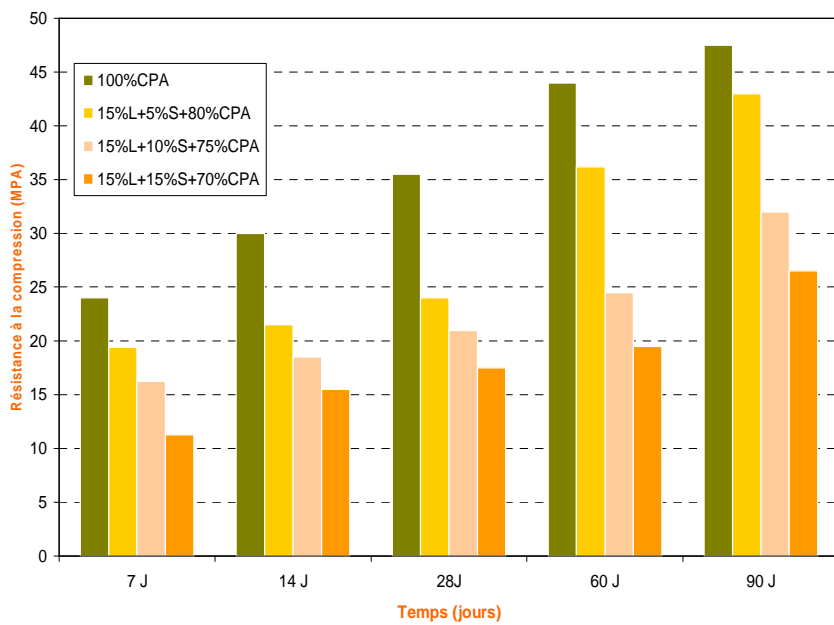
**Figure 4.7:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 15%L , avec E/L=0,30 ,SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr



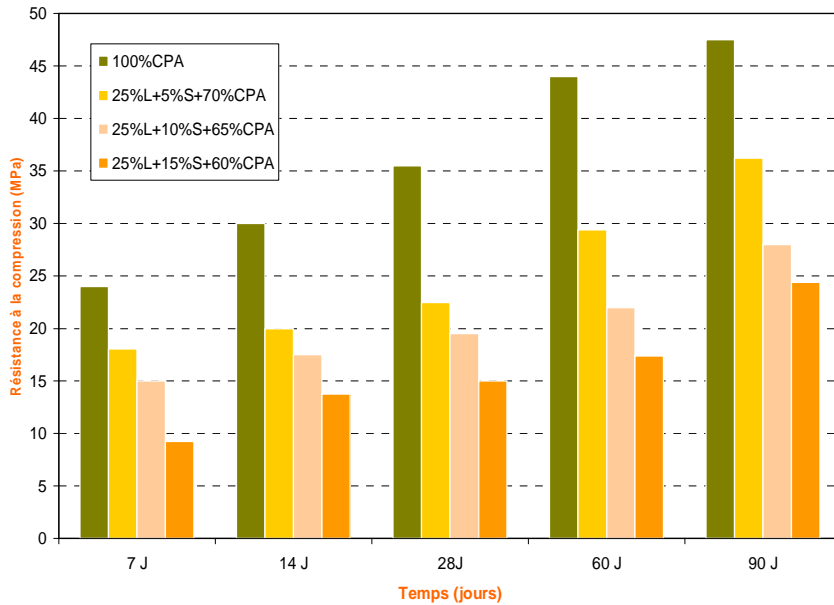
**Figure 4.8:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 25%L , avec E/L=0,30 ,SSB=2500 cm<sup>2</sup>/gr



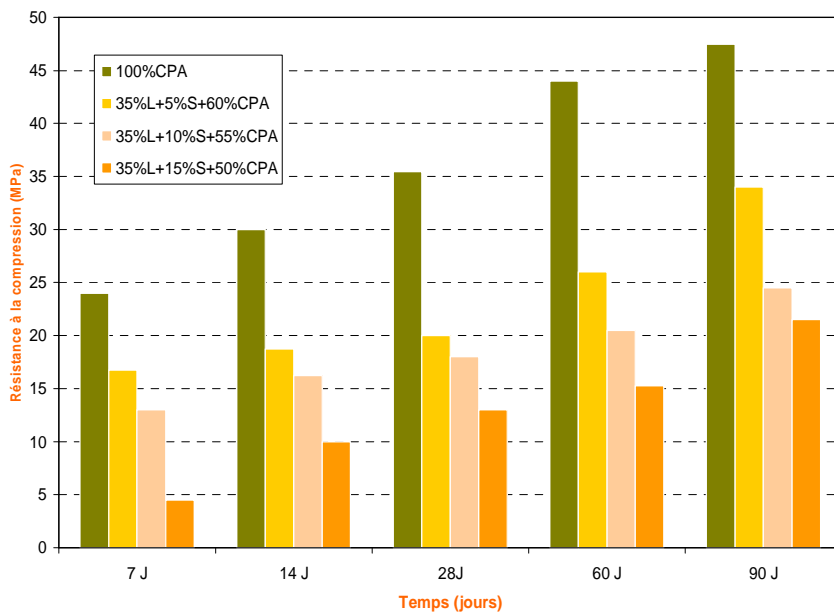
**Figure 4.9:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 35%L , avec  $E/L=0,30$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



**Figure 4.10:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 15%L, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



**Figure 4.11:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 25%L, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$

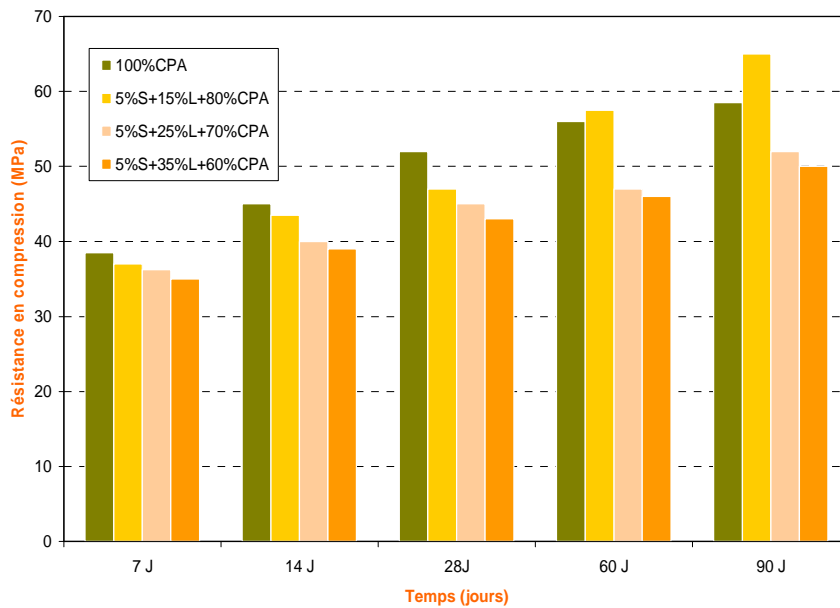


**Figure 4.12:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 35%L, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$

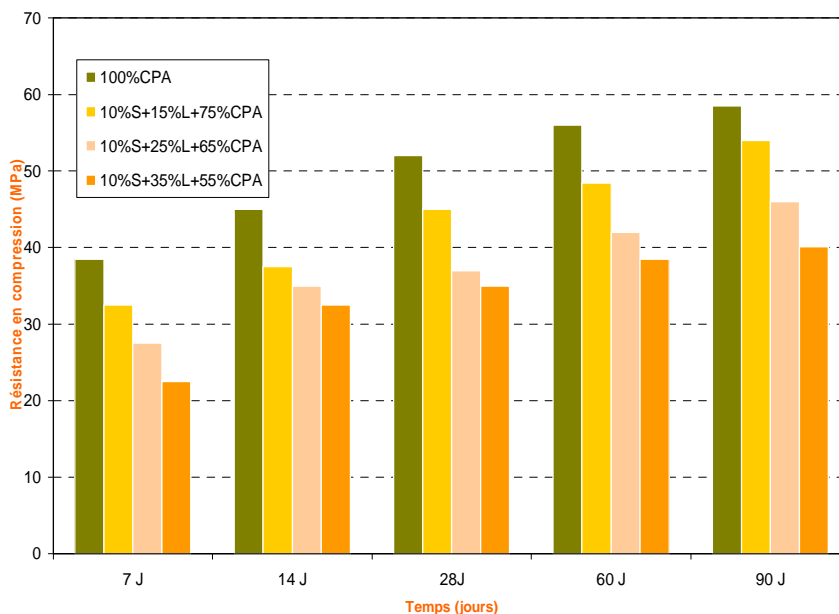


### 4.2.1.2 Influence de la teneur en sable broyé

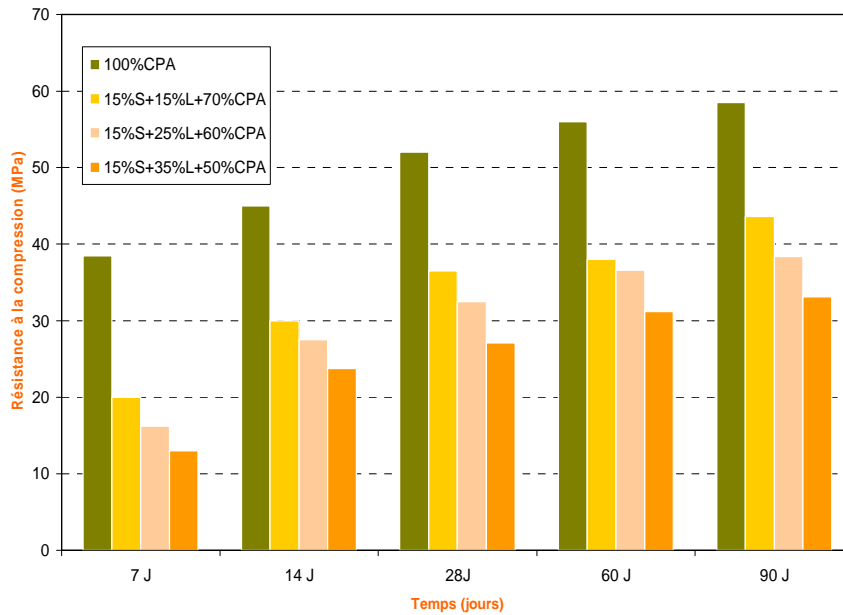
L'étude de l'influence de variation de la teneur du sable de dune finement broyé sur les propriétés mécaniques résistance à la compression de la pâte de ciment a base de (CPA, Laitier.G , sable de dune broyé ) , a nous conduit de varier la teneur de sable de dune de : 5%, 10% ,15% et sa pour des teneurs de laitier 15%, 25% ,35% respectivement , les résultats des essais mécaniques des éprouvettes après (7,14,28,60,90 ) jours de durcissement est représentés par les figures sous dessous :



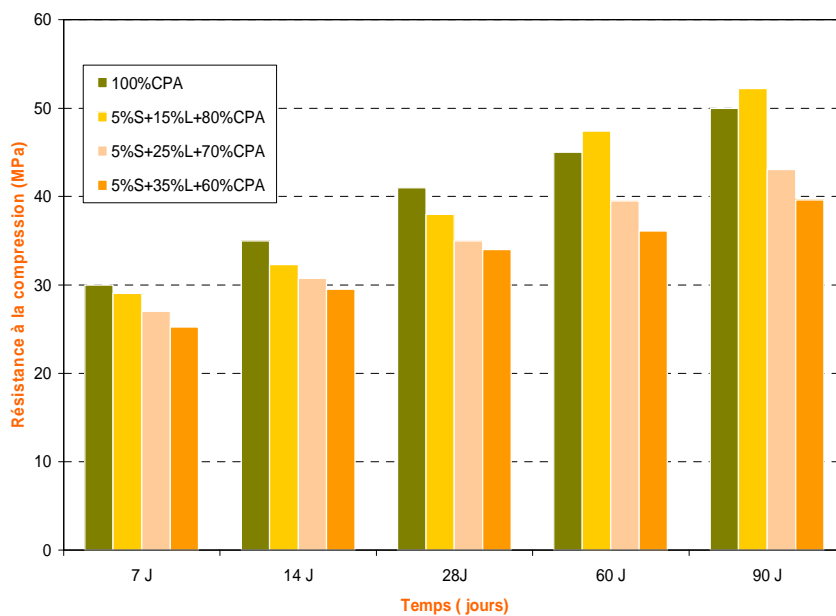
**Figure 4.13:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 5% S, avec  $E/L=0,30$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



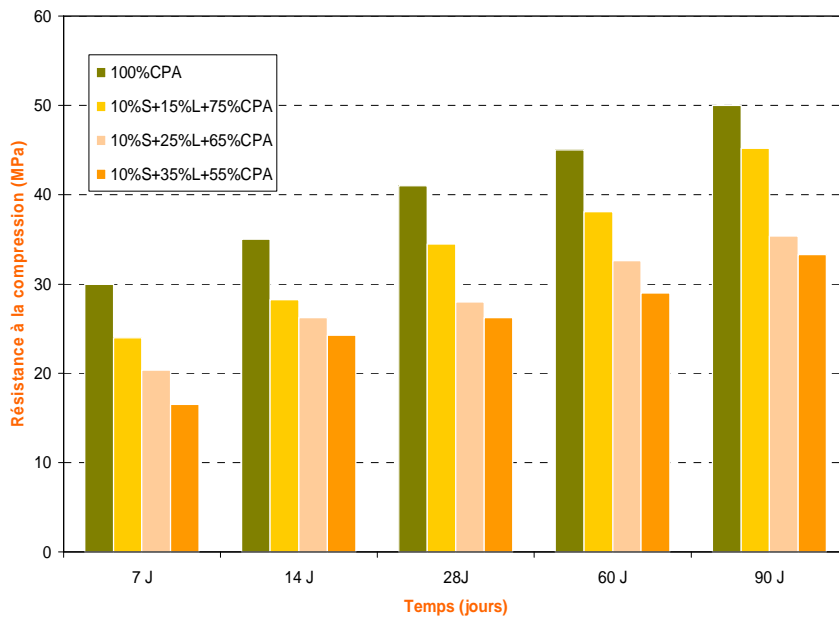
**Figure 4.14:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de laitier 10 % S, avec  $E/L= 0,30$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



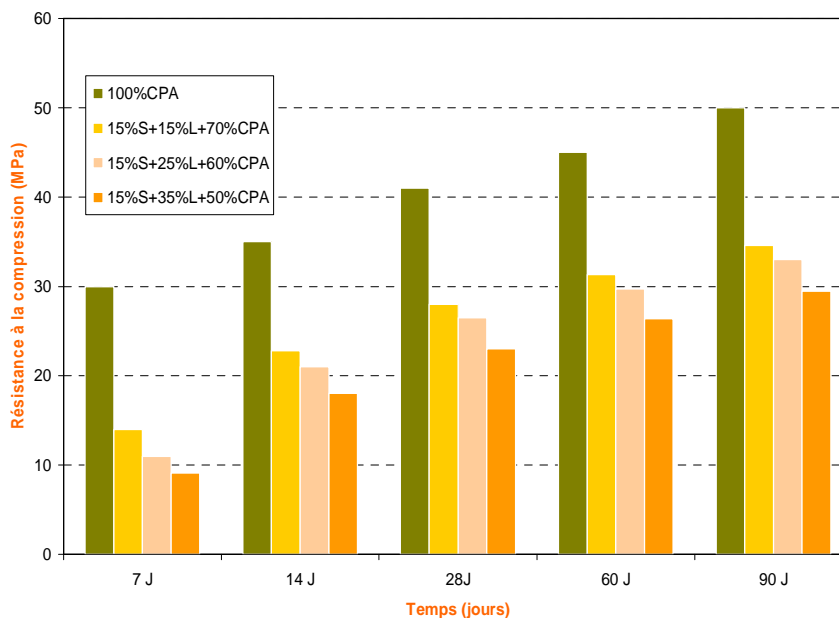
**Figure 4.15:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 15% S, avec  $E/L=0,30$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



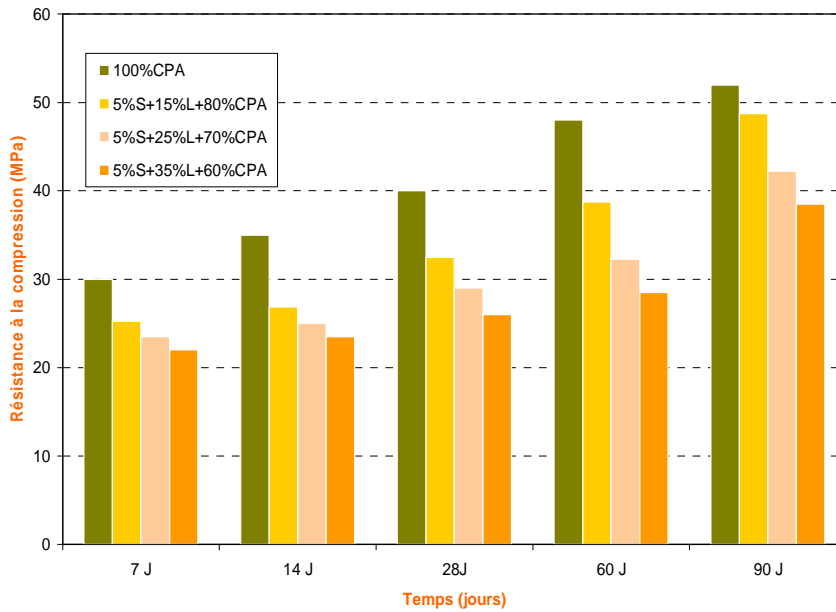
**Figure 4.16:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 5% S, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



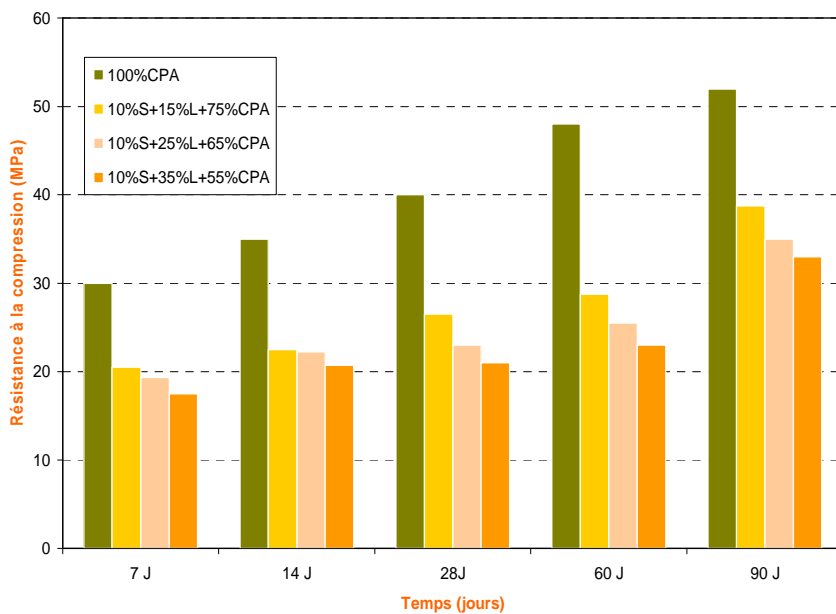
**Figure 4.17:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 10% S, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



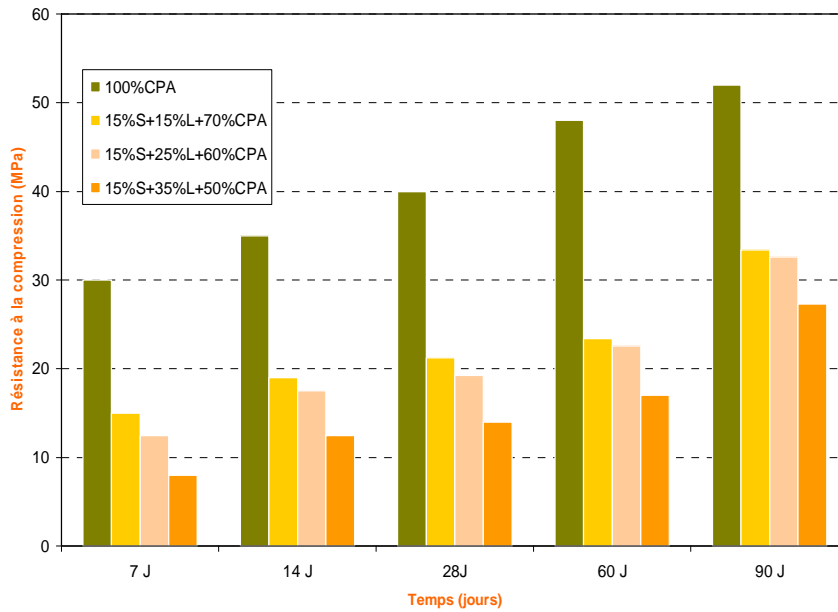
**Figure 4.18:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 15% S, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



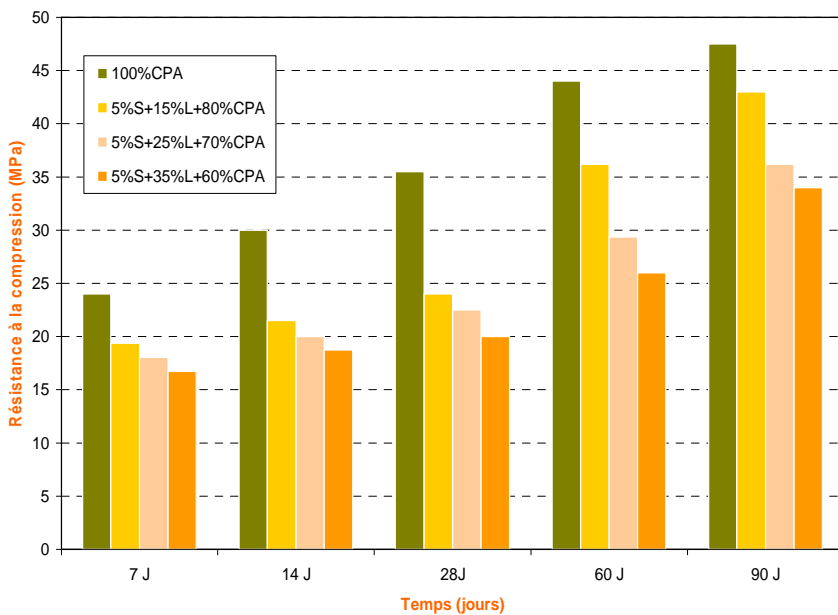
**Figure 4.19:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 5% S, avec  $E/L=0,30$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



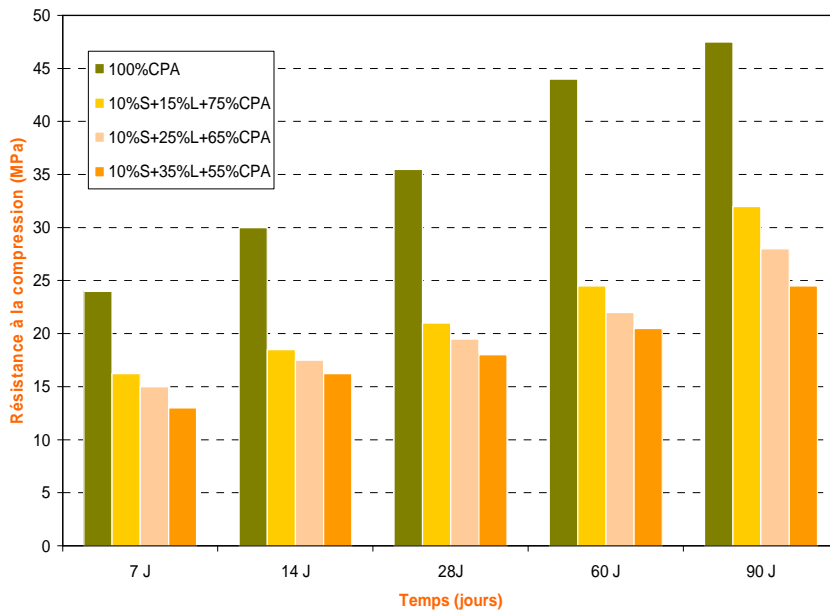
**Figure 4.20:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 10% S, avec  $E/L=0,30$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



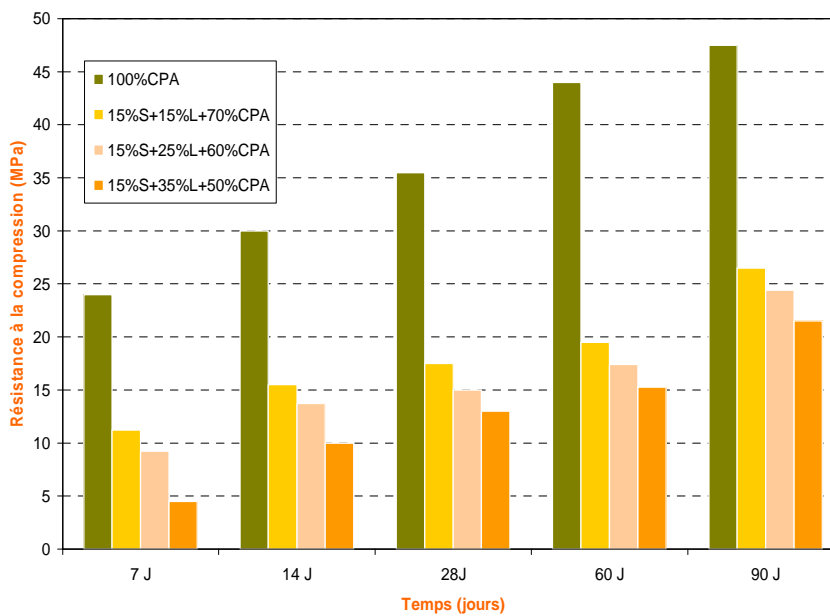
**Figure 4.21:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 15% S, avec  $E/L=0,30$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



**Figure 4.22:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 5% S, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



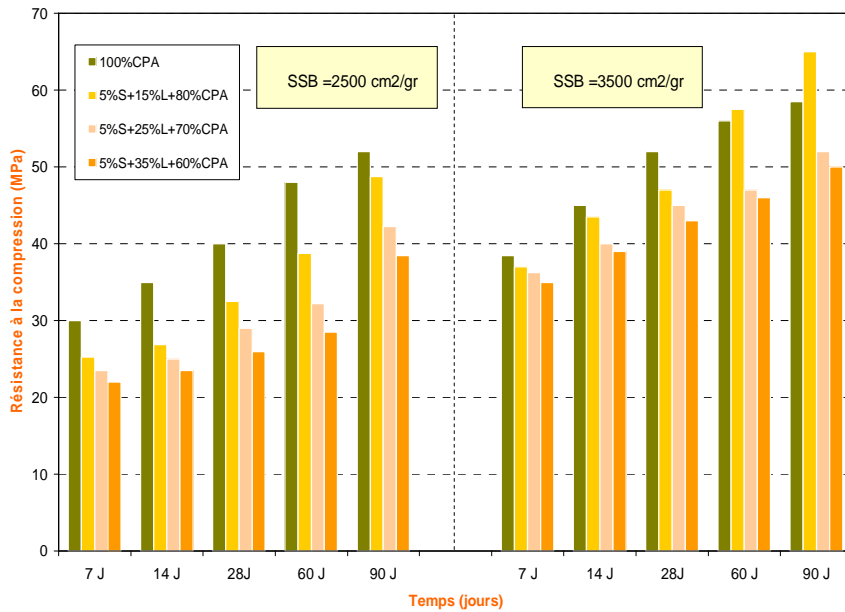
**Figure 4.23:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 10% S, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$



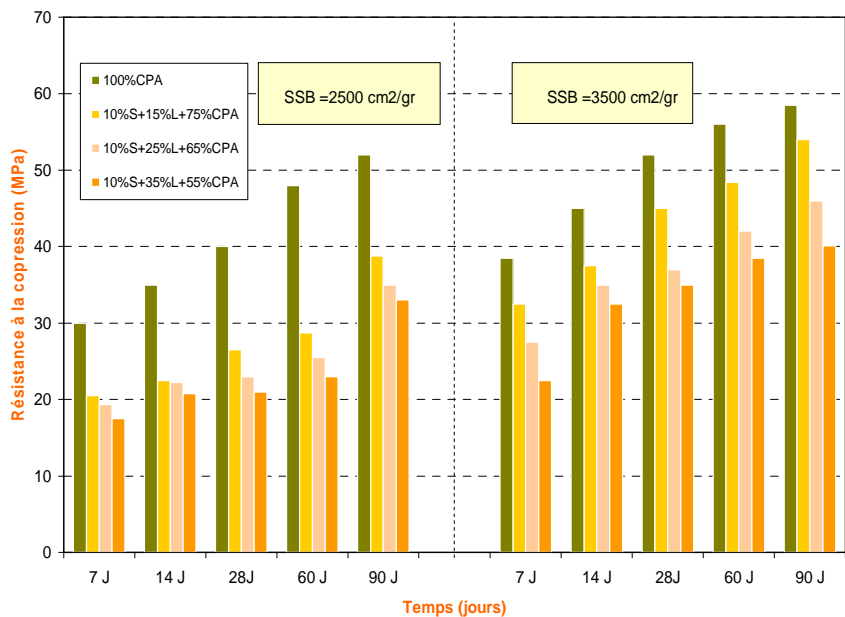
**Figure 4.24:** Évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps pour teneur de sable 15% S, avec  $E/L=0,40$ ,  $SSB=2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$

### 4.2.1.3 Influence de variation de finesse (S.S.B)

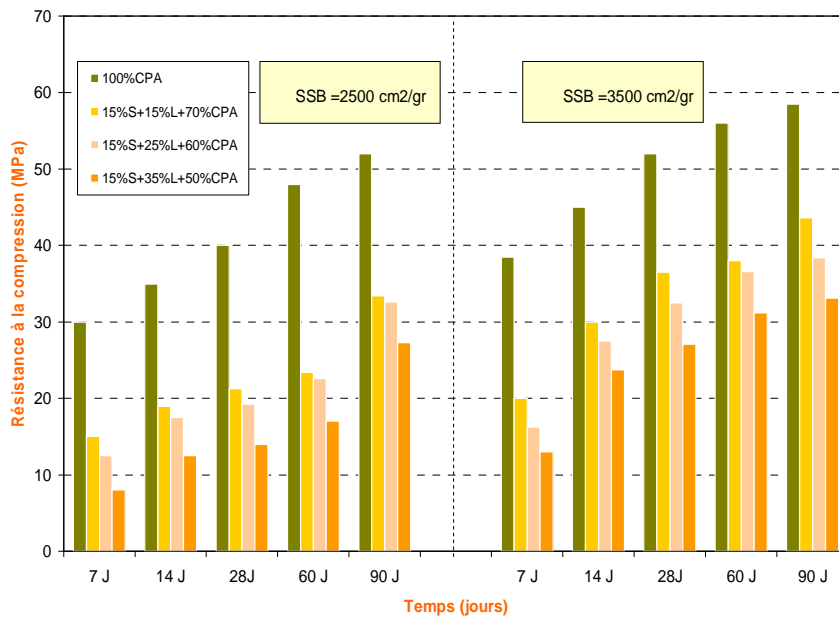
L'étude de l'influence de variation de la surface spécifique du laitier et de sable de dune finement broyés sur les propriétés mécaniques résistance à la compression de la pâte de ciment à base de ( CPA , laitier , sable de dune ) nous a conduit à varier la surface spécifique de laitier et de sable de dune de 2500 cm<sup>2</sup>/g à 3500 cm<sup>2</sup>/g les résultats de cette étude et présentés aux figures ci-dessous :



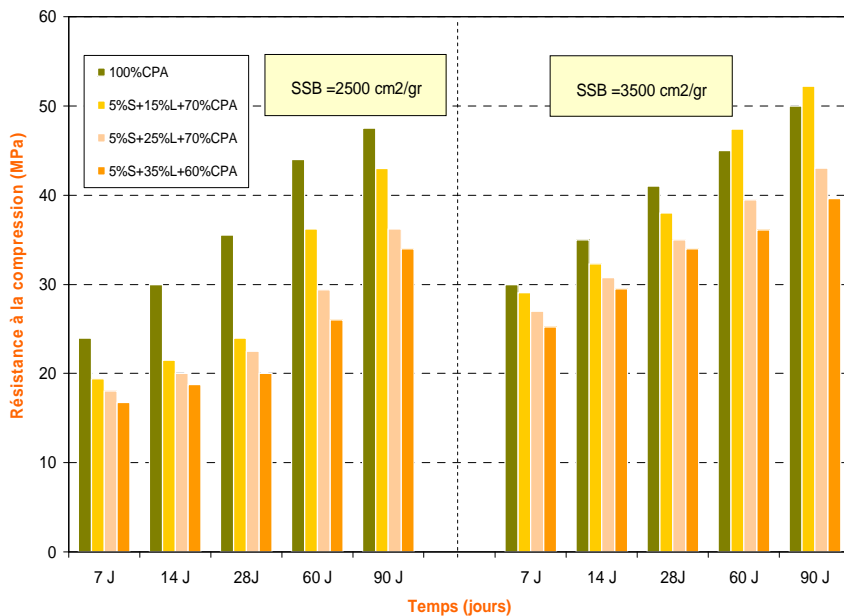
**Figure 4.25:** L'influence de variation de finesse sur l'évolution de la résistance à la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps et pour E/L=0,30 et 5% SDB



**Figure 4.26:** L'influence de variation de finesse sur l'évolution de la résistance à la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps et pour E/L=0,30 et 10% SDB

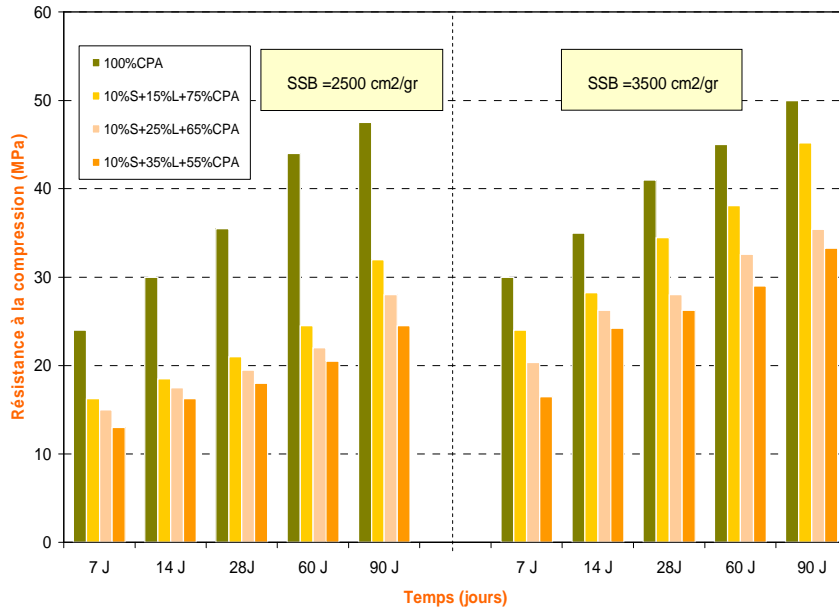


**Figure 4.27:** L'influence de variation de finesse sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps et pour E/L=0,30 et 15% SDB

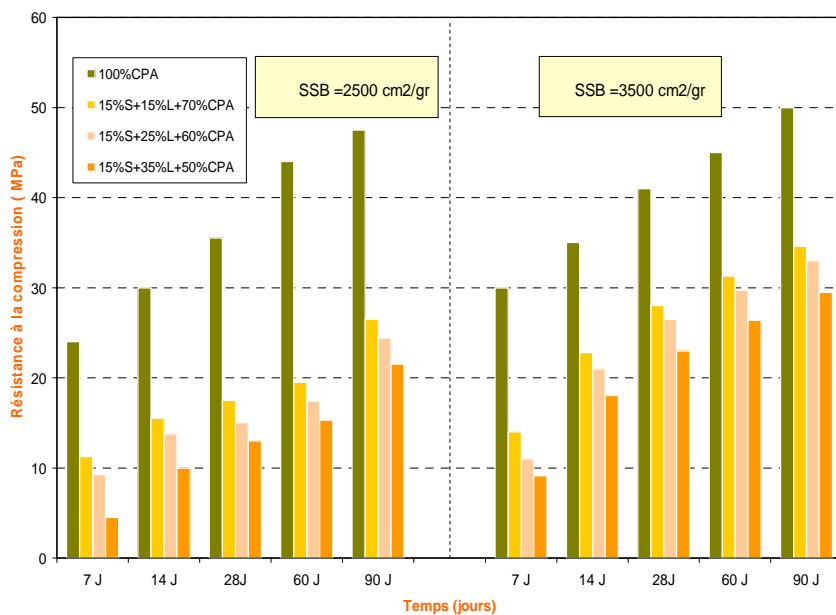


**Figure 4.28:** L'influence de variation de finesse sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G + Sable D.B) en fonction du temps et pour E/L=0,40 et 5% SDB





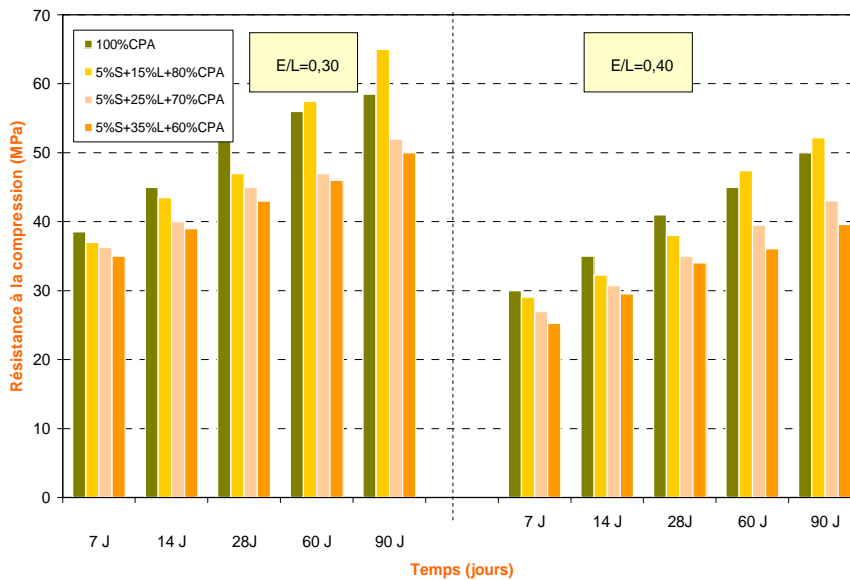
**Figure 4.29:** L'influence de variation de finesse sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier.G +SableD.B) en fonction du temps et pour E/L=0,40 et 10%SDB



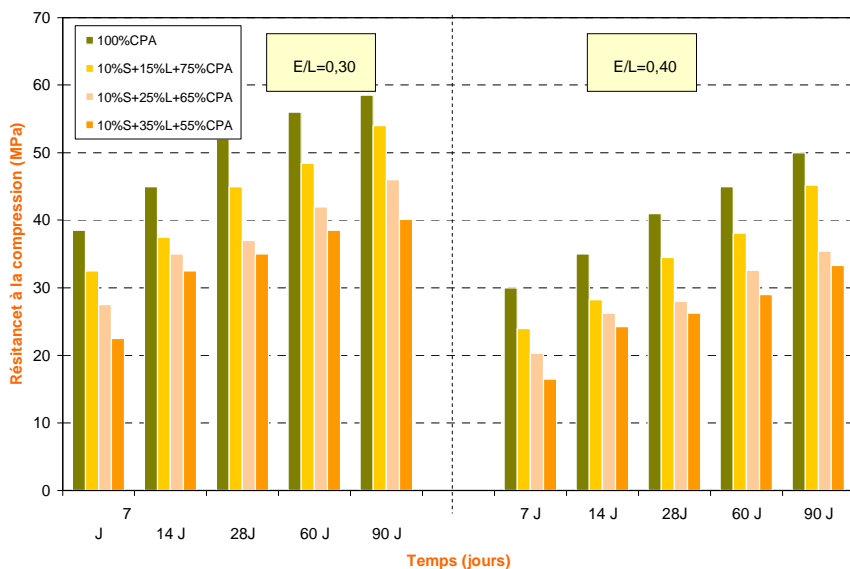
**Figure 4.30** L'influence de variation de finesse sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier.G +SableD.B) en fonction du temps et pour E/L=0,40 et 15%SDB

#### 4.2.1.4 Influence de variation de rapport (eau /liant) :

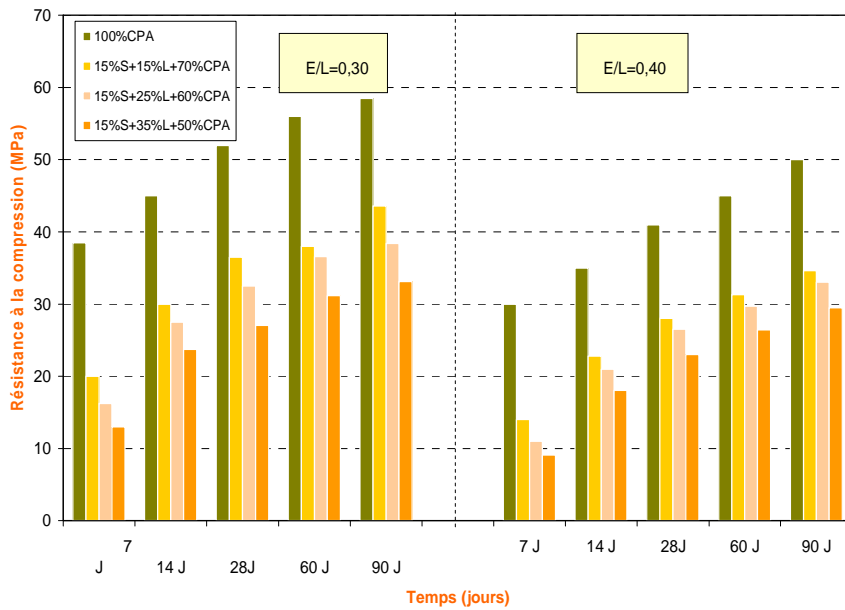
L'étude de l'influence de variation du rapport ( E/L) sur les propriétés mécanique résistance à la compression de la pâte de ciment a base du ( CPA , Laitier.G , sable de dune broyé ) nous à conduite de varié le rapport E/L de : ( 0,30 et 0,40) les résultats de cette étude et présenté aux figures sous dessous.



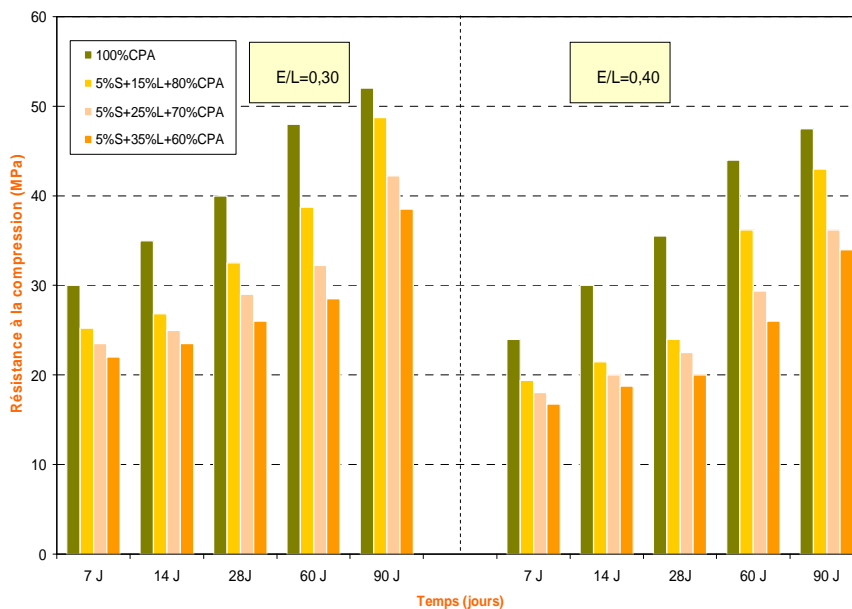
**Figure 4.31:** L'influence de variation de rapport (E/L) sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction du temps pour SSB = 3500 cm<sup>2</sup>/gr et 5% SDB



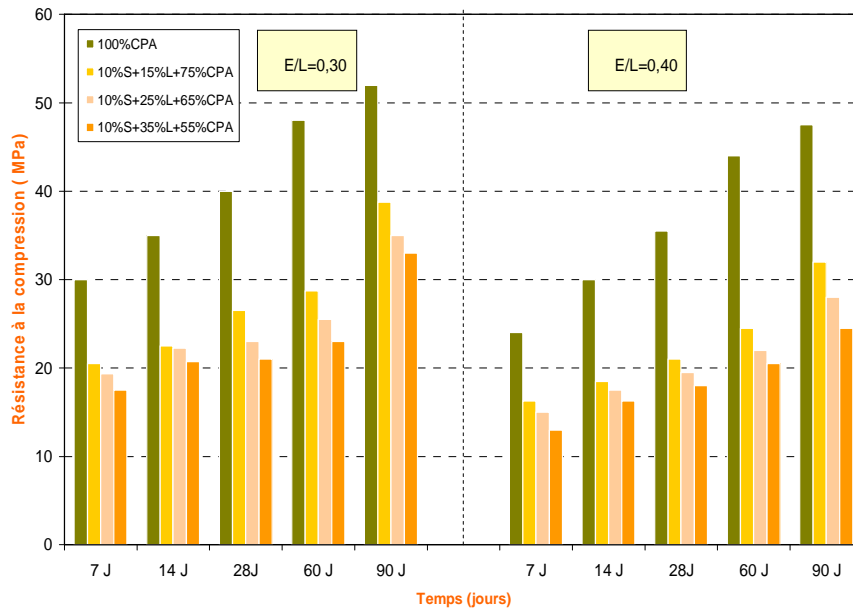
**Figure 4.32:** L'influence de variation de rapport (E/L) sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction du temps pour SSB = 3500 cm<sup>2</sup>/gr et 10% SDB



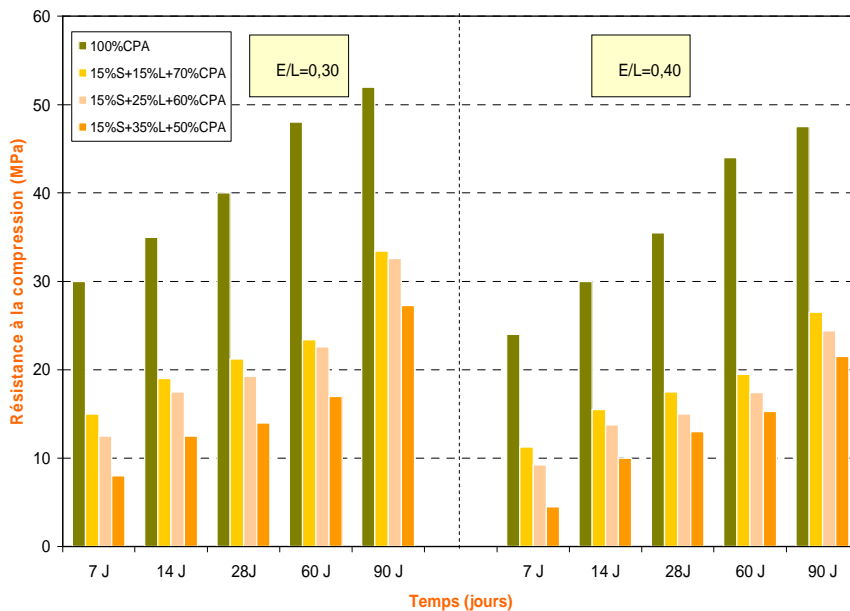
**Figure 4.33:** L'influence de variation de rapport (E/L) sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction du temps pour SSB = 3500 cm<sup>2</sup>/gr et 15% SDB



**Figure 4.34:** L'influence de variation de rapport (E/L) sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction du temps pour SSB = 2500 cm<sup>2</sup>/gr et 5% SDB



**Figure 4.35** :L'influence de variation de rapport (E/L) sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction du temps pour SSB = 2500 cm<sup>2</sup>/gr et 10% SDB



**Figure 4.36**: L'influence de variation de rapport (E/L) sur l'évolution de la résistance a la compression du mélange (CPA+ laitier .G +Sable D.B) en fonction du temps pour SSB = 2500 cm<sup>2</sup>/gr et 15% SDB

#### 4.2.1.5 ANALYSE DE RESULTATS :

a) L'analyse des résultats de l'étude de l'influence de variation de teneur de laitier à nous permise de tirer les remarques suivantes :

- L'augmentation de la teneur de laitier de 15%,25% et 35% dans le mélange (C.P.A, L.G.H , S.D.B ) pour des teneurs de sable de dune 5% , 10% et 15% respectivement a conduit a une diminution de la résistance à la compression pour tous les âges de durcissements ( 7j , 14j , 60j , 28j , 90j ), cette aptitude et aussi vérifiée pour les surfaces spécifiques ( 2500 et 3500) cm<sup>2</sup>/gr et les rapports :

(E / L = 0,30, 0,40) ;

- On constate aussi que le laitier apporte leur forte contribution au développement de résistance en compression lorsqu' il est introduit d'une valeur de 15% et lorsque la teneur de sable de dune et prise égale 5% ;

- On constate aussi que le laitier apporte leur faible contribution au développement de résistance en compression lorsqu' il est introduit d'une valeur de 35% et lorsque la teneur de sable de dune et prise égale 15%.

b) L'analyse des résultats de l'étude de l'influence de variation de teneur de sable de dune broyé a nous permise de tirer les points suivants :

- L'augmentation de la teneur de sable de dune de (5% à 15%) dans le mélange (C.P.A, L.G.H , S.D.B ) pour teneur de laitier prise (15% ,25% ,35%) respectivement a conduit a une diminution de la résistance à la compression pour tous les âges de durcissements ( 7j , 14j , 60j , 28j , 90j ) cette tendance et aussi vérifiée pour tout les surfaces spécifiques étudiés et pour les rapports : (E/L= 0,30 et 0,40) ;

- On peut constatée que le sable de dune apport leur forte contribution en développements de résistance en compression lorsque la teneur de laitier est le plus faible (15%) .

- Nous pouvons observer qu'au sein d'une même série de combinaisons lorsque la teneur de sable varie de (5% à 15%) le sable de dune apporte leur forte contribution en développements de résistance en compression lorsqu'il est introduit d une valeur de 5%.

- La combinaison (5%S, 15%L, 80%CPA) est la combinaison qui a présenté la meilleure résistance en compression, il a présente des valeurs proche de celle de ciment sans ajout (CPA) à court terme et une résistance supérieur à long terme, en revanche la combinaison (15%S, 35%L, 50%CPA) à présenté les plus faibles résistances de toutes les combinaisons étudiées, cette diminution de la résistance s'explique par le fait que la chaux émise dans ce cas par le ciment Portland

est faible, ne permettant pas l'élévation de la valeur de pH, car l'augmentation de la résistance se traduit par l'augmentation du pH, et le déclenchement des réactions par suite (référence)

**c) L'influence de variation de rapport (E/L) :**

L'analyse des résultats d'étude de l'influence de variation de rapport (E/L) de (0,30 à 0,40) pour teneur de sable de dune varié de (5 à 15)% et pour teneur de laitier (15, 25, 35)% respectivement et pour surface spécifique varie de (2500 à 3500)  $\text{cm}^2/\text{gr}$ , montrent que les résistances mécaniques à la compression s'abaissent lorsqu'on augmente le rapport E/L de (0,30 à 0,40) cette tendance et aussi vérifiée (respecté) pour finesse de mouture de 2500  $\text{cm}^2/\text{gr}$  et pour 3500  $\text{cm}^2/\text{gr}$ , par exemple pour finesse de mouture 3500  $\text{cm}^2/\text{gr}$  les combinaisons (5%S, 15%L, 80%CPA) et (10%S, 15%L, 75%CPA) la résistance à la compression à 28j diminuer de 19 % et 23,33 %, respectivement lorsqu'on varie E/L de 0,3 à 0,4.

**d) L'influence du temps :**

L'analyse des résultats de l'étude de l'influence du temps de durcissement sur l'évolution des résistances mécaniques à la compression, montre que tous les combinons étudiés on présentée une augmentation régulière des résistances mécaniques à la compression en fonction du temps, cette tendance et aussi vérifiée pour tous les finesses de mouture 2500  $\text{cm}^2/\text{gr}$  et 3500  $\text{cm}^2/\text{gr}$  et pour les rapports E/L (0,30 et 0,40); Ainsi nous pouvons remarquée que tous les combinaisons étudiées développent lentement leur résistance a la compression comparant avec celle de ciment sans ajouts (CPA), par exemple pour la combinaison (5%SDB, 15%LGH) à 7 jours la résistance est de 37 MPa et à 90 jours 65 MPa.

**e) Influence de la finesse de mouture (SSB) :**

L'analyse des résultats d'étude de l'influence de variation du finesse de mouture sur l'évolution de résistance a la compression des pâtes de ciment a base de (CPA, L.G.H, SDB), montre que le finesse à un effet positif puisque les meilleurs résultats sont obtenus pour sable de dune et de laitier les plus fins (SSB=3500 $\text{cm}^2/\text{gr}$ ).

Cette amélioration de résistance s'explique par l'effet que l'augmentation de finesse de mouture favorise la solubilité de laitier et sable de dune et par la suite l'interaction chimique entre la silice et aluminium contenant dans le laitier et la silice contenant dans sable de dune avec hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ce qui donné la naissance d'un nouveau gel CSH ce qui traduit par l'accroissement rapide de résistance en compression.

**RÉSUMÉE D'ANALYSE DE RÉSULTAT :**

En résumant, nous pouvons constater que le sable de dune et le laitier capable de développer une réaction pouzzolanique et hydraulique a la fois en milieu riche en chaux, cette réaction pouzzolanique et hydraulique est plus importante pour teneur de laitier est 15%, et le sable 5%, ce qui traduit par développement des résistances comparables et parfois supérieures au ciment témoin, et plus faible lorsque la teneur de laitier et 35% et de sable 15%.

On a montré aussi que l'augmentation de la finesse de mouture de (2500 à 3500)  $\text{cm}^2/\text{gr}$  à un effet très positif sur le développement de résistance, puisque les meilleurs résultats sont obtenus pour sable de dune et laitier les plus fins.

On a aussi montré que l'augmentation de rapport (E/L) de (0,30 à 0,40) affecte d'une manière significative l'évolution de résistance à la compression de toutes les combinaisons étudiées.

A la fin de cette partie d'étude deux combinaisons ont été retenir pour compléter nos études il s'agit de combinaison (5%S ,15%L) qui a présente une résistance mécanique proche de celle de ciment témoin a courte terme et supérieure à long terme, et celle de (10%S ,15%L) qui a présenté un comportement proche de celle (5%S ,15%L)

## 4.2.2 ÉTUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES DU LIANT :

### 4.2.2.1 Consistance et début et fins de prise :

L'étude de l'influences de l'ajout de sable de dune et de laitier finement broyé au ciment sur la consistance et sur le début et la fin de prise de liant a été évaluée sur la pâte pure , le seul variable est la nature de ciment d'où deux combinaisons ont été étudiées pâte P(1) (5%S ,15%L ,80%CPA )et la pâte P(2) (10%S ,15%L, 75%CPA) et celle de ciment témoin sans ajouts P(t) (100%CPA).

Les essais de consistance et de début et fin de prise ont été effectués suivant la norme **EN196-3**. Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 4.2

**Tableau 4.2** Temps de début et de fin de prise pour différents types des ciments étudiés.

Type de ciment	Quantité de ciment (g)	T (°C±2)	Quantité d'eau (%)	Début de prise	Fin de prise
P(t) (100%CPA)	400	20	25,50	2h :05min	3h :20min
P(1) (5%S ,15%L ,80%CPA)	400	20	24,50	2h :25min	5h :20min
P(2) (10%S ,15%L, 75%CPA)	400	20	23,00	2h :35min	5h :40min

### ANALYSE DES RESULTATS :

L'analyse des résultats des essais de consistance et de prise montrent que l'ajout du sable de dune et de laitier de proportion (5%S ,15%L) et (10%S ,15%L) , fait prolonge le délais de prise d'une manière significative on comparaison avec celle de ciment témoin ,on constat aussi que l'ajout de 10 % de sable de dune broyé démunie la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normal de la pâte de ciment donc il rends plus fluide cela est due a notre avis au particules de sable de dune broyé les plus fins qui agissent à la manière d'un lubrifiant ainsi que leur forme , d'autre part en remarque qu' il n'y a pas un effet significative sur le temps de début de prise et fin de prise lorsque la teneur de sable varie de 5 % à 10 % .



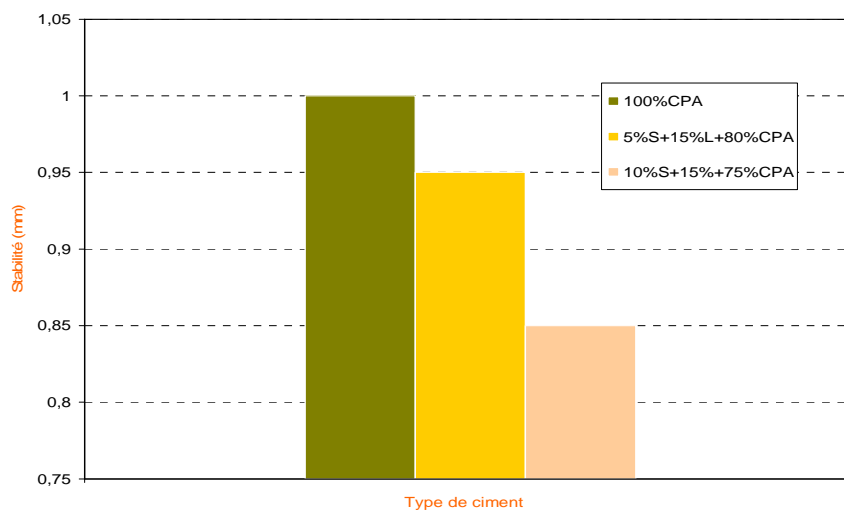
#### 4.2.2.2 Stabilités de liant (Gonflement) :

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume qui serait susceptible de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation, les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court ; L'essai est effectué sur la pâte pure de consistance normalisée suivant la norme **EN196-3**.

**Tableau 4.3** Gonflement de la pâte de ciment.

Type de ciment	Gonflement à froid (mm)	Gonflement à chaud (mm)	Stabilité (mm) (G.Froid -G.Chaud)
P(t) (100%CPA)	0,30	1,30	1,00
P(1) (5%S ,15%L ,80%CPA)	0	0,90	0,90
P(2) (10%S ,15%L, 75%CPA)	0	0,85	0,85



**Figure 4.37** stabilité volumétrique des ciments étudiée.

#### ANALYSE DES RESULTATS :

L'analyse des résultats d'essai de stabilité volumétrique montre que le ciment avec ajout du sable de dune et de laitier soit pour la combinaison (5%S ,15%L) ou bien (10%S ,15%L) on présenté une stabilité volumétrique meilleure par rapport au ciment sans ajout ce comportement est principalement attribué à leur faible teneur en chaux,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hydroxyde de calcium qui est souvent responsable de gonflement de ciment.

### 4.2.3 Résistance aux eaux agressives :

L'attaque de la pâte de ciment par les eaux agressives a été déterminée sur des éprouvettes cubiques de dimensions  $(2 \times 2 \times 2)$  cm<sup>3</sup> après 24 heures du coulage, les éprouvettes ont été démoulées puis conservées pendant 7 jours dans l'eau potable puis immédiatement placée dans les différentes solutions, elles ont été placées soit dans l'eau potable, soit dans une solution à 5 % de sulfate de sodium (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) soit dans une solution à 5 % chlorure de magnésium (5%) MgCl<sub>2</sub>.

Des essais mécaniques en compression simples ont été réalisés aux échéances 28 et 90 jours, afin de pouvoir suivre l'évolution de la résistance des éprouvettes dans les milieux agressifs en comparant ces derniers avec le milieu de l'eau potable.

Le coefficient de qualité (A) qui est défini la résistance de ciment aux eaux agressives et donner par la formule suivante :

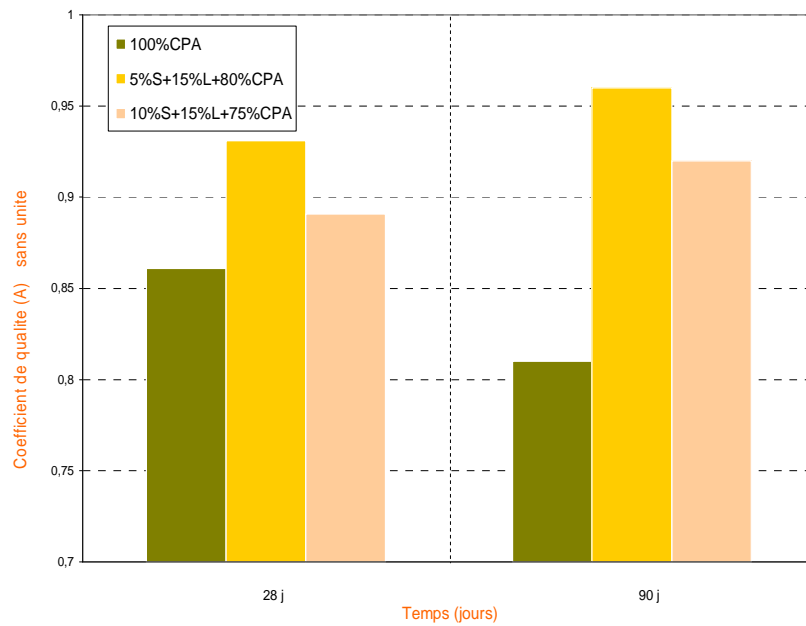
$$A = \frac{R_s}{R_{ep}}$$

Rs : résistance à la compression des ciments immergés dans différentes solutions agressives ;

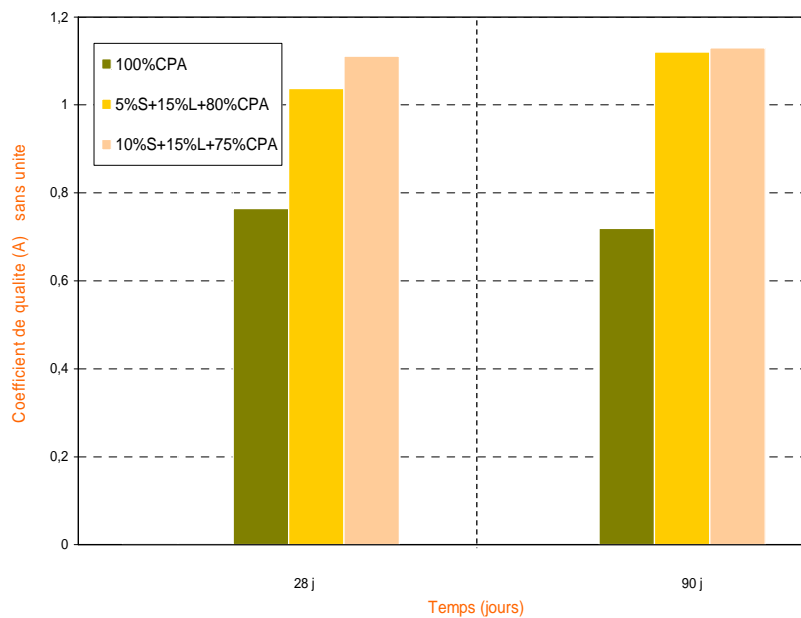
R<sub>ep</sub> : résistance à la compression des ciments immergés dans l'eau potable ;

Tableau 4.4 Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives.

Temps .C (jours)	Type de ciment			Milieux de conservation				
	%CPA	% S	% L	Eau potable	MgCl <sub>2</sub> (5%)		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (5%)	
				R <sub>ep</sub> (daN/cm <sup>2</sup> )	Rs (daN/cm <sup>2</sup> )	A	Rs (daN/cm <sup>2</sup> )	A
28	100	0	0	52,00	44,80	0,861	39,80	0,765
	80	5	15	47,00	43,75	0,931	48,74	1,037
	75	10	15	45,00	40,10	0,891	50,00	1,111
90	100	0	0	58,50	47,40	0,810	42,12	0,720
	70	5	15	65,00	62,40	0,960	72,80	1,120
	70	10	15	54,00	49,70	0,920	61,02	1,130



**Figure 4.38** Évolution du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution chlorure de magnésium 5% ( $MgCl_2$ ) en fonction du temps.



**Figure 4.39** Évolution du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution sulfate de sodium 5% ( $Na_2SO_4$ ) en fonction du temps.

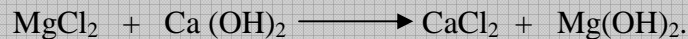
## ANALYSE DE RESULTATS :

### 1) Résistance à l'acide

L'analyse des résultats de variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution chlorure de magnésium ( $MgCl_2$ ) de concentration 5% pendant 28 et 90 jours montrent que le ciment de référence sans ajout présente une diminution de coefficient de qualité (A) de 5,92%

- par contre pour le ciment avec ajouts soit pour la combinaison (5%S ,15%L) ou bien (10%S ,15%L) on remarque une amélioration de coefficient de qualité (A) en fonction du temps par rapport au ciment témoin sans ajouts.

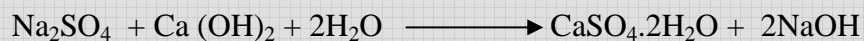
Donc l'incorporation des ajouts minéraux de sable de dune et de laitier finement broyé au ciment augmente la résistance de ciment aux acides cela est due au fait que le ciment portland, au cours de leur hydratation, libère une quantité considérable d'hydroxyde de calcium ( $CH$ ) peut être lixiviée à l'extérieur lorsque entre en contact avec  $MgCl_2$  sous forme de chlorures de calcium  $CaCl_2$  soluble



en plus l'exposition prolongée de la pâte de ciment peut favoriser le remplacement des ions calcium des CHS par des ions magnésium. Cette substitution produite donc des silicates de calcium-magnésium hydratés ((C,M) - S-H) qui ont des propriétés mécaniques relativement faibles, tandis que le ciment avec sable de dune et de laitier l'hydroxyde de calcium est consommé par une réaction pouzzolanique et hydraulique latente pour former à la fin des nouveaux hydrates stables.

### 2) Résistance au sulfate

L'analyse des résultats de variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution sulfatique ( $Na_2SO_4$ ) de concentration 5% pendant 28 et 90 jours figure (4.39) montre que le ciment témoin sans ajouts (CPA), à près 90 jours d'immersion dans la solution sulfatique 5%  $Na_2SO_4$  présente une diminution de coefficient de qualité de 0,765 à 28 jours à 0,720 à 90 jours donc une diminution de 5,88% cela peut être expliqué par l'effet que le ciment sans ajouts contenant une teneur élevée de  $C_3A$  et de hydroxyde calcium  $Ca(OH)_2$  comparant avec le ciment avec ajouts.



Contrairement au ciment sans ajout pour les pâtes de ciment avec ajouts soit pour la combinaison (5%S, 15%L) ou (10%S, 15%L) montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 28 jours et pour 90 jours cela est dû à l'augmentation de la valeur du pH l'alcante de milieu cimentaire (due à la formation de NaOH) ce qui favorise l'hydratation de laitier et stabilise la formation des cristaux de CSH.

#### **4.2.4 RÉSUMÉE D'ANALYSE DES RESULTATS :**

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de sable de dune et de laitier au ciment, fait prolonger le délai de prise ;

- Les résultats obtenus montrent aussi que l'ajout de 10 % de sable de dune broyé démunie la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment
- L'essai montre que le ciment avec ajout de sable de dune et de laitier soit pour la combinaison (5%S ,15%L) ou (10%S ,15%L) a présenté une stabilité volumétrique meilleure par rapport au ciment sans ajout.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de sable de dune et de laitier au ciment augmente la résistance des ciments aux acides, et aux sulfates, ce comportement est principalement attribué à leur faible teneur en chaux, car l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  est le principal hydrate concerné par les agressions chimiques. Par la suite, consommer à la fin par une réaction pouzzolanique et hydraulique latent, il en résulte que les liants à effet pouzzolanique et hydraulique latent (consommation d'hydroxyde de calcium et formation d'hydrates), par conséquent le ciment avec ajouts de sable de dune et de laitier sont plus durables que le ciment sans ajouts, donc une meilleure stabilité aux agressions chimiques que le ciment sans ajout.

### **4.3 ETUDE DES PROPRIETES DE MORTIER A BASE DU CIMENT AVEC AJOUTS SABLE DE DUNE ET LAITIER**

#### **4.3.1 Propriétés mécanique :**

Afin de étudier l'influence de l'ajout de sable de dune et de laitier granule finement broyé au ciment sur les propriétés mécaniques et sur le développement de retrait et gonflement de mortier nous avons effectués des essais sur mortier normal sur des éprouvettes de dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ , à raison de trois éprouvettes par essai ;

dans tous les essais le rapport  $E / L$  est maintenue identique pour le mortier témoin a base de ciment sans ajout, et pour le mortier a base de ciment avec ajout sable de dune et de laitier broyé ; concernant les conditions de durcissement, on a procédé à un durcissement naturel (conservation à l'eau,  $T=20^\circ\text{C}$ ) des éprouvettes jusqu'à leur test

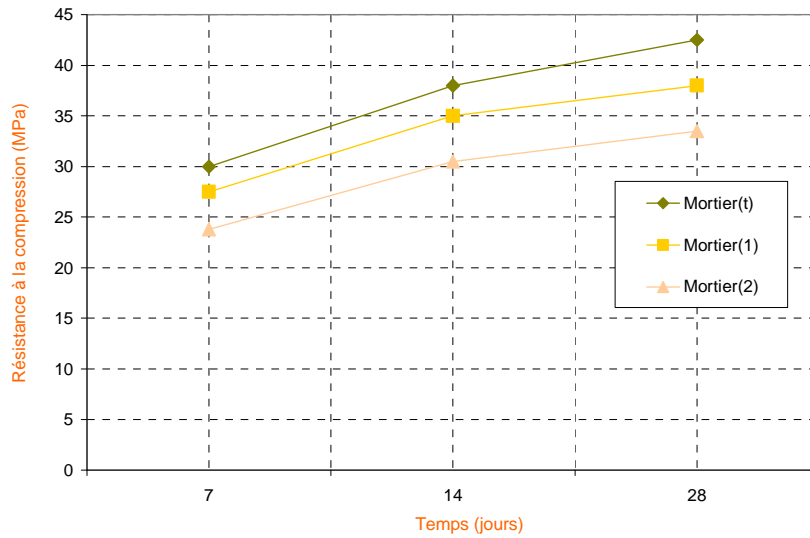
#### **Composition de mortier normal :**

Sable normalise : 1350 gr  
Ciment : 450 gr  
Eau : 250 gr

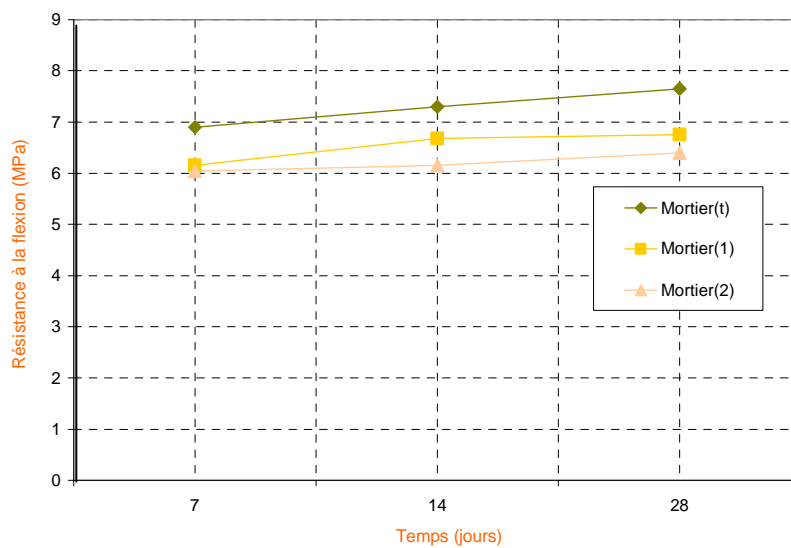
Les résultats des essais de compression, flexion et traction par flexion pour différents types de mortier étudiés en fonction du temps, sont rapportées dans le tableau 4.5

**Tableau 4.5** Résistances mécaniques de différents types de mortier étudiés en fonction du temps

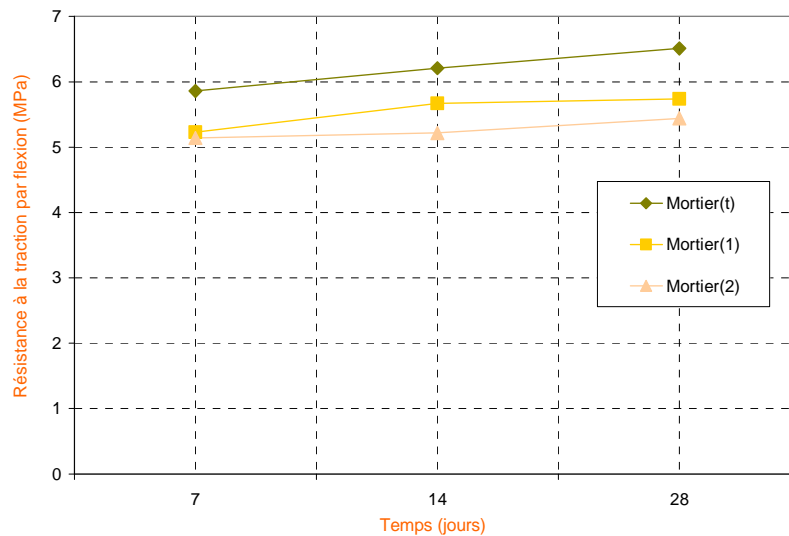
Type de mortier	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)			Résistance à la traction par flexion (MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j	7j	14j	28j
Mortier (t) (référ)	30,00	38,00	42,50	6,90	7,30	7,65	5,86	6,21	6,51
Mortier (1) (5%S, 15%L, 80%CPA)	27,50	35,50	38,00	6,15	6,68	6,75	5,23	5,67	5,74
Mortier (1) (10%S, 15%L, 75%CPA)	23,80	30,50	33,50	6,04	6,15	6,40	5,14	5,22	5,44



**Figure 4.40** Évolution de la résistance à la compression pour différents types des mortiers étudiés en fonction du temps.



**Figure 4.41** Évolution de la résistance à la flexion pour différents types des mortiers étudiés en fonction du temps.



**Figure 4.42** Évolution de la résistance à la traction par flexion pour différents types des mortiers étudiés en fonction du temps.

#### 4.3.3.4 ANALYSE DES RESULTATS

##### 1) Résistance à la compression :

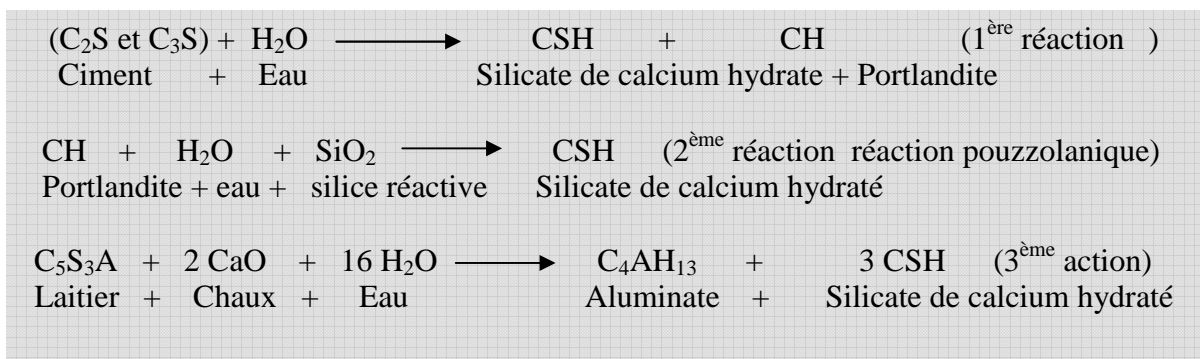
L'analyse des résultats des essais de résistance à la compression des mortiers figure (4.40) montre que l'évolution de résistance à la compression en fonction de temps pour différents types de mortier étudiés en montrant des tendances similaires à celle obtenant pour la pâte pure, donc on constater aussi :

- Que les résistances de tous les mortiers soit pour mortier témoin ou mortier à base de ciment avec ajout augmente régulièrement en fonction du temps et ne présente aucune chute de résistance, donc autant que l'hydratation se poursuit, plus les produits d'hydratation sont formés (notamment la formation des CSH), les quels conduisent à une augmentation dans la résistance mécanique.

- on constater aussi que le mortier témoin à base de ciment sans ajout mortier (t) présent pour tous les âges de durcissement (7, 14 et 28) jours des résistances plus élevées que celle des mortiers à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier, ceci montre que la substitution de ciment par (5%S, 15%L) mortier (1) et (10%S, 15%L) mortier (2) entrent une diminution de résistance mécanique en compression de mortier, cette diminution est plus importante pour mortier (2) que celle de mortier (1) ;



Cette diminution est de (8,33 % et 10,58%) pour mortier (1) et de (20,6 % et 21,11%,) pour mortier (2) respectivement pour 7 jours et 28 jours , la diminution de résistance est principalement attribuée à la diminution de l'activant (hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dégagé lors de hydratation de ciment ce qui ne permettant pas l'élévation de la valeur du pH et par la suite la dissolution de sable de dune et de laitier, par l'interaction chimique enter (silice + aluminium) contenant dans le laitier et (le silice) contenant dans le sable de dune avec (hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) , Le résultat de cette réaction est la production des nouvelle hydrates (C.S.H) ces réactions peut être écrite par l'équations suivantes :



## 2) Résistance à la flexion et traction par flexion :

Les résultats d'essais de résistance à la flexion et traction par flexion figures (2.41 et 4.42) montrent des tendances similaires à la résistance à la compression, toutefois la diminution de la résistance à la flexion et traction par flexion pour mortier (2) est plus grand que celle de mortier (1) elle est d'ordre (10,86 % 11,76%) pour mortier (1) et de (12,46 % 16,33%) pour mortier (2) respectivement pour (7 et 28) jours , donc nous pouvons observer aussi que lorsque la teneur de sable de dune augmente de (5% à 10%) la résistance à la flexion et traction par flexion diminuée en plus ;

### 4.3.2 Changements volumétriques

Comme déjà mentionné dans la recherche bibliographique, la pâte de ciment, même en absence de chargement, manifeste des variations dimensionnelles on distingue des gonflements et des retraits. Le but de cette étude est d'évaluer expérimentalement la contribution de l'ajout de sable de dune et de laitier au développement de retrait et gonflement.

En fait, selon les circonstances, jusqu'à cinq types de retrait peuvent se développer dans un béton, ces cinq types de retrait sont le retrait plastique, **le retrait de séchage**, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation

Tous les types de retrait provoquent des contraintes internes qui peuvent faire fissurer la pâte selon le type de retrait en cause, la contraction d'un élément de béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés, se matérialise par l'apparition de fissures à la surface de l'élément de béton ou dans l'ensemble de la masse de béton, en plus d'être peu esthétiques, ces fissures peuvent causer des dommages bien plus importants, tels qu'accélérer la corrosion des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs dans le béton [83].

#### Retrait de séchage

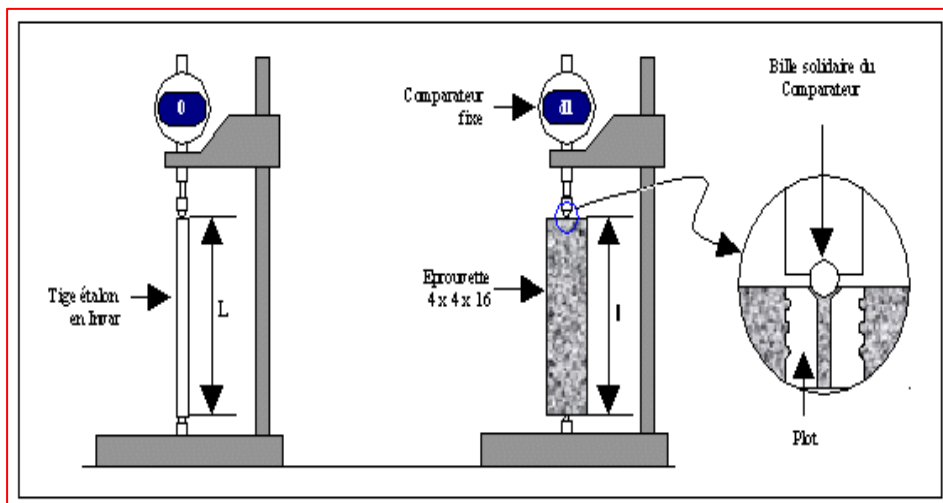
Le retrait de séchage est un retrait de dessiccation qui se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant dont le degré hygrométrique est inférieur à celui du réseau capillaire de la pâte de ciment hydrate, cette situation favorise l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir de leurs extrémités exposées à l'air plus sec, comme c'est aussi le cas avec le retrait plastique, l'évaporation de l'eau contenue dans le béton entraîne une diminution de la masse de béton et le développement d'un gradient d'humidité dans l'élément de béton

Le retrait de séchage s'arrête lorsque l'équilibre entre l'humidité relative ambiante et celle du béton est atteint ou lorsque les forces qui retiennent l'eau à l'intérieur des petits pores capillaires sont égales aux forces qui causeraient l'évaporation de cette eau [83] ; La valeur ultime de ce type de retrait ainsi que la vitesse de son développement dépend de la quantité d'eau disponible (non liée) dans le béton durci et de la mobilité de cette eau.

### 4.3.2.1 Mesure de retrait :

Cette méthode de mesure dite **Plots** consiste à mesurer la variation de la longueur d'une éprouvette de dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ , à partir de plots placés à chaque extrémités de l'éprouvette la figure présente un schéma du montage utilisé. Cette technique de mesure a pour désavantage majeur de ne pouvoir commencer les mesures qu'après le démoulage de l'échantillon, soit à partir de 24 heures, négligeant ainsi une très grande partie du retrait endogène dont le développement débute dès les premières heures, d'autre part cette technique ne tient pas compte des microfissures qui peuvent faire leur apparition dans l'éprouvette [83].

En fait, cette technique de mesure normalisée par la norme **ASTM C157** est très bien adaptée pour mesurer le **retrait de séchage** dans les bétons conventionnels de rapport eau de ciment élevé pour les quels le retrait de séchage est le seul type de retrait qui se développe de manière significative.



**Figure 4.43** schéma de dispositif utilisé pour mesurer le retrait de séchage.

Afin d'étudier expérimentalement l'influence de l'ajout de sable de dune et de laitier sur le développement de retrait de séchage et le gonflement, trois séries de mortier ont été confectionnées sur des éprouvettes de dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  à base de ciment sans ajout mortier de référence et des éprouvettes à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier de proportions de sable de dune et de laitier ( 5%S ,15%L ) mortier(1) , et ( 10%S ,15%L ) mortier (2) , dans tous les essais le rapport E /L est maintenu égale à 0,50 toutes les éprouvettes sont préparées à par tire de sable normalisé .

Pour le milieu de conservation les éprouvettes sont conservées à l'air libre pour évalués a la fois le retrait de séchage et la variation de masse (perde de masse) et sous l'eau ( $t = 20C^0$ ) pour évalués la variation de masse (gaine de masse) et gonflement. Les résultats obtenus pour 3j ,7j ,14j, 28j sont rapportées dans les tableaux. : 4.7 ,4.8, 4.9 et 4.10

Tableau 4.6 Récapitulation des paramètres des formulations des mortiers

Formulation	Mortier (t)	Mortier (1)	Mortier (2)
Ciment (g)			
CPA	450	360	337,5
SDB	-	22,5	45
LGH	-	67,5	67,5
Sable (g)	1350	1350	1350
Eau (g)	225	225	225
S/C		3	
E/C		0,5	

**Tableau 4.7** Variations de la masse des mortiers en fonction de temps cas de conservation a l'air

Type de mortier	La variation de masse $\Delta M/M$ (%)			
	temps			
	3j	7j	14j	28j
Mortier (t) (Référence)	2,52	2,88	3,24	3,97
Mortier (1) (5%S, 15%L)	3,25	4,16	4,70	5,06
Mortier (2) (10%S, 15%L)	3,11	3,85	4,22	4,58

**Tableau 4.8** Variations de la masse des mortiers en fonction de temps cas de conservation a l'eau

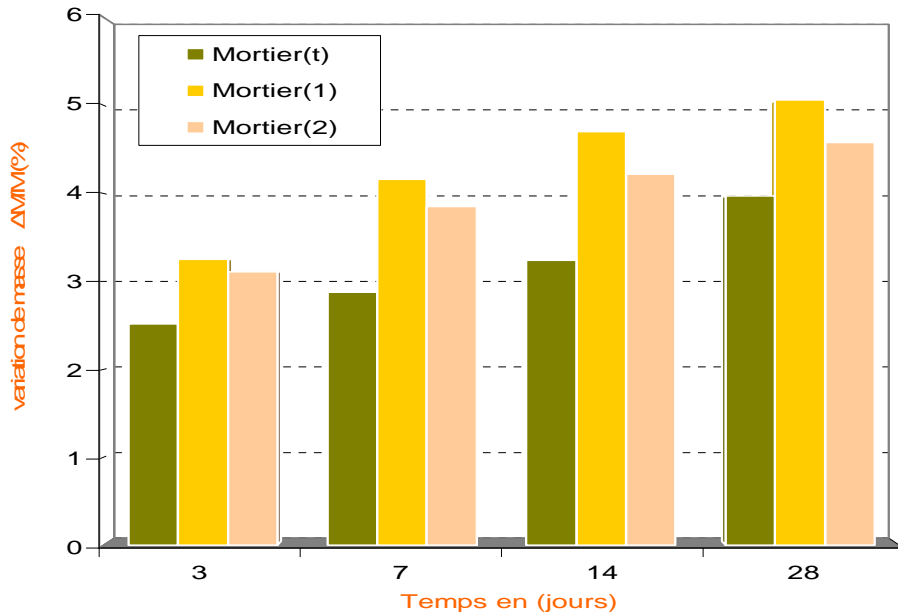
Type de mortier	La variation de masse $\Delta M/M$ (%)			
	temps			
	3j	7j	14j	28j
Mortier (t) (Référence)	0,50	0,72	0,90	1,09
Mortier (1) (5%S, 15%L)	1,44	1,61	1,62	1,62
Mortier (2) (10%S, 15%L)	1,46	1,65	1,83	1,83

**Tableau 4.9** Variations linéaires des mortiers en fonction du temps cas de conservation a l'air.

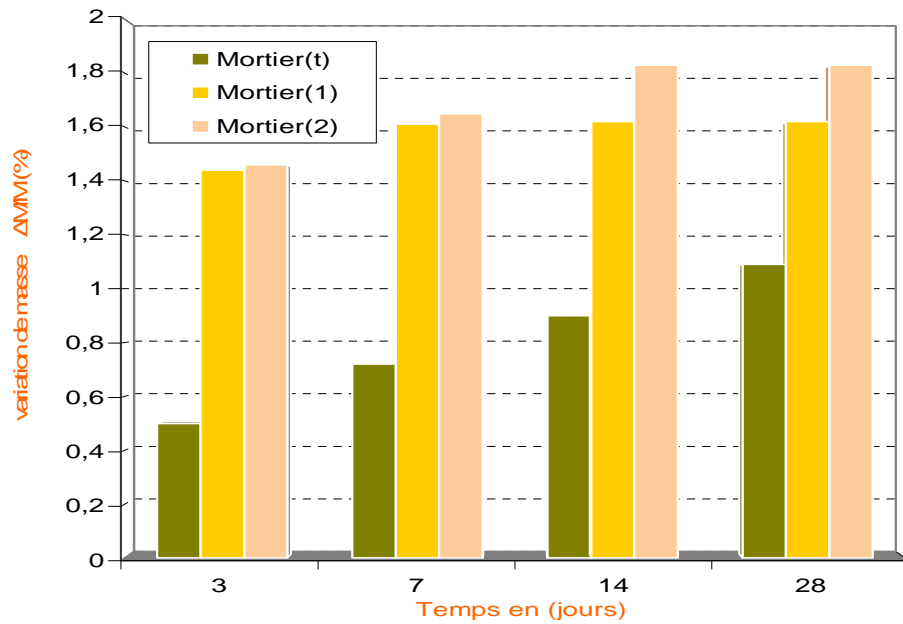
Type de mortier	La variation linéaire $\Delta L/L$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )			
	temps			
	3j	7j	14j	28j
Mortier (t) (Référence)	220	342	450	512
Mortier (1) (5%S, 15%L)	222,5	346	455.5	520
Mortier (2) (10%S, 15%L)	221,5	344	453	515

**Tableau 4.10** Variations linéaires des mortiers en fonction de temps cas de conservation a l'eau.

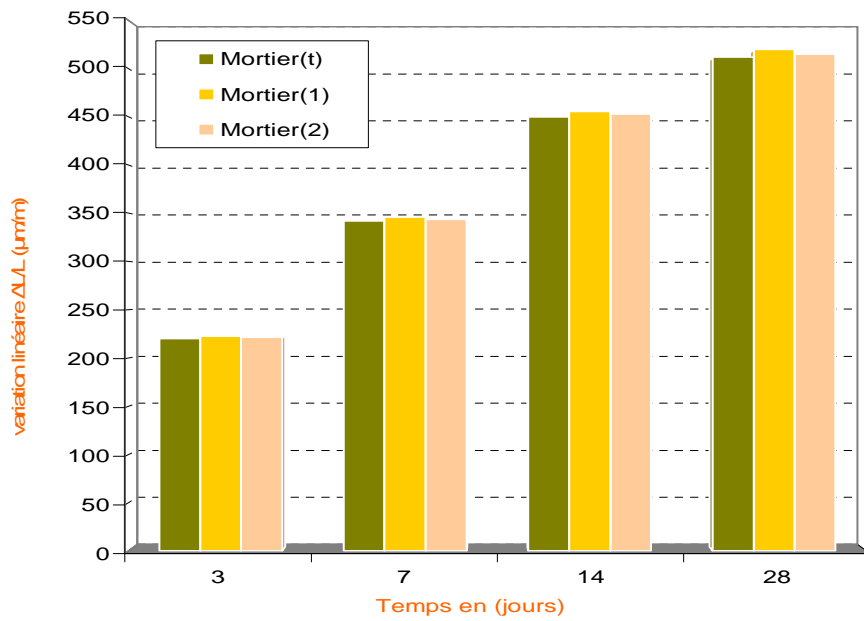
Type de mortier	La variation linéaire $\Delta L/L$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )			
	temps			
	3j	7j	14j	28j
Mortier (t) (Référence)	80	98	120	126
Mortier (1) (5%S, 15%L)	74	90	108	115
Mortier (2) (10%S, 15%L)	78	93	110	124



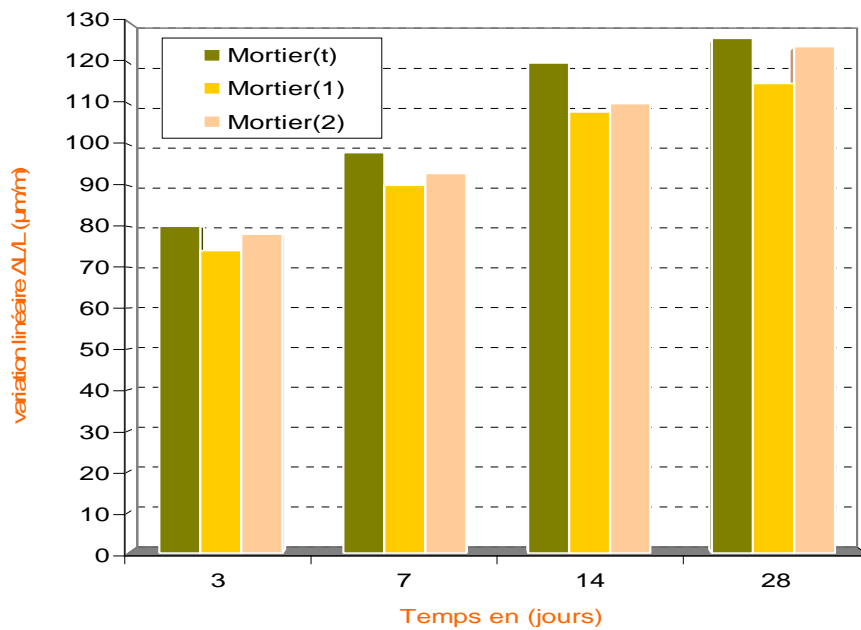
**Figure 4.44** Variations de la masse des mortiers en fonction de temps cas de conservation à l'air



**Figure 4.45** Variations de la masse des mortiers en fonction de temps cas de conservation à l'eau.



**Figure 4.46** Variations linéaire des mortiers en fonction de temps cas de conservation à l'air.



**Figure 4.47** Variations linéaire des mortiers en fonction de temps cas de conservation à l'eau.

#### 4.3.2.1 ANALYSE DE RESULTATS :

##### 1) variation massique :

L'analyse de résultats de variation massique figure (4.45) montre que les éprouvettes conservées dans l'eau que soit a base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier finement broyé au celle sans ajouts, montrent tous un gagne du poids, signe que l'eau tend à occuper les vides de la pate : ceux occasionnes par l'air occlus à la mise en place et les vides produits par la contraction le chatelier au fur et à la mesure de l'hydratation.

Pour les éprouvettes qui on été conservées dans l'air figure (4.46) on observe des pertes de poids, qui correspondent à un départ d'eau par évaporation, on remarque que la perte de poids des éprouvettes confectionne a base de liant ciment avec ajout sable de dune et de laitier granule broyé est plus élevée que celle des éprouvettes a base de ciment sans ajout.

##### 2) variation linéaire :

L'analyse des résultats de variation linéaire (retrait de séchage), figure (4.46) montre que les éprouvettes à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier mortier (1) et mortier (2) présentent un taux de retrait légèrement plus élevé que celle enregistrée pour les éprouvettes à base de ciment sans ajout mortier (t) cependant on constate que le retrait le plus petit est caractérisé le mortier (t) puis vient ceux de mortier (2) le retrait le plus grand est enregistré pour mortier (1).

Nous pouvons constaté aussi pour les éprouvettes conservées dans l'eau que les éprouvettes à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier mortier (1) présent un taux de gonflement le plus faible de tout les éprouvettes étudiées ceci montre que le portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dégage lors de hydratation du ciment qui est contrairement à la formation des autres hydrate se fait avec augmentation de volume se trouve dans le mortier (1) est stabilisé mieux que les éprouvettes du mortier à base de ciment sans ajout mortier (t) et mortier (2) .

#### 4.3.3 RESUME D'ANALYSE RESULTATES :

Les essais de laboratoire réalise dans cette partie de étude effectuent sur mortier normale montre que les résultats de résistance à la compression du mortier a base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier (5%S, 15%L), (10%S, 15%L) respectivement mortier (1), mortier (2) présentant des tendances similaires aux résultats de résistance à la compression obtenant sur la pate pure ; Pour les résultats d'essais de résistance à la flexion et traction par flexion montrent aussi des tendances similaires à la résistance à la compression, toutefois



la diminution de la résistance à la flexion et traction par flexion pour mortier (2) est plus grande que celle de mortier (1). Les résultats obtenus montrent aussi que les mortiers à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier mortier (1) et mortier (2) développent de retrait légèrement plus élevé que celle de mortier à base de ciment sans ajout mortier (t), en revanche l'expansion du mortier à base de ciment sans ajout est plus importante que ceux du mortier avec ajout de sable de dune et de laitier.

## 4.4 ETUDE DU PROPRIETES DE BÉTON À BASE DU CIMENT AVEC AJOUTS SABLE DE DUNE ET LAITIER

### L'objectif :

L'objectif de cette partie d'étude expérimentale est d'étudier l'influence de l'ajout de sable de dune et le laitier granulé finement broyé sur les propriétés de béton a savoir propriétés mécanique ( résistance à la compression , résistance à la flexion , résistance à la traction par flexion ), la déformabilité , l'absorption , stabilité de béton a l'eau ( caractérise par coefficient de ramollissement ), ainsi que la perméabilité ( la perméabilité est un indicateur de durabilité de béton ) .

### 4.4.1 Formulation et dosage du béton :

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'intérieur 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 [84]

L'étude de formulation de béton a pour but de définir la composition du béton constituent différents granulats dont on dispose, dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage en cause, la méthode utilise pour déterminer les compositions du béton pour ce travail, c'est la méthode de B.SCRAMTAIV ou la méthode des volumes absolus, 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

### 4.4.2 Paramètres de formulation :

Tableau 4.11 récapitulation des caractéristiques physiques du béton

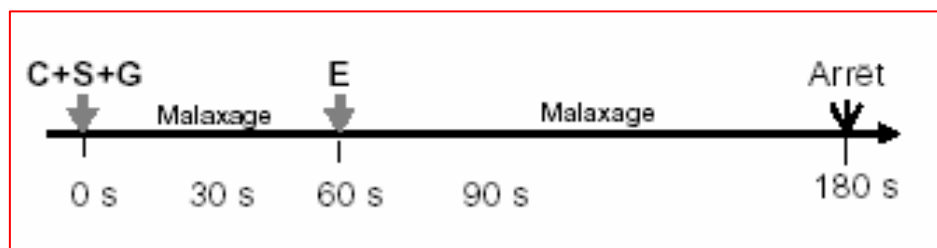
$R_b$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$R_c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	A	AC (cm)	$\rho_{abs}^G$ (Kg/l)	$\gamma_{app}^G$ (Kg/l)	$\gamma_{app}^C$ (Kg/l)	$\rho_{abs}^C$ (Kg/l)	$\alpha$	$V_v$
360	42,5	0,6	5	2,61	1,42	2,63	3,10	1,33	0,45

**Tableau 4.12** Paramètres de formulation des bétons

Formulation	B[t] REFERENCE	B [1] (5%SB+15%LG)	B [2] (10%SB+15%LG)
Clinker + gypse	385	308	288,75
Ciment Laitier	-	19,25	38,50
(kg/m <sup>3</sup> ) Sable DB	-	57,75	57,75
Gravier (kg/m <sup>3</sup> )	1242,82		
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	555,10		
Eau (L)	192,5		
C/E	0,50		
G/S	2,23		
Affaissement (cm)	5		

#### 4.4.3 Méthode de 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. Les mélanges sont confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 20 litres suivant la norme NF EN 196-1. La procédure de malaxage des mélanges est récapitulée ci-dessous :



**Figure 4.48** Procédure de malaxage des mélanges

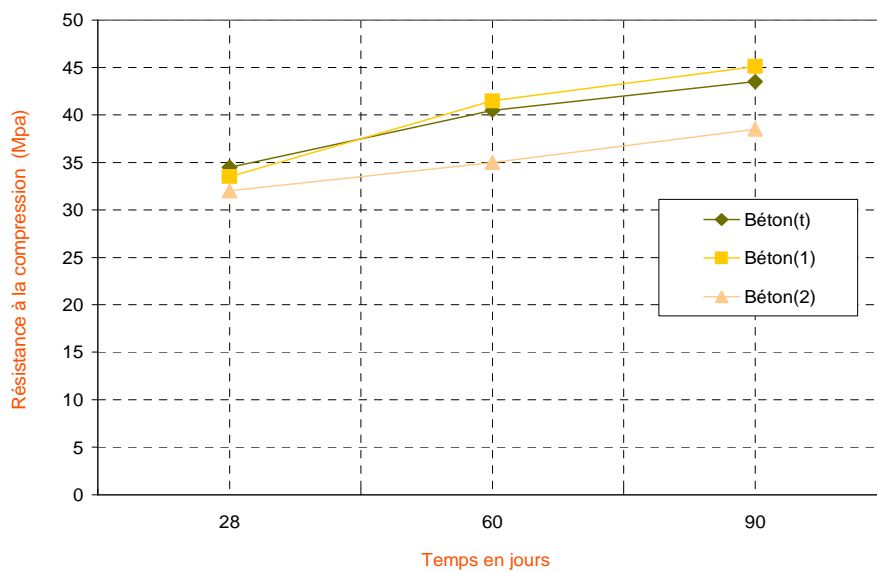
#### 4.4.4 Propriétés mécaniques du béton :

Afin d'évaluer expérimentalement l'influence de l'ajout de sable de dune et de laitier au ciment sur la performance mécanique de béton nous avons confectionné des éprouvettes afin de effectuer des essais de compression, flexion et traction par flexion sur des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm<sup>3</sup>, prismatiques (10×10×40) cm<sup>3</sup>, respectivement, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à température (20°C±1°C) à près 24h de leur démoulage.

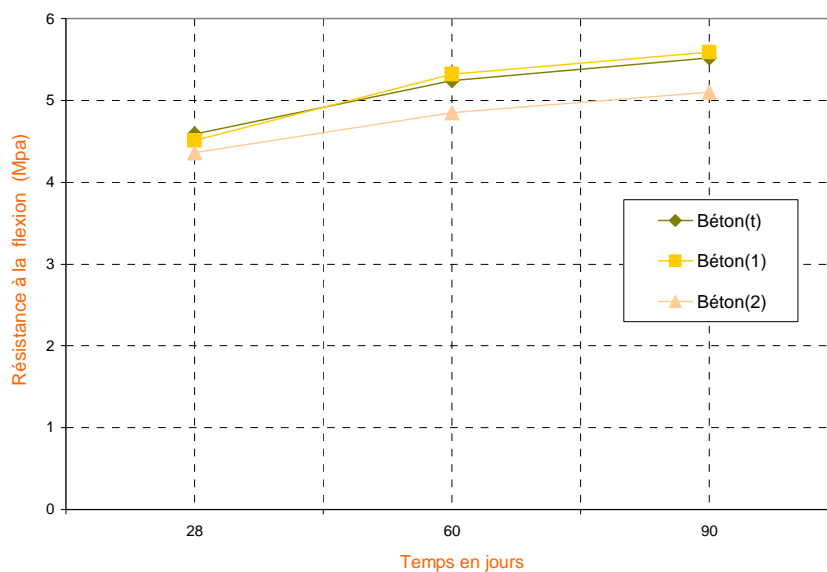
Les résultats des essais de compression, et de flexion et traction par flexion en fonction du temps pour différents types du béton étudié (à base du ciment avec ajouts de sable de dune et le laitier, et sans ajouts) sont présente sous dessous :

**Tableau 4.13** Résistance du béton à la compression, flexion, et traction par flexion en fonction du temps pour différents types des bétons étudiés

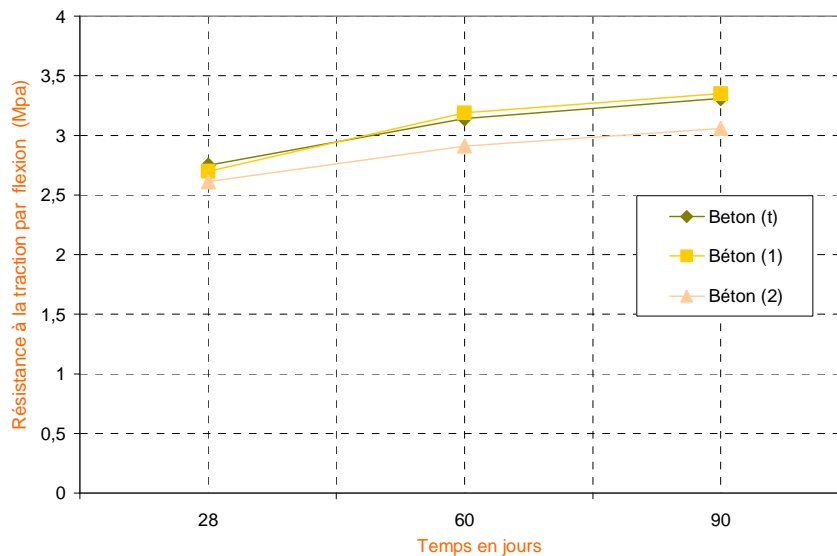
Type de béton	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)			Résistance à la traction par flexion (MPa)		
	28j	60j	90j	28j	60j	90j	28j	60j	90j
Béton [T]	34.5	40.5	43.5	4.59	5.24	5.52	2.75	3.14	3.31
Béton [1]	33.5	41.5	45.12	4.51	5.32	5.59	2.70	3.19	3.35
Béton [2]	32	35	38.5	4.36	4.85	5.10	2.61	2.91	3.06



**Figure 4.49** Évolution de résistance à la compression pour différents types des bétons étudiés en fonction du temps.



**Figure 4.50** Évolution de la résistance à la flexion pour différents types des bétons étudiés en fonction du temps.



**Figure 4.51** Évolution de la résistance à la traction par flexion pour différents types des bétons étudiés en fonction du temps.

#### 4.4.2.1 ANALYSE DE RESULTATS :

L'analyse des résultats de résistance à la compression du béton à base de ciment sans ajout béton [t], et béton à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier : béton [1] et béton [2] en fonction du temps (28, 60 et 90) jours, figure (4.41) montrent des tendances similaires à celle des résistances en compression obtenant sur la pâte pure, donc on peut constater par exemple que le béton à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier de proportion (5%S, 15%L) béton [1] a présenter une résistance en compression inférieure à celle de béton de référence à 28 jours de (2,90 %) et comparable à 60 jours et une résistance supérieure à celle de béton de référence béton [t] à 90 jours de 3,59 % ;

Pour les résultats de résistance à la flexion et traction par flexion on constate des tendances similaires à celle de résistance en compression, toutefois on remarque que la diminution ou bien l'augmentation de résistance à la flexion et traction par flexion est d'ordre inférieur que celle de résistance en compression, pour le béton [1] par exemple la diminution et l'augmentation est de l'ordre (1,74%, 1,27%) et (1,81%, 1,20%) respectivement pour la résistance à la flexion et traction par flexion à 28 et 90 jours.

#### 4.4.3 La Perméabilité :

La perméabilité 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.). La perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation, un écoulement de cette eau capillaire interstitielle apparaît lorsque le matériau subit une dessiccation ou lorsqu'il est soumis à un gradient de pression ou de concentration, la perméabilité à l'eau est utilisée pour caractériser le degré d'interconnexions de la structure poreuse des bétons.

Les essais de perméabilité consistent à forcer un fluide, usuellement de l'eau ou du gaz, à s'écouler sous une pression donnée à travers le matériau, théoriquement, la perméabilité est un paramètre intrinsèque du matériau et ne doit pas dépendre du fluide utilisé, en pratique, il en est autrement du fait que le gaz possède une viscosité moindre que celle de l'eau et pénètre plus facilement à l'intérieur du matériau, on distingue par conséquent la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz, selon Neville, les essais de perméabilité au gaz donnent des valeurs 6 à 100 fois supérieures à celles des essais à l'eau, l'utilisation de l'eau comme fluide est la méthode la plus répandue.

##### 4.4.3.1 Dispositif expérimental et technique de mesures :

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 (*écoulement unidirectionnelle*). 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, à la fin de l'essai la pression atteindra 10 bars.



**Figure 4.52** Dispositif expérimental utilisé pour mesurer la perméabilité de béton

#### 4.4.3.2 Le coefficient de perméabilité spécifique $K_p$ :

La perméabilité à l'eau d'un mortier ou d'un béton est mesurée avec l'eau la perméabilité à l'eau peut être indiquée par le coefficient de perméabilité spécifique  $K_p$  (désigné par la suite par perméabilité à l'eau), ce coefficient dépend de plusieurs paramètres,

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

Avec :

$K_p$ : coefficient de perméabilité spécifique [m/s] (perméabilité à l'eau)

$k$  : coefficient qui prend en considération le diamètre de l'éprouvette

$F$  : section de l'éprouvette [cm<sup>2</sup>]

$Q$  : quantité d'eau qui traverse l'éprouvette en [cm<sup>3</sup>]

$H$  : épaisseur de l'éprouvette dans la direction de l'écoulement

$\eta$  : viscosité dynamique de l'eau d'essai [Ns/m<sup>2</sup>] (eau à 20 °:  $\eta = 0,89$  Ns/m<sup>2</sup>)

$\zeta$  : temps de l'essai [s]

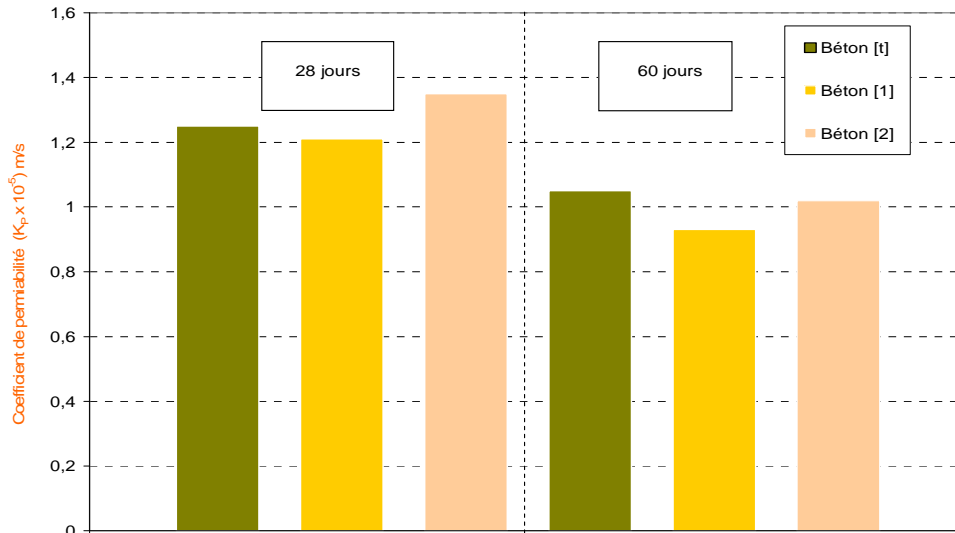
$p_1$  : pression à l'entrée, absolue [N/m<sup>2</sup>]

$p_2$  : pression à la sortie, absolue [N/m<sup>2</sup>]

Tableau 4.14 Coefficient de perméabilité pour différentes types des bétons études

Type de béton	Ages d'éprouvettes (jours)	Q (ml)	$K_p$ (m/s)
Béton [t]	28	54	$1,25 \times 10^{-5}$
	60	45	$1,05 \times 10^{-5}$
Béton [1]	28	52	$1,21 \times 10^{-5}$
	60	40	$0,93 \times 10^{-5}$
Béton [2]	28	58	$1,35 \times 10^{-5}$
	60	44	$1,02 \times 10^{-5}$

$P_1 - P_2 = 10$ bars,  $\tau = 9$  heures,  $F = 176,72$  cm<sup>2</sup>,  $k = 1$ ,  $\eta = 0,89$ .



**Figure 4.53** Variation du coefficient de perméabilité pour différent types des bétons en fonction du temps

#### 4.4.3.3 ANALYSE DE RESULTATS :

La perméabilité à l'eau est utilisée pour caractériser le degré d'interconnexion de la structure poreuse des bétons ;

L'analyse des résultats des essais de perméabilité figure (4.53) montre que à l'âge à 28 jours le béton a base de ciment avec ajout de sable de dune et laitier de proportion ( 5%S ,15%L) présenter un coefficient de perméabilité légèrement plus faible que celle de béton de référence sans ajout , en revanche le béton [2] béton a base de ciment avec ajout de sable de dune et laitier de proportion ( 10%S ,15%L) présenter un coefficient de perméabilité plus élevé que le béton de référence et a celle de béton [1] ,ceci montre en premier lieu que le volume hydrate C.S.H formé par un liant n'est pas un indicateur du degré d'interconnexion puisque il n'ya pas une corrélation forte entre la variation de coefficient de la perméabilité et le variation du coefficient d'absorption et par la suite avec la porosité du béton durci ,ceci est en concordance avec les résultats publié par A. Bessa [86 ]

En deuxième lieu la réactivité chimique de sable de dune et de laitier à engendrée un arrangement de la microstructure une modification de la structure poreuse de béton l'effet microstructural est plus prononcé lorsque la teneur de sable de dune est 5% que la teneur de sable de dune est de 10% ;



Ainsi on constate qu'après 60 jours que toutes les types de béton étudiés soit pour le béton a base de ciment sans ajout ou bien avec ajout ont présenté une diminution du coefficient de perméabilité  $K_p$  ceci montre que le degré d'interconnexion des pores dépend au degré d'avancement d'hydratation dans le temps ;

Nous pouvons constater également que la substitution partielle du ciment par (5%S 15%L) et par (10%S 15%L) respectivement a conduit à une réduction de la perméabilité de l'ordre (11,42 et 2,85) % après 60 jours.

En résumer nous pouvons constater que l'ajout de sable de dune et de laitier au ciment engendre une modification de la structure poreuse du béton durci donc un effet microstructurale cet effet est plus prononce avec l'avancement de hydratation dans le temps et lorsque la substitution du ciment par de sable de dune et de laitier est de (5%S 15%L) cet effet agit positivement sur la performance (durabilité) du béton par la réduction de la perméabilité du béton durci.

#### 4.4.4 Absorption d'eau par immersion :

L'essai d'absorption d'eau par immersion de béton est effectué à l'âge de 28 jours sur des éprouvettes de forme cubiques de dimensions (10×10×10) cm<sup>3</sup> qui ont été conservées à l'eau (T = 20°C).

Avant de mesurer l'absorption, les éprouvettes ont été pré conditionnes dans l'étuve à température enverrons (T= 80°C) jusqu'à une masse constante les éprouvettes ont été immergé totalement dans l'eau pendant une durée de 24h (c'est à dire jusqu'à saturation du matériau) en le plaçant dans un récipient, le coefficient d'absorption (A) et donner par l'équation :

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

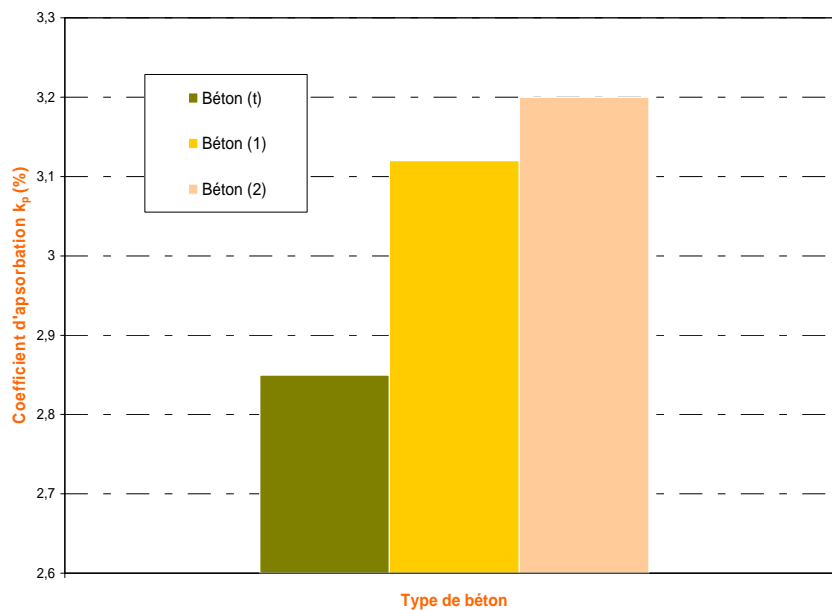
avec :

A : coefficient d'absorption

M1: poids sec du matériau

M2: poids humide du matériau

Les valeurs du coefficient d'absorption pour déférents types de bétons étudiés sont présentées sous dessous (figure 4.54).



**Figure 4.54** Variation du coefficient d'absorption d'eau pour déférents types des bétons étudiés.

#### 2.4.4.1 ANALYSE DE RESULTATS :

Le volume poreux du béton, indépendamment de la facilité avec laquelle un fluide peut traverser, se mesure par absorption la mesure de l'absorption du béton, peut aussi fournir une indication sur la porosité ;

La porosité peut se mesurer à l'aide d'un porosimètre au mercure Cook et Hover [58] ou bien par la méthode de déplacement du méthanol ou l'hélium D<sup>ef</sup>. Mellas 2003 [87] ;

L'analyse des résultats d'essais d'absorption pour différents types de béton étudiés figure ( 4.46 ) montrent que le béton à base de ciment sans ajouts béton [t] présente un coefficient d'absorption, ( $A=2,85\%$ ) plus faible que celui de béton avec ajout de sable de dune et de laitier : béton [1] ( $A=3,12\%$ ) et béton [2] ( $A=3,20\%$ ) , en revanche le béton [2] présente un coefficient d'absorption le plus élevé , ceci démontre que l'effet chimique ou bien la réactivité chimique du sable de dune et de laitier ne produit pas des nouvelles hydrates suffisantes qui viennent diminuer la porosité du béton durci et par conséquent l'absorption .

On constate aussi que l'absorption du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout de sable de dune.

Finalement d'après la norme NBN B15-211(1989) le béton [1] et béton [2] est considéré comme un bon béton puisque leur coefficient d'absorption est inférieur à 5%.

#### 4.4.5 Coefficient de ramollissement

La stabilité des matériaux a l'eau est définie par le coefficient de ramollissement [85], Il représente le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau ( $R_{hum}$  : humide) à la résistance de compression du matériau sec ( $R_{sec}$ ).

Afin d'étude l'influence de l'ajout de sable de dune et de laitier sur la stabilité de béton a l'eau l'essai est réalisé a l'âge de 28 jour sur des éprouvettes de forme cubique de (10×10×10) cm

$$K = \frac{R_{hum}}{R_{sec}}$$

Tableau 4.15 : Valeur de coefficient de ramollissement pour différents types des bétons étudiés.

Type de béton	$R_{hum}$ (daN/cm <sup>2</sup> )	$R_{sec}$ (daN/cm <sup>2</sup> )	K
Béton [t]	30	35	0,86
Béton [1]	28,90	34	0,85
Béton [2]	27,40	33	0,83

##### 4.4.5.1 ANALYSE DE RESULTATS :

L'analyse des résultats obtenus montrent que le béton a base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier béton [1] présente un coefficient de ramollissement légèrement plus faible que celle du béton de référence de l'ordre de (1,16%) et supérieure au béton [2] de (3,48%), cela a notre avis est due à la faible porosité qui caractérise le béton de référence comparé avec celle de béton [1] et béton [2].

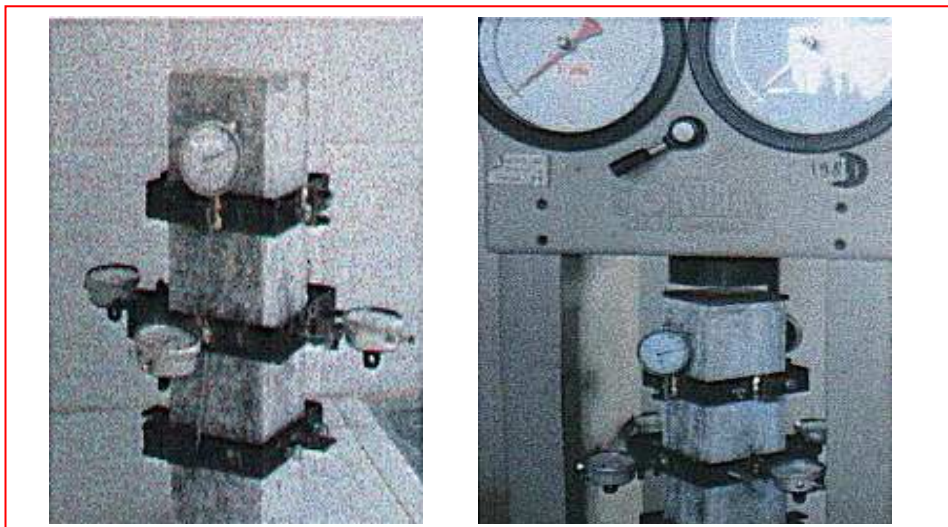
#### 4.4.6 Déformabilité :

##### Objectif :

L'étude expérimentale de déformabilité du béton a pour objectif est d'étudier l'influence de l'ajoute sable de dune et de laitier de haut fourneau granulé finement broyé au ciment sur la déformabilité du béton le module de déformation du béton, fluage du béton sous une compression uniaxiale, la compression uniaxiale a été effectués sur des spécimens de forme prismatique (10×10×40) cm à l'âge de 28 jours , et à l'aide d'un dispositif figure ( 4.55 ) conçu spécialement pour cette raison par docteur mezghiche [90] , on a peu enregistré les déformations longitudinales et transversales, la méthode et décrite on détails dans l'annexe les résultats des essais sont présentés par les figures (4.55; 4.56 ; 4.57 ; 4.58 ; 4.59 ; 4.60 ; 4.61)

##### 2.4.6.1 Dispositif expérimental et technique de mesures :

L'essai consiste à appliquer de contrainte croissante a une éprouvette de forme prismatique (10×10×40) cm du béton étudié et de mesurer les déformations correspondantes, jusqu'à une valeur ( $P = 0,30.P_c$ ), pour la mesure de module élasticité, l'éprouvette prismatique est équipée d'un dispositif pour mesurer les déformations longitudinales et transversales au moyen d'indicateurs a cadran ayant la valeur d'une division de 0,01mm.



**Figure 4.55** Dispositif expérimental utilisée pour mesuré les déformations longitudinales et transversales de béton sous l'effet d'une contrainte croissent verticale.

4.4.6.2 RESULTATS DES ESSAIS DE DEFORMABILIT :

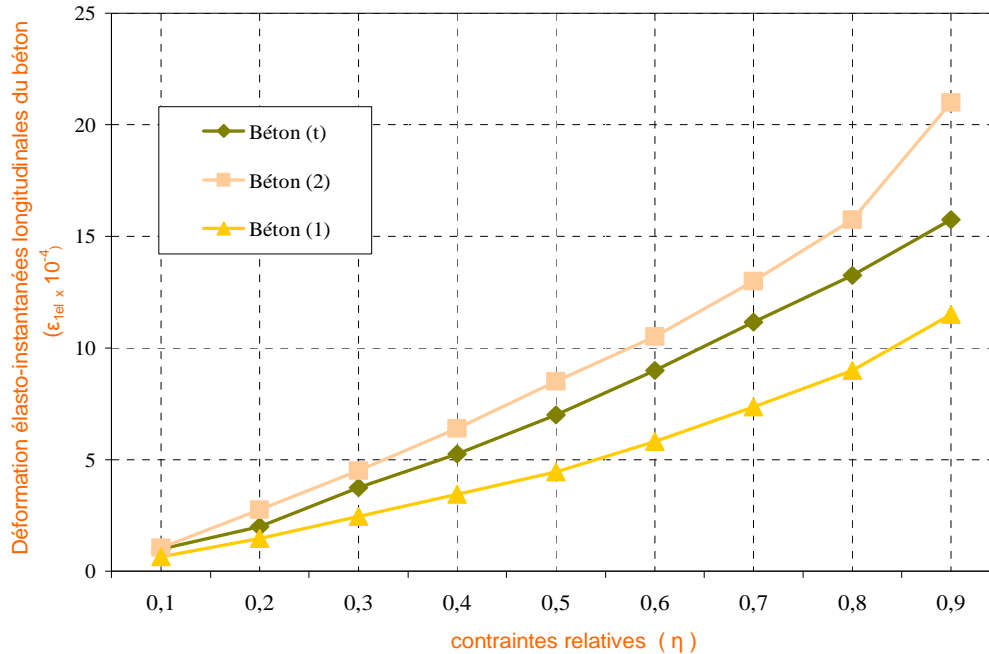


Figure 4.56: Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton  $\epsilon_{1el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]

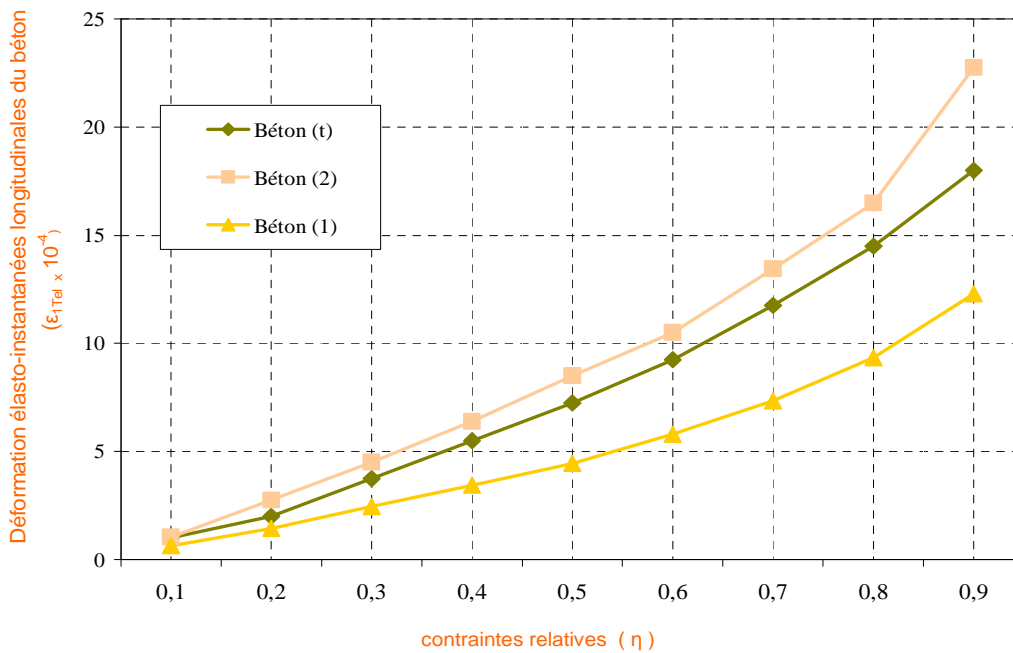
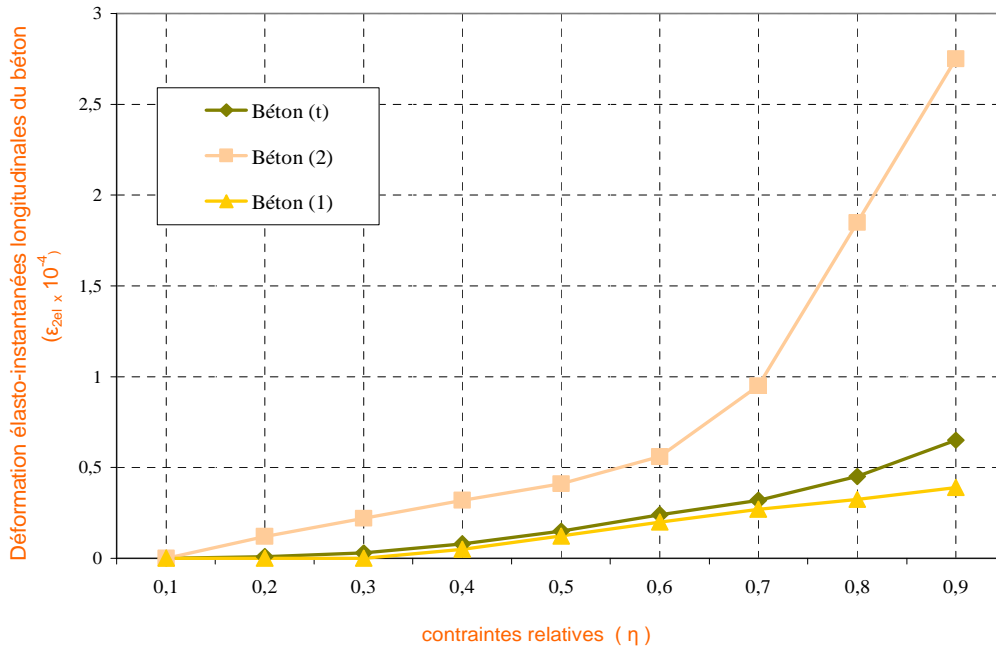
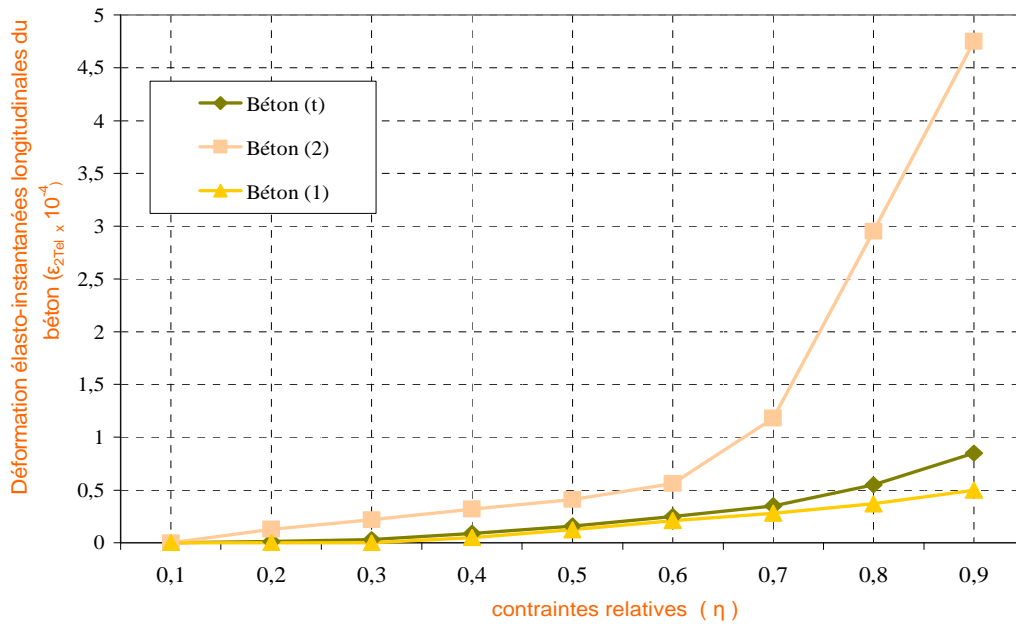


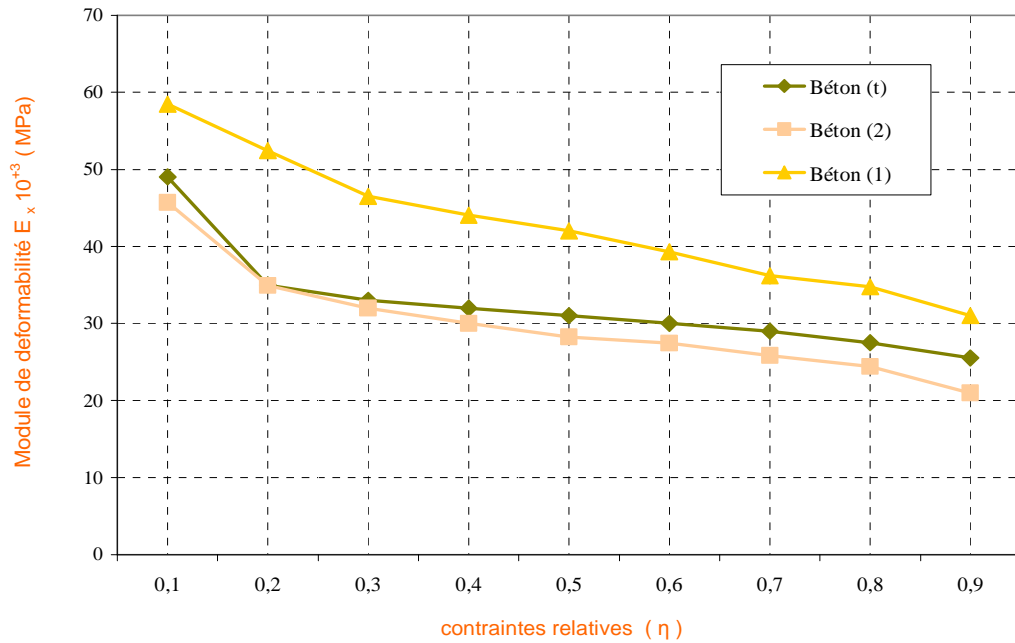
Figure 4.57: Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton  $\epsilon_{1Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]



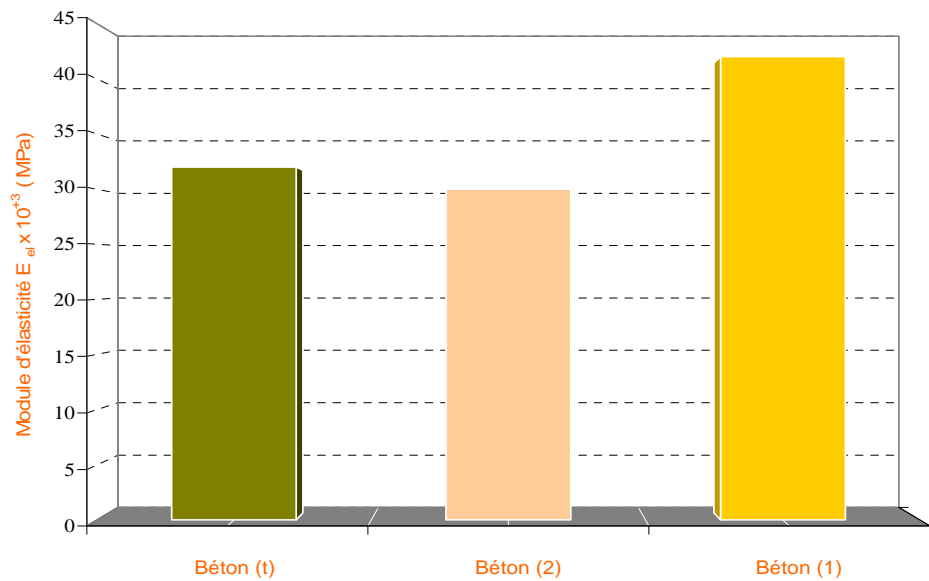
**Figure 4.58:** Déformation élasto-instantanées transversales du béton  $\epsilon_{2el}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]



**Figure 4.59:** Déformation élasto-instantanées totales transversales du béton  $\epsilon_{2Tel}$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]



**Figure 4.60:** Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes Béton [t], Béton [1] et Béton [2]



**Figure 4.61 :** Module d'élasticité des bétons Béton [t], Béton [1] et Béton [2]



#### **4.4.6.3 ANALYSE DE RESULTATS :**

L'analyse des résultats d'essai de déformabilité à nous permis de constate les remarques suivantes :

Nous constatons en premier lieu que le béton [1] béton a base de ciment avec ajout du sable de dune et de laitier de proportion (5%S, 15%L) présente un module d'élasticité plus élevé que celle de béton de référence béton [t], et béton [2], cependant en remarque que le béton [2] et béton [t] prend la même valeur de module d'élasticité lorsque la contrainte relative est ( $\eta = 0,2$ ) ;

En constate aussi et sa pour différents types des bétons étudiés béton [t], béton [1] et béton [2] que le module de déformabilité décroît avec l'augmentation de contraintes relatives ;

Les figures (4.56) et (4.57) montrent respectivement la relation entre la valeur relative de la contrainte ( $\eta$ ) et les déformations élasto- instantané longitudinale et la relation entre la valeur relative de la contrainte ( $\eta$ ) et les déformations élasto-instantané longitudinale totale, d'après les résultats obtenus on constate en premier approche que les déformations les plus petites sont caractéristiques de béton [1], puis venir celui du béton [t], les déformations les plus grandes est observées dans le béton [2] ;

En deuxième approche on constate que les déformations due au fluage est plus remarquée pour le béton de référence béton [t] que celle de béton a base de ciment avec ajout béton [1], béton [2], les déformations due au fluage n'apprêter pour le béton avec ajout que lorsque la contrainte de compression normale atteint leur valeur limite, tends que pour le béton de référence cette déformation se manifeste avec l'application de la contrainte de compression ;

Pour les déformations transversales montrent des tendances similaires aux déformations élasto instantané longitudinales donc en peu aussi voir que les déformations les plus petites sont caractéristiques de béton [1], puis venir celle de béton [t], les déformations les plus grandes étant observée pour le béton [2].

## **4.5 CONCLUSION GENERAL**

---

Les résultats des essais de laboratoire réalisés au cours du programme expérimental qui a été établi afin d'étudier l'influence de l'ajout de sable de dune et de laitier granulé finement broyé aux ciments sur la stabilité de béton à nous permis de tirer les conclusions suivantes :

- la contribution de l'ajout de sable de dune et de laitier au ciment au développement de propriétés mécaniques (résistance à la compression, flexion et traction par flexion) est principalement attribuer à la réactivité chimique du constituant (minérales) de sable de dune et de laitier lorsque ces dernier entrent en réaction avec hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  dégagé par le ciment au cours de leur hydratation, cette réaction est plus importante lorsque le sable de dune et de laitier est substitue en teneur (5%S, 15%L) et lorsque la finesse de mouture  $3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$  et  $(E/L = 0,30)$ , le résultat de cette réaction est la naissance des nouvelles hydrates (C.S.H) et la consommation (stabilisation) de hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
- Les essais ont démontré aussi que l'incorporation de sable de dune et de laitier au ciment augmente significativement la résistance des ciments aux milieux agressifs; et par conséquence meilleure stabilité de ciment aux agressions chimiques;
- Les essais ont démontré aussi que les mortiers à base de ciment avec ajout de sable de dune et de laitier développent de retrait de séchage plus élevé que celle de mortier a base de ciment sans ajout, en revanche le mortier avec ajout de sable de dune et de laitier on présenté une meilleure stabilité volumétrique à l'expansion que celle de mortier sans ajout;
- Les essais ont démontré aussi que l'ajout de sable de dune et de laitier au ciment fait augmenter l'absorption du béton à l'eau par contre réduire la perméabilité a l'eau, ceci est due au effet microstructurale apporte par l'ajout de sable de dune et de laitier au ciment ce effet âge positivement sur la performance (durabilité) de béton par la réduction de la perméabilité et par conséquence la pénétration d'agression chimique;
- Pour la stabilité a l'eau les essais ont démontre que le béton à base de ciment avec ajouts du sable de dune et de laitier en teneur (5%S, 15%L) respectivement à montré une stabilité à l'eau comparable a celle du béton sans ajouts, tandis que l'augmentation de la teneur de sable de dune de 10% diminuer le coefficient de ramollissement de l'ordre de 3,48 %;

- l'étude de déformabilité du béton à montre que l'ajout de sable de dune et de laitier en teneur (5%S et 15%L) au ciment a conduit a une diminution de déformations transversales et longitudinales; tandis que l'augmentation de la teneur de sable de dune de 10% a conduit une augmentation de déformations longitudinales et transversal de béton comparent avec celle de béton à base de ciment sans ajout et par conséquence le béton avec ajout (5% sable de dune et 15% laitier), présente un module d'élasticité plus élevé que celui de béton avec ciment sans ajout et celui de béton a base de ciment avec ajout (10%S ,15%L) .

Ce projet de recherche apporte plusieurs réponses sur l'effet de l'ajout de sable de dune et laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton ; cependant il est important d'ajouter quelque commentaires sur les résultats obtenus :

- les résultats de variation volumétrique ont montré que le ciment avec ajout de sable de dune et laitier développe de retrait de séchage plus élevé que le ciment sans ajout tout fois la technique utilise pour mesure le retrait a pour désavantage majeur de ne pouvoir commencer les mesures qu'après le démoulage de l'échantillon, soit a partir de 24 heures, négligeant ainsi une très grande partie du retrait endogène dont le développement débute dès les premières heures, d'autre part cette technique ne tient pas compte des microfissures qui peuvent faire leur apparition dans l'éprouvette

Donc il serait important de poursuite des études plus approfondies sur l'influence de l'ajout de sable de dune et laitier finement broyés au ciment sur le développement de retrait endogène.

# ANNEXE

---

## DEFORMABILITE DES BETONS

---

### 1) Dispositif expérimental et technique de mesures :

L'essai consiste à appliquer une contrainte croissante à une éprouvette de forme prismatique (10×10×40) cm du béton étudié et de mesurer les déformations correspondantes, jusqu'à une valeur ( $P = 0,30.P_c$ ), pour la mesure de module élastique, l'éprouvette prismatique est équipée d'un dispositif pour mesurer les déformations longitudinales et transversales au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0,01mm

### 2) Résistance à la compression

La résistance à la compression prismatique des éprouvettes et donner par la formule suivant :

$$R_{pri} = \frac{P}{F}$$

Avec :

P : charge de destruction

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

### 3) Module d'élasticité :

Ce module se détermine pour chaque éprouvette au niveau d'une charge égale 30% de la charge de destruction.

$$E_{el} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1el}} \qquad E_{el} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_{1el}}$$

$\sigma_1$  : Accroissement de la contrainte de zéro au niveau de 30% la charge

$P_1$  : charge de destruction correspondante

$\varepsilon_1$  : accroissement de déformation relative (élasto – instantané)

longitudinale des éprouvettes correspondant à la charge  $P_1 = 0,30P$

### 4) Coefficient de poisson :

$$\mu = \nu = \frac{\varepsilon_{2el}}{\varepsilon_{1el}}$$

Avec :

$\varepsilon_{2el}$  : accroissement de déformation relative transversale élasto – instantané des éprouvettes correspondant à la charge  $P1 = 0,30P$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1el} &= \varepsilon_1 - \varepsilon_{1F} \\ \varepsilon_{2el} &= \varepsilon_2 - \varepsilon_{2F}\end{aligned}$$

$\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  : accroissement totale entière des déformations relatives longitudinale et transversales des éprouvettes correspondants à la charge  $P1 = 0,30P$

$\varepsilon_{1F}$  et  $\varepsilon_{2F}$  : accroissement de (a coulage rapide) déformation de fluage longitudinale et transversale

L'accroissement de déformations relatives longitudinale et transversale se détermine comme la moyenne arithmétique des indicateurs des quarts cotes du prisme selon la formule :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} \qquad \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}$$

Avec :

$\Delta l_1$  et  $\Delta l_2$  : accroissement absolue des déformations longitudinale et transversale des éprouvettes correspondant a l'accroissement des contraintes

$l_1$  et  $l_2$  : les bases fixes pour les mesures de déformation longitudinale et transversale des éprouvettes

# Bibliographie

- [1] Benhamou, O. (1994) « *Comportement rhéologique des coulis de liants hydrauliques ultrafins destinée à l'injection* », Thèse de doctorat en géologie de L'Ingénieur. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 332 p.
- [2] Cours Intensif (1994) *Les injection de coulis de ciment: Méthodes de contrôle en laboratoire et en chantier*. Notes de cours intensif sur l'injection présenté le 9- 10 mai 1994 à L'Université de Sherbrooke. Préparé par T. Mnif et A Yahya sous la direction de G. Ballivy et K. Khayat, Mai 1994, 200 p.
- [3] C. Richet, C. Galle, P. Le Bescop, H. Peycelon, S. Bejaoui, I. Tovenat, I. Pointeau, V. L'hostis, P. Lovera , « synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des bétons applications aux coulis cimentés » CEA Saclay Direction de l'Énergie Nucléaire France pp. 16-18, Mars 2004
- [4] G. C. Bye, *Portland Cement: Composition, Production and Properties*, Pergamon Press Ltd. , Oxford, 1983
- [5] S. N. Gosh, *Advances in cement technology*, Pergamon Press Ltd (1983)
- [6] H. F. W. Taylor, *the chemistry of cements*, Academic Press, London, 1983
- [7] K. Fuji et W. Kondo, *Roc. 5th. Int. Symp. on Chem. Cem., V II*, p. 362, Tokyo, 1968
- [8] R. H. Bogue, *La chimie du ciment portland*, Ed. Eyrolles, Paris, (1952)
- [9] J. Skalny et J. F. Young, "Mechanism of Portland Cement Hydration" 7th. Int. Congr. Chem., cement., Paris, 1980
- [10] M. Regourd, "L'hydratation du ciment portland", dans "Le béton hydraulique", Paris Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1982
- [11] L. S. Glasser et coll., *Cem. Conc. Res.*, 8, 733, (1978)
- [12] M. E. Tadros, W. V. Jackson et J. Skalny. *Coll. Int. Sci*, IV, 211, (1976)
- [13] Cours université Sherbrooke « hydratation du ciment portland » chapitre 6, P58-59- 62. 2006
- [14] L. E. Copeland et Kantro D. L., "Hydration of portland cement" 5th. Int. Symp. Chem. Ceme., Tokyo. 1968, VII p.387
- [15] A. Bentur, " Effect of gypsum on the hydration and strength of C3S pastes", *J. Am. Ceram. Soc.*, 59(5), 210 (1976)
- [16] I. Jawed et J. Skalny, "Effect of gypsum on C<sub>3</sub>S hydration", *Cem. Conc. Resc.* ,V 10 p. 697-701, 1980
- [17] I. Jawed, S. Goto et R. Kondo, "Hydration of C<sub>4</sub>AF in presence of Lime and sulfates", *Cem. Concr. res.*, 6(4), 441 (1976)
- [18] J. Baron, Sauterey, « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1981.
- [19] A.M. Harrison, N.B. Winter, H.F.W. Taylor, « An examination of some pure and composite Portland cement paste using scanning electron microscopy with X-ray analytical capability », 8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Rio, 3-2, pp. 170-175, 1986.

- [20] Pigeon (1981), Composition et hydratation du ciment Portland, séminaire progrès dans le domaine du béton, Québec, septembre 1981, p.36-72.
- [21] VERNET, C. (1992) introduction à la physico-chimie du ciment portland; Deuxième partie : Chimie de 'hydratation, Techno des S.A. Grou w ciments Français. Département de recherche / Produits nouveaux.
- [22] LAP L ANTE, P. (1993) Propriétés mécaniques des bétons durcissant : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances. Paris, (s.éd.), 299 p.
- [23] MEHTA P.K. (1986), Concrete, structure, properties and materials. Englewood Cliff (New Jersey) Prentice Hall, 1986. 600p.
- [25] Feldman R. F. and Sereda P. J., « Un modèle pour pâte de ciment Portland hydraté d'après les modifications de l'épaisseur de la couche adsorbée et les propriétés mécaniques ». Matériaux et constructions, 6:509–520, (1968).
- [26] W. Lerch, "The influence of gypsum on the hydration and properties of Portland cement pastes", Roc ASTM, 46 1252 (1946)
- [27] G. Yamaguchi , K Takemoto, H. Uchikawa et Takagi S., "Researches on the influence of gypsum upon the rate of hydration of portland cement", J. Res. Onoda Cement Co., 12(46) 257 (1960)
- [28] A. Raccanelli , "Effet of additions of alcali sulfate and calcium sulfate on the initial reaction of hydration of portland cement", Int. Ital. Cem., 34(1) 3 (1964)
- [29] PAILLERE, A. M. (1982) Les adjuvants. Chapitre 4 de l'ouvrage "le Béton hydraulique" (Baron, Sauterey). Presse de l'ENPPC pp 99- 113
- [30] AITCIN, P- C. (1989) Les fluidifiants des réducteurs d'eau pas comme les autres. Les bétons à hautes performances: expérience nord-américaine et française, Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, no 473, série béton 263, p 15 1-155.
- [31] YAHIA, A (1995), Développement et optimisation des coulis de ciment pour le scellement des ancrages submergés Rapport préparé dans le cadre de l'examen pré doctoral, Université de Sherbrooke, 118 p.
- [32] BENHAMOU, O. (1994) Comportement rhéologique des coulis de liant hydraulique ultrafin destiné à l'injection, Thèse de doctorat en géologie de L'Ingénieur. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 332 p.
- [33] Cement Association of Canada 2005
- [34] « Supplementary cementing materials » Gouvermment of Canada Plan 2000 on climate changes. 2005
- [35] Notes De Cours « les ajouts cimentaires » université Sherbrooke G.I.C 712 chapitre 7, 3-8P.2006
- [36] D<sup>er</sup> A.Guettalla et D<sup>er</sup> Mezghiche.B « travaux de recherches » 2001
- [37] Degussa Construction Chemicals France 2005
- [38] SOLLAC, 1975. Sidérurgie générale, tome 1 (du minerai à l'acier), 315 pages.



- [39] XP P 18 540, 1997. Granulats - Définitions, conformité, spécifications. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 36 p.
- [40] ALEXANDRE, J. SEBILEAU, J.L, CTPL 1988. Le laitier de haut-fourneau: élaboration, traitements, propriétés, emplois. C.T.P.L. (Ed), Paris, France, 340 pages.
- [41] NF P 98 107, 1991. Assises de chaussées - Activation du laitier vitrifié - Définitions, caractéristiques et spécifications. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 12p.
- [42] PEREME J., CTPL 2003. Vitrified blast furnace slag: Granulated or pelletised Proceedings of the 3rd European slag conference, 2-4th October 2002, Keyworth. Ed: EURO SLAG publication, N°2, pp 31-35.
- [43] Mehta P. K., "Supplementary cementing materials for concrete", Ed. By V.Malhotra, Canada, 1, 1987
- [44] Chang Z., Aiqin W., Mingshu T., "The filling role of pozzolanic material", Cement and Concrete Research, Vol. 26, N°. 6, pp. 943-947, 1996.
- [45] Bijen J. Prof. Dr, " Blast furnance slag ciment ", 1996.
- [46] 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.
- [47] Loukhovski G., Pakhanov V.D., Clakocht V.A., "Chelotchimie tsmenty I Betony", Kiev. Budivel'nik, 1978, p. 184.
- [48] Mehta P.K, "Pouzzolanes naturelles, matériaux complémentaires en cimentation pour le béton", centre canadien de la technologie, rédacteur V. Malhotra, Canmet 1987.
- [49] Iliencko V.M., Gontcharov V.I., Gontchar V.I., "Issledovanie, Fiziko-mekhanitcheskikh svoistv. Chlacosilikatnogo betona na mestykh materialakh krivbassa", in trubobetonnie jelezo, betonnie konstrukii ispolzovaniem otkhodov gornorudnoy imetallurgitcheskoy promychlennosti, Krivoi rog.1978, p. 166-173.
- [50] ILienko V. M., "Effektivnost ispolzovania chlakohtchelotchykh betonov chakhnom stroitelstv chakhtnoestritelstvo", N°. 10, pp. 15-18, 1969.
- [51] HAKKINEN, T. (1993) Influence of high slag content on basic mechanical properties and carbonation of concrete, Thèse de Doctorat, Espoo, Technical Research Center of Finland, VTT Publications 141, 143 p.
- [52] MALTAIS, Y. (1996) Étude de l'évolution du degré d'hydratation de ciments et du développement des résistances mécaniques de mortiers et de bétons soumis à différentes températures de mûrissement, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 188 p.
- [53] WU, X., JIANG, W. ET ROY, D. M. (1990) Early activation and properties of slag cement, Cement and Concrete Research, vol. 20, n° 6 , p. 961-974.
- [54] SLAG CEMENT " concert time of set , reducing thermal stress in mass concrete" Not: 3,9 ; slag cement association 2002

- [55] FELDMAN, R. F. (1983) Significance of porosity measurements on blended cement performance, American Concrete Institute Special Publication SP-79, vol. 1, Édité par V.M. Malhotra, p. 415-433.
- [56] ROY, D. M., KUMAR, A. ET RHODES, J. P. (1986) Diffusion of chloride and cesium ions in Portland cement pastes and mortars containing blast furnace slag and fly ash, American Concrete Institute Special Publication SP-9 1, vol. 2, p. 1423-1444.
- [57] MALEK, R. I. A., ROY, D. M. FT FANG, Y. (1989) Pore structure, permeability and chloride diffusion in fly ash- and slag-containing pastes and mortars, Proceedings of the Materials Research Society on Fly Ash and Cod Conversion B-Products : Characterization, Utilisation and Disposal V, vol. 136, Édité par R.T. Hemmings, E.E. Berry, J.G. McCarthy et F. P. Glasser, p. 255-262.
- [58] Adam M. Neville « propriétés de bétons » 465p ,468p, p 639, septembre 2000
- [59] Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo « Utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton » guide des règles de l'art, laboratoire de la technologie des matériaux, p15
- [60] Cook DJ, Hinczak I and Duggan R, "Volume Changes in Portland Blast-furnace Slag Cement Concrete", Second International Conference on Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain, 1986
- [61] Alexander KM, Wardlaw J and Ivanusec I, "The Influence of SO<sub>3</sub> Content of Portland Cement on the Creep and Other Physical Properties of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol 9, 1979.
- [62] ACI 3R-87, "Ground granulated blast –furnace slag as a cementitious constituent in concrete", ACI Manuel of concrete practice, Part 1: Materials and general properties of concrete, 16pp. (Detroit, Michigan, 1994).
- [63] Arya C., Buenfeld N.R. and Newman J.B., "Factors influencing chloride-binding in concrete", Cem. Concr. Res., 1990, 20, 2, 291-300.
- [64] Baron J., Ollivier J.P., "La durabilité des bétons", Press de l'école national des ponts et. chaussées, 1992.
- [65] Diamond S., "Effects of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement-fly ashes pastes", Cem. Concr. Res., 1981, 11, 3, 383-394.
- [66] Dreux G., Festa J., "Nouveau guide du béton et de ses constituants", 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [67] Feldman R.F., "significance of porosity measurements on blended cement performance", 1<sup>st</sup> 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
- [68] Kobayashi K., Uno Y., "Influence of alkali on carbonation of concrete.2.Influence of alkali in cement on rate of carbonation of concrete", Cem. Concr. Res., 20, 4, PP. 619-622, 1990.
- [69] Longuet P., Burglen L. et Zelwer A., "La phase liquide du ciment hydraté", Rev. Matér. Constr., 1973, 676, 35-41.

- [70] Litvan, G.G, Meyer. A, "Carbonation of granulated blast furnace slag cement concretes in structures", in: Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. 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.
- [71] Loukhovski G., Pakhanov V.D., Clakocht V.A., "Chelotchimie tsmenty I Betony", Kiev. Budivelnik, 1978, p. 184.
- [72] Pomeroy. D., "Concrete durability", from basic research to pratical reality, in: Concrete, durability, K.and B. Mather Intern. Conf,J.M. Scanlon, Ed., ACI, SP-100,1, 111-130.,1987
- [73] Papadakis G., Fardis N., Vayenas G., "Hydration and carbonation of pozzolanic cements",ACI Materials journal, Vol. 89, No. 2, pp 119-130, March-April 1992.
- [74] Olivier E, "Technologie des matériaux de construction", édition 1978
- [75] Tsukayama R., Abe H. and Nagataki S., "Long-term experiments on the neutralization of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement", 7<sup>e</sup> Congrès de la chimie des ciments, Paris, 1980, 3, 4, 30-35.
- [76] Verbeck G.J., "Mechanisms of corrosion of steel in concrete", in: corrosion of metals in concrete, ACI, 1975, SP-49, 21-38.
- [77] 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.
- [78] Schiessl P., "Zur Frage Zulässig Rissebreite und der erforderlichen betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der karbonatisierung des betons". Deutscher ausschuss fur stahlbeton, 1976, 255, 39-49.
- [79] Slag cement " the effects of ground granulated blasfurance slag in concrete", Not 2, Civil and Marine Slag cement limited 2000
- [80] Oxand " Fiche technique corrosion des armatures ; carbonatation"  
Site web: [www.oxand.com](http://www.oxand.com)
- [81] Karima Arroudj, Mohamed Nadjib Oudjit " Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments " 2<sup>ème</sup> colloque Maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie les 10 et 11 décembre 2002
- [82] S. Laldji, A. Phithaksounthone A.Tagnit-Hamou " synergie des ajouts cimentaires dans les bétons " Faculté de génie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke. Québec, Canada
- 83 Kosmateka, SH, Panarese W.C, Allen, GE.and Cummings S. (1991) " Dosage et contrôle des mélanges de béton " , CPCA, p58
- 84 Valérie Seigneur S(2000) " Etude de l'influence du murissement a l'eau et de l'ajout d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène de béton a haute performance", p13
- 85 Anissa Bessa "évaluation de la contribution des additions s à l'activité liante du ciment dans les mortiers" pp 46
- 86 D<sup>er</sup>.Mellass .M "Travaux de recherche" 2003
- 87 Université de Sherbrooke, GCI714 -"Durabilité et réparation du Béton",338p

- 88 Guettala .A "caractéristique du béton de terre stabilise (B.T.S) à base de sol de la région de Biskra" thèse de magister en habitat en milieu aride et semi aride 1995
- 89 Mezghiche B., "Technologie des bétons aux laitiers basiques pour R.A.D.P". Résumé de thèse de PHD, Kiev 1989.
- 90 Mladenka Saric-Coric, "Interactions superplastifiant-laitier dans les ciments au laitier – Propriétés du béton", thèse de doctorat en génie civil, sous la direction de Pierre-Claude Aïtcin.
- 91 Pierre Claude Aïtcin 2000 " Béton haute performance " , P 175
- 92 ASMS technical note no 1 " Properties of Slag Concretes" <http://www.p2pays.org>