

UNIVERSITE MOHAMMED KHEIDER - BISKRA –
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE-CIVIL

N° d'ordre :
Série :

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : GENIE CIVIL

Option : Matériaux de construction

Présenté par :

GUIMER TAREK

**Contribution de l'addition minérale sur
les caractéristiques physico-mécaniques des
liants et mortiers**

SOUTENUE LE : 17 / 11 / 2007

Devant le jury composé de :

Président :	B. MEZGHICHE	M.C	Université de BISKRA
Rapporteur:	M.MELLAS	M.C	Université de BISKRA
Examineur:	A. GUETTALA	M.C	Université de BISKRA
Examineur :	A. ZATAR	M.C	Université de BISKRA

RESUME

Ce travail consiste à l'étude de l'évolution de la résistance du ciment Portland composé de pâtes et de mortier contenant deux additions (le filler calcaire et le laitier finement broyé).

Afin de se relier mieux à l'effet pouzzolanique de ces additions dans les pâtes et dans le mortier à base de ce ciment, nous avons suivi l'évolution de la résistance mécanique en fonction de l'âge et le mode du traitement. Cette étude est une approche simplifiée pour voir d'une part, la contribution de l'addition minérale dans une pâte de ciment et dans le mortier sur le développement de la résistance mécanique, et d'autre part sur la porosité de matériau par l'échange du méthanol.

Et pour confirmer notre étude, nous avons essayé d'adopter des équations approchées à partir des résultats trouvés dans le laboratoire.

Mots clés : porosités, pâte de ciment, mortier, résistances mécaniques, échange par le méthanol.

ABSTRACT

This work describes the study of the evolution of the resistance of Portland cement made up of pastes and mortar containing two minerals additions such as calcareous filler and the finely crushed slag.

The effects of those additions in the pastes and mortar containing this cement, has been carried to see the evolution of the mechanical resistance as function of the age and the mode of the treatment. This study is a simplified approach to see, the contribution of the mineral addition of a cement paste and mortar on the development of the mechanical resistance, the porosity obtained upon methanol exchange.

In addition, to confirm our study we based on proximate equations to approach the results finding in the laboratory.

Key words: porosities, paste cement, Mortar, mechanical resistances, exchange by methanol.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى إبراز دور الإضافات المعدنية في تحسين الخصائص الفيزيائية و الكيميائية لعجينة الإسمنت و الميلاط وهذا بإضافة المادة الكلسية الفيلر وخبث الأفران العالية بمقياس نعومة متباين مع استعمال إسمنت بورتلندي مركب لإظهار مدى مساهمة هذه الإضافات في تحسين المقاومة الميكانيكية والديمومة هذا من جهة ومن جهة أخرى نهدف من هذه الدراسة إلى محاولة تقدير المسامية الكلية بإضافة مادة الميثانول لمختلف العينات المستعملة بتغير نسبة خليط/ماء ولتوثيق العلاقة بين هذين العنصرين اعتمدنا على إيجاد علاقات رياضية تقريبية من خلال النتائج المتحصل عليها مخبريا .

كلمات مفتاحيه : المسامية , عجينة إسمنتية , الميلاط , المقاومة الميكانيكية, الميثانول .

REMERCIEMENT

Ce travail de mémoire a été effectué, au Laboratoire de Génie-civil (LGC) de l'Université de BISKRA sous la direction du : Dr MELLAS Mekki, maître de conférence à l'Université de BISKRA, Je tiens sincèrement à exprimer toute ma reconnaissance pour ses conseils avisés et sa disponibilité tout le long de ce travail.

Je tiens également à remercier Dr : MEZGHICHE BOUZIDI, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de la soutenance.

Aussi, je remercie les Drs : ZATAR ABD ALLAH, GUETTALA ABDELHAMID, d'avoir accepté d'examiner ce travail malgré leur nombreuses charges.

Je remercie également Mrs : OUNIS Abdelhafid, CHEBILI Rachid, Abdelaziz SALIM, ainsi que tout l'encadrement du département de Génie-civil pour leur soutien moral et leurs conseils tout au long de ce mémoire.

Un merci spécial est adressé à toutes les personnes du laboratoire du Génie-civil

Mr BENAÏCHI EL-HADJ, TAMARAT MESSAOUD et TOUR ABDELMOUNEM, Je tiens sincèrement à leur exprimer toute ma reconnaissance pour leurs conseils avisés et les échanges enrichissant que nous avons eu, sans oublier Mr : KAMEL GUIMER, FATAH, HAKIM au niveau de laboratoire d'agronomie.

Je tiens également à remercier toutes les personnes du Laboratoire B.E.S.T et SEGMA de Génie civil au niveau de wilaya de Biskra et génie des matériaux de l'université de Boumerdès, qui par leurs conseils et les échanges enrichissant que nous avons eu.

Mes remerciements vont particulièrement au directeur de siège sonatrach monsieur : BEN DRISSE.

Je ne saurais oublier l'aide précieuse de Messieurs : HAFNAOUI DEHMANE et AL BAR ABD ALLAH, ZEGGAR SLIMANE, BOUHDJER RACHID pour leurs aides et leurs conseils bénéfiques.

Je suis enfin très reconnaissant envers ma famille, en particulier mes parents, mes frères et sœurs, sans oublier mes amis pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant toute la durée de ce travail.

SOMMAIRE

	Page
RESUME	i
ABSTRACT	ii
	iii
INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
	03
1-1. Introduction	03
1-2. Généralités	03
1-2-1. Un peu d'histoire sur les ciments portland industriels	03
1-2-2. Ciments courants	03
1-3. Les Additions Minérales	04
1-3-1. Les pouzzolanes naturelles.....	04
1-3-2. Le laitier Haut fourneau.....	05
1-3-3. La fumée de silice.....	07
1-3-4. Les cendres volantes.....	08
1-3-5. Les fillers calcaires.....	08
1-3-5-1. Action sur la porosité et la surface spécifique.....	10
1-3-5-2. Action sur les aspects rhéologiques.....	10
1-3-5-3. Action sur les propriétés mécaniques.....	10
1-4. Hydratation du ciment portland	11
1-4-1. Les réactions d'hydratation	11
1-4-2. L'état de l'eau dans la pâte de ciment hydraté.....	13
1-4-2-1. L'eau combinée chimiquement.....	14
1-4-2-2. L'eau zéolitique.....	14
1-4-2-3. L'eau adsorbée.....	14
1-4-2-4. L'eau des capillaires.....	14
1-4-3. Hydratation et réaction pouzzolaniques.....	16
1-4-4. L'hydratation du laitier.....	16
1-4-5. L'activité du laitier.....	18
1-4-6. L'activité du filler.....	18
1-4-6-1. Réactivité directe des fillers calcaires.....	18
1-4-6-2. Réactivité indirecte des fillers calcaires.....	19
1-4-7. Influence de laitier sur la perméabilité du béton.....	20
1-5. Durabilité des ciments au laitier et du filler	22
1-5-1. Résistances aux eaux agressives.....	22
1-5-1-1. Eaux pures et douces.....	22
Eaux contenant des sulfates.....	24
1-6. Evaluation de la porosité	26
1-6-1. Introduction.....	26
1-6-2. Définition.....	26
1-6-2-1. Pores du gel.....	27
1-6-2-2. Pores capillaires.....	28

1-6-3. Les différentes techniques préalablement utilisées.....	29
1-6-3-1. Techniques d'imagerie.....	29
1-6-3-2. Adsorption de gaz.....	30
1-6-3-3. Diffusion aux petits angles.....	30
1-6-4. Les techniques adaptées à nos recherches.....	31
1-6-5. La relation entre la porosité et la résistance.....	35
CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES ET LES	39
METHODES D'ESSAIS	
2-1. Introduction.....	39
2-2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	39
2-2-1. Le Laitier.....	39
2-2-1-1. Analyse du laitier.....	39
2-2-2. Propriétés physiques de laitier.....	39
2-2-3. Ciment portland.....	39
2-2-3-1. Analyse chimique et minéralogique du ciment.....	40
2-2-3-2. Propriété physique de ciment.....	40
2-2-4. Le filler calcaires.....	40
2-2-5. Propriété physique du filler calcaire.....	40
2-2-6. Le sable.....	40
2-2-6-1. Analyse granulométrique.....	40
2-2-6-2. Propriété physique de sable.....	41
2-3. Méthodes d'essais.....	41
2-3-1. Les différents essais sur la pâte et le mortier.....	41
2-4. Le plan expérimental.....	43
2-4-1. La préparation des échantillons.....	43
2-4-2. Les mesures effectués.....	43
CHAPITRE III: ETUDE DE LIANT DE CIMENT AU LAITIER ET AU FILLER	44
3-1. Introduction.....	44
3-2. Caractéristiques de la pate du ciment a la filler et le laitier.....	44
3-2-1. Propriétés mécaniques du liant.....	44
3-2-2. Propriétés physiques du liant.....	47
3-2-2-1. Consistance et prise.....	48
3-2-2-1-1. Influence de la quantité de filler et de laitier sur la consistance et la prise.....	48
3-2-2-2. Le gonflement.....	49
3-2-3. Action des eaux agressives.....	51
3-3. Etude du mortier.....	54
3-3-1. Comportement mécanique.....	55
3-3-1-1. Influence de la quantité de laitier et de Filler sur le comportement mécanique des mortiers normalisés.....	55
3-3-1-2. Influence de la quantité de laitier et de Filler sur le comportement mécanique des mortiers.....	57
3-3-2. Le retrait et le gonflement.....	60
3-4. Conclusion.....	73

CHAPITRE IV: ETUDE DE LA POROSITE DE LA PATE DU CIMENT ET DU MORTIER	74
4-1 Introduction.....	74
4-2 Les processus d expérimentation.....	74
4-3 LA RELATION ENTRE LA POROSITE ET LE RAPPORT E/C.....	74
4-4 LES RESULTATS DE POROSITE.....	76
4-4-1La pâte de ciment.....	76
4-4-2 le mortier.....	77
4-5 RELATION ENTRE LA RESISTANCE MECANIQUE ET LE RAPPORT E/C	79
CONCLUSION.....	81
CONCLUSION GENERALE.....	82
RECOMMANDATION ET PERSPECTIVE.....	83
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	84

<u>Liste de figure</u>	Page
CHAPITRE I	
Figure 1-1. Plage de laitier dans le diagramme de RANKIN d'après [Venuat 1989].....	05
Figure 1-2. L'effet filler de la fumée de silice d'après [Bache1990].....	08
Figure 1-3. Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [Pigeon 1981] (Terré par Dr : Guettala, a h.2005).....	13
Figure 1-4. Structure du ciment durci selon le modèle de Feldman et Sereda ; 1968].....	14
Figure 1-5. Processus de l'hydratation. A) état initial B) Recouvrement des grains de ciment C) Création des liens entre particules [S, Pren; 2000].....	15
Figure 1-6. Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau. [Hansen 1970].....	16
Figure 1-7. Champ des composants chimiques du laitier d'après [Bijen J. Prof. Dr., 1996]..	17
Figure 1-8. Influence de l'addition de laitier ou de cendres volantes sur l'évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d'après [Feldman R.F, 1983].....	21
Figure 1-9. Pertes de masse en fonction du temps d'éprouvettes de mortier confectionné avec différents ciments, conservées dans une eau douce de pH 5 à 5,5, d'après [Ali A., Amine A.m., Sharara A.M et El-Didamony H,1994].....	24
Figure 1-10. L'efficacité de laitiers à réduire les expansions dues aux sulfates, d'après [Douglas E, 1989].....	25
Figure 1-11. Influence du rapport E/C et le degré d'hydratation sur la porosité capillaire et la porosité totale de la pâte de ciment [Neville & Brooks ; 1987].....	27
Figure 1-12. représentation volumétrique des proportions dans la pâte du ciment.....	28
Figure 1-13. Différent Composition d'une pâte de ciment à différents stades d'hydratation [Powers1949].....	29
Figure 1-14. Relation entre la porosité obtenue par le mercure en fonction de celle obtenu par l'hélium de ciment Portland hydraté [Beaudoin ; 1979].....	32
Figure 1-15. Evolution de la résistance en compression du béton en fonction de sa porosité. [Rossler et older 1985].....	36
Figure 1-16. La loi de Féret [1892].	36
CHAPITRE II	
Figure 2-1. analyse granulométrique de sable.....	41
CHAPITRE III	
Figure 3-1. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de filler (E/C)=0,3.....	44
Figure 3-2. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de laitier (E/C)=0.3.....	45
Figure 3-3. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de filler (E/C)=0.25.....	46
Figure 3-4. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de laitier (E/C)=0.25.....	46
Figure 3-5. Temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.....	48
Figure 3-6. Variation de la consistance de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.....	49
Figure 3-7. Gonflement (à chaud et à froid) de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.....	50
Figure 3-8. La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution MgCl ₂ en fonction du temps et du % de laitier et de filler.....	53
Figure 3-9. La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution Na ₂ SO ₄ en fonction du temps et du % de laitier et de filler.....	53
Figure 3-10. Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en	

fonction du temps et le % de laitier.....	56
Figure 3-11. Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en fonction du temps et le % de filler.....	56
Figure 3-12. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de retrait.....	62
Figure 3-13. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de gonflement.....	62
Figure 3-14. Variations massique des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de retrait.....	63
Figure 3-15. Variations massique des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de gonflement.....	63
Figure 3-16. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.3$	65
Figure 3-17. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/L=0.3$	65
Figure 3-18. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.3$	65
Figure 3-19. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.35$	66
Figure 3-20. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.35$	66
Figure 3-21. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.35$	66
Figure 3-22. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.4$	67
Figure 3-23. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.4$	67
Figure 3-24. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.4$	67
Figure 3-25. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.45$	68
Figure 3-26. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.45$	68
Figure 3-27. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.45$	68
Figure 3-28. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.5$	69
Figure 3-29. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.5$	69
Figure 3-30. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.5$	69
Figure 3-31. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.55$	70
Figure 3-32. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.55$	70
Figure 3-33. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.55$	70
Figure 3-34. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.6$	71
Figure 3-35. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.6$	71

Figure 3-36. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.6	71
---	-----------

CHAPITRE IV

Figure 4-1. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour une pate sans ajouts.....	76
Figure 4-2. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour une pate avec 10%F.....	76
Figure 4-3. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour une pate avec 15%S.....	76
Figure 4-4. Relation entre la porosité et le rapport E/C de mortier sans ajout.....	77
Figure 4-5. Relation entre la porosité et le rapport E/C de mortier avec 10%F.	77
Figure 4-6. Relation entre la porosité et le rapport E/C de mortier avec 15%S.	77
Figure 4-7. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C de mortier de référence.	79
Figure 4-8. Relation entre la résistance à la compression de mortier avec 10%F.....	79
Figure 4-9. Relation entre la résistance à la compression de mortier avec 15%S.....	80

Liste de photo :

	Page
CHAPITRE I	
Photo1-1. Pouzzolane naturelle granulée.	4
Photo1-2. Laitier cristallisé d'après [Venuat M, 1989].....	6
Photo1-3. Laitier granulé d'après [Venuat 1989].	6
Photo1-4. Fumé de silice sou forme de poudre.....	7

Liste des tableaux :

Page

CHAPITRE I

Tableau 1-1. Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment d'après [P. C. Hewlett 1972] et [H.F.W Taylor, 1997]	15
Tableau 1-2. Porosités à l'eau comparées des différents types de bétons [Recommandation AFGC décembre ; 1997]	33

CHAPITRE II

Tableau 2-1. Composition chimique du laitier.....	39
Tableau 2-2. Module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma).....	39
Tableau 2-3. Composition chimique et minéralogique de ciment.....	40
Tableau 2-4. Composition chimique d'un filler calcaire.....	40
Tableau 2-5. Analyse granulométrique du sable.....	40
Tableau 2-6. Différents essais sur la pâte.....	41
Tableau 2-7. Différents essais sur le mortier.....	42

CHAPITRE III

Tableau 3-1. Durcissement naturel, E/(C)=0.3.....	45
Tableau 3-2. Durcissement naturel, E/(C)=0.3.....	45
Tableau 3-3. Durcissement naturel, E/(C)=0.25.....	46
Tableau 3-4. Durcissement naturel, E/(C)=0.25.....	47
Tableau 3-5. Temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction du % de l'ajout du laitier et de filler.	48
Tableau 3-6. Gonflement (à chaud et à froid) de la pâte de ciment en fonction du % de Laitier et de filler.	50
Tableau 3-7. Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives en fonction du % de laitier et de filler à [28 jours].	52
Tableau 3-8. Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives en fonction du % de laitier et de filler à [90 jours].	52
Tableau 3-9. Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives en fonction du % de laitier et de filler à [180 jours].	52
Tableau 3-10. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier et de filler pour un rapport E/C=0.5 à 28jours.	55
Tableau 3-11. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.3.....	57
Tableau 3-12. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.35.....	57
Tableau 3-13. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % et de laitier pour un rapport E/C=0.4.....	57
Tableau 3-14. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % et de laitier pour un rapport E/C=0.45.	58
Tableau 3-15. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.5.....	58
Tableau 3-16. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/ L=0.55.....	58
Tableau 3-17. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.6.....	58
Tableau 3-18. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.3.	58
Tableau 3-19. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.35.....	59
Tableau 3-20. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.4.....	59

Tableau 3-21. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.45.....	59
Tableau 3-22. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.5.	59
Tableau 3-23. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.55.....	59
Tableau 3-24. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour le rapport E/C=0.6.	60
Tableau 3-25. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et du % de laitier	61
Tableau 3-26. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et du % de Filler	61
Tableau 3-27. Variations de la masse des mortiers en fonction du temps et du % de laitier.	61
Tableau 3-28. Variations de la masse des mortiers en fonction du temps et du % de filler.....	61

CHAPITRE IV

Tableau 4-1. La relation entre le rapport E/C et la porosité basée sur l'échange par le méthanol d'une pâte de ciment avec et sans ajouts.....	75
Tableau 4-3. La relation entre le rapport E/C et la porosité basée sur L'échange par le méthanol d'un mortier avec et sans ajouts.....	75

Liste des symboles :

C : masse de ciment

E : masse d'eau

L : masse de liant

S : le laitier

F : le filler

A : coefficient de qualité.

P : la porosité

P_m : porosité basée sur l'échange du méthanol

R : coefficient de corrélation

V_a : volume d'air

V_c : volume spécifique du ciment

V_m : volume du méthanol introduit dans la pâte de ciment ou de mortier

V_p : volume des pores

V_t : volume total

V_u : volume du ciment anhydre

M_a : poids de l'échantillon à l'état sec

M_{ss} : poids de l'échantillon saturé superficiellement sec

M_m : poids de l'échantillon immergé dans le méthanol

γ_m : densité du méthanol

V_{uc} : volume du ciment non hydraté

V_{ps} : volume des produits solides

V_c : volume de ciment.

V_{eg} : volume de l'eau de gel.

V_{ce} : volume des capillaires en eau.

V_{cv} : volume des capillaires vides.

V_e : volume de l'eau.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique. D'une part les additions sont susceptibles de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et d'autre part, certaines additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent peuvent réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés. Ces deux effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances finales des matériaux durcis (physiques, mécaniques et de durabilité). Par ailleurs, l'incorporation des additions minérales engendre également un effet granulaire relatif aux modifications induites sur la compacité du squelette granulaire et les propriétés rhéologiques du mélange frais.

Cet effet agit lors de la mise en œuvre et de la mise en place et influe sur l'ampleur et le sens des deux autres effets par les modifications apportées sur la porosité de la matrice cimentaire. Cependant, la majorité des études récentes concernant l'influence des additions minérales sur les propriétés du béton (Lawrence, 2000) ainsi que la normalisation actuelle EN 206-1 considèrent l'activité liante des additions résultant de leurs effets physico-chimique et chimique sans prendre en compte l'action de l'effet granulaire. [Bessa, 2003]

L'approche méthodologique utilisée permet d'évaluer distinctement l'action physique et chimique des additions minérales sur les mortiers. Elle consiste en la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mortiers dont l'ouvrabilité et le volume absolu de l'ensemble des phases solides constituantes sont conservés constants. L'action physique des additions minérales sur les mélanges est directement évaluée par la variation du besoin en eau en fonction de la quantité d'addition minérale incorporée. Leur action chimique est évaluée par la variation relative des résistances dans les mortiers pour des rapports eau/ciment donnés par rapport à des mortiers de référence sans addition.

L'analyse des résistances en compression des mortiers avec additions minérales en fonction du rapport E/C, a permis de quantifier distinctement l'effet physique lié aux variations du besoin en eau, et l'effet chimique, lié aux modifications du processus d'hydratation du ciment dans le mélange. [A, Boudchicha et B, Mezghiche 2005].

L'objectif de notre étude est d'évaluer empiriquement la participation physico-chimique, microstructural et éventuellement chimique des additions minérales sur les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité des pâtes du ciment et des mortiers en s'affranchissant de leur effet granulaire. Pour cela, nous avons mis au point une méthodologie

INTRODUCTION GÉNÉRALE

expérimentale spécifique basée sur l'estimation de l'impact des additions minérales incorporée dans le mélange et examiné leur réactivité à partir de type d'ajout introduit et ensuite mesuré la porosité totale du mélange (pâte / mortier) à l'aide de méthanol pour l'apprécier. Deux additions minérales de caractéristiques différentes ont été introduites dans la pâte pour estimer la résistance en compression et la résistance chimique d'une solution concentrée de Na_2SO_4 et MgCl_2 , et pour le mortier on a évalué la résistance mécanique en fonction du temps.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le Premier Chapitre: Ce chapitre est consacré à la recherche bibliographique, qui comporte une synthèse bibliographique, d'une part sur la représentation des différents ajouts naturels ou artificiels utilisés dans le monde de ciment, ensuite par une bibliographie concernant l'hydratation de ciment portland avec les différents ajouts.

Ainsi que la composition des hydrates obtenus, suivie par un certain nombre de connaissances de base sur la durabilité des ciments avec ajouts, et d'autres parts nous représentons le phénomène de porosité et les techniques utilisées pour sa détermination, et les travaux des recherches déjà réalisés sur ce sujet.

Le Deuxième Chapitre : est un aperçu sur les caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques des matériaux utilisés (ciment, filler, laitier, sable), sur les différents essais appliqués et enfin nous avons exposé le plan expérimental de notre travail dans ce mémoire.

Le Troisième Chapitre : concerne l'étude des propriétés physiques et mécaniques de la pâte du ciment et du mortier avec l'addition de la filler et le laitier.

Le Quatrième Chapitre : consiste à étudier la porosité à base de méthanol de pâte et de mortier avec la filler et le laitier.

Nous finalisons notre travail par des conclusions et des recommandations



CHAPITRE I



REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1-1. INTRODUCTION:

Ce chapitre repose sur deux objectifs. Les généralités données en début de ce chapitre vont nous montrer les notions de base sur les matériaux cimentaires avec leur réactivité, l'impact sur la résistance mécanique, sans oublier l'hydratation des ciments et les facteurs qui affectent la réactivité des ajouts suivis par des synthèses bibliographiques sur la durabilité des ciments avec ajouts. Et ensuite la représentation du phénomène de porosité et les travaux réalisés sur ce dernier. Enfin on déclarera l'objectif ciblé de notre recherche et l'identification des problèmes en cause.

1-2. GENERALITES:

1-2-1. Un peu d'histoire sur les ciments portland industriels:

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" $[Ca(OH)_2]$ et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice. L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans [D. Moore.1995]. L'utilisation et les secrets de fabrication de ce matériau se sont ensuite perdus à la chute de l'Empire face au retour de la maçonnerie en pierre.

Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile. En 1817, Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. Apsdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Mais la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, moulable avec une bonne résistance à la compression et qui rend inutile la taille de la pierre.

1-2-2. Ciments courants:

La première étape consiste à la formation d'un clinker par cuisson à haute température ($1450^{\circ}C$) d'un mélange de **80 %** de calcaire et **20 %** d'argile environ, suivie d'une trempe. Le

clinker est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium. On obtient alors le ciment Portland par cobroyage du clinker et du gypse.

1-3. LES ADDITIONS MINÉRALES:

1-3-1. Les pouzzolanes naturelles:

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identiques à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique. [R. Dupain, R. Lanchant 1995].

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer. [G. Dreux & J. Festa, 1998].

Il s'agit d'une roche volcanique effusive à composition, surtout, Feldspathique (donc siliceuse) à structure alvéolaire et trachytique résultant de l'accumulation des cendres volcaniques (photo 2-1.)

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



(La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau.) [Kobayashi K., Uno Y. 1990,].



Photo 1-1. Pouzzolane naturelle granulée

1-3-2. Le laitier de haut fourneau:

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 µm. La composition chimique de laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les même que ceux du clinker [G. Dreux & J. Festa, 1998].

Le laitier granulé broyé est considéré comme un véritable ciment car il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques [M. Venuat.1989].

Les laitiers de haut fourneau trouvent leur utilisation surtout dans les ciments et pour les travaux routiers. Il existe d'autres laitiers métallurgiques provenant de métaux non ferreux et qui pourraient être utilisée [Moll H.L, 1964].

Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke que l'on utilise pour réduire l'oxyde de fer se retrouvent dans le laitier de haut fourneau, comme ces impuretés pourraient avoir un point de fusion très élevé si l'on n'ajustait pas leur composition chimique, on ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie du diagramme SiO₂ – CaO – Al₂O₃ (figure1-1.).

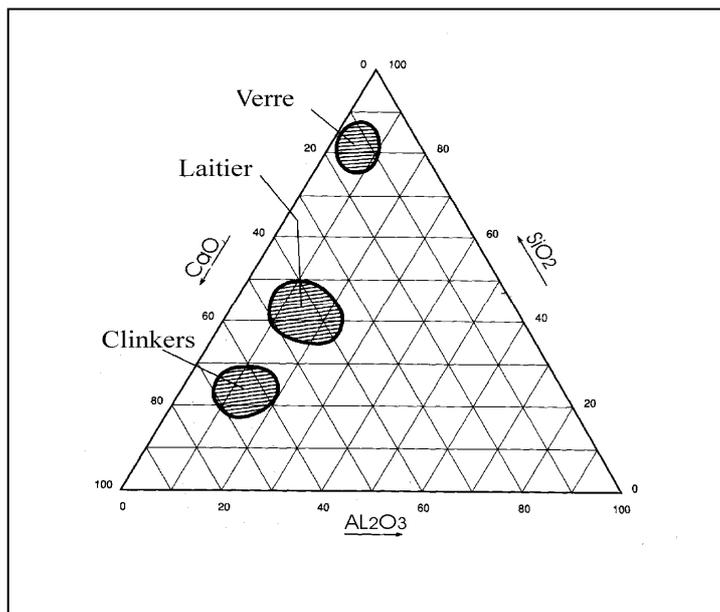


Figure 1-1. Plage de laitier dans le diagramme de RANKIN d'après [Venuat 1989].

Zone ou la température de fusion de ces trois oxydes est parmi la plus basse. Ainsi du point de vue chimique, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte [Aitcin P.C, 2000]. Le laitier fondu a une densité plus faible (de l'ordre de 2,8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7) de telle sorte que le laitier fondu flotte au dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément [Aitcin P.C, 2000].

La quantité de laitier recueillie par tonne de fonte varie suivant les minerais utilisés et les régions de production [Moll H.L, 1964].

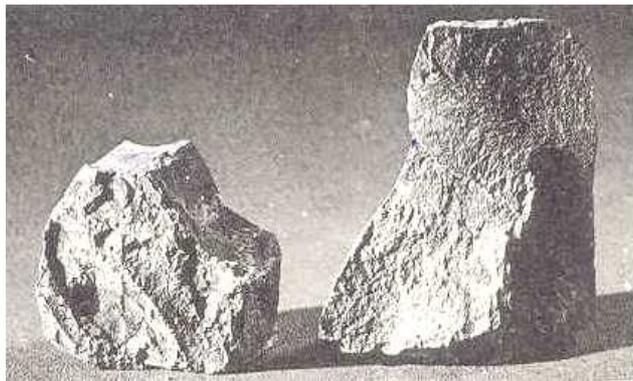


Photo 1-2. Laitier cristallisé d'après [Venuat M, 1989]



Photo 1-3. Laitier granulé d'après [Venuat M; 1989].

La composition chimique des laitiers de haut fourneau est déterminée à partir:

- du Combustible utilisé.
- du métal à obtenir.
- des conditions de refroidissement [Locher, F.w, 1968.].

1-3-3. La fumée de silice:

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie des alliages de silicium et notamment ferrosilicium récupérée dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication de ces produits. Elle se présente sous forme de particules sphériques plus ou moins grisâtres et extrêmement fines dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0.1 μm (100 fois plus petits que ceux du ciment) [G. Dreux & J. Festa, 1998].

Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO_2 . La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.



Photo 1-4. Fumée de silice sous forme de poudre.

L'effet filler est aussi responsable de l'augmentation de la fluidité des bétons qui contiennent de la fumée de silice et qui ont de très faibles rapports eau/ciment. Par conséquent, à cause de leurs caractéristiques physiques uniques, la pâte de ciment durci qui contient du fumé de silice est dense

A cause de leur grande finesse, les particules de fumée de silice peuvent remplir les rides qui se trouvent entre les plus grosses particules de ciment.

- ⇒ {
- Pâte de ciment dense et dure: \downarrow porosité $\Rightarrow \uparrow R^\circ\text{C}$
 - Pas de zone de transition entre granulats et pâte de ciment $\Rightarrow \uparrow R^\circ\text{C}$.
 - \uparrow fluidité du béton $\Rightarrow \downarrow E/L$.

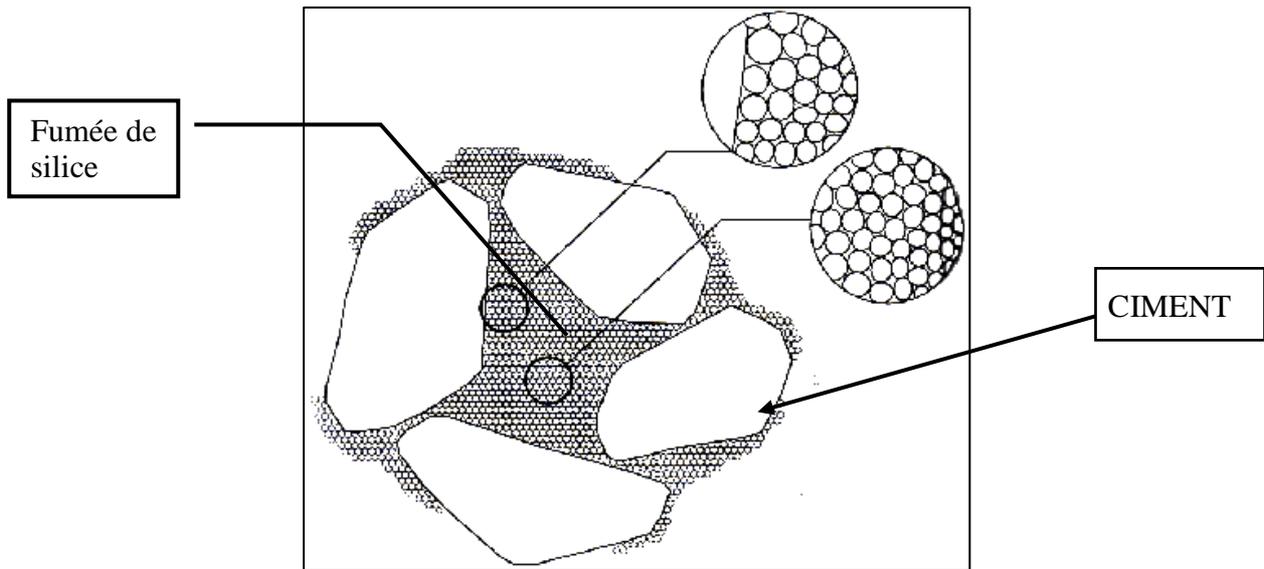


Figure 1-2. Effet filler de la fumée de silice (d'après Bache1990)

1-3-4. Les cendres volantes:

Les cendres volantes, pouzzolanes d'origine industrielle, sont des produits pulvérulents qui proviennent du dépeussierage des gaz de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Elles apparaissent sous forme de particules sphériques vitreuses pleines ou creuses dont les diamètres sont compris entre 0.5 et 200 μm (50 % des grains ont un diamètre environ de 30 μm).

Les cendres volantes peuvent être divisées en deux catégories suivant leur teneur en chaux [G. Dreux & J. Festa, 1998]:

- **Les cendres volantes siliceuses (V):** sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %.

Ce type de cendres volantes présente des propriétés pouzzolaniques.

- **Les cendres volantes calciques (W):** moins utilisées, elles doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

Outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

1-3-5. Les fillers calcaires:

Le terme filler fait référence à tout produit obtenu par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite...) naturelles ou non.

L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration...) [Escadeillas, 1988].

Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

En France, vers 1996, le prix des filler calcaires était environ cinq fois plus faible que celui du ciment. Les réductions de coût de production et une accessibilité importante sont à l'origine de l'utilisation relativement courante des fillers calcaires en France.

Au Canada, la norme CAN3-A5-M83 limite à 5% le remplacement du ciment Portland (ordinaire de type 10 et à haute résistance initiale de type 30) par des fillers calcaires.

Ce n'est qu'en 1979 que la fabrication et la commercialisation de ciments utilisant des fillers calcaires ont été autorisée en France.

C'est également le cas dans le cadre des normes européennes [ENV197]. Trois différents dosages sont autorisés. Le ciment Portland CEMI peut contenir 5% de fillers calcaires. Les CPJ-CEMII-A et CPJ-CEMII-B peuvent contenir respectivement 6 à 20% et 21 à 35% de constituants secondaires dont les fillers calcaires.

Les valeurs de pourcentages autorisés peuvent varier en fonction des conditions d'exposition des bétons. En 1988, les ciments aux filler calcaires constituaient la majorité des CPJ [Escadeillas, 1988]. Les ciments de la classe CPJ CEMII-A ou B 32.5 et 32.5R (Résistance garantie à 2 jours) était alors les ciments les plus couramment utilisés.

L'addition de fillers calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple :

Compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins. Les fillers peuvent également influencer à l'hydratation.

Être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [Neto et campitell, 1990].

Ils Sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation [A.m. Neville ; 2000], Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du liant, les fillers calcaires doivent présentés une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75 % en masse. [G. Dreux & J. Festa, 1998]. L'addition de fillers calcaire peut se faire à deux temps: au moment de la fabrication du ciment lui même, ou plus tart au moment de la réalisation du mélange cimentaire. Le clinker est plus difficile à broyer que les fillers calcaires.

Outre l'utilisation en remplacement de ciment ou de sable, des études ont été menées pour voir l'effet d'une substitution partielle du gypse par des fillers calcaires.

1-3-5-1. Action sur la porosité et la surface spécifique:

Les fillers calcaires auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du CaCO_3 (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de CaCO_3 et de C_3S anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de C_3S incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de CaCO_3 . Ces chercheurs expliquent notamment le plus important retrait d'une pâte de silicate tricalcique, par le fait que la porosité serait plus importante en présence de carbonate de calcium [Adams et Race, 1990]. À un certain degré d'hydratation, une pâte de C_3S ne contenant pas de CaCO_3 a une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15% de CaCO_3 peut posséder une porosité plus faible, due aux différents degrés d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans CaCO_3 , [Ramachandan et Zhang Chuin-mei, 1986].

Le retrait de séchage serait influencé par l'addition de CaCO_3 . Le retrait d'une pâte de ciment hydraté serait accru par une augmentation de la surface spécifique. Mais le retrait de séchage est influencé non seulement par la finesse et la teneur en eau, mais aussi par la nature minéralogique de l'addition [Adams et Race, 1990]. Selon [Ramachandan et Zhang Chuin-mei, 1986] le retrait est plus important avec CaCO_3 . Mais la différence s'amenuise avec le temps.

1-3-5-2. Action sur les aspects rhéologiques:

La présence de fillers calcaires implique des variations du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. L'effet s'oriente vers un effet fluidifiant.

1-3-5-3. Action sur les propriétés mécaniques:

Beaucoup d'articles ont été écrits pour relier la présence de fillers calcaires avec résistance. Pour beaucoup la résistance serait améliorée, ou au moins équivalente dans le cas d'addition. [Soroka et Setter ; 1977] expliquent notamment une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice obtenue. Le broyage de clinker et de filler calcaires diminue d'une côté la proportion de clinker dans le mélange et de ce fait diminue la résistance atteinte. Un broyage plus fin pourrait être réalisé pour obtenir des résistances équivalentes à un mélange sans ajout. Mais [Schmidt 1995] dit que pour des ajouts compris entre (5 et 10) % les résistances ne sont pas significativement réduites. Et un broyage plus intense n'est pas particulièrement indiqué [Detwiller et Tennis, 1998].

Certains auteurs, comme [Campitelli et Florindo, 1990] remettent en question l'effet bénéfique des fillers sur les propriétés mécaniques. L'addition de filler introduit au moment du

broyage abaisserait les performances de résistance des ciments, même pour l'optimum de SO₃ présent dans le ciment, quel que soit le pourcentage d'ajout ou la finesse de celle-ci [Campitelli et Florindo, 1990] Le broyage concomitant avec celui des fillers ne favorise pas une bonne répartition de particules en taille. Notamment la plus grande part de clinker dans les larges particules ne favoriserait pas le développement de la résistance au jeune âge [Menetrier et Sorrentino, 1986].

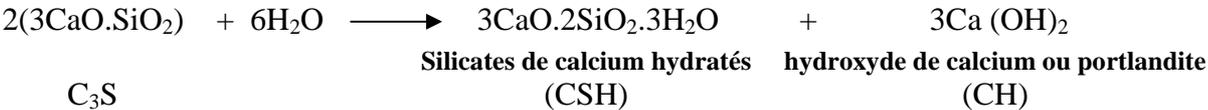
Dans le cas de l'utilisation de carbonate de calcium, des valeurs optimales pour plusieurs paramètres existent qui assurent des propriétés mécaniques acceptables. Pour un mélange d'aluminate tricalcique pur et de carbonate de calcium, la résistance en compression est maximale pour un rapport pondéral de 1.5 C₃A et 1.0 CaCO₃, qui correspond la plus grande quantité de carbonate de calcium hydraté formée (C₃A. CaCO₃.11H) [Campitelli et Florindo, 1990]. IL faut souligner pour terminer deux éléments importants qui doivent être considérés lorsque l'on désire comparer les performances de deux matériaux : le moment du broyage ainsi que le rapport eau/liant comme mentionné ci-dessus, la répartition des tailles des particules de ciment divers à particules de fillers calcaires peut être fort différente suivant le moment du broyage. De plus le remplacement du ciment par les filler induit une proportion moins importante de ciment dans le mélange. Il existe dans les papiers scientifiques des comparaisons de performances de matériaux ayant des rapports eau ciment ou eau/liant constants ou bien encore démontrant des propriétés rhéologiques comparables. Il faut bien entendu garder en tête les paramètres en commun des matériaux que l'on compare.

1-4. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND:

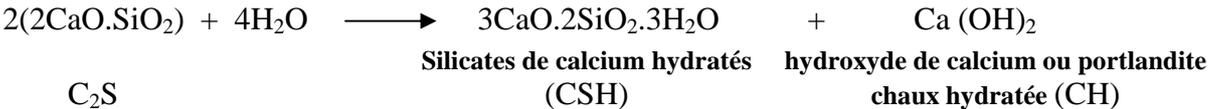
1-4-1. Les réactions d'hydratation:

De manière très schématique, on peut présenter les réactions des différents composés du ciment Portland en écrivant les relations suivantes:

- Le silicate tricalcique (C₃S):

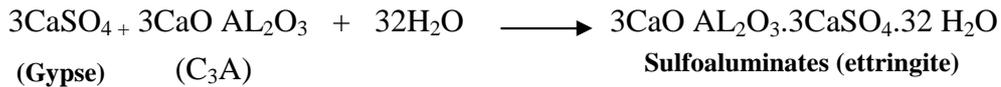


- Le silicate bicalcique (C₂S):

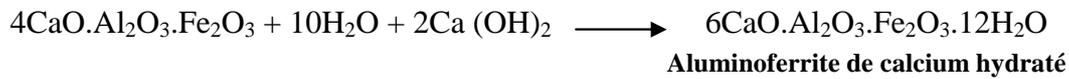


- L'aluminate tricalcique (C₃A):





• L' alumino ferrite tétracalcique (C₄AF):



Une fois hydratée, la pâte de ciment forme une structure cristalline; il est à remarquer que les C₃S et C₂S donnent la même famille d'hydrates dans le C-S-H; ils sont aussi l'agent liant le plus important, soit par les proportions, soit par les caractéristiques mécaniques qu'ils confèrent au matériau durci. Le C-S-H (la pâte de ciment durcie) qui occupe entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée, se présente sous la forme de feuillets très minces qui s'enroulent sur eux même en formant des tubes creux. D'un point de vue morphologique, le gel solide et poreux du C-S-H est un micro-cristal lamellaire, la lamelle étant composée de 2-3 feuillets très minces (voir fig.1.6)[Feldman;1968],[M. Collepardi;1992]

L'excès de calcium, libéré par les réactions d'hydratation du liant, se retrouvent sous forme de portlandite Ca(OH)₂ cristallisée sous forme de plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment partiellement hydratés. On trouve une forte concentration de cristaux de Ca (OH)₂ dans la zone de transition à l'interface pâte de ciment-granulat ou en bordure des bulles d'air.

Le gypse contenu dans le ciment Portland sert à réguler la réaction de prise du ciment par la formation d'un film de cristaux d'ettringite (C₃A.3CaSO₄.32H₂O) à la surface des grains de C₃A, qui se révèlent très actifs et très violent à l'eau et dégage beaucoup de chaleur. En ralentissant l'hydratation de C₃A on évite le phénomène de la fausse prise.

La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

La pâte de ciment hydraté est formée par :

- Les hydrates (CSH, Ca(OH)₂, sulfaluminates);
- Des grains de ciment non hydraté;
- Des espaces capillaires;
- Des bulles d'air. (Figure 1-3)

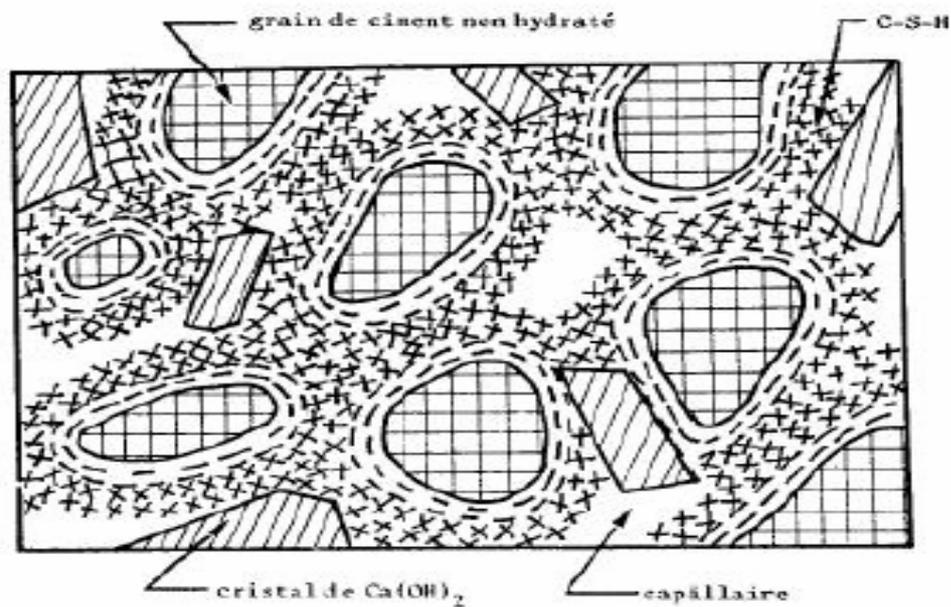


Figure 1-3. Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté
[Pigeon 1981] (Tirée par Dr : Guettala, a h.2005).

Les réactions d'hydratation sont exothermiques et responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires (voir tableau 1.1). Le matériau passe alors d'un état de suspension de particules flocculées à celui de solide viscoélastique. L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait que les réactions de ses différents constituants se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et que celles-ci peuvent s'interférer.

Dès le contact avec l'eau, les différentes phases du ciment se dissolvent superficiellement, ce qui correspond au recouvrement des grains de ciment par les premiers produits de l'hydratation, les silicates de calcium hydratés C-S-H (Figure 1.5 - schémas A et B). Elle dure une vingtaine d'heures. Au fur et à mesure de leur formation, les C-S-H forment des ponts entre les particules de ciment [Brey 92] et la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Ce cristallisé dans la solution entre les grains.

1-4-2. L'état de l'eau dans la pâte de ciment hydraté:

Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes. Cette eau interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état (Figure 1.4).

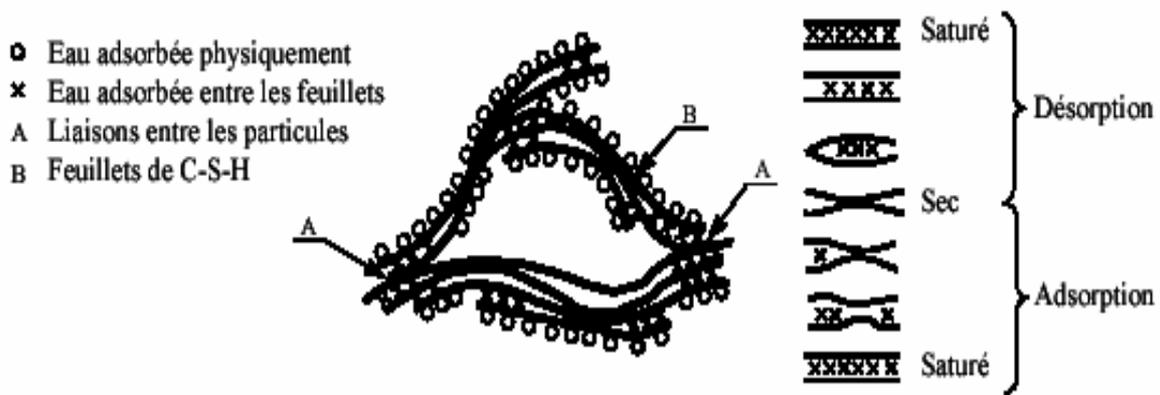


Figure 1-4. Structure du ciment durci selon le modèle de Feldman et Sereda ;1968].

1-4-2-1. 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.

1-4-2-2. 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.

1-4-2-3. L'eau adsorbée :

Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides (surtout sur les parois des capillaires ou des pores de gel). On croit qu'une couche d'environ 6 molécules d'eau, 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.

1-4-2-4. L'eau des capillaires :

Il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment, et selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface, on trouve l'eau libre contenue dans les plus gros capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$). Son départ ne cause pas de changement de volume important (retrait) et l'eau non libre qui 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. Elle a beaucoup d'influence sur le retrait de la pâte.

Le durcissement de la pâte de ciment correspond au remplissage graduel de l'espace entre les grains de ciment par les produits de réaction qui continuent de se former

(Figure1-5). La pâte se densifie et la résistance du matériau augmente. Cette étape de durcissement peut durer jusqu'à un an, tant que l'hydratation n'est pas complète. Le gain sur la résistance mécanique n'est alors plus significatif mais le comportement aux agressions chimiques diverses d'un béton vieilli suffisamment longtemps sera meilleure que celle d'un béton comportant encore des grains de ciment anhydres [Pren; 2000].

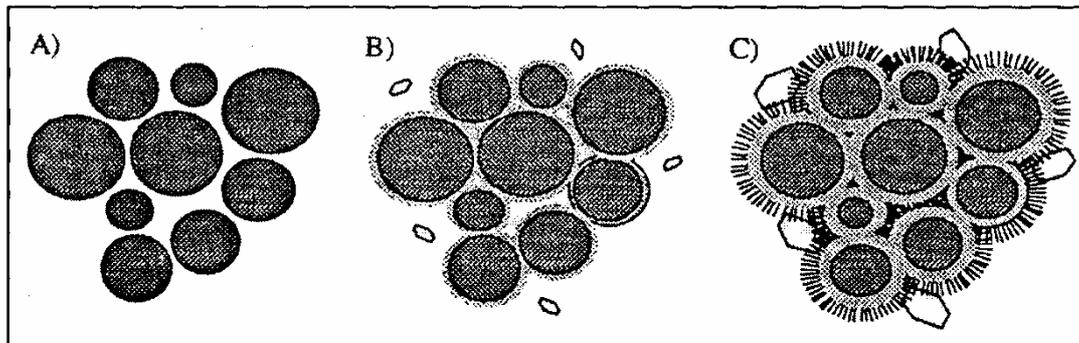


Figure 1-5. Processus de l'hydratation. A) état initial B) Recouvrement des grains de ciment C) Création des liens entre particules [S, Pren; 2000].

Tableau 1-1. Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment d'après [P. C. Hewlett 1972] et [H.F.W Taylor,1997].

Période	Processus chimique	Processus physique
Gâchage	Dissolution rapide du ciment, formation du C-S-H et d'étringite	Fort dégagement de chaleur (1 ^{er} pic thermique)
Dormante	Augmentation rapide du pH et de la teneur en Ca^{2+} de l'eau de gâchage ce qui induit un ralentissement de la dissolution des constituants du ciment. Formation lente de C-S-H et d'étringite et sursaturation en chaux de la phase aqueuse	Inertie thermique et augmentation lente de la viscosité
Prise	Accélération de la dissolution des constituants du ciment grâce à la diminution de la teneur en Ca^{2+} par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$; Hydratation de C_3S pour donner du C-S-H et de la portlandite,	Augmentation du flux thermique, solidification et diminution de la porosité
Ralentissement	Epuisement du gypse et formation du monosulfate d'alumine par la réaction des ions sulfates (provenant de l'étringite) avec le reste des aluminates; Accélération de l'hydratation des C_3S et C_2S .	Deuxième pic thermique et diminution de la porosité
Durcissement	Ralentissement des réactions du fait que les grains anhydres sont recouverts d'hydrate de plus en plus épais.	Diminution du flux thermique et de la porosité

Et selon Hansen, la figure (1.6) permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100% d'hydratation (conservation dans l'eau).

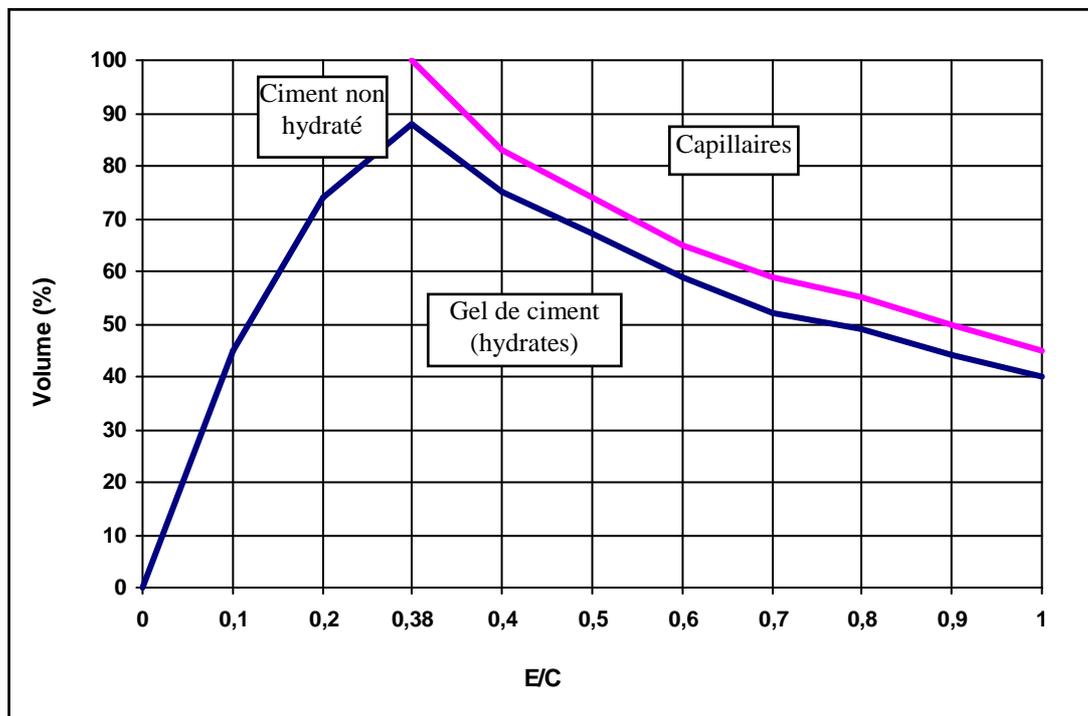


Figure 1-6. Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau. [Hansen 1970].

1-4-3. Hydratation et réaction pouzzolaniques:

L'hydratation des liants hydrauliques se fait par l'intermédiaire d'un processus de dissolution des composés du produit anhydre dans l'eau interstitielle, suivie d'une cristallisation ou une précipitation des hydrates par combinaisons des ions présents dans la solution ainsi formée.

En plus de la contribution à la fluidité, les microsilices sont chimiquement actives. A l'instar de la réaction du silicate de calcium avec l'eau pour créer les hydrates, elle se combine avec la chaux qui s'est libérée pendant l'hydratation du ciment, pour former à son tour un silicate de calcium hydraté résistant. La microstructure a été ainsi renforcée [Cim béton ; 2000].

1-4-4. L'hydratation du laitier:

Les laitiers du haut fourneau sont des matériaux hydrauliques les plus utilisés car leur production est très importante et que leurs propriétés sont stables, comparées à celles des autres sous produits industriels [Galal A., Taha A.S;1990].

Plus de cent ans d'expérience sur les ciments aux laitiers du haut fourneau ont montré clairement leur efficacité dans la confection des structures en béton, et en particulier les structures maritimes [Bijen J. Prof. Dr., 1996].

Seul le laitier granulé est utilisé en cimenterie. Il est ajouté au moment du broyage aux autres constituants (clinker, gypse) Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (90% et plus) de quatre oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) et contiennent une quantité insignifiante des oxydes : TiO_2 , MnO , FeO et les sulfures : CaS , MnS , FeS . [Mezghiche B,1996], [Mezghiche B 1989].

On repère les compositions chimiques des laitiers à l'intérieur d'un tétraèdre dont les quatre sommets représentent respectivement : $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (figure 1-7).

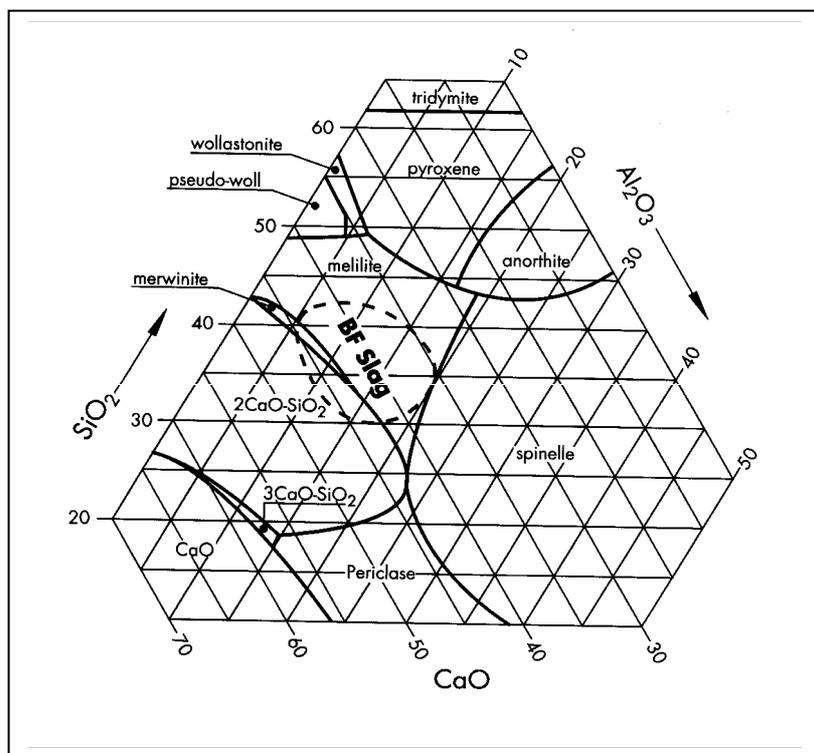


Figure 1-7. Champ des composants chimiques du laitier d'après [Bijen J. Prof. Dr, 1996].

La composition chimique du laitier est schématisée par la formule $\text{C}_5\text{S}_3\text{A}$ reflétant la répartition courante des 3 oxydes [Vornovitch L. V., Dron R, 1975]. L'hydratation du ciment au laitier est étudiée suivant les cas suivants:

1. Absence de gypse.
2. Par activation sulfatique et alcaline.

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

- Le contenu du ciment au laitier en CSH est considérablement supérieur par rapport au ciment portland ; à cause de la production inférieure de la chaux; cette dernière présente

dans le ciment au laitier durci seulement en quelques points, tandis qu'elle représente 25% dans le ciment portland [Bijen J. Prof. Dr, 1996], ce sont des gels denses qui constituent une matière de remplissage, où il y a une augmentation de la compacité. Le contenu élevé de ces gels dans ce ciment conduit à une différence de taille des pores qui engendre une diminution relative de la porosité capillaire qui est due de la précipitation des CSH [Bakker. Rem, 1983].

- l'aluminate tétracalcique apparaît dans les milieux riches en chaux et il est exempt de sulfate, il se forme également à partir de l'activation sodique, grâce à la chaux libérée par le laitier.

1-4-5. L'activité du laitier:

Le rapport entre la composition chimique, la structure et l'activité hydraulique du laitier ont été étudiées 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 et de son traitement thermique [Mehta P. K, 1987]. Une grande attention a été donnée à la relation entre la composition chimique du laitier et la réactivité.

1-4-6. L'activité du filler:

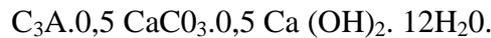
1-4-6-1. Réactivité directe des fillers calcaires:

[Longuet et coll. 1982], ont introduit la notion de filler inerte ou actif'. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C_3A comme évaluation de la réactivité hydraulique d'un filler calcaire donné.

En effet, il a été démontré que le $CaCO_3$ peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons X a permis de détecter la présence de carboaluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange [Ingram et coll. 1990]. La formation de carboaluminates de calcium hydratés est vue comme analogue à celle de l'ettringite [Klemm et adams. 1990]. Il y a une composition entre SO_4 et CO_3 pour réagir avec les aluminates de calcium.

La réaction initiale du ciment, et en particulier celle de l'aluminate tricalcique avec du gypse, est contrôlée par la quantité de particules fines présentes dans le clinker [Campitelli et Florindo, 1990]. La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec l'aluminate tricalcique se traduit par la formation d'un carboaluminate de calcium hydraté de formule $C_3A.CaCO_3.11H_2O$. La forme $C_3A.3CaCO_3.27H_2O$ aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec $CaCO_3$, [Klemm et adams. 1990].

Cependant, la stabilité de ce produit est limitée. L'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur un matériau cimentaire provoquerait la formation d'hémicarboaluminate dont la composition chimique est donnée par la formule suivante:



La solubilité du gypse est plus importante que celle du carbonate de calcium (2.41g/l contre 0.014g/l). Les phases AFm et AFt créés pendant l'hydratation sont au contraire très insolubles [Klemm et adams. 1990].

Sous certaine condition très particulière, l'ettringite, le monosulfoaluminate et le carboaluminate de calcium hydraté peuvent coexister [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

1-4-7. Réactivité indirecte des fillers calcaires:

Le gypse réagit plus vite avec l'aluminate tricalcique pour former de l'ettringite quand du carbonate de calcium est présent dans le mélange, selon [R .Klemm et adams, 1990]. Cela proviendrait de la réaction du $CaCO_3$ sur la surface des grains de C_3A formant une membrane plus perméable de plaquâtes hexagonales. La conversion d'ettringite en monosulfoaluminate hydraté est aussi accélérée [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

Il existe une proportion optimale de gypse et de carbonate de calcium qui provoque l'activation optimale de la réaction. Cet optimum est une fonction de la quantité d'aluminate tricalcique, d'alcalis et de SO_3 présents dans le ciment [Campitelli et florindo, 1990].

D'autres réactions peuvent intervenir entre le $CaCO_3$ et le clinker. Le $CaCO_3$ peut même agir en tant qu'activateur de réactions qui subviennent pour le système clinker- gypse- eau [Campitelli et florindo, 1990].

Des observations au microscope électronique à balayage ont montré que les produits d'hydratation se font sur les particules de C_3S et aussi de $CaCO_3$, confortant ainsi l'idée du carbonate de calcium comme éventuel site de nucléation [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

L'addition de $CaCO_3$ augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue.

Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le dichlorure de calcium .mais sans toutefois diminuer la période d'induction [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en CaCO_3 . Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

Une pâte contenant du carbonate de calcium aurait des silicates de calcium hydratés de rapport C/S légèrement plus haut que celle n'en contenant pas du carbonate de calcium . Par exemple pour des pâtes de CPA, riche en C3A, contenant 0,30 a 60% de fillers calcaires, le rapport C/S moyen mesuré serait respectivement égal à (2.1;1.8 et 1.6 ± 0.2) [Gegout et coll., 1986]. Cela pourrait provenir du fait que des particules de CaCO_3 seraient incorporées dans la phase des C-S-H [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986], Plus la quantité de CaCO_3 incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'a une valeur de 25% [Ramachandran et zhang chun-mei- 1986].

La quantité de portlandite observée augmenterait avec la quantité de fillers ajoutée au ciment.

Dans le cas de fortes teneurs en ajout, la chaux est en cristaux plus gros, groupés en amas [Gegout et coll., 1986]. Il apparaîtrait aussi que les fillers calcaires, par leur relative inertie chimique, peuvent contribuer et diminuer sensiblement la température dans les bétons de masse [Kessal et coll., 1996].

1-4-8. Influence de 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.

- La substitution partielle du ciment par environ 30% de cendres volantes conduit, pour un même rapport eau/liant, à une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre de 2 à 5, après 28 jours.

Les courbes porosimétriques de la figure 1-8 suivante montre que les cendres volantes et 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, pouzzolaniques 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 [Feldman R.F, 1983].

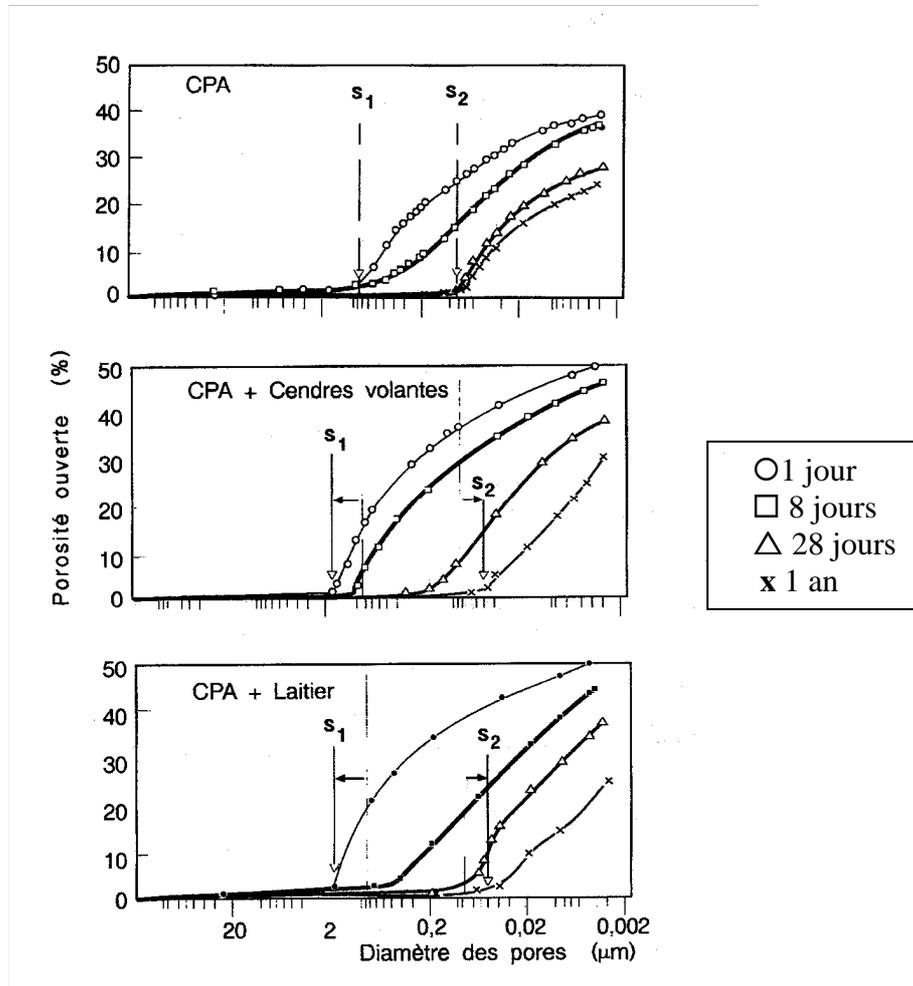


Figure 1-8. Influence de l’addition de laitier ou de cendres volantes sur l’évolution de la structure porosimétriques des pâtes au cours du temps, d’après [Feldman R.F, 1983].

La faible perméabilité des pâtes de ciment pouzzolanique peut être expliqué sur la base du schéma donné dans la (figure 1-8). [GLoukhovski G., Pakhamov V.D, 1978]. 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.

Une partie des produits d’hydratation se forme sur place, tandis que l’autre, par l’effet de dissolution et les phénomènes de transport et de précipitation, se dépose dans les pores capillaires formés au début durant l’hydratation du clinker.

La masse qui se précipite dans les pores est petite et par conséquent elle est incapable de remplir complètement les pores larges, mais elle est suffisante pour stopper les passages entre les pores ou, au moins, de réduire considérablement leur largeur. Comme conséquence, la porosité des pâtes des ciments mélangés est plus grande ou, au mieux, la même que celle des ciments portlands, mais leur perméabilité deviennent plus faible [Hermann K., 1995].

1-5. DURABILITE DES CIMENTS AU LAITIER ET DU FILLER:

1-5-1. Résistances aux eaux agressives:

1-5-1-1. Eaux pures et eaux douces:

Les eaux douces peuvent minéraliser de teneur en dioxyde de carbone agressif comprise entre 15 et 30 mg/l et de pH 5,5 à 6,5, sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs. Toutefois, des expériences récentes établissent que, même dans ce cas, on ne peut pas négliger l'action dissolvante de l'eau [Konecny L., Frost, 1991].

L'eau douce peu théoriquement causer de très gros dégâts au béton. Heureusement, elle n'attaque pratiquement pas un béton étanche à l'eau avec un rapport $E/C < 0,60$ [Amine N, 1998].

L'attaque d'un béton par des eaux pures faiblement agressives ne peut s'effectuer que s'il est peu compact : dans ces conditions, elle consiste surtout en une dissolution de la portlandite et par conséquent le lessivage. Les silicates et les aluminates, moins solubles, sont attaqués plus tardivement lorsqu'une partie de la chaux a déjà été lessivée. La dissolution sélective de leur calcium provoque un accroissement de leur porosité, en même temps que le rapport molaire

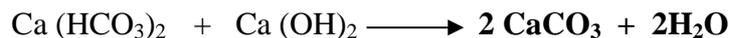
CaO/SiO_2 décroît. Les ions alcalins Na^+ et K^+ , particulièrement mobile, sont également lessivés par les eaux [Konecny L., Frost, 1991].

Le processus d'attaque conduit à des pertes de masses et d'alcalinité due au lessivage de la portlandite, ce qui induit une augmentation de la porosité et de la perméabilité. Il peut se traduire également par une diminution de la cohésion et une chute des résistances mécaniques du béton.

Corrélativement, on constate que les ciments sont d'autant plus résistants à l'attaque par les eaux douces, qu'ils sont moins riches en hydroxyde de calcium et ont une plus grande stabilité chimique. C'est le cas des ciments avec additions minérales (Laitiers, pouzzolanes naturelles, fumée de silice...) dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des CSH de rapport CaO/SiO_2 Faible [Baron J., Ollivier J.P, 1992].

L'attaque du béton par les eaux douces chargées en dioxyde de carbone se déroule conformément à un processus de dissolution - précipitation, selon le mécanisme suivant [Baron J., Ollivier J.P, 1992] :

L'eau amenée à percoler à travers le béton se sature progressivement en bicarbonate, par suite la dissolution de la portlandite et, à un degré moindre, des CSH, lorsque cette solution de bicarbonate vient en contact avec d'autres cristaux de portlandite, il y a précipitation de carbonate de calcium, très peu soluble, qui accroît momentanément la compacité du béton en diminuant la section de percolation:



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



Comme dans le cas des bétons au contact d'eaux pures, on constate que la dégradation par eaux chargées en dioxyde de carbone est fonction de la teneur en portlandite, c'est à dire du type de ciments. Les bétons sont d'autant plus résistants que le ciment libère moins de portlandite

L'hydroxyde de calcium fait plus de 20 à 25 % en poids de la pâte des ciments portlands et son enlèvement provoque une évidente augmentation dans la perméabilité du béton et la déstabilisation des phases hydratées. Dans ce cas, La résistance à la lixiviation des ions Ca^{2+} est d'autant plus grande que le ciment contient moins de chaux, les bétons de CPA, riche en chaux, sont plus sensibles à l'altération que les bétons de ciments au laitiers, pouzzolane, et les bétons de ciment alumineux (exempt de portlandite) [Hermann K., 1995].

Dans ce cas, les ciments pouzzolaniques se comportent mieux que les ciments portlands, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice, à la surface du béton, riche en gel de silice et d'alumine [Baron J., Ollivier J.P, 1992].

La teneur en CaO est environ 64 % dans le CPA et 45 % dans les ciments pouzzolaniques, mais principalement c'est la grande quantité de Ca (OH)_2 et la faible quantité de CSH qui étaient à l'origine de leur faible résistance au lessivage [Hermann K,1995].

Pour les ciments au laitier, la relation entre le type de ciment et l'intensité de l'attaque est illustrée par la figure (1-10).

La figure (1-9) montre que les pertes de masses des mortiers diminuent quand la teneur en laitiers augmente (supérieure à 40 %) Dans le cas d'un CPA, d'un CHF, et d'un ciment alumineux fondu. [Douglas E, 1989].

Les pertes de masses observées sont accompagnées d'une détérioration des caractéristiques mécaniques : résistance à la flexion et à la compression, module de déformation.

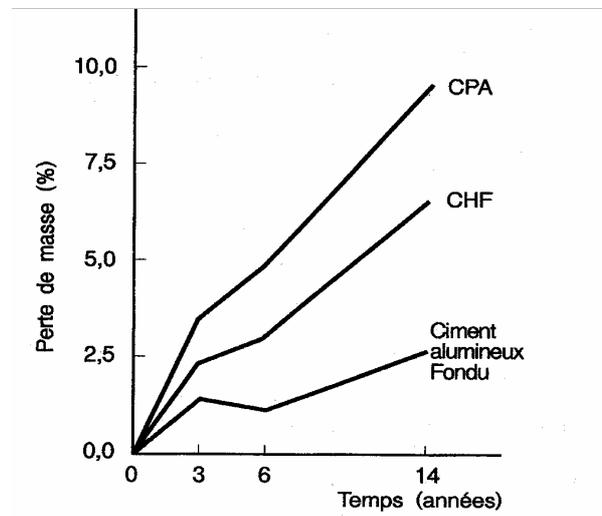


Figure 1-9. Pertes de masse en fonction du temps d'éprouvettes de mortier confectionnées avec différents ciments, conservées dans une eau douce de pH = 5 à 5,5, d'après [Ali A., Amine A.m., Sharara A.M et El-Didamony H, 1994].

1-5-2. Eaux contenant des sulfates:

Quand le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium, sodium et calcium.

Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de CaSO_4 attaque le béton à cause de la réaction entre CaSO_4 et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions qui sont comparativement riches en CaSO_4 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$, comme le cas des pâtes de ciment portland.

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que CaSO_4 puisqu'il réagit non seulement avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'ettringite expansive.

L'importance de la détérioration dû à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment [Hermann K, 1995]. Les additions minérales de laitiers, de pouzzolanes naturelles et de fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates.

On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, au moins pour les bétons âgés.

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

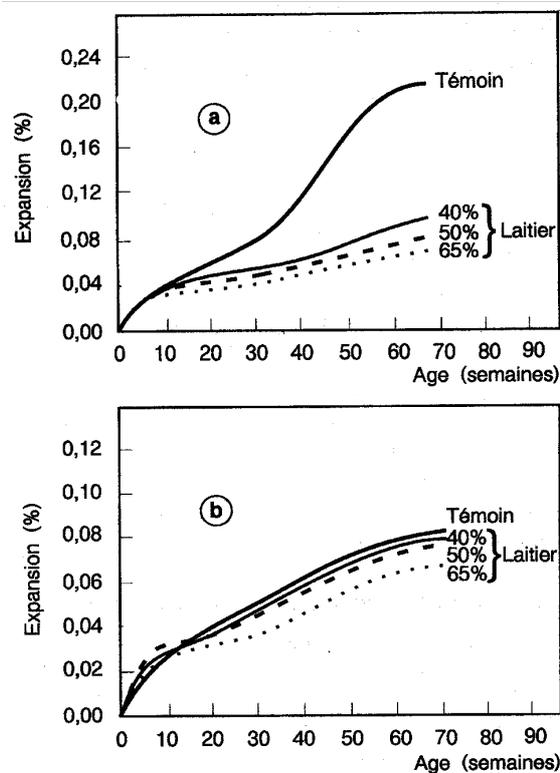


Figure 1-10. L'efficacité de laitiers à réduire les expansions dues aux sulfates, d'après [Douglas E, 1989].

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

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

Lorsque la teneur en laitier est inférieure à 60%, et dans le cas des ciments avec ajout de pouzzolane, c'est le clinker de base qui détermine la tenue du ciment aux sulfates. Ce clinker doit satisfaire aux critères exigés pour les ciments portland, en ce qui concerne les teneurs en C_3A et en SO_3 (voir figure I.11) [Baron J., Ollivier J.P; 1992].

Pour le filler de nombreuses études faites sur l'action des ions chlore sur des systèmes cimentaires incorporant des fillers calcaires, mais très restreint. Deux études portant sur la diffusion des ions chlore dans des pâtes et des mortiers ont montré que l'utilisation de fillers calcaires pouvait permettre de réduire le coefficient de diffusion du matériau [Tezlica et coll., 1992],[Hornain et coll., 1995].

1-6. EVALUATION DE LA POROSITE:

1-6-1. Introduction:

Depuis plus d'un siècle, on sait que, moins on utilise d'eau pour une quantité donnée de ciment, plus le béton sera résistant. L'eau est un ingrédient essentiel du béton qui remplit deux fonctions de base: une fonction physique qui donne au béton les propriétés rhéologiques nécessaires et une fonction chimique qui permet le développement de la réaction d'hydratation. Malheureusement pour obtenir un béton maniable quand on utilise que de l'eau et le ciment, il est donc nécessaire d'utiliser plus d'eau qu'il en faut pour hydrater toutes les particules de ciment. Cette eau additionnelle qui ne sera jamais liée à des particules de ciment dans la pâte durcie crée **une porosité** à l'intérieur de la pâte durcie ce qui affaiblit les propriétés mécaniques du béton et diminue considérablement sa durabilité.

1-6-2. Définition:

Dans la pâte du ciment durcie, un grand volume des pores est inerte dans la structure. La porosité est principalement un dérivé de la présence de la quantité de l'eau. Le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte du ciment frais devient des pores dans la pâte du ciment durcie. Ces pores sont divisés en deux catégories:

- **La première:** représente le volume des pores capillaires qui dépendent principalement du rapport eau/ciment et le degré d'hydratation.

- **La deuxième:** représente les pores du gel. Quand l'hydratation augmente, la quantité et la distribution de la porosité entre les capillaires et les pores de gel change. Initialement les pores sont des pores capillaires, une fois le processus d'hydratation a progressé le volume des pores est réduit car l'espace des capillaires se remplit avec le produit d'hydratation, d'où une croissance de la porosité due au gel, ce qui entraîne une réduction de la porosité totale. La figure (1-11) montre la relation entre la porosité totale et le rapport eau/ciment en fonction du degré d'hydratation, ce qui nous amène à remarquer que la porosité totale est intimement liée à la porosité des capillaires. [Verbeck 1960] a divisé arbitrairement les pores en deux régions, les pores du gel considérés variant entre [10 à 80°A] et les capillaires de [80°A à 13µm].

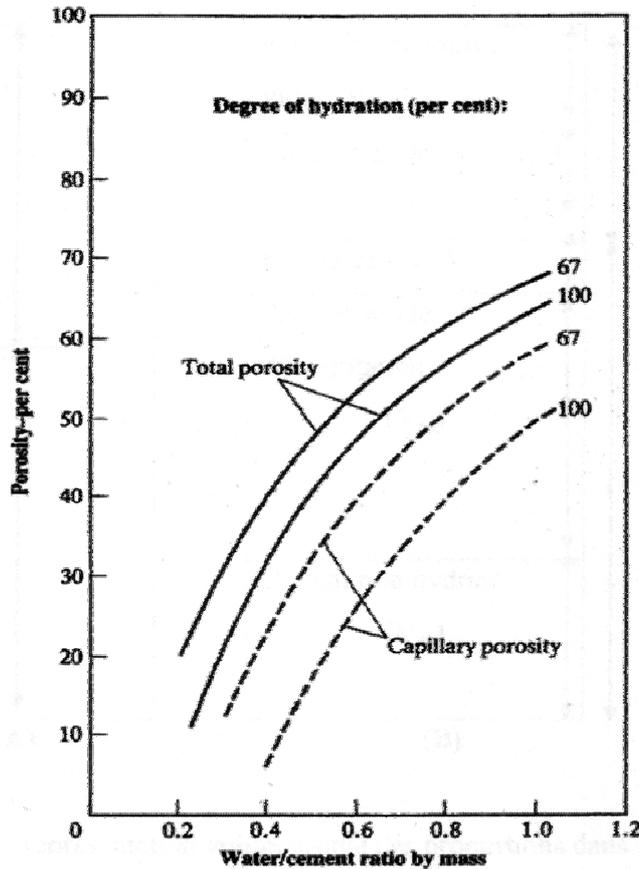


Figure 1-11. Influence du rapport E/C et le degré d'hydratation sur la porosité capillaire et la porosité totale de la pâte de ciment [Neville & Brooks ; 1987]

1-6-2-1. Pores du gel:

Il s'agit d'un gel poreux puisqu'il peut retenir une grande quantité d'eau évaporable. Les pores du gel sont essentiellement des vides interstitiels interconnectés entre les particules du gel en forme d'aiguille, de plaque ou de feuillet.

La figure (1-12) illustre les proportions par volumes des différents constituants de la pâte du ciment avant et après hydratation. Le ciment hydraté ou le gel du ciment consiste à un produit solide d'hydratation plus de l'eau qui est absorbé par une grande surface des hydrates, cette eau s'appelle '*eau du gel*' qui se situe entre les produits du solide de l'hydratation qu'on appelle les pores du gel. En plus de l'eau du gel, il existe aussi l'eau

combinée chimiquement et physiquement avec les produits d'hydratation. La quantité de cette eau peut être déterminée comme étant une eau non évaporable. Le produit solide d'hydratation occupe un volume qui peut être moins que la somme du volume absolu du ciment sec et de l'eau à l'origine.

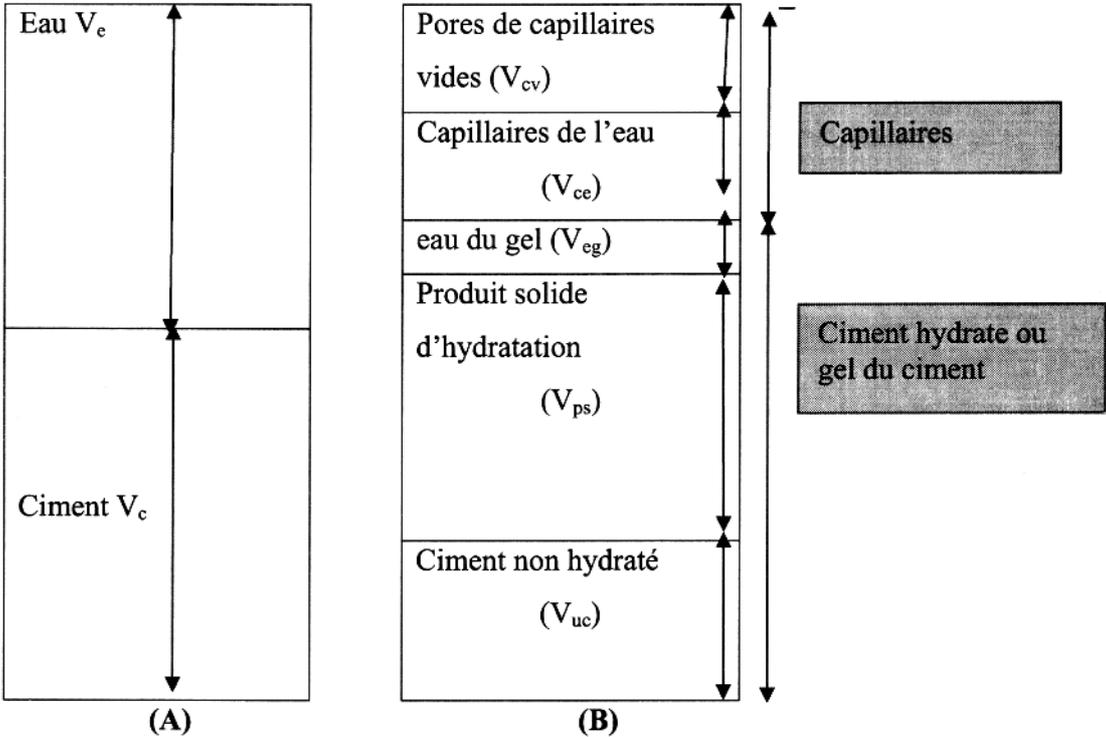


Figure 1-12. Représentation volumétrique des proportions dans la pâte de ciment
(A) avant hydratation (degré d'hydratation, h=0)
(B) pendant l'hydratation (degré d'hydratation, h)

A un rapport critique du rapport Eau/Ciment massique, (autour de 0.38), une pâte de ciment hydratée peut ne pas avoir une porosité de capillaires. Elle ne représente qu'une porosité dû au gel, qui représente 28% du volume du gel, cependant, à un grand rapport Eau/Ciment et à une hydratation complète, il peut y avoir à peu près 28 % de porosité du gel plus une porosité des capillaires dû à l'excès de l'eau [Powers, (1960)].

1-6-2-2. Pores capillaires:

Les pores capillaires représentent la partie du volume brut qui n'a pas été remplie par le produit d'hydratation. La porosité capillaire de la pâte dépend à la fois du rapport eau/ciment et du degré d'hydratation. Ces pores capillaires sont interconnectés et principalement responsables de la perméabilité de la pâte de ciment durci et de sa vulnérabilité face aux cycles de gel et de dégel.

Lorsque le rapport eau/ciment massique est supérieur à 0.38, théoriquement tout le ciment peut s'hydrater, mais les pores capillaires sont néanmoins toujours présentes,

certaines capillaires contiendront l'excès d'eau de malaxage, les autres se rempliront en absorbant de l'eau externe au système. La figure (1-13) montre les volumes relatifs du ciment non hydraté, des produits d'hydratation et des capillaires dans des mélanges de rapports eau/ciment.

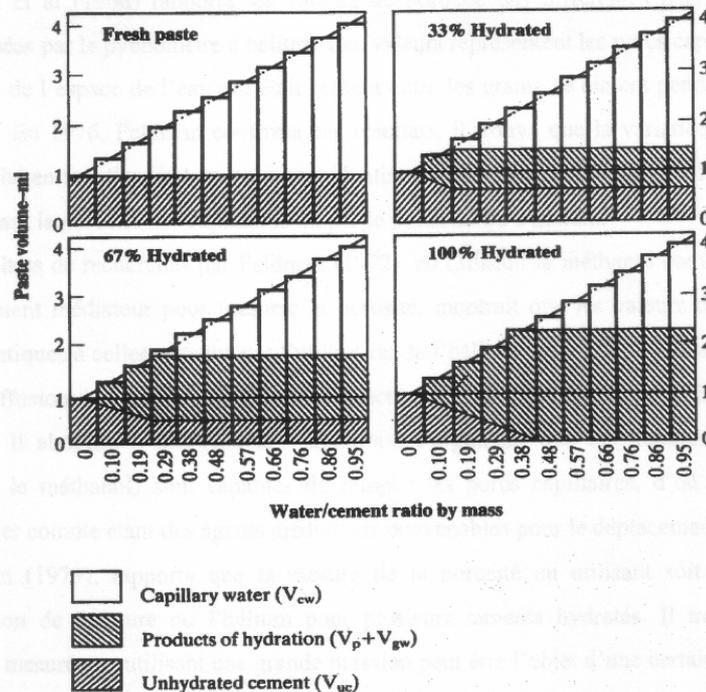


Figure 1-13. Différentes compositions d'une pâte de ciment à différents stades d'hydratation [Powers1949].

1-6-3. Les différentes techniques préalablement utilisées:

Il existe de nombreuses techniques d'étude de la microstructure et plus spécialement d'étude de la porosité. En général, elles sont indirectes et l'interprétation des données qu'elles fournissent intègre des hypothèses et des modèles. Étant donné la complexité du matériau cimentaire et l'aspect indirect de ces techniques, il s'avère important de comparer leurs résultats. Leur application peut également être limitée soit par leur aspect pratique (préparation d'échantillon, ...) soit par le caractère intrinsèque (échelle pas assez fine,.....).

1-6-3-1. Techniques d'imagerie:

La meilleure technique est celle qui donne une image directe de la structure.

La technique la plus usuelle est la microscopie électronique à balayage (**MEB**). Là encore le problème de la préparation du matériau se pose. Notamment, l'échantillon doit être coupé et poli afin de présenter une surface plane. De plus, la plupart du temps la pâte doit être séchée, ce qui risque de modifier la microstructure. De plus, l'interprétation en terme

volumique de ces données en deux dimensions doit être prise avec de grandes précautions.[Mellas, 2003].

L'imagerie RMN peut en principe fournir une image en trois dimensions. Cette technique est fondée sur l'utilisation de gradients de champs magnétiques qui permettent une discrimination spatiale des différentes parties de l'échantillon. On peut alors obtenir une carte du liquide inclus dans la porosité du matériau. Cependant, à l'heure actuelle, la résolution de cette technique est supérieure au micromètre.

1-6-3-2. Adsorption de gaz:

Ces techniques sont basées sur le fait que la condensation est modifiée pour un gaz compris dans des pores et pour un gaz libre. Cette différence est due à l'interaction des molécules de ce gaz avec les atomes de la surface du solide. La mesure du volume de gaz (N_2 , H_2O , ...) adsorbé sur les parois des pores en fonction de la pression appliquée permet de tracer des isothermes.

Moyennant quelques hypothèses (nombre de couches adsorbées, ...) on peut évaluer la surface spécifique de la pâte (surface par unité de masse).

Cette technique permet d'atteindre de porosités fines, jusqu'à quelques Å [M. C. Garci Juenger and H. M. Jennings; 2001], [H. M. Jennings and P. D. Tennis 1994]. Cependant, elle nécessite une étape préalable de séchage qui peut être très longue (plusieurs semaines) et qui risque de détruire ou de modifier la microstructure. De plus, les résultats obtenus par différentes équipes montrent des variations importantes qui proviennent en partie des différences dans les conditions de préparation du matériau.

1-6-3-3. Diffusion aux petits angles;

Ces techniques consistent en l'analyse de l'intensité d'une radiation diffusée par le matériau. Les techniques de diffusion aux petits angles utilisent soit un rayonnement de neutrons (SANS) soit un rayonnement de rayons X (SAXS).

La figure de diffusion donne des informations statistiques sur l'ensemble d'objets diffusants. Les interprétations des données expérimentales nécessitent un modèle. Ces techniques sont non destructives et ne nécessitent pas d'étape de séchage [42] [D. Pearson and A. J. Allen.1985] l'application de ces techniques aux pâtes de ciments a été montrée par [Häussler et al .1994] .

Maggion [R. Maggion1992] il a fait des mesures par SAXS, la rugosité des interfaces solide/liquide (dimension fractale de surface) et la corrélation de position entre les grains de matière (dimension fractale de masse). D'après Winslow [44][Douglas Winslow, John M. Bukowski, et J. Francis Young, 1994] le SAXS permet de sonder des échelles plus petites que

le SANS : les valeurs des surfaces spécifiques obtenues par SAXS sont proches des valeurs obtenues par RMN ou par adsorption d'eau, alors que celles obtenues par SANS sont proches des résultats d'adsorption d'azote.

1-6-4. Les techniques adaptées à nos recherches:

Pendant ces dernières années, parmi les techniques les plus abordées nous avons celle pour la détermination de la porosité par intrusion de mercure (MIP). Celle-ci consiste à faire introduire le mercure dans les pores d'un corps par application d'une grande pression en supposant que les pores ont des formes simples. Cette méthode est utilisée principalement pour la détermination de la structure des pores de la pâte de ciment hydratée. La relation entre la pression appliquée et le diamètre des pores a été développée [paasb ; 1921]. Une illustration globale de cette méthode a été publiée par [Orr 1970].

D'après Shi et [Winslow; 1985], l'application d'une grande pression sur la pâte de ciment hydraté peut provoquer la destruction de la structure d'une part et d'autre part les pores ayant un diamètre inférieur à 30\AA ne sont pas pris en considération, en parallèle à cette méthode il y a d'autres dont on a utilisé un remplacement des fluides comme le méthanol ou le pycnomètre par l'hélium.

[helmuth et al ; 1966] rapporta les valeurs de porosité des différentes pâtes de ciment déterminées par le pycnomètre à hélium.

Ces valeurs représentent les pores capillaires et ce qui reste de l'espace de l'eau qui était présent entre les grains de ciment pendant le temps de prise, en 1976, Feldman confirma ces résultats, il trouva que la variation du module d'élasticité en fonction de la porosité est identique quand cette porosité est calculée soit en considérant la porosité des capillaires ou par le pycnomètre à hélium. Les résultats de recherches par [Feldman ;1972], en utilisant le méthanol comme agent de déplacement médiateur pour mesurer la porosité, montraient que les valeurs des porosités sont identiques à celles obtenues par l'utilisation de l'hélium.

En 1973, Feldman a publié ses travaux sur la diffusion de l'hélium dans la microstructure du ciment portland ordinaire, il aboutira à des résultats supportant l'argument que les liquides organiques (comme le méthanol) sont capables de remplir les pores capillaires, d'où on peut les considérer comme étant des agents médiateurs convenables pour le déplacement de l'eau. [Beaudoin;1979] rapporte que la mesure de la porosité soit par la méthode d'intrusion de mercure ou l'hélium pour plusieurs ciments hydratés, trouve que la porosité mesurée en utilisant une grande pression peut être l'objet d'une certaine limitation dû à la microstructure.

La porosité obtenue par le mercure est inférieure à celle obtenue par l'hélium ceci à basse porosité, car il est possible que l'espace existant dans l'hydroxyde de calcium ne puisse pas être atteint par le mercure, ce phénomène est illustré dans la figure (1-14). [Shi et Winslow (1985)] confirmaient que l'utilisation d'une grande pression pendant l'intrusion du mercure réduit le volume des pores de la pâte du ciment hydratée, cette réduction est due essentiellement aux petits pores du gel.

La recherche sur le méthanol comme agent médiateur de déplacement a été rapporté aussi par [Parrot et al ; 1981] dont les travaux ont fait l'objet d'étude de l'effet du séchage basé sur l'échange de l'eau par le méthanol dans les pores. Ils ont trouvé que pour un ciment dont le rapport E/C est de 0.6 (par masse) l'échange de l'eau par le méthanol montre que le volume des pores occupé par le méthanol est seulement de 0.6 % en moyenne de celui occupé par les pores remplis d'eau initialement. Cette méthode d'échange procure des informations fiables sur la structure.

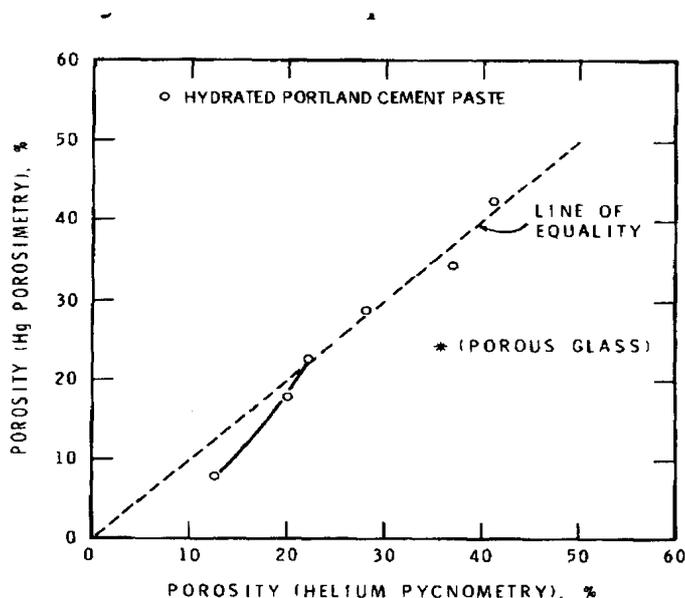


Figure 1-14. Relation entre la porosité obtenue par le mercure en fonction de celle obtenue par l'hélium de ciment Portland hydraté [Beaudoin ; 1979].

Dans le cas du béton, constitué par des différents granulats fins et gros et le ciment avec des proportions par masses et un rapport Eau/Ciment par masse, le volume total des pores est la somme des porosités des gros granulats, du sable, de la pâte de ciment ainsi que le volume de l'air entraîné dans le béton.

Théoriquement, La porosité du béton peut être déterminée mathématiquement par des formules très simples [Neville et Brooks ; 1987], en connaissant les différents paramètres tel que les proportions des agrégats, du ciment, rapport E/C, la quantité de l'air

dans le béton et la nature des agrégats avec leurs caractéristiques physiques, tout cela bien entendu avec un degré d'hydratation connu et bien précis. Or dans la pratique et plus particulièrement dans la cas litigieux de la qualité du béton in situ, les caractéristiques des différents matériaux, le taux d'hydratation et la porosité sont nécessaire pour résoudre le conflit, de cette dernière et peut être obtenue comme étant une donnée en bloc soit par intrusion de mercure ou par les méthodes de déplacement comme le méthanol ou l'hélium. Mais les informations de la microstructure du ciment, premier responsable de la durabilité et de la résistance du béton, restent inconnues et difficilement atteints.

Une autre méthode de mesure de la porosité dite porosité accessible à l'eau; cette méthode est une recommandation AFREM intitulée «Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau » [Recommandation AFGC décembre; 1997]. L'essai consiste à déterminer par pesée les éléments suivants : la masse d'un corps d'épreuve sec, sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique. La gamme de mesure couverte par cette méthode va de 1 % à 20 % environ. Les valeurs présentées dans le tableau suivant sont données à titre indicatif :

Tableau 1-2. Porosités à l'eau comparées des différents types de bétons.

	BO OC	BHP HPC	BTHP VHC	BFUP UHPFRC
Porosité à l'eau (%)	12 - 16	9 - 12	6 - 9	1,5 - 6
Water porosity (%)				

Dans notre pays la technique de détermination de porosité avec une méthode basée sur la norme ASTM. Designation: C642 (Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete).

La méthode consiste à faire sécher les éprouvettes dans une étuve à 105 °C pendant au moins 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante. Il faut ensuite procéder à une immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures. En dernier lieu, il faut faire chauffer l'échantillon jusqu'à ébullition pendant 5 heures.

Les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et dans l'eau (pesée hydrostatique).

Le poids de l'échantillon après l'étuvage est désigné par A, le poids de l'échantillon après ébullition est désigné par C (pesée à l'air) et par D (pesée à l'eau).

La porosité est déterminée par la loi de la ASTM désignation C642

$$\mathbf{V_p = [(C - A) / (C - D) \times 100] \quad [1-1].}$$

Où: **V_p**: Volume des pores (des vides) (%).

A: poids de l'échantillon sec (après étuvage) (g).

C: Poids à l'air après immersion et ébullition (g).

D: Poids à l'eau après immersion et ébullition (g).

Cette méthode est appliquée dans le laboratoire de développement des Géo matériaux Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie par [Ben cheikh M, Baali L; 2003].

Leurs résultats montrent qu'un accroissement de la porosité entraîne un accroissement de la perméabilité et une réduction de la résistance.

Les résultats obtenus montrent d'une façon pratique que l'augmentation du dosage en ciment entraîne une réduction du coefficient de perméabilité et de porosité, avec une augmentation de la résistance.

Cela se confirme avec les travaux de [Baron et al (1992)]. « La vitesse de la perméabilité varie comme l'inverse du dosage en ciment, si le dosage est réduit, la vitesse de la perméabilité augmente plus rapidement ».

Et notre recherche sera basée sur les travaux de [Mellas; 2003] pour continuer de mesurer la porosité par l'échange de méthanol; La porosité obtenue par l'échange du méthanol est calculée seulement pour les échantillons de la pâte du ciment durcie et ne peut pas être appliquée aux échantillons de béton, car les échantillons sont petits et ne représentent pas les proportions réelles des ingrédients dans le mélange.

Les proportions des ingrédients varient d'un échantillon à un autre. Un test préliminaire était réalisé sur des tranches minces de 3mm de la pâte de ciment et de mortier coupés des prismes. La détermination de la porosité par le remplacement du méthanol est obtenue par trempage des échantillons dans une quantité d'eau jusqu'à un poids constant avant de mesurer le poids de l'échantillon saturé superficiellement sec ainsi que le volume. Les tranches sont ensuite immergées dans le méthanol et le décroissement du poids était contrôlé en fonction du temps d'immersion.

L'échange complet est indiqué par une atteinte d'un poids constant, en générale dépendant de l'âge, la procédure dure 3 à 14 jours, La porosité totale basée sur la saturation de l'échantillon par de l'eau était trouvée approximativement [**3%**] plus grande que celle obtenue par l'échange par le méthanol, les résultats obtenus était avec une grande concordance avec ceux obtenus par [Patel et al ; 1984].

Pour éviter une hydratation supplémentaire, les échantillons sont immergés directement dans le méthanol du moment que ces échantillons seront utilisés pour la détermination de la porosité totale. Les valeurs des volumes des tranches étaient obtenues par pesage l'échantillon saturé par le méthanol avec une surface sèche à l'air puis

totalement immergé dans le méthanol. La densité était obtenue par un densimètre à bouteille; Le poids sec de chaque échantillon était obtenu après qu'il a été entreposé à 20°C sur du gel de la silice pour 48 heures. Le volume des pores est obtenu par la formule (1-2), ci-dessous:

$$V_m = (W_m - W_a) / \gamma_m \quad [1-2].$$

Où: **W_a**: poids de l'échantillon a l'état sec (g).

W_m: poids de l'échantillon immergé dans le méthanol (g).

γ_m: densité du méthanol (g/cm³).

Le volume des pores était obtenu à partir du poids de l'échantillon saturé superficiellement sec par le méthanol moins le poids sec, après avoir stocké l'échantillon dans le gel de la silice, divisé par la densité du méthanol.

La porosité par échange de méthanol sera calculé par la formule suivante:

$$P_m = V_p / V_t \quad [1-3].$$

Où; **P_m**: la porosité totale basée sur l'échange du méthanol.

V_p: le volume des pores occupé par le méthanol dans la pâte du ciment ou mortier.

V_t: le volume total.

1-6-5. La relation entre la porosité et la résistance:

Il est à noter que la structure des pores a une grande influence sur les propriétés mécaniques du béton [Rostasy et al. 1980, Perreira et al. 1989, Noumowe 1995] [H.F.W Taylor1997] [T.C Powers and H.H steinour1955] [Pihlajavaara S.E.; 1972]. De nombreux essais ont permis de mettre en évidence l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques du béton et plusieurs auteurs ont même proposé des relations théoriques permettant de lier la porosité totale à diverses caractéristiques [M, Rossler et Older 1985] [C.J, Perreira et al 1989] [Perreira C.J., Rice R.W., Skalny J.P. et CraceW.R. 1989].

La figure (1-15) présente à titre indicatif les relations de la résistance en compression en fonction de la porosité $\Phi = (V_p / V_{tot,})$, proposées par différents auteurs.

Sous hautes températures la porosité évolue de façon significative du fait des pressions de pores. Ceci provoque une altération des propriétés mécaniques.

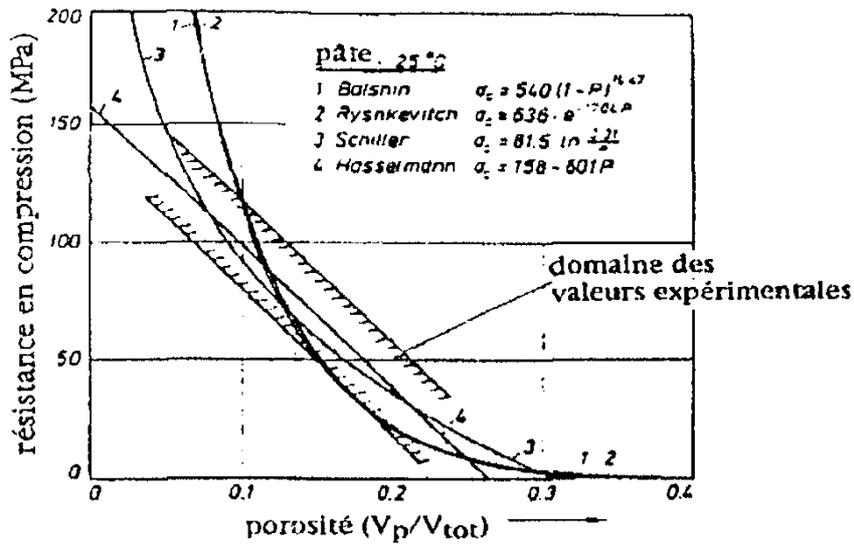


Figure 1-15. Evolution de la résistance en compression du béton en fonction de sa porosité. [Rossler et older 1985].

En 1892 Ferret exprime une relation des principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment hydraté qui sont le rapport de l'eau disponible au volume de la phase de silicates qui peut s'hydrater et la quantité d'air piégé durant le malaxage. Cette relation est exprimée sous forme de la loi suivante:

$$\sigma = k / (1 + e/c)^2 \quad [1-4].$$

Ou : σ : la résistance.

k : constante empirique.

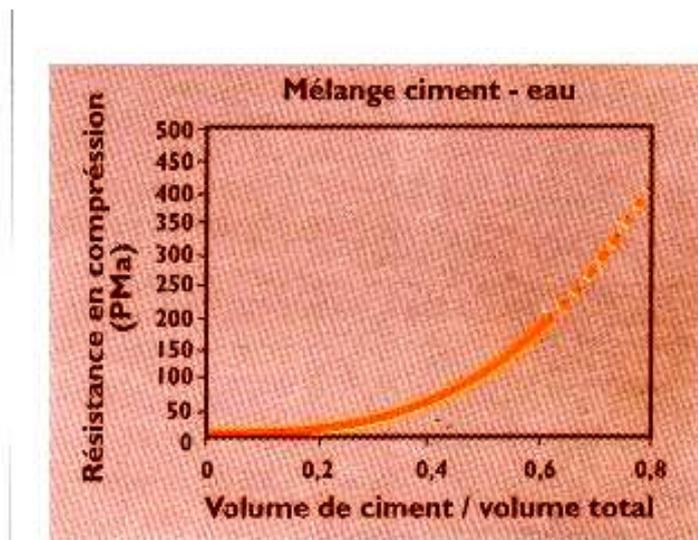


Figure 1-16. La loi de Féret (1892).

Balshin (1949) a suggéré une formule empirique pour des solides poreux:

$$\sigma = \sigma_o \cdot (1 - P)^A \quad [1-5].$$

Où; σ : résistance. σ_o : résistance à une porosité égale à zéro.

P : porosité. A : constante empirique.

Cette équation est utilisée par [Fagerlund en 1973] pour le calcul de la porosité dans le béton dont la porosité zéro est donnée théoriquement bien que cette valeur ne puisse pas être atteinte,

En 1953, [Ryshkevitch (1953)] suggérait, l'équation suivante concernant un matériau homogène, poreux :

$$\sigma = \sigma_o \cdot \exp(-BP) \quad [1-6].$$

Où; σ_o : est la résistance à une porosité égale à zéro.

P : porosité.

B : Constante empirique.

Selon cette équation, il existe une relation linéaire entre la porosité et le logarithme de résistance qui a été utilisée par [Manning et Hope (1971)] [Schiller (1958)], (1971) suggéra une équation permettant le calcul de cette résistance pour matériau céramique.

$$\sigma = K \cdot \ln(P_o/P) \quad [1-7].$$

Où; K : constante empirique.

P_o : porosité à une résistance égale à zéro.

[Fagerlund (1973)] trouva que la relation entre la porosité et la résistance dans le béton ne peut être obtenue que si on prend en considération les contraintes causées par les agrégats poreux ou non poreux et le degré d'hydratation du béton.

[Watson (1981)] s'est intéressé à la relation entre la résistance d'un ciment Portland ordinaire et la porosité basée sur le pycnomètre à hélium, il trouva dans des conditions expérimentales que la relation entre la résistance de compression et la porosité du ciment hydraté est linéaire et peut être écrite comme suit:

$$\sigma = Kh \cdot [(Vs/Vp) - (Vs/Vp)_{cr}] \quad [1-8].$$

Où; σ : résistance à la compression.

Vs/Vp_{ph} : Rapport du Volume du solide sur le Volumes des pores déterminé par le pycnomètre à hélium.

$(V_s/V_{pph})_{cr}$: Rapport du Volume du solide sur le Volume des pores critique correspondant à une résistance zéro.

K_h : const.

La résistance d'un mortier de ciment ou d'un béton dépend de la résistance de la pâte du ciment de même que celle des granulats. Le ciment hydraté, obtenu après les réactions chimiques, est l'élément responsable du développement de la résistance du béton ou du mortier. La contribution du ciment dans la résistance du béton dépend de la participation de chacun de ses différents composants.

De nombreuses formules ont été établies pour décrire l'influence de la porosité sur la résistance des matériaux; mais aucune de ces formules ne peut s'appliquer directement à un matériau hétérogène tel que le béton. Dans un tel matériau les agrégats jouent un rôle prépondérant, par rapport aux contraintes qui leurs sont appliquées.

L'objectif de notre étude consiste à ajouter des additions minérales comme le laitier et le filler calcaire à des proportions variables pour deux buts; d'une part pour apprécier le pourcentage de chaque ajout et son influence sur les propriétés physico-chimiques et son influence sur le comportement mécanique des mortiers et liantes contenant ces ajouts, afin d'aboutir à quelques perfectionnements concernant: les propriétés physiques, le comportement mécanique et la durabilité et d'autre part découvrir l'impact de ces ajouts sur la porosité du liant et du mortier par l'utilisation du méthanol comme ingrédient de porosité pour estimer cette dernière.

Enfin notre étude est finalisée par des équations expérimentales représentant la relation entre la porosité et la résistance mécanique.

Le chapitre suivant représente les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de ces matériaux utilisés.

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES
DES MATERIAUX
UTILISES ET LES
METHODES D'ESSAIS

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES

ET LES METHODES D'ESSAIS

2-1. INTRODUCTION :

Ce chapitre présente à la fois les matériaux que nous utiliserons, et les méthodes qui seront mises en œuvre dans la suite de ce travail, après on exposera les caractéristiques chimiques et minéralogique de ces matériaux puis le plan expérimental de notre étude.

2-2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES :

2-2-1. Le Laitier :

Dans notre étude on a utilisé le laitier granulé de haut fourneau de complexe sidérurgique d'El-Hadjar, Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie de AIN-TOUTA.

2-2-1-1. Analyse du laitier :

Tableau 2-1. Composition chimique du laitier.

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	S
(%)	40,80	5,2	0,53	43,01	6,4	3,02	0,8

La qualité du laitier est appréciée par deux modules :

Tableau 2-2. Module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma).

Module	Formule	Valeur	Remarque
Mb	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	1,074	Mb>1 donc le laitier est basique
Ma	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	0,127	

2-2-1-2. Propriétés physiques de laitier:

- Masse volumique apparente = 1080 kg/m³.
- Masse volumique absolue = 2733 kg/m³.
- Surface spécifique = 3500 cm²/g.

2-2-2. Le Ciment portland:

Le ciment qu'on a utilisé est un ciment portland composé, provenant de la cimenterie d'AIN-TOUTA, dont la composition chimique et minéralogique est représentée ci-dessous:

2-2-2-1. Analyse chimique et minéralogique du ciment: [fiche technique -
 Décembre 2004]

Tableau 2-3. Composition chimique et minéralogique de ciment.

Composition chimique (%)						Composition minéralogique (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Chaux libre	Résidu insoluble	Perte au feu	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20,34	5,37	3,00	61,69	1,8	0,97	1,12	5,03	58,09	23,32	8,32	10,27

2-2-2-2. Propriétés physiques de ciment:

- Masse volumique apparente = 1215 kg/m³.
- Masse volumique absolue = 3150 kg/m³.
- Surface spécifique = 3371 cm²/g.

2-2-3. Le filler calcaire:

Les fillers proviennent de la carrière géante (E.N.G) d'El Khroub, près de Constantine. Ils sont de nature calcaire. La composition chimique est représentée au-dessous.

Tableau 2-4. Composition chimique d'un filler calcaire.[laboratoire de la cimenterie d' AIN-TOUTA].

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	NaCl	PF
0.58	0.02	0.06	55.80	0.06	0.08	0.56	43.53

2-2-3-1. Propriétés physiques de filler calcaire :

- Masse volumique apparente = 1530kg/m³.
- Masse volumique absolue = 2720 kg/m³.
- Surface spécifique = 3000 cm²/g.

2-2-4. Le sable:

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

2-2-4-1. Analyse granulométrique:

Tableau 2-5. Analyse granulométrique du sable.

Ouvertures de mailles (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5,000	0,00	0,00	0,00	100,00
2,500	190.0	190.00	9.5	90,50
1,250	210.00	400.00	20.00	80,00
0,630	480.0	880.00	44.00	56,00

0,315	610.00	1490.00	74.5	25,50
0,160	290.0	1780.00	89.00	11.00
0,080	120.00	1900.00	95.00	5
Le fond	98	1998	99,9	0,10

2-2-4-2. Propriétés physiques de sable:

- Masse volumique apparente = 1440 kg/m³.
- Masse volumique absolue = 2500 kg/m³.
- Module de finesse = 2,37.
- Equivalent de sable = 67,00.

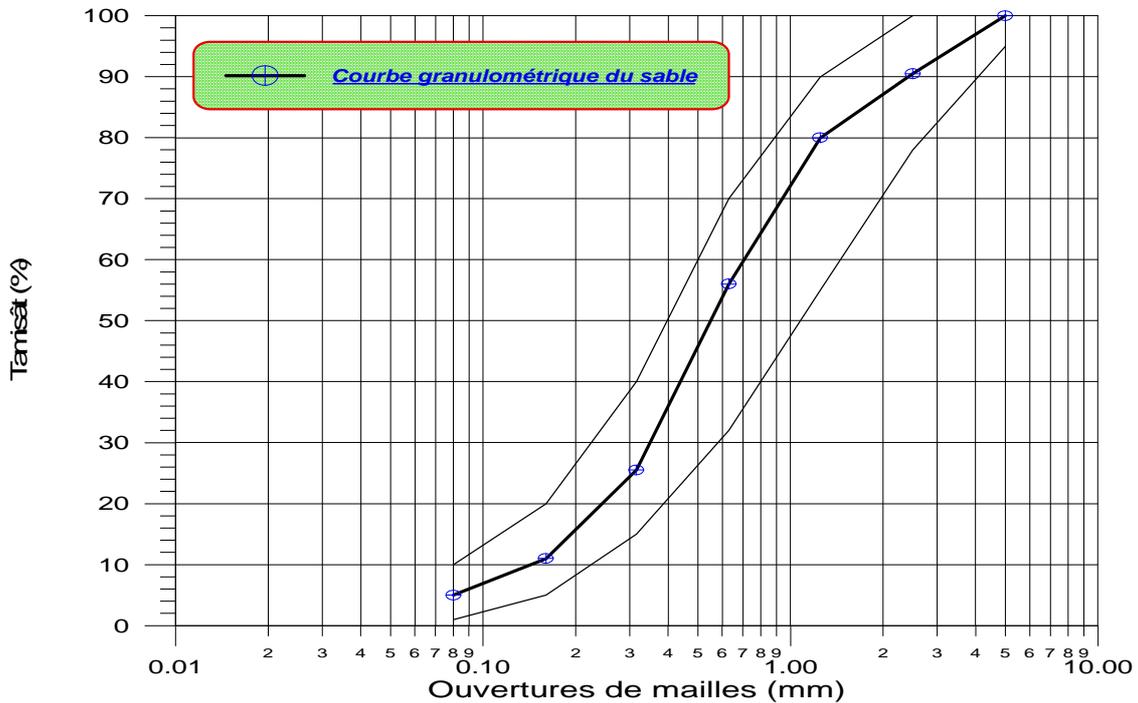


Figure 2-1. Analyse granulométrique de sable.

Il est à noter que la courbe granulométrique de notre sable s’inscrit dans le fuseau recommandé par le mortier et le béton courant.

2-3. METHODES D'ESSAIS:

Pour analyser les caractéristiques physico mécaniques de la pâte, mortier nous avons appliqué les différents essais, qui sont résumés dans les tableaux ci-dessous:

2-3-1. Les différents essais sur la pâte et le mortier:

Tableau 2-6. Différents essais sur la pâte.

Type d'essai	Formule	Appareillage	Type de moule
Masse volumique Absolue	$\varphi = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$	Densimètre	-----
Masse volumique apparente	$\varphi = \frac{M}{V}$	Cylindre de Volume	-----
Finesse de mouture	SSB = K.Pt.G. \sqrt{t}	Perméabilimètre de Blaine	-----
Consistance	-----	Sonde de Vicat	-----
prise	-----	Aiguille de Vicat	-----
Expansion à chaud et à froid	-----	Bouilloire de Le Chatelier	aiguille
Résistance Mécanique	$R_c = \frac{F}{S}$	Presse hydraulique	(2×2×2) cm ³
La porosité par le méthanol	$V_m = (M_{ss} - M_a) / \gamma_m$; $P_m = V_m / V_t$	-----	(3×2×2)cm ³
Action des eaux agressives	$A = \frac{R_s}{Rep}$	Presse hydraulique	(2×2×2) cm ³

Tableau 2-7. Différents essais sur le mortier.

Type d'essai	Formule	Appareillage	Type de moule
Résistance à la traction par flexion	$R_t, R_{t/F}$ directement données par l'appareil	Machine de flexion	(4×4×16) cm ³
Résistance à la compression	$R_c = \frac{F}{S}$	Presse hydraulique	(4×4×16) cm ³
Retrait	$\frac{\Delta L}{L_0}$	Dilatomètre à comparateur	(4×4×16)cm ³
Masse volumique absolue (sable)	$\varphi = \frac{M}{V_2 - V_1}$	Eprouvette graduée	-----
Masse volumique apparente (sable)	$\varphi = \frac{M}{V}$	Cylindre de volume 1L	-----
Equivalent de sable	$\frac{h_2}{h_1} \times 100$	Eprouvettes graduées	-----
La porosité par le méthanol	$V_m = (M_{ss} - M_a) / \gamma_m$; $P_m = V_m / V_t$	-----	±(4×4×0.03)cm ³
Analyse granulométrique	-----	Tamiseuse électrique et les Tamis	-----

Remarque:

Pour l'essai de la porosité basée sur le méthanol les détails sont présentés dans le chapitre précédent, les résultats de cette technique seront par la suite présentés dans le chapitre 4 de notre recherche.

2-4. LE PLAN EXPERIMENTAL:**2-4-1. La préparation des échantillons:**

Durant notre étude on a utilisé pour la confection des échantillons des moules de dimensions $(20 \times 20 \times 20)\text{mm}^3$ pour l'étude de la pâte de ciment et des moules de $(40 \times 40 \times 160)\text{mm}^3$ pour l'étude du mortier.

L'étude a été basée sur l'utilisation d'un ciment portland composé avec l'addition de matières minérales telles que: le laitier de haut Fournaux et la matière calcaire séparément et avec différents pourcentages. Le but envisagé est d'une part l'évaluation du taux de participation de ces ajouts et leur influence sur la résistance mécanique en fonction du temps, et d'une autre part l'essai permet d'évaluer la porosité totale existante dans chacun des deux éléments.

1) Pour la pâte de ciment on a utilisé un ciment portland composé (CPJ) de résistance caractéristique (42.5 Mpa) pour un poids de (20 ± 2) g et d'un rapport E/C variant entre $(0.3 \div 0.6)$ avec les différentes additions minérales précédemment citées.

2) En ce qui concerne le mortier, on a utilisé le sable d'oued avec un taux constant de (1350 ± 2) g en conservant le même rapport E/C cité précédemment avec le changement de la quantité d'eau suite au changement du rapport E/C.

2-4-2. Les mesures effectuées:

On a conservé les échantillons précédents pour mesurer la résistance de la pâte de ciment aux acides $[\text{NaSO}_4, \text{MgCl}_2]$, et l'ampleur de la résistance mécanique aux charges sollicitant chacune des deux matières (le mortier, la pâte cimentaire) en fonction du temps, d'une part, et d'une autre part on a utilisé des tranches de ces deux matières pour mesurer la porosité à l'intermédiaire du (Méthanol) [Voir Chapitre4].

Enfin on conclut notre étude par la présentation de la relation entre les différents paramètres étudiés et la résistance mécanique à la compression.

CHAPITRE III

ETUDE DE LIANT
DE CIMENT AU
LAITIER ET AU
FILLER

CHAPITRE III

ETUDE DE LIANT DE CIMENT AU LAITIER ET AU FILLER

3-1. INTRODUCTION :

Ce chapitre étudie les propriétés mécaniques et physiques des matériaux, afin de justifier le choix de la matière utilisée, deux ajouts avec des caractéristiques différentes sont exploités pour cette recherche pour confirmer l'action des additions sur le comportement des matériaux.

3-2. CARACTERISTIQUE DE LA PATE DU CIMENT AU LAITIER ET AU FILLER :

3-2-1. Propriétés mécaniques du liant :

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages du filler et du laitier et l'influence du dosage en eau sur la résistance mécanique de la pâte du ciment, on a utilisé des éprouvettes cubiques de $[2 \times 2 \times 2] \text{ cm}^3$ en pâte pure à raison de six éprouvettes par essai. La finesse de mouture de laitier est $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$, celle du filler et de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, les éprouvettes sont conservées dans des conditions de durcissement naturel. Après le démoulage, on soumet les éprouvettes à une cure normale à 20°C .

Les résultats obtenus sont indiqués sur les graphes et représentés juste après dans les tableaux ci-dessous [3-1..3-4]:

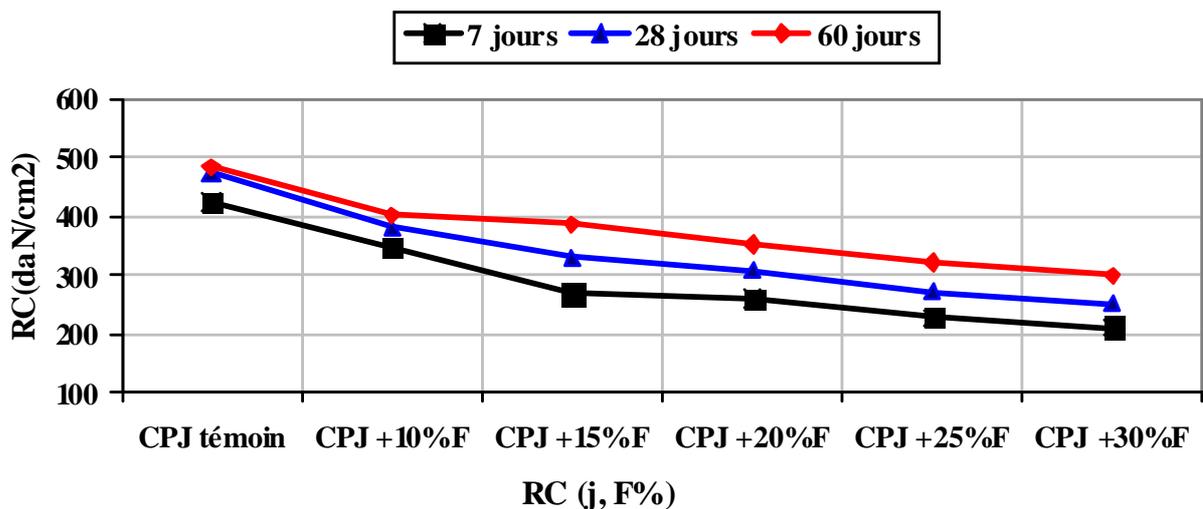


Figure 3-1. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de filler $E/C = 0,3$.

Tableau 3-1. Durcissement naturel, E/C = 0.3.

Type de ciment		Résistance à la compression (daN/cm ²)		
CPJ(%)	F(%)	7 jours	28 jours	60 jours
100	0	425.0	475.0	485.0
90	10	346.2	382.5	402.5
85	15	268.7	330.0	387.5
80	20	260.0	307.5	352.5
75	25	228.7	272.5	322.5
70	30	211.2	252.5	300.0

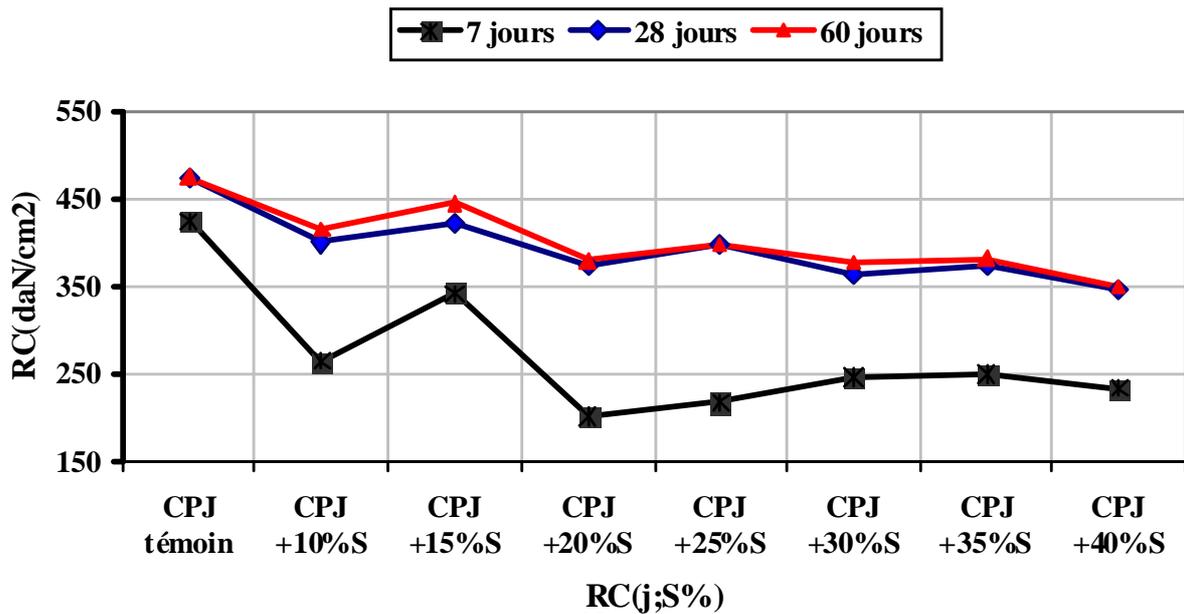


Figure 3-2. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de laitier E/(C+S)=0.3.

Tableau 3-2. Durcissement naturel, E/(C+S)=0.3.

Type de ciment		Résistance à la compression (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S(%)	7 jours	28 jours	60 jours
100	0	425,00	475,00	485,00
90	10	265,00	400,00	415,00
85	15	342,50	423,70	445,00
80	20	201,25	372,50	380,00
75	25	217,50	396,50	397,50
70	30	246,25	362,50	377,50
65	35	250,00	373,70	382,50
60	40	233,75	347,50	350,00

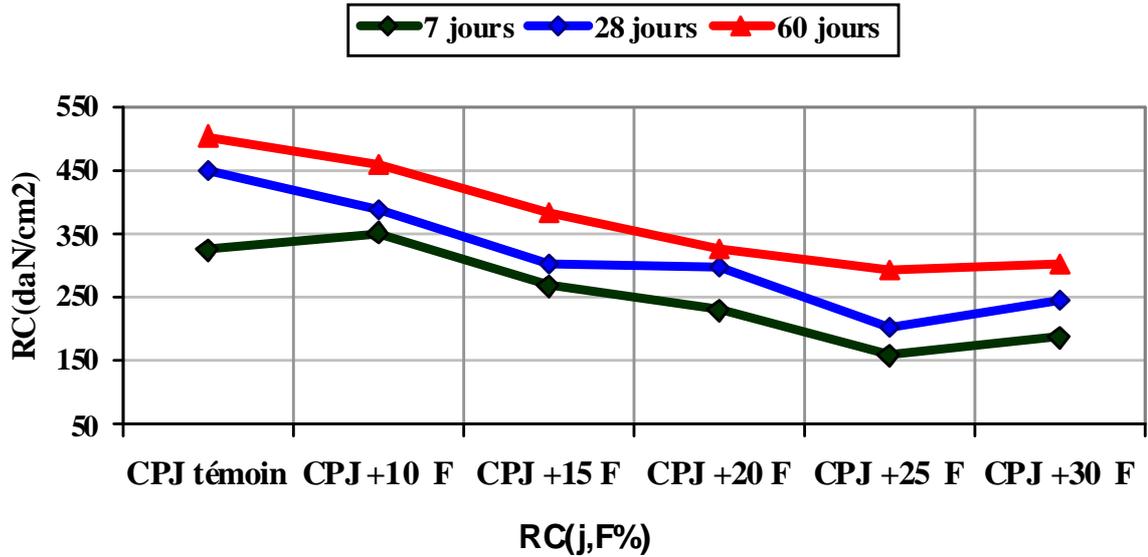


Figure 3-3. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de filler E/C =0.25

Tableau 3-3. Durcissement naturel, E/C=0.25.

Type de ciment		Résistance à la compression (daN/cm²)		
CPJ(%)	F(%)	7jours	28jours	60jours
100	0	326.2	452.5	505.0
90	10	352.5	387.5	458.5
85	15	268.7	302.5	385.0
80	20	230.0	298.5	325.8
75	25	158.7	202.5	292.5
70	30	187.5	245.0	305.0

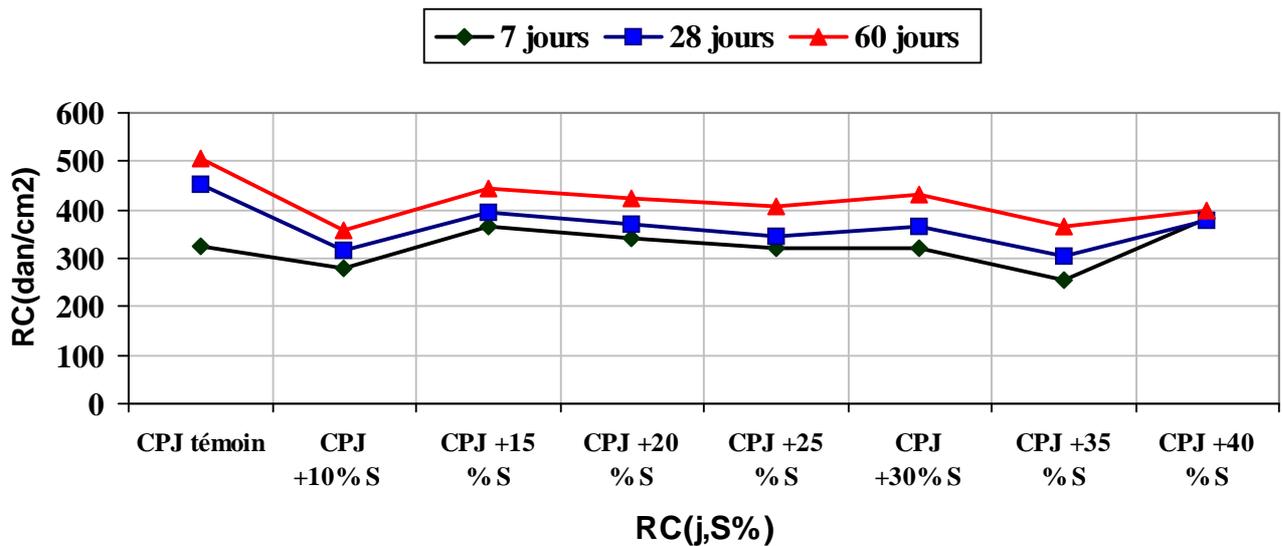


Figure 3-4. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de laitier E/(C+S) =0.25

Tableau 3-4. Durcissement naturel, E/(C+S)=0.25.

Type de ciment		Résistance à la compression ((daN/cm ²))		
CPJ(%)	S(%)	7jours	28jours	60jours
100	0	326,20	452,50	505,00
90	10	281,20	315,00	357,50
85	15	365,00	396,50	442,00
80	20	340,00	368,50	425,00
75	25	322,50	345,00	407,50
70	30	318,70	367,50	432,50
65	35	255,00	302,50	365,00
60	40	383,70	377,50	400,50

COMMENTAIRE:

D'après les résultats obtenus (Figure 3-1. à figure 3-4.), on remarque que l'ajout de 15% de laitier permet une augmentation de la résistance mécanique à la compression du ciment en fonction du temps de durcissement dans les conditions naturelles au delà de cette valeur nous observons une dégression de la résistance avec l'augmentation de pourcentage d'ajouts, sauf l'intervalle entre (25et 30)% de laitier nous apercevons une évolution de la résistance mais elle reste inférieure à la résistance trouvée de 15%S.

-Et pour la pate du ciment contenant le filler, nous apercevons que le pourcentage de 10% du filler fait augment la résistance mécanique la compression et pour les autres pourcentages nous remarquons qu' il y'a une dégression de la résistance en fonction du temps.

L'incorporation des ajouts minéraux actifs et inertes (laitier et calcaire) dans la pâte permet d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ces derniers. Ces ajouts réagissent par leur finesse et leur activité pouzzolanique engendrant un squelette plus dense et par conséquent un mortier plus résistant et plus durable.

Cette augmentation est due à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et la microstructure du matériau obtenu.

3-2-2. Propriétés physiques du liant:

Le choix de la composition optimale du ciment avec le laitier et le filler en fonction des critères physico-mécaniques et productif.

Vu les caractéristiques mécaniques que représentent les liants (CPJ avec une substitution allant jusqu'à [15%] de laitier et [10%] de filler calcaire étudiés précédemment, nous avons choisi ces deux liants pour terminer notre étude, ceci confirme les résultats de (Y. Ghernouti et autre ; 2003) Et (Adams, Rase 1990).

3.2.2.1. Consistance et prise:

Il y a lieu d'expérimenter deux choses:

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

Les ciments Portland composés avec laitier et filler se distinguent par une prise lente et un durcissement ralenti à sa période initiale. En comparaison avec un ciment portland composé sans ajouts.

3.2.2.1.1. Influence de la quantité de filler et de laitier sur la consistance et la prise:

La consistance ainsi que les temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la quantité de laitier et de filler introduit sont donnés par les tableaux [3-5; 3-6]:

Tableau 3-5. Temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction du % de l'ajout du laitier et ce filler.

Type de ciment		Quantité de ciment (g)	T(°C)	Quantité d'eau (%)	Début de prise	Fin de prise
CPJ %	Laitier %					
100	0	400	29	25,60	2h :05min	3h :00min
85	15	400	29	29,00	2h :45min	3h :00min
Type de ciment		Quantité de ciment (g)	T(°C)	Quantité d'eau (%)	Début de prise	Fin de prise
CPJ %	Filler %					
100	0	400	29	25,60	2h :05min	3h :00min
90	10	400	29	29,00	2h :40min	3h :10min

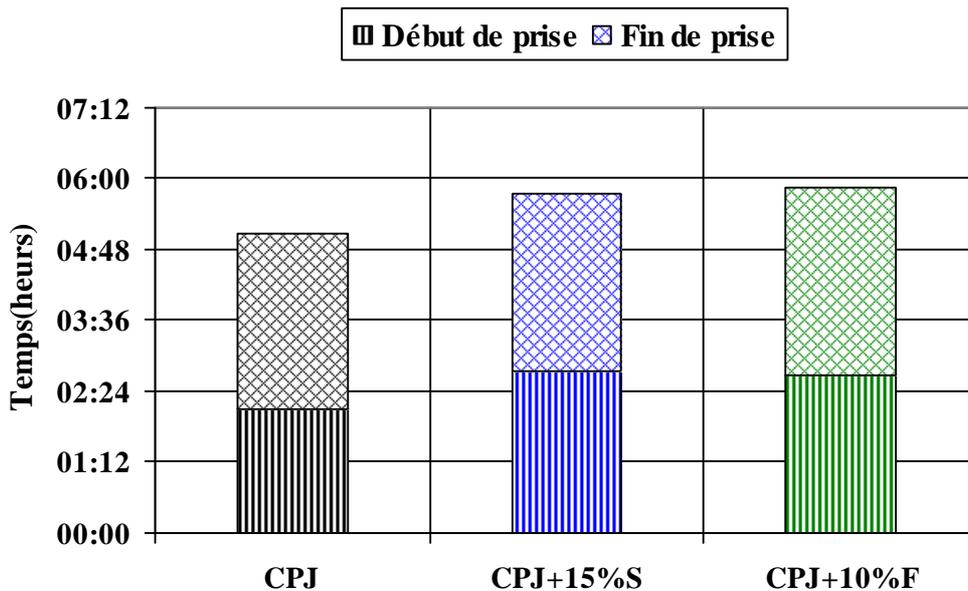


Figure 3-5. Temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.

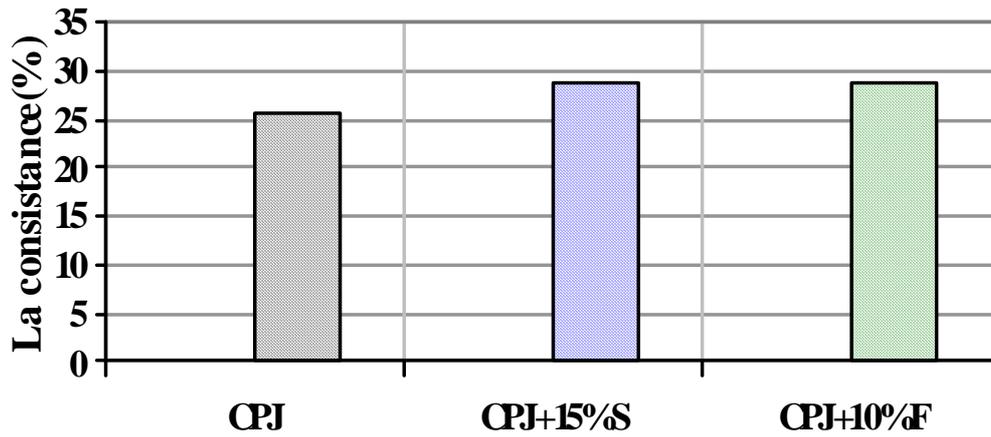


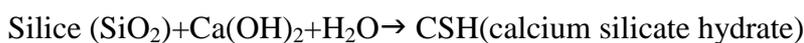
Figure 3-6. Variation de la consistance de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.

COMMENTAIRE:

D'après les résultats obtenus (figure3-5.) on remarque que l'augmentation de la teneur en ajout de liant entre 10% et 15 %, donne un double effet:

- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- Retardement de la prise.

D'après la même figure on voit nettement que les temps de début et de fin de prise augmentent avec l'augmentation de la quantité d'ajout. Cela s'explique par le fait que la réaction est retardée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de la diminution de l'ajout pouzzolanique par rapport au laitier pour 15% et inerte de 10% pour le filler d'addition. Par conséquent les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en faible quantité aux très jeunes âges.



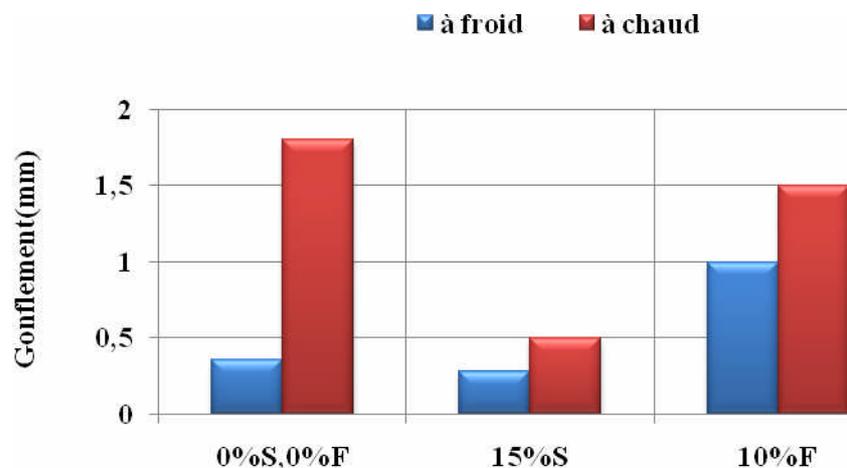
D'après la (figure 3-6) on remarque que par l'addition progressive de l'ajout le besoin en eau augmente sensiblement.

3.2.2.2. Le gonflement:

Le gonflement est engendré par l'expansion de certains éléments provoquant à long terme des anomalies à la résistance et présentant après la prise des fissures dans la masse du liant. En appliquant l'essai de Le Chatelier, on a pu calculer le gonflement à froid et à chaud, les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3-6. Gonflement de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.

Type de ciment		Gonflement à froid (mm)	Gonflement à chaud (mm)
CPJ (%)	Laitier (%)		
100	0	0.36	1.8
85	15	0.28	0.5
Type de ciment		Gonflement à froid (mm)	Gonflement à chaud (mm)
CPJ (%)	Filler (%)		
100	0	0.36	1.8
90	10	1.00	1.5

**Figure 3-7.** Gonflement (à chaud et à froid) de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler.**COMMENTAIRE :**

D'après les résultats obtenus (figure3-7.) on voit que les valeurs du gonflement soit à froid ou à chaud sont inférieures à 10 mm d'allongement, d'où ce ciment présente une stabilité de volume. La norme [NF EN 197-1] et la norme [NF P 15-301] limitent cette expansion à 10mm. D'après LE CHATELIER le gonflement augmente avec l'accroissement du pourcentage de la chaux ou du gypse.

On constate que l'ajout de filler et de laitier fait diminuer le gonflement à chaud et à froid du liant. La forme $C_3A.3CaCO_3.27H_2O$ aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec $CaCO_3$, [Klemm et adams. 1990]. Cependant, la stabilité de ce produit est limitée. L'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur un matériau cimentaire provoquerait la formation d'hémicarboaluminate dont la composition chimique est donnée par la formule suivante: $C_3A.0,5 CaCO_3.0,5 Ca(OH)_2. 12H_2O$.

3-2-3. Action des eaux agressives :

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

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), On peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatiques. Ces altérations d'origine chimique peuvent être amorcées ou renforcées par des actions physiques (chocs thermiques, cycles d'humidification-dessiccation, ...) ou mécaniques.

Afin d'avoir un béton résistant aux eaux agressives, il faut déterminer le coefficient de qualité (A) qui est défini par la formule suivante :

$$A = \frac{R_s}{R_{ep}} \quad (3-1)$$

R_s: résistance à la compression des ciments immergés dans différentes solutions agressives.

R_{ep}: résistance à la compression des ciments immergés dans l'eau potable.

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

La résistance aux eaux agressives est déterminée à partir des éprouvettes cubiques [2×2×2] cm³ en pâte pure avec un rapport fixe **E/(C)** et **E/(C+S)** égale à 0.3. Le durcissement des éprouvettes était en conditions naturelles pendant 7 jours (temps zéro), puis les pâtes de ciment durcies sont immergées séparément pendant 28j, [3 et 6] mois dans les solutions suivantes : eau potable, [**MgCl₂ (5%)**],[**Na₂SO₄ (5%)**].

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux [3-9; 3-10; 3-11].

Tableau 3-7. Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives en fonction du % de laitier et de filler à [28 jours].

Age	Type de ciment		Eau potable	Milieux agressifs			
	CPJ (%)	S (%)		RC (daN/cm ²)	MgCl ₂ (5%)		Na ₂ SO ₄ (5%)
			RC (daN/cm ²)		A	Rc (daN/cm ²)	A
28 Jours	100	0	563,5	547,5	0.971	538,0	0.954
	85	15	497,5	476,5	0.957	463,5	0.931
	CPJ (%)	F (%)	RC (daN/cm ²)	RC (daN/cm ²)	A	RC (daN/cm ²)	A
	100	0	563,5	547,5	0.971	538,0	0.954
	90	10	545,6	518,5	0.950	504,5	0.924

Tableau 3-8. Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives en fonction du % de laitier et de filler à [90 jours].

Ages	Type de ciment		Eau potable	Milieux agressifs			
	CPJ (%)	S (%)		RC (daN/cm ²)	MgCl ₂ (5%)		Na ₂ SO ₄ (5%)
			RC (daN/cm ²)		A	RC (daN/cm ²)	A
3 mois	100	0	610,0	516,8	0.847	506,8	0.830
	85	15	535,6	528,5	0.987	527,5	0.985
	CPJ (%)	F (%)	RC (daN/cm ²)	RC (daN/cm ²)	A	RC (daN/cm ²)	A
	100	0	610,0	516,8	0.847	506,8	0.830
	90	10	564,5	547,0	0.970	554,2	0.982

Tableau 3-9. Coefficient de qualité des ciments immergés dans différentes solutions agressives en fonction du % de laitier et de filler à [180 jours].

Ages	Type de ciment		Eau potable	Milieux agressifs			
	CPJ (%)	S (%)		RC (daN/cm ²)	MgCl ₂ (5%)		Na ₂ SO ₄ (5%)
			RC (daN/cm ²)		A	RC (daN/cm ²)	A
6mois	100	0	610,0	498,5	0.817	504,5	0.935
	85	15	540,0	537,6	0.995	536,0	0.992
	CPJ (%)	F (%)	RC (daN/cm ²)	RC (daN/cm ²)	A	RC (daN/cm ²)	A
	100	0	610,0	498,5	0.817	504,5	0.827
	90	10	576,0	538,7	0.935	562,5	0.976

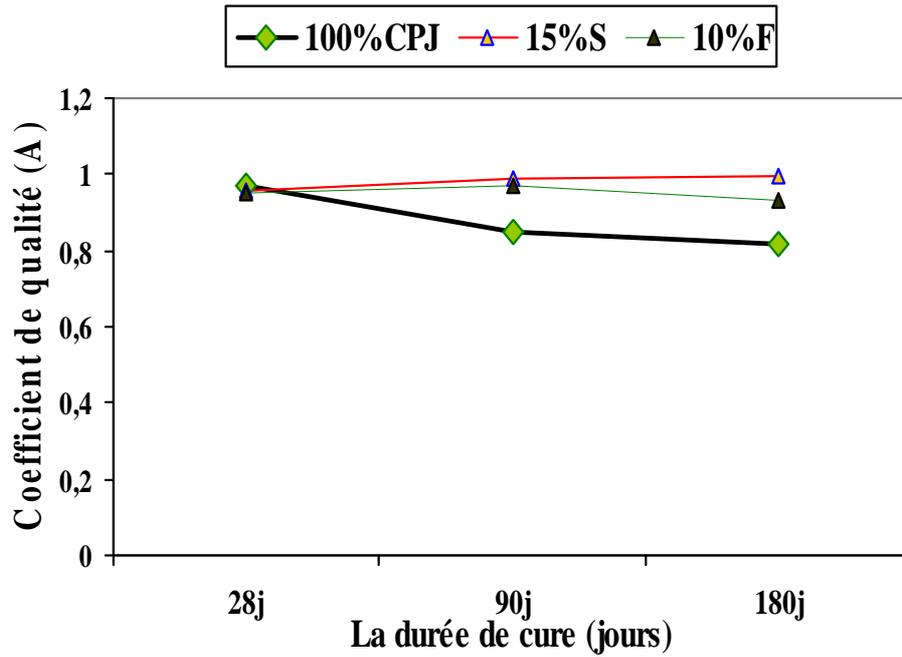


Figure 3-8. La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution $MgCl_2$ en fonction du temps et du % de laitier et de filler.

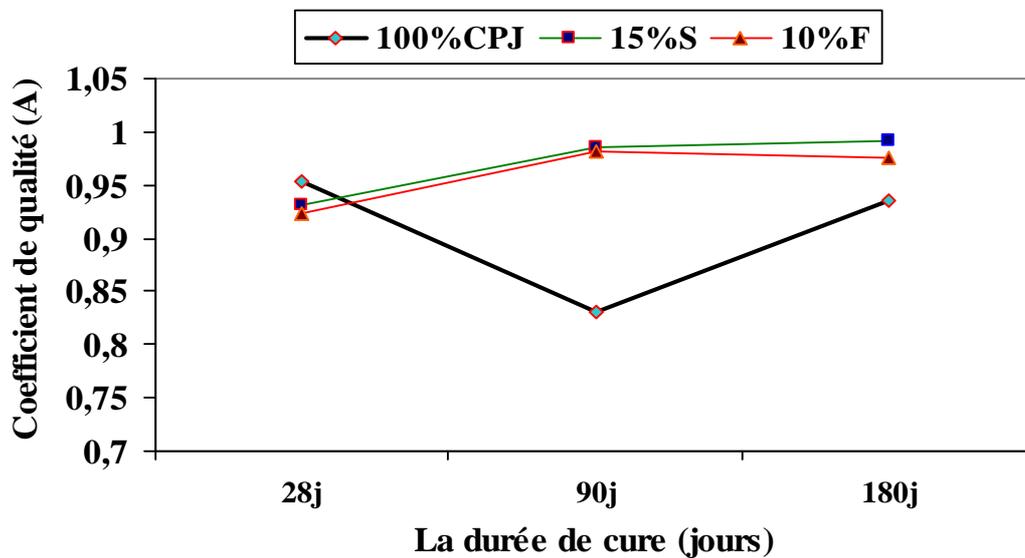


Figure 3-9. La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution Na_2SO_4 en fonction du temps et du % de laitier et de filler.

COMMENTAIRE:

L'une des raisons initiales pour utiliser divers ajouts minéraux dans le mortier est leur influence sur la résistance du mortier aux attaques chimiques.

Cette résistance n'est pas seulement due à la composition chimique de la pâte de ciment hydraté, mais aussi à sa microstructure.

Il n'est pas exagéré de dire que les ajouts minéraux ont une influence majeure sur tous les aspects de durabilité relatifs à la migration des agents agressifs à travers le mortier et le béton.

Nous constatons, d'après les résultats obtenus [tab 3-7,3-8,3-9], que le coefficient de qualité (A)(voir l'équation 3-1), dans toutes les solutions agressives, est lié par le type d'additions et de l'accroissements du pourcentage des ces ajouts.

-Les ciments avec filler et le laitier montrent une meilleure résistance dans le milieu nocif, ce comportement est principalement attribué à leur faible teneur en chaux, car $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ est souvent responsable des dégâts du béton.

Les pâtes de ciments immergées dans la solution $[\text{Na}_2\text{SO}_4]$ montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité jusqu'à 3 mois. Cela est dû à l'augmentation de la valeur du pH qui stabilise la formation des cristaux de CSH.

D'après les résultats précédents, nous remarquons que l'action de la solution $[\text{MgCl}_2]$ sur les pâtes de ciments est plus nocive. Cela peut être expliqué par le fait que l'incursion d'ions de chlorure dans la pâte est influencée par le cation du chlorure (les ions de chlorure attachés aux cations divalents pénètrent plus vite que ceux attachés aux ions monovalents) [AM amine ; et autre 1997].

En comparant l'effet du milieu agressif de chlorures à celui de sulfates, on remarque que les sulfates influent plus que les chlorures sur le ciment avec filler et le laitier. Par conséquent, les ciments avec filler et le laitier sont plus durables dans les milieux où les chlorures sont prédominants.

SYNTHESE:

D'après tout ce qui précède, on peut conclure que le ciment avec filler et le laitier est durable dans les solutions agressives. Cela peut être dû à la forte imperméabilité des pâtes de ciments durcies, ainsi qu'à la formation supplémentaire des hydrates CSH qui précipitent dans les pores, en diminuant par la suite la porosité de la pâte de ciment.

3-3. ETUDE DU MORTIER:

Dans cette partie ; il s'agit des essais de compression, flexion et de retrait.

Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable d'oued. Les essais sont à raison de six éprouvettes par essai effectués sur des éprouvettes en mortier de dimensions

[4×4×16]cm³. Dans tous les essais le rapport E/C a été variable entre [0.3 -0.6] pour tous les mortiers avec et sans ajout. Concernant les conditions de durcissement, dans cette partie on a procédé à un durcissement naturel (conservation à l'eau, T=20°C) des éprouvettes jusqu'à leur test.

Nota :

Pour le mortier de rapport E/C=0.5 on utilise un sable normalisé uniquement pour mesurer la résistance mécanique à [28jours].

3-3-1. Comportement mécanique:

Dans cette partie, nous avons étudié, le mortier en fixant les quantités de laitier et de filler d'après les résultats retrouvés précédemment, avec une variation progressive du rapport E/C.

3.3.1.1. Influence de la quantité de laitier et de Filler sur le comportement mécanique des mortiers normalisés:

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction du pourcentage de laitier et de filler, aux différents âges, sont rapportés dans le tableau [3-10].

Pour que nos conclusions soient justifiées, nous avons gardé les paramètres suivants constants :

- Finesse du (CPJ) : 3371 cm²/g.
- Finesse du laitier (S) : 3500 cm²/g.
- Finesse de filler (F) : 3000 cm²/g.

Tableau 3-10. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier et de filler pour un rapport E/C=0.5 à 28 jours.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)	La résistance à la flexion (daN/cm ²)	La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)
CPJ (%)	S (%)	28j	28j	28j
100	0	450.25	79.5	72.85
85	15	444.56	76.53	70.65
CPJ (%)	F (%)	28j	28j	28j
100	0	450.25	79.5	72.85
90	10	430.58	66.8	69.5

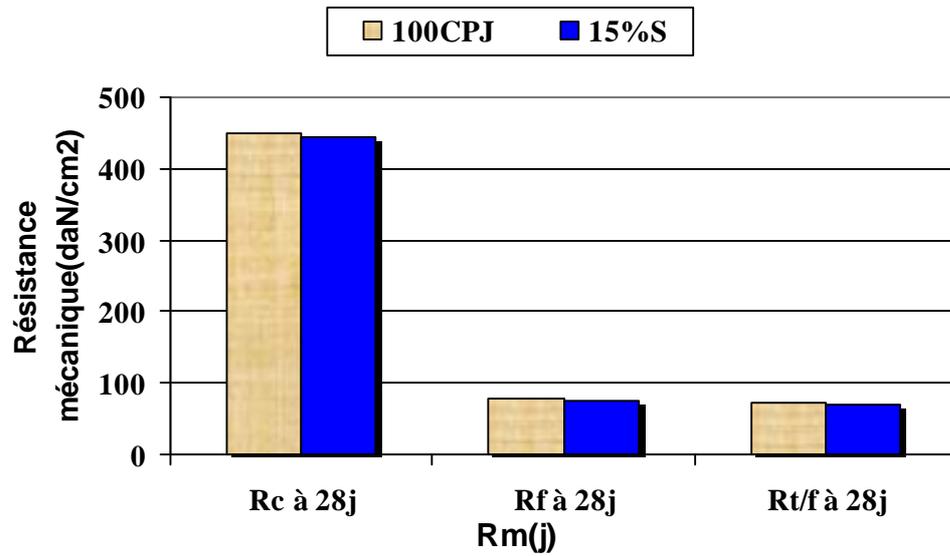


Figure 3-10. Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en fonction du temps et le % de laitier.

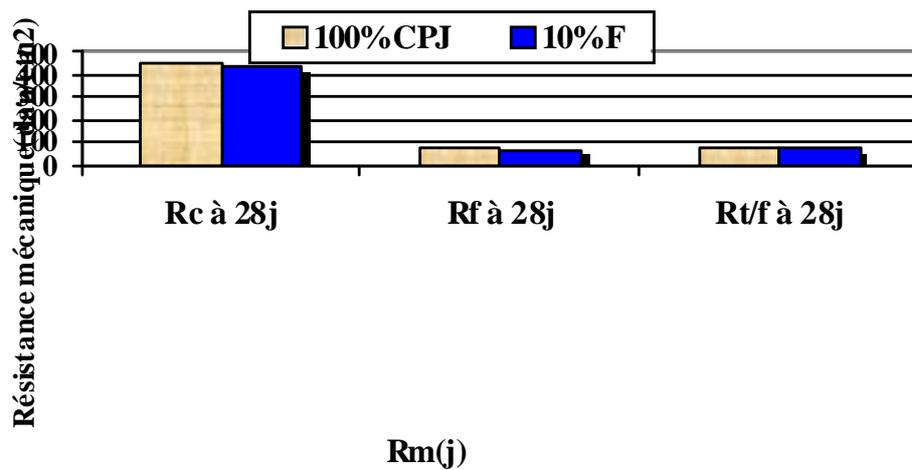


Figure 3-11. Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en fonction du temps et le % de filler.

COMMENTAIRE :

D'après les résultats obtenus dans la figure (3-10) et (3-11), on remarque que les résistances mécaniques à la compression, flexion et traction par flexion augmentent avec l'addition de 10%F et de 15%S en fonction du temps..

Ce phénomène peut être expliqué par le changement de la structure des pores, qui fait augmenter le nombre de petits pores et fait diminuer le nombre de gros pores, par conséquent, il densifie la structure. Mais Les résistances mécaniques du mortier préparé avec des ciments composés (référence) sont habituellement meilleures que celles d'un mortier avec ajouts.

3.3.1.2. Influence de la quantité de laitier et de Filler sur le comportement mécanique des mortiers:

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction le rapport E/C, le pourcentage de laitier et de filler, aux différents âges, sont rapportés dans les tableaux [3-11;3-24].

Tableau 3-11. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.3.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	450.89	460.55	470.45	75.58	76.62	77.52	68.25	68.69	69.47
85	15	410.68	430.25	460.39	70.75	72.85	73.56	65.37	67.55	68.80

Tableau 3-12. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.35.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	395.25	397.65	400.45	74.85	75.67	78.25	63.78	65.25	66.75
85	15	380.75	384.25	390.65	66.56	68.54	69.45	61.25	63.27	65.16

Tableau 3-13. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % et de laitier pour un rapport E/C=0.4.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	391.42	395.54	397.28	72.36	74.46	75.26	63.59	65.82	67.26
85	15	345.69	348.36	350.45	65.26	66.85	67.59	58.89	60.75	62.55

Tableau 3-14. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.45.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	385.47	390.25	395.05	70.86	72.45	75.36	62.45	64.45	65.36
85	15	360.54	366.25	368.59	69.85	70.56	72.87	57.58	60.52	61.80

Tableau 3-15. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.5.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	376.36	378.52	379.98	70.69	71.63	73.58	60.95	61.25	62.84
85	15	360.25	362.47	365.54	68.52	69.80	70.69	55.69	57.89	59.25

Tableau 3-16. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.55.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	365.85	368.69	370.25	68.75	70.27	72.58	59.65	60.77	62.45
85	15	350.21	354.42	356.45	64.89	65.89	67.39	55.46	57.67	59.26

Tableau 3-17. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de laitier pour un rapport E/C=0.6.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	S (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	354.68	356.25	358.69	65.98	67.25	69.25	59.42	60.74	62.57
85	15	334.58	337.08	339.25	62.76	63.84	65.25	54.25	56.55	59.25

Tableau 3-18. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.3.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	450.89	460.55	470.45	75.58	76.62	77.52	68.25	68.69	69.47
90	10	395.58	400.45	420.25	72.37	73.64	74.26	70.65	72.35	73.35

Tableau 3-19. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.35.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	395.25	397.65	400.45	74.85	75.67	78.25	63.78	65.25	66.75
90	10	385.56	390.25	396.29	71.36	72.65	74.27	69.87	70.84	72.58

Tableau 3-20. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.4.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	391.42	395.54	397.28	72.36	74.46	75.26	63.59	65.82	67.26
90	10	384.58	385.45	390.25	71.25	72.60	73.85	68.75	70.42	71.56

Tableau 3-21. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.45.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	385.47	390.25	395.05	70.86	72.45	75.36	62.45	64.45	65.36
90	10	264.37	267.65	269.45	70.42	71.36	72.65	68.63	70.65	71.59

Tableau 3-22. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.5.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	376.36	378.52	379.98	70.69	71.63	73.58	60.95	61.25	62.84
90	10	250.25	257.25	260.58	69.85	70.89	71.69	67.86	69.46	70.95

Tableau 3-23. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % de filler pour un rapport E/C=0.55.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	365.85	368.69	370.25	68.75	70.27	72.58	59.65	60.77	62.45
90	10	276.41	279.80	281.25	69.89	70.68	71.56	68.45	70.15	71.26

Tableau 3-24. Résistances mécaniques du mortier en fonction du % filler pour le rapport E/C=0.6.

Type de liant		La résistance à la compression (daN/cm ²)			La résistance à la flexion (daN/cm ²)			La résistance à la traction par flexion (daN/cm ²)		
CPJ (%)	F (%)	7j	28j	60j	7j	28j	60j	7j	28j	60j
100	0	354.68	356.25	358.69	65.98	67.25	69.25	59.42	60.74	62.57
85	10	265.85	269.45	271.59	68.84	70.38	71.29	64.88	66.07	68.29

3-3-2. Le retrait et le gonflement:

Le retrait:

La maturation des matériaux cimentaires s'accompagne d'une réduction dimensionnelle ou retrait, même en l'absence de chargement. On distingue une composante exogène, due à des gradients hydriques ou thermiques régnant entre le matériau et le milieu environnant, et une Composante endogène générée par le matériau lui-même sans échange avec l'extérieur.

Le gonflement:

La pâte de ciment ou de mortier mûri continuellement dans l'eau après leur mise en place augmentent en volume et en masse. Ce gonflement est du à l'absorption d'eau par le gel de ciment, Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement. De plus, l'intrusion de l'eau réduit la tension de surface du gel, provoquant par la suite une petite expansion.

Il s'agit dans cette partie, d'évaluer le retrait et le gonflement que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes en mortier à sable normalisé avec un rapport E/C égale à 0,5.

On compare, à différents temps (t), la variation de la longueur et de la masse d'une éprouvette de dimensions [4×4×16] cm³, par rapport à sa longueur et sa masse à un temps (t0) pris pour origine.

Les résultats obtenus sont rapportés dans les (tableaux 3-25 et 3-28).

Tableau 3-25. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et du % de laitier.

Type de ciment		La variation de longueur $\Delta L/L$ (mm/m)			
CPJ (%)	S (%)	Type de déformation	3j	7j	28j
100	0	retrait	4.00	10.00	15.5
		gonflement	7.5	13.8	14.0
85	15	retrait	5.0	16.5	20.00
		gonflement	2.60	5.70	5.89

Tableau 3-26. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et du % de Filler.

Type de ciment		La variation de longueur $\Delta L/L$ (mm/m)			
CPJ (%)	F (%)	Type de déformation	3j	7j	28j
100	0	retrait	4.00	10.00	15.5
		gonflement	7.5	13.8	14.0
90	10	retrait	3.8	17.00	21.0
		gonflement	4.15	10.5	12.21

Tableau 3-27. Variations de la masse des mortiers en fonction du temps et du % de laitier.

Type de ciment		La variation de masse $\Delta M/M$ (g/kg)			
CPJ (%)	S (%)	Type de déformation	3j	7j	28j
100	0	retrait	3.79	6.80	15.50
		gonflement	64.84	66.55	69.45
85	15	retrait	11.25	24.40	62.50
		gonflement	40.06	45.15	33.81

Tableau 3-28. Variations de la masse des mortiers en fonction du temps et du % de filler.

Type de ciment		La variation de masse $\Delta M/M$ (g/kg)			
CPJ (%)	F (%)	Type de déformation	3j	7j	28j
100	0	retrait	4.90	7.50	16.65
		gonflement	60.80	66.55	70.10
90	10	retrait	14.60	20.50	58.60
		gonflement	36.70	44.75	39.50

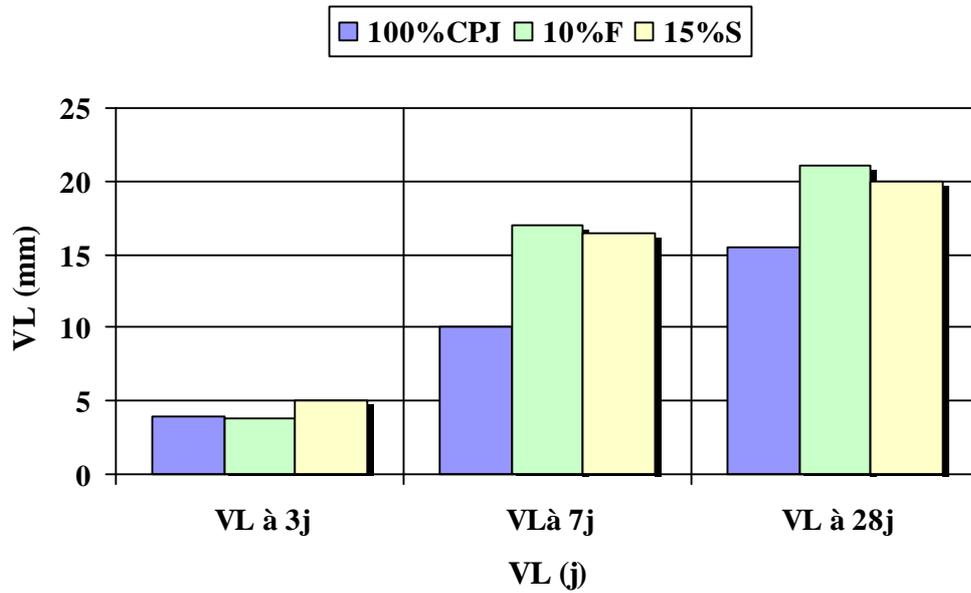


Figure 3-12. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de retrait.

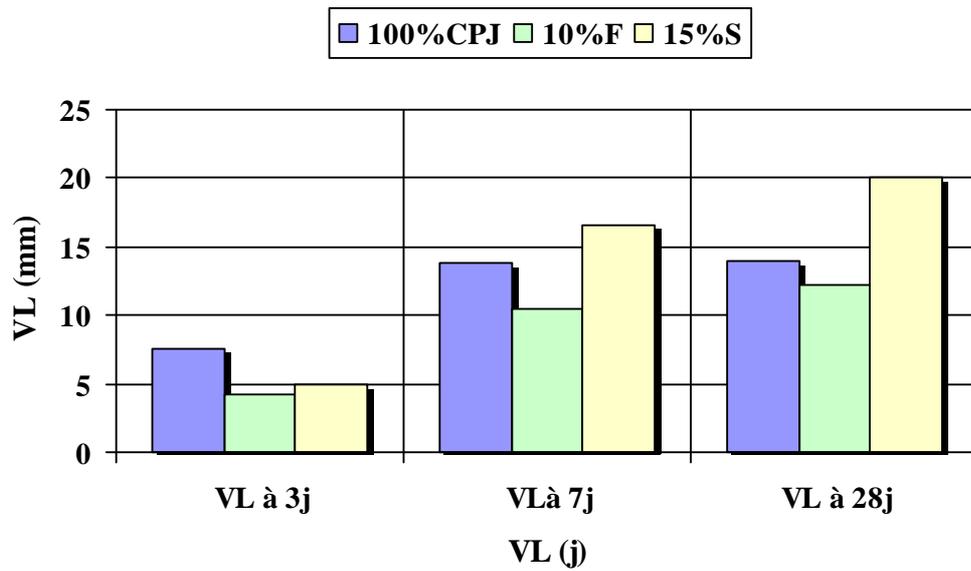


Figure 3-13. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de gonflement.

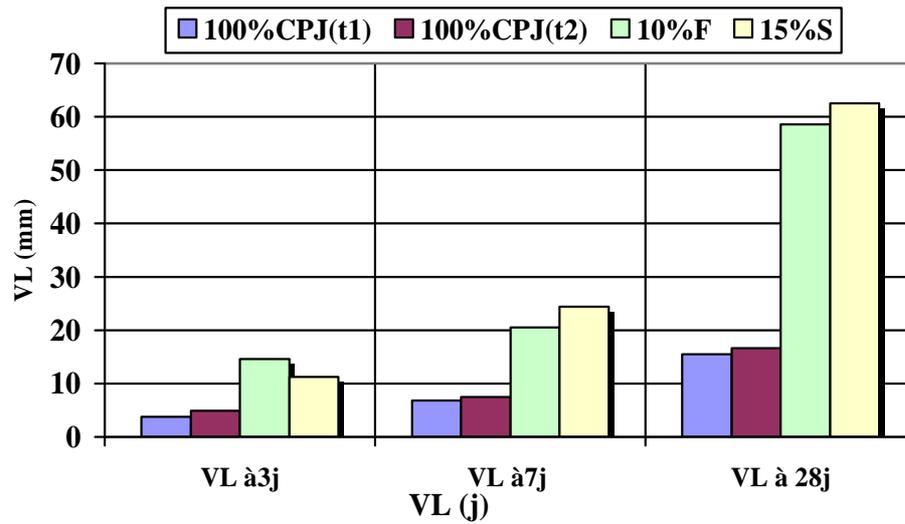


Figure 3-14. Variations massique des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de retrait

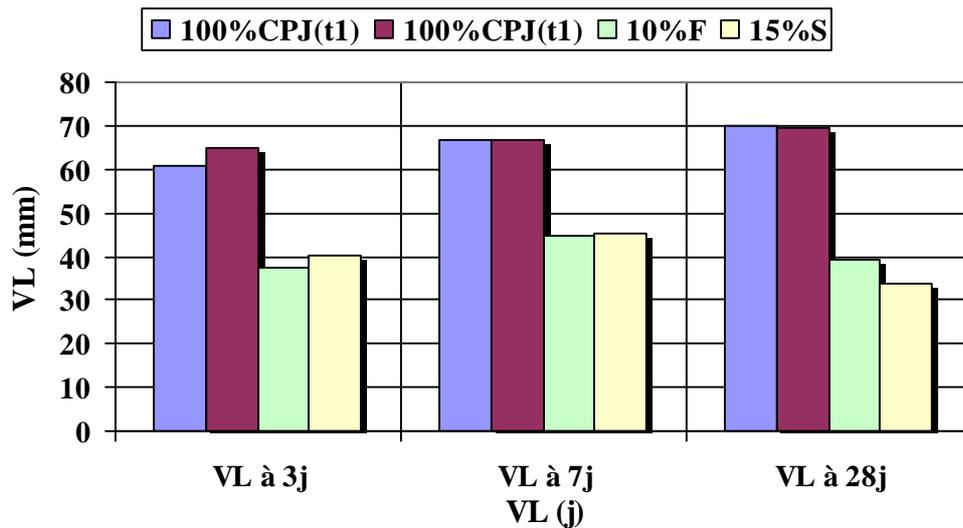


Figure 3-15. Variations massique des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de gonflement.

t1 : représente le témoin de mortier avec 10%F.

t2 : représente le témoin de mortier avec 15%S.

COMMENTAIRE :

Pour la variation massique de mortier avec ajout réduit par rapport au mortier de référence. La variation massique augmente avec la diminution des pourcentages de l'ajout.

Nous savons que le gonflement observé après la prise est dû à la constitution d'hydrates comme la portlandite Ca(OH)_2 qui contrairement à la formation des autres hydrates, se fait avec une augmentation de volume. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait et est lié à la quantité de chaux libre non hydratée restant après la prise. Si cette quantité est faible, le gonflement pourra être négligeable et le retrait deviendra important.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les mortiers avec laitier ou de filler renferment des retraits plus importants que ceux du mortier témoin (sans ajout). Cela s'explique par le fait que l'ajout de laitier et de filler fait diminuer la quantité de la chaux libre dans le mortier.

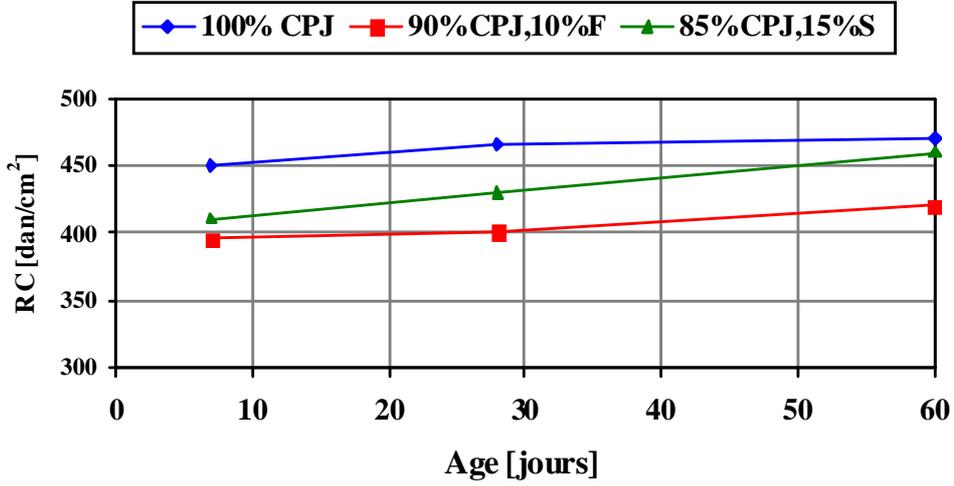


Figure 3-16. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.3

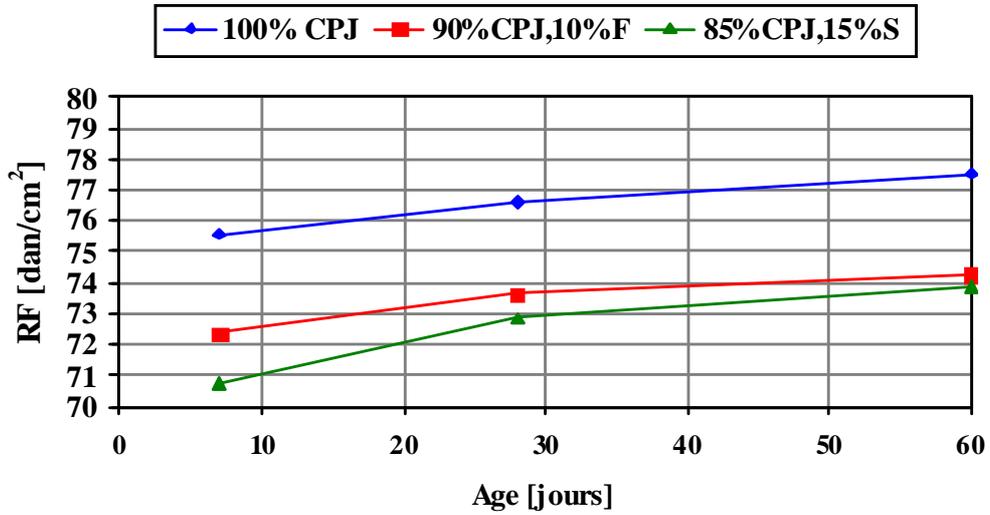


Figure 3-17. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.3

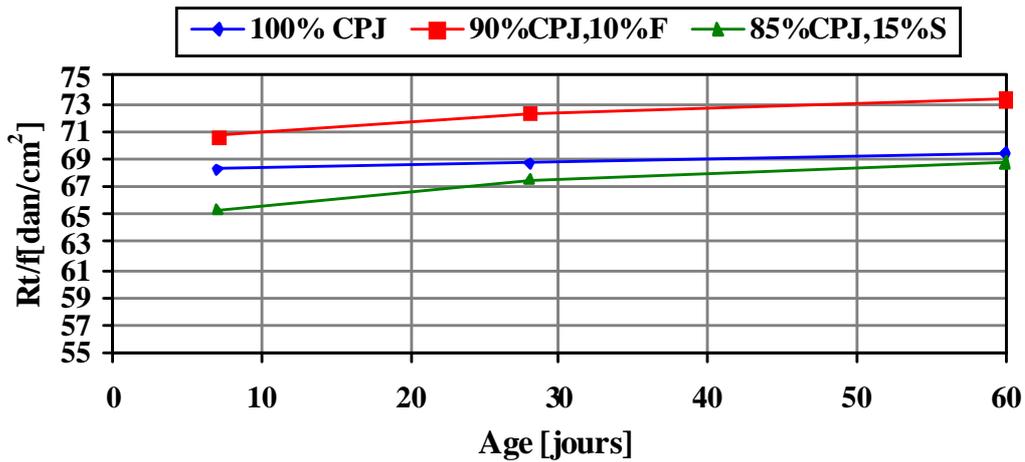


Figure 3-18. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.3

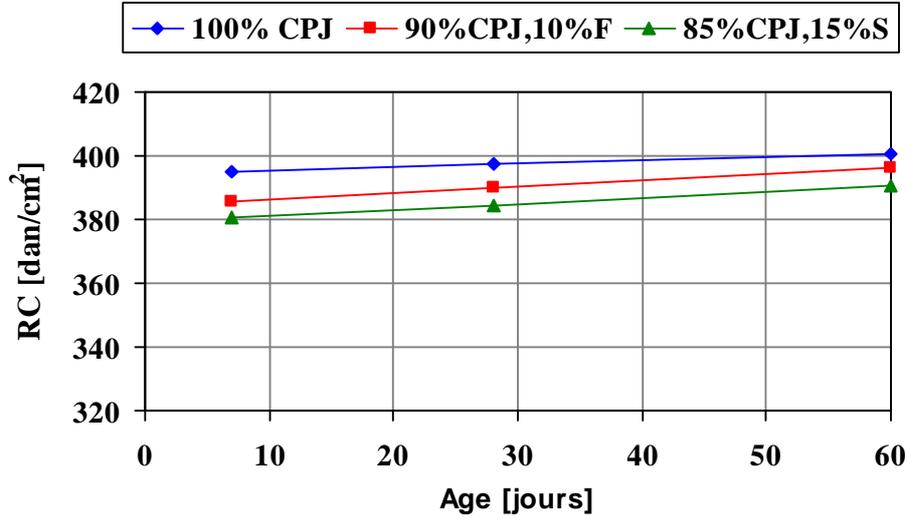


Figure 3-19. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.35

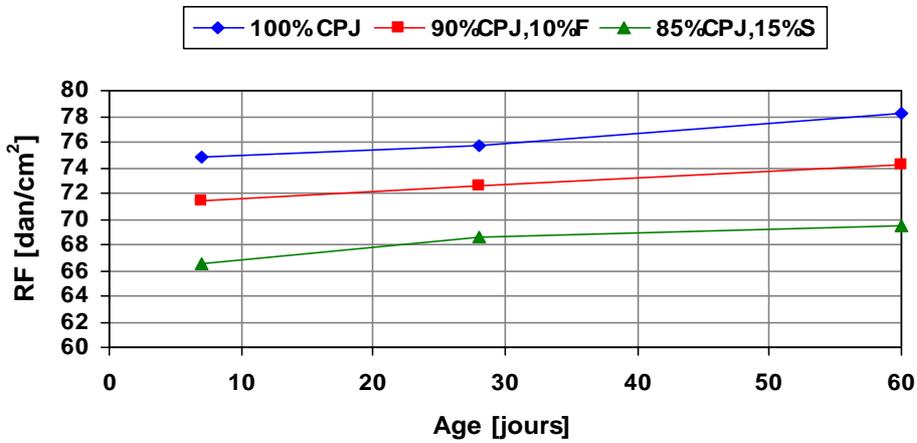


Figure 3-20. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.35

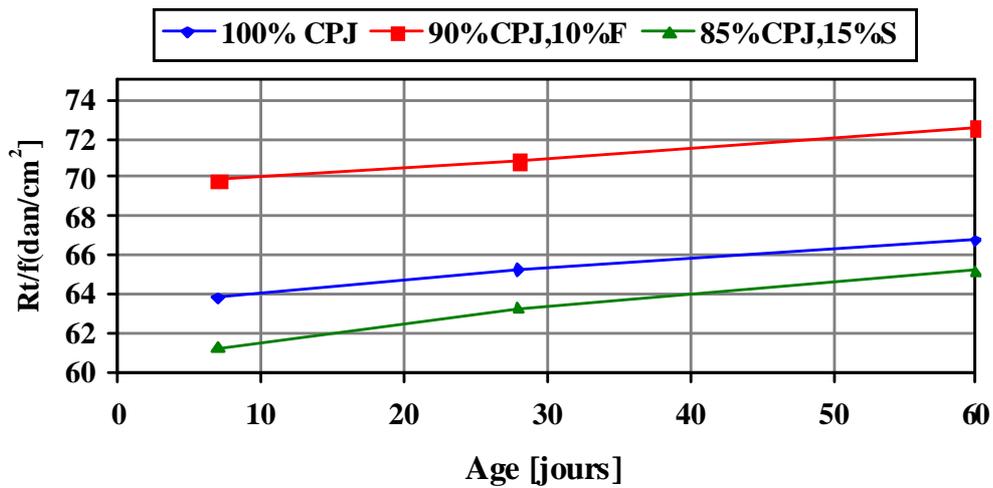


Figure 3-21. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.35

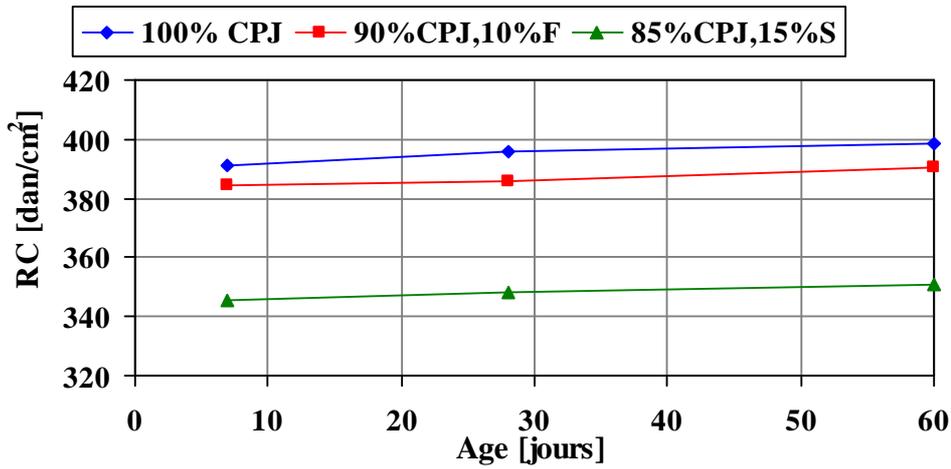


Figure 3-22. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.4

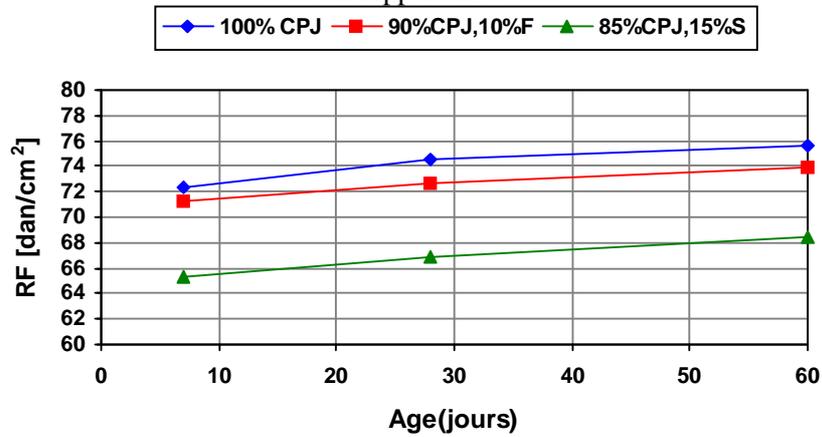


Figure 3-23. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.4

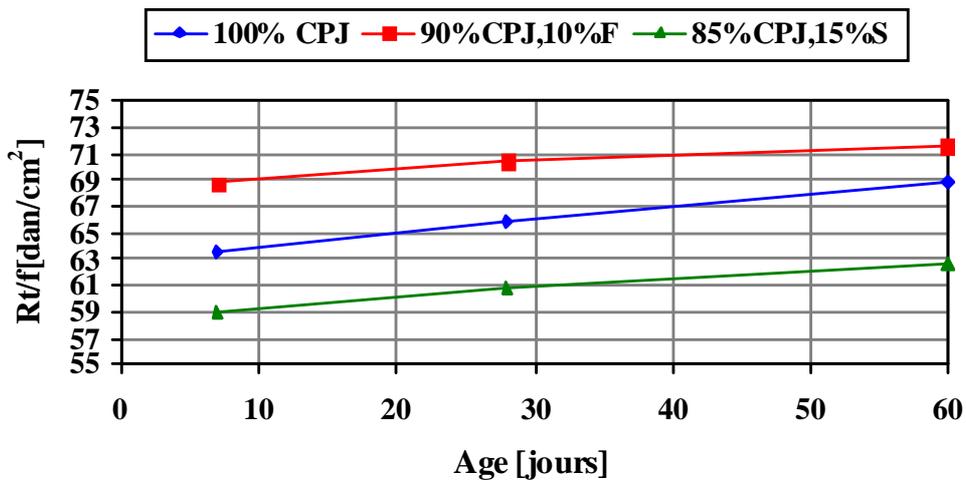


Figure 3-24. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.4

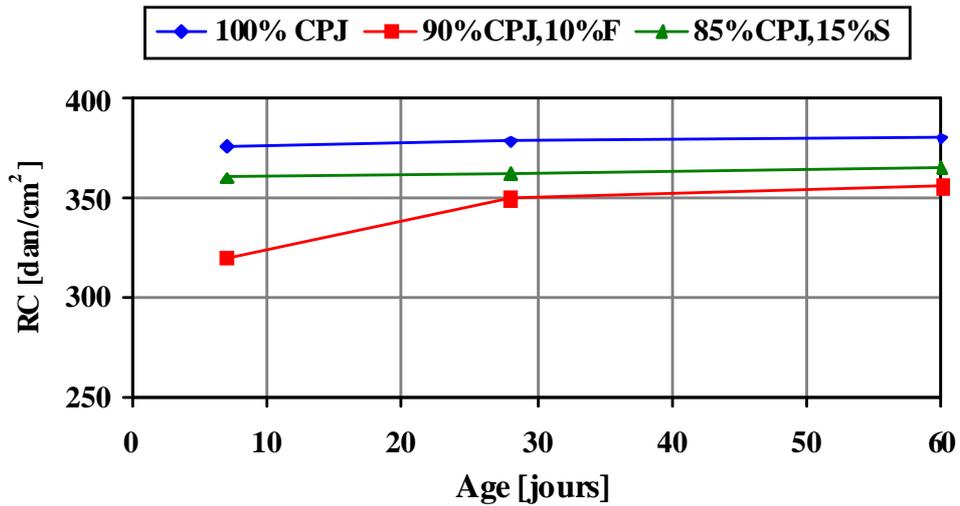


Figure 3-25. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.45.

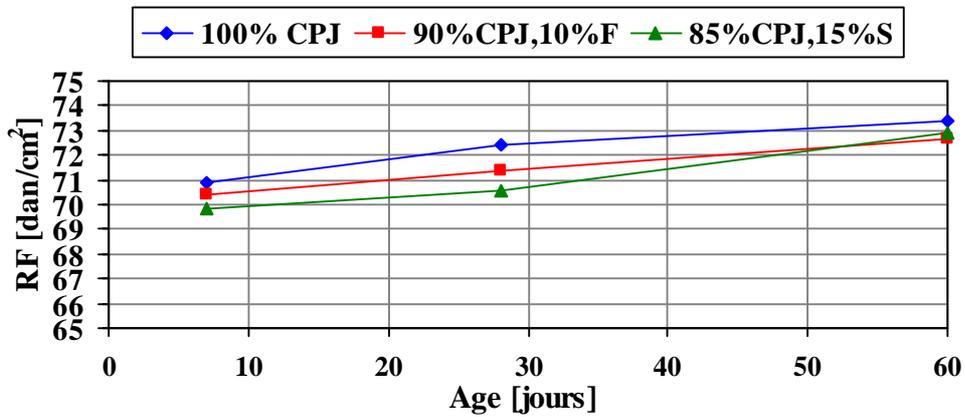


Figure 3-26. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.45

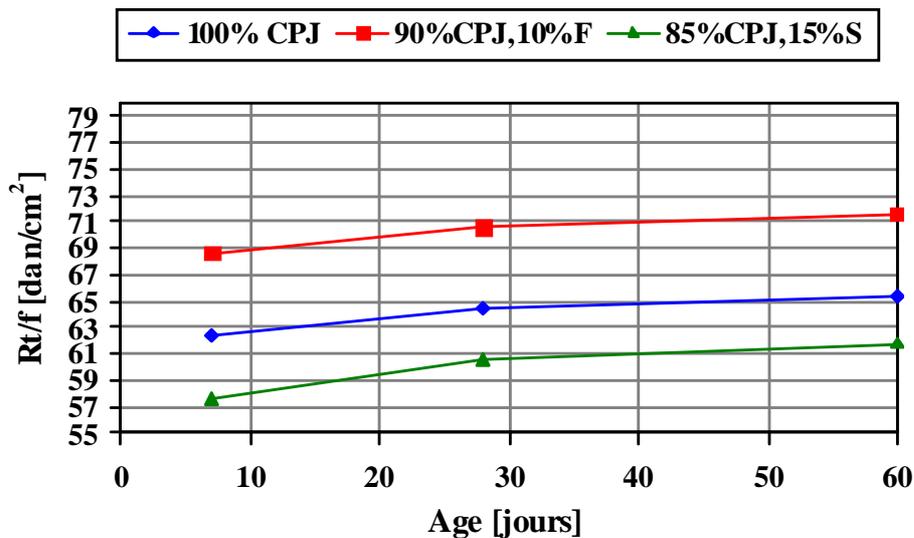


Figure 3-27. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.45

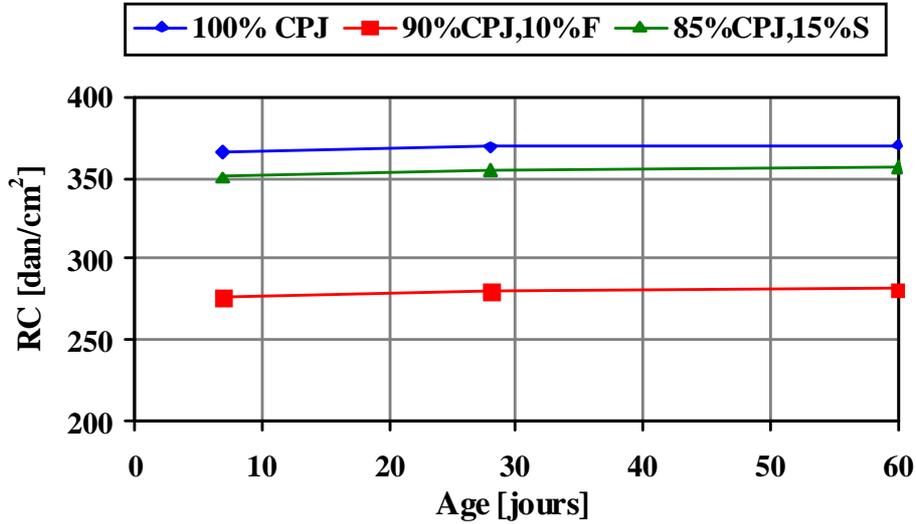


Figure 3-28. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.5

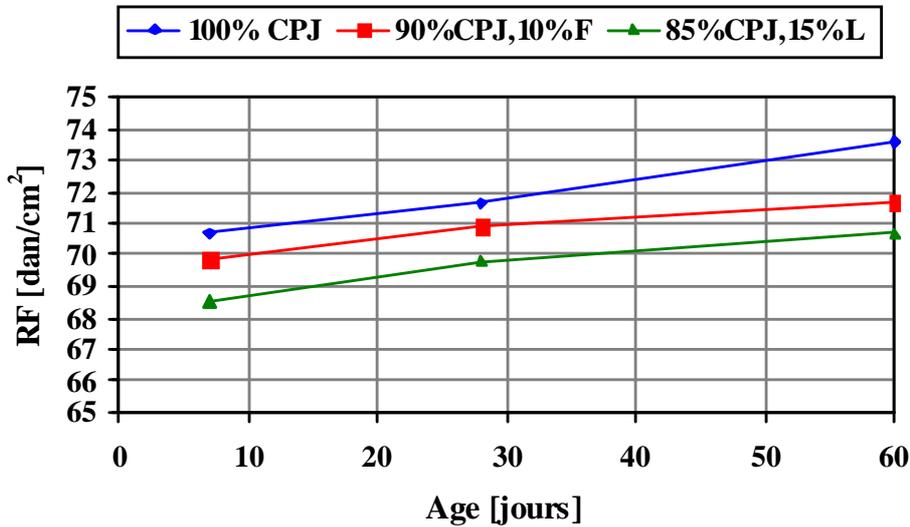


Figure 3-29. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.5

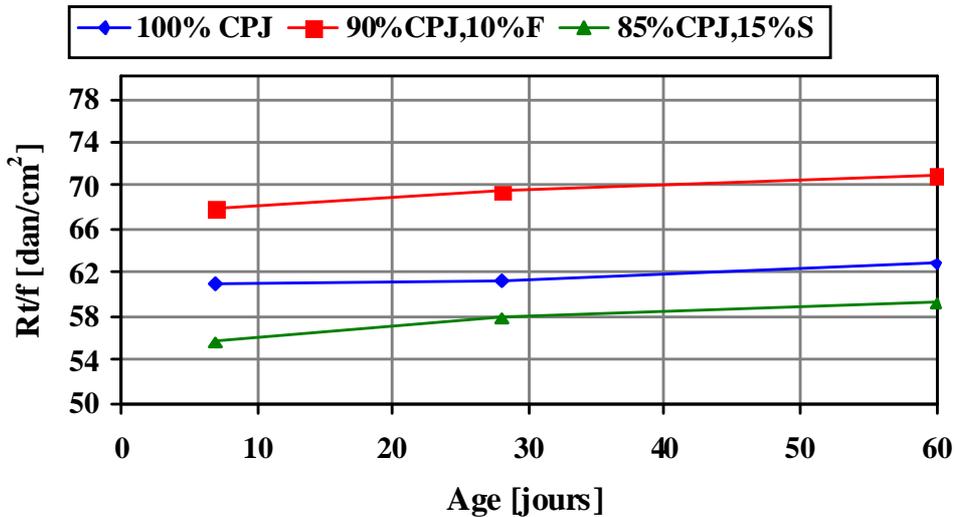


Figure 3-30. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.5

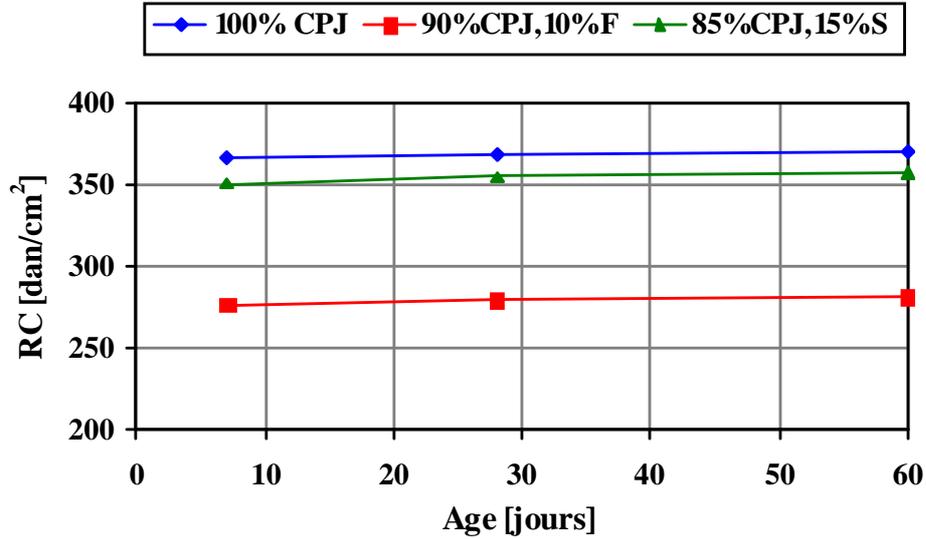


Figure 3-31. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.55

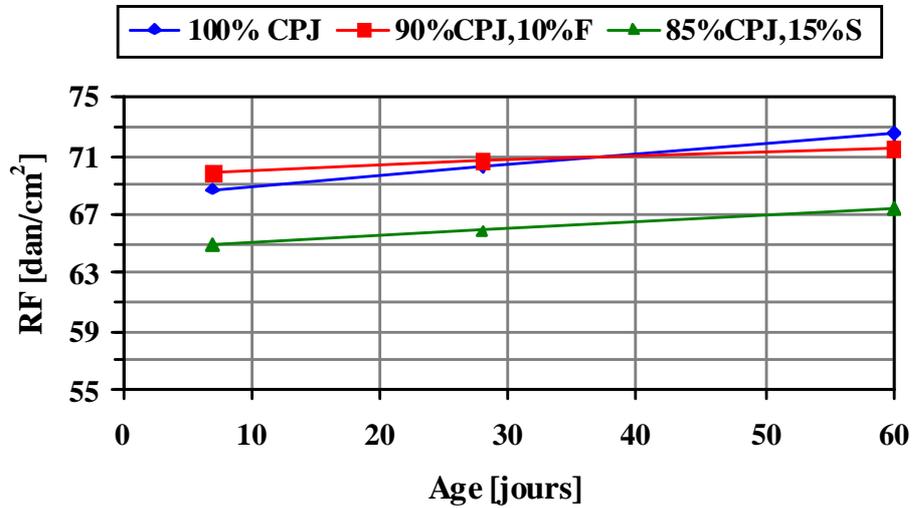


Figure 3-32. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.55

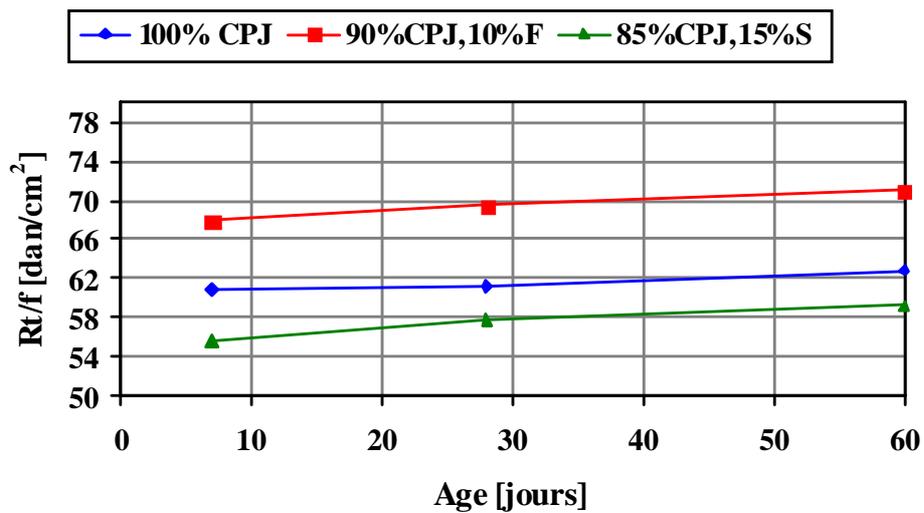


Figure 3-33. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.55

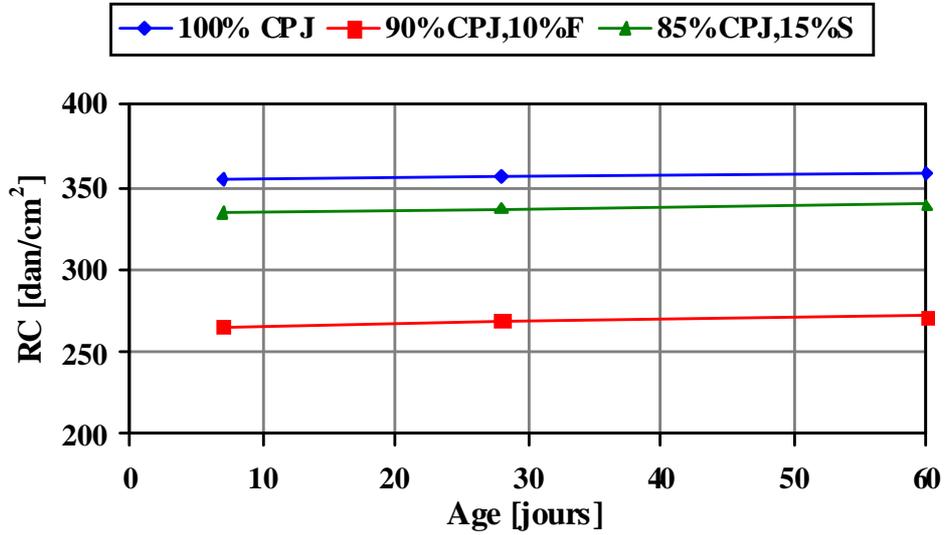


Figure 3-34. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.6

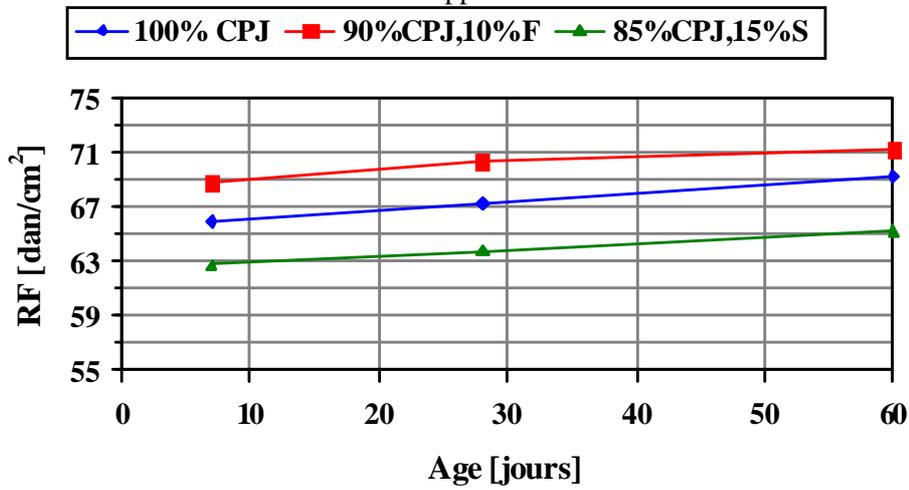


Figure 3-35. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.6

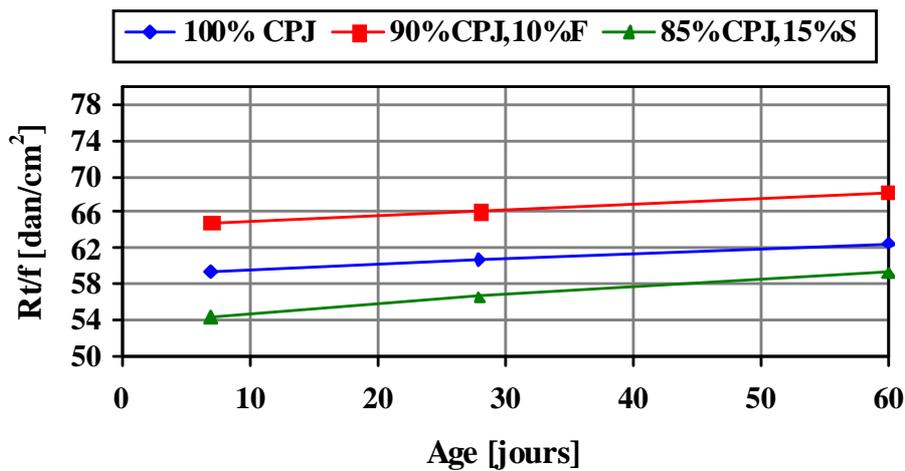


Figure 3-36. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport E/C=0.6.

COMMENTAIRE:

L'influence physique des ajouts minéraux sur le mélange est constatée directement avec le changement de la quantité d'eau ajoutée, le rôle chimique est évalué par le changement proportionnel de la résistance mécanique du mortier pour un rapport E/C par rapport au mortier témoin sans ajouts.

Dans les premiers 7 jours, les résultats de la résistance mécanique obtenus ont donné pour le mortier avec 15% de laitier des valeurs proches à celles du mortier témoin quelque soit le rapport E/L, et pour la résistance mécanique à la compression du mortier avec 10% de filler on remarque qu'il y a un grand écart entre la résistance de celui-ci et de celle du mortier témoin.

De 28 à 60 jours, on constate que la résistance mécanique du mortier de référence à la compression a augmenté mais ses valeurs restent petites et proportionnelles. La résistance du mortier avec 15% du laitier a accompagné la progression du mortier témoin mais elle est restée inférieure à cette dernière ; on remarque d'une autre part que la relation entre la résistance mécanique à la compression et le temps est linéaire en fonction du changement du rapport E/C

On a constaté aussi que la résistance mécanique avec 15% de laitier correspond à celle du mortier témoin. Cette relation confirme le rôle physique du laitier de haut fourneau qui consiste à remplir les pores existants entre les grains du ciment, ce remplissage fait augmenter la compacité du mortier et par conséquent sa résistance mécanique.

Pour le mortier avec 10% de filler, les études ont confirmées qu'une teneur en filler de 10% dans le mortier augmente la résistance mécanique à la compression mais reste inférieur à celle du mortier de référence.

Au delà de cette valeur, on observe des chutes de résistance et une augmentation de la porosité [Adams et Raco.1990].

Pour la résistance mécanique à la flexion on a constaté à 7 jours que la résistance mécanique à la flexion avec 10% de filler et avec 15% de laitier est proche de celle du mortier témoin jusqu'à 60 jours, cela explique l'influence des ajouts minéraux dans l'amélioration de la résistance mécanique et la réduction de la porosité du mortier.

Pour la résistance mécanique du mortier à la traction par flexion on a constaté qu'il y a un changement dans la résistance du mortier témoin par rapport au mortier avec ajouts notamment avec 10% de filler.

Et de ce changement on déduit que les ajouts minéraux jouent un rôle fondamental dans l'accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges.

CONCLUSION :

Cette étude nous a permis d'extraire un certain nombre de points :

- Le besoin d'eau et le début et fin de prise augmentent avec l'ajout
- Le mortier avec ajouts représente un important retrait et un gonflement moins que le mortier de référence.
- Les résultats d'analyse sur le mortier, montrent que la résistance mécanique avec l'ajout de **[10-15] %** de filler et de laitier respectivement dans le CPj, engendre une diminution de la résistance mécanique par rapport au mortier témoin, ainsi les essais confirment la réactivité robuste de laitier vis-à-vis de la réactivité de filler.



CHAPITRE IV



ETUDE DE LA
POROSITE DE LA
PATE ET DU
MORTIER

CHAPITRE IV

ETUDE DE LA POROSITE DE LA PATE ET DU MORTIER

4-1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus pour la porosité par l'échange de méthanol de la pâte de ciment et de mortier avec et sans ajouts, ensuite nous commençons l'analyse des résultats pour trouver une relation entre nos résultats et les techniques préalablement utilisées.

4-2. LES PROCESSUS D'EXPERIMENTATION :

Une fois que les échantillons sont préparés, pour la détermination de la résistance et de la porosité.

La porosité est déterminée par la méthode de l'échange de méthanol pour une tranche de [3mm] d'épaisseur approximativement extraite d'un cube de [2×2×2]cm³ de pâte de ciment. Et pour le mortier on extrait aussi une tranche de [4mm±1] d'un prisme de [4×4×16]cm³ de mortier.

La résistance à la compression est déterminée par l'écrasement des éprouvettes à chaque âge approprié.

4-3. LA RELATION ENTRE LA POROSITE ET LE RAPPORT E/C:

Les valeurs de la porosité totale basée sur l'échange du méthanol pour les différents rapports E/C et les différents types d'échantillons utilisés dans ce travail sont reportés aux tableaux au dessous :

Tableau 4-1. Relation entre le rapport E/C et la porosité basée sur l'échange par le méthanol d'une pâte de ciment avec et sans ajouts,

	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
100% CPJ	3.04345	3.20655	3.29655	3.31655	3.74095	4.10139	4.19640
10% F	0,78957	0,87231	0,96717	1,22612	2,10345	3,39715	3,73607
15% S	0,78942	1,19732	1,35939	1,82058	3,14370	3,29588	4,24402

Tableau 4-2. Relation entre le rapport E/C et la porosité basée sur L'échange par le méthanol d'un mortier sans et avec ajouts.

	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
100% CPJ	11,78233	12,04564	14,27554	14,42052	16,37753	17,01234	23,51578
10% F	8,31419	8,458254	9,94493	11,33915	12,13005	17,25100	18,35494
15% S	10,69125	10,71575	11,28004	13,74814	14,04163	15,35886	17,22200

4-4. LES RESULTATS DE POROSITE :

4-4-1. La pate de ciment:

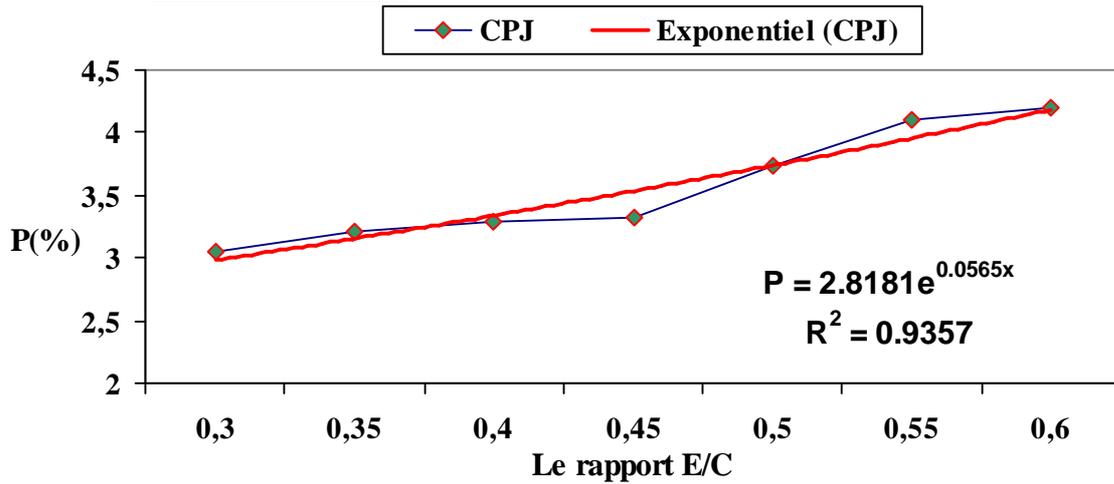


Figure 4-1. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour une pate sans ajouts

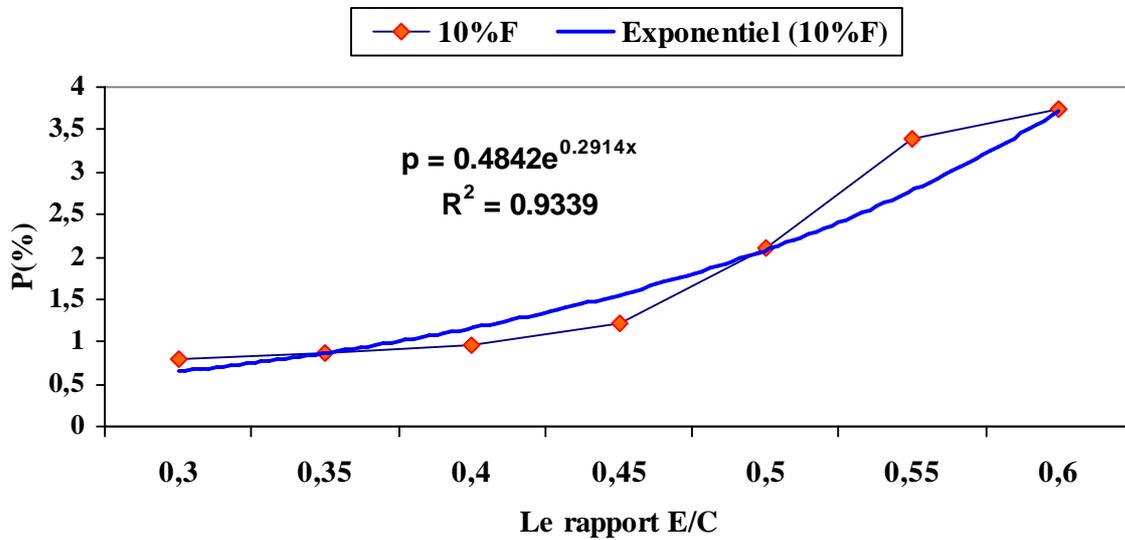


Figure 4-2. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour une pate avec 10%F.

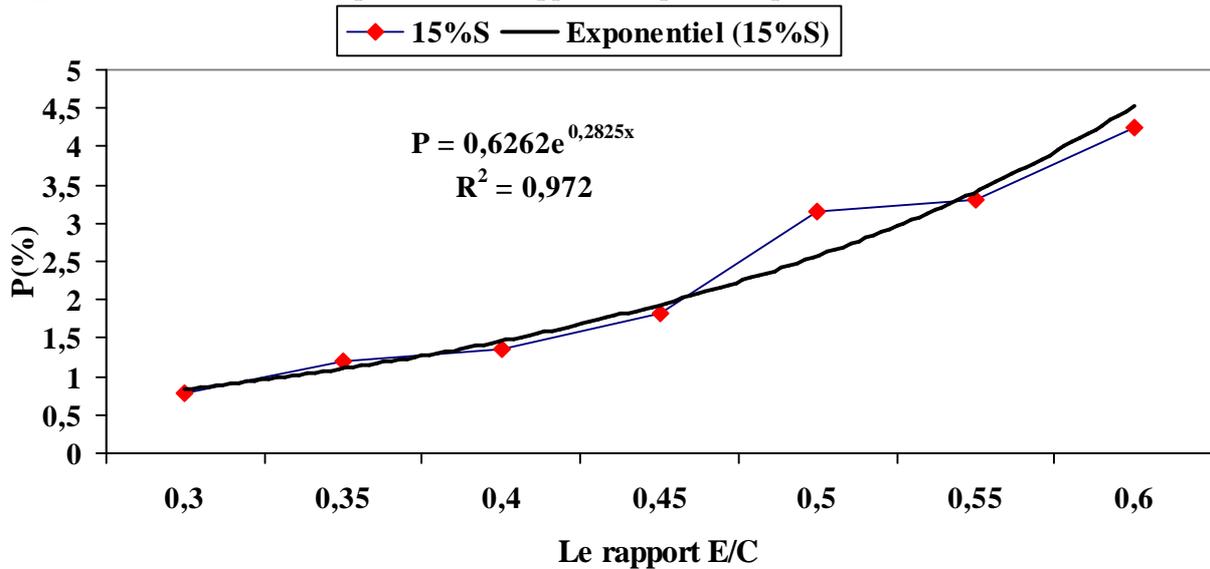


Figure 4-3. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour une pate avec 15%S.

4-4-2. Le mortier :

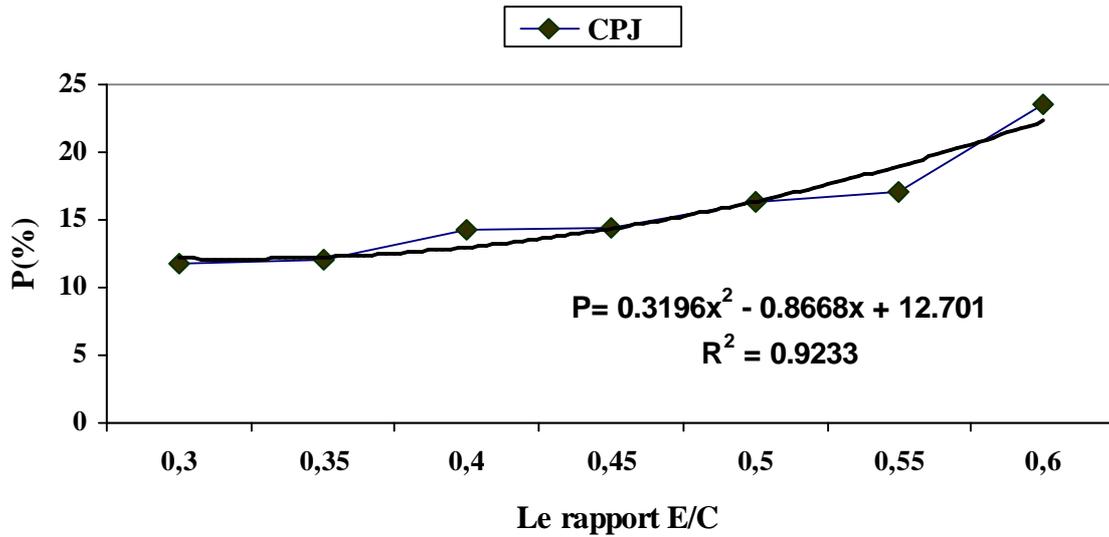


Figure 4-4. Relation entre la porosité et le rapport E/C de mortier sans ajout.

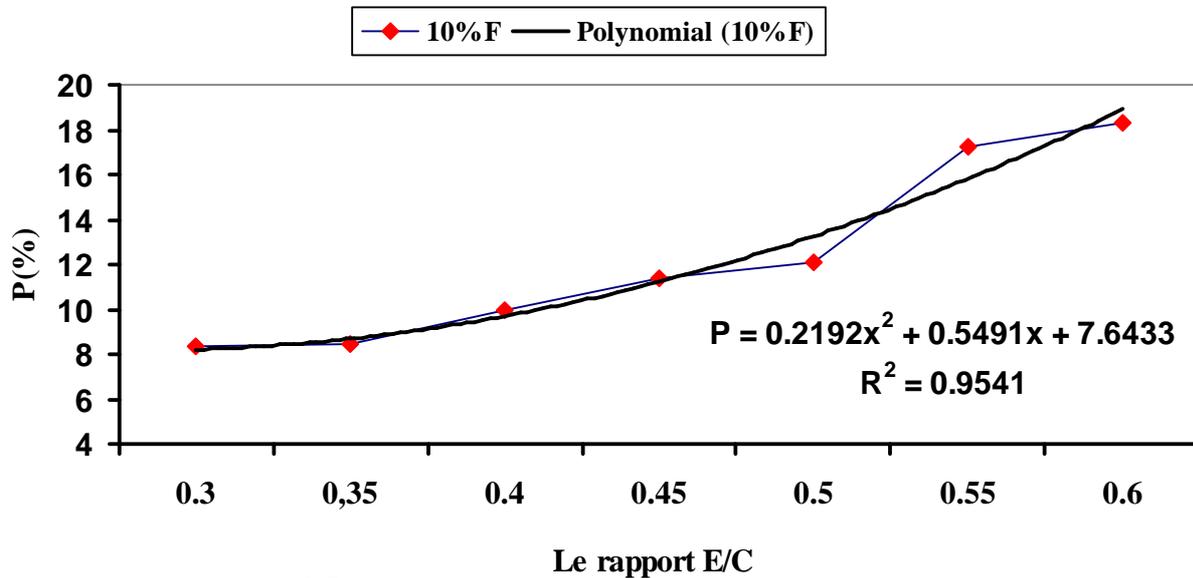


Figure 4-5. Relation entre la porosité et le rapport E/C de mortier avec 10%F.

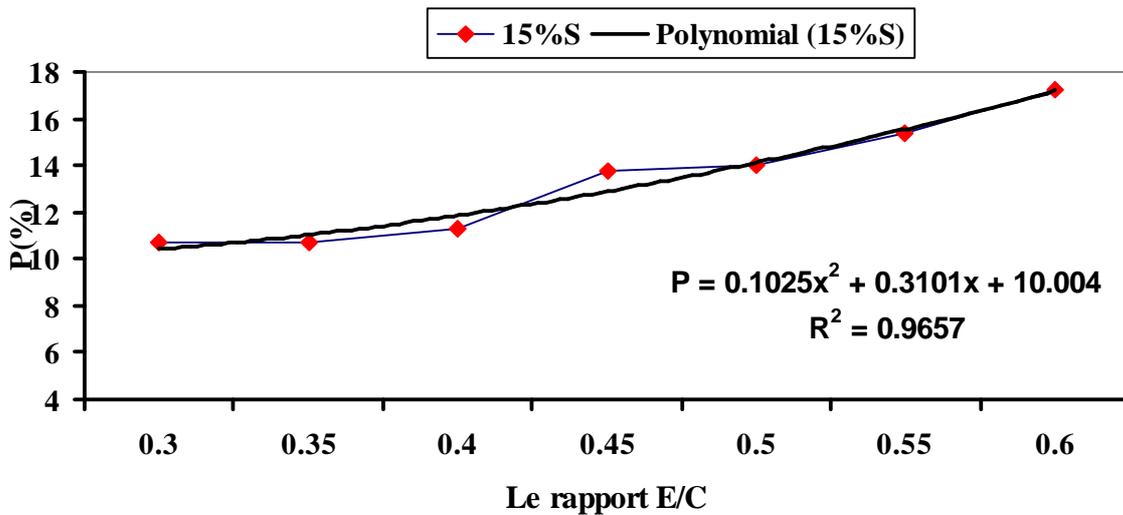


Figure 4-6. Relation entre la porosité et le rapport E/C de mortier avec 15%S.

COMMENTAIRE :

D'après les résultats précédents en ce qui concerne la porosité à base de méthanol, on peut remarquer ce qui suit :

Premièrement : Pour la pate de ciment, la porosité avec 10% de filler est inférieure à celle avec 15% de laitier, et en comparant les résultats obtenus on remarque qu'il y a une augmentation de la porosité pour la pate de ciment sans ajouts. Cela nous montre clairement le rôle des additions minérales dans la réduction de la porosité pour différents rapports E/C, et à partir des équations obtenues on constate que la relation est de type exponentiel avec un coefficient de corrélation à des valeurs élevées entre les différents types de pates de ciment utilisées.

Deuxièmement : Pour le mortier, on remarque les mêmes résultats précédents, mais avec un petit changement. Dans les valeurs de la porosité avec le rapport E/C = 0.6 du mortier contenant 10% F, et celui contenant 15% S. où la porosité a diminué pour le mortier avec 15% S, à cause de l'existence d'une portion importante de silice comme constituant de la matière ajoutée (le laitier) en plus de l'existence du sable qui contient à son tour le même composant (le silice),

En constatant les équations mathématiques obtenues on remarque que la relation est polynomiale avec un coefficient de corrélation à des valeurs variables, cela confirme la dépendance de la porosité par le rapport E/C et par conséquent son influence sur la résistance mécanique et sur la durabilité.

On peut conclure les points suivants :

- La porosité dépend du rapport E/C.
- La réduction de la porosité dépend du taux de finesse de la matière minérale ajoutée et du taux de son efficacité pouzzolanique pour limiter ce phénomène.
- La porosité augmente suite à l'excès des pourcentages des ajouts et surtout au delà de 10% F, 15% S [Adams, Raco 1990].
- La résistance mécanique dépend de la réduction de la porosité.
- La réactivité pouzzolanique participe au développement de la résistance et aussi stoppé la porosité.
- Les additions minérales ne contribuent pas à former un volume important de nouveaux produits hydratés capables de réduire la porosité des mortiers même si la résistance en compression peut être plus ou moins améliorée par l'activité liante des additions en présence de ciment. La contribution liante des additions minérales a donc un rôle structurant

des liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique qu'un rôle quantitatif sur la réduction de la porosité (A, Bessa ; 2004).

- Notre étude confirme que la porosité à base de méthanol reflète la théorie entre la porosité et le rapport E/C.

Sans oublier l'étude réalisée par (Parrott1981) qui ne confirme aucun risque de transformation au niveau de la microstructure. Et pour justifier cette apparition nous recommandons à voir la structure intérieure de la pâte de ciment et du mortier.

4-5. RELATION ENTRE LA RESISTANCE MECANIQUE ET LE RAPPORT E/C :

Les résultats de la relation entre la résistance mécanique à la compression du mortier en fonction du rapport E/C sont représentés ci-dessous :

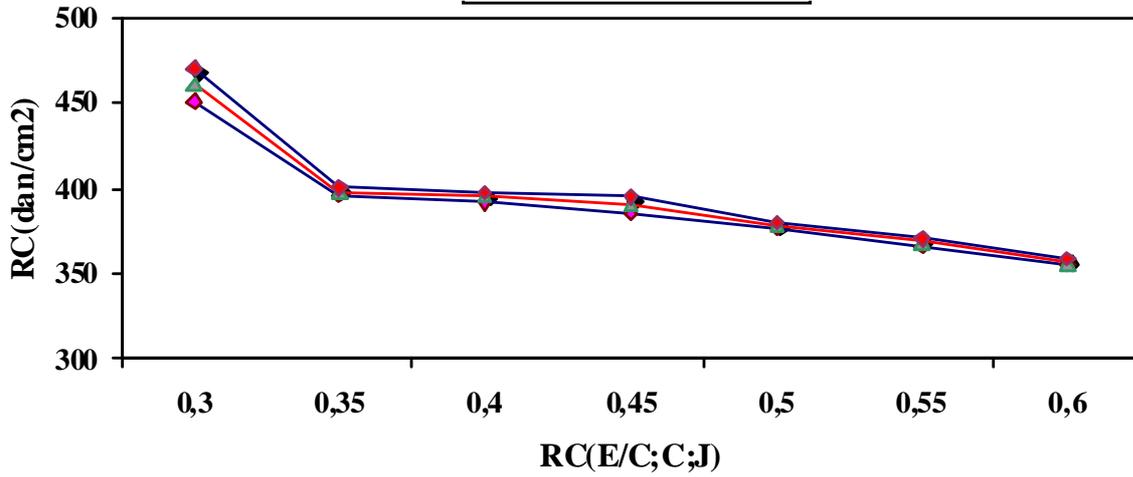


Figure 4-7. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C de mortier de référence.

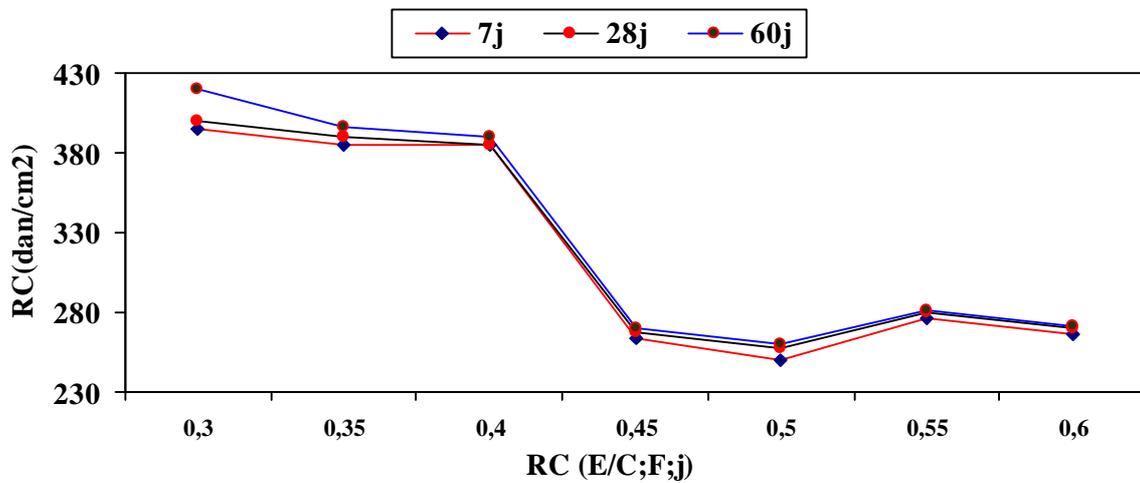


Figure 4-8. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C de mortier avec [10%F].

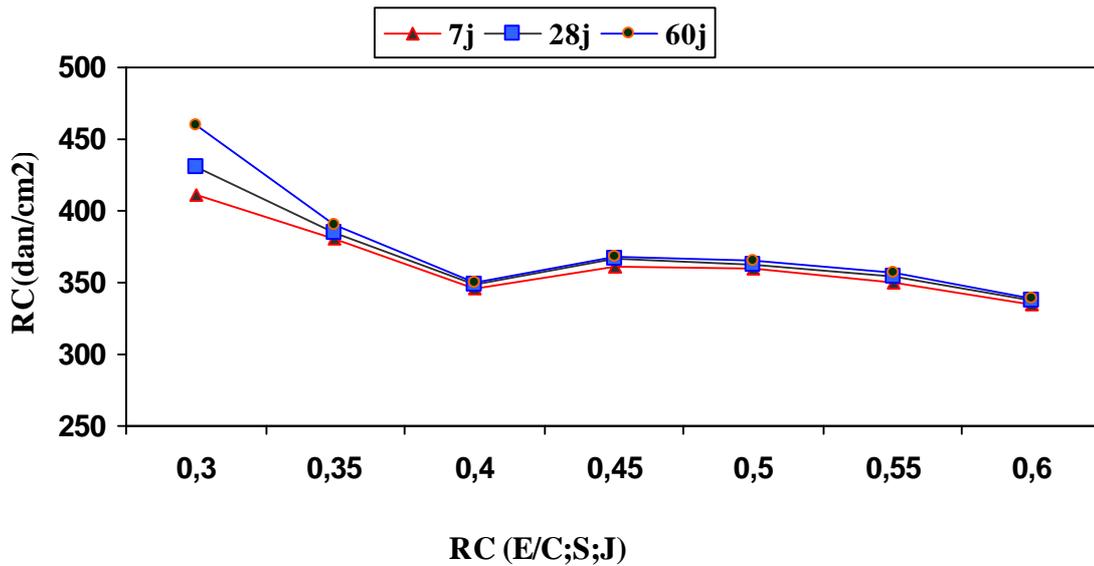


Figure 4-9. La relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C de mortier avec [15%S].

COMMENTAIRE :

D'après les résultats précédents nous remarquons que la résistance mécanique est reliée avec le rapport E/C, elle diminue avec l'augmentation du rapport E/C et augmente sensiblement la porosité du matériau,

Il est possible de modifier la microstructure du mortier en lui ajoutant des produits minéraux. Ces ajouts modifient la microstructure du mortier en terme de caractéristiques physiques et chimiques, ils conduisent à la segmentation de larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux.

L'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité ; les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires, et par conséquent augmente la résistance mécanique.

La contribution des additions siliceuses et calcaires de même finesse est tout à fait comparable, ainsi que l'absence d'un effet chimique important. Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique des additions. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons (Anissa Bessa et autre.2004).

CONCLUSION :

On conclue dans ce chapitre que la porosité à base de méthanol donne une image approché pendant les études avec la présence des additions minérale à des caractéristiques minéralogiques différentes avec la variation de rapport E/C.

Et on constate aussi que cette démarche affirmer l'importance de réduire ce phénomène pour garder la durabilité des ouvrages et développer la résistance mécanique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

D'après cette recherche on a essayé de choisir la méthode exploitable pour déterminer la porosité par l'addition de deux matières minérales différentes dans la pâte du ciment et dans le mortier.

En partant des résultats obtenus on a pu sortir avec plusieurs points:

- L'analyse des résistances en compression des mortiers avec additions minérales en fonction du rapport E/C, a permis de quantifier distinctement l'effet physique lié aux variations du besoin en eau, et l'effet chimique lié aux modifications du processus d'hydratation du ciment dans le mélange.

- L'activité pouzzolanique des ajouts est nettement améliorée par l'augmentation de sa finesse de mouture.

- Les additions minérales utilisées donnent une préférence à augmente la résistance mécanique a des taux précis, sans oublier la réactivité chimique de ces ajouts.

- L'action des ions de chlorure ou de sulfate attachés aux cations divalents ($MgCl_2$) sur le ciment est plus nocive que celle des ions attachés aux cations monovalents ($Na_2 SO_4$).

- La présente étude donne un aperçu sur la participation de l'addition minérale dans la pâte du ciment et du mortier pour évaluer la porosité par la méthode d'échange du méthanol.

- La matière ajoutée (le méthanol) a une influence sur la nature chimique de la matière étudiée et cela par la modification dans la réaction chimique entre les différents éléments des matières mélangées. Un examen de la structure intérieure des matières étudiées par le (MEB) va nous confirmer la modification de la structure intérieure (microstructure) des échantillons étudiés.

RECOMMANDATIONS :

Notre étude expérimentale nous a permis de faire la recommandation suivante :

- L'utilisation du (MEB) pour voir et examiner la structure des matières étudiées.
- Détermination de la porosité par d'autres méthodes à savoir les moyens comme ; les matériaux et les additions.
- Il faut limiter le pourcentage d'addition incorporée pour éviter l'effet contraire d'ajouts et par conséquent augmenter la porosité du matériau.
- Nous conseillons d'utiliser des adjuvants pour voir l'impact sur la porosité et comparer les résultats précédents avec les nouveaux résultats.

PERSPECTIVES :

- On développera l'étude par la présentation de la relation entre la porosité et le rapport E/C ainsi que la résistance mécanique avec les différents essais recommandés précédemment.
- On utilisera d'autres additions comme la fumée de silice, la pouzzolane, pour voir la contribution des additions sur les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques du liant, mortier et du béton.
- On essaiera de combiner les différents ajouts et on examinera les effets de leur utilisation simultanée.
- On développera l'étude du mortier avec d'autre ciment et sable, pour distinguer l'impact des différents paramètres sur les performances mécaniques.

- Aitcin P.C. 2000**, Béton haute performance, Edition Eyrolles, 2000, 800 p.
- Adams, L.D., Race, R.M. (1990)** Effect of limestone additions upon drying shrinkage of Portland cement mortar, tiré de Carbonate additions to cement, Klieger P. et Hooton D. Éditeurs, STP 1064, ASTM.
- Amine N.**, “Incidence de l’adjonction de la pouzzolane sur les propriétés des bétons de haut résistance”, Mémoire d’ingénieur, Boumerdes 1998.
- Ali A., Amine A.M., Sharara A.M., El-Didamony H.**, “The behaviour of different cement pastes in various sulphate solutions”, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 1, pp. 169-172, June 1994.
- **Bessa. A., J.L. Gallias ; 2003** : ‘Evaluation de la contribution des additions minérales à l’activité liante du ciment dans les mortiers’, 21^{èmes} rencontres universitaires de Génie Civil 2003, Prix René Houpert.
- **Bessa. A., J.L. Gallias ; 2004** : ‘Evaluation de la contribution des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et la durabilité des mortier liante du ciment dans les mortiers’, 22^{èmes} rencontres universitaires de Génie Civil 2004, Prix René Houpert.
- **Boudchicha, A, Mezghiche B, Jean-Louis Gallias, 2005** : utilisation d’une nouvelle approche méthodologique pour l’évaluation de l’effet des additions minérales sur les propriétés des mélanges cimentaires, colloque cmedimat 2005,6 et 7 decembre2005.
- Brey 1992 D.Breyse, A. Delagrave, B. Gerardh, Hornain .J.Marchand**, Etat de l’art – Etude du vieillissement d’origine chimique ou mécanique des matériaux à matrice cimentaire .Note technique ,1992 contrat LERM/DER, n°T20 D47.
- Bijen J. Prof. Dr**, “ Blast furnace slag ciment ”, 1996.
- Bakker. Rem**, “permeability of blended cement concretes”, paper SP-79-30 from ACI sp 79, Detroit 1983, pp. 589-605.
- Baron J., Ollivier J.P.**, La durabilité des béton, Press de l’école national des ponts et. - Chausses, 1992
- **Beaudoin J.J. 1979** : porosity measurement of some hydrated cementitious systems by high pressure mercury intrusion-microstructure limitations. Cement&concrete research,vol 9.1979.
- Ben cheikh M, Baali L;2003**: Etude expérimentale sur la perméabilité, la porosité et la résistance d’un béton à base de matériaux locaux comme critère de sa durabilité colloque cmedimat 2005,6 et 7 decembre2005.

- Baron J. (1992)** « *Introduction à la durabilité des bétons* »- La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-6, Paris, pp: 23 – 38
- Balshin .k.k(1949):**Relation of mechanical properties of powders metals and their porosity and the ultimate **properties** of porous metal ceramic materials .Dokl Akad Nauk SSSR ,vol 67.1949
- . Dupain .R, R. Lanchon & J.C. Saint – Arroman :** «Granulats, sols, ciments et Bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». Edition Casteilla. 1995.
- . Dreux .G & J. Festa:** «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition. Eyrolles. Mai 1998.
- Detwiler et Tennis, 1998:** The use of limestone addition in Portland cement: a State of the art review, Portland Cement Association report RP 118
- Douglas E.,** “Mortier de ciment au laitier et béton de laitier : caractéristique de durabilité”, Matériaux complémentaires en cimentation, CANMET, V. M. Malhotra Ed, Chapitre. 6, P6, 1989.
- Douglas Winslow, John M. Bukowski, and J. Francis Young.** The early evolution of the surface of hydrating cement. *Cement and Concrete Research*, 24(6):1025–1032, 1994.
- Escadeillas G, (1988) :** Les ciments aux filler calcaires: contribution à leur optimisation Par 1 'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillérisés Thèse de doctorat Université Paul Sabatier de Toulouse, p. 143
- Feldman (1968) R.F. Feldman and P.J. Sereda,** A model of hydrated Portland cement paste as deduced from sorption length-change and mechanical properties. *Mat. And Struct. RILEM*, 1(6):509–520, 1968.
- Feldman R.F.1983,** “significance of porosity measurements on blended cement performance”, 1st Inter. Conf. On the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by products in concrete, Montebello, 1983, V.M. Malhotra, Ed., ACI, SP-79, 1,415-433
- Feldman R .H; 1972: Factors** affecting young's modulus-porosity relation of hydrated cement compacts.*Cement&concrete research*, vol2, 1972.
- Fagerland k 1973:** Strength and porosity of concrete .Proceeding of the conference on pore structure and properties of materials.Prague, vol 2, p p55-77, 1973.
- Gegout P, Honain, h, Thuret, B., Mortureux, B, Volant, J, Regourd, M. (1986):** Texture et performance des ciments fillérisés, CERILH, congrès *international sur la chimie Des ciments, Rio, vol.5*

- Galal A., Taha A.S., Helmy I.M.**, “Rice husk ash in Portland blended cement”, *Silicates industrials*, Nr. 1-2, pp. 55-58, 1990.
- Ghernouti .Y, Y M.T. Abadlia; R. Chaid** : effets des ajouts cimentaire ultrafins sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons séminaire international de géomatériaux, GEOMAT’02 ;10-11mars2003.
- Hermann K.**, “Substances exerçant une action chimique sur le béton”, *Bulletin du ciment*, Bruxelles, N° 12/Décembre 1995.
- Hornain, h., Marchand, J, Moranville-Regourd, M. (1995)**: diffusion of chloride ions in limestone filler blended cernent pastes and mortars, *Cernent and Concrete Research*, vol. 125, n°08, p.1667-1678
- Häussler. F, Eichhorn F, and H. Baumbach.** Description of the structural evolution of a Hydrating Portland cement paste by SANS. *Physica Scripta*, 50:210–214, 1994.
- helmuth R .A et verbeck G; 1966**: Structure and physical properties of cement apste. *Proc of the chemistry of cement Tokyo 1966*.
- Ingram, K., Poslusny, M, Daugherty, Rowe,W. (1990)**:Carboaluminate reactions Influenced by limestone additions, tiré de *Carbonate additions to cement*, Klieger P. ET Hooton D. éditeurs, STP 1064, ASTM
- Klemm, W.A., Adams, L.D. (1990)** :An investigation of the formation of carboaluminates, tiré De *Carbonate additions to cernent*, Klieger P. et Hooton D. éditeurs, STP 1064, ASTM
- Kessal, M., Edward-Lajnef.M, Tagnit-Hamoau., Aitcin, P -C (1996)**
L’optimisation de La résistance a court terme des bétons fabriqués avec un ciment de type 20M, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol.23, p.614-620.
- Kobayashi K, Uno Y**: “Influence of alkali on carbonation of concrete.2.Influence of alkali in cement on rate of carbonation of concrete”, *Cernent and Concrete Research.*, 20, 4, PP 619-622, 1990.
- Konecny L., Frost**, “Leaching of concrete”, *Advances in cementitious materials*, *Ceramic transactions*, Vol. 16, pp, 477-487, 1991.
- Lawrence P., (2000)** « Sur l’activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse.
- Longuet, P., Beuglen, L, .Zelwer, A 1982** : La phase liquide du ciment hydraté, Publication Technique **CERILH n°2 19**
- Loukhovski G., Pakhanov V.D**, “Chelotchimie tsmenty I Betony”, *Kiev Budivelnik*, 1978, p. 184.

- Locher, F.W.** “Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack”, Proc.5th international symposium on the chemistry of cement, Tokyo, Vol, 3, PP. 328-335, 1968.
- Moore .D:** The Roman Pantheon: The Triumph of Concrete. 1995.
- Moll H.L,** “Über die Korrosion von stahl in beton, Deutscher ausschuss fur Stahlbeton”, 1964, 169, 23-61.
- Menetrier, D . Sorrentino 1986 :** Particle-size distribution in blended cements, 8^{ème} Congrès international sur la chimie des ciments, Rio, vol. IV, p.60-65
- Mezghiche B,** “Résistance et déformabilité de Béton Basique” Premier séminaire national en génie-civil Biskra le 8-9 Décembre 1996.
- Mezghiche B:** “Technologie des bétons aux laitiers basiques pour R.A.D.P”. Résumé de thèse de PHD, Kiev 1989.
- Mellas, M.2003 :**L'utilisation du Microscope electronique a balayage et les diffractions par rayons x dans l'étude des ciments et bétons (These de doctorat), université de Biskra
- Maggion, R:** Étude de l'évolution microtexturale de pâtes de silicate tricalcique hydraté. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 1992.
- Neto, C S., Campitelli1990:** The influence of limestone additions on the rheological Properties and water retention value of Portland cement slurries, tiré de Carbonate additions to cernent, Klieger P. et Hooton D. éditeurs, STP 1064, ASTM.
- Neville A.M et Brooks : 1987:**concrete technology .Longman . London .1987.
- Noumowe, A. 1995:** Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton - Cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de Génie Civil : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon 1, 1995. 231p.
- NEVILLE A.M :** (Propriétés des bétons). Version française traduit par CRIB. Eyrolles. 2000.
- Orr C 1970:** Application of mercury penetration to material analysis powder diffraction ,p3,1970.
- Powers T.C and H.H steinour,** An interpretation of published researches on the alkali aggregate reaction, j.amer, Inst., 51, pp.497-516(feb.1955)and pp.785-811(April 1955).
- Prene .S (2000),** Intérêt des bétons bas pH dans le cadre du stockage des déchets nucléaires Note EDF R &D, 2000, n°- 43/00/020/A.
- Pearson. D and A. J. Allen.** A study of ultrafine porosity in hydrated cements using small Angle neutron scattering. Journal of Materials Science, 20:303–315, 1985.

- Parrot.L.J; 1981:** Effect of drying history upon the exchange of the pores water with methanol and upon subsequent methanol sorption behavior in hydrated alite cement. *Cement&concrete research*, vol 11.1981.
- Patel R.J et parrot L.J.Martin J.A&Killoh D.C1981:**Gradient microstructure and diffusion properties of paste caused by drying . *Cement&concrete research*, vol 14.1984.
- Perreira C.J., Rice R.W., SkalnyJ.P et Crace W.R: (1989),** Pore structure and its relationship to properties of materials. *Mat. Res. Symp. Proc.*, 1989, vol 137. P 3-21.
- Pihlajavaara S.E. (1972),** an analysis of the factors exerting effect on strength and other properties of concrete at elevated temperatures. *ACI special Publication*, 1972, paper SP34-19. p 347-354.
- Ramachandran, V S, Zhang Chun-mei 1986:** Hydration kinetics and microstructural Development in the $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3. \text{CaCSO}_4\text{-}2\text{H}_2\text{O-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system, *Matériaux et Constructions*, vol.19, n°114, p.437-444
- Recommandation AFGC décembre 1997:** Durabilité des bétons : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité (L.M.D.C. INSA-UPS, Toulouse).
- Rostasy F.S., Weiss R. et Wiedmann G. (1980),** Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. *Cement and Concrete Research*, 1980, vol 10, n°2. p 157-164
- Rossler M. et Odler 1. (1985),** Investigations on the relationship between porosity structure and strength of hydrated Portland cement pastes one. Effect of porosity. *Cement and Concrete Research*, 1985, vol 15, n° 2. P 320-330.
- Ryshkevitch E 1953 :**Compressive strength of porous sintered alumina and zirconia,*Journal of the American ceramic society*,36,1953.
- Schmidt.D , Rostasy , F.S. (1995)** Crystallisation and hydration pressure or formation pressure of solid phases, *Cement and Concrete Research*, vol.25, n02, p.255-256
- Schiller k.k 1971:** Strength of porous materials. *Cement &Concrete Research*,vol 1,1971.
- Schiller k.k 1958:**Porosity and strength of brittle solid .*Butterworth Science* ,London ,1958.
- Shi D&Winslow D .N.1985:** Contact angle and damage during mercury intrusion into cement paste ,*Cement&concrete research*,vol 15.1985.
- Soroka I, Setter, N. 1977:** The effects of filler on strength of cement mortars,-*Cement and Concrete Research*, vol.26, n°4, p.449-456.
- Taylor H.F.W,** *Cement chemistry*, Thomas Telford, 2nd edition, p. 475, 1997
- 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.

-Watson, K.L 1981: A simple relationship between the compressive strength and porosity of hydrated Portland cement. Cement & Concrete Research, vol 11, pp472-476, 1971.