

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil

THESE DE DOCTORAT

en Génie Civil

**COMPORTEMENT DES MORTIERS ET BÉTONS À BASE
DE CIMENTS AU LAITIER D'EL HADJAR DANS DES
MILIEUX AGRESSIFS**

Par

Ahmed HADJ SADOK

Devant le jury composé de:

| | | |
|------------|--|-----------------------|
| M. ABED | Professeur, Université de Saad Dahleb Blida | Président |
| K. EZZIANE | Maitre de conférences, université de Chlef | Examineur |
| M. GHRICI | Maitre de conférences, université de Chlef | Examineur |
| B. MENADI | Maitre de conférences, Université de Saad Dahleb Blida | Examineur |
| S. KENAI | Professeur, Université de Saad Dahleb Blida | Directeur de thèse |
| L. COURARD | Professeur, Université de liège, Belgique | Co-directeur de thèse |

Blida, 2010

RÉSUMÉ

Le laitier granulé de haut fourneau est largement utilisé comme substituant au ciment Portland en raison de ses propriétés avantageuses comme la réduction de la chaleur d'hydratation et l'amélioration de la durabilité du béton. Cependant, l'efficacité du laitier dépend de sa réactivité hydraulique. Dans cette étude, le laitier granulé de haut fourneau d'El Hadjar, qui est caractérisé par une faible réactivité, est utilisé dans des mortiers et des bétons.

Les résistances mécaniques en compression et en flexion des mortiers et bétons à base de ciment au laitier sont analysées. La microstructure a été analysée par des essais de porosité à l'eau et au mercure. Les propriétés de transport (perméabilité à l'eau, au gaz, diffusion et conduction des ions de chlore,..) ainsi que la résistance à l'attaque des sulfates et de l'eau de mer des mortiers et béton au laitier sont également étudiés.

La composition chimique du laitier et les résultats de la résistance en compression ont confirmé la faible réactivité hydraulique du laitier étudié. Cependant, il peut être utilisé avec satisfaction dans le mortier et le béton, comme substituant au ciment, à un taux optimum d'environ 30 pourcent.

La microstructure est plus raffinée pour les mortiers au laitier par rapport au mortier de référence et les propriétés de transport sont améliorées aux âges avancés, en particulier, pour 50% de substitution. La résistance aux sulfates du mortier est améliorée pour des taux de laitier supérieurs à 30%, tandis que la résistance à l'eau de mer n'est que faiblement influencé par la présence du laitier.

Un effet négatif du laitier a été observé sur la perméabilité et l'absorption d'eau des bétons avec un rapport Eau/Liant élevé. Néanmoins, les propriétés de durabilité des bétons au laitier d'El Hadjar sont améliorées au long terme, pour un faible rapport Eau/Liant.

ABSTRACT

Granulate blast furnace slag has been widely used as a substitute for Portland cement because of its advantageous properties such as reduction in heat evolution and improvement of concrete durability. However, the effectiveness of slag depends on its hydraulic reactivity. In this study, El Hadjar granulated blast furnace slag, which is characterised by low reactivity, is used in mortar and concrete mixes.

Compressive and flexural strength of slag cement mortar and concrete are analyzed. The microstructure was studied by water and mercury porosity tests. Transport properties (water permeability, gas permeability, resisting of chloride ions penetration,..) and performance under sulfates attack and sea water of slag mortars are also analyzed.

The chemical composition and compressive strength results confirmed the low hydraulic activity of the slag studied. However, it can be used satisfactory in mortar and concrete as cement replacement at about 30 percent, in wet curing conditions.

The microstructure is finer for slag mortars compared to the reference mortars and transport properties are improved at long term, particularly for 50% slag substitution. Sulfate resistance of mortar is improved by slag replacement up to 30%, while resistance to sea water is only weakly influenced by the presence of slag.

A negative effect of slag was observed in permeability and water absorption of concrete with high Water/Binder ratio. Nevertheless, the durability properties of El-Hadjar slag concrete were improved at long term at low Water/Binder ratio.

ملخص

خبث الفرن العالي المحبب يعتبر مادة مستعملة بكثرة كمستبدل للاسمنت البورتلندي و هذا للعدة أسباب مفيدة والتي تشمل التقليل من حرارة التفاعلات الكيميائية و تحسين ديمومة للخرسانة. غير أن فعالية الخبث المحبب متعلقة بقدرته على الانفعال. في هذه الأطروحة. خبث الفرن العالي لمصنع الحجار, المتميز بتفاعل ضعيف استعمل في الملاط و الخرسانة.

قد تمت دراسة الخواص الميكانيكية للملاط و الخرسانة المتكونة من الاسمنت و الخبث. البنية المجهرية تم دراستها بتجربة المسامية للماء و لزئبق . خواص النقل (قابلية النفوذ للماء و الغاز و ذرات الكلور) و مقاومة الملاط و الخرسانة لكبريتات و مياه البحر تمت أيضا دراستهم.

التركيب الكيميائي و نتائج مقاومة الضغط أثبتت ضعف تفاعلية الخبث المستعمل بينما يمكن استعماله بمقدار 30% كمستبدل للاسمنت في الملاط و الخرسانة.

لاحظنا أن البنية المجهرية للملاط الخبث أدق من بنية لملاط المرجعي و أن خواص النقل تحسنت في الازمان المتقدمة و خاصة من اجل نسبة 50% من الخبث.

مقاومة الملاط ضد الكبريتات تحسنت من اجل نسب الخبث الأكثر من 30 % , بينما المقاومة لمياه البحر لم تتأثر كثيرا بوجود الخبث. تأثيرا سلبيا للخبث قد لوحظ على النفاذة و مص المياه عبر المسامات للخرسانة ذات النسبة العالية ل الماء/الاسمنت. مع ذلك, خواص الديمومة لخرسانة خبث الحجار تحسنت من اجل نسب ماء/اسمنت ضعيفة

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Matériaux et Génie Civil de l'Université de Saad Dahleb de Blida et au Laboratoire de Matériaux de Construction (LMC) de l'Université de Liège en Belgique.

Je remercie Monsieur Said KENAI, Professeur à l'université de Blida, mon directeur de thèse, pour m'avoir dirigé dans ces travaux de recherche. Je le remercie pour le temps qui a consacré pour corriger ce mémoire. Espérant avoir l'occasion de travailler avec lui dans le futur, qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Cette recherche a été réalisée sous la direction de Monsieur Luc COURARD, Professeur à l'université de Liège. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour la confiance et l'aide qu'il m'a apporté tout au long de ce travail. Espérant une continuité dans cette collaboration scientifique, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je souhaite ensuite remercier les rapporteurs de thèses qui m'ont fait honneur d'accepter d'être membres du jury:

- Monsieur M. ABED, Professeur à l'université de Blida, président du jury ;
- Monsieur M. GHRICI, Maître de conférences à l'université de Chlef, examinateur ;
- Monsieur, K. EZZIANE Maître de conférences à l'université de Chlef, examinateur;
- Monsieur B. MENADI, Maître de Conférences à l'Université de Blida, examinateur.

J'associe également à mes remerciements, le Directeur de la cimenterie de Meftah, Mr DJAADOUNE Abdelkader directeur du laboratoire de la cimenterie, Mr TOUIL Djamel, directeur du Laboratoire des Matériaux au département de chimie industrielle à l'Université de Saad Dahleb, Mr BACHIR Cherif, directeur du laboratoire de génie civil de l'ENSH, Mr FORTAS Abdelkader, laborantin du LGM de l'université de Blida et mon ami Fethi, technicien au laboratoire de génie civil de L'ENSH.

Je tiens à remercier Dr DARIMON Anne, chef de recherche à l'Ulg (Belgique), Mr MICHEL Frédérique, directeur technique du LMC de Liège ainsi que Dr RENÉ Pirard du département de chimie à l'Ulg pour leur collaboration scientifique précieuse.

Je remercie l'équipe du laboratoire LMC de l'Université de Liège ; Monique DENOTTE, Fabiane LIBIOULLE, Véronique SZEPETIUK, Alain SALOMON et Jean DELHAMENDE, pour leur aide précieuse et leur soutien permanent.

Je ne saurais oublier de saluer les responsables, les collègues et amis de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique et du département de Génie Civil de l'université de Saad Dahleb.

Mes vifs remerciements à ma mère, à ma femme et mon enfant Imad-Eddine pour leurs patientes, pour le sacrifice qui m'a été accordé tout au long de la préparation de cette thèse et pour m'avoir supportés et soutenus jusqu'à ce jour.

En fin, je souhaite remercier tous ceux qui, par leur aide et par leur encouragement et Dieu c'est qu'ils sont nombreux, m'ont permis de réaliser cette modeste thèse.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| RÉSUMÉ | 2 |
| REMERCIEMENTS | 5 |
| TABLE DES MATIERES | 7 |
| LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES | 9 |
| INTRODUCTION | 15 |
| 1. CIMENT ET AJOUTS MINERAUX | 18 |
| 1.1 Introduction | 18 |
| 1.2 Les ciments | 18 |
| 1.3 Les ajouts cimentaires | 25 |
| 1.4 Conclusion | 30 |
| 2. LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU | 31 |
| 2.1 Introduction | 31 |
| 2.2 Fabrication du laitier de haut fourneau | 31 |
| 2.3 Caractéristiques chimiques du laitier granulé | 34 |
| 2.4 Structure vitreuse | 37 |
| 2.5 Indice d'activité du laitier | 38 |
| 2.6 Activation du laitier | 39 |
| 2.7 Hydratation du ciment au laitier | 40 |
| 2.8 Influence du laitier sur le béton à l'état frais | 44 |
| 2.9 Influence du laitier sur les propriétés physiques | 45 |
| 2.10 Influence du laitier sur propriétés mécaniques. | 48 |
| 2.11 Travaux de recherche sur le laitier Algérien (D'El Hadjar) | 52 |
| 2.12 Conclusion | 57 |
| 3. DURABILITE DES BETONS A BASE DE CIMENT CONTENANT LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU | 58 |
| 3.1 Introduction | 58 |
| 3.2 Structure poreuse d'une matrice cimentaire | 58 |
| 3.2.1 Classification des tailles des pores | 58 |
| 3.2.2 Formes géométriques des pores | 59 |
| 3.2.3 Influence du laitier sur la porosité | 60 |
| 3.2.4 Influence des granulats sur la porosité et la microstructure | 61 |
| 3.4 Influence du laitier sur les propriétés de transport dans les matériaux cimentaires | 62 |
| 3.4.1 La perméabilité | 62 |
| 3.4.2 Diffusion des ions chlore | 64 |
| 3.5 Résistance aux sulfates | 67 |
| 3.5.1 Sources et mécanismes d'attaque des sulfates | 67 |
| 3.5.2 Influence du laitier de haut fourneau sur la performance des ciments et bétons lors de l'attaque des sulfates | 69 |
| 3.6 Carbonatation | 71 |
| 3.7 Conclusion | 73 |
| 4. MATERIAUX ET ESSAIS | 74 |
| 4.1 Introduction | 74 |
| 4.2 Matériaux | 74 |
| 4.3 Mortiers | 79 |
| 4.4 Les Bétons | 80 |
| 4.5 Essais réalisés sur mortier | 81 |
| 4.5.1 Essais mécaniques. | 81 |
| 4.5.2 Porosité accessible à l'eau | 82 |
| 4.5.3 Porosimétrie par intrusion de mercure | 83 |
| 4.5.4 Absorption d'eau par capillarité | 86 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.5 Diffusion des ions de chlorures | 87 |
| 4.5.6 Résistance aux sulfates et à l'eau de mer | 92 |
| 4.6 Essais sur béton | 94 |
| 4.7 Variables étudiées | 97 |
| 5. CARACTERISTIQUES MECANQUES DES CIMENTS AU LAITIER D'EL HADJAR | 99 |
| 5.1 Introduction | 99 |
| 5.2 Evolution des résistances mécaniques à moyen terme (jusqu'à 90 jours) | 99 |
| 5.3 Evolution des résistances mécaniques à long terme (jusqu'à 360 jours) | 103 |
| 5.4 Effet du climat extérieur (chaud et sec) sur le développement des résistances mécaniques des ciments au laitier | 107 |
| 5.5 Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en flexion | 110 |
| 5.6 Conclusion | 113 |
| 6. MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES DE TRANSPORT DES MORTIERS A BASE DE CIMENT AU LAITIER D'EL HADJAR | 114 |
| 6.1 Introduction | 114 |
| 6.2 Analyse de la structure Poreuse | 114 |
| 6.2.1 Porosité totale | 114 |
| 6.2.2 Microstructure | 116 |
| 6.4 Absorption d'eau par capillarité | 121 |
| 6.5 Taux de saturation | 126 |
| 6.5 Perméabilité à l'oxygène | 127 |
| 6.6 Perméabilité aux ions chlorures | 128 |
| 6.6.1 Diffusions des chlorures en régime permanent | 128 |
| 6.6.2 Conduction des ions chlorure | 131 |
| 6.7 Conclusion | 133 |
| 7. DURABILITE DES MORTIERS AU LAITIER d'EL HADJAR DANS DES MILIEUX SULFATIQUES | 134 |
| 7.1 Introduction | 134 |
| 7.2 Résistance aux sulfates de sodium et de magnésium | 134 |
| 7.2.1 Expansion | 134 |
| 7.2.2 Variation des résistances mécaniques | 139 |
| 7.3 Résistance à l'eau de mer | 147 |
| 7.4 Conclusion | 149 |
| 8. RESISTANCE ET DURABILITE DES BETONS A BASE DE CIMENTS AU LAITIER D'EL HADJAR | 151 |
| 8.1 Introduction | 151 |
| 8.2 Résistance en compression | 151 |
| 8.3 Absorption capillaire | 153 |
| 8.4 Perméabilité à l'azote | 156 |
| 8.5 Pénétration d'eau sous pression | 158 |
| 8.6 Conclusion | 160 |
| CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES | 162 |
| REFERENCES | 166 |
| ANNEXES | 178 |

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

| | |
|---|-----|
| Tableau 1.1 : Coût énergétique kW/t de ciment | 19 |
| Tableau 1.2 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NFP 15-301 | 20 |
| Tableau 1.3 : Teneur moyenne des oxydes constitutifs du clinker | 21 |
| Tableau 1.4 : Composition minéralogique du ciment | 21 |
| Tableau 1.5 : Utilisation annuelle (tonnes) des différentes additions au béton en Europe | 26 |
| Tableau 1.6 : Ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes | 26 |
| Tableau 2.1: Production et utilisation annuelle des laitiers dans le monde | 34 |
| Tableau 2.2 : Compositions chimique de quelques laitiers dans le monde | 34 |
| Tableau 2.3 : Spécifications chimiques des quelques normes pour le laitier | 36 |
| Tableau 2.3 : Classe de laitier selon l'indice d'activité d'après la norme ASTM C 989-89 | 39 |
| Tableau 2.4 : Influence du mode de broyage sur la résistance en compression de ciment au laitier | 50 |
| Tableau 3.1 : Diffusion des ions chlorures dans les bétons au laitier | 65 |
| Tableau 3.2: Résistance des bétons conservés dans les solutions de sulfates (en pourcentage de la résistance des bétons conservés dans l'eau) | 71 |
| Tableau 4.1 : Composition chimique des ciments utilisés | 74 |
| Tableau 4.2: Composition minéralogique et propriétés physiques des ciments utilisés | 74 |
| Tableau 4.3 : Composition chimique du laitier granulé d'El Hadjar | 75 |
| Tableau 4.4 : Indices chimiques du laitier granulé d'El Hadjar | 76 |
| Tableau 4.5: Indice d'efficacité hydraulique h du laitier d'El Hadjar | 77 |
| Tableau 4.6 : Classification des indices d'efficacité hydrauliques des laitiers en fonction des résultats des essais mécaniques | 77 |
| Tableau 4.7: Composition des mortiers | 79 |
| Tableau 4.8 : Données climatiques de la période où les éprouvettes ont été conservées à l'extérieur du laboratoire | 80 |
| Tableau 4.9 : Composition des bétons | 81 |
| Tableau 4.10: Perméabilité aux ions chlorure des bétons selon la charge Q | 92 |
| Tableau 5.1 : Résistance en compression (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier | 104 |
| Tableau 5.2 : Résistance en flexion (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier | 106 |
| Tableau 5.3 : Corrélation entre la résistance à la flexion et à la compression pour les deux environnements de cure | 110 |
| Tableau 6.1 : Porosité à l'eau PW, porosité à l'eau sous vide PWV et porosité au mercure PHG des mortiers étudiés en fonction de l'âge | 116 |
| Tableau 6.2 : Porosité fermée Pf des mortiers étudiés en fonction de l'âge | 116 |
| Tableau 6.3: Rayon critique (R_{cr}) et rayon moyen des pores (R_m) des mortiers étudiés | 119 |
| Tableau 6.4: Coefficient d'absorption capillaire des mortiers en fonction de l'âge | 124 |
| Tableau 6.5: Coefficient de diffusion et temps de passage (retard) des ions chlorure | 131 |
| Tableau 8.1: Coefficient d'absorption d'eau capillaire des bétons au laitier | 153 |
| Tableau 8.2: Valeurs moyennes de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons au laitier pour les deux rapports E/L (0,65 et 0,42) | 159 |

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche | 24 |
| Figure 1.3 : Hydratation des C_3S produisant du gel C-S-H et des cristaux CH | 24 |
| Figure 1.4 : Evolution d'émission de CO_2 (par tonne de ciment produite) en fonction des solutions envisagées dans l'industrie du ciment | 25 |
| Figure 1.5 : Principe du comportement de l'ajout calcaire | 28 |
| Figure 1.6 : Effet de la pouzzolane sur l'expansion des mortiers immergés dans une solution à 1% de sulfate de magnésium | 29 |
| Figure 2.1 : Situation du laitier de haut fourneau dans le système $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ | 35 |
| Figure 2.2 : Principaux réseaux formant le verre dans le laitier | 38 |
| Figure 2.3 : Action hydroxylique sur les liaisons Si-O-Si sur la structure vitreuse du laitier | 41 |
| Figure 2.4 : Hydratation du laitier | 42 |
| Figure 2.5 : Courbe calorimétrique de l'hydratation des ciments au laitier | 43 |
| Figure 2.6 : Taux de ressuage pour différents dosages en laitier | 45 |
| Figure 2.7 : Temps de prise des ciments avec ajout laitier | 46 |
| Figure 2.8 : Evolution du retrait des ciments au laitier (CPJ avec 30% de laitier et CHF avec 50% de laitier) | 47 |
| Figure 2.9 : Fluage des bétons à haute performance au laitier de haut fourneau | 48 |
| Figure 2.10 : Evolution de la résistance à la compression de bétons avec différents teneurs en laitier | 49 |
| Figure 2.11 : Courbe de résistance à la compression à 28 jours (MPa) de ciment avec 50% clinker - 50% laitier en fonction de la finesse des composants | 50 |
| Figure 2.12 : Temps de broyage du laitier et du clinker | 50 |
| Figure 2.13: Influence du laitier sur la résistance en flexion des bétons contenant 10% de métakaolin | 51 |
| Figure 2.14 : Diffractogramme aux rayons X du laitier granulé d'El Hadjar | 53 |
| Figure 2.15 : Indice d'efficacité hydraulique en fonction de la finesse du laitier granulé d'El Hadjar | 53 |
| Figure 2.16 : Résistance à la compression du laitier en fonction des différents activants | 54 |
| Figure.2.17 : Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 28 jours | 55 |
| Figure. 2.18 : Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation | 57 |
| Figure 3.1 : Influence de l'environnement de cure sur la distribution des pores d'un béton contenant 65% de laitier granulé | 61 |
| Figure 3.2 : Perméabilité à l'eau et aux ions chlorures des bétons au laitier | 63 |
| Figure 3.3 : Influence du laitier sur la perméabilité au gaz des Bétons à Hautes Performances | 64 |
| Figure 3.4 : Influence du pourcentage de laitier sur la perméabilité, sur la fixation et sur le coefficient de diffusion des chlorures | 66 |
| Figure 3.5 : Taux de chlorures liés par liaison chimique et physique dans le ciment hydraté | 67 |
| Figure 3.6 : Effet du laitier sur l'expansion des ciments dans une solution de 5 % de sulfates de sodium (pH 12) | 70 |
| Figure 3.7 : Effet du laitier et de la cure humide sur la carbonatation du béton | 72 |
| Figure. 4.1 : Finesse du laitier en fonction du temps de broyage. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.2 : Courbes granulométriques du laitier et du ciment B (CEM I 52,5) | 76 |
| Figure 4.3 : Sables utilisé pour la confection des bétons étudiés | 78 |
| Figure 4.4 : Mouillabilité des liquides selon l'angle de contact | 83 |
| Figure 4.5 : Porosimètre à mercure. | 86 |
| Figure 4.6 : Schéma (a) et vue d'ensemble (b) du dispositif d'essai de l'absorption d'eau par capillarité | 86 |
| Figure 4.7 : Cellule de diffusion en régime stationnaire | 88 |
| Figure 4.8 : Prélèvement de l'échantillon pour l'essai de diffusion en régime stationnaire | 88 |
| Figure 4.9 : Evolution de la concentration en chlorures C1 dans la cellule aval en fonction du temps t | 90 |
| Figure 4.10 : Schéma du dispositif de l'essai de conduction | 91 |
| Figure 4.11 : Mesure de l'expansion (éprouvettes 25x25x285 mm) | 93 |
| Figure 4.12 : Mesure d'expansion (éprouvette 20x20x160mm) | 94 |
| Figure 4.13 : Schéma du perméamètre de type CEMBUREAU | 96 |
| Figure 4.14 : Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression | 96 |
| Figure 5.1 : Evolution de la résistance en compression des ciments au laitier en fonction de l'âge (cure humide, 20°C) | 99 |
| Figure 5.2 : Effet du laitier sur la résistance en compression des éprouvettes conservées en cure humide à 20°C | 100 |
| Figure 5.3 : Développement de la résistance des mortiers au laitier par rapport à celle du mortier à base de CEM I | 101 |
| Figure 5.4 : Evolution de la résistance en flexion des ciments au laitier en fonction de l'âge (cure humide, 20°C) | 102 |
| Figure 5.5 : Effet du laitier sur la résistance en flexion des éprouvettes conservées en cure humide à 20°C | 102 |
| Figure 5.6 : Evolution de la résistance en compression à long terme des mortiers de type A (CEM I 32,5 + laitier) en cure humide | 104 |
| Figure 5.7 : Evolution de la résistance en compression à long terme des mortiers de type B (CEM I 52,5 + laitier) en cure humide | 105 |
| Figure 5.8 : Evolution de la résistance en flexion à long terme des mortiers de type A (CEM I 32,5 + laitier) en cure humide | 106 |
| Figure 5.9 : Evolution de la résistance en flexion à long terme des mortiers de type B (CEM I 52,5 + laitier) en cure humide | 107 |
| Figure 5.10 : Effet du laitier sur la résistance en compression des éprouvettes conservées en climat extérieur | 108 |
| Figure 5.11: Développement de la résistance en compression des mortiers conservés au climat extérieur par rapport à celle des mortiers conservés en cure humide | 109 |
| Figure 5.12: Effet du laitier sur la résistance à la flexion des éprouvettes conservée en climat extérieur | 110 |
| Figure 5.13: Développement de la résistance en flexion des mortiers conservés en climat extérieur par rapport à celle des mortiers conservés en cure humide. | 110 |
| Figure 5.14 : Corrélacion entre les résistances en compression et en traction des mortiers au laitier | 112 |
| Figure 5.15 : Corrélacion entre les résistances en compression et en traction des mortiers au laitier selon le mode de cure | 112 |

| | |
|--|-----|
| Figure 6.1 : Variation de la porosité à l'eau (a) et au mercure (b) en fonction de l'âge par rapport à 28 jours pour les mortiers étudiés | 116 |
| Figure 6.2 : Courbes d'intrusion de mercure en fonction de l'âge de maturation des mortiers MB0 (a), MB30 (b) et MB50 (c) | 117 |
| Figure 6.3 : Courbes de distribution de la porosité des mortiers après 28 jours (a), 90 jours (b) et 360 jours (c) de maturation en cure humide | 118 |
| Figure 6.4 : Photographies au MEB des mortiers avec et sans laitier après 360 jours de maturation | 122 |
| Figure 6.4 : Photographies au MEB des mortiers avec et sans laitier après 360 jours de maturation | 123 |
| Figure 6.6 : Absorption d'eau par capillarité des mortiers avec et sans laitier à (a) 90 jours et (b) 360 jours | 124 |
| Figure 6.7 : Corrélation entre le coefficient d'absorption et le rayon moyen des pores | 125 |
| Figure 6.8: Taux de saturation des mortiers avec et sans laitier à (a) 90 jours et (b) 360 jours | 126 |
| Figure 6.9 Perméabilité à l'oxygène des mortiers en fonction du taux de laitier à 90 et 360 jours de maturation | 127 |
| Figure 6.11 : Evolution de la concentration en chlorures en fonction du temps des mortiers (cure humide de 90 jours) | 130 |
| Figure 6.10 : Evolution de la concentration en chlorures en fonction du temps des mortiers (cure humide de 180 jours) | 131 |
| Figure 6.11 : Conduction des chlorures a travers les mortiers avec et sans laitier après 90 et 180 jours de maturation | 132 |
| Figure 6.12 : Relation entre le coefficient de diffusion et la charge totale Q. | 132 |
| Figure 7.1 : Expansion des éprouvettes de mortier A (CEM I 32,5) dans la solution de sulfate de sodium (5% Na ₂ SO ₄) | 136 |
| Figure 7.2 : Expansion des éprouvettes de mortier A (CEM I 32,5) dans la solution de sulfate de magnésium (5% MgSO ₄) | 136 |
| Figure 7.3 : Expansion des éprouvettes de mortier B (CEM I 52,5) dans la solution de sulfate de sodium (5% Na ₂ SO ₄) | 137 |
| Figure 7.4 : Expansion des éprouvettes de mortier B (CEM I 52,5) dans la solution de sulfate de magnésium (5% MgSO ₄) | 137 |
| Figure 7.5 : Influence du taux de laitier sur la réduction de l'expansion des mortiers exposés en sulfate de sodium (a) et en sulfates de magnésium (b) | 139 |
| Figure 7.6 : Développement de la résistance en flexion en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de sodium (5% Na ₂ SO ₄) | 140 |
| Figure 7.7 : Développement de la résistance à la flexion des éprouvettes en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de magnésium (5% MgSO ₄) | 140 |
| Figure 7.8 : Résistance à la flexion relative des éprouvettes immergées dans les sulfates de sodium (5% Na ₂ SO ₄) | 142 |
| Figure 7.9 : Résistance à la flexion relative des éprouvettes immergée dans les sulfates de magnésium (5% MgSO ₄). | 142 |
| Figure 7.10 : Développement de la résistance en compression en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de sodium (5% Na ₂ SO ₄). | 143 |
| Figure 7.11 : Développement de la résistance en compression en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de magnésium (5% MgSO ₄) | 143 |
| Figure 7.12 : Résistance à la compression relative des éprouvettes immergées dans les | |

| | |
|---|-----|
| sulfates de Sodium (5% Na ₂ SO ₄) | 145 |
| Figure.7.13 : Résistance à la compression relative des éprouvettes immergées dans les sulfates de magnésium (5% MgSO ₄) | 145 |
| Figure. 7.14 : Eprouvettes de mortier A, après 7 mois (MA0 et MA20) et 6 mois (MA30, MA50 et MA60) de conservation dans les sulfates de sodium (5% de Na ₂ SO ₄) | 146 |
| Figure 7.15 : Eprouvettes de mortier MA0, MA30 et MA60, après 6 mois d'immersion dans 5% de MgSO ₄ | 146 |
| Figure 7.16 : Eprouvettes de mortier MB0, MB30 et MB0, après 9 mois d'immersion dans (a) 5% de Na ₂ SO ₄ et (b) 5% de MgSO ₄ | 147 |
| Figure 7.17: Expansion des mortiers au laitier dans l'eau de mer | 148 |
| Figure 7.18 : Variation de masse des mortiers au laitier dans l'eau de mer | 148 |
| Figure 8.1: Résistance en compression des bétons "A" (E/L=0,65) à base de ciment au laitier | 152 |
| Figure 8.2 : Résistance en compression des bétons "B" (E/L=0,42) à base de ciment au laitier | 152 |
| Figure 8.3 : Influence du rapport E/L et du taux de laitier sur l'évolution de la résistance en compression des bétons | 153 |
| Figure 8.4: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons à base de ciments au laitier (E/L=0,65), après 28 jours (a) et 90 jours (b) | 154 |
| Figure 8.5: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons à base de ciments au laitier (E/L=0,42), après 28 jours (a) et 90 jours (b) | 154 |
| Figure 8.6: Relation entre la résistance en compression et le coefficient d'absorption capillaire | 155 |
| Figure 8.7: Coefficient de perméabilité à l'azote des bétons à base de ciments au laitier (E/L=0,65), après 28 jours (a) et 90 jours (b) | 157 |
| Figure 8.8: Coefficient de perméabilité à l'azote des bétons à base de ciments au laitier (E/L=0,42), après 90 jours | 157 |
| Figure 8.9: Relation entre la résistance en compression et le coefficient de perméabilité à l'azote | 158 |
| Figure 8.10: Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons avec E/L 0,65 | 159 |
| Figure 8.11: Effet du rapport E/L sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression à 90 jours de maturation | 160 |

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

| | |
|---------------------|--------------------------------------|
| A.C.I | American Concrete Institute |
| B.S | British Standard |
| C ₃ S | Silicate tricalcique (alite) |
| C ₂ S | Silicate bicalcique (belite) |
| C ₄ AF | Aluminate-ferrite tetracalcique |
| CaCO ₃ | Carbonate de calcium |
| CaSO ₄ | Gypse |
| C ₃ A | Aluminate tricalcique |
| CSH | Silicate de calcium hydraté |
| Ca(OH) ₂ | Portlandite |
| Ca | Absorption d'eau |
| C | Dosage en ciment |
| E/C | Rapport eau sur ciment |
| ft | Résistance à la traction par flexion |
| fc | Résistance à compression |
| G/S | Rapport gravier sur sable |
| L | Liant |
| P _w | Porosité à l'eau |
| P _{wv} | Porosité à l'eau sous vide |
| S | Coefficient d'absorption capillaire |

INTRODUCTION

La tendance d'utilisation des ajouts cimentaires ne cesse d'accroître, car c'est une façon efficace pour l'industrie du ciment de diminuer ses émissions de CO₂, qui représentent 5% du total des émissions anthropiques dans le monde [1]. En outre, elle contribue à la valorisation des sous-produits et ainsi, à augmenter la production du ciment tout en préservant l'environnement.

Le laitier de haut fourneau granulé, sous-produit issu de l'industrie de la fonte, est parmi les ajouts les plus utilisés dans le monde. Il peut avoir une composition chimique et structurelle très variable selon les minerais, les combustibles et le procédé de fabrication de la fonte. Lorsqu'il est broyé et mélangé au ciment Portland, il se dissout en présence de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) issu de l'hydratation du clinker, et s'hydrate pour former dans la matrice cimentaire du gel de silicates et d'aluminates de calcium hydratés (*CSH et CAH*) additionnel [2, 3]. La matrice cimentaire résultante présente une bonne résistance chimique et une structure de pore plus raffiné [4, 5]. En outre, l'utilisation du laitier dans le béton réduit la chaleur d'hydratation et améliore les propriétés mécaniques et réduit la perméabilité du béton à long terme. Cependant, la bonne hydratation du laitier dépend de sa réactivité hydraulique, qui est influencée par la finesse, la composition chimique et par le contenu en verre et sa composition [6, 7].

Le complexe sidérurgique d'El Hadjar produit annuellement plus 700 milles tonnes de laitier de haut fourneau. Le laitier produit est utilisé soit comme granulats ou comme couches de bases dans la construction routière. Le laitier granulé est utilisé par les cimenteries locales à des taux ne dépassant pas les 20%, comme ajout au ciment. Ce taux d'utilisation, justifié par une faible réactivité du laitier d'El Hadjar [8], reste néanmoins faible selon une étude récente, qui a montré, d'un point de vu résistance mécanique, la possibilité d'une utilisation plus large [9].

La résistance en compression, utilisée usuellement pour l'estimation de la qualité du béton, a toujours été un paramètre de premier ordre dans le calcul des structures en béton. Toutefois, la durabilité du béton constitue une considération majeure dans la conception des structures. La durabilité du béton est directement affectée par ses performances dans des milieux agressifs ou, indirectement, par la forme et le volume de sa structure poreuse et, par conséquent, sa perméabilité. La perméabilité du béton est considérée comme un

indicateur essentiel de durabilité. En effet, elle gouverne les propriétés de transport des phases liquides, gazeuses et ioniques dans le béton, et par conséquent, influence des paramètres importants de durabilité, tel que : la carbonatation, la résistance aux milieux agressifs et le gel dégel.

Jusqu'à présent, peu d'investigations ont été réalisées pour évaluer l'effet du laitier d'El Hadjar sur la durabilité des bétons, particulièrement, dans des conditions environnementales sévères. D'autant plus que des détériorations du béton sont fréquemment observées dans les structures exposées à des eaux souterraines ou des sols contenant de fortes concentrations en sulfates, notamment, dans le sud et le l'ouest de l'Algérie.

Le présent travail a pour objectif d'analyser l'effet du laitier d'El Hadjar, en tant que substituant au ciment, sur la durabilité des mortiers et bétons d'une manière directe, en quantifiant leurs comportement dans des milieux agressifs (climat chaud, sulfates et eau de mer), et indirectement, en caractérisant leurs microstructures et en évaluant leurs propriétés de transports (sorption, perméabilités et diffusion).

Pour cela nous avons réparti notre travail comme suit :

Après une introduction générale, une revue bibliographique est présentée, en trois chapitres (1, 2 et 3). Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur la fabrication du ciment ainsi que sur les ajouts cimentaire et leurs interactions avec le ciment. Le deuxième chapitre porte sur le laitier de haut fourneau, sa caractérisation, son hydratation et ses effets sur le béton à l'état frais et durci. La durabilité du béton au laitier est présentée dans le chapitre 3.

Dans le chapitre 4, nous étalons notre programme expérimental, les différents matériaux utilisés ainsi que les différentes techniques utilisées dans la présente étude.

Le chapitre 5, présente les résultats de la caractérisation mécanique des mortiers à base de ciment avec et sans laitier. L'effet du type du ciment ainsi que le mode et la durée de cure sur les résistances mécaniques y sont présentés.

La chapitre 6 analyse la microstructure des mortiers à base de ciment Portland, avec et sans laitier. La porosité et la distribution de la taille des pores sont développées par des essais de porosimétrie à l'eau et au mercure. Une analyse qualitative complémentaire au

microscope électronique est aussi proposée. La deuxième partie est consacrée à l'étude des propriétés de transport dans le mortier, à savoir: l'absorption d'eau par capillaire, la perméabilité à l'oxygène et la diffusion et la conduction des ions chlore.

Le chapitre 7 présente les résultats de la résistance des mortiers au laitier d'El Hadjar soumis à des attaques de solutions de sulfates de sodium et de magnésium ainsi que d'eau de mer.

L'étude des bétons utilisant des ciments au laitier permet de valider les résultats obtenus sur mortier et de vérifier l'influence du laitier sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton. Pour cela, le chapitre 8 analyse l'influence des ciments au laitier d'El Hadjar sur la résistance en compression et sur différentes propriétés relatives à la durabilité du béton.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale, qui rappelle les principaux résultats obtenus et propose des recommandations pour d'éventuels futurs travaux, sur cet axe de recherche.

CHAPITRE 1

CIMENTS ET AJOUTS MINERAUX

1.1 Introduction

Dans le présent chapitre, on présente une revue bibliographique sur les caractéristiques des ciments et ajouts les plus répandus. Dans un premier temps, on donne des informations générales sur les procédures de fabrication du ciment, son hydratation puis on expose les différents ajouts utilisés dans l'industrie cimentière ainsi que leurs interactions avec le ciment.

1.2 Les ciments

1.2.1 La fabrication du ciment

Le clinker Portland est un liant hydraulique composé de silicate et d'aluminate de calcium. Ces composants résultent eux même de combinaisons de différents oxydes (la chaux CaO , la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde de fer Fe_2O_3) se trouvent dans la nature sous forme de minéraux constitués principalement de calcaire et d'argile. Les matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments tels que la magnésie MgO , les sulfates, les sulfures et les alcalins K_2O et Na_2O , dont les pourcentages doivent être limités [10].

La figure 1.1 montre les différentes étapes de la fabrication du ciment. Après extraction des matières premières (calcaire et argile), un concassage est effectué, le plus souvent sur les lieux même de l'extraction, dans le but de limiter la granulométrie de la matière première à 50, voire 100 mm au maximum. Ensuite un mélange homogène d'argile et de calcaire est effectué dans des proportions toujours proches du rapport 80 % de calcaire pour 20% d'argile. La préparation du cru peut être réalisée soit par voie humide, quand les matériaux extraits ont une grande humidité, soit par voie sèche (méthode la plus utilisée en Algérie) pour réduire la consommation d'énergie (Tableau 1.1). Après homogénéisation, une cuisson à 1450°C est réalisée dans des fours rotatifs pour permettre la transformation du cru en clinker ; le clinker est ensuite refroidi à environ 100°C. Enfin, le broyage est généralement accompagné par l'ajout du gypse, ainsi que d'autres constituants (cendres volantes, calcaire, laitier, ..), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments.

Tableau 1.1 : Coût énergétique kW/t de ciment [11].

| Voies | Humide | Semi sèche | Semi –humide | Sèche |
|-----------------|------------|------------|--------------|----------|
| kcal/kg clinker | 1100/ 1800 | 950 /1100 | 950 /1100 | 690 /780 |
| kWh/t ciment | 115 | 125 | 130 | 130 |

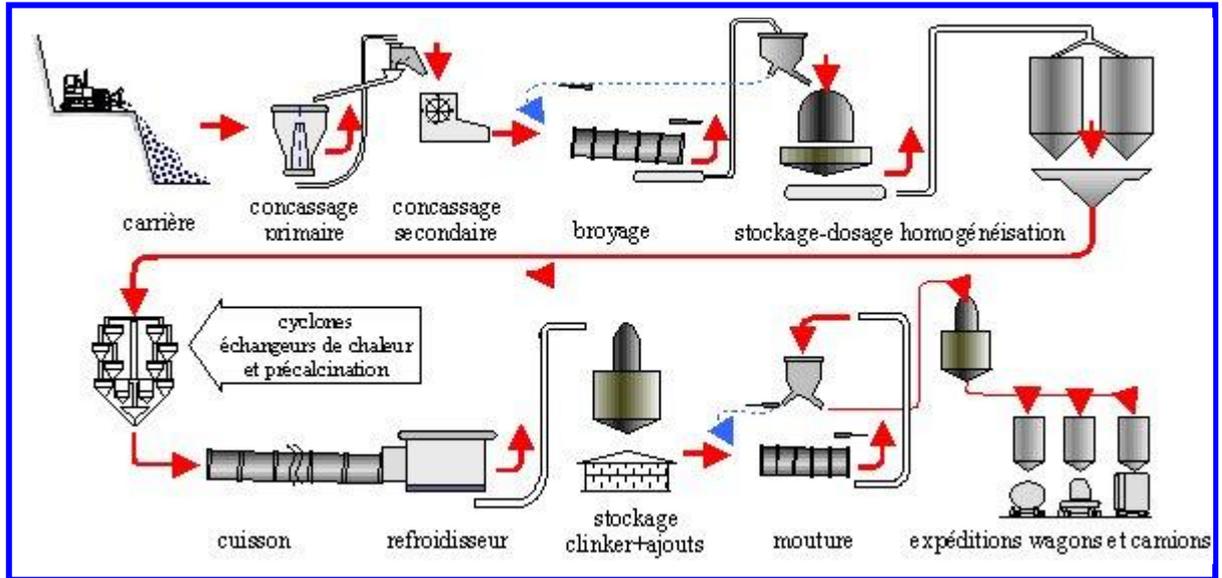


Figure 1.1 : Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche.

1.2.2 Production et coût de la fabrication du ciment

L'industrie cimentière en Algérie est représentée dans le secteur public par quatre (04) filiales comportant douze usines dont la capacité est d'environ 13 millions de tonnes/an et de deux (02) cimenteries dans le secteur privé d'une capacité de 4 millions de tonnes/an. La production nationale du ciment s'est élevée à environ 17 millions.

MENER [13] estime le coût de la fabrication d'une tonne de ciment par rapport au coût total comme suit :

Matière première : 23 %, Energie thermique : 18 %, Energie électrique : 12%, Main d'œuvre : 7 % ; Maintenance : 5 % ; Intérêts : 18 % ; Amortissement : 14 %.

L'énergie semble avoir une part importante sur le coût de production du ciment (environ 30%). L'étape de clinkérisation consomme le plus d'énergie (environ 80 %) [13]. Pour réduire le coût d'énergie et, par conséquent, augmenter la production du ciment, la

substitution partielle du clinker par des ajouts tel que, le tuf, le calcaire, les cendres, le laitier... semble être une solution adéquate [14].

1.2.3 Les différents types de ciments

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages, qu'il s'agisse de résister à une attaque physique ou chimique spécifique, de présenter des caractéristiques mécaniques compatibles avec les contraintes appliquées ou encore pour tenir compte d'une mise en œuvre particulière. Le tableau 1.2 présente les différents types de ciments courants normalisés avec leurs compositions. Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 28 jours.

Tableau 1.2 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NFP 15-301 [15]

| <i>Désignation</i> | <i>Types de ciment</i> | <i>Teneur en clinker</i> | <i>Teneur en % de l'un des constituants suivant : laitier- pouzzolane – cendre – calcaires – schistes – fumée de silice</i> | <i>Matière secondaire</i> |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------|--|---------------------------|
| CPA - CEM I | Ciment portland | 95 à 100 % | | 0 à 5% |
| CPJ –CEM II /A | Ciment portland composé | 80 à94 % | - de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans le cas de fumée de silice auquel la proportion est limitée à 10 % (*) | 0 à 5 % |
| CPJ –CEM II /B | | 65 à 79 % | - de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*) | 0 à 5 % |
| CHF- CEM III/A | Ciment de haut fourneau | 35 à 64 % | 35 à 65 % de laitier de haut fourneau | 0 à 5 % |
| CHF- CEM III/B | | 20 à 34 % | 66 à 80 % de laitier de haut fourneau | 0 à 5 % |
| CLK- CEM III/C | | 5 à 19 % | 81 à 95 % de laitier de haut fourneau | 0 à 5 % |
| CPZ –CEM IV/A | Ciment pouzzolanique | 65 à 90 % | 10 à 35 % de pouzzolane, cendre siliceuse ou fumée de silice. Ces derniers étant limités à 10 % | 0 à 5 % |
| CPZ –CEM IV/B | | 45 à 64 % | 36 à 55 % comme ci-dessus | 0 à 5 % |
| CLC-CEM V/ A | Ciment au laitier et au cendre | 40 à 64 % | 18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30 % de cendre siliceuse ou de pouzzolane | 0 à 5 % |
| CLC-CEM V/ B | | 20 à39 % | 31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus | 0 à 5 % |

1.2.4 Composition chimique et minéralogique du ciment

Lors de la cuisson du cru, les constituants principaux (chaux, silice, alumine et oxyde de fer) de la matière première réagissent les uns avec les autres pour former des produits complexes en atteignant un état d'équilibre chimique. Après refroidissement, le ciment est supposé conserver cet équilibre [6] et sa composition minéralogique potentielle est calculée à partir des quantités des oxydes du clinker dont la teneur moyenne est énumérée dans le tableau 1.3. Le tableau 1.4, présente les quatre (04) composés minéralogiques principaux du ciment.

Tableau 1.3 : Teneur moyenne des oxydes constitutifs du clinker [16]

| Oxydes constitutifs | Teneur limites (%) | Valeur moyenne (%) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| CaO | 60 à 69 | 65 |
| SiO ₂ | 18 à 24 | 21 |
| Al ₂ O ₃ | 4 à 8 | 6 |
| Fe ₂ O ₃ | 1 à 8 | 3 |
| MgO | 0 à 5 | 2 |
| Alcali | 0 à 2 | 1 |
| SO ₃ | 0 à 3 | 1 |

Tableau 1.4 : Composition minéralogique du ciment.

| Composés | Composition | Appellation abrégée |
|------------------------------|--|---------------------|
| Silicate tricalcique | 3 CaO.SiO ₂ | C ₂ S |
| Silicate bicalcique | 2 CaO.SiO ₂ | C ₃ S |
| Aluminate tricalcique | 3 CaO.Al ₂ O ₃ | C ₃ A |
| Aluminoferrite tétracalcique | 4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ | C ₄ AF |

1.2.5 Hydratation du ciment Portland

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment. C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles, qui durcissent avec le temps [17]. Ces réactions commencent dès la mise en contact du ciment et de l'eau. Quelques heures après, le matériau fait prise (il passe de l'état de suspension à l'état solide). L'hydratation se poursuit très rapidement après les heures qui suivent la prise, pour

arriver au stade du durcissement. Ce phénomène se produit pendant plusieurs mois, mais de plus en plus lentement.

i) Mécanisme de l'hydratation

Les processus physico-chimiques des réactions d'hydratation du ciment sont complexes. Le mécanisme décrit par LECHATÉLIER, en 1887 et qui explique le processus d'hydratation, reste le plus pertinent et a été confirmé par les constatations expérimentales [18]. C'est un mécanisme de dissolution – précipitation, décrit comme suit:

Lorsqu'on ajoute de l'eau au ciment, les produits anhydres vont progressivement passer en solution pour donner les ions suivants [18] : Ion calcium: Ca^{2+} . Ion hydroxyle : OH^- . Ion silicates : $\text{SiO}_4\text{H}_2^{2-}$, SiO_4H_3^- , $\text{SiO}_7\text{H}_4^{2-}$. Ion aluminates : $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, AlO_2^- . Ion sulfate : SO_4^- . Ces derniers vont sursaturer la solution et déclencher la précipitation d'hydrates. Ceci va réduire la concentration des espèces en solution et donc permettre à nouveau le passage en solution des constituants anhydres. Ce phénomène se poursuit ainsi, jusqu'à l'hydratation totale.

ii) Réactions de l'hydratation

ii-1) Hydratation du C_3S et C_2S

Les deux silicates s'hydratent immédiatement en présence de l'eau de gâchage selon les réactions chimiques suivantes ;

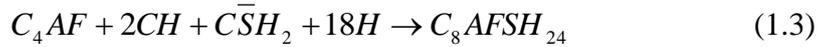


Les hydrates ainsi obtenus sont :

- Les silicates de calciums hydratés (C-S-H) ; il s'agit d'un gel qui influence la plupart des propriétés de la pâte.
- La chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH ou portlandite) ; dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5. Elle participe peu au développement de la résistance du béton [17].

ii- 2) Hydratation des C₃A et C₄AF

Une partie des *CH* obtenus dans les équations (1.1) et (1.2) réagit ensuite, avec les deux autres minéraux restants, selon les réactions d'hydratation suivantes ;



Où le $\bar{C}SH_2$ est le gypse (CaSO₄.2H₂O).

Ces réactions donnent un nouveau hydrate, le tri sulfoaluminate, appelé sel de CANDLOT ou plus souvent « ettringite » (C_nASH_{3n}). Il se dépose à la surface des grains de C₃A formant une couche protectrice. Ce composé apparaît généralement sous forme de fines aiguilles enchevêtrées ou d'oursins très caractéristiques. Après la consommation totale du gypse, les deux équations (1.3) et (1.4) deviennent :



1.2.6 Structure interne des hydrates du ciment

Bien que la structure de la matrice cimentaire soit macroscopiquement uniforme, la composition chimique et la morphologie des phases solides très diverses est sensible aux conditions d'hydratation et de conservation (température et humidité).

i) Les silicates de calcium hydratés CSH

La phase des *CSH* est formée de plusieurs variétés de silicates de calcium hydratés. La composition chimique et la structure cristalline des *CSH* sont mal définies. Du fait de leurs germination rapide lors de l'hydratation du C₃S du ciment, les *CSH* sont mal cristallisés (en état pratiquement amorphe) [18, 19]. Cette phase est souvent appelée 'gel' de *CSH*, le terme "gel" indiquant le faible degré de cristallisation.

Le *CSH* occupe entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. D'un point de vue morphologique, il serait formé de particules fines (100 à 200

Å de diamètre) de grande surface spécifique interne. Une particule serait une cristallite formée de lamelles étant elle-même composée de 2 à 3 feuillets très minces (Figure 1.2). Dans le modèle de KANTRO et al [18], chacun des feuillets de la lamelle de *CSH* se compose d'une couche d'octaèdres de chaux prise en sandwich entre deux couches de tétraèdres de silice. Les feuillets minces de *CSH* s'enroulent sur eux même et forment des tubes creux. Cette cristallisation aciculaire recouvre progressivement les grains de ciment anhydre en leur donnant un aspect dit de "hérisson" (Figure 1.3).

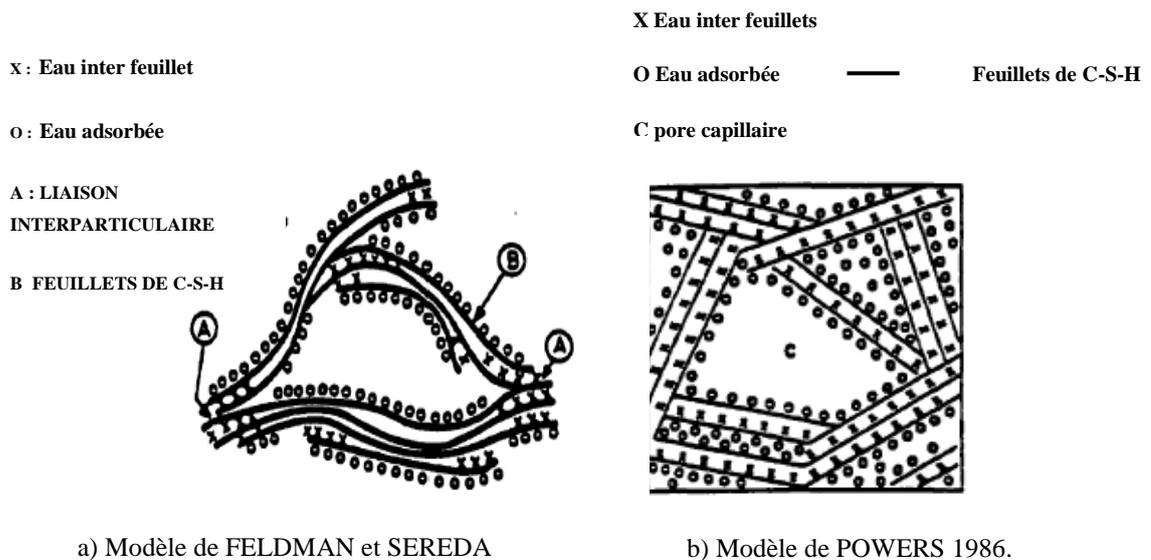


Figure 1.2 Modèles de C-S-H [18]

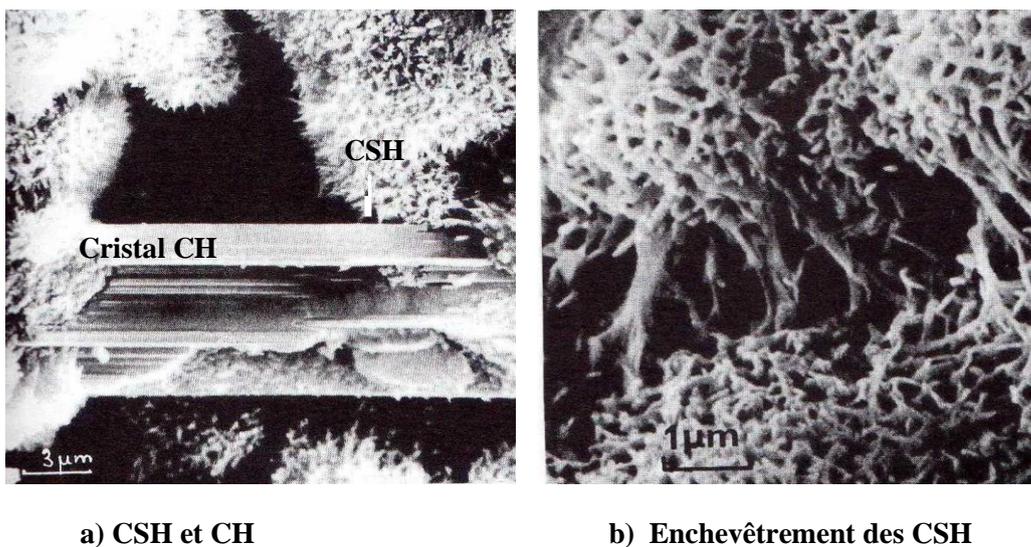


Figure 1.3 : Hydratation des C_3S produisant du gel C-S-H et des cristaux CH [20]

ii) La Portlandite

La portlandite (CaOH_2) occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. Elle cristallise en plaquettes hexagonales prismatique (Figure 1.3) empilées entre les grains de ciment partiellement hydratés [17, 20]. La portlandite peut aussi se trouver dans l'état amorphe lorsqu'elle ne trouve pas assez d'espace pour se cristalliser. En raison de la grande taille des cristaux, la portlandite a une faible surface spécifique et les forces de liaisons entre ces cristaux sont faibles [18].

1.3 Les ajouts cimentaires

1.3.1 Introduction

Parmi tous les composants du béton, le ciment est celui qui a l'impact environnemental le plus important [21]. Ce dernier est responsable d'environ 5% du total des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) d'origine entropique dans le monde [1]. Ce gaz carbonique représente 82% des gaz à effet de serre, qui sont impliqués dans le changement climatique actuel [22].

Pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO_2 , plusieurs solutions sont adoptées actuellement par l'industrie du ciment (Figure 1.4) : l'amélioration des performances dans le procédé de cuisson, l'utilisation des fuels de substitution ainsi que la substitution du clinker par d'autres matériaux pouzzolaniques ou inertes.

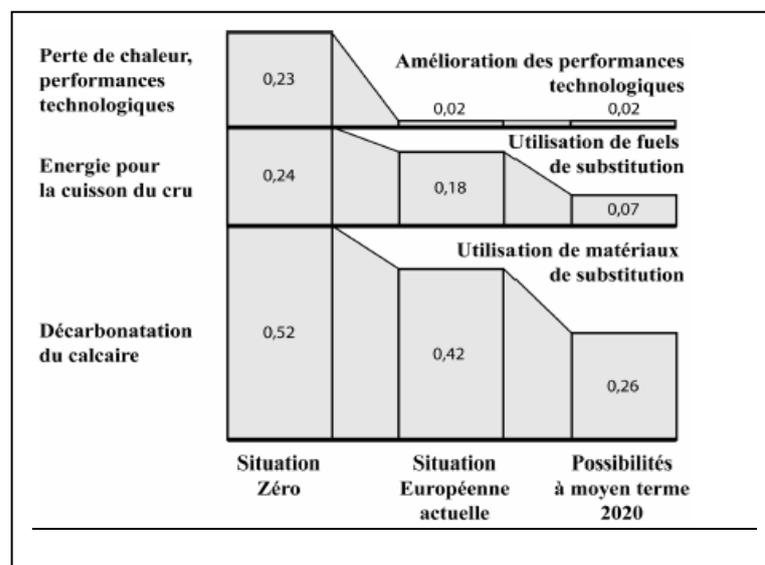


Figure 1.4: Evolution d'émission de CO_2 (par tonne de ciment produite) en fonction des solutions envisagées dans l'industrie du ciment [21].

1.3.2 Les différents types d'ajouts au ciment

Les ajouts au ciment les plus utilisés sont : la pouzzolane naturelle, les laitiers, la fumée de silice, les cendres volantes et le calcaire. Le tableau 1.4 donne une estimation de l'utilisation des différents ajouts en Europe. En Algérie, l'emploi des ajouts est dans une phase primaire, caractérisée par une faible utilisation de ces matériaux, employés principalement pour la fabrication de ciment composé (35 % d'ajout maximum). Les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes sont illustrés dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Utilisation annuelle (tonnes) des différentes additions au béton en Europe [23]

| Pays | Pouzzolane naturelle | Fumée de silice | Laitier | Calcaire | Cendres volantes |
|------------|----------------------|-----------------|---------|----------|------------------|
| Belgique | - | Occasionnelle | limité | - | 80000 |
| Danemark | - | 25000 | - | - | 100000 |
| Finlande | - | 50000 | 5000 | - | 100000 |
| France | - | 17000 | - | 450000 | 200000 |
| Allemagne | 50000 | - | - | - | 340000 |
| Italie | - | - | - | - | 1800000 |
| Pays bas | - | Occasionnelle | - | - | 100000 |
| Norvège | limité | 17000 | - | - | 35000 |
| Portugal | - | - | - | - | - |
| Espagne | - | - | - | - | 95000 |
| Suède | - | 25000 | 1000 | - | 900000 |
| Angleterre | - | 1000 | 900000 | - | 10000 |

Tableau 1.6: Ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

| Entreprise | Cimenterie | Ajouts utilisés |
|------------|------------------|-----------------------|
| ERCE | Ain Touta | Pouzzolane |
| | Ain El Kebir | Pouzzolane |
| | Hamma Bouziane | Pouzzolane |
| | Hadjar Essaoud | Laitier |
| | Tébessa | - |
| ERCC | Meftah | Tuf / calcaire |
| | Raïss Hamidou | Poussière |
| | Sour EL-Ghozlane | Tuf / calcaire |
| ECDE | Chlef | Calcaire |
| ERCO | Beni-saf | Pouzzolane |
| | Zahana | Pouzzolane |
| | Saida | Pouzzolane |
| ACC | M'sila Sig | Calcaire – pouzzolane |

i) Le calcaire.

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, provenant de gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. Selon la norme NF P18-301[15], les additions calcaires sont substituables au ciment et, lorsqu'elles sont utilisées dans une proportion excédant 5 % en masse, elles doivent avoir une teneur en $\text{CaCO}_3 \geq 75$ % en masse, une faible teneur en argile (adsorption de bleu de méthylène $\leq 1,20$ g/100g) et une teneur en matières organiques (TOC) $\leq 0,50$ % en masse.

TSIVILIS et al [24] ont constaté qu'une augmentation du contenu de calcaire, mène à une répartition granulométrique plus large du mélange clinker - calcaire broyé simultanément. Ceci s'explique par le fait que le calcaire est plus mou que le clinker. Cette répartition granulométrique plus large permet aux particules de calcaire de combler les vides entre les particules de clinker. Ceci conduit à une réduction de la demande en l'eau, améliorant ainsi l'ouvrabilité du béton. L'influence du calcaire lors de la prise des ciments n'est pas encore parfaitement éclaircie. La théorie initiale prétend qu'il se comporte comme un filler inerte et que son influence est de ce fait purement physique. Cependant, récemment, des réactions chimiques entre le calcaire (carbonate de calcium) et le C_3A du clinker donnant naissance à du monocarboaluminate de calcium ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) ont été mises en évidence [25]. Ce dernier peut agir d'une manière semblable que le sulfoaluminate sur la régularisation du temps de prise. De ce fait, le calcaire tend à augmenter le temps de prise des ciments au calcaire.

La présence du calcaire comme ajout aux ciments peut modifier considérablement leurs comportements vis-à-vis des résistances mécaniques. Des études [26, 27] ont montré un développement rapide de la résistance aux jeunes âges des mortiers avec ciment au calcaire (Figure 1.5). Cette augmentation est due, selon BORGHOLM [27], à l'hydratation accélérée de l'alite (C_3S) du ciment en présence du calcaire. Par ailleurs, les mêmes études rapportent des diminutions de la résistance à 28 jours. MENADI et al [28] ont montré que l'incorporation de 15% de fine calcaire au béton conduit à une diminution de la résistance, indépendamment du type du ciment. La perte de résistance peut toutefois être compensée par une augmentation de résistance résultant d'une répartition granulométrique plus large du mélange. Ceci peut être le résultat d'un broyage simultané du clinker et du calcaire, ou d'un broyage global plus fin du ciment.

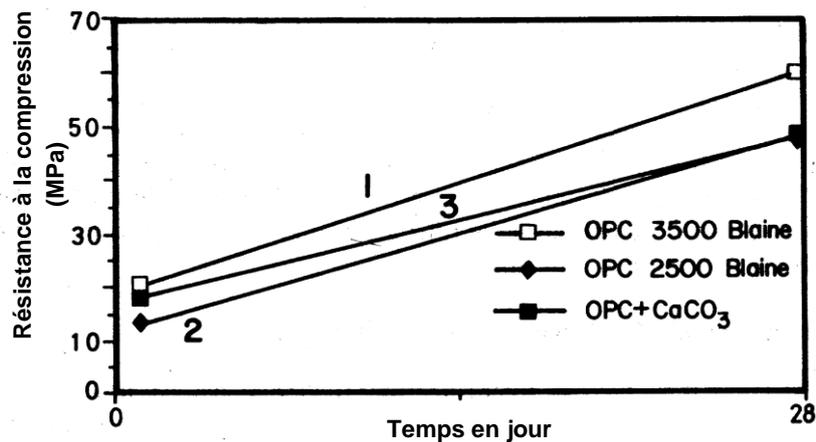


Figure 1.5 : Principe du comportement de l'ajout calcaire [25].

La perméabilité des bétons avec ciment au calcaire semble être comparable à celle des bétons fabriqués avec le ciment Portland [29]. KENAI et al [30] ont même montré une diminution de la profondeur de pénétration d'eau sous pression quand le ciment est remplacé par 15% de calcaire. TSIVILIS et al [31] ont constaté aussi une amélioration de la perméabilité à l'eau en présence du calcaire. Cependant, un effet négatif sur l'absorption capillaire et la porosité a été observé pour les bétons avec un pourcentage d'ajout excédant les 15%. La présence des fillers calcaires dans le béton n'a que très peu d'influence sur le coefficient de diffusion des ions chlorures [25]. Selon plusieurs chercheurs [32, 33], la présence du calcaire améliore la résistance aux sulfates des bétons. Néanmoins, ceci dépend de la quantité de calcaire ajoutée. GONZALEZ [33] a montré que 10% de calcaire conduit à une amélioration de la performance des ciments à l'attaque des sulfates, tandis que 20% d'ajout calcaire cause des effets néfastes sur la résistance aux sulfates. Ce comportement peut être expliqué par les changements du degré d'hydratation, de la porosité capillaire et du type de produits d'hydratation formés en présence du calcaire.

ii) La pouzzolane naturelle

Un matériau naturel ou artificiel, riche en silice et en alumine, est considéré comme pouzzolane s'il réagit avec la chaux en présence d'eau pour donner des composés semblables aux *CSH*.

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement

composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer [10]. Actuellement, en Algérie, le gisement de BOUHAMIDI, situé à 2.5 km de Beni-Saf, demeure l'unique gisement exploité. La production est estimée de 1000 à 1400 tonne/jour. La quasi-totalité de cette production est destinée aux cimenteries de l'Est et de l'ouest du pays. La pouzzolane naturelle, étant un ajout pouzzolanique, produit en présence de clinker et de gypse, des réactions chimiques qui commencent dès l'addition de l'eau. La solution, en premier temps, est hautement saturée en Ca^{+2} et OH^- et très riche en SO_4^{-2} , selon le type du ciment. Les premiers produits qui se forment sont l'ettringite et la portlandite. Suite à cela, la réaction pouzzolanique peut commencer avec la formation de fines particules de CSH. Cette réaction est lente par rapport aux réactions d'hydratation du ciment Portland, ce qui influence les caractéristiques mécaniques. En effet, GHRICI et al [34] ont trouvé que la substitution de 30 à 40% de pouzzolane naturelle avait conduit à une diminution importante de la résistance aux jeunes âges. Cependant, à 28 et 90 jours, les résistances étaient comparables à celles du ciment sans ajout.

La pouzzolane naturelle peut présenter des avantages très intéressants tant à l'état frais qu'à l'état durci du béton, ainsi qu'une amélioration de la durabilité. En effet, la réaction pouzzolanique conduit à une réduction de la teneur en chaux libre dans la pâte de ciment et donc réduit le risque d'attaque des sulfates [35]. La figure 1.6 illustre bien la diminution de l'expansion des mortiers contenant 10%, 30% et 40% de pouzzolane naturelle et conservés dans solution contenant 1% de Mg SO_4 pendant 5 ans. Cette amélioration a aussi été constatée par GHRICI et al [34] dans le cas des sulfates de sodium (5% Na_2SO_4), où de 30% de pouzzolane naturelle a conduit à une diminution de l'expansion de 53% après 32 semaines d'immersion.

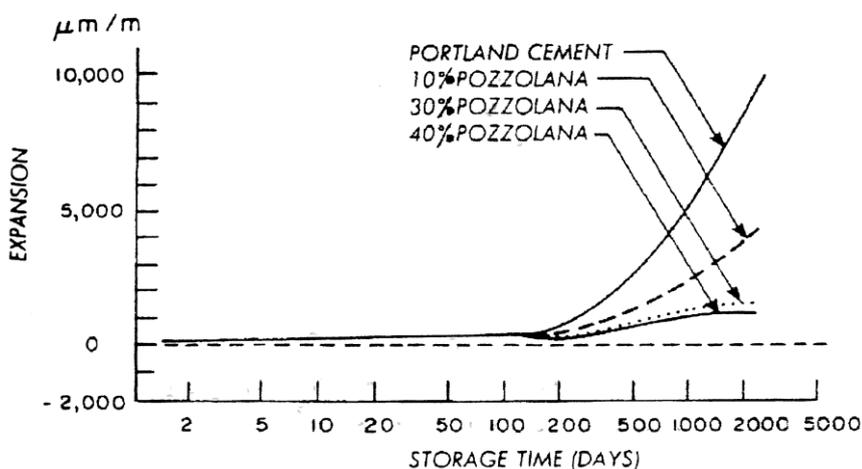


Figure. 1.6 : Effet de la pouzzolane sur l'expansion des mortiers immergés dans une solution à 1% de sulfate de magnésium [35].

iii) Les cendres volantes

Selon la norme NF P15-301 [15], les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres volantes peuvent être de nature silico-alumineuse ou sulfo-calcique. La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la silice réactive SiO_2 (supérieur à 25%) et de l'alumine Al_2O_3 . Le restant contient de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et d'autres oxydes. La proportion de chaux réactive CaO doit être inférieure à 5 % en masse. Par contre, la cendre volante calcique (W) a des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la chaux réactive CaO (supérieur à 5%), de la silice réactive SiO_2 et de l'alumine Al_2O_3 . Le restant contient de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et d'autres oxydes. La perte au feu des cendres volantes sèches doit, dans tous les cas, être inférieure ou égale à 7 % en masse.

1.4 Conclusion

L'incorporation des ajouts minéraux dans la fabrication du ciment réduit la consommation de l'énergie de clinkérisation est par conséquent le coût de la fabrication. L'utilisation des ajouts cimentaires entraîne aussi une réduction d'émission de CO_2 dans l'air. Mis à part des avantages économiques et écologiques, les ajouts minéraux, mélangés aux ciments, offrent un intérêt technique considérable en améliorant la performance du ciment et en particulier sa durabilité.

CHAPITRE 2

LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

2.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons une étude bibliographique sur les caractéristiques du laitier de haut fourneau, ainsi que la performance des ciments et bétons à base de ciment au laitier, à l'état frais et à l'état durci. Enfin, une synthèse des travaux de recherche réalisés sur le laitier algérien (d'El Hadjar) sera présentée.

2.2 Fabrication du laitier de haut fourneau

En industrie sidérurgique, dans le procédé de réduction et de fusion du minerai de fer dans le haut fourneau, la fonte rassemble, entre autres, tous les éléments qui sont réduits au cours de l'opération (fer, manganèse, silicium,...). Les oxydes non réduits, quelle que soit leur provenance (gangue du minerai, addition, cendre de coke,...), se retrouvent dans un produit complexe, le *laitier*. De densité proche de 2.8, le laitier surnage au dessus de la fonte qui est plus lourde (densité 7) à une température de 1425 à 1550°C. Le laitier est évacué du haut fourneau sous forme liquide puis refroidi. Le mode de refroidissement du laitier va déterminer les caractéristiques des différents produits obtenus.

2.1.1 Différents types de laitier

i) Laitier rocheux (ou cristallisé)

Le laitier rocheux est obtenu par refroidissement très lent du laitier liquide dans des fosses qui peuvent être situées tout prêt ou à une certaine distance du haut fourneau. Dans ce cas le laitier est transporté dans des cuves placées dans des chariots circulants sur une voie ferrée. Au cours du refroidissement, les oxydes constituant le laitier peuvent s'unir en plus d'une quinzaine de composés, tel que la gehlénite ($2 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ou l'akermanite ($2 \text{ CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$). Après le début de solidification, le laitier est arrosé afin d'en abaisser la température et de le fragmenter. Le matériau obtenu est un laitier cristallisé, de granulométrie de 0 -300 mm, de masse volumique apparente de 1,2 à 1,4 t/m³, de bonne dureté (coefficient Los Angeles de 20 à 24) et résistant à l'abrasion (coefficient micro-Deval de 8 à 14) [36]. Le laitier cristallisé comporte une certaine porosité (3 à 20%), due à l'oxydation du soufre. Cette porosité a une influence directe sur la masse volumique absolue et la conductivité thermique du matériau (de 0,5 à 0,8 W. m⁻¹.

K^{-1}) qui est sensiblement inférieure à celle des matériaux naturels tel que le calcaire et le granite. De par ses caractéristiques, le laitier cristallisé a plusieurs domaines d'utilisations à savoir :

- les travaux routiers ; en tout-venant, il peut être employé comme remblai ; concassé et classé, il est utilisé comme grave (0-20mm); comme gravillons, recouvert par un liant hydrocarbure (l'enrobé), il permet d'établir les couches de roulement des routes.
- en travaux de génie civil : après concassage, il peut être utilisé comme granulats pour béton ou bien dans la fabrication de parpaings. Dans ce domaine, les granulats du laitier cristallisé qui présentent à la fois une résistance mécanique élevée et une faible conductivité thermique, offrent des avantages indéniables quant à l'isolation thermique et la protection au feu [37].
- ballast de voies ferrées ou encore dans la fabrication de vitrocéramique.

ii) Laitier expansé

C'est un laitier cristallisé dans lequel, pendant le refroidissement, on a provoqué la formation d'alvéoles. Le procédé de refroidissement comprend une injection d'eau ($1 \text{ m}^3/\text{t}$ de laitier), complétée par une injection d'air et de vapeur d'eau. Le produit obtenu est un granulat de masse volumique apparente de 0,3 à $1,1 \text{ t/m}^3$, de faible conductivité thermique ($0,1$ à $0,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et de faible résistance mécanique (1 à 8 MPa à la compression).

iii) Laitier granulé

Le laitier granulé est obtenu en mettant brutalement le laitier liquide au contact d'une quantité d'eau importante (environ $10 \text{ m}^3/\text{tonne}$ de laitier), de façon à le diviser en petits grains et à le refroidir très rapidement. Pour cela, il existe différents procédés :

- granulation en bassin : consiste à verser le laitier liquide dans un bassin rempli d'eau.
- granulation en rigole : se fait en laissant couler le laitier liquide dans une goulotte parcourue par un fort courant d'eau qui sert à granuler et à transporter le sable de laitier.
- granulation en pot : c'est le seul procédé utilisé dans les nouvelles installations [36]. Le laitier liquide est refroidi par des jets d'eau sous haute pression (trempe) provenant de fentes réparties dans le pot de granulation.

Le laitier est ensuite filtré afin de le séparer de l'eau qui a servi à sa granulation. Ainsi, le produit obtenu est un laitier granulé de couleur jaune/beige clair, de granulométrie 0 – 5 mm, de densité apparente variant de 0,7 à 1,4 et de densité absolue de 2,6 à 2,8. La trempe subie par le laitier ayant empêché sa cristallisation, la principale caractéristique du laitier granulé est d'être, pour 85 à 100%, sous forme vitreuse. Il s'agit d'un liquide surfondu à très forte viscosité, en état instable et susceptible de cristalliser ; la chaleur latente de cristallisation est d'environ 200 MJ/kg [36]. Cet état instable est à l'origine de l'hydraulicité du laitier granulé. Le laitier granulé broyé est utilisé principalement dans l'industrie du ciment, en substitution du clinker ou dans la fabrication du béton en tant qu'addition, en substitution partielle du ciment. Le laitier vitrifié est aussi employé dans l'industrie de verre comme source d'alumine et de silice [38], mais très peu exploité comme sable dans la construction.

iv) Laitier bouleté

Le laitier liquide est déversé dans un couloir d'alimentation incliné, arrosé par des jets d'eau (environ 1 m³/t de laitier). A ce moment, le laitier commence à se refroidir et subit un début d'expansion. La matière aboutit ensuite dans un tambour muni d'ailettes et tournant à 300 tr/min, qui disperse le laitier. La plupart des morceaux projetés à l'air libre par le tambour, pas encore solidifiés, sont expansés et prennent une forme sphérique sous l'effet de tension superficielle. Les autres fractions éclatent pour donner du laitier granulé. Le produit obtenu est un laitier bouleté d'une granulométrie de 0 – 20 mm, de masse volumique absolue de 1,4 à 1,6 t/m³, de porosité de 45 à 50% et une faible conductivité thermique (0,15 W .m⁻¹ .K⁻¹) [36].

2.2.2 Production de laitier

Pour chaque tonne de fonte, la quantité de laitier produite dépend principalement de la masse des oxydes non réductibles enfournés, donc en raison inverse de la teneur en fer du minerai de fer. Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 300-400 kg de laitier [6, 36]. Le tableau 2.1 présente la production et l'utilisation du laitier dans les pays les plus industrialisés à travers le monde.

En Algérie, la production annuelle du complexe sidérurgique d'El Hadjar est d'environ 0,6 millions de tonnes de laitier. Seule une faible quantité est utilisée dans les travaux routiers ou comme ajouts au ciment dans la cimenterie de Hadjar-Essaoud.

Tableau 2.1 production et utilisation annuelle des laitiers dans le monde [39]

| Pays | Production 10 ⁶ tonne | Utilisation 10 ⁶ tonne | Pays | Production 10 ⁶ tonne | Utilisation 10 ⁶ tonne |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Australie | 4,7 | 0,12 | Pays-Bas | 1,1 | 1,0 |
| Canada | 2,9 | 0,2 | Norvège | 0,1 | - |
| Chine | 22,0 | 16,0 | Afrique du sud | 1,5 | 0,6 |
| Japon | 24,0 | 8,2 | Suisse | 0,1 | 0,03 |
| France | 10,4 | 1,9 | Royaume Uni | 1,5 | 0,25 |
| Allemagne | 15,0 | 2,8 | Etat Unis | 13,0 | 1,0 |
| Inde | 7,8 | 2,8 | Algérie | 0,6 | 0,06 |

2.3 Caractéristiques chimiques du laitier granulé

La composition chimique du laitier dépend de la nature du minerai, du fondant de chaux utilisé pour une bonne fusibilité [19] et du coke utilisés dans de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau. Les constituants principaux du laitier de haut fourneau sont les oxydes suivants : La chaux « CaO », la silice « SiO₂ », l'alumine « Al₂O₃ », et la magnésie « MgO ». Ces mêmes oxydes constituent principalement le ciment Portland mais dans des proportions différentes. La représentation simplifiée de Keil situe la position du laitier dans le système CaO-SiO₂-Al₂O₃ (Figure 2.1). Des quantités moins importantes d'oxydes de fer (FeO), de manganèse (MnO), d'alcalis (K₂O), de soufre (SO₃) et de titan (TiO₂) peuvent être également caractéristiques de la composition du laitier. L'oxyde de fer se trouvant en petite quantité, n'a aucun effet prouvé sur l'activité hydraulique du laitier [40]. La valeur limite du titane se situe entre 1,5 à 2,5%. Un contenu plus élevé a un effet négatif sur les ciments avec un contenu élevé de laitier [40]. Le tableau 2.2 compare quelques compositions chimiques de laitier dans le monde.

Tableau 2.2 Compositions chimique de quelques laitiers dans le monde [9, 36, 41, 42].

| Pays | Composition chimique en (% en masse) | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | TiO ₂ | K ₂ O |
| France | 43,23 | 32,40 | 10,35 | 6,94 | 0,87 | 0,19 | 0,31 | 0,44 | 0,38 |
| Japon | 42,49 | 32,99 | 15,20 | 6,22 | 0,83 | 0,37 | 0,49 | 0,98 | 0,36 |
| Grande Bretagne | 40,45 | 36,11 | 10,84 | 9,46 | 1,22 | 0,36 | 0,57 | 0,70 | 0,51 |
| Algérie | 42,2 | 40,1 | 6,0 | 4,7 | 0,15 | 2,0 | 2,6 | 1,2 | 1,2 |

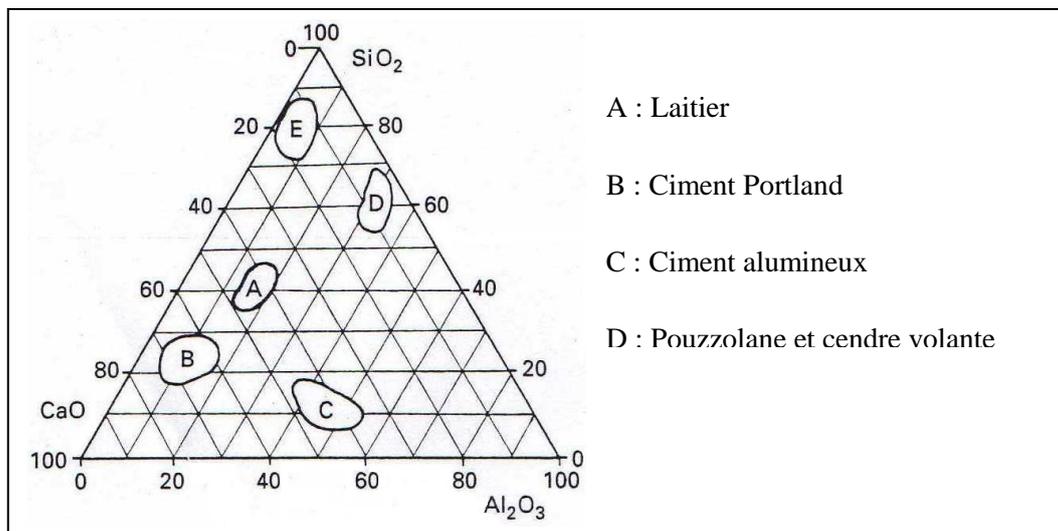


Figure 2.1 : Situation du laitier de haut fourneau dans le système CaO-SiO₂-Al₂O₃ [36]

Les normes européennes définissent des limites sur la composition chimique du laitier de haut fourneau granulé et broyé (Tableau 2.3). La norme française NF P 15-301 [43] et les normes britanniques BS 146 et BS 4246 exigent, pour la fabrication des ciments composés, que :

- le laitier granulé soit constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme des oxydes CaO, MgO et SiO₂.
- Le rapport en masse (CaO + MgO)/ (SiO₂) dépasse 1,0.

Ce rapport assure une alcalinité élevée, qui permet au laitier d'avoir une bonne hydraulicité [6]. En effet, l'activité hydraulique du laitier est liée à son alcalinité, qui est définie d'une manière générale par le rapport pondéral de la somme des oxydes basiques à la somme des oxydes acides [40]. Cependant, dans la littérature, l'indice de basicité est défini sous plusieurs formes à savoir :

$$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (2.2)$$

ou simplifié;

$$\frac{CaO}{SiO_2} \quad (2.3)$$

Selon la valeur de l'indice de basicité, le laitier se divise en deux catégories [40] :

Basique : si le l'indice est supérieur à 1,0 ou *Acide* : si l'indice est inférieur à 1,0

Pour une bonne performance du laitier, ce rapport doit varier entre 1,3 et 1,4 [7]. S'il est inférieur à 1.1, le laitier est considéré comme acide et par conséquent de faible activité hydraulique.

Tableau 2.3. Spécifications chimiques des quelques normes pour le laitier [44].

| Paramètres chimiques | | Royaume Uni | Suède | Finlande | Autriche | Allemagne | Russie |
|---|------|----------------|-------|----------|----------|-----------|--------|
| SO ₃ (%) | Max. | - | 4,0 | - | - | - | - |
| Teneur en humidité (%) | Max. | 1,0 | - | - | - | - | - |
| Mn ₂ O ₃ (%) | Max. | 2,0 | - | - | 6,7 | - | - |
| (CaO+MgO+Al ₂ O ₃)/(SiO ₂) | Max. | 1,0 | - | 1,0 | - | 1,0 | - |
| CaO (%) | Min. | - | - | - | - | - | 35-42 |
| Soufre S (%) | Max. | - | - | - | - | - | - |
| MgO (%) | Max. | 14,0 | 5,0 | 16,0 | 18,0 | - | 9-15 |
| Al ₂ O ₃ (%) | Min. | - | - | - | 6-17 | - | 6-11 |
| Chlorure Cl(%) | Max. | - | 0,1 | 0,05 | - | - | - |
| CaO+ MgO+SiO ₂ (%) | Min. | - | 70,0 | - | - | - | - |
| Chaux libre CaO (%) | Max. | - | 2,0 | - | - | - | - |
| Perte au feu (%) | Max. | 3,0 | 5,0 | - | - | - | - |
| Alcalins Na ₂ O | Max. | - | 1,5 | - | - | - | - |
| Résidu insoluble (%). | Max. | 1,5 | - | - | - | - | - |
| CaO/SiO ₂ . | Max. | 1,4 | - | - | - | - | - |

L'aluminium a une nature amphotère, c-à-d qu'il possède à la fois des propriétés acides et basiques. A cet effet l'indice de basicité peut être calculé par les équations suivantes [40] :

$$\frac{CaO + MgO + 1/3 Al_2 O_3}{SiO_2 + 2/3 Al_2 O_3} \quad (2.4)$$

Ou bien

$$\frac{CaO + MgO + Al_2 O_3}{SiO_2} \quad (2.5)$$

Le rapport présenté par l'équation 2.4 est aussi appelé indice d'hydraulicité. C'est la formule la plus utilisée aux Etats Unis, au Canada et au Japon pour évaluer la performance hydraulique du laitier [44]. On considère que la valeur minimale de cet indice doit être supérieure à 1,0 [7].

Les formules citées ci-dessus, basées sur la composition chimique, sont souvent utilisées pour prévoir l'activité hydraulique du laitier de haut fourneau. Cependant, Mantel [45] a conclu que ces formules ne prévoient pas d'une façon précise la résistance mécanique du laitier et qu'il n'y a aucune corrélation entre la composition chimique du laitier et l'activité hydraulique du ciment au laitier.

2.4 Structure vitreuse

La teneur en verre du laitier est considérée comme la variable la plus significative indiquant les propriétés hydrauliques du laitier granulé et broyé. Plusieurs facteurs influencent le degré de vitrification, dont les plus importantes sont la température du laitier fondu dans le haut fourneau et le taux d'extinction (ou de refroidissement) ; relatif à la quantité d'eau utilisée lors du processus [7].

Le verre est un réseau à trois dimensions présenté sous plusieurs formes où le silicium est le formateur principal du réseau type, entouré d'atomes d'oxygène. Les principales représentations chimiques des types de réseaux sont présentées dans la figure 2.2 [46]. Les cations tel que Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} et Mg^{2+} agissent comme formateur remplaçant du silicium et/ou comme modificateur entrant en réaction avec les ions O^{2-} du réseau cristallin. Le principal modificateur du réseau est le Ca^{+2} , tandis que l'Al et la Mg apparaissent dans les silicates au sein du laitier vitreux comme formateurs de réseau (Al^{3+} , Mg^{2+}).

La teneur en verre est déterminée par l'analyse des phases par diffraction aux rayons X, où les raies de phases cristallines se distinguent de l'anneau de diffraction créé par la phase vitreuse [18]. On utilise aussi des méthodes de comptage visuel au microscope, et pour les laitiers avec une finesse $\leq 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, on peut utiliser la fluorescence ultraviolet, où le laitier cristallisé donne une couleur noire alors que le laitier vitreux donne une couleur jaune [36].

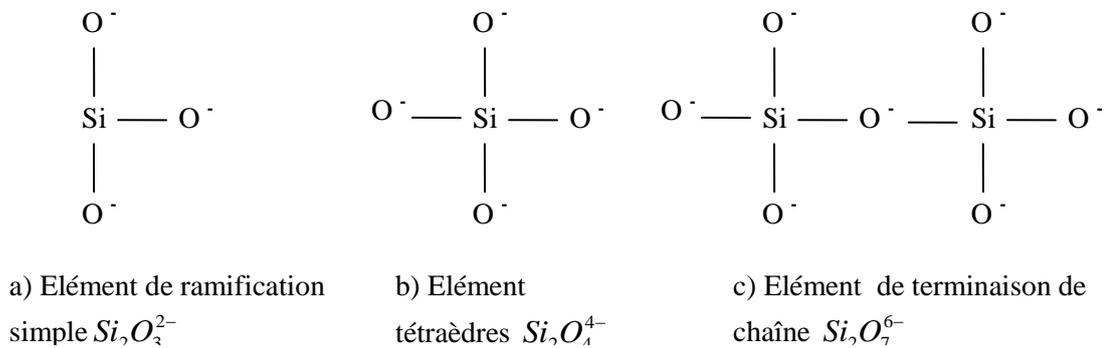


Figure 2.2 Principaux réseaux formant le verre dans le laitier [46].

Jusqu'à présent aucune corrélation précise entre le contenu en verre et l'hydraulicité du laitier n'a été mise en évidence [41]. Cependant, une structure vitreuse est essentielle à la réactivité du laitier. D'ailleurs, d'une manière générale, pour des propriétés satisfaisantes du béton, la teneur en verre du laitier granulé doit être au-dessus de 90% [7]. Selon la norme NF P 15-301, le laitier granulé de haut fourneau doit contenir au moins deux tiers, en masse, de laitier vitreux. Les normes britanniques, quant à elles, recommandent une valeur minimale de 85% du taux de verre. Néanmoins, même si un taux élevé en verre est indispensable pour bonne activité hydraulique du laitier, un faible pourcentage en matériaux cristallin dans la structure du laitier peut être bénéfique pour la réactivité. FREARSON et UREN [47] ont observé des zones hydratées plus larges autour des grains de laitier vitreux contenant, en inclusions, des cristaux de merwinite autour des grains entièrement vitreux. En effet, les cristaux du laitier peuvent agir comme germe de cristallisation lors de l'hydratation [6].

2.5 Indice d'activité du laitier

L'indice d'activité est un paramètre important, qui permet l'évaluation de la performance hydraulique du laitier, indépendamment de sa composition chimique. Il est défini selon la norme ASTM C 989-89 [48] comme étant le rapport entre la résistance à la compression d'un cube de mortier avec 50% de ciment et 50% de laitier finement broyé et la résistance en compression d'un mortier de ciment Portland seul (100%). L'indice est calculé à 7 et à 28 jours et exprimé en pourcentage.

$$I.A.L = R_c \text{ mortier (50\% laitier + 50\% ciment portland)} / (R_c \text{ Mortier de ciment portland seul}) \times 100 \quad (2.6)$$

Selon la valeur de L'I.A.L, la norme classe les laitiers de haut fourneau granulés et broyés en trois catégories : 80, 100 et 120 (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Classe de laitier selon l'indice d'activité d'après la norme ASTM C 989-89

| Classe selon l'Age | Indice d'activité minimum (en %). | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | Moyenne de cinq échantillons | Echantillon individuel |
| 7 jours | | |
| Classe 80 | – | – |
| Classe 100 | 75 | 70 |
| Classe 120 | 95 | 90 |
| 28 jours | | |
| Classe 80 | 75 | 70 |
| Classe 100 | 95 | 90 |
| Classe 120 | 115 | 110 |

Pour une utilisation efficace du laitier dans le béton, quelques normes européennes exigent une valeur minimale de l'indice d'activité de 75 % [44].

2.6 Activation du laitier

2.6.1 Activation chimique

Activer du laitier chimiquement, c'est le maintenir dans un milieu à pH suffisamment élevé (12 à 13) pour permettre la dissolution des composants du laitier qui serviront à former les produits d'hydratation [49]. Ceci est possible par addition de substances alcalines (sodique ou calcique) ou sulfatiques.

i) Activation alcaline

Dans le cas d'activation alcaline (sodique ou calcique), le pH de la solution interstitielle est ramené à une valeur supérieure à 12,6 pour permettre la dissolution des composantes du laitier.

La soude agit comme un catalyseur et ne réagit pas avec les composants du laitier. Dans ce cas, les produits formés sont des silicates de calcium hydraté (*CSH*), des aluminates de calcium hydratés (C_4AH_{13}) et de la géhlénite hydratée (C_2ASH_8) [19]. Lorsque le laitier est activé par de la chaux, le pH de la solution augmente à environ 12,6 [49], ce qui est

suffisant pour solubiliser la silice et l'alumine du laitier, favorisant ainsi la formation des *CSH*, des aluminates de calcium hydratés (C_4AH_{13}) et de la portlandite.

ii) Activation sulfatique

L'activation sulfatique n'est pas strictement catalytique. Le sulfate de calcium rentre en réaction avec les éléments solubilisés du laitier. Dans ce cas, les produits d'hydratation sont des silicates de calcium hydratés (*CSH*), de l'ettringite et de l'hydroxyde d'aluminium ($Al(OH)_3$) [19].

2.6.2 Activation mécanique

La finesse de broyage du laitier intervient dans sa réaction avec le clinker et joue un rôle très important dans l'évolution des résistances mécaniques, aussi bien à court terme qu'à long terme. En effet, une augmentation de la finesse du laitier conduit à une augmentation de l'activité du laitier, notamment au jeune âge [6, 48].

2.6.3 Activation thermique

L'énergie d'activation apparente de l'hydratation du laitier (≈ 56 kJ/mol) est plus importante que celle du ciment Portland ($\approx 40-45$ kJ/mol) [50, 51]. Ceci montre l'intérêt d'un traitement par la chaleur (activation thermique) sur l'hydratation des ciments au laitier. En effet, l'observation au microscope électronique à balayage a mis en évidence des différences significatives dans la structure hydratée des ciments peu réactifs à 20 °C, lorsque ces mêmes ciments subissent un traitement thermique à 80 °C [50].

2.7 Hydratation du ciment au laitier

La première phase dans l'hydratation des ciments au laitier consiste en l'hydratation des différents composés du clinker du ciment. Durant cette phase, coexiste une réaction immédiate du laitier de haut fourneau qui libère des ions de calcium et d'aluminium dans la solution [6]. Cette réaction conduit à la formation de produits insolubles semblable à ceux formés par l'hydratation du clinker. Cependant, en taux et en intensité, cette réaction est lente [52]. D'après la théorie de Le-Chatelier (dissolution-précipitation), ce n'est qu'au niveau de la réaction de dissolution initiale qu'il peut y avoir une différence capitale entre les composés du ciment. Les étapes ultérieures (diffusion et cristallisation) sont, par essence de même nature [20]. L'attaque hydrolytique, qui est suffisante pour libérer les ions solubles à partir du clinker, ne conduit pas au même résultat

dans le cas de produits moins basiques, comme c'est le cas pour le laitier granulé de haut fourneau: ce qui explique l'hydraulicité latente du laitier.

Pour perturber les liaisons de type Si - O - Si du verre de laitier (Figure 2.3), l'attaque hydrolytique doit être complétée par une attaque hydroxylique (c à d par les ions de OH⁻ en présence d'eau) [20, 53]. Cette attaque est assurée par l'hydrolyse de Ca(OH)₂ produite par l'hydratation du ciment, ce qui augmente très rapidement la valeur du pH de la solution.

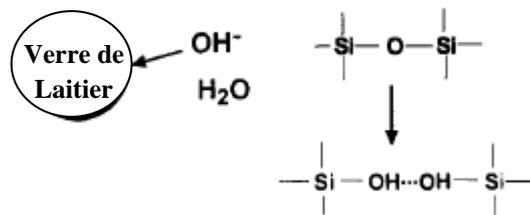
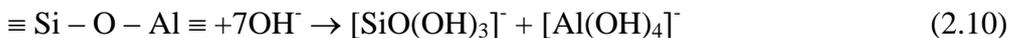
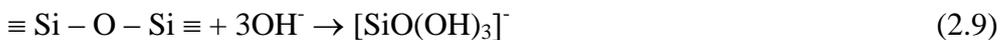


Figure 2.3 : Action hydroxylique sur les liaisons Si-O-Si sur la structure vitreuse du laitier [53].

Les différentes espèces dissoutes du verre du laitier par l'action hydroxylique se retrouvent sous forme d'ion Ca⁺², [H₂SiO₄]⁻², [H₃SiO₄]⁻ et [H₄AlO₄]⁻ [54]. Les liaisons Ca - O étant plus faibles que celles de Si - O et Al - O, la concentration en ions Ca⁺² est plus élevée dans la solution interstitielle que celle des autres espèces. Ainsi, une couche imperméable d'hydrates de CSH se forme à la surface du grain du laitier, retardant la dissolution et l'hydratation du laitier. Lorsque la concentration en OH⁻ est suffisamment élevée, la dissolution peut reprendre selon les réactions suivantes [55].



Lorsque les ions Ca⁺² (Equation 2.7) entrent en contact avec les espèces dissoutes du laitier (monosilicates et aluminates), les silicates de calcium hydraté 'CSH' et les aluminates de calcium hydratés 'CAH' se forment entre les grains de clinker et de laitier (Figure 2.4, Equations 2.11 et 2.12). En présence de sulfates, des sulfoaluminates de calcium (ettringite) se forment également [54, 55, 56].

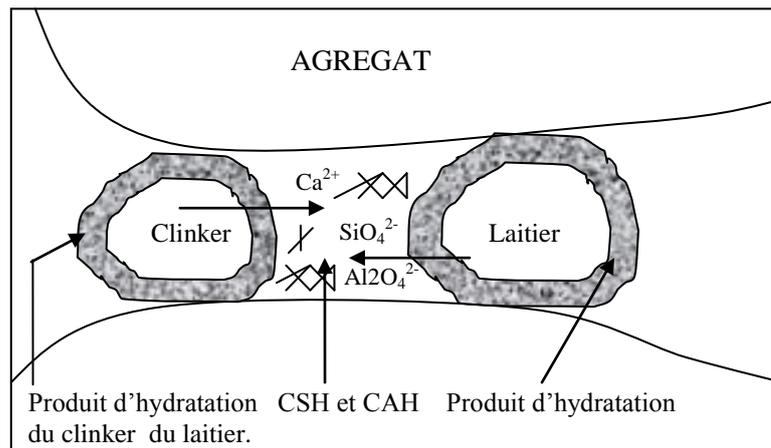
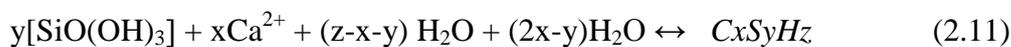


Figure 2.4 : Hydratation du laitier [57].



Le clinker agit donc d'une manière indirecte sur la dissolution du laitier par le passage de chaux en solution. Cette consommation de chaux par le laitier augmente, à son tour, la vitesse de dissolution de l'alite (C_3S) du clinker. Cet effet a été observé par ESCALANTE-GARCIA et SHARP [57], qui ont trouvé que l'hydratation initiale du C_3S du clinker est considérablement augmentée par la présence du laitier.

2.7.2 Structure de CSH dans le ciment au laitier

La concentration en chaux dans la solution interstitielle est un paramètre déterminant de la structure du CSH [18, 54]. La réaction pouzzolanique, qui fait intervenir une variation de concentration en chaux, pourrait donc modifier les caractéristiques du CSH formé. En effet, dans le cas du ciment au laitier, le rapport moyen Ca/Si des CSH dans la pâte est abaissé. Pour des taux de remplacement de 40 et 60%, les valeurs typiques du rapport Ca/Si sont de l'ordre de 1,5 à 1,6 [54]. Ce rapport est supposé être proche de 2 dans le cas de clinker Portland [6].

2.7.3 Cinétique d'hydratation du ciment au laitier

L'hydratation du ciment au laitier se déroule selon les étapes décrites succinctement ci-dessous [50, 54]. Le déroulement et le début de chaque étape varient selon la finesse du ciment, la porosité totale de la matrice cimentaire et le rapport E/C. La figure (2.5),

présente les courbes calorimétriques de l'évolution de l'hydratation de trois ciments au laitier.

- 1- l'hydratation du laitier débute avec la formation d'une très fine couche d'hydrates sur la surface des grains, durant les premières heures;
- 2- entre 12 heures et 3 jours, l'hydratation du laitier est accélérée par la consommation de chaux libérée par l'hydratation du clinker;
- 3- la réaction d'hydratation est ensuite ralentie entre 3 et 28 jours. Durant cette période, la quantité de chaux libérée par le clinker dépasse la quantité de chaux consommée par le laitier. La portlandite peut alors cristalliser;
- 4- plus tard, l'hydratation du laitier peut être accélérée par cette accumulation de chaux (jusqu'à 90 jours d'hydratation);
- 5- finalement, la réaction d'hydratation est ralentie en raison de l'accumulation des hydrates dans les pores, ainsi que l'augmentation de la couche d'hydrates enveloppant les grains de laitier.

Cette hydratation s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus faible que celui d'un ciment Portland. Les ciments au laitier, de par leurs faibles chaleurs d'hydratation, peuvent être utilisés dans le bétonnage de masse ou en climat chaud [6, 9, 48].

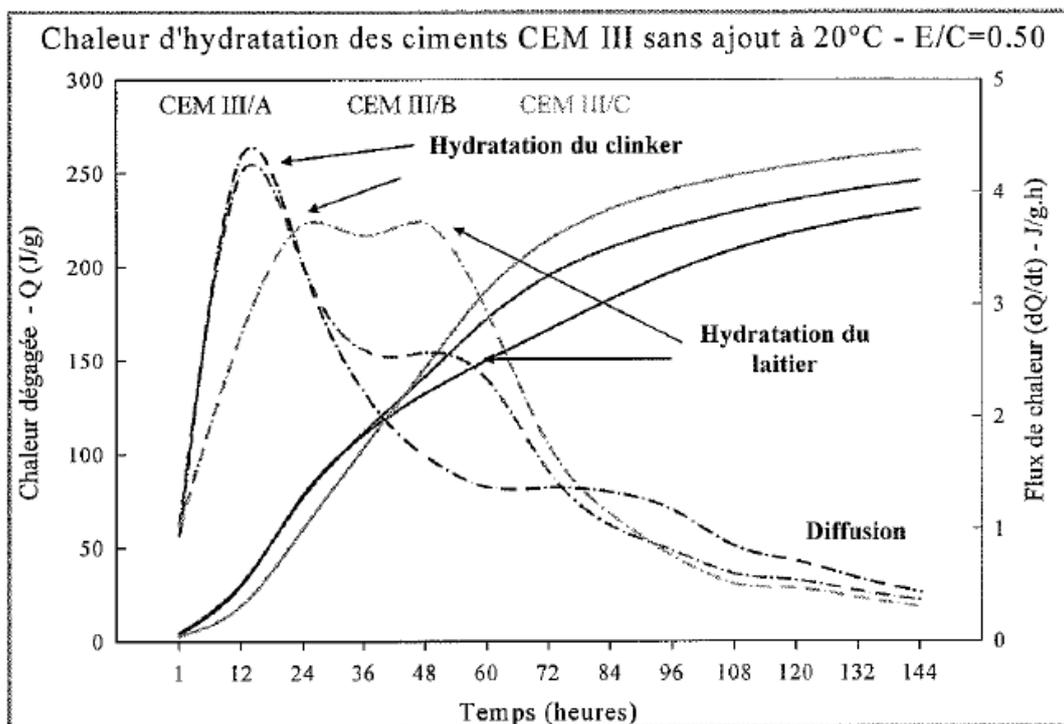


Figure 2.5: Courbe calorimétrique de l'hydratation des ciments au laitier [54]

2.8 Influence du laitier sur le comportement du béton à l'état frais

2.8.1 Ouvrabilité

La présence du laitier granulé broyé améliore l'ouvrabilité du béton à l'état frais et le rend plus plastique et de meilleure cohésion [6, 58]. D'ailleurs, dans la fabrication des bétons à haute performance, la présence du laitier, utilisé comme filler, réduit de 25% la quantité d'adjuvant réducteur d'eau utilisée [58]. La faible densité du laitier (de 2,6 à 2,8) comparée à celle du clinker Portland seul (3,15), peut être à l'origine de cette amélioration. En effet, le volume absolu du laitier sera de 20-25% plus grand que celui du ciment remplacé [58]. Ceci engendre une augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui a pour effet d'améliorer la plasticité du mélange.

Un matériau plus fin aura, théoriquement, un effet d'accroissement de la demande en eau de mouillage des particules. Cependant, la maniabilité augmente avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier granulé et broyé [59]. Cette tendance s'explique par le fait que les particules les plus fines déplacent une partie de l'eau des vides entre les particules les plus grosses, la rendant disponible comme lubrifiant interne additionnel [60]. Ainsi le béton est moins ferme et la conservation de l'eau est améliorée. Néanmoins, la distribution de dimensions des particules du laitier influence la maniabilité. Pour une même surface spécifique, plus la distribution granulaire du laitier est étroite, plus la fluidité du mortier est grande [59].

WAINWRIGHT et REY [61] ont observé que l'addition de 55% et 85% de laitier granulé et broyé conduit à une augmentation de l'ouvrabilité de 15 mm d'affaissement pour les bétons de ciment Portland à 20 à 40 mm pour les mélanges avec laitier. La même tendance a été constatée par SWAMY et BOUIKNI qui ont observé l'augmentation de l'ouvrabilité de 55 mm pour un béton ordinaire à 160 mm pour des bétons contenant 50% de laitier [62]. Toutefois, la maniabilité d'un béton contenant du laitier est plus sensible aux variations du dosage en eau que celle d'un béton confectionné par un ciment Portland seul [6].

2.8.2 Ressuage

Le ressuage est le terme employé pour décrire le mouvement ascendant de l'eau vers la surface du béton frais. Ce mouvement est dû à l'incapacité des constituants solides du béton à retenir toute l'eau de gâchage lorsqu'ils sont entraînés vers le bas [6]. Tous les bétons ressuent, mais l'eau est observée à la surface seulement quand le taux de ressuage dépasse celui de l'évaporation [61]. L'eau qui monte à la surface peut, de manière

significative, augmenter le rapport E/C du béton en surface, ce qui conduit à la formation de réseau de pores capillaires qui affectera la durabilité du béton.

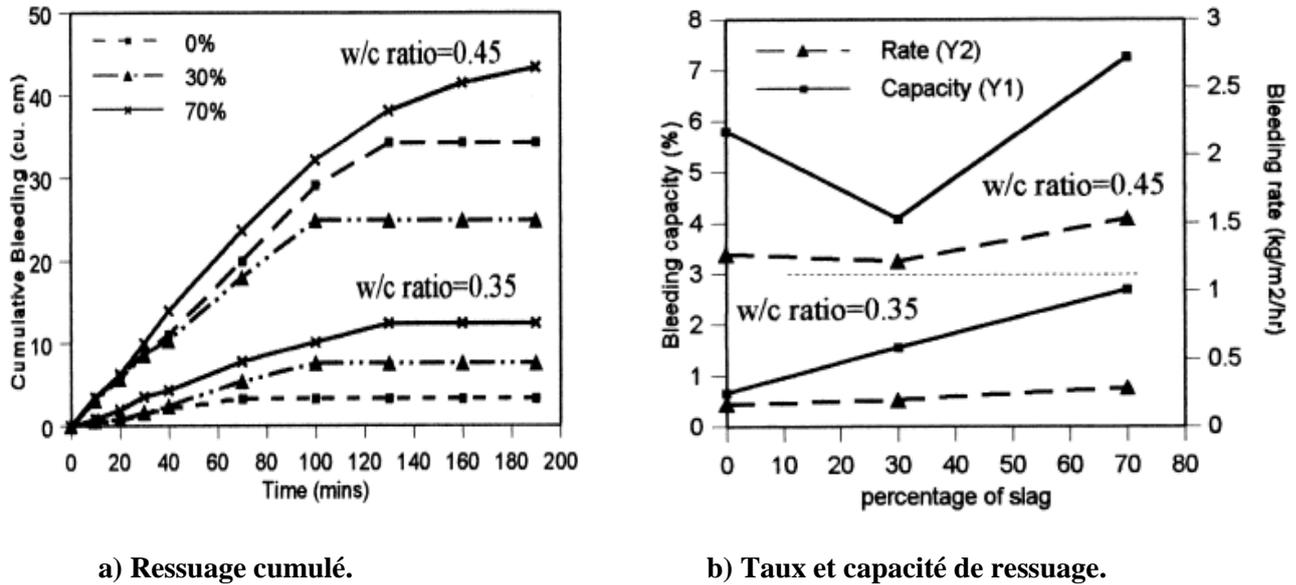


Figure 2.6 : Taux de ressuage pour différents dosages en laitier [63].

Le ressuage tend à diminuer quand le mouvement de l'eau est ralenti par la croissance des produits d'hydratation du ciment et l'adhésion de ces derniers avec les constituants solides du béton. La substitution partielle du ciment portland par du laitier conduit à un retard dans la hydratation qui rendra potentiellement le béton plus prédisposé au ressuage. La figure 2.6 montre que, pour un rapport E/C constant, l'augmentation du dosage du laitier augmente le taux et la capacité du ressuage de manière significative. Cependant, un rapport E/C plus faible diminue le taux de ressuage [63]. L'effet du laitier sur le ressuage dépend aussi de la finesse de ce dernier et, lorsque le laitier est finement broyé, le ressuage du béton peut être diminué [6, 58].

2.9 Influence du laitier sur les propriétés physiques

2.9.1 Temps de prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres parmi lesquels : le type de ciment et la finesse de mouture. Le temps de prise est d'autant plus rapide que la finesse est grande. La prise semble être contrôlée, principalement, par une hydratation sélective des composés de ciment [6]. Le C₃S et le C₃A sont les premiers à réagir. La réaction du C₃A avec l'eau est

très violente (beaucoup de chaleur) et doit être contrôlée par les sulfates de calcium (gypse $C\bar{S}H_2$ ou anhydrite: $C\bar{S}$), ce qui permet au C_3S de s'hydrater en premier. Les silicates bicalciques C_2S réagissent plus lentement et n'ont pas une influence significative sur la prise.

L'ajout de laitier au ciment conduit à un changement dans la composition minéralogique du ciment caractérisé principalement par une diminution des aluminates tricalciques ' C_3A ' et une augmentation des silicates bicalcique ' C_2S ' [64]. Au début de l'hydratation du ciment, les particules fines du laitier enveloppe uniformément la surface des particules de ciment, ce qui retarde et diminue la formation initiale des produits d'hydratation [59]. Ces deux phénomènes conduisent vraisemblablement à une hydratation plus lente du ciment, ce qui se traduit, théoriquement, par un retard dans la prise du ciment.

Effectivement, sous des températures normales, la présence du laitier dans le béton conduit à un retard de la prise, habituellement de 30 à 60 min [6, 58]. Les travaux de NIGRI et al [64] ont montré que ce retard est d'autant plus important que le pourcentage du laitier augmente (Figure 2.7). Cet effet a été constaté par BROOKS et al [65] dans les bétons à haute résistance, où 40 et 60% de laitier ont augmenté considérablement le début et le temps de prise.

Le retard de prise du ciment engendré par la présence du laitier permet de conserver l'ouvrabilité du béton pour une plus longue durée. De ce fait, il peut représenter un avantage important, en cas de travaux en climat chaud ou encore pour les bétons transportés sur de longues distances.

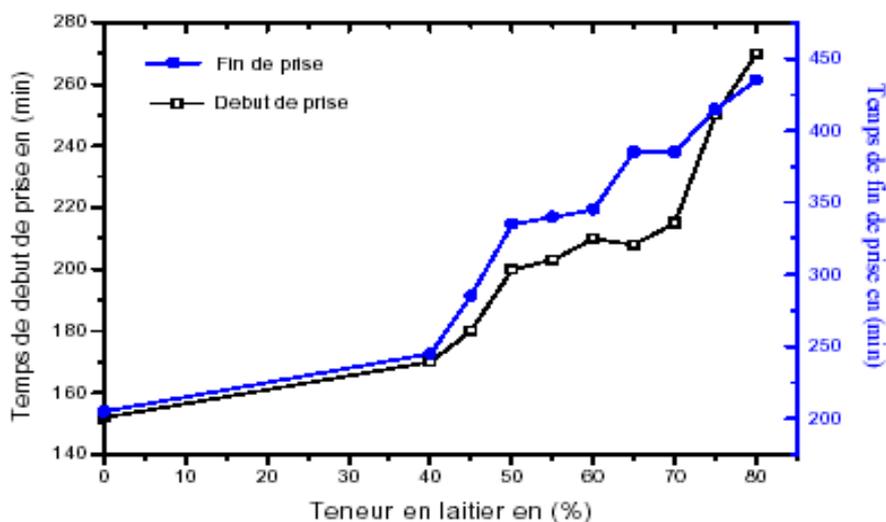


Figure 2.7 Temps de prise des ciments avec ajout laitier [64]

2.9.2 Retrait et fluage

Le retrait des bétons est augmenté dans un premier temps mais, globalement, le retrait n'est pas affecté de façon préjudiciable par l'utilisation du laitier [6]. BEHIM et al [42] ont constaté une réduction sensible du retrait due à l'incorporation du laitier, notamment à long terme (Figure 2.8). Cette variation a été observée pour les bétons à haute performance où 40 % de laitier a conduit à une diminution importante du retrait de séchage, après 180 jours [66].

Le fluage est défini comme l'augmentation de la déformation avec le temps du béton sous charge constante. L'influence du laitier sur le fluage est relative à son effet sur la résistance au moment du chargement [6]. Néanmoins, la vitesse d'hydratation et, par conséquent, du développement de la résistance, influence le développement du fluage. En effet, le faible taux d'hydratation des ciments au laitier à jeune âge peut engendrer une capacité supérieure de déformation au fluage, notamment en traction [67]. Cependant, l'hydratation lente et continue de ces ciments conduit à une réduction de la vitesse du fluage jusqu'au long terme. De ce fait, le laitier tend à diminuer le fluage propre mais augmente le fluage de séchage du fait d'une porosité plus importante [6].

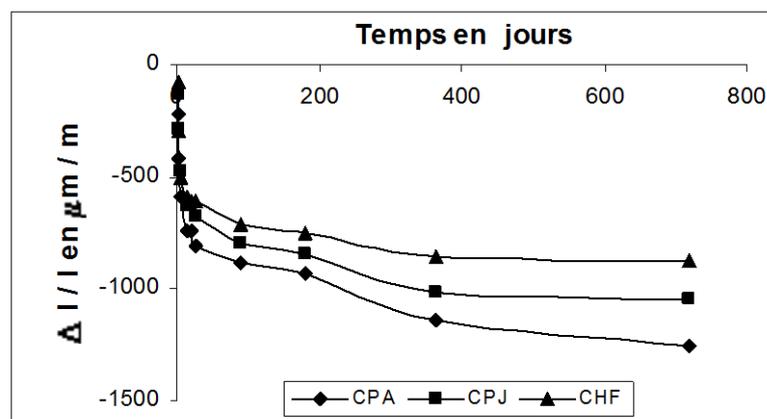


Figure 2.8 : Evolution du retrait des ciments au laitier (CPJ avec 30% de laitier et CHF avec 50% de laitier) [42].

JIANYONG et YAN [66] ont réalisé une étude sur le fluage en compression de trois bétons à haute performance (A, B et C) au laitier et fumée de silice, présentant une résistance en compression à 28 jours de 82, 100 et 104 MPa, respectivement. Comme le montre la figure 2.9, le fluage est réduit pour le béton avec 30% de laitier et encore d'avantage pour celui incorporant de la fumée de silice.

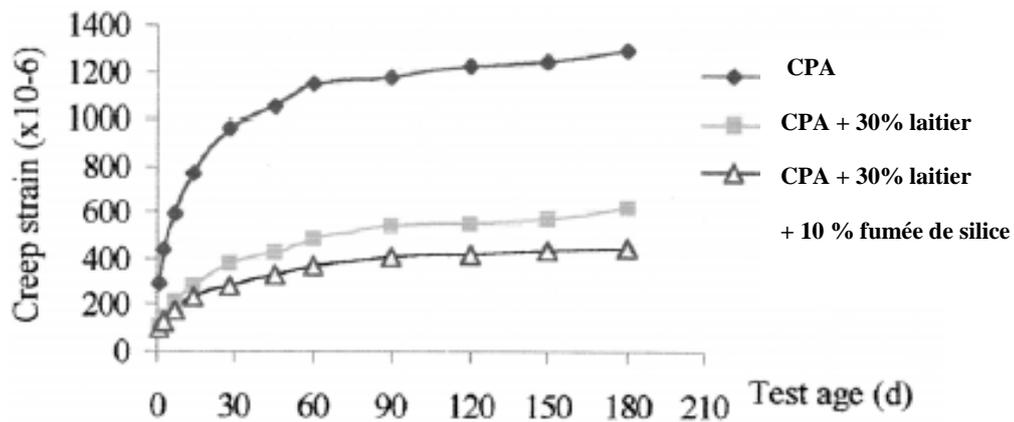


Figure 2.9: Fluage des bétons à haute performance au laitier de haut fourneau [66].

2.10 Influence du laitier sur propriétés mécaniques

2.10.1 Résistance en compression

L'hydratation initiale du laitier est très lente, car elle dépend de l'attaque du verre par les ions hydroxydes libérés durant l'hydratation du clinker Portland. LUKE et GLASSER [68] ont étudié l'évolution de l'hydratation d'un ciment Portland contenant 30% de laitier à 25°C pendant 2 ans. Après un mois d'hydratation du ciment, ils ont trouvé que seulement 40% de laitier avait réagi. ROY [69], quant à lui, a signalé que 30 à 37% des particules du laitier sont hydratées après 28 jours. De ce fait, les bétons contenant le laitier broyé comme substituant au ciment, développent, à températures ambiantes, des résistances initiales inférieures à celles des bétons à base d'un ciment Portland.

La formation de l'hydroxyde de calcium par l'hydratation du ciment Portland, avec en parallèle la dissolution du laitier, aboutit à une réaction continue du laitier sur une longue période. Ainsi, à long terme, on observe un gain de résistance des bétons au laitier (Figure 2.10).

Une plus grande finesse du laitier permet un meilleur développement de la résistance. ONER et al [70] ont étudié l'effet de la finesse du laitier et du clinker sur la résistance à la compression du ciment au laitier (Figure 2.11). On peut voir que, pour une finesse constante du clinker, la résistance augmente proportionnellement avec la finesse du laitier. Cependant, cette amélioration n'est significative qu'à long terme, car l'activation du laitier

doit d'abord avoir lieu [71]. Une plus grande finesse du clinker accélère l'activation et permet une augmentation de la résistance du mélange à jeune âge.

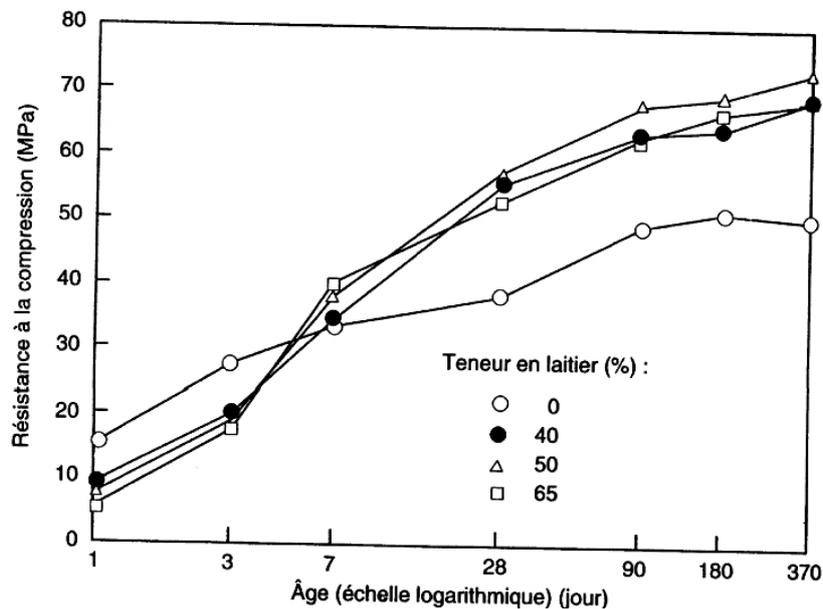


Figure 2.10 Evolution de la résistance à la compression de bétons avec différents teneurs en laitier [6].

Dans la fabrication du ciment, le mode de broyage du clinker et du laitier influence la résistance. En effet, le laitier plus dur que le clinker (Figure 2.12), donne une distribution granulaire plus étroite. En cas de broyage simultané, le laitier ayant une broyabilité inférieure à celle du clinker, s'accumule dans les fractions les plus brutes. Le clinker étant plus facile à broyer, s'accumule dans des fractions plus fines [71]. De ce fait, un ciment au laitier obtenu par un broyage simultané du clinker et du laitier présente des valeurs de résistances à jeune âge supérieures, comparées à un ciment produit par broyage séparé du clinker et du laitier à la même finesse [72]. Le tableau 2.4 montre l'évolution de la résistance à la compression de ciments composés avec 25 % de laitier broyés simultanément ou séparément [72]. Cependant, cette différence entre les résistances en compression des ciments ayant une même finesse, produits par un broyage simultané et séparé, devient négligeable dans les âges avancés [71, 72].

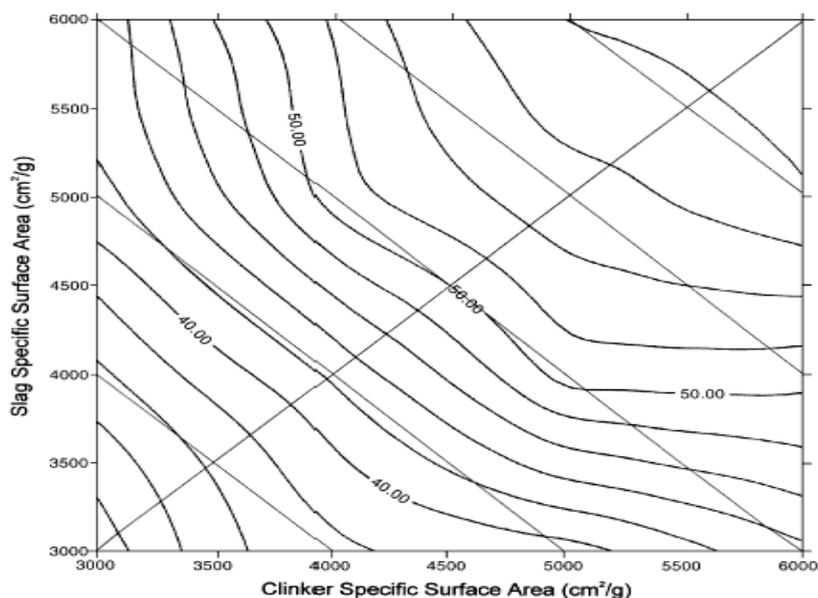


Figure 2.11: Courbe de résistance à la compression à 28 jours (MPa) de ciment avec 50% clinker - 50% laitier en fonction de la finesses des composants [70].

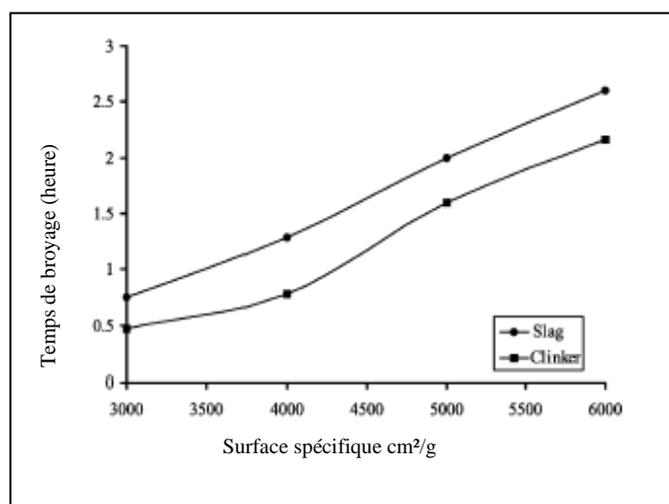


Figure 2.12 : Temps de broyage du laitier et du clinker [70].

Tableau 2.4 : Influence du mode de broyage sur la résistance en compression de ciment au laitier [72].

| Broyage | Résistance en compression (MPa) | | | | |
|-------------------|---------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| | 1 jour | 2 jours | 7 jours | 28 jours | 90 jours |
| Broyage simultané | 8.7 | 15.6 | 30.5 | 49.1 | 59.2 |
| Broyage séparé | 8.0 | 14.9 | 29.7 | 48.1 | 60.7 |

2.10.2 Résistance en traction

D'une manière générale, à moyen et long terme, la résistance en flexion des ciments au laitier est comparable sinon supérieure à celle du ciment portland seul. En effet, KHATIB et HIBBERT [73] ont étudié la résistance à la flexion des bétons contenant des ciments au laitier sans ou avec 10% de métakaolin. A 90 jours, le béton avec 60% de laitier a développé une résistance à la flexion supérieure à celle du béton témoin. Cette supériorité était plus importante pour les bétons contenant en plus 10% de métakaolin (Figure 2.13).

Ce comportement vis-à-vis de la résistance en flexion a été rapporté par UJHELYI et IBRAHIM [74] : dans leur étude sur l'effet de la cure sur la résistance en flexion, avec une température de cure de 42°C, ils ont observé que la résistance d'un béton avec 40% de laitier est supérieure à celle du béton témoin. La même tendance a été observée pour les bétons à haute performance contenant 30% de laitier, après 28 jours de conservation dans une cure humide [66].

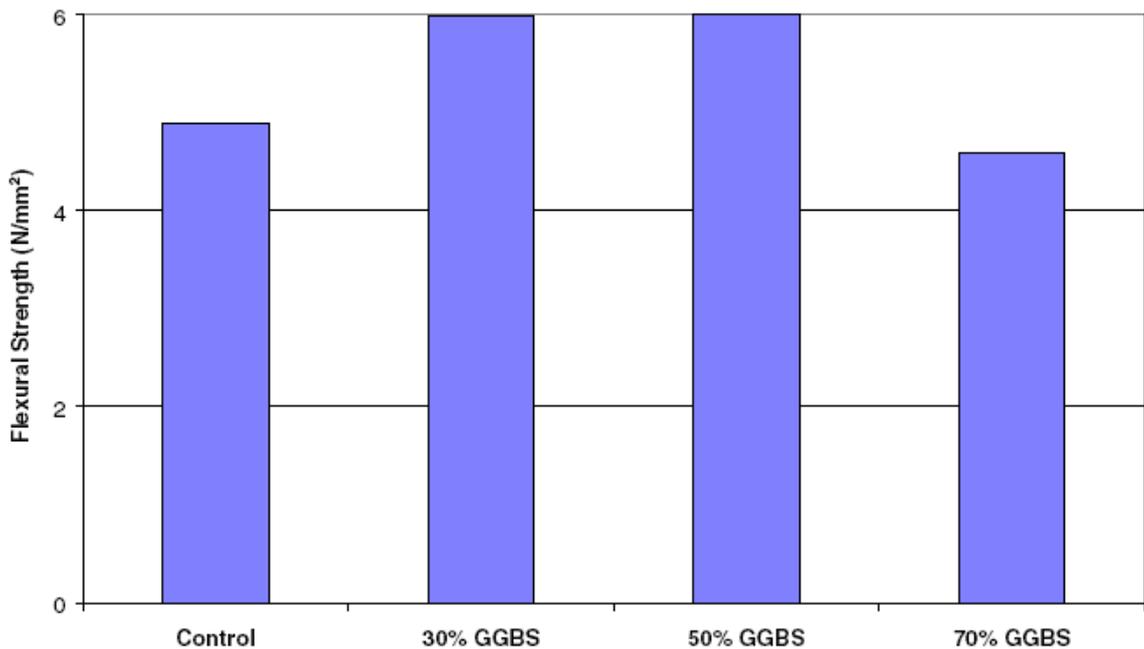


Figure 2.13: Influence du laitier sur la résistance en flexion des bétons contenant 10% de métakaolin [73].

2.11 Travaux de recherche sur le laitier algérien (D'El Hadjar)

2.11.1 Introduction

En Algérie, le laitier de haut fourneau est produit dans le complexe sidérurgique d'El Hadjar (Annaba). Une tonne de fonte produite génère à El Hadjar en moyenne 380 kg de laitier [75]. La production de laitier granulé et cristallisé par les hauts fourneaux d'El Hadjar est de l'ordre de 600 000 tonnes par an dont en moyenne 430 000 tonnes de laitier granulé et 170 000 tonnes de laitier cristallisé [75, 76]. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur le laitier algérien qu'il soit cristallisé, essentiellement en techniques routières, ou bien granulé, utilisé dans l'industrie cimentaire. Dans cette partie, on va s'intéresser uniquement aux études réalisées sur la caractérisation du laitier granulé d'El Hadjar et son comportement comme ajout aux ciments et bétons.

2.11.2 Activité hydraulique et caractéristiques mécaniques

Le laitier granulé d'El Hadjar se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaunâtre et de structure poreuse. L'exploitation quantitative du diagramme de diffraction des rayons X (Figure 2.14), établi par BEHIM et al [77], montre qu'il présente une structure vitreuse à 97 %, ce qui est un indice de bonne réactivité mais pas nécessairement optimal, dans la mesure où un taux de cristallinité de l'ordre de 5 à 10 % favorise la germination et, par suite, l'hydratation [78].

En contact d'eau, le laitier d'El Hadjar est inactif et présente une dissolution presque nulle, même avec une finesse de 6000 cm²/g. Cependant, en présence d'un activateur, il offre une bonne activité hydraulique [79]. De même, l'étude faite par KRIKER [80] a montré que la pâte pure de laitier ne manifeste aucune prise même après 48 heures d'observation. L'auteur considère le laitier comme étant de faible hydraulité, qui ne permet pas des taux d'utilisation élevés (>30%) dans le béton, comme c'est le cas en Europe.

Par contre, une étude récente [77] a montré que l'efficacité hydraulique, estimée sur la base de résistances à la compression de mortiers contenant des ciments sans laitier (CEM I) et avec 50% de laitier (CEM III), est satisfaisante aussi bien à 7 jours qu'à 28 jours, principalement pour le laitier le plus finement broyé à 4200 cm²/g (Figure 2.15).

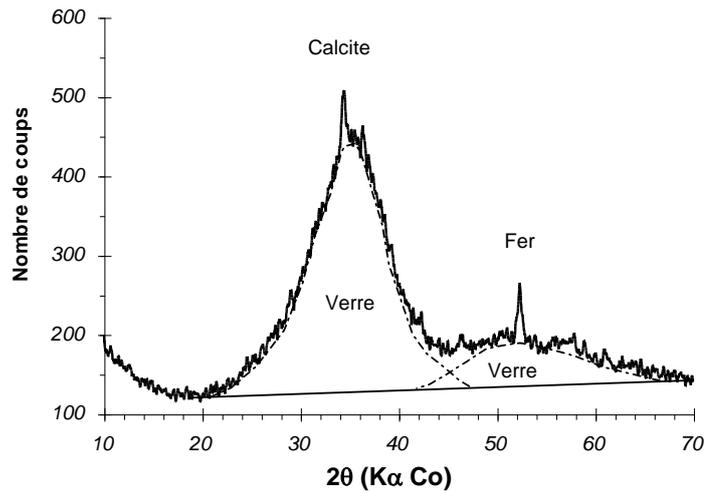


Figure 2.14 : Diffractogramme aux rayons X du laitier granulé d'El Hadjar [77].

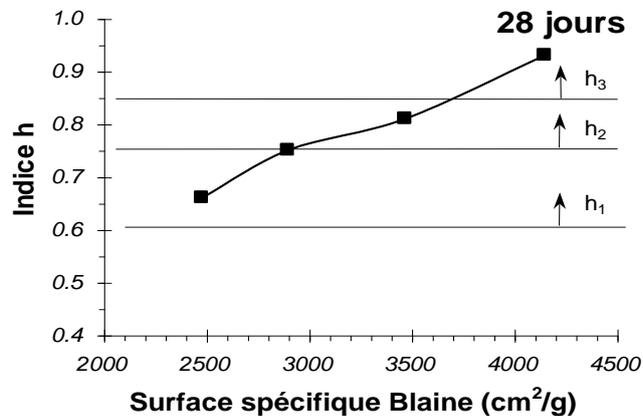


Figure 2.15 : Indice d'efficacité hydraulique en fonction de la finesse du laitier d'El Hadjar [77].

En activant le laitier par six clinkers différents, GUETTACHE [79] a observé que les résistances à 3 jours sont presque identiques, allant de 12 à 13 MPa ; par contre les résistances à 90 jours varient de 37 à 57 MPa. Ceci met en évidence la qualité du clinker dans l'activation de ce produit. Les meilleures résistances au jeune âge correspondent au clinker riche en C_4AF et, à long terme, au clinker riche en C_3S et en alcalis.

Dans le but de confectionner un béton à base de laitier d'El Hadjar activé par des solutions alcalines sans l'utilisation de clinker, MEZGHICHE [71] a mené une étude avec différents dosages de laitier et des silicates de calcium, pour fabriquer un béton étuvé à une température de 90 à 95 °C puis conservé à température ambiante. Il a constaté que la résistance à la compression des bétons augmente intensément pour un dosage en laitier de

350 kg/m³, au-delà de laquelle toute augmentation du dosage ne conduit pas à une élévation significative de la résistance des bétons.

Dans le même contexte, ZEGHICHI et al [82] ont élaboré des mortiers à base de 80% de laitier et 20% de clinker, activés par différentes solutions alcalines : les résultats des résistances à la compression à 7 et 28 jours sont présentés sur la figure 2.16. L'effet des différents activateurs reste semblable par rapport au mortier témoin (A) à 7 et à 28 jours de durcissement et donne lieu à une amélioration allant de 10 à 60%. L'activant le plus efficace est celle de K₂CO₃.

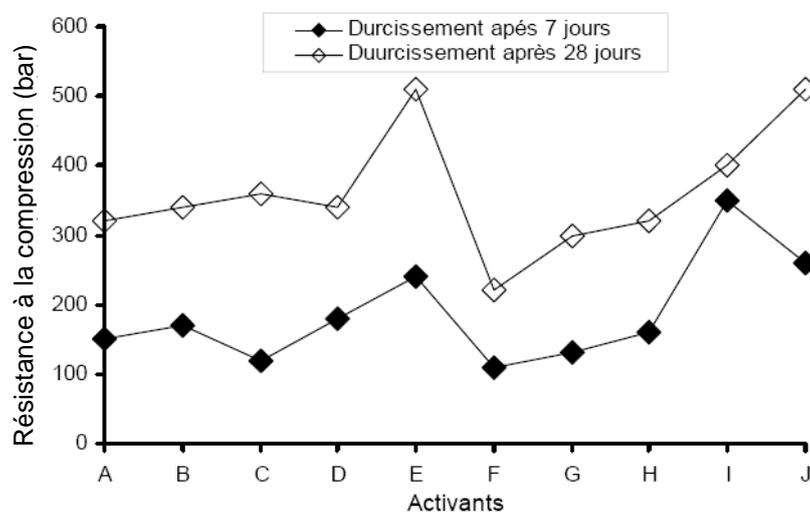


Figure 2.16 : Résistance à la compression du laitier en fonction des différents activateurs [78] A(eau), B(NaOH), C(KOH), D(Na₂CO₃), E(K₂CO₃), F(Na₂SO₃), G(K₂O), H(NaCl), I(K₂SO₄), J(NaSO₄)

Dans une autre étude, BOUGARA et al [83] notent, qu'avec un laitier activé par des bases fortes (NaOH et KOH), on n'obtient que 66% de la résistance d'un mortier à base de clinker. Par ailleurs, la combinaison des solutions alcalines avec de petites quantités de clinker ou de chaux ne semble pas tellement améliorer les résistances. Ceci est expliqué par les auteurs en fonction du faible rapport CaO/SiO₂ (égal à 1,1), qui rend ce laitier moins sensible à l'activation chimique.

L'activation thermique semble être efficace pour le laitier d'El Hadjar, notamment à jeune âge. En effet, les résultats des recherches effectuées par BOUGARA [84] et EZZIANE [85] montrent, qu'à une température de cure de 20°C, les mortiers à base de ciment au laitier enregistrent un faible développement de la résistance. Par contre, à des températures

élevées, les mortiers avec 30 et 50% de laitier atteignent les mêmes performances de résistance que celles d'un mortier à base de CPA, au bout de 3 jours à 40°C et seulement au bout d'un jour pour une cure à 60°C. Cependant, les mêmes sources rapportent qu'à long terme, l'effet de la température est négatif et fait diminuer l'efficacité du laitier d'une façon importante.

BEHIM et al [86] ont mené une étude sur des mortiers contenant de 0 à 90% de laitier d'El Hadjar, avec une surface spécifique variant de 2500 à 4000 cm²/g. Les résultats montrent un développement des résistances mécaniques des ciments au laitier plus lent que celui des ciments ordinaires aux jeunes âges (2 à 7 jours). Par contre, les ciments avec des taux de laitier n'excédant pas les 50% et une finesse élevée développent une résistance comparable et parfois supérieure à celles du ciment Portland à moyen et à long termes. La figure 2.17 montre l'amélioration de la résistance avec l'augmentation de la finesse du laitier.

La même variation a été constatée dans l'étude réalisée par BOUGARA [84] sur l'activation mécanique du laitier d'El Hadjar. L'auteur a trouvé que, pour une finesse du laitier de 4200 cm²/g, la résistance à la compression des mortiers de ciment avec 30 et 50% de laitier atteint à 28 jours une résistance comparable à celle du mortier ordinaire.

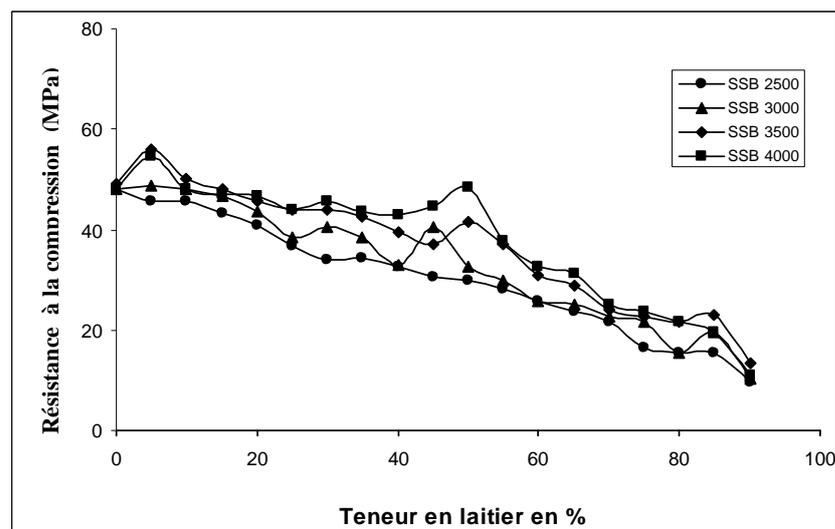


Figure.2.17 : Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 28 jours [80].

2.11.3 Durabilité

AMRANE et KENAI [87] ont étudié les résistances mécaniques de cinq types de bétons dont le ciment a été substitué par 0, 15, 30, 40 et 50 % de laitier d'El Hadjar. Afin d'étudier l'effet du climat chaud, les bétons ont été conservés dans cinq environnements différents, simulant le climat algérien en période d'été. La pénétration d'eau sous pression a aussi été étudiée pour les bétons conservés à une cure humide à 20°C et ceux conservés en climat chaud et sec.

Pour une conservation sous l'eau à 20°C, les résistances du béton au laitier au jeune âge sont faibles, comparées à celles du béton témoin. Par contre, à long terme, elles deviennent comparables sinon meilleures. Cependant, dans les environnements à température élevée et avec une faible humidité, l'évolution de la résistance des ciments au laitier est plus rapide mais reste faible à tout âge et même avec une cure initiale de 7 jours, la résistance des bétons au laitier n'a pas atteint celle du béton témoin, même après 90 jours.

Dans un environnement humide à 20°C pendant 28 jours, la perméabilité des bétons au laitier est légèrement supérieure à celle du béton témoin et est considérée comme étant très acceptable. Par contre, dans le climat chaud et peu humide, le béton au laitier a montré une faible perméabilité.

BEHIM [88] a conduit une recherche sur la durabilité des pâtes de ciments introduites directement après démoulage dans des solutions chimiquement agressives (eau de mer ou eaux sulfatées). Les résultats ont montré un meilleur comportement du CHF (50% de laitier) par rapport aux autres ciments (CPA et CPJ avec 30% de laitier). Toutefois, cette amélioration est moindre que celle à laquelle le chercheur pouvait s'attendre d'un CHF. Il conclut que la période de cure initiale de 2 jours ($t = 20^{\circ} \text{C}$ et $H \geq 50\%$), n'a pas permis au laitier de réagir avec la portlandite du clinker (réaction pouzzolanique). Effectivement, certains auteurs [89] considèrent même qu'une cure humide de 28 jours des ciments au laitier reste insuffisante pour permettre une bonne tenue des ciments au laitier dans des milieux agressifs.

BEHIM et al [90] ont également réalisée une étude sur des pâtes de ciment au laitier, dans laquelle les éprouvettes sont soumises à une cure humide de 90 jours avant d'être immergées dans une solution de nitrate d'ammonium. Après 35 jours d'attaque, le CHF a montré une durabilité supérieure à celle du CPJ et du CPA ; les pertes de résistance (des éprouvettes immergées dans les nitrates par rapport à celle conservées dans l'eau) finales

sont respectivement de 38, 51 et 53 % à une température de conservation de 20 °C et 52, 54 et 55 % à 40 °C. Dans la même étude, les chercheurs ont analysé l'effet du laitier sur la carbonatation des mortiers. Les résultats montrent que, dans des conditions de cure normale, les ciments au laitier se carbonatent plus rapidement que le CPA. Par contre, lorsqu'ils sont activés thermiquement (étuvés) ou conservés dans une cure humide prolongée, les ciments au laitier, et en particulier les CHF, se carbonatent moins vite que les CPA et CPJ (Figure 2.18).

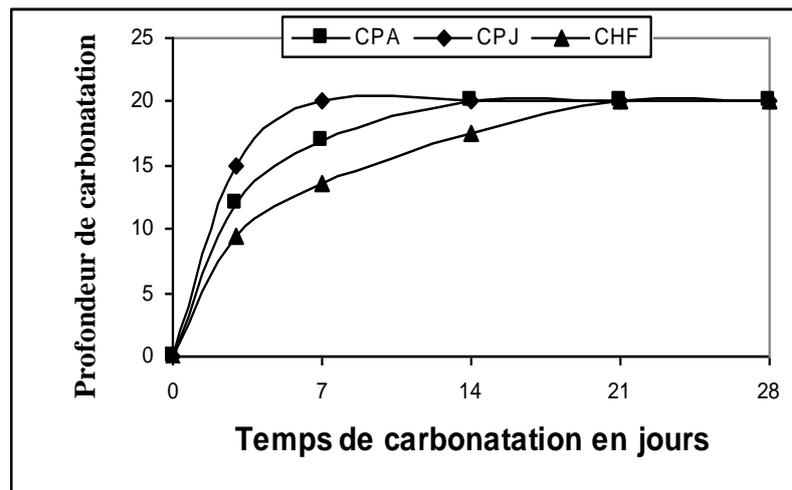


Figure. 2.18 : Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation [88].

2.12 Conclusion

Dans l'industrie sidérurgique, plusieurs types de laitier sont produits, mais seul le laitier granulé est utilisé comme ajout dans l'industrie du ciment. La réactivité hydraulique de ce dernier dépend de plusieurs paramètres, dont notamment sa composition chimique, son contenu en verre et sa finesse de mouture. Lorsqu'il est utilisé dans le béton, le laitier améliore les propriétés à l'état frais en augmentant l'ouvrabilité et la cohésion. Les ciments au laitier présentent une faible chaleur d'hydratation, de bonnes caractéristiques mécaniques à long terme mais faibles au jeune âge.

Concernant le laitier algérien d'El Hadjar, les travaux effectués montrent que son activité est relativement moyenne. Le taux de substitution optimal semble être d'environ 30%. Cependant, un taux de 50% peut être envisagé si le laitier est finement broyé. D'autre part, on constate le manque d'études sur la durabilité du laitier d'El Hadjar, notamment des études sur la structure interne et des phénomènes de transport des mortiers et bétons, ainsi que leur comportement dans des milieux agressifs tel que les sulfates, d'autant que les sols et les eaux souterraines en Algérie sont connus pour leur agressivité.

CHAPITRE 3

DURABILITE DES BETONS CONTENANT LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

3.1 Introduction

La durabilité du béton est régie, d'une manière directe, par son comportement face à des environnements agressifs ou, indirectement, par la forme de sa structure poreuse et, par conséquent, sa perméabilité. En effet, tous les mécanismes de détérioration du béton incluent la pénétration de l'eau et/ou toutes autres espèces nocives (oxygène, anhydride carbonique, ions de chlore, ions de sulfate, acides, etc.). Les dommages de gel ne se produisent pas en béton à moins qu'ils aient atteint un niveau critique de saturation. La corrosion exige de l'eau et de l'oxygène et peut être provoquée par les ions de chlore. La réaction d'alcali silice exige de l'eau elle aussi. Pour un béton exposé à un environnement rude, sa faible perméabilité réduit le taux de détérioration en lui accordant une plus longue durée de vie. De ce fait, la durabilité du béton dépend principalement de sa composition, particulièrement du rapport E/C, du type de ciment et des additions minérales qui peuvent influencer sa structure interne ainsi que sa résistance chimique.

Dans ce chapitre, dans un premier temps, un rappel succinct de la structure poreuse (formes et dimensions) des matériaux à base de ciment Portland est abordé. Une revue bibliographique est ensuite présentée sur l'influence du laitier granulé de haut fourneau sur la structure poreuse et la durabilité des bétons, et leur comportement face à des milieux agressifs.

3.2 Structure poreuse d'une matrice cimentaire

Un milieu poreux est composé d'un volume solide et d'un espace poreux (volume des vides). Dans le cas du béton sain, la matière solide est constituée de granulats, d'hydrates et de grains anhydres, les pores étant remplis d'eau et ou d'air.

3.2.1 Classification des tailles des pores

Nous avons vu que, lors de l'hydratation du ciment, différents hydrates se forment et se développent dans les espaces situés entre les grains de ciment anhydre. De ce mode de remplissage, résulte un réseau de pores complexe, tortueux et de dimensions très variables. Les principaux types de pores présents dans une matrice cimentaire sont, dans l'ordre croissant des dimensions caractéristiques [17, 18, 92, 93] :

- *les pores des hydrates ou pores de gel* : généralement de quelques nanomètres (nm) et toujours de dimension inférieure à 10-20 nm. Ils sont une caractéristique intrinsèque des hydrates (environ 28%) et dépendent peu du rapport eau/ciment (E/C). Le gel de CSH est la source principale de cette porosité et dans ce cas, selon le modèle de DIEMNON et al [18], on retrouve deux types de pores : les pores inter-cristallites situés entre les particules de gel et les pores intra-cristallites correspondant aux espaces entre les feuillets des CSH (la dimension caractéristique des espaces interfeuillets est de quelques dizaines d'Angströms).

- *les pores capillaires* (de 0,01 μm à 10 μm) : ils sont les vestiges intergranulaires de la pâte fraîche qui n'ont pas été remplis par les produits d'hydratation. Leur dimension moyenne augmente avec le rapport E/C et leur volume diminue avec l'évolution de l'hydratation. Le transport des fluides (le plus souvent l'eau) dans le béton se fait principalement à travers la porosité capillaire. Toutefois, la dimension des pores n'influence pas la diffusion des ions, tant qu'ils sont un diamètre supérieur à celui des ions.

- *les macropores* : ils sont associés à l'entraînement d'air, aux défauts de compactage, à la ségrégation, etc. (de 10 μm à 1 mm).

3.2.2 Formes géométriques des pores

Suivant leur participation au transport de la matière à l'intérieur de la matrice cimentaire, on distingue trois catégories de pores [92] :

- *Les pores interconnectés* : ils forment un espace continu dans le matériau et peuvent participer au transport de matière.
- *Les pores isolés* : ils n'ont pas de connexion avec l'extérieur.
- *Les pores aveugles* : ils sont interconnectés d'un seul côté et ne participent pas au transport de matière mais peuvent être accessibles.

Les pores interconnectés et les pores aveugles constituent la porosité ouverte. Cette dernière est principalement responsable de la perméabilité de la pâte du ciment durci et de sa vulnérabilité face aux agents agressifs ainsi qu'aux cycles de gel et dégel.

3.2.3 Influence du laitier sur la porosité

JIANG [2] a montré que la porosité totale des mortiers à base de ciments au laitier est plus élevée que celle des mortiers fabriqués avec un ciment sans ajout. Cependant, il a trouvé une répartition de la taille des pores plus étroite et plus fine dans les mortiers à base de ciments au laitier. Selon ce chercheur, l'hydratation du laitier au jeune âge est très lente comparée à celle du clinker, les hydrates formés sont principalement des sulfo-aluminates primaires qui se présentent en aiguilles dispersées, laissant des vides accessibles. A long terme, le laitier est activé par les Ca(OH)_2 provenant de l'hydratation du clinker et forme le gel de CSH qui se loge dans la structure formée par les aiguilles d'ettringite. Il en dérive une diminution du volume des pores capillaires, ainsi qu'une structure de pore plus fine que celle existante dans le ciment Portland ordinaire. Ce résultat est conforté par les travaux de CHENG et al, [94] qui ont constaté pour un béton à base de ciment ordinaire (CPA), une formation importante de plaquettes d'hydroxydes de calcium et d'aiguille d'ettringite ainsi que de grands pores capillaires (0.05-10 μm). Au contraire, pour un béton avec 40 et 60 % de laitier granulé, peu d'ettringite s'est formée et les pores capillaires étaient inférieurs à 10-50 nm. La structure poreuse raffinée des bétons au laitier a été aussi observée par YOUNG et al [95], avec un diamètre moyen des pores d'environ 0.008 μm pour les bétons au laitier, alors qu'il dépasse 0,011 μm pour un béton à base d'CPA.

La porosité et la distribution de la taille des pores des bétons au laitier semblent être influencées fortement par l'environnement de cure. En effet, pour des échantillons de mortier exposés à l'air libre après une cure humide initiale de 24 heures, MALAMI et al [3] ont trouvé que le volume spécifique des pores des mortiers avec un faible pourcentage de laitier (4 et 15%) était comparable à celle des mortiers témoins, mais que 50 % de laitier conduisait à une augmentation de la porosité. BOUIKNI et al [96] ont analysé la structure poreuse des bétons avec 50 et 65% de laitier. Ils ont constaté une augmentation de la porosité totale avec l'augmentation du taux de laitier. Cette augmentation est plus prononcée pour les bétons au laitier conservés à l'air libre aux conditions du laboratoire (Figure 3.1). Les auteurs expliquent cette variation par le manque d'humidité qui conduit à une quantité de chaux, produite par l'hydratation du clinker, insuffisante pour activer le laitier. Toutefois, les bétons conservés continuellement sous une cure humide à 20°C ont présenté une porosité plus faible et une distribution globale de la taille des pores plus fine que celle des bétons conservés à l'air libre avec ou sans cure initiale.

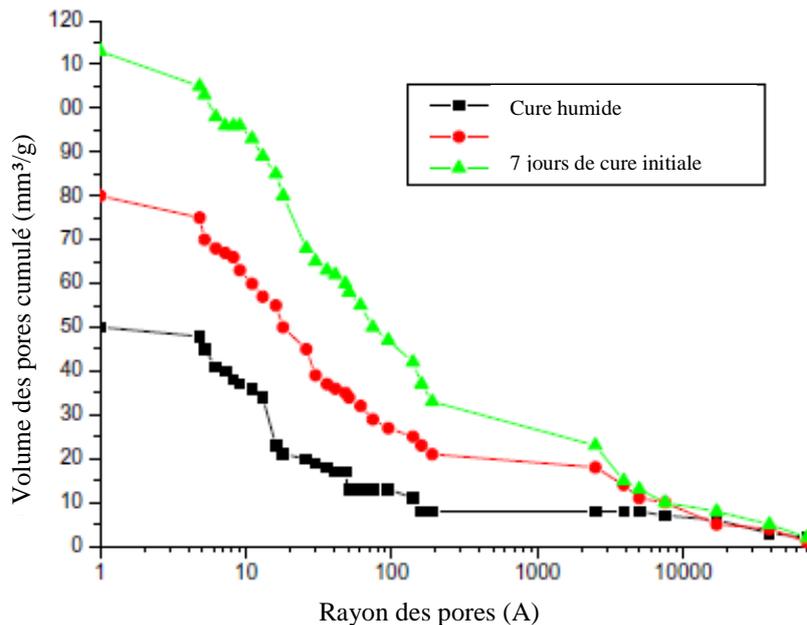


Figure 3.1 : Influence de l'environnement de cure sur la distribution des pores d'un béton contenant 65% de laitier granulé [96].

3.2.4 Influence des granulats sur la porosité et la microstructure

L'introduction de granulats dans la pâte de ciment modifie la structure de la matrice. Autour du granulat, les grains anhydres s'arrangent en fonction de l'effet de paroi et génèrent un gradient de E/C et une proportion de vides remplis d'eau, plus importante que dans le reste de la pâte. Lors de l'hydratation, la portlandite se forme principalement dans cette zone poreuse [18]. Cette zone, appelée « auréole de transition », de quelques dizaines de micromètres autour du granulat, est caractérisée par un rapport E/C globalement plus élevé que dans le reste de la pâte et une porosité plus importante [92]. Sa résistance mécanique est moins élevée que le reste de la pâte. A cause de cela et de la formation préférentielle dans ces zones de fissures dues au retrait, se construit un cheminement privilégié pour les agents agressifs [18]. La présence du laitier granulé conduit à une amélioration de l'auréole de transition. En effet, l'hydratation du laitier consomme une partie de la Portlandite issue de l'hydratation du clinker pour produire des CSH. Cela aide à homogénéiser la microstructure de l'auréole de transition, laquelle voit son épaisseur se réduire et sa densité augmenter [97].

3.4 Influence du laitier sur les propriétés de transport dans les matériaux cimentaires

Principalement, dans le béton, trois types de fluide peuvent pénétrer et mettre en péril sa durabilité ; l'eau (pure ou chargée d'ions agressifs), le gaz carbonique et l'oxygène. La capacité d'un solide à se laisser traverser par un fluide s'appelle la perméabilité. Cette perméabilité est relative à l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux sous un gradient de pression. Cependant, le mouvement de fluides dans le béton s'effectue aussi par d'autres mécanismes à savoir la diffusion et l'absorption. Ces paramètres de transport sont notamment influencés par la composition du béton, particulièrement la présence d'additions minérales.

3.4.1 La perméabilité

Dans la littérature, il est admis que la perméabilité du béton à base de laitier de haut fourneau est inférieure à celle des bétons à base de ciment Portland ordinaire. L'ordre de grandeur de cette diminution varie de 10 à 100 selon les sources [6, 92]. Cette amélioration de la perméabilité est attribuée principalement au raffinement de la structure poreuse par les hydrates du laitier (voir § 3.2.3). Cependant, en réalité, cet effet dépend de plusieurs paramètres. L'hydratation des ciments au laitier est fortement liée à l'activité hydraulique du laitier et, étant donné la lenteur du processus d'hydratation par rapport à celui du clinker, dépend aussi de la durée de cure humide et de degré de maturation. Le rapport Eau/Liant (E/L), est un autre facteur déterminant pour la perméabilité des bétons et particulièrement de ceux contenant des additions minérales. En effet, une réduction du rapport E/L conduit à une diminution de la porosité capillaire, favorisant ainsi l'activation du laitier par la chaux produite par le clinker [6, 54, 98].

CHENG et al [94] ont mesuré la perméabilité à l'eau et la pénétration aux ions chlore (RCPT test) de trois bétons A, B et C contenant des ciments avec 0, 30 et 50% de laitier granulé, respectivement. Les résultats sont présentés dans la figure 3.2. La plus faible perméabilité à l'eau a été enregistrée pour le béton contenant 50% de laitier. De même, les résultats de la perméabilité aux ions chlores (essai de conduction) montrent, selon l'échelle de WITHING, une perméabilité élevée (charge totale de 10271 C) pour le béton A (0% de laitier) et une faible perméabilité (une charge de 1864 C) pour le béton C (50% de laitier). L'auteur explique ce résultat par la structure plus dense que présente le béton avec un pourcentage élevé de laitier. En effet, les produits d'hydratation sont efficaces pour remplir les grands pores capillaires et pour raffiner le système de pores du béton. D'autre part, la

faible chaleur d'hydratation que présente le béton au laitier peut réduire les fissures d'origine thermique et améliorer ainsi la perméabilité du béton.

ALEXANDER et al [100] ont trouvé une diminution de la perméabilité à l'oxygène des bétons avec 50% de laitier, comparés aux bétons à base de ciment ordinaire. Le même effet a été constaté pour des rapports E/C de 0,49 ; 0,56 et de 0,66.

Selon les travaux de SHI et al [101] sur des bétons à haute performance (BHP), avec un faible rapport E/C, la perméabilité au gaz d'azote semble être peu influencée par la présence du laitier (Figure 3.3). L'optimum est obtenu pour un taux de laitier de 30%. Les auteurs expliquent cette variation par le fait qu'un BHP est plus dense et son hydratation est plus lente que celle d'un béton normal ; ainsi l'effet du remplissage et l'effet pouzzolanique du laitier ne sont pas aussi efficaces que dans un béton ordinaire.

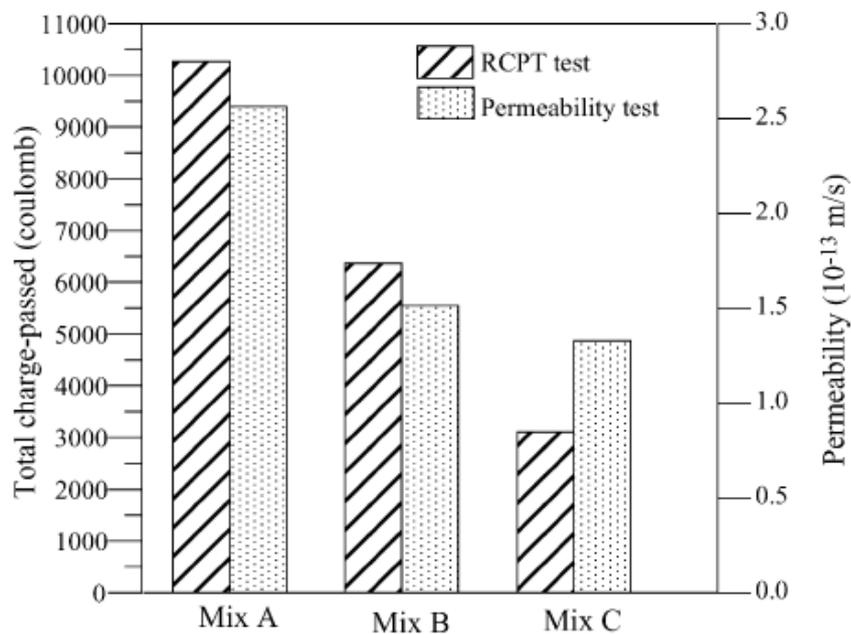


Figure 3.2 : Perméabilité à l'eau et aux ions chlorures des bétons au laitier [94].

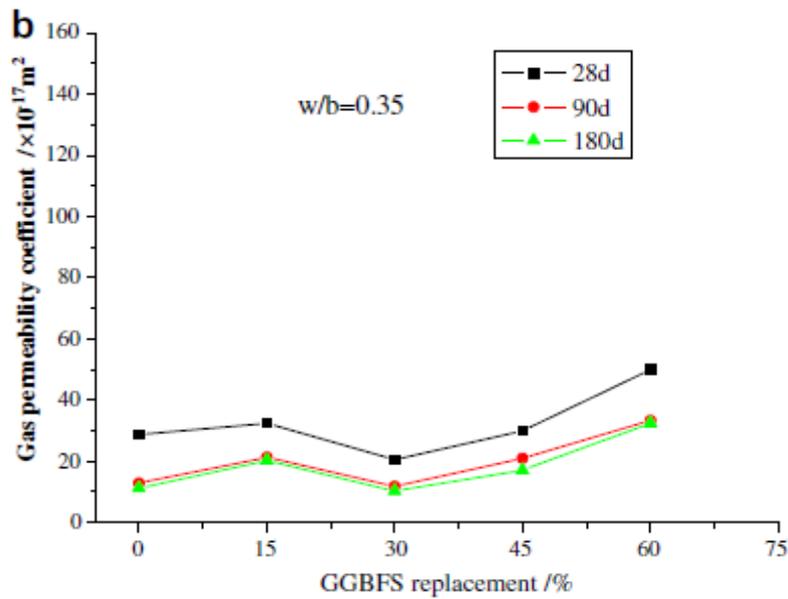


Figure 3.3: Influence du laitier sur la perméabilité au gaz des Bétons à Hautes Performances [101].

3.4.2 Diffusion des ions chlore

Plusieurs travaux ont montré une diminution de la diffusivité des ions de chlore dans les bétons à base de ciment au laitier de haut fourneau.

DAUBE. J [102] a montré que le coefficient de diffusion d'ions chlorure d'un béton avec 60% de laitier et avec un rapport E/C de 0,5 est dix fois plus faible que celui d'un béton avec un ciment Portland sans ajout.

CHO. S.W et al [103] ont étudié l'influence du laitier et du rapport E/C sur la diffusion des ions chlorures du béton. Comme le montre le tableau 3.1, indépendamment du rapport E/C, la charge totale (essai de conduction) ainsi que le coefficient de diffusion (essai de diffusion accélérée) diminuent avec l'augmentation du taux du laitier. Cette diminution est plus significative pour des taux de laitier supérieurs à 40%.

La faible diffusion des chlorures dans les bétons au laitier a été expliquée par SHIQUN et al [104] par le fait que les hydrates (CSH additionnel) formés par l'hydratation du laitier, contribuent, non seulement à remplir les pores capillaires, mais également à réduire la connectivité de ces pores et augmenter ainsi la tortuosité. Par conséquent, le chemin de diffusion des ions chlorures sera allongé. Cela est conforme avec les travaux d'autres chercheurs [95], qui ont constaté une augmentation proportionnelle de la diffusion des

chlorures avec le diamètre moyen des pores des bétons, avec et sans laitier, indépendamment du rapport de E/C.

Tableau 3.1 : Diffusion des ions chlores dans les bétons au laitier [103].

| Bétons | E/C | laitier (%) | Charge totale (coulomb) | Coefficient diffusion ($\times 10^{-8}$ m ² /heure) |
|--------|------|-------------|-------------------------|---|
| A0 | 0.35 | 0 | 5311 | 17.51 |
| A20 | | 20 | 4685 | 13.92 |
| A40 | | 40 | 2208 | 7.06 |
| A50 | | 50 | 1543 | 6.19 |
| A70 | | 70 | 1034 | 5.2 |
| B0 | 0.55 | 0 | 9639 | 39.48 |
| B20 | | 20 | 6355 | 20.47 |
| B40 | | 40 | 2709 | 13.37 |
| B50 | | 50 | 2148 | 10.66 |
| B70 | | 70 | 1350 | 7.73 |

D'après les résultats de DHIR et al. [105], les avantages de l'utilisation du laitier sont également confirmés sur des pâtes de ciment pures, où pour des remplacements du clinker par 33,3, 50, et 66,7 % de laitier (E/C = 0,55), ils ont constaté que l'augmentation du taux de laitier conduisait à une diminution du coefficient de diffusion (Figure 3.4) et à une augmentation du taux de chlorures liés avec l'augmentation du taux du laitier.

3.4.2.1 Interaction entre les chlorures et les hydrates du ciment

Deux types d'interactions des chlorures avec les hydrates du ciment sont possibles [92, 105-107]:

- *l'interaction chimique*: les ions de chlore sont fixés principalement par réaction chimique avec les aluminates (C₃A et C₄AF) du clinker pour former du monochloroaluminates de calcium hydratés (sel de Friedel) C₃A.CaCl₂.10H₂O ou du monochloroferrites de calcium hydratés 3CaO.Fe₂O₃.CaCl₂.10H₂O selon les équations suivantes :



- *l'interaction physique*: par adsorption sur les parois des hydrates. En effet, les *CSH*, *CAH* et *CAFH* (produits d'hydratation du clinker et du laitier), ayant une grande surface spécifique, contribuent à la fixation physique des chlorures par adsorption.

Toutefois, il semble que la fixation des ions par réaction chimique soit plus dominante que celle par adsorption physique (Figure 3.5).

Les chlorures "libres" qui ne sont pas fixés (chimiquement ou physiquement) peuvent migrer à l'intérieur du béton, soit par capillarité, soit par diffusion sous gradient de concentration. Ainsi, la capacité de fixation des ions Cl^- par le liant, et par conséquent la diffusion des chlorures dans le béton, dépend principalement du taux d'aluminate (C_3A+C_4AF) dans le liant. Dans les ciments au laitier, la teneur de ces composés diminue et, par conséquent, la teneur en chlorures libre devrait augmenter. Cependant, plusieurs travaux [105, 109] montrent, qu'au contraire, la quantité des chlorures liés est plus importante dans le ciment au laitier (Figure 3.4). Cette capacité de fixation serait due à la forte adsorption des chlorures sur les pores des hydrates présents dans le ciment au laitier [92].

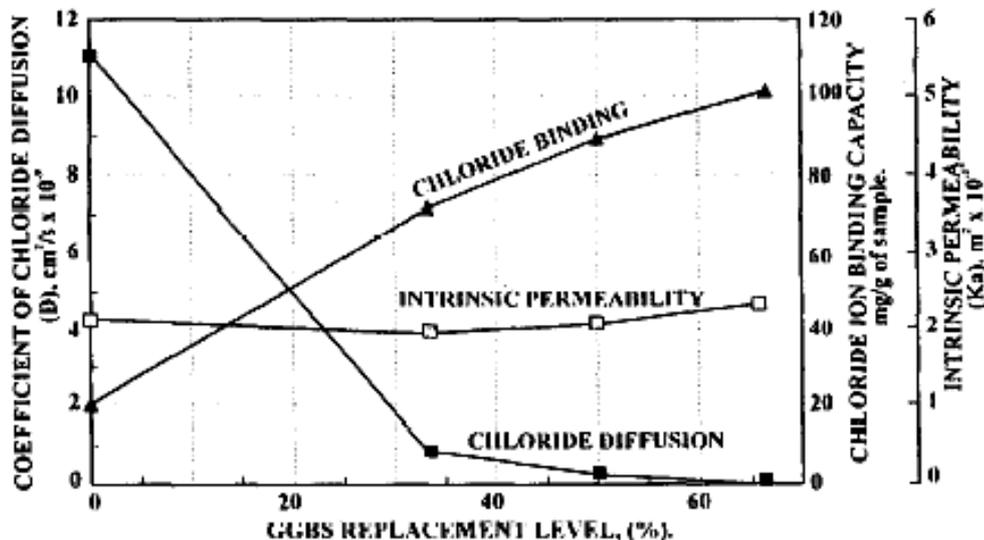


Figure 3.4 : Influence du pourcentage de laitier sur la perméabilité, sur la fixation et sur le coefficient de diffusion des chlorures [105]

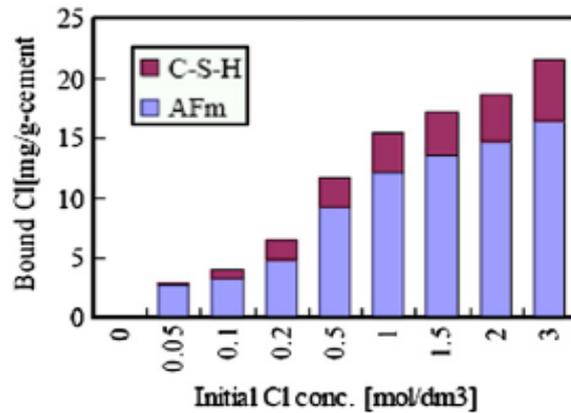


Figure 3.5 : Taux de chlorures liés par liaison chimique et physique dans le ciment hydraté [106].

3.5 Résistance aux sulfates

3.5.1 Sources et mécanismes d'attaque des sulfates

Les sulfates peuvent se trouver dans plusieurs milieux comme l'eau de mer, les eaux souterraines, les eaux usées industrielles et dans certains sous-produits industriels [17]. De même, ils sont présents naturellement dans les sols avec des concentrations relativement faibles (0,01 à 0,05%). Toutefois, il n'est pas rare de trouver des concentrations beaucoup plus élevées (supérieures à 5%) [109] comme c'est le cas dans les sols algérien, notamment dans les régions sahariennes présentant des eaux souterraines profondes. Dans ces eaux, les sels s'enrichissent pendant des milliers d'années et leur salinité peut atteindre des valeurs très élevées. Par capillarité, ces sels, dissous dans l'eau souterraine, sont transportés dans les couches de sol proches de la surface où ils sont déposés par cristallisation. La salinification peut se manifester par l'apparition de cristaux de gypse.

L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs et/ou d'une perte des propriétés liantes des CSH du ciment. L'expansion peut causer des dommages structuraux considérables dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans). Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère le rythme de destruction. L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton en surface [18].

3.5.1.1 Attaque des sulfates de sodium

L'expansion peut résulter de la formation d'ettringite secondaire ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) selon les réactions suivantes :

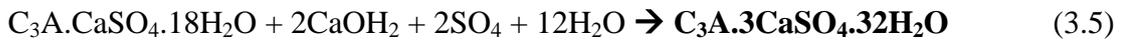
- Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates).



- Formation d'ettringite secondaire à partir du C₃A résiduel :



ou à partir des aluminates hydratés:

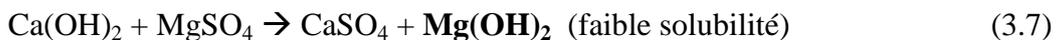


Ces réactions dépendent de la composition du ciment, notamment du taux de C₃A et de la solution interstitielle, particulièrement de la concentration en portlandite. La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est supérieur de 3 à 8 fois (suivant qu'il s'agit du C₃A ou du C₄AH₁₃) au volume du solide initial.

3.5.1.2 Attaque des sulfates de magnésium

Le sulfate de magnésium est très agressif car il présente une double action par formation d'ettringite et substitution des ions Ca²⁺ en Mg²⁺. Les échanges de Mg²⁺ avec Ca²⁺ conduisent à la formation de la "Brucite" Mg(OH)₂ (Equation 3.7) qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des CSH en un silicate de magnésium hydraté "MSH" sans propriétés liantes (Equation 3.9) [110, 111]. De plus, la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation du gypse secondaire.

- Formation de produit expansif



- Substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺ dans les C-S-H



3.5.2 Influence du laitier de haut fourneau sur la performance des ciments et bétons lors de l'attaque des sulfates

Dans la littérature, on dénombre un grand nombre de travaux de recherche montrant l'effet bénéfique de l'utilisation du laitier de haut fourneau granulé, comme ajout au ciment ou addition dans le béton, dans un environnement sulfatique. Cet effet est principalement dû au fait que [112] :

- le laitier ne contient pas de C_3A , et son addition au béton réduit le taux global de C_3A dans le mélange,
- le laitier réagit avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et réduit donc sensiblement sa présence dans le béton et sa réaction avec les aluminates pour former l'ettringite,
- à long terme, la perméabilité du béton au laitier diminue et ralentit la pénétration des sulfates.

Nous allons présenter ci-après quelques travaux de recherche, relatifs à la résistance des ciments et bétons au laitier granulé dans un environnement de sulfates de sodium et de sulfates de magnésium, objet de notre étude.

CAO et al [113] ont étudié la résistance aux sulfates des ciments Portland (CEM I) et des ciments au laitier (40, 60 et 80%). Les échantillons de mortier ont été réalisés avec un rapport E/C de 0,6 et conservés pendant 7 jours avant d'être immergés dans des solutions de sulfate de sodium (5% Na_2SO_4) ayant des pH de 12 et de 7 à 3, obtenus par titration en utilisant une solution de 10% H_2SO_4 . L'expansion et le développement de résistance ont été mesurés. Après 360 jours d'immersion dans les sulfates avec un pH 12, les ciments au laitier (particulièrement ceux avec un taux supérieur à 60%) ont montré une faible expansion (Figure 3.6) et une faible perte de résistance. Au contraire, dans la solution à pH 3, seul le ciment avec 80% de laitier a présenté de bonnes performances.

GOLLOP et TAYLOR [114] ont étudié par microscopie électronique à balayage des pâtes de ciment avec 69% de laitier de haut fourneau. Des éprouvettes cubiques ont été immergées pendant 6 mois dans des solutions de sulfates de sodium Na_2SO_4 (0,25 mole/L) ou de magnésium MgSO_4 (0.25 mole/L). Les auteurs ont constaté que le ciment au laitier

étudié avait une tendance à se désagréger par l'attaque des sulfates plutôt que de subir une expansion élevée. Dans la solution de Na_2SO_4 , une décalcification partielle du *CSH* et la formation d'ettringite a été observée. Dans la solution de MgSO_4 , les mêmes réactions sont observées mais les effets dominants étaient la décomposition du *CSH* et la formation de la brucite et du gypse au-dessous de la surface des éprouvettes, ainsi que de silicates de magnésium hydratés *MSH* et du gypse au niveau des bords des éprouvettes.

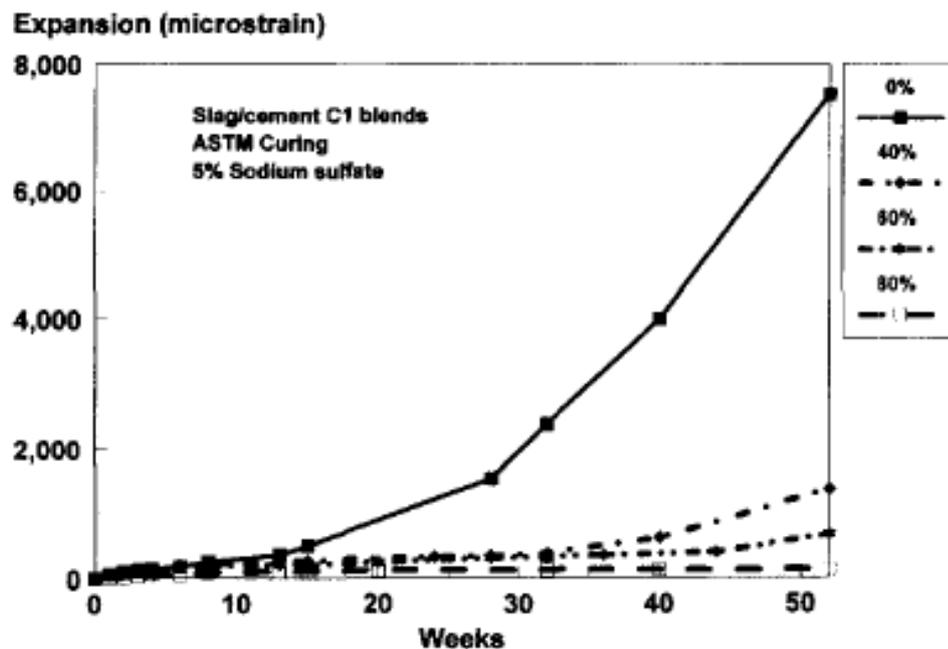


Figure 3.6: Effet du laitier sur l'expansion des ciments dans une solution de 5 % de sulfates de sodium (pH 12) [113].

Les ciments au laitier semblent présenter de meilleures performances dans un environnement de sulfates de sodium que dans celui de sulfates de magnésium. En effet, El-DARWISH et al [115] ont constaté que les échantillons de béton à base d'un ciment avec 30% (en volume) de laitier, conservés pendant un an dans une solution de sulfate de sodium et dans de l'eau de mer, ont présenté de bonnes performances (faible expansion et légère perte de résistance et de rigidité). Cependant, dans la solution de sulfates de magnésium, le gel de *CSH* c'est transformé en *MSH*, conduisant à une perte des propriétés liantes.

HIGGINS [116] a étudié l'expansion et le développement de la résistance en compression des bétons avec un rapport E/C de 0,5 et un dosage en liant (ciment + laitier) de 350 kg/m³. Ainsi, les échantillons ont été immergés dans des solutions de sulfate de magnésium et de sodium pendant six ans. Dans la solution de sulfate de sodium, le béton à base de CEM I était presque totalement désintégré après 6 ans, alors que les bétons au laitier (60 et 70%) montraient une faible perte de résistance et de faibles dommages dans les bords des éprouvettes. D'autre part, le béton à base de ciment Portland (CEMI) avait atteint rapidement (après 9 mois d'immersion) une expansion élevée (de 1%). Par contre les bétons avec 60 et 70% de laitier ont subi des dommages tout en gardant une expansion relativement faible (inférieure à 0.1%). Toutefois, dans la solution de sulfate de magnésium, comme le montre le tableau 3.2, tous les bétons étudiés ont pratiquement présenté les mêmes performances.

Tableau 3.2: Résistance des bétons conservés dans les solutions de sulfates (en pourcentage de la résistance des bétons conservés dans l'eau) [116].

| | % de résistance dans Na ₂ SO ₄ | | | % de résistance dans MgSO ₄ | | |
|------------------|--|-------|-------|--|-------|-------|
| | 1 an | 2 ans | 6 ans | 1 an | 2 ans | 6 ans |
| CEMI | 97 | 87 | 0 | 85 | 74 | 28 |
| CEMI+60% Laitier | 106 | 97 | 62 | 95 | 75 | 18 |
| CEMI+70% Laitier | 105 | 89 | 90 | 94 | 77 | 28 |

3.6 Carbonatation

La carbonatation est la réaction du dioxyde de carbone contenu dans l'air (en moyenne 0,03%) avec les hydrates du ciment. Tous les hydrates sont sensibles à l'attaque du dioxyde de carbone mais le Ca(OH)₂ est celui qui réagit le plus rapidement pour former du CaCO₃. Parmi les conséquences de la carbonatation, on peut citer le retrait de carbonatation, mais aussi la diminution du pH de la solution interstitielle. Celle-ci engendre la déstabilisation de la couche d'oxyde qui passive l'armature, ce qui va faciliter la corrosion en présence d'humidité et d'oxygène. La vitesse de carbonatation dépend de la structure poreuse et du taux d'humidité du béton.

D'une manière générale, les ciments au laitier se carbonatent plus rapidement que le ciment Portland ordinaire [6, 92, 117]. Les ciments au laitier contiennent moins de portlandite (Ca(OH)₂) que le ciment Portland sans ajout (CEM I). La formation de la calcite pendant la carbonatation du CEM I entraîne la formation d'une couche protectrice dans la peau du matériau qui ralentit la diffusion du dioxyde de carbone; par conséquent, la

carbonatation peut être ralentie. Dans les ciments au laitier, en absence de quantité suffisante de portlandite, le dioxyde de carbone diffuse plus rapidement. Toutefois, si le béton contient moins de 50% de laitier et a subi un mûrissement suffisant en cure humide, la carbonatation n'est que peu influencée [6].

SULAPHA et al [118] ont suivi pendant 12 mois la carbonatation des bétons au laitier (30, 50 et 65 % de substitution) et/ou de fumée de silice (5 et 10%). De cette étude, ils ont observé que le béton contenant le laitier d'une finesse de 4500 cm²/g présentait un taux de carbonatation plus élevé par rapport au béton à base de CEM I. Par contre, pour le béton contenant du laitier à finesse élevée (6000 et 8000 cm²/g) et de la fumée de silice, le taux de carbonatation était inférieur à celui du béton à base de CEM I. Dans ce cas, les auteurs pensent que la densification de la structure poreuse a dominé l'effet de diminution du Ca(OH)₂ dans la matrice cimentaire.

PARROTT [119] a examiné l'effet du laitier et de la cure sur la profondeur de carbonatation du béton d'enrobage, exposé pendant 18 mois à 20°C et à 60% d'humidité relative. Les résultats, présentés dans figure 3.7, montrent qu'à partir de 20% de laitier, la profondeur de carbonatation est plus importante que celle du béton sans ajout. L'augmentation de la carbonatation est proportionnelle à l'augmentation du taux de laitier. Néanmoins, cet effet est moins important avec un prolongement de la durée de cure humide, notamment pour des taux de laitier inférieurs à 50%.

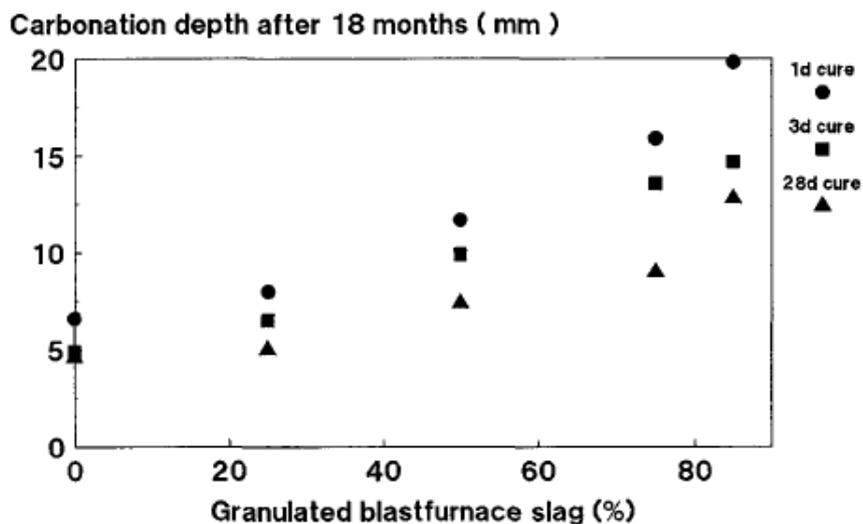


Figure 3.7: Effet du laitier et de la cure humide sur la carbonatation du béton [119].

3.7 Conclusion

La présence du laitier de haut fourneau dans le béton modifie considérablement sa structure interne. La porosité des bétons au laitier est plus importante, mais leur structure de pores est plus raffinée. De ce fait, les propriétés de transport (perméabilité, diffusion et absorption) dans la matrice cimentaire sont améliorées. Toutefois, la carbonatation est influencée négativement par la présence du laitier. La pâte de ciment au laitier hydratée, contenant plus *CSH* et moins de Ca(OH)_2 , conduit à amélioration de la résistance chimique du béton dans des environnements sulfatiques. Néanmoins, l'amélioration de la durabilité du béton par la présence de laitier, dépend de son activité hydraulique, du rapport E/C et des conditions de maturation et, notamment, de la durée de cure humide.

CHAPITRE 4

MATERIAUX ET ESSAIS

4.1 Introduction

Les matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes de mortiers et bétons, ainsi que les essais réalisés et les variables étudiées, sont présentés dans ce chapitre. Notre étude expérimentale, réalisée sur des échantillons de mortiers et bétons, comporte essentiellement quatre parties mettant en évidence l'effet du laitier d'El Hadjar sur différents propriétés :

- I- caractéristiques mécaniques des ciments au laitier d'El Hadjar ;
- II- microstructure et propriétés de transport des mortiers à base de ciment au laitier d'El Hadjar ;
- III- durabilité des mortiers au laitier d'El Hadjar face à l'attaque des sulfates et de l'eau de mer ;
- IV- résistance mécanique et la durabilité des bétons à base de ciment au laitier d'El Hadjar.

4.2 Matériaux

4.2.1 Les ciments

Pour la confection des mortiers, deux ciments de type Portland ont été utilisés. Un ciment (A) de type CEM I 32,5, fabriqué au laboratoire en utilisant un clinker provenant de la cimenterie de Meftah avec 5% de gypse ; le produit a été broyé à une finesse de 3150 cm^2/g à l'aide d'un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg. Le ciment (B), est de type CEM I 52,5 provenant de la cimenterie de Haccourt (Belgique). La composition chimique et minéralogique (calculée selon la formule de BOGUE) ainsi que les propriétés physiques des deux ciments sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2. Pour la confection des bétons, le clinker utilisé pour le ciment (A), a été mélangé au gypse et broyé au laboratoire à une finesse est de 3900 cm^2/g . Le ciment obtenu, noté (C) et de type CEM I 42,5.

Tableau 4.1 : Composition chimique des ciments utilisés

| Ciments | Composition chimique (%) | | | | | | | | | | |
|----------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------|------|-------------------|------------------|-----------------|------|------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | CaO libre | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ | CT | P.F |
| A (CEM I 32,5) | 21,87 | 5,32 | 3,28 | 62,41 | 0,17 | 1,06 | - | - | 2,73 | 1,68 | 2,02 |
| B (CEM I 52,5) | 18,40 | 5,60 | 3,80 | 61,30 | 0,20 | 0,90 | 0,42 | 0,78 | 3,30 | 0,04 | 2,20 |

Tableau 4.2: Composition minéralogique et propriétés physiques des ciments utilisés

| Ciments | Composition minéralogique | | | | Propriétés physiques | | | | |
|---------------|---------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------|-----|
| | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | Finesse (cm ² /g) | Masse volumique (kg/m ³) | Demande en eau (%) | Temps de prise (min) | |
| | | | | | | | | Début | Fin |
| A (CEMI 32,5) | 51,65 | 19,00 | 8,55 | 9,97 | 3150 | 3200 | 27 | 180 | 330 |
| B (CEMI 52,5) | 55,23 | 17,00 | 8,42 | 11,55 | 4400 | 3110 | 29 | 150 | 240 |

4.2.2 Le laitier granulé

Le laitier utilisé dans cette étude provient du complexe sidérurgique d'El Hadjar. Il s'agit d'un matériau qui a l'aspect d'un sable de couleur jaunâtre et de granulométrie 0/5. Sa composition chimique, présentée dans le tableau 4.3, montre une teneur en magnésie et en alumine faible par rapport à la composition chimique moyenne des laitiers [120].

4.2.2.1 Caractéristiques physiques

Le matériau a été séché puis broyé, dans un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg. La figure 4.1 présente la finesse du laitier en fonction du temps de broyage. Dans notre étude, la finesse prise en considération est de l'ordre de 4200 à 4300 cm²/g. Pour cela, le laitier a été broyé pendant 75 minutes. Sa granulométrie a été déterminée par diffraction laser. Il s'agit d'une technique de mesure indirecte utilisée pour déterminer la distribution de taille des matériaux granulaires pulvérulents. Le diffractomètre laser enregistre l'image de la diffusion (diffraction, réflexion, réfraction) des rayons à travers la suspension de particules. Les images de diffusion sont ensuite calculées à partir d'un modèle de diffusion théorique. La méthode est présentée avec précision par MICHEL et COURARD [121]. La courbe granulométrique du laitier en comparaison avec celle du ciment B (CEMI 52,5) est représentée par la figure 4.2.

Tableau 4.3 : Composition chimique du laitier granulé d'EL Hadjar

| Composition chimique en % | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | TiO ₂ | Na ₂ O | SO ₃ | Perte au feu |
| 41,20 | 9,19 | 3,44 | 42,84 | 2,11 | 1,07 | 1,16 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |

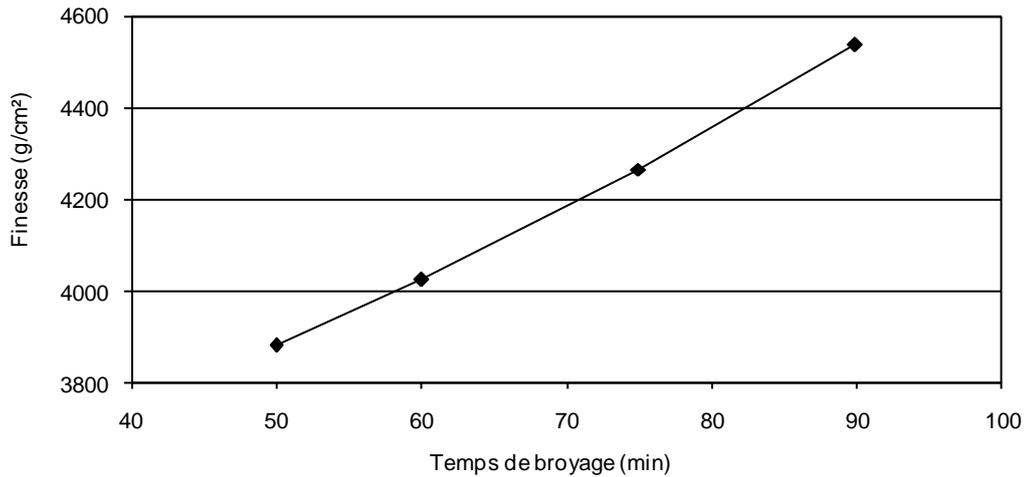


Figure. 4.1 : Finesse du laitier en fonction du temps de broyage.

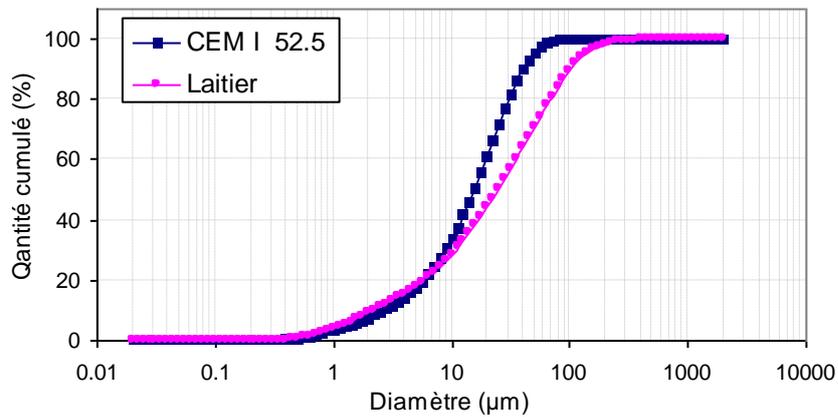


Figure 4.2 : Courbes granulométriques du laitier et du ciment B (CEM I 52,5).

4.2.2.2 Activité hydraulique

a. Indices chimiques d'activité

Des indices chimiques préconisés par la norme NF P 15-301 [43] ainsi que ceux issus de la littérature [7, 122] et qui présentent une bonne corrélation avec les résistances mécaniques, ont été calculés et sont présentés dans le tableau 4.4, en se basant sur la composition chimique donnée dans le tableau 4.3.

Parmi les sept indices calculés, trois (I_2 , I_3 et I_6 et I_7) sont en dehors des valeurs recommandées. Néanmoins, ces indices présentent une bonne corrélation avec la résistance à la compression [122] : ils permettent donc de classer le laitier d'El Hadjar comme étant de faible hydraulité. Il faut cependant noter qu'il n'est pas prudent d'évaluer l'activité hydraulique du laitier sur la base de la composition chimique seule. En effet, plusieurs

chercheurs ont affirmés que ces modules chimiques ne présentaient pas une corrélation fonctionnelle avec l'hydraulicité du laitier [45, 123].

Tableau 4.4 : Indices chimiques du laitier granulé d'El Hadjar

| Indices chimiques | Valeurs calculées | Valeurs optimales proposées dans la littérature |
|---|-------------------|---|
| $I_1 = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2}$ | 1,31 | 1.3 à 1.4 |
| $I_2 = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0,5 MgO - 2SiO_2$ | -9,32 | 12 < I < 20 |
| $I_3 = \frac{CaO + 0.56Al_2O_3 + 1.4MgO}{SiO_2}$ | 1,23 | > 1.65 |
| $I_4 = \frac{CaO + MgO + 0.66Al_2O_3}{SiO_2 + 0.33Al_2O_3}$ | 1,15 | > 1 |
| $I_5 = \frac{CaO}{SiO_2}$ | 1,04 | Maximum 1.4 |
| $I_6 = \frac{(CaO + MgO)}{(SiO_2 + Al_2O_3)}$ | 0,89 | 1.0– 1.3 |
| $I_7 = \frac{(CaO + MgO)}{SiO_2}$ (Norme NF P 15 301) | 1,09 | >1.4 |

b. Indice d'efficacité hydraulique

Le pouvoir hydraulique est estimé conventionnellement à l'aide de l'indice d'efficacité hydraulique h , selon la norme NF P 18 – 506 [124]. Cet indice est défini par le rapport, à un âge donné, de la résistance à la compression d'un mortier à base de liant composé, en masse, de 50 % de laitier et de 50 % de ciment portland, à celle obtenue au même âge sur un mortier à base de 100% du même ciment. Le ciment doit avoir une teneur en C_3A comprise entre 6 et 10 % et une teneur maximale en SO_3 de 3 %. L'indice d'efficacité hydraulique h a été calculé pour les trois ciments (A, B et C) utilisés dans notre étude (Tableau 4.5). Les résultats sont similaires pour tous les ciments (de l'ordre de 0,50 à 7 jours et de 0,70 à 28 jours). Selon la classification de la norme de l'indice d'efficacité hydraulique (h_1 à h_3 de réactivité croissante, h_1 étant la plus faible) (Tableau 4.6), le laitier d'El Hadjar est classé comme étant de faible voir à la limite de moyenne hydraulicité. Plusieurs chercheurs [77, 80] ont trouvés des résultats similaires sur l'activité hydraulique du laitier d'El Hadjar.

Tableau 4.5: Indice d'efficacité hydraulique h du laitier d'El Hadjar

| | Résistance à la compression (MPa) | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 7 jours | | | 28 jours | | |
| | A CEM I 32,5 | C CEM I 42,5 | B CEM I 52,5 | A CEM I 32,5 | C CEM I 42,5 | B CEM I 52,5 |
| $R_{c_{CEM I}}$ | 25,75 | 24,05 | 35,25 | 36,35 | 48,82 | 58,5 |
| $R_{c_{CEM I + 50 \% L}}$ | 12,85 | 13,30 | 19,00 | 25,73 | 34,30 | 41,0 |
| h | 0,50 | 0,55 | 0,54 | 0,71 | 0,70 | 0,70 |

Tableau 4.6 : Classification des indices d'efficacité hydrauliques des laitiers en fonction des résultats des essais mécaniques [124]

| Indice | 7 jours | 28 jours |
|--------|---------|----------|
| h_1 | - | > 0,60 |
| h_2 | > 0,60 | > 0,75 |
| h_3 | > 0,70 | > 0,85 |

4.2.3 Le sable

Pour la confection des mortiers, un sable normalisé a été utilisé, conformément à la norme NF P 18-403 [125]. Son fuseau granulométrique est présenté en **annexe I**.

Pour la confection des bétons, un sable d'oued "S₁" siliceux de granulométrie 0/6 et de module de finesse Mf (somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5,00 mm) de 3,7 a été rectifié par un sable fin "S₂" de granulométrie 0/2 et de Mf 1,56. Le sable obtenu, mélange de 60% du sable "S₁" et de 40% du sable "S₂", a un module de finesse de 2,85. Les courbes granulométriques sont illustrées par la figure 4.3.

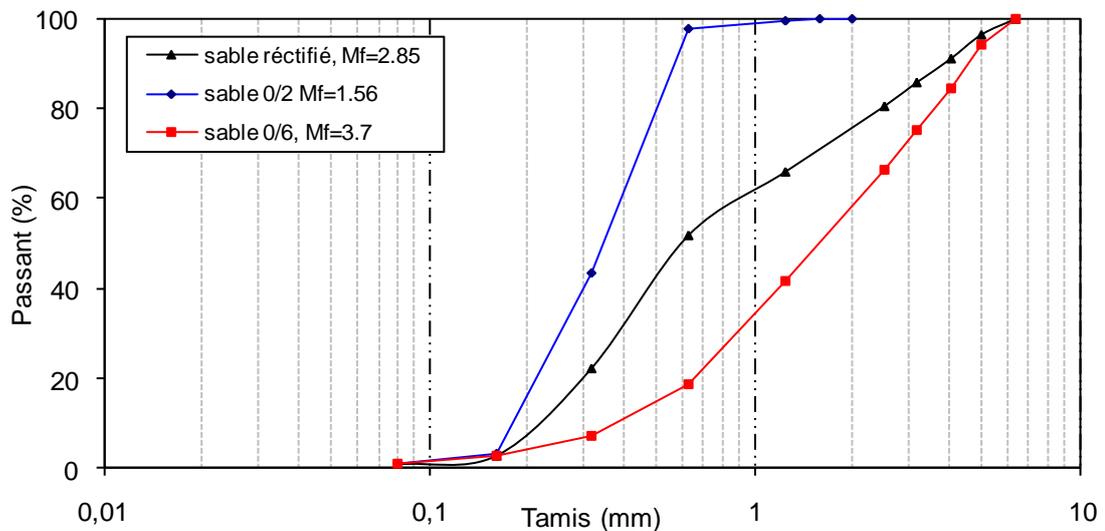


Figure 4.3 : Sables utilisé pour la confection des bétons étudiés

4.2.4 Les graviers

Deux types de graviers "G₁" et "G₂", d'origine calcaire, ont été utilisés pour la confection des bétons étudiés. Ils présentent respectivement une granulométrie 8/15 et 15/25. Leurs courbes granulométriques sont présentées en **annexe I**.

4.2.5 L'eau

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable de distribution, propre et exempte d'impuretés. L'eau utilisée pour la préparation des solutions d'immersion (essais de durabilité) est une eau déminéralisée.

4.2.6 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé pour les mélanges de béton est un superplastifiant réducteur d'eau non chloré à base de copolymère acrylique. Sa densité est de 1,11 et son extrait sec est de 30,2±1,3%. Sa fiche technique est présentée en **annexe I**.

4.3 Mortiers

4.3.1 Formulation

Les mortiers sont confectionnés à partir de sable normalisé (CEN 196-1) et de liant (ciment + laitier), en utilisant un rapport Eau/Liant (E/L) de 0,5. Deux types de ciment (A et B) sont utilisés. Le liant est obtenu par substitution massique du ciment par du laitier granulé et broyé. Le taux de substitution varie entre 10 et 60% selon la partie étudiée. Le tableau 4.7 résume les compositions des différents mortiers réalisés ainsi que leurs utilisations dans les différentes parties expérimentales.

Tableau 4.7: Composition des mortiers

| Désignation | Liant (g) | | | | | Sable (g) | E/L | Parties expérimentales | | |
|-------------|------------------------|------------------------|---------|-----|----|-----------|-----|------------------------|-----|---|
| | Ciment A CEM I 32,5 | Ciment B CEM I 52,5 | Laitier | | I | | | II | III | |
| | | | (g) | (%) | | | | | | |
| MA | MA0 | 450 | - | 0 | 0 | 1350 | 0,5 | √ | - | √ |
| | MA10 | 405 | - | 45 | 10 | | | | | |
| | MA20 | 360 | - | 90 | 20 | | | | | |
| | MA30 | 315 | - | 135 | 30 | | | | | |
| | MA50 | 225 | - | 225 | 50 | | | | | |
| | MA60 | 185 | - | 265 | 60 | | | | | |
| MB | MB0 | - | 450 | 0 | 0 | 1350 | 0,5 | √ | √ | √ |
| | MB30 | - | 315 | 135 | 30 | | | | | |
| | MB50 | - | 225 | 225 | 50 | | | | | |

4.3.2 Confection et conservation des éprouvettes

Les échantillons de mortier sont confectionnés suivant la norme EN 196-1. Le compactage des moules prismatiques 40x40x160 mm ou 40x140x160 mm est effectué à l'aide d'une table à chocs. Après coulage, les moules sont conservés dans une chambre humide pendant 24 heures jusqu'au démoulage. Une fois démoulés, ils sont conservés dans la chambre humide à 95% HR et $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'échéance de l'essai.

Afin de vérifier l'influence de la cure sur les propriétés mécaniques, une série d'éprouvettes, après une cure humide initiale de 7 jours, a été conservée à l'extérieur du laboratoire pendant 3 mois, durant une période d'été. Les données climatiques relatives à cette période (humidité relative et température) sont présentées en détail en **annexe I**, page 3 et résumées dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Données climatiques de la période où les éprouvettes ont été conservées à l'extérieur du laboratoire

| Périodes | Température ($^{\circ}\text{C}$) | | | Humidité relative (%) | | | Vitesse du vent (m/s) | | |
|-----------------------|------------------------------------|------|------|-----------------------|------|------|-----------------------|-------|------|
| | min | max | moy | min | max | moy | min | max | moy |
| 1 ^{er} Mois | 18 | 31,5 | 24,8 | 29,2 | 80,4 | 54,8 | 2,28 | 5,75 | 4,02 |
| 2 ^{ème} Mois | 21 | 35,5 | 28,3 | 15,0 | 74,1 | 44,6 | 2,12 | 6,85 | 4,49 |
| 3 ^{ème} Mois | 22 | 34,5 | 28,3 | 31,6 | 77,8 | 54,7 | 1,93 | 10,75 | 6,34 |

4.4 Bétons

4.4.1 Formulation

La composition des bétons a été calculée sur base de la méthode de Dreux [10]. La résistance caractéristique à la compression visée à 28 jours est de 30 MPa, avec une consistance plastique de 70 à 80 mm. Pour tous les mélanges de bétons réalisés, le dosage en liant (ciment + laitier) est de 365 kg/m^3 . Les liants utilisés sont obtenus par substitution partielle massique du ciment par différents pourcentages de laitier granulé et broyé (0, 15, 30 et 50%). Pour tous les liants utilisés, deux rapports Eau/Liant (E/L) ont été étudiés (0,65 et 0,42). Pour les mélanges de béton avec un rapport E/L de 0,42, un superplastifiant a été utilisé. Les différentes compositions des bétons sont présentées dans le tableau 4.9.

4.4.2 Confection et conservation des éprouvettes de béton

Les constituants du béton sont introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie et sont mélangés à sec pendant 30 secondes. L'eau est ensuite introduite

pendant une minute et le malaxage poursuivi durant 3 minutes. La mise en place du béton est réalisée conformément à la norme NF P 18-404 et NF P 18-405 [126, 127]. Après coulage, les éprouvettes sont couvertes par un film plastique pendant 24 heures. Après le démoulage, elles sont conservées dans l'eau saturée de chaux à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à échéance d'essai.

Tableau 4.9 : Composition des bétons

| Désignation Béton | E/L | Liant (kg/m^3) | | Agréats (kg/m^3) | | | SP * (%) | Slump (mm) |
|----------------------|------|----------------------------------|---------|---------------------------------------|------------|-------------|-------------|---------------|
| | | Ciment | Laitier | Sable 0/5 | G1 8/15 | G2 15/25 | | |
| A0 | 0,65 | 365 | 0 | 734 | 468 | 655 | - | 75 |
| A15 | | 310 | 55 | 734 | 468 | 655 | - | 80 |
| A30 | | 205 | 110 | 734 | 468 | 655 | - | 97 |
| A50 | | 182,5 | 182,5 | 734 | 468 | 655 | - | 104 |
| B0 | 0,42 | 365 | 0 | 734 | 468 | 655 | 1,8 | 55 |
| B15 | | 310 | 55 | 734 | 468 | 655 | 1,8 | 61 |
| B30 | | 205 | 110 | 734 | 468 | 655 | 1,8 | 58 |
| B50 | | 182,5 | 182,5 | 734 | 468 | 655 | 1,8 | 64 |

* SP : superplastifiant dosé en poids du liant.

4.5 Essais réalisés sur mortier

4.5.1 Essais mécaniques

La résistance à la traction par flexion a été effectuée sur trois éprouvettes prismatiques de mortier $40 \times 40 \times 160$ mm pour chaque variable, conformément à la norme EN 196-1 [128]. L'essai est réalisé à l'aide d'une presse de flexion trois points d'une capacité de 5 kN, en appliquant une vitesse de chargement de 50 N/s.

Les demi-prismes issus de l'essai de flexion sont testés en compression sur les faces latérales du moulage, sous une section de 40×40 mm² selon la norme EN 196-1. La résistance en compression est la moyenne de six mesures.

Les variables étudiées dans cette partie d'étude sont :

- Le taux de substitution du laitier et murissement

- *Etude à moyen terme* : essais réalisés à 2, 7, 28 et 90 jours pour les mortiers MA0, MA10, MA20, MA30, MA50 et MA60.
- *Etude à long terme et effet du type de ciment* : essais réalisés à 2, 7, 28, 90, 180 et 240 jours pour les mortiers MA0, MA20, MA30 et MA50 de même que pour MB0, MB30 et MB50.

- Le mode de cure :

Les éprouvettes ont été conservées en respectant deux modes de cure différents :

- En chambre humide, avec plus de 95% de HR et T $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
- A l'extérieur du laboratoire (voir tableau 4.8) après une cure humide initiale de 7 jours.

4.5.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation de la durabilité [129]. Elle est déterminée par l'absorption d'eau par immersion, qui est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. Dans cet essai, trois éprouvettes cylindriques de 80 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur, carottées à partir d'échantillons prismatiques 40x140x160 mm, sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (variation de 0,1% après 24h). Ainsi la masse sèche " M_{sec} " de l'échantillon est déterminée.

- Pour obtenir *la porosité accessible à l'eau par immersion* " P_W ", les échantillons ont été immergés dans l'eau jusqu'à saturation (variation en masse de 0,1% après 24 h) selon la norme NBN B 15-215 [130] et sont pesés dans l'air " M_{sat} " et dans l'eau " M_{eau} ". On définit P_W comme étant la porosité ouverte du matériau.
- Pour obtenir *la porosité accessible à l'eau par immersion sous vide* " P_{WV} ", les échantillons ont été saturés sous vide selon la norme NBN B24-213 [131] et pesés à l'air " M_{satV} " et dans l'eau " M_{eauV} ". P_{WV} est définie comme étant la porosité Totale du matériau.

Ainsi, les porosités P_W et P_{WV} sont calculées respectivement selon les équations 4.1 et 4.2 :

$$P_W = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

$$P_{WV} = \frac{M_{\text{satV}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{satV}} - M_{\text{eauV}}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

et la porosité fermée P_f peut être déduite par la différence entre la porosité totale P_{WV} et la porosité ouverte P_W .

4.5.3 Porosimétrie par intrusion de mercure

La porosité par intrusion de mercure constitue l'un des principaux outils pour la caractérisation de la structure poreuse. Cette méthode est régulièrement employée pour caractériser la structure interne de divers matériaux poreux tels que céramique, roches, argiles et matériaux cimentaires. Cet essai permet de quantifier plusieurs paramètres et, notamment, la porosité volumique totale, le diamètre moyen et critique des pores ainsi que la distribution des tailles, sur la base d'hypothèses sur la forme des pores.

a. Principe de l'essai et exploitation des résultats

Il s'agit de mettre un matériau poreux, sous vide, en présence d'un liquide non-mouillant (Figure 4.4). Le mercure a un angle de contact qui varie entre 117° et 145° [18]. On applique une pression de mercure P_{Hg} que l'on augmente de façon incrémentale. On mesure alors le volume cumulé de mercure (égale au volume de pore V_p) entrant dans les pores (de plus en plus fins) à chaque incrément. De cette manière, on peut tirer la relation entre le volume total des pores et la pression exercée.



Figure 4.4 : Mouillabilité des liquides selon l'angle de contact.

La pression nécessaire au mercure pour pénétrer dans le réseau poreux du matériau est fonction de l'angle de contact (θ), de la tension superficielle du mercure et de la géométrie des pores. En supposant que les pores remplis de mercure ont une forme cylindrique, le rayon moyen (r_p) de la classe de pores pénétrés peut être lié à la pression de mercure selon l'équation (4.3) de WASHBURN [93]:

$$r_p = \frac{2 \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos \theta}{P_{Hg}} \quad (4.3)$$

dans laquelle :

θ = angle de contact entre la surface et le mercure,

σ_{Hg} = tension superficielle du mercure.

A partir de cette relation, on peut représenter *la courbe d'intrusion de mercure* qui représente le volume cumulé des pores en fonction du rayon des pores : $V_p = V_p(r_p)$. Par différentiation, on obtient aussi *la distribution des volumes des pores*, naturelle ($\Delta V_p / \Delta r_p = f(r_p)$) ou logarithmique ($\ln(\Delta V_p) / \ln(\Delta r_p) = f(r_p)$) en fonction du rayon des pores ; elle est plus souvent appelée *distribution des tailles des pores*, qui met en évidence le mode poreux caractéristique de la microstructure du matériau.

b. Préparation des échantillons

Avant de lancer l'essai d'intrusion, il est impératif de sécher complètement l'échantillon poreux de tout liquide, libre ou adsorbé. En effet, l'eau adsorbée résiduelle pourrait changer l'angle de contact entre le mercure et la phase solide, ce qui peut affecter, pour une pression donnée, l'évaluation du diamètre du pore (voir Equation 4.3). Plusieurs modes de séchage sont proposés dans la littérature [18, 132, 133]. Les méthodes les plus courantes sont l'étuvage à 105°C, l'échange eau-solvant (méthanol, pentane, ..) ou encore la mise en équilibre par des hydrates de perchlorate de magnésium (poudre blanche très avide d'eau). Dans notre cas, pour protéger au mieux la structure poreuse du matériau, on a procédé par un étuvage des échantillons à une température de 45°C jusqu'à masse constante (variation de masse de 0,001g après 24h). Les échantillons sont ensuite placés dans un dessiccateur en présence de gel de silice. Cette méthode est proche de celle utilisée par le LCPC [133], qui consiste en un séchage sous vide à 45°C en présence de gel de silice, pendant 14 jours.

c. Dispositif expérimental et conduite de l'essai

L'appareil de porosimétrie utilisé est un porosimètre "*Micromeritics Pore Sizer 9320(R)*" (Figure 4.5) permettant d'accéder à des pores dont le rayon est compris entre 60 μm et 3,7 nm, correspondant à des pressions variant de 0,001 à 200 MPa.

Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure se déroulent en deux étapes :

1. *l'intrusion à basse pression*, pour des pressions variant de 0,01 à 0,1 MPa. Un poste basse pression "Pascal 140" est utilisé ;

2. *l'intrusion à hautes pressions*, comprises entre 0,1 et 200 MPa, en utilisant un poste haute pression "Pascal 240".

L'échantillon est tout d'abord placé dans le pénétromètre (Figure 4.5) : il s'agit d'une cellule cylindrique en verre, reliée à un tube métallique contenant la réserve de mercure. L'ensemble est placé dans un premier temps dans l'unité de basse pression (Pascal 140) avant de faire le vide (environ 0,01 MPa) pour désaérer l'échantillon. La cellule d'injection est alors remplie de mercure et le vide dans le pénétromètre est progressivement équilibré par palier de 0,001 MPa puis de 0,01 MPa jusqu'à arriver à la mesure finale réalisée à 0,1 MPa. Le pénétromètre est ensuite placé dans l'unité à haute pression (Pascal 240) qui permet d'atteindre une pression maximale de 200 MPa et ainsi d'accéder aux pores ayant un rayon de 3,7 nm.

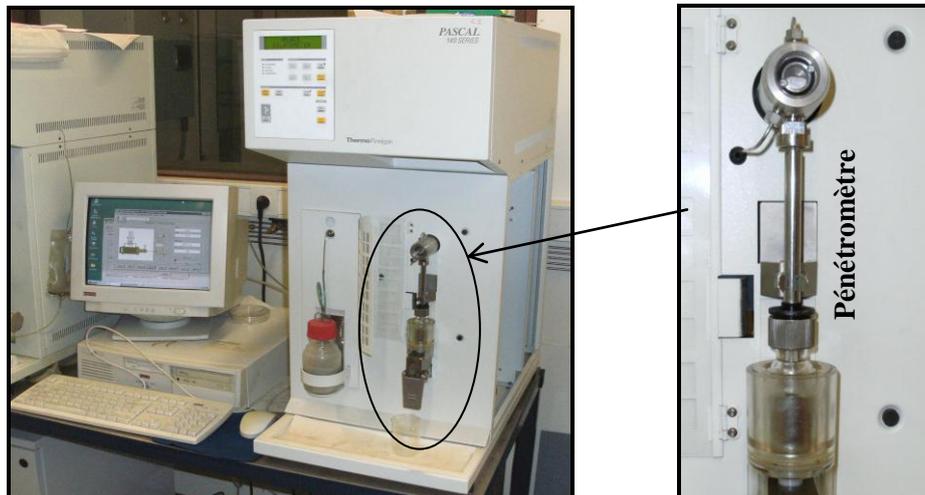


Figure 4.5 : Porosimètre à mercure.

4.5.4 Absorption d'eau par capillarité

Le transfert d'eau dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface liquide/solide/gaz dans les capillaires, est appelé absorption d'eau par capillarité. L'absorption capillaire dépend de la structure poreuse (porosité ouverte, taille et interconnexion des pores) et de l'état hydrique du matériau.

La pression capillaire P_i dans un pore, considéré comme cylindrique, est régie par la loi de JURIN, en fonction du rayon r_i , de la tension superficielle du fluide γ et de l'angle de contact θ (Equation 4.4). Ainsi, la hauteur d'ascension h_i , qui est exprimée en fonction

de la pression capillaire P_i , de la masse volumique de l'eau ρ et de l'accélération de la pesanteur g , est inversement proportionnelle au rayon r_i du capillaire (Equation 4.5).

$$P_i = \frac{2 \cdot \sigma_i \cdot \cos \theta}{r_i} \quad (4.4)$$

$$h_i = \frac{P_i}{g\rho} = \frac{2 \cdot \sigma_i \cdot \cos \theta}{r_i g\rho} \quad (4.5)$$

Par contre, la capacité d'absorption du liquide dans le capillaire est proportionnelle à son rayon r_i [93]. En effet, si on considère un capillaire horizontale, communiquant avec un liquide d'un côté et de l'autre avec de l'air, la loi de POISEUILLE permet d'écrire le débit de pénétration du liquide dans le capillaire. Ainsi, quant un liquide de viscosité η pénètre dans le capillaire à une distance x , son débit Q_i , à cet instant, est donné par l'équation 4.6 :

$$Q_i = \frac{\pi P_i r^4}{8\eta x} \quad (4.6)$$

Où P_i est la pression capillaire (Equation 4.4).

d'où
$$Q_i = \frac{\pi \sigma \cos \theta r^3}{4\eta x} \quad (4.7)$$

a. Préparation et prétraitement des échantillons

Dans cet essai, des blocs de mortier (MB0, MB30 et MB50) de 160x140x40 mm sont préparés. Après leur conditionnement en chambre humide (95% HR et T 20°C) pendant la période de maturation étudiée (90 et 365 jours), des éprouvettes cylindriques (\varnothing 80 mm, H 40 mm) sont carottées et rectifiées des deux faces. Les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée pendant un minimum de 7 jours à 45°C, jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0,1\%$ en 24 heures). Une hauteur de 1 cm de la surface latérale des éprouvettes a été enduite par de la résine, pour permettre une pénétration d'eau unidirectionnelle (Figure 4.6).

b. Conduite de l'essai

L'essai est réalisé selon la norme EN 13057 [134]. L'échantillon est placé sur deux appuis collés sur le fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 2 ± 1 mm à partir de la base de l'éprouvette. Ce niveau d'eau est maintenu constant pendant la durée de l'essai à l'aide du dispositif montré sur la figure 4.6. La variation de la masse est mesurée après 4,

9, 16, 25, 36, 49 minutes, de même qu'après 1, 4, 8, 24 et 48 heures. La pesée des éprouvettes est effectuée après les avoir essuyées à l'aide d'une peau de chamois humide pour enlever les gouttes d'eau de la surface.

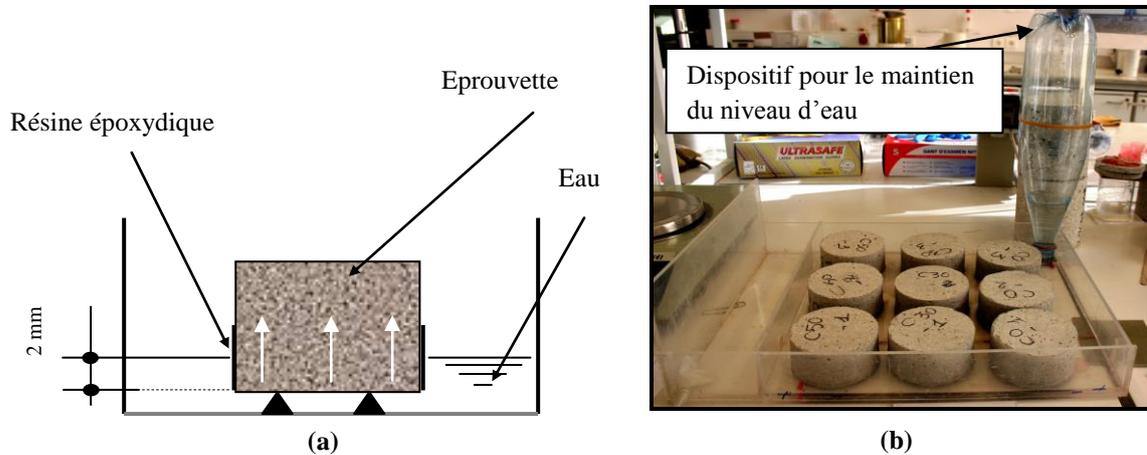


Figure 4.6 : Schéma (a) et vue d'ensemble (b) du dispositif d'essai de l'absorption d'eau par capillarité.

c. Coefficient d'absorption

L'absorption d'eau par unité de surface Ca_t , après un temps t d'immersion est déterminée par l'équation 4.8 [135]:

$$Ca_t = \frac{M_t - M_o}{A} \quad (4.8)$$

L'absorption d'eau Ca_t est proportionnelle à la racine carrée du temps (Equation 4.9). De ce fait, un coefficient d'absorption S est déterminé par régression linéaire de l'ensemble des mesures se trouvant dans le domaine d'évolution linéaire de l'absorption Ca_t , le plus souvent entre 1 et 8 heures. Ce coefficient indique la tendance de l'éprouvette à s'imprégner d'eau par action capillaire, sans aucune pression extérieure.

$$Ca_t = S\sqrt{t} \quad (4.9)$$

La norme EN 13057 [134] présente la méthode de calcul du coefficient S pour différents cas d'évolution de l'absorption en fonction du temps.

d. Taux de saturation

Le taux de saturation τ_t en fonction du temps d'absorption est calculé suivant l'équation 4.10 :

$$\tau_t = \frac{M_t - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}} \times 100(\%) \quad (4.10)$$

dans laquelle :

M_t = masse à l'instant t (g),

M_{sec} = masse sèche (g),

M_{sat} = masse saturée (g).

4.5.5 Diffusion des ions de chlorures

La présence de chlorures dans le béton est la cause de dégradations, en particulier pour les armatures. Principalement, on distingue deux sources de chlorures :

- *Source interne*, où les chlorures peuvent être présents au gâchage à partir des composants du béton (granulats marins ou contaminés, adjuvant, eau de gâchage). Les normes limitent habituellement la teneur en chlorure initiale.

- *Source externe*, principalement les sels de déverglaçage (NaCl) ou l'environnement marin. Dans ce dernier, le béton peut être immergé, exposé à des cycles de mouillage/séchage à cause des marées ou exposé aux embruns. Occasionnellement, les eaux souterraines ou des processus industriels peuvent être à l'origine de la présence de chlorures [117]. Ces chlorures peuvent pénétrer dans le béton par capillarité, sous l'effet de variation d'humidité (cycles de séchage/mouillage) ou par diffusion sous l'effet d'un gradient de concentration.

Dans notre étude, pour évaluer la perméabilité aux ions chlore des mortiers à base de ciment au laitier, un essai de diffusion naturelle en régime stationnaire et un essai de diffusion sous champ électrique (essai de conduction) ont été réalisés.

a. Essai de diffusion des ions chlore en régime stationnaire

L'essai consiste à sceller une tranche de mortier entre deux compartiments (Figure 4.7). La cellule 1 contient de l'eau saturée en chaux et la cellule 2 de l'eau saturée en chaux et 1 mole (58,44 g) de NaCl : ainsi, les chlorures migrent par diffusion de la cellule 2 vers la cellule 1. Un temps initial est nécessaire pour que les ions chlore traversent la tranche de mortier. Cette période correspond au régime de diffusion transitoire. Lorsque le flux d'ions traversant la tranche devient constant en fonction du temps, le régime est dit permanent (ou stationnaire) et nous permet de calculer le coefficient de diffusion effectif. Au cours de l'essai, des prélèvements réguliers permettent de déterminer la concentration de chlorures

dans la solution aval (cellule 1) en fonction du temps. Ainsi, la diffusion des chlorures pour les mortiers MB0, MB30 et MB50 a été étudiée après une cure humide de 90 jours et de 180 jours, respectivement.

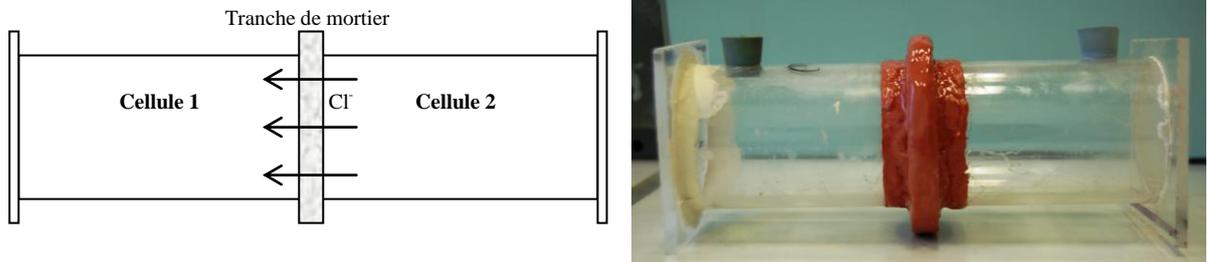


Figure 4.7 : Cellule de diffusion en régime stationnaire.

✓ Préparation des échantillons et montage des cellules

Pour cet essai, des tranches de 8 ± 1 mm d'épaisseur et de 80 mm de diamètre, ont été sciées dans la partie centrale des éprouvettes cylindriques (Figure 4.8), carottées dans des prismes de mortier de dimensions 160x140x40 mm. Une description complète du montage des cellules de diffusion est présentée dans **l'annexe I**. Les échantillons de mortier sont placés dans la solution saturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avant essai pour éviter la présence de bulles d'air qui peuvent nuire au mécanisme de diffusion.

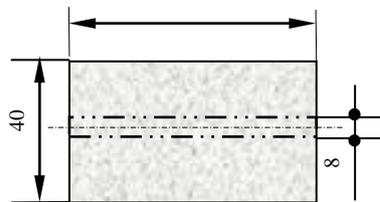


Figure 4.8 : Prélèvement de l'échantillon pour l'essai de diffusion en régime stationnaire.

✓ Prélèvement et analyse des chlorures (Mode opératoire)

Afin de déterminer le temps de passage des chlorures à travers la tranche de mortier, les prélèvements ont été réalisés 1 fois par semaine pendant le premier mois de l'essai ; ils ont été ensuite plus espacés. Un volume de 10 ml de solution de la cellule 1 est prélevé. La concentration en chlorures est alors déterminée par titrage potentiométrique. **L'annexe I** reprend de manière détaillée la procédure suivie pour cette analyse.

Après chaque prélèvement, 10 ml d'eau déminéralisée saturée en chaux sont rajoutés dans la cellule 1 afin d'éviter le dessèchement de la partie supérieure de l'échantillon. Cette quantité est alors prise en compte lors du calcul de la concentration en chlorure de la solution. La quantité cumulée des chlorures qui a traversé l'échantillon à l'échéance "i" est calculée à partir de l'équation 4.11 :

$$Q_i = C_i \cdot V + \sum_{n=1}^{i-1} C_{i-n} \cdot P \quad (4.11)$$

dans laquelle :

C_i = la concentration en chlorure mesurée à l'instant i,

P = le volume du prélèvement (10 ml),

V = le volume de la cellule.

La concentration en chlorures corrigée " C_i' ", prenant compte des chlorures prélevés, à l'échéance "i" est alors donné par l'équation 4.12 :

$$C_i' = \frac{Q_i}{V} \quad (4.12)$$

✓ Détermination du coefficient de diffusion effectif

Lorsque le flux ionique atteint le régime permanent, le coefficient de diffusion effective peut être calculé. L'expression du flux constant (état stationnaire) parallèle à la direction de diffusion s'exprime selon la première loi de Fick (Equation 4.13) :

$$J = \frac{D_e}{e} (C_2 - C_1) \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}) \quad (4.13)$$

dans laquelle

D_e = le coefficient de diffusion effectif (m^2/s),

e = l'épaisseur de la tranche de mortier (m),

C_1 = la concentration en chlorures dans la cellule 1 (kg/m^3),

C_2 = la concentration en chlorures dans la cellule 2 (kg/m^3).

Le flux J massique par unité de surface est donné par l'équation 4.14 [97]:

$$J = \frac{dm}{dt} \frac{1}{A} = \frac{V}{A} \frac{dC_1}{dt} \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}) \quad (4.14)$$

dans laquelle

m = la masse des chlorures qui ont traversé la tranche de mortier (kg),

A = la surface de la tranche (m²),

V_1 = le volume de la cellule 1(avale) (m³).

En égalant les deux équations (4.13 et 4.14), il s'ensuit (Equation 4.15) :

$$\frac{V}{A} \frac{dC_1}{dt} = \frac{D_e}{e} (C_2 - C_1) \quad (4.15)$$

En régime stationnaire (Figure 4.8), en exprimant graphiquement la concentration de la cellule 1 en fonction du temps, le coefficient de diffusion effectif est calculé comme suit :

$$D_e = \frac{V_1}{A} \frac{\Delta C_1}{\Delta t} \frac{e}{(C_2 - C_1)} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4.16)$$

dans laquelle $\Delta C/\Delta t$ représente l'augmentation de la concentration des chlorures dans la cellule 1 (pente de la droite de la figure 4.9).

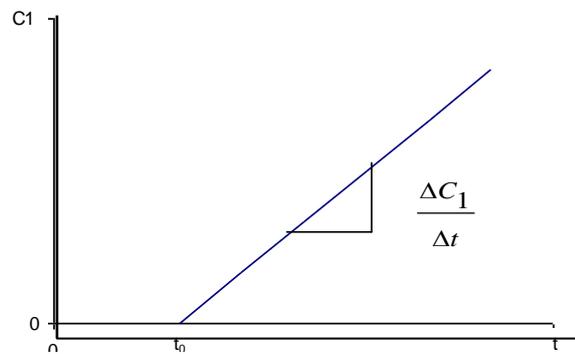


Figure 4.9 : Evolution de la concentration en chlorures C_1 dans la cellule aval en fonction du temps.

b. Essai de conduction

Après 90 jours et 180 jours de cure humide (95% HR et 20°C), des éprouvettes de mortier (MB0, MB30 et MB50) de 96 mm de diamètre et 50 mm de hauteur sont obtenues en sciant de 10 mm, les deux extrémités d'éprouvettes, initialement moulées à 70 mm de hauteur. Avant l'essai, la surface latérale de l'échantillon est enduite de résine époxy. Après durcissement de la résine, l'éprouvette est saturée sous vide pendant 18 heures, conformément à la norme ASTM C 1202 [136]. Une fois saturé, l'échantillon est disposé

entre deux cellules, contenant un réservoir de manière à ce qu'une des faces de l'éprouvette baigne dans une solution de soude (NaOH) à 0.3 N et l'autre dans une solution de 3% de chlorure de sodium (NaCl), comme le montre la figure 4.10. Les cellules sont ensuite branchées au dispositif de mesure, les deux extrémités servant d'anode et de cathode pour le passage d'un courant de 60 volts durant une période de 6 heures.

Les ions chlore étant chargés électriquement, lorsque le liquide est soumis au champ électrique, ils se mettent en mouvement vers l'électrode du signe opposé. L'intensité du courant (en Ampère) est mesurée toutes les 30 minutes pendant la durée de l'essai (380 minutes). En intégrant la courbe présentant l'intensité en fonction du temps, on obtient la charge totale Q (en Coulombs) qui a traversé l'échantillon. Cette charge peut être calculée de manière simplifiée à partir de l'équation 4.17.

$$Q = 900. (I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + 2.I_{300} + 2.I_{330} + I_{360}) \text{ (Coulomb)} \quad (4.17)$$

Le classement de la perméabilité aux ions chlore du béton en fonction de la charge totale Q est donné au tableau 4.10. Dans notre cas, les essais étant réalisés sur du mortier, ce classement est donné à titre indicatif.

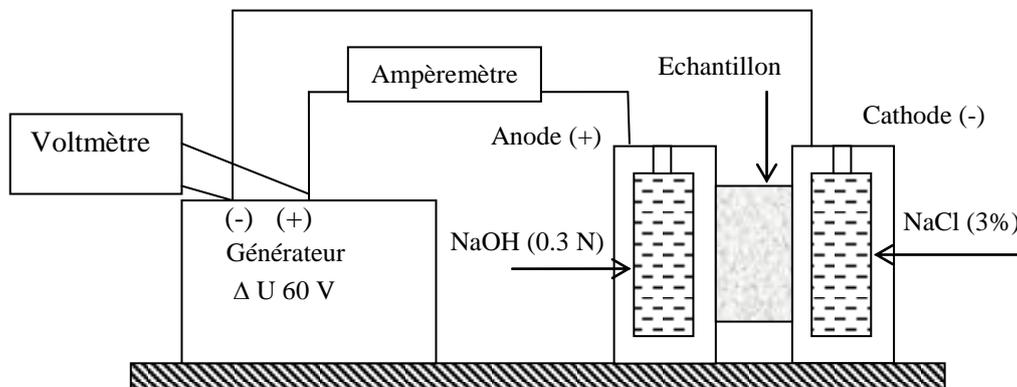


Figure 4.10 : Schéma du dispositif de l'essai de conduction.

Tableau 4.10: Perméabilité aux ions chlore des bétons selon la charge Q [137].

| Charge (Coulomb) | Perméabilité aux ions chlore | Type de béton |
|------------------|------------------------------|-------------------|
| < 100 | négligeable | Béton de polymère |
| 100-1000 | très faible | Béton au latex |
| 1000-2000 | faible | E/C < 0.40 |
| 2000-4000 | modérée | E/C 0,45 et 0,50 |
| >4000 | élevée | E/C >0,60 |

4.5.6 Résistance aux sulfates et à l'eau de mer

Les sulfates peuvent se trouver dans plusieurs milieux (eau de mer, eaux souterraines,..), à des concentrations pouvant causer des désordres importants dans les structures en béton, notamment, dans les parties enterrées. Les différentes sources de sulfates ainsi que leurs mécanismes d'attaque sur les matériaux cimentaires ont été mentionnés précédemment dans le chapitre 3 (section 3.5.1).

L'étude a été conduite en deux parties :

Partie I : pour étudier l'effet du taux de substitution du laitier sur la résistance à l'attaque par les sulfates, une série d'éprouvettes de mortier (MA10, MA20, MA30, MA50 et MA60%) à base de ciment A (CEM I 32,5), après une cure humide de 60 jours, a été immergée dans des solutions de :

- 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4).
- 5% de sulfate de magnésium (MgSO_4).

Partie II : dans le but d'étudier l'influence du type du ciment et de la durée de cure humide sur la résistance aux sulfates et à l'eau de mer des mortiers à base de ciment au laitier, deux séries d'éprouvettes de mortier (MB0, MB30 et MB50), à base de ciment B (CEM I 52,5), après 28 ou 90 jours de cure humide, ont été immergées dans des solutions de :

- 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4).
- 5% de sulfate de magnésium (MgSO_4).
- eau de mer (Tableau 4.11).

Pour des raisons de comparaison, dans les deux parties étudiées, des éprouvettes témoins ont été conservées dans l'eau. Il faut également mentionner que les solutions de sulfates et d'eau de mer ont été changées chaque mois.

Tableau 4.11 : Composition de l'eau de mer (pour 1000 g d'eau) [138].

| Composés | Proportion (g) |
|---|----------------|
| Sulfates de chlorure (NaCl), | 30,0 |
| Chlorures de magnésium ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), | 6,0 |
| Sulfates de magnésium ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), | 5,0 |
| Sulfates de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), | 1,5 |
| Bicarbonate de potassium (KHCO_3). | 0,2 |

Dans la partie I, l'expansion a été mesurée sur des éprouvettes (25x25x285 mm) selon la norme ASTM C 267 [139], en utilisant un comparateur de précision de 1 µm. Les mesures sont effectuées à l'aide de plots, fixé sur les faces latérales de l'éprouvette à une distance de 250 mm (Figure 4.11).

Pour des raisons de disponibilité du laitier d'El Hadjar, la mesure de l'expansion dans la partie II de l'étude a été réalisée sur des éprouvettes 20x20x160, mm selon la norme ENV 196-10 [138] (Figure 4.12).

Dans les deux parties (I et II), les mesures ont été prises tous les mois durant une période d'immersion de 12 mois.



Figure 4.11 : Mesure de l'expansion (éprouvettes 25x25x285 mm)



Figure 4.12 : Mesure d'expansion (éprouvette 20x20x160mm)

En plus de l'expansion, les éprouvettes (40x40x160mm) de mortier (MA0, MA20, MA30 et MA50) à base de ciment A (CEM I 32,5) au laitier, immergées dans les sulfates pendant 60, 90 180 et 300 jours, ont été testées pour déterminer leur résistance en flexion et en compression. Ces résistances sont comparées à celles des éprouvettes témoins, conservées dans l'eau.

4.6 Essais sur béton

4.6.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons étudiés est déterminée sur des cubes de 70 mm après 28, 90 et 360 jours. L'essai est réalisé conformément à la norme EN 12390-3 [140]. Une presse de compression de capacité 3000 kN avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s est utilisée.

4.6.2 Absorption capillaire

Pour cet essai, des éprouvettes cubiques de 70 mm ont été utilisées. Après 28, 90 et 360 jours de cure humide, elles sont séchées à 105°C jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0,1\%$ en 24 heures) et leurs faces latérales sont enduites de résine époxy. Les échantillons sont ensuite immergés dans l'eau sur une hauteur de 4 mm et l'absorption est mesurée après 4, 9,16, 25, 36, 49, 64 et 81 minutes et le coefficient d'absorption est calculé.

4.6.3 Perméabilité au gaz (azote)

L'essai de perméabilité au gaz est réalisé sur des disques de 50 mm d'épaisseur et 150 mm de diamètre, obtenus par sciage des éprouvettes cylindriques de béton de 150 mm de hauteur. Après la période de cure humide étudiée (28, 90 et 360 jours), les éprouvettes sont séchées à l'étuve à 70°C, jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0,1\%$ en 24 heures).

La méthode utilisée, dite de CEMBUREAU [141], consiste à soumettre l'échantillon à un gradient de pression constant et à mesurer, lorsque le régime permanent est atteint, le débit d'écoulement du gaz à travers cet échantillon. Le schéma de principe du perméamètre est donné par la figure 4.13. Cet appareil permet de mesurer des perméabilités de l'ordre de 10^{-19} à 10^{-14} m². La relation de Hagen-Poiseuille pour les écoulements laminaires d'un fluide compressible dans des milieux poreux est employée pour la détermination du coefficient de perméabilité au gaz K pour une pression donnée (Equation 4.18) :

$$k = \frac{2 \cdot P_a \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{A \cdot (P_0^2 - P_a^2)} \quad (4.18)$$

dans laquelle

Q = le débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (m³/s).

P_a = la pression atmosphérique (Pa),

L = l'épaisseur d'échantillon (m),

A = la section d'échantillon (m²),

P₀ = la pression absolue appliquée à l'amont (Pa),

μ = la viscosité de l'azote (1,7510⁻⁵ Pa.s, à 20°C).

Pour les bétons de type A (E/L=0,65), trois pressions d'entrée P₀ (1,5, 2,0 et 2,5 bar) sont étudiées pour chaque éprouvette. Pour les bétons de type B (E/L=0,42), une pression supplémentaire de 3,0 bar a été étudiée. Le coefficient de perméabilité (apparent) est obtenu par la moyenne des valeurs obtenues pour chaque pression, pour deux éprouvettes.

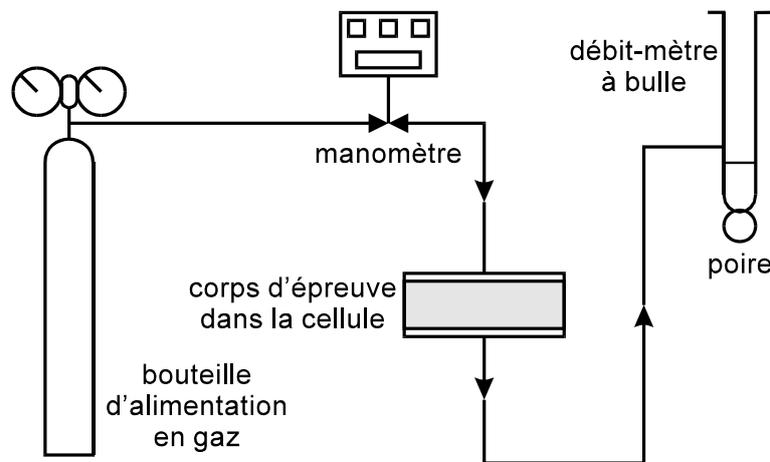


Figure 4.13 : Schéma du perméamètre de type CEMBUREAU.

4.6.4 Essai de pénétration d'eau sous pression

L'essai de pénétration d'eau sous pression (perméabilité à l'eau) est effectué selon la norme DIN 1048 [142], sur les bétons étudiés, après un mûrissement dans l'eau à 20°C pendant 28, 90 et 360 jours. Avant l'essai, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

L'essai, comme le montre la figure 4.14, consiste à appliquer de l'eau sous pression sur la face inférieure de l'éprouvette, pendant un temps donné et de mesurer la profondeur de pénétration de l'eau (mm). Dans notre cas, une pression de 3 bars est appliquée pendant 24 heures. À la fin de l'essai, l'éprouvette est fendue en deux parties par un essai de traction par fendage (essai Brésilien) et la profondeur de la pénétration de l'eau est mesurée (mm). Pour chaque variable, deux éprouvettes sont testées et la valeur moyenne est calculée.

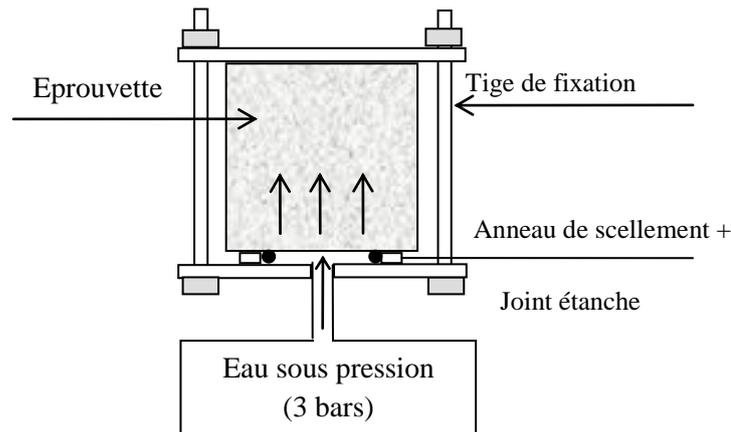
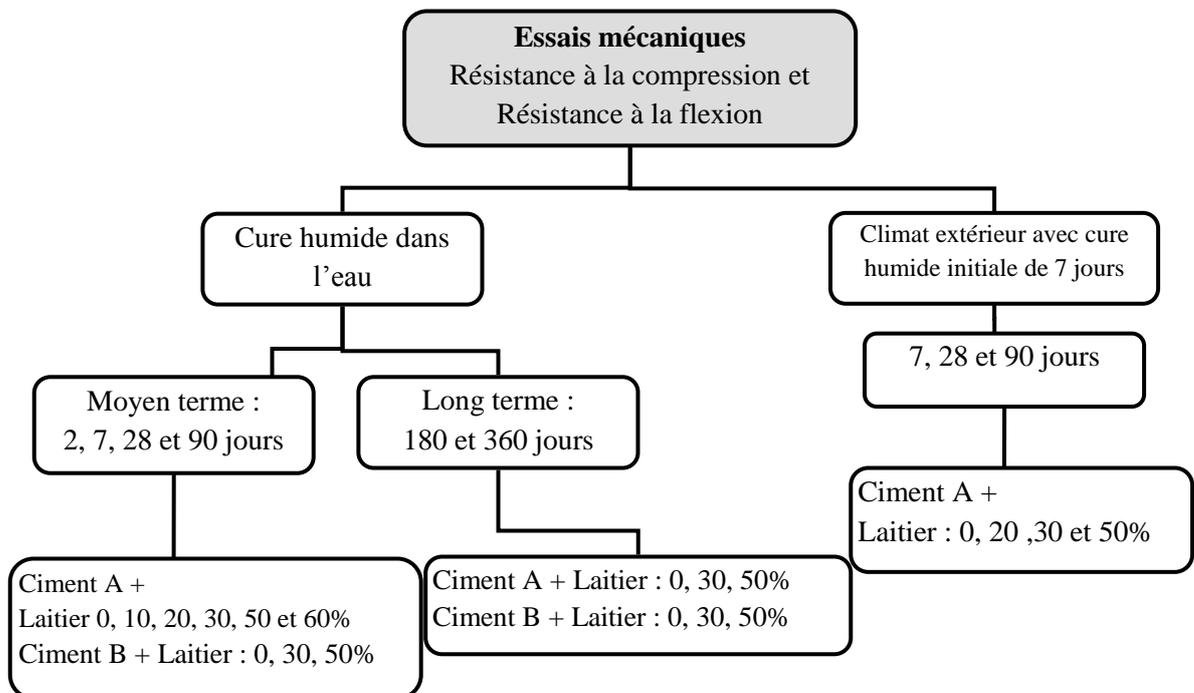


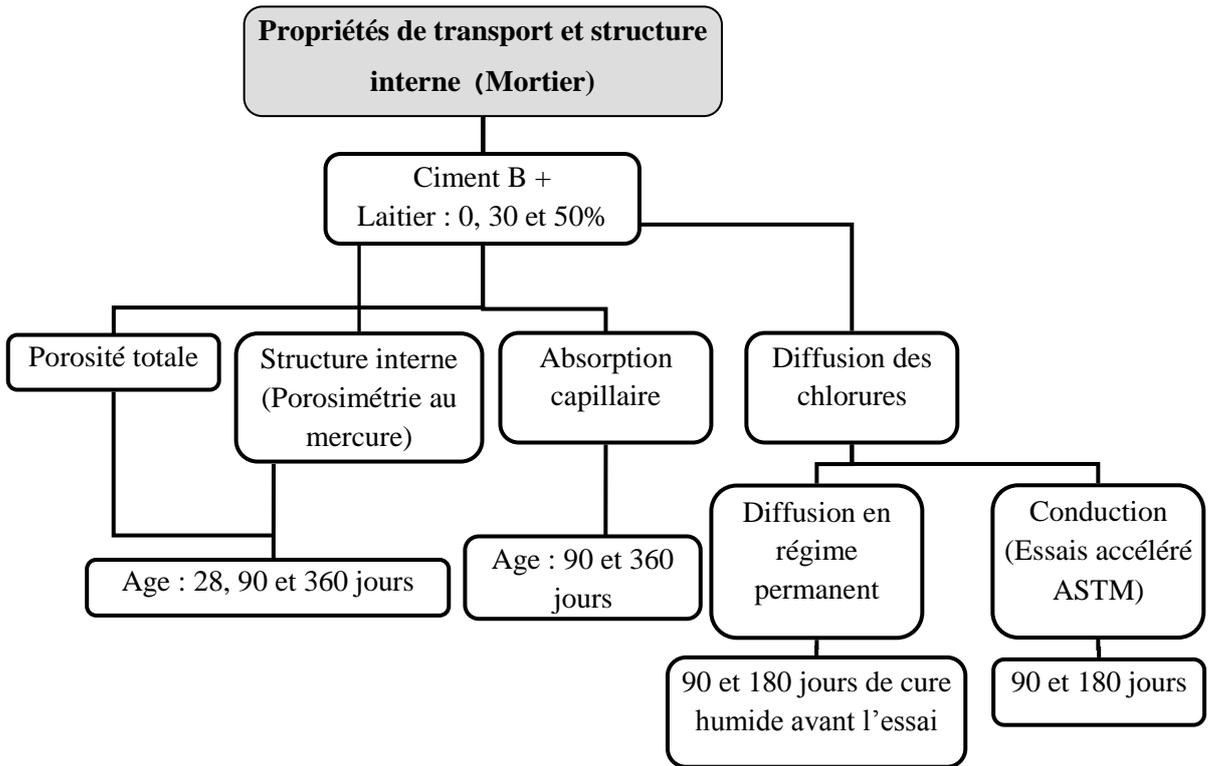
Figure 4.14 : Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression.

4.7 Variables étudiées

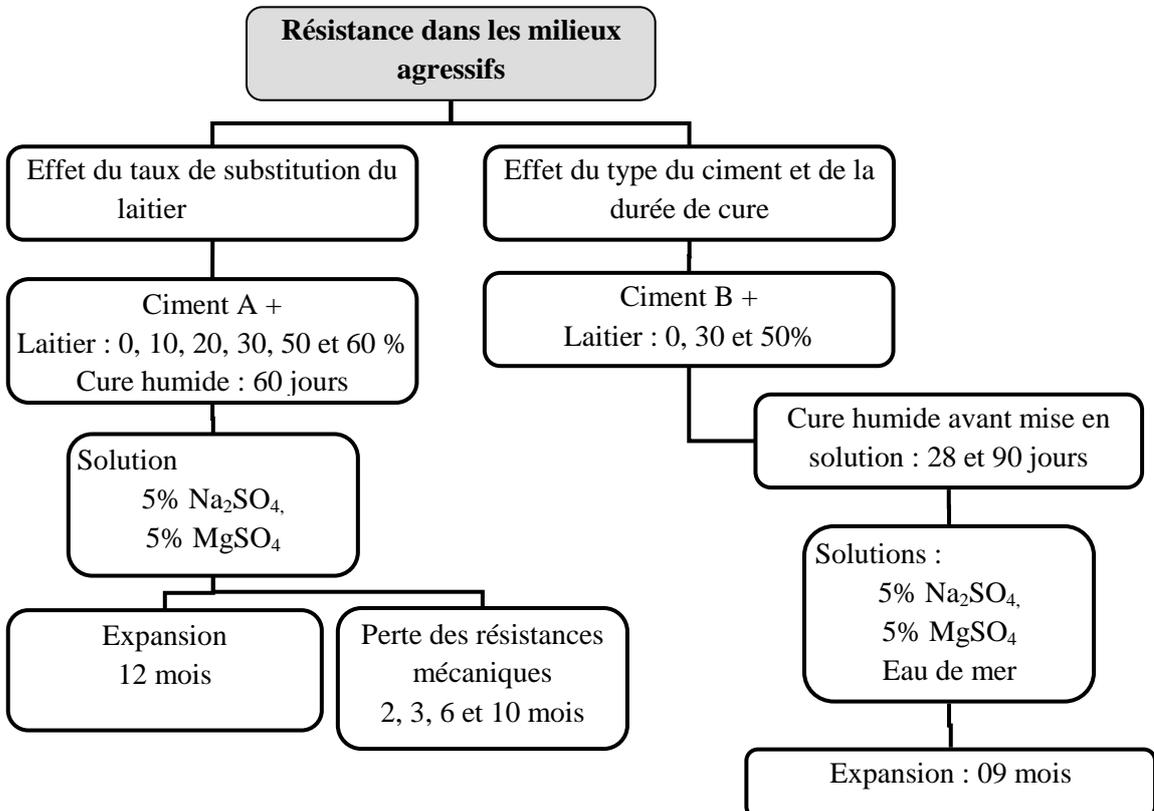
4.7.1 Caractéristiques mécaniques des mortiers



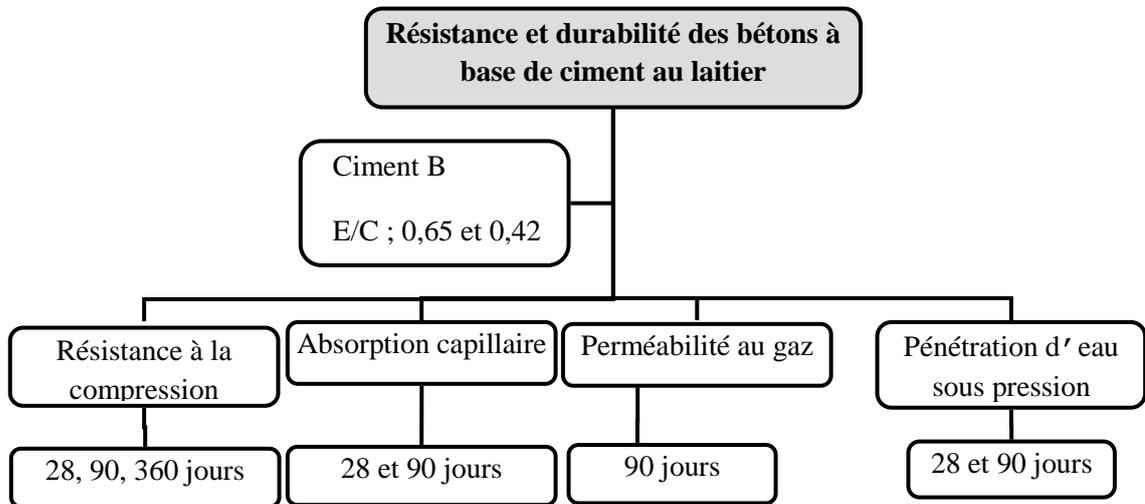
4.7.2 Microstructure et propriétés de transport des mortiers



4.5.3 Résistance des mortiers à l'attaque des sulfates et de l'eau de mer



4.7.4 Résistance mécanique et durabilité des bétons



Chapitre 5

CARACTERISTIQUES MECANIKES DES CIMENTS AU LAITIER D'EL HADJAR

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des essais de caractérisation mécanique des mortiers à base de ciment avec et sans laitier sont présentés. L'effet du type du ciment ainsi que le mode et la durée de la cure sur les résistances mécaniques sont étudiés. Une analyse sommaire et des tentatives d'interprétation et d'explication de ces résultats sont données.

5.2 Evolution des résistances mécaniques à moyen terme (jusqu'à 90 jours)

5.2.1 Résistance en compression

Rappelons que dans cette partie de l'étude, seul le ciment de type "A" a été utilisé. Les résultats de la résistance en compression des éprouvettes conservées en cure humide à 20°C, jusqu'à 90 jours, en fonction du pourcentage de substitution du laitier sont représentés dans les figures 5.1 et 5.2. A l'issue de ces résultats, on peut observer une augmentation de la résistance en compression avec l'âge (Figure 5.1), pour tous les mélanges étudiés. Cette augmentation est due à l'hydratation continue en fonction du temps.

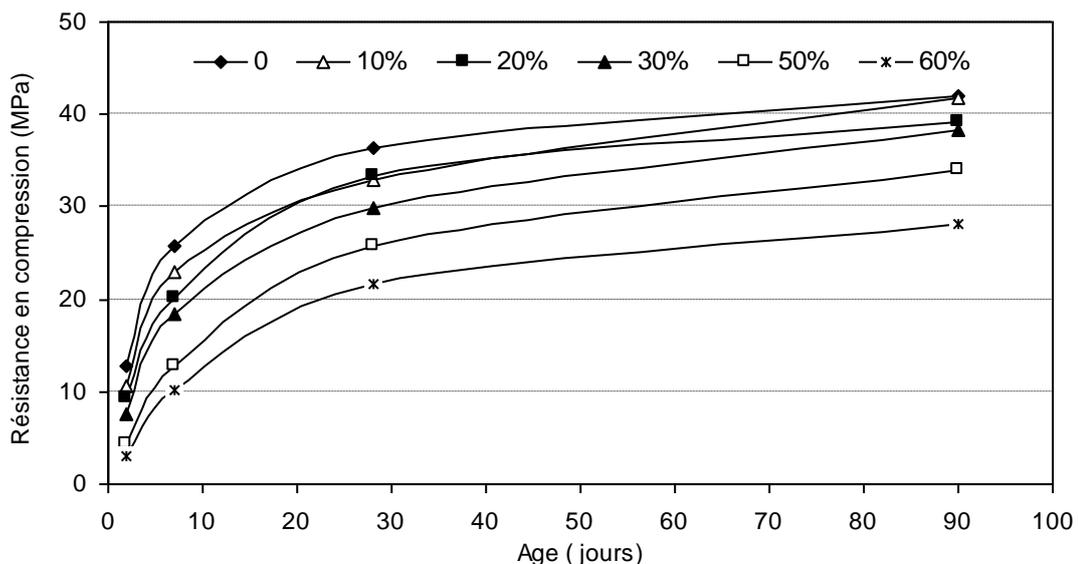


Figure 5.1 : Evolution de la résistance en compression des ciments au laitier en fonction de l'âge (cure humide, 20°C).

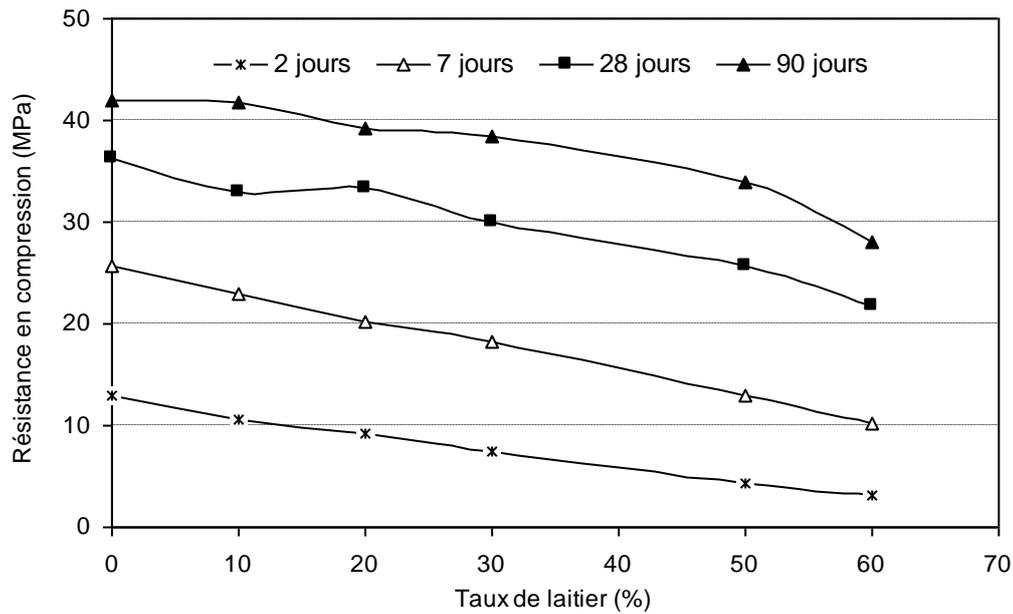


Figure 5.2 : Effet du laitier sur la résistance en compression des éprouvettes conservées en cure humide à 20°C.

Au regard de la figure 5.2, on peut constater que l'augmentation du dosage en laitier dans le ciment conduit à une diminution, directement proportionnelle, de la résistance en compression, quelque soit l'âge. Cependant, cet effet est plus accentué aux jeunes âges (2 et 7 jours) où la résistance des ciments au laitier se développe moins rapidement que celle du ciment sans ajout. Ceci engendre un faible accroissement de résistance comme le montre la figure 5.3, qui présente le taux de développement des résistances des mortiers au laitier par rapport à la résistance du mortier de référence (à base de CEM I). A titre d'exemple, à 7 jours, on enregistre une diminution de résistance de 21, 29 et 50% pour respectivement 20, 30 et 50% d'ajout par rapport à celle du ciment témoin (CEM I). Toutefois, cette diminution de résistance, due à l'incorporation du laitier, devient moins importante avec l'âge à l'exception du ciment avec 60% de laitier qui a présenté un développement de résistance relativement faible, à tout âge (de l'ordre de 60% à 28 jours et de 67% à 90 jours). A 28 et 90 jours, la résistance des ciments avec 10, 20 et 30% de laitier se rapproche de celle du ciment sans ajout (92% de la résistance du mortier de référence, à 90 jours, pour un mélange à 30% d'ajouts). Le ciment avec 50% de laitier quant à lui, par rapport au CEM I, a atteint un développement de 71% à 28 jours et de l'ordre de 80 % après 90 jours de maturation.

Le laitier ayant un caractère hydraulique latent, la résistance des ciments au laitier se développe lentement, notamment aux jeunes âges. Cet effet est d'autant plus important que le pourcentage de laitier augmente. Néanmoins, un laitier présentant une bonne réactivité hydraulique, à partir de 28 jours, s'hydrate en présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, libérée par l'hydratation du clinker et confère au ciment une résistance comparable, sinon supérieure à celle du ciment Portland sans ajout [6, 143, 144].

Dans notre cas, le faible développement de la résistance des ciments au laitier, même après 28 jours, particulièrement pour les taux de laitier supérieurs à 30%, peut être expliqué par la réactivité limitée du laitier utilisé. En effet, comme il a été montré au chapitre 4, le laitier d'El Hadjar présente un indice d'activité hydraulique (NF P 18-506 [124]) d'environ 0,70, ce qui le classe dans la gamme des laitiers de faible activité.

Le même comportement du laitier d'El Hadjar a été observé dans des recherches antérieures [84, 85, 88]. Entre autres, BEHIM [88] a trouvé un indice d'activité hydraulique de 0,80 pour le laitier d'El Hadjar utilisé dans son étude. Cette différence pourrait s'expliquer par la finesse élevée de son laitier, qui augmente la surface spécifique et donc la réactivité [70].

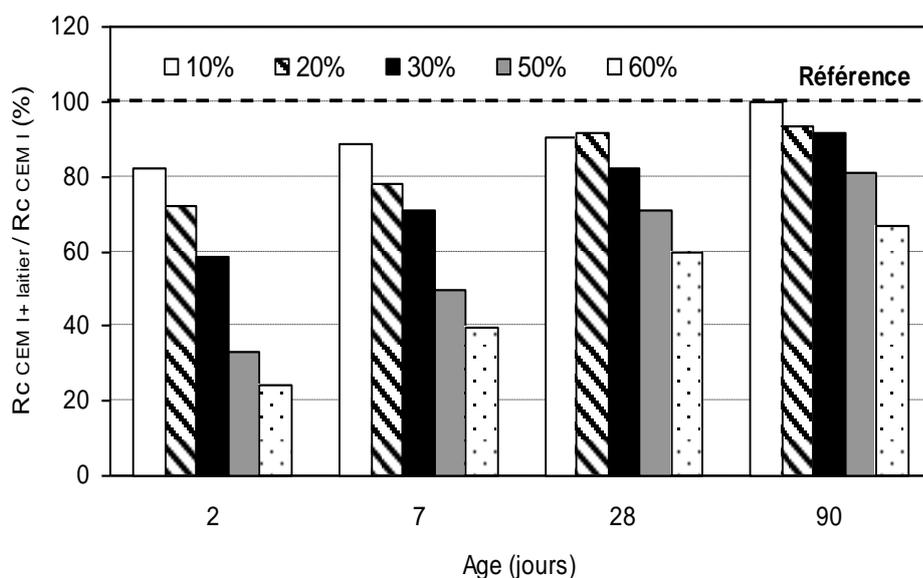


Figure 5.3 : Développement de la résistance des mortiers au laitier par rapport à celle du mortier à base de CEM I.

5.2.2 Résistance à la flexion

Les résultats de la mesure de résistance en flexion des éprouvettes conservées en cure humide à 20°C, en fonction du pourcentage de substitution du laitier, sont regroupés dans les figures 5.4 et 5.5.

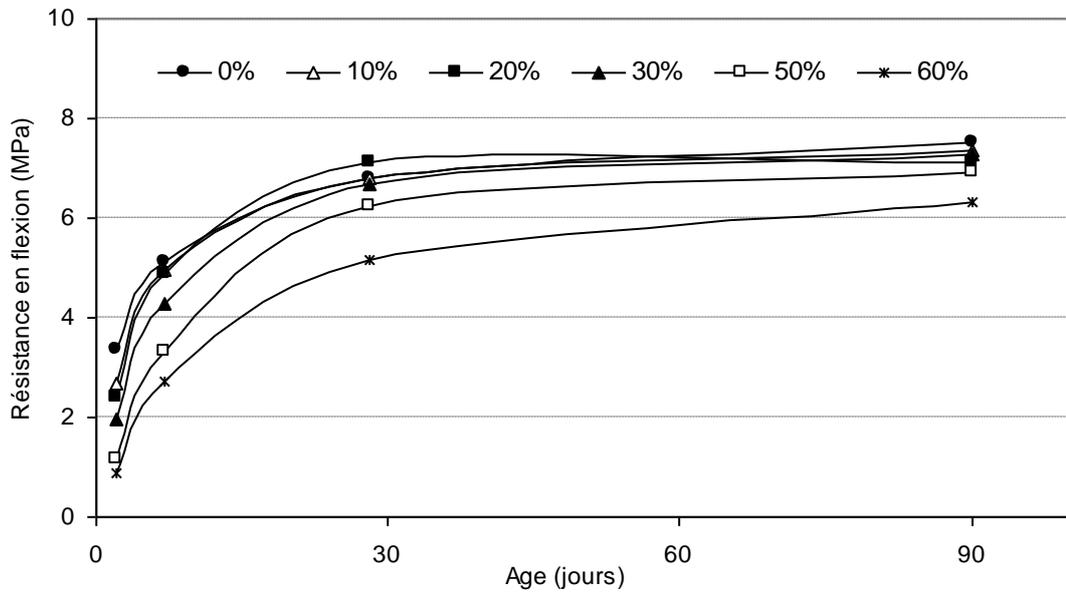


Figure 5.4 : Evolution de la résistance en flexion des ciments au laitier en fonction de l'âge (cure humide, 20°C).

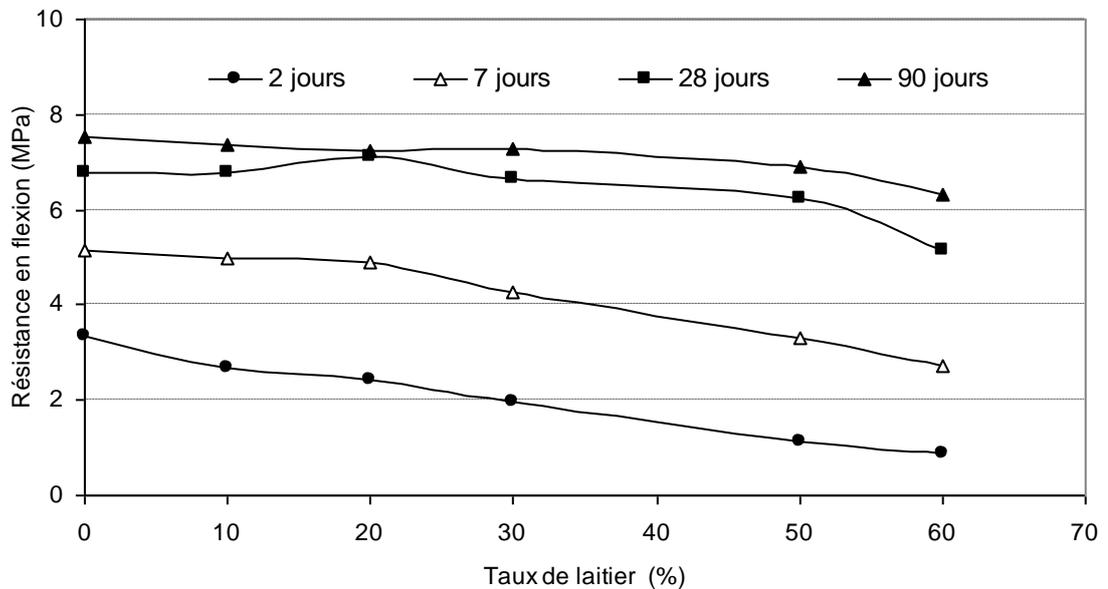


Figure 5.5 : Effet du laitier sur la résistance en flexion des éprouvettes conservées en cure humide à 20°C.

En regardant attentivement ces résultats, on observe que l'évolution de la résistance en flexion suit la même tendance que celle de la résistance en compression, particulièrement aux jeunes âges. A 2 jours, la résistance des ciments au laitier reste relativement faible (Figure 5.4). Après 7 jours de maturation, cet effet est moins accentué, sauf pour les mélanges à 30% de laitier et plus. A 28 et 90 jours, la résistance en flexion des mortiers à base de ciment au laitier devient comparable voir légèrement supérieure (pour 20% de laitier à 28 jours) à celle du mortier témoin à base de CEM I. En effet, la variation reste très faible et ne dépasse guère les 8% sauf pour le mortier avec 60% de laitier, qui présente une diminution de résistance de l'ordre de 24 et 16% à 28 et 90 jours, respectivement.

Plusieurs recherches ont montrés qu'à moyen et à long terme, la résistance des ciments au laitier est comparable sinon supérieure à celle du ciment Portland sans ajout. CORINA et al [145] ont constaté une amélioration de la résistance en traction par fendage pour les bétons au laitier (jusqu'à 50%), après 28 jours de maturation en cure humide. La même variation a été trouvée par KHATIB et al [73], où 40% de laitier avait conduit à une meilleure résistance en flexion à 28 jours. Toutefois, un taux élevé de 75% de laitier avait mené à un effet inverse.

Selon SALTE et HOVER [146], les microfissures, présentes dans le béton avant l'application d'un chargement, sont en grande partie responsables de la faible résistance en traction du béton. Ces fissures sont engendrées, le plus fréquemment, par le retrait ou par des gradients thermiques [6]. Les ciments au laitier, lors de l'hydratation, présentent un dégagement de chaleur moins important que celui des ciments de type CEM I [6, 48], d'autant plus que les taux de laitier sont élevés. Ceci pourrait être la cause d'une diminution des microfissures d'origine thermique, et par conséquent, de l'amélioration à long terme de la résistance en flexion.

5.3 Evolution des résistances mécaniques à long terme (jusqu'à 360 jours)

Suite aux résultats de l'étude des résistances mécaniques à moyen terme, l'étude du développement des résistances mécaniques à long terme (jusqu'à 360 jours) des ciments au laitier a été réalisée pour un taux de substitution de 30 et de 50%. Ainsi, afin de mettre en évidence l'effet du type de ciment les caractéristiques mécaniques, les deux ciments A et B ont été utilisés.

5.3.1 Résistance en compression

Le développement à long terme de la résistance en compression des mortiers à base de ciment (A et B) au laitier est présenté dans le tableau 5.1 et les figures 5.6 et 5.7.

Tableau 5.1 : Résistance en compression (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier.

| % de laitier | | Mortier A (CEM I 32,5 + laitier) | | | | | Mortier B (CEM I 52,5 + laitier) | | | | |
|--------------|------------|----------------------------------|---------|----------|----------|-----------|----------------------------------|---------|----------|----------|-----------|
| | | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours |
| 0% | Moyenne | 12,87 | 25,75 | 36,35 | 41,95 | 50,79 | 24,28 | 35,25 | 58,90 | 68,60 | 76,00 |
| | Ecart type | 0,27 | 0,71 | 0,60 | 1,32 | 1,25 | 0,601 | 5,764 | 3,97 | 1,921 | 1,377 |
| 30% | Moyenne | 7,50 | 18,30 | 29,82 | 38,40 | 51,25 | 13,92 | 30,76 | 52,46 | 67,16 | 74,53 |
| | Ecart type | 0,19 | 0,30 | 1,17 | 1,90 | 0,81 | 0,164 | 1,22 | 1,50 | 1,436 | 1,447 |
| 50% | Moyenne | 4,28 | 12,85 | 25,73 | 32,05 | 48,64 | 6,64 | 19,00 | 40,98 | 55,67 | 67,52 |
| | Ecart type | 0,10 | 0,34 | 0,59 | 1,62 | 0,74 | 0,124 | 0,707 | 1,90 | 0,700 | 0,602 |

De ces résultats, il apparaît un meilleur développement de la résistance pour les ciments au laitier (30% et 50%) de 90 à 360 jours de maturation, particulièrement pour 30% de laitier, quelque soit le type de ciment (A et B) étudié. En effet, à 360 jours, les résistances sont relativement comparables pour les trois types de mortiers avec une légère diminution pour le taux de substitution de 50% de laitier. Toutefois, cette diminution, de l'ordre de 7% et 11% pour le MA50 et MB50 respectivement, reste faible.

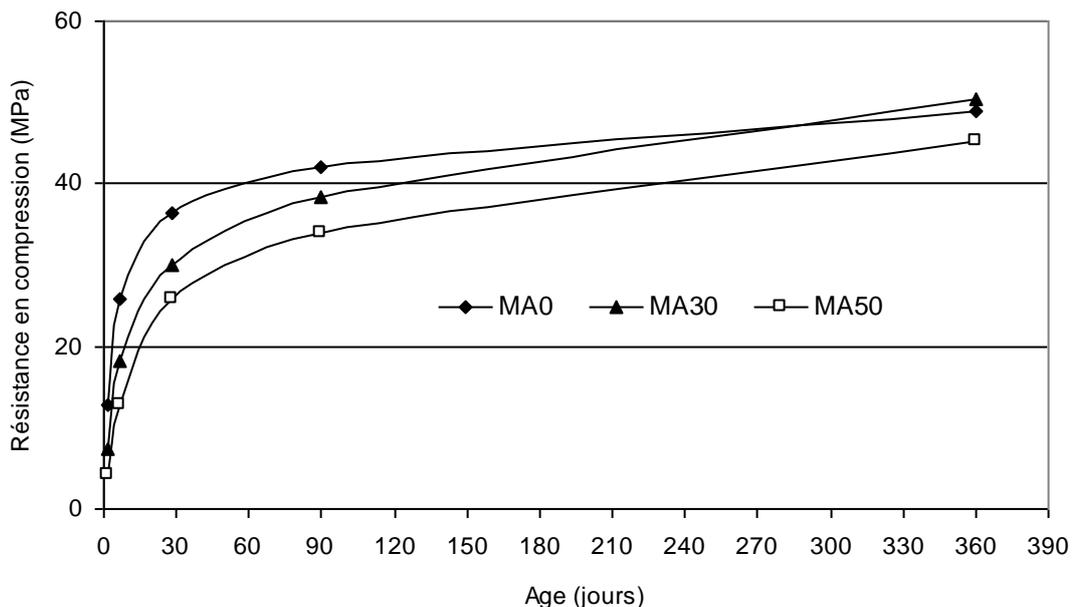


Figure 5.6 : Evolution de la résistance en compression à long terme des mortiers de type A (CEM I 32,5 + laitier) en cure humide.

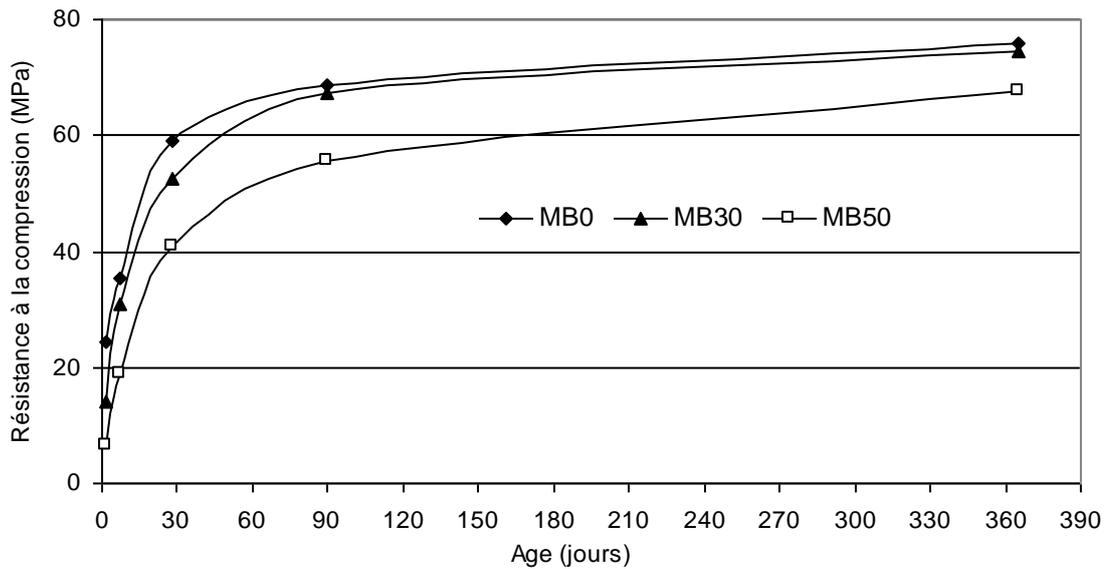


Figure 5.7 : Evolution de la résistance en compression à long terme des mortiers de type B (CEM I 52,5 + laitier) en cure humide.

D'après la figure 5.7, on peut constater une activation du ciment avec 30% de laitier (MB30), dès 90 jours de cure. Sa résistance est comparable à celle du mortier témoin, à base de CEM I 52,5. Dans les mortiers à base de ciment de type A, cet effet d'activation, pour le ciment avec 30 % de laitier (MA30), n'est constaté qu'après 360 jours de maturation (Figure 5.6).

Le ciment de type B, étant de classe de résistance supérieure à celle du ciment de type A et ayant un taux de C_3S plus élevé, présente un potentiel hydraulique plus important. Ceci pourrait être la cause d'une meilleure activation du laitier par les hydroxydes de calcium $Ca(OH)_2$ produits par l'hydratation du clinker [79]. Néanmoins, cet effet ne semble pas se produire avec la même intensité pour le ciment avec 50% de laitier qui, même après 360 jours, développe une résistance inférieure à celle des ciments sans et avec 30% de laitier.

5.3.2 Résistance à la flexion

Le développement à long terme de la résistance en flexion des mortiers au laitier à base de ciment A et B est présenté dans le tableau 5.2 et les figures 5.8 et 5.9.

Tableau 5.2 : Résistance en flexion (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier.

| % de laitier | | Mortier A (CEM I 32,5 + laitier) | | | | | Mortier B (CEM I 52,5 + laitier) | | | | |
|--------------|------------|----------------------------------|---------|----------|----------|-----------|----------------------------------|---------|----------|----------|-----------|
| | | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours |
| 0% | Moyenne | 3,36 | 5,14 | 6,79 | 7,51 | 8,19 | 4,48 | 7,07 | 7,83 | 8,46 | 8,29 |
| | Ecart type | 0,37 | 0,27 | 0,32 | 0,22 | 0,66 | 0,14 | 0,15 | 0,53 | 0,94 | 0,30 |
| 30% | Moyenne | 1,95 | 4,29 | 6,66 | 7,26 | 9,11 | 3,14 | 5,90 | 8,09 | 8,81 | 8,81 |
| | Ecart type | 0,15 | 0,08 | 0,33 | 0,34 | 0,02 | 0,05 | 0,32 | 0,16 | 0,35 | 0,30 |
| 50% | Moyenne | 1,13 | 3,31 | 6,25 | 6,92 | 8,13 | 1,64 | 3,99 | 7,77 | 8,85 | 8,99 |
| | Ecart type | 0,18 | 0,13 | 0,22 | 0,36 | 0,25 | 0,18 | 0,21 | 0,64 | 0,49 | 0,79 |

Pour les mortiers à base de ciment de type A (Figure 5.8), la résistance en flexion des mortiers au laitier devient équivalente à celle du ciment sans ajout à partir de 90 jours. Après 360 jours de maturation en cure humide, on constate une légère supériorité (11%) pour le ciment avec 30% de laitier. Au regard de la figure 5.9, pour les mortiers à base de ciment de type B, on peut observer qu'à partir de 90 jours, la résistance en flexion des ciments avec 30 et 50% de laitier dépasse celle du ciment témoin. Cependant, la différence reste modeste : elle est de 5,4 et 8,5% pour 30 et 50% de laitier, respectivement, après 360 jours.

Cette variation reflète une synergie réactionnelle certaine entre le laitier et le clinker. Toutefois, cet effet apparait plus tôt lorsque le ciment de type B (CEM I 52.5) est utilisé.

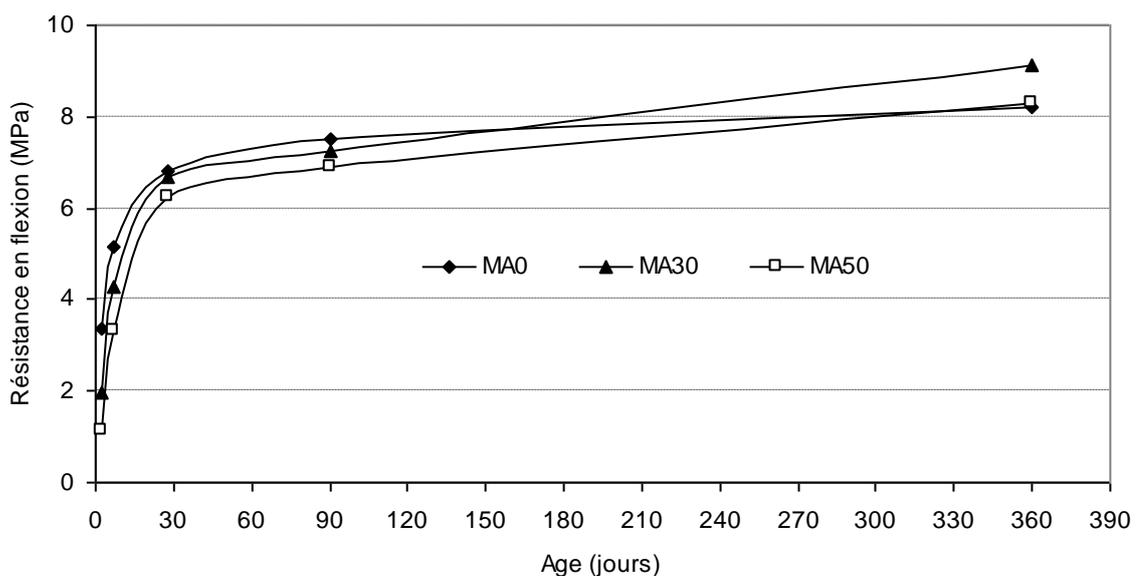


Figure 5.8 : Evolution de la résistance en flexion à long terme des mortiers de type A (CEM I 32,5 + laitier) en cure humide.

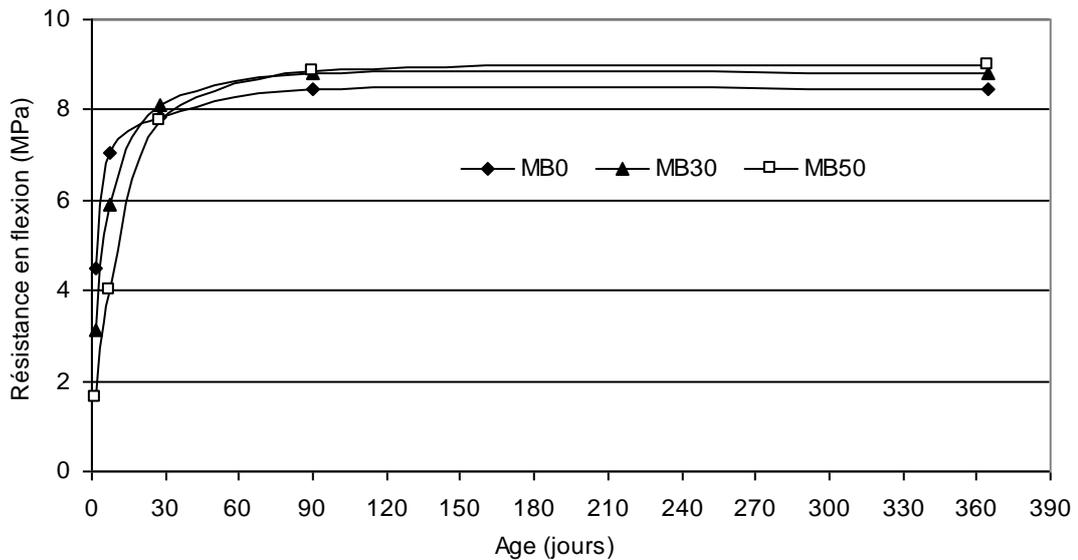


Figure 5.9 : Evolution de la résistance en flexion à long terme des mortiers de type B (CEM I 52,5 + laitier) en cure humide.

5.4 Effet du climat extérieur (chaud et sec) sur le développement des résistances mécaniques des ciments au laitier

Dans cette partie d'étude, après une cure humide initiale à 20°C de 7 jours, les éprouvettes ont été conservées à l'extérieur du laboratoire en période d'été. Les données climatiques (température, humidité et vitesse du vent) relatives à cette période d'essai sont regroupées dans le tableau 4.8.

Les résultats de la résistance en compression et en flexion en fonction du pourcentage de laitier pour différents âges sont représentés dans les figures 5.10 et 5.12. Les figures 5.11 et 5.13, quant à elles, présentent respectivement le rapport des résistances en compression et en flexion des mortiers conservés dans le climat extérieur et celles des mêmes mortiers conservés en cure humide.

Au vu des résultats en compression, on remarque un bon développement de la résistance de 7 à 28 jours (Figure 5.10), particulièrement pour les ciments avec 20 et 30% de laitier (MA20 et MA30), qui ont atteint respectivement 95,5 et 92% de leur résistance obtenue en cure humide à 20°C, après 28 jours de maturation (Figure 5.11). Ceci pourrait être dû à l'effet bénéfique de la cure humide initiale de 7 jours, ainsi qu'à la température élevée (30°C) du milieu de conservation, qui peut être un facteur favorisant l'hydratation. Cependant, l'évolution entre 28 à 90 jours reste faible pour tous les ciments,

particulièrement pour ceux avec 30 et 50% de laitier (MA30 et MA50) qui ont développé, respectivement, 80 et 66% de leurs résistances obtenues en cure humide. Cette variation est probablement due à la faible humidité du milieu de conservation. En effet, dans de telles circonstances, le processus d'hydratation est ralenti avant que les pores ne soient totalement remplis par les produits d'hydratation [87, 147].

On a tendance à penser que l'augmentation de la température de cure favorise l'hydratation du ciment et du laitier (activation thermique). Ceci est vrai aux jeunes âges mais à long terme des baisses de résistances mécaniques ont été constatées [41]. Dans notre cas, cet effet n'est pas visible à cause de la cure humide initiale qui compense l'effet négatif ultérieur de la baisse d'humidité.

Comme constaté en cure humide, l'augmentation du pourcentage du laitier conduit à une diminution de la résistance en compression. Néanmoins, en climat extérieur, l'écart de résistance entre le mortier témoin (MA0) et celui avec 20 et 30% de laitier demeure relativement faible, à 28 comme à 90 jours: il ne dépasse pas les 14%. Par contre, le ciment avec 50% d'ajout a enregistré une faible résistance, même après 90 jours.

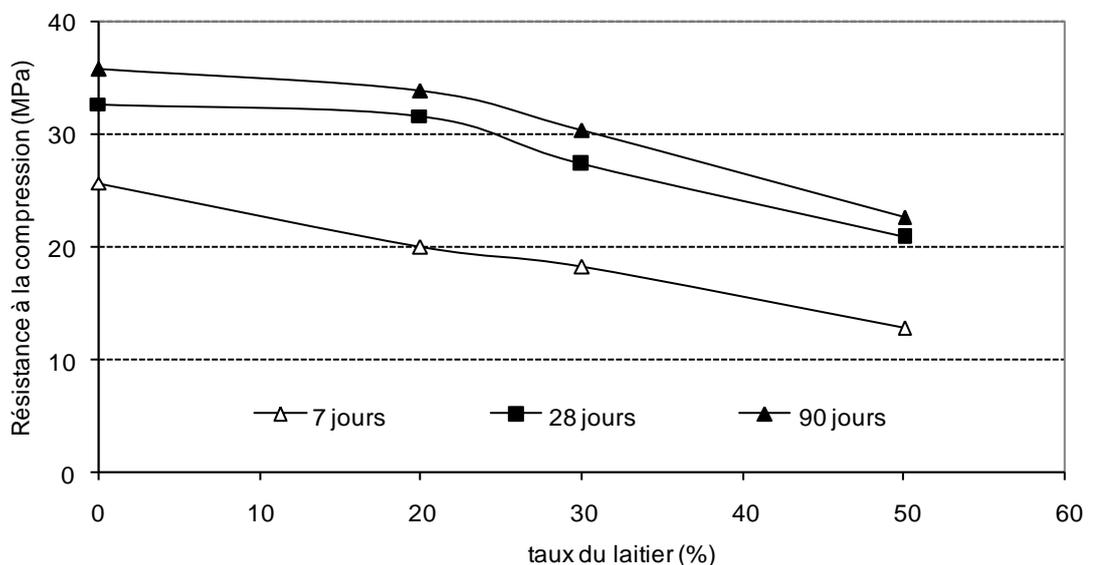


Figure 5.10 : Effet du laitier sur la résistance en compression des éprouvettes conservées en climat extérieur.

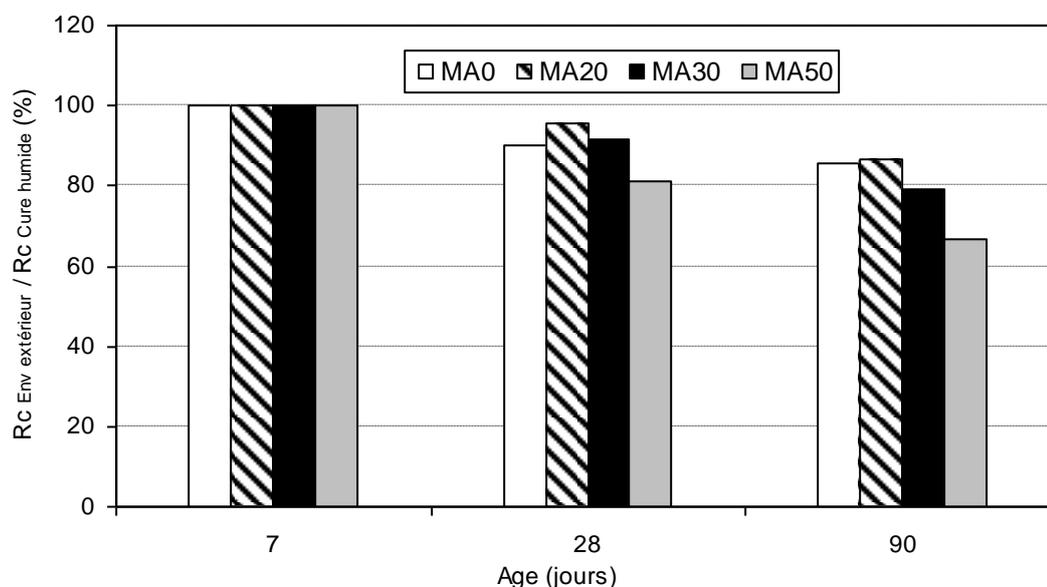


Figure 5.11: Développement de la résistance en compression des mortiers conservés au climat extérieur par rapport à celle des mortiers conservés en cure humide.

RAMEZANIANPOUR et MALHOTRA [147] ont vu une chute de résistance de 38% pour un béton contenant 25% de laitier et de 50% pour un béton avec 50% laitier et 25% de cendres volantes lorsque ces derniers sont conservés dans un climat sec; les chercheurs ont conclu que les bétons avec additions sont plus sensibles au manque d'humidité. Cette constatation est confirmée par les travaux de DURAN et BILIM [148] qui ont observé que, par rapport aux bétons conservés en cure humide, ceux conservés à 65% d'humidité relative ont subi une diminution moyenne en résistance de 6% pour les bétons sans laitier et de 15% pour les bétons au laitier.

L'évolution de la résistance en flexion n'est pas très différente à celle de la résistance en compression. D'après la figure 5.12, on observe un développement normal jusqu'à 28 jours mais stagne après, à l'exception du ciment avec 20% de laitier pour lequel une augmentation de 16% est enregistrée entre 28 et 90 jours. Par rapport aux résistances développées en cure humide, les ciments avec 20 et 30% de laitier ont atteint des valeurs, qui même si inférieures à celles du ciment témoin, restent appréciables. Par contre, le ciment avec 50% de laitier présente une faible résistance et qui a très peu progressé avec l'âge (environ 1 MPa de 7 à 90 jours).

D'une manière générale, la cure humide initiale de 7 jours a permis un développement normal des résistances mécaniques entre 7 et 28 jours. Néanmoins, cette période de cure demeure insuffisante pour permettre une hydratation continue à long terme des ciments

avec laitier. Cet effet semble être plus accentué pour les ciments avec des taux de laitier supérieurs à 30%.

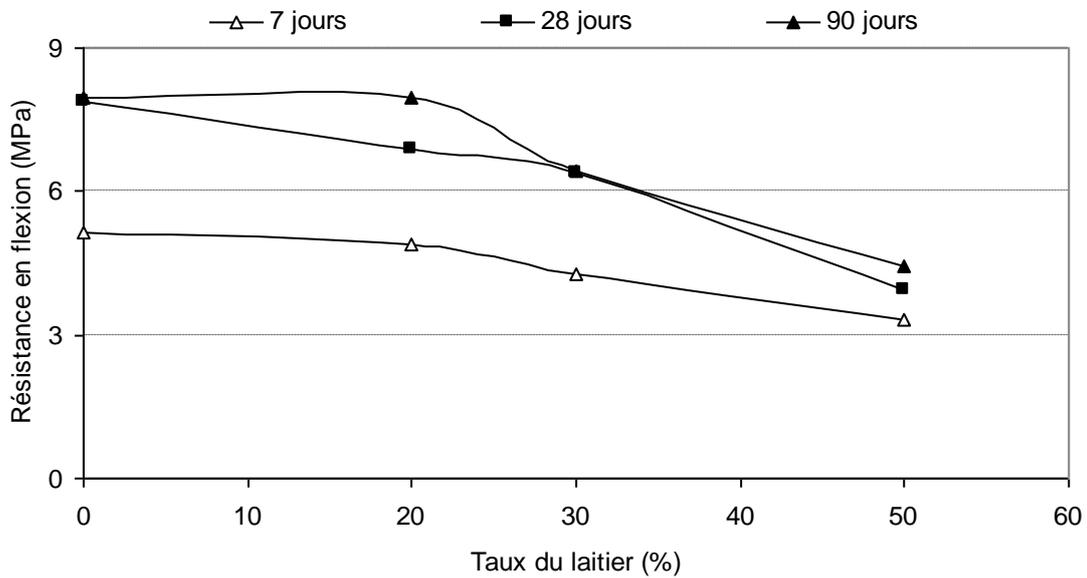


Figure 5.12: Effet du laitier sur la résistance à la flexion des éprouvettes conservées en climat extérieur.

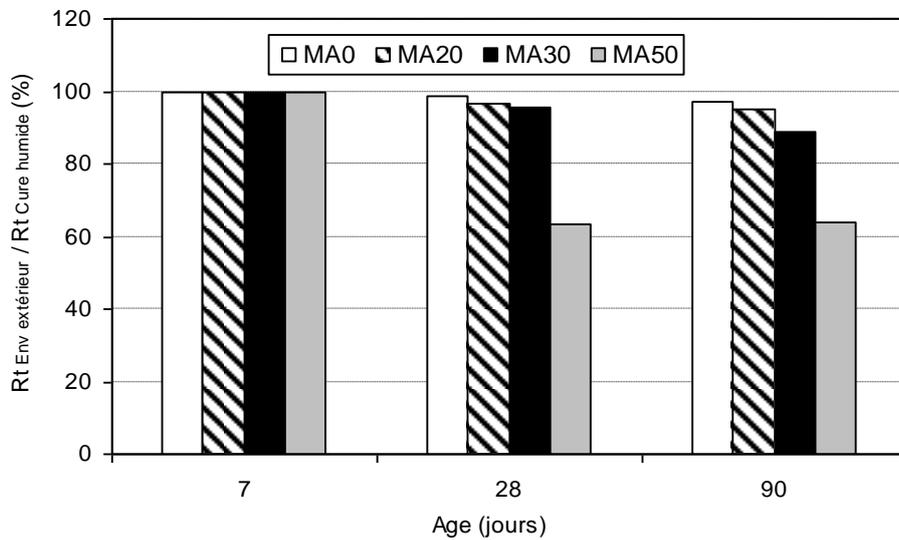


Figure 5.13: Développement de la résistance en flexion des mortiers conservés en climat extérieur par rapport à celle des mortiers conservés en cure humide.

5.5 Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en flexion

On se propose d'établir une corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction des mortiers à base de CEM I et des mortiers au laitier (Tableau 5.3).

La relation proposée par l'équation 5.1, pour les mortiers au laitier conservés suivant les deux modes de cure étudiés est représentée par la figure 5.14.

Tableau 5.3 : Corrélation entre la résistance à la flexion et à la compression pour les deux environnements de cure.

| Equation | Coefficients | coefficient de corrélation | N° d' équation |
|-----------------|------------------------|----------------------------|----------------|
| $f_t = a f_c^b$ | a = 0,559 b = 0,552 | R = 0.933 | 5.1 |

Un certain nombre de formules reliant la résistance en traction f_t et la résistance en compression f_c ont été proposées dans la littérature :

$$f_t = 0,12 f_c^{0,7} \quad (\text{BS 8007/87}) \quad (5.2)$$

$$f_t = 0,5 f_c^{0,5} \quad (\text{ACI 318/99}) \quad (5.3)$$

$$f_t = 0,6 + 0,06 f_c \quad (\text{BAEL 91}) \quad (5.4)$$

La figure 5.14 illustre aussi les données de résistance à la compression en fonction de la résistance en traction et la relation représentant le modèle proposé, en comparaison avec les relations proposées par les différents règlements. Il faut noter que les valeurs de la résistance en flexion ont été corrigées par un facteur de 0,6 afin d'obtenir des valeurs en traction. Les courbes proposées par le BAEL 91 et l'ACI présentent les valeurs les plus proches à celles des courbes de corrélation, pour les faibles résistances. Toutefois, la résistance en traction des ciments au laitier reste sous estimée pour les résistances élevées, particulièrement pour les ciments conservés en climat extérieur.

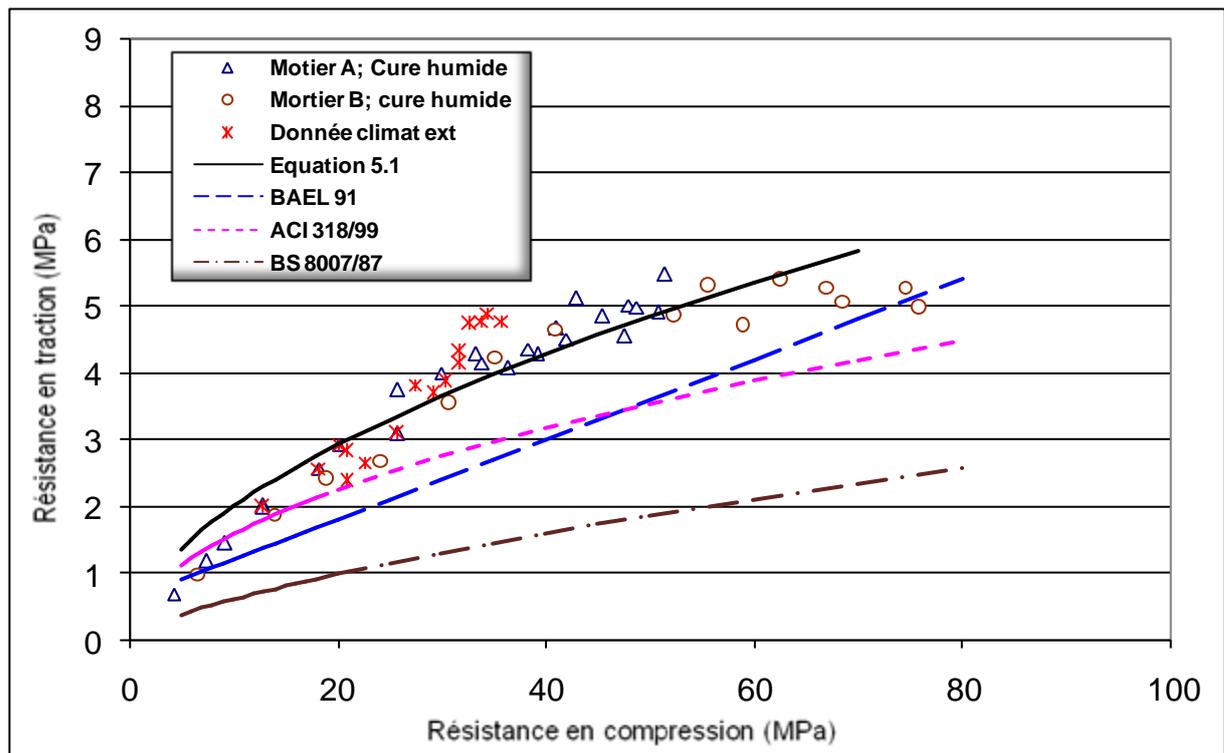


Figure 5.14 : Corrélation entre les résistances en compression et en traction des mortiers au laitier selon le mode de cure.

5.6 Conclusion

Les résultats de cette partie expérimentale sur l'effet du laitier d'El Hadjar sur les propriétés mécaniques des mortiers ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- l'augmentation du taux de laitier conduit à une diminution de la résistance à court terme. Cependant, on a observé un bon développement de résistance à long terme (après 90 jours) pour les ciments avec un taux de laitier n'excédant pas 50%. Toutefois un taux optimal de 30% est observé. Ceci justifie partiellement le choix actuel des cimenteries utilisant le laitier d'El Hadjar à un dosage limité de 15 à 20% ;
- l'utilisation du ciment de type B (CEMI 52,5) semble offrir une meilleure activation au laitier, pour 30% d'ajout, que le ciment de type CEM I 32,5. Cet effet n'est pas observé lorsque 50% de laitier sont substitués ;

- en climat extérieur, sec avec cure humide initiale de 7 jours, les ciments avec 30 et 50% de laitier ont subi, après 28 jours, une perte de résistance plus importante que celle subie par le ciment à base de CEM I et celui avec 20% de laitier.

Chapitre 6

MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES DE TRANSPORT DES MORTIERS A BASE DE CIMENT AU LAITIER D'EL HADJAR

6.1 Introduction

Le présent chapitre présente une étude sur mortiers à base de ciment Portland de type CEM I 52.5 avec et sans laitier. Une étude de la structure poreuse est réalisée en premier. Cette dernière propose de quantifier la porosité volumique à l'eau et au mercure ainsi que l'étude de la distribution du réseau poreux du mortier par porosimétrie au mercure (PM). Une analyse qualitative complémentaire au microscope électronique est aussi proposée. La deuxième partie est consacrée à l'étude des propriétés de transport dans le mortier, à savoir: l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité à l'oxygène et la diffusion et la conduction des ions chlore.

6.2 Analyse de la structure Poreuse

6.2.1 Porosité totale

La porosité volumique accessible à l'eau par immersion " P_w " (ou porosité ouverte) et par immersion sous vide " P_{wv} " (ou porosité totale) ainsi que la porosité au mercure " P_{Hg} " des mortiers avec et sans laitier, après 28, 90 et 360 jours de maturation, sont présentées dans le tableau 6.1.

Au vu des résultats, on peut voir une diminution de la porosité à l'eau avec l'âge, pour tous les mortiers étudiés. Cette diminution reflète une hydratation continue en fonction du temps. On peut constater aussi une porosité plus importante, à tout âge, pour les mortiers au laitier, particulièrement, pour le MB50 par rapport au mortier MB0. La figure 6.1 présente la porosité relative à celle de 28 pour différents niveaux de substitution du ciment par le laitier. On remarque que la diminution de la porosité entre 28 et 360 jours est plus importante pour le MB30 et MB50 que pour le MB0. Cette variation est typique et est la conséquence de l'hydratation latente du laitier dans le ciment Portland. Ceci est largement confirmé dans la littérature [2, 94, 149].

La porosité à l'eau sous vide P_{wv} présente des valeurs supérieures à celles de la porosité à l'eau P_w . Cette augmentation est expliquée par une accessibilité de l'eau, plus importante, dans les pores capillaires fins sous l'action de la dépression créée par le vide. Toutefois, la

variation de la porosité P_{WV} des mortiers étudiés reste identique à celle de la porosité P_W , qui augmente proportionnellement avec le pourcentage du laitier.

Pour mieux exploiter les résultats, on propose de calculer P_f (%), la porosité fermée déduite de la différence de la porosité ouvert P_W et la porosité totale P_{WV} [93] comme le montre l'équation 6.1.

$$P_f = P_{WV} - P_W \quad (\%) \quad (6.1)$$

N.B

La porosité dite fermée P_f , en plus du volume des pores fermés (isolés), peut contenir le volume des pores continus de petits diamètres, qui sont inaccessibles à l'eau par simple immersion (sous pression atmosphérique).

Les résultats de la porosité fermée P_f des mortiers MB0, MB30 et MB50 sont présentés dans le tableau 6.2. Une porosité fermée plus importante des mortiers au laitier par rapport au mortier de référence est constatée à tout âge. Toutefois, on remarque une faible variation de P_f entre MB30 et MB50. Ceci reflète, malgré une porosité élevée, une structure poreuse discontinue des mortiers au laitier. L'étude de la distribution des tailles de pores sera traitée en détail dans la section 6.2.2.

Les résultats de la porosité au mercure P_{Hg} montrent une variation similaire que celle des porosités à l'eau P_W et P_{WV} avec, toutefois, des valeurs plus faibles. Cette différence est liée à la nature différente des deux méthodes d'investigation et qui ne donnent pas le même type d'informations sur la porosité de la matrice. En effet, en porosimétrie au mercure, la plupart des gros pores capillaires qui, saturés à basses pressions, ne sont pas comptabilisés. Toutefois, la technique permet d'atteindre des petits pores de 3,7 nm de rayon (pour une pression d'essai de 2000 bars). Les pores de gel intra-cristallite (entre les feuillis du gel), qui ont un diamètre de quelques Angströms, ne sont pas accessibles. Au contraire, l'absorption d'eau par immersion considère la porosité ouverte du matériau mais pas forcément les plus petits pores. En effet, un calcul établi par COURARD [93] et repris en **annexe II.3**, montre que pour un capillaire cylindrique, avec une dépression de 950 mPars (cas d'essai d'absorption sous vide), le rayon minimal des pores pouvant être atteint par l'eau est de 820 nm. Cette valeur du rayon, dans le cas de l'essai d'absorption d'eau sous pression atmosphérique (absorption par immersion), doit être nettement supérieure.

En outre, la température du pré-conditionnement, de 105°C dans l'essai d'absorption d'eau, en comparaison avec 45°C en porosimétrie au mercure, permet un séchage plus important des pores et par conséquent engendre un volume de vide plus important.

Tableau 6.1 : Porosité à l'eau P_w , porosité à l'eau sous vide P_{wv} et porosité au mercure P_{HG} des mortiers étudiés en fonction de l'âge

| Mortiers | P_w (%) | | | P_{wv} (%) | | | P_{HG} (%) | | |
|----------|-----------|----------|-----------|--------------|----------|-----------|--------------|----------|-----------|
| | 28 jours | 90 jours | 360 jours | 28 jours | 90 jours | 360 jours | 28 jours | 90 jours | 360 jours |
| MB0 | 16,47 | 15,99 | 15,72 | 18,41 | 16,52 | 16,14 | 11,20 | 10,90 | 10,40 |
| MB30 | 17,61 | 17,10 | 16,76 | 19,96 | 18,98 | 17,75 | 12,50 | 11,50 | 10,50 |
| MB50 | 18,98 | 18,31 | 17,90 | 21,48 | 20,23 | 18,97 | 14,15 | 13,45 | 11,60 |

Tableau 6.2 : Porosité fermée P_f des mortiers étudiés en fonction de l'âge

| Mortiers | P_f (%) | | |
|----------|-----------|----------|-----------|
| | 28 jours | 90 jours | 360 jours |
| MB0 | 1,93 | 0,53 | 0,42 |
| MB30 | 2,35 | 1,87 | 0,99 |
| MB50 | 2,50 | 1,98 | 1,06 |

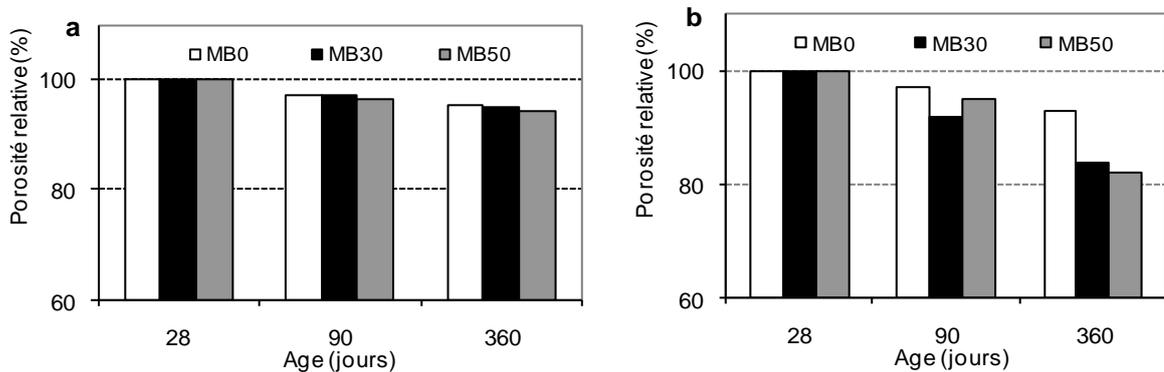


Figure 6.1 : Variation de la porosité à l'eau (a) et au mercure (b) en fonction de l'âge par rapport à 28 jours pour les mortiers étudiés.

6.2.2 Microstructure

6.2.2.1 Distribution des pores

La figure 6.2 présente les courbes d'intrusion représentant l'évolution des volumes cumulés des pores pour les mortiers MB0, MB30 et MB50 en fonction du temps de maturation. Après une répartition incrémentale des volumes, pour chaque nanomètre (en procédant par un échantillonnage avec un pas de 1 nm), on a obtenu les courbes de distributions (naturelles) des volumes de pores, qui sont représentées par la figure 6.3 (les courbes proposent une comparaison entre les trois mortiers à 28, 90 et 360 jours).

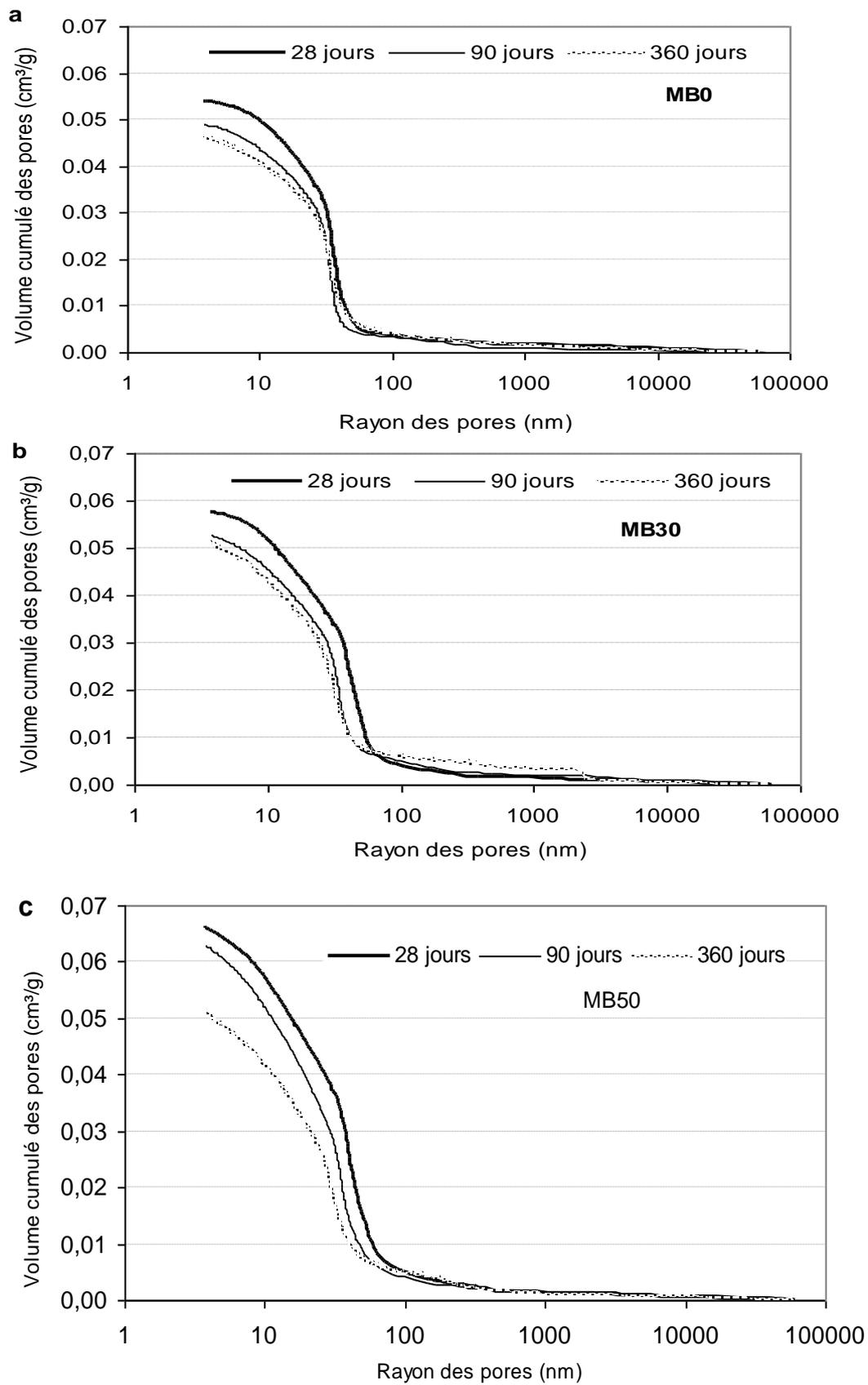


Figure 6.2 : Courbes d'intrusion de mercure en fonction de l'âge de maturation des mortiers MB0 (a), MB30 (b) et MB50 (c).

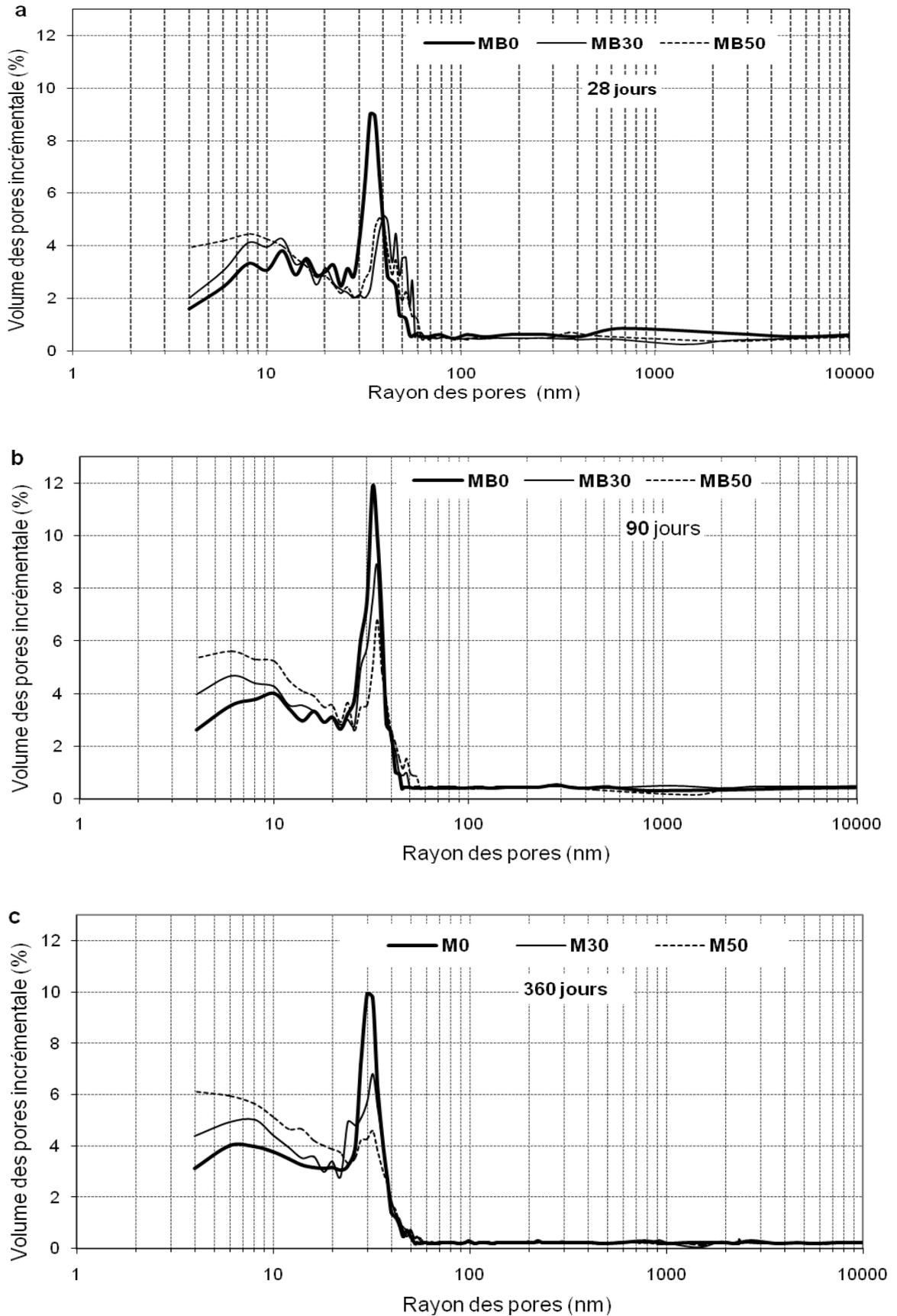


Figure 6.3 : Courbes de distribution de la porosité des mortiers après 28 jours (a), 90 jours (b) et 360 jours (c) de maturation en cure humide.

Le tableau 6.3 regroupe le rayon moyen de pore " R_m " et le rayon critique " R_{cr} ". Le rayon moyen calculé en se basant sur un modèle de pore cylindrique de rayon R_i et de volume V_i . Si " S " est la surface interne des pores et V le volume total, alors R_m est calculé par l'équation 6.1.

$$R_m = \frac{2.V}{S} \quad (6.1)$$

Le rayon critique R_{cr} (ou de percolation) est défini comme le rayon correspondant au pique (ou mode de remplissage) apparent dans la courbe de distribution différentielle des volumes des pores. Ces courbes, obtenues par différentiation logarithmique, sont présentées en **annexe II.2** pour les trois mortiers étudiés en fonction de l'âge.

Tableau 6.3: Rayon critique (R_{cr}) et rayon moyen des pores (R_m) des mortiers étudiés.

| Mortiers | 28 jours | | 90 jours | | 360 jours | |
|----------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | R_{cr} (nm) | R_m (nm) | R_{cr} (nm) | R_m (nm) | R_{cr} (nm) | R_m (nm) |
| M0 | 35,0 | 35,0 | 36,0 | 32,0 | 31,5 | 30,5 |
| M30 | 40,0 | 38,8 | 37,0 | 30,5 | 30,0 | 28,0 |
| M50 | 40,0 | 35,8 | 36,0 | 27,5 | 28,0 | 25,3 |

Il est à noter que les gros pores (vide d'air, microfissure,..) ne sont généralement pas interconnectés et donc sont uniquement accessible par les petits pores capillaires [150]. Cela conduit à une erreur associée à la méthode. D'une manière générale, la méthode est plus représentative des petits pores que les grands pores.

De la figure 6.2, on peut observer une diminution du volume des pores accessible au mercure et une évolution de la porosité vers les petits diamètres avec l'âge. Ceci est dû au remplissage progressif des pores par les produits d'hydratation. Toutefois, on peut voir que l'évolution de la porosité pour les mortiers MB0 et MB30 s'effectue principalement entre 28 et 90 jours et ralentie après, entre 90 et 360 jours. Pour le mortier MB50, la diminution la plus importante de la porosité s'est établie au long terme (entre 90 et 360 jours).

Comme le montre la figure 6.3-a, à 28 jours de maturation, la distribution du volume des pores des mortiers au laitier (MB30 et MB50) est plus grossière que celle du mortier à base de CEM I seul. Le rayon critique (de percolation) ainsi que le rayon moyen des pores sont plus élevés dans les mortiers MB30 et MB50 que dans le mortier MB0 (Tableau 6.3).

A 90 jours, par contre, la distribution de la taille des pores pour les mortiers au laitier semble évoluer vers les petits pores et a rejoint celle du mortier sans ajout. En effet, le rayon critique des pores est comparable pour les trois mortiers étudiés (d'environ 35 nm), qui est d'ailleurs moins important qu'à 28 jours (38-40 nm), pour tous les mortiers étudiés. Le rayon moyen quant à lui est moins important dans les mortiers au laitier, reflétant ainsi une porosité plus raffinée.

Au long terme, après 360 jours de cure humide, le réseau de pores des mortiers au laitier est nettement plus raffiné que celui du mortier témoin (MB0). Cet effet est particulièrement visible pour le mortier avec 50% de laitier, où la distribution des pores est principalement orientée vers des valeurs de rayon de 4 à 30 nanomètre. Cette gamme représente essentiellement les pores capillaires fins ainsi que la porosité inter-cristallite (situé entre les particules du gel hydraté) [18, 95]. Cette observation s'adhère aux valeurs du rayon critique et du rayon moyen des pores, qui sont plus faibles pour les mortiers MB30 et MB50 par rapport au mortier MB0 (Tableau 6.3).

Il est intéressant de rappeler que, même après 360 jours de maturation, les mortiers au laitier (MB30 et MB50) ont présenté une porosité supérieure à celle du mortier à base de CEM I. Cela pourrait être dû à la porosité élevée des *CSH* issu de l'hydratation du laitier même s'ils sont peu pénétrables avec un rapport C/S plus faible à cause du Si apporté par le laitier [149, 151]. En effet, l'augmentation du volume des pores pour les mortiers au laitier (particulièrement le MB50) par rapport au mortier MB0 (Figure 6.2) c'est produite principalement dans la fraction des petits pores de rayon <35 nm et particulièrement entre 4 et 20 nm. Cette classe de petits pores est attribuée à la porosité du gel des *CSH* qui sont plus présents dans les matrices à base de ciment au laitier [6,94].

Des résultats similaires, montrant une structure poreuse plus raffinée des bétons au laitier, ont été cités par plusieurs chercheurs [94-96, 149, 150]. L'hydratation du laitier qui se fait par une consommation de chaux (Ca(OH)_2), conduit à la formation des "*CSH*" additionnels qui contribuent à la densification de la structure poreuse de la matrice. Dans la plupart des cas, une maturation de 21 à 28 jours est suffisante pour observer le raffinement de la porosité [3, 94]. Toutefois, une période de 90 jours est quelques fois nécessaire [150]. Dans notre cas, on arrive au même résultat pour le mortier MB50 mais après une durée de cure humide de 360 jours. Ceci montre l'importance du temps de maturation, sous cure

humide, nécessaire à une bonne hydratation du laitier étudié, reflétant une fois de plus, sa moyenne réactivité.

6.2.2.2 Observation au MEB

Sur les photographies présentées dans les figures 6.4 et 6.5 on propose, sur des plages d'observation différentes, une comparaison des trois mortiers (MB0, MB30 et MB50) après 360 jours de maturation. L'agrandissement choisi (19000 fois), permet d'observer les micropores de petites dimensions (à partir de 40nm de rayon). La classe des diamètres entre 3 et 200 nm est définie par les pores inter-cristallite, situés entre les particules d'hydrates, principalement le gel. Sur les plages visualisées au microscope on peut observer au niveau des échantillons de mortiers MB0 et MB30, comme le montre la figure 6.4, une structure d'hydrates (cristaux et gel) assez dense étroitement combinée aux aiguilles d'ettringite. Dans le mortier MB50, la structure des hydrates semble relativement plus dense, les aiguilles d'ettringite ne sont pas détectées. Ceci peut expliquer le raffinement de la porosité observé dans la distribution des pores du MB50 (en PM) et reflète ainsi, une meilleure hydratation du laitier après 360 jours de maturation en cure humide.

6.4 Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'absorption d'eau par capillarité des mortiers avec et sans laitier après 90 et 360 jours de cure humide sont données dans la figure 6.6.

A 90 comme à 360 jours, on constate une absorption capillaire plus faible pour les mortiers au laitier par rapport à celle du mortier témoin MB0, particulièrement, entre 8 et 48 heures d'absorption. Toutefois l'évolution de l'absorption capillaire avec l'âge (entre 90 et 360 jours) de maturation demeure faible.

Le coefficient d'absorption capillaire " S ", déterminé par régression du tronçon linéaire (4 minute et 8 heures) des courbes d'absorption présentées dans la figure 6.6, pour les mortiers MB0, MB30 et MB50 à 90 et 360 jours, est présenté dans le tableau 6.4.

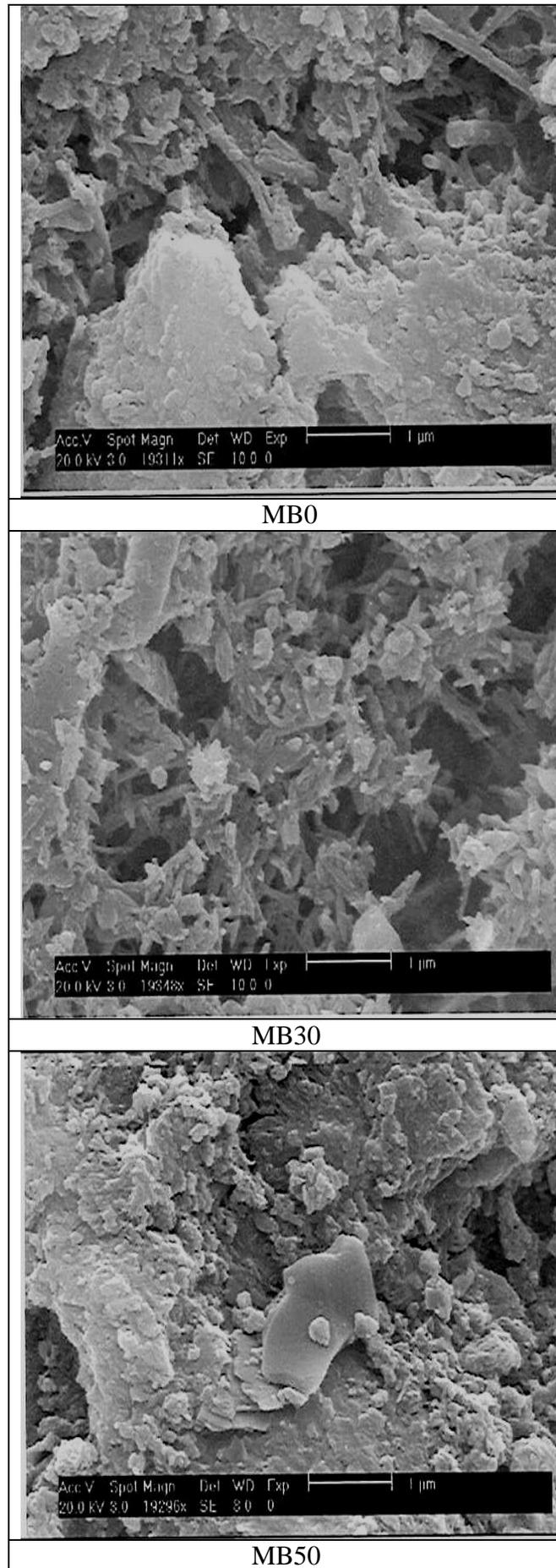


Figure 6.4 : Photographies au MEB des mortiers avec et sans laitier après 360 jours de maturation.

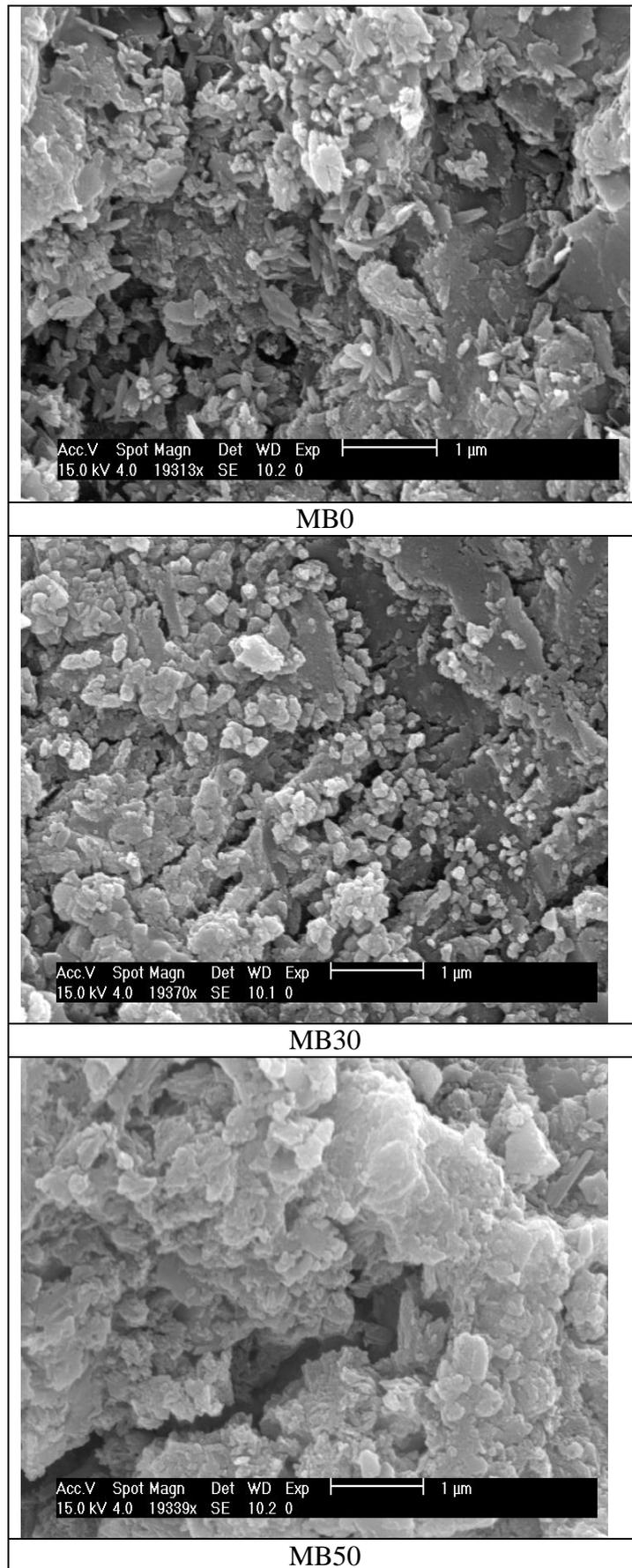


Figure 6.5 : Photographies au MEB des mortiers avec et sans laitier après 360 jours de maturation.

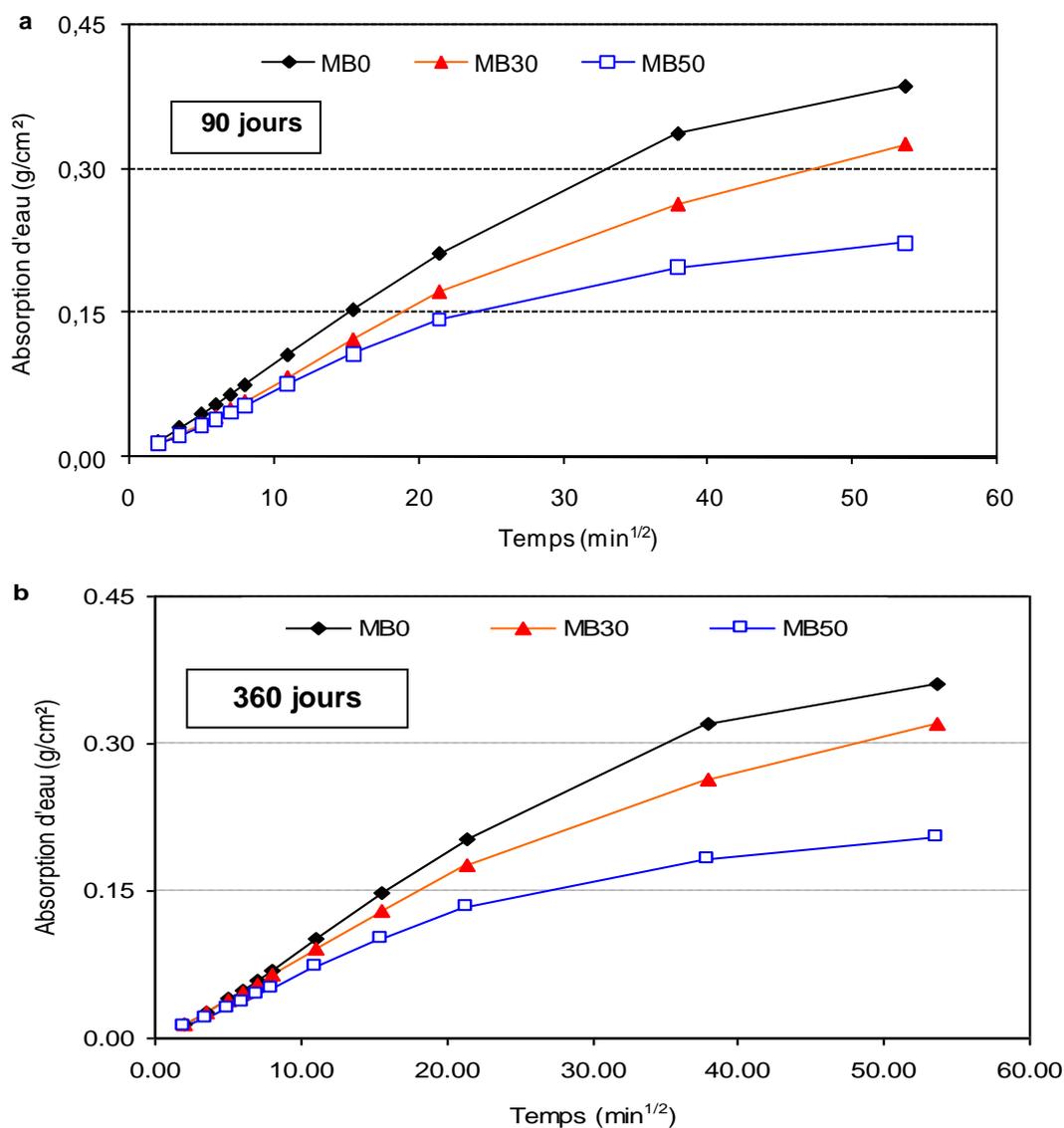


Figure 6.6 : Absorption d' eau par capillarité des mortiers avec et sans laitier à (a) 90 jours et (b) 360 jours.

Tableau 6.4: Coefficient d'absorption capillaire des mortiers en fonction de l'âge

| Age | S (kg/mm ² h ^{1/2}) | | |
|-----------|--|------|------|
| | M0 | M30 | M50 |
| 90 jours | 6.11 | 5.12 | 4.12 |
| 360 jours | 5.95 | 5.07 | 3.85 |

Le coefficient d'absorption présente des valeurs plus faibles pour les mortiers au laitier, notamment, pour le mortier avec 50% de laitier. A 90 jours, par rapport au mortier MB0,

une diminution du coefficient de 16% est enregistrée pour le mortier MB30 contre 32% pour le MB50, atteignant 35% après 360 jours de maturation.

Ceci peut être expliqué par la structure des pores, plus raffinée, observée précédemment dans les mortiers au laitier. La figure 6.7 présente la relation entre le coefficient d'absorption et le rayon moyen des pores. Une bonne corrélation linéaire ($R=0.92$) est proposée, montrant une diminution du coefficient d'absorption avec la diminution du rayon moyen de la porosité. Ceci est en conformité avec la loi de POISSEUILLE qui montre une relation proportionnelle entre la capacité d'absorption d'eau d'un capillaire et son rayon (voir chapitre 4, section 4.5.4).

L'effet positif du laitier sur l'absorption capillaire des mortiers et bétons a été rapporté dans la littérature, pour de faible taux en laitier [152], mais surtout pour des taux supérieurs à 50% [100, 167]. L'amélioration est justifiée par la formation du gel "CSH" due à l'hydratation du laitier et qui modifient la distribution et les dimensions de la porosité capillaire [2].

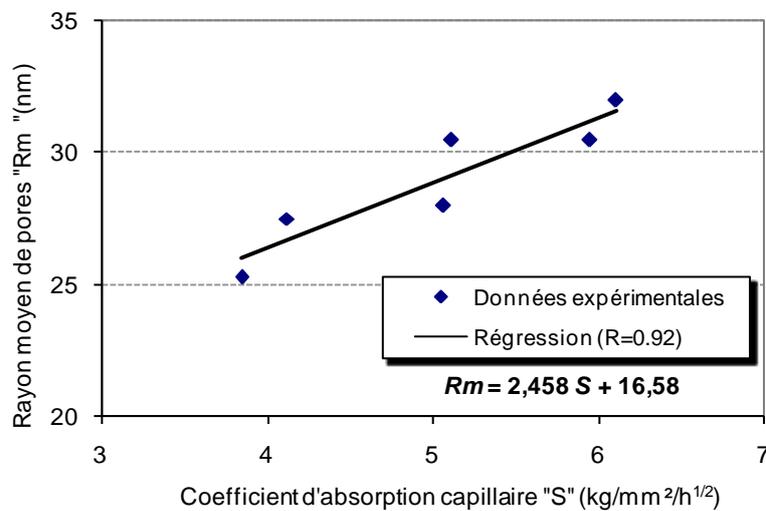


Figure 6.7 : Corrélation entre le coefficient d'absorption et le rayon moyen des pores

6.5 Taux de saturation

Le taux de saturation dépend non seulement de l'absorption capillaire mais aussi de la porosité totale du matériau. Sur la figure 6.8, présentant le taux de saturation par absorption capillaire des mortiers, on observe des valeurs inférieures pour les mortiers au

laitier, particulièrement, le MB50. Ceci est dû à leur faible absorption capillaire observée précédemment. En plus, la porosité élevée des mortiers MB30 et MB50 par rapport au MB0, offre plus de volume de pores à remplir par l'eau sous l'action des forces capillaires.

Entre 90 et 360 jours de cure, paradoxalement, le taux de saturation n'a presque pas évolué pour le MB0 et le MB30 et est plus important pour MB50 à 360 jours qu'à 90 jours (Figure 6.8-b). Ceci prouve que le raffinement de la microstructure du mortier MB50, entre 90 et 360 jours, était plus important que l'évolution de la porosité ; si l'absorption capillaire diminue entre 90 et 360 jours plus que la porosité, on aura des taux de saturation plus importants à 360 jours.

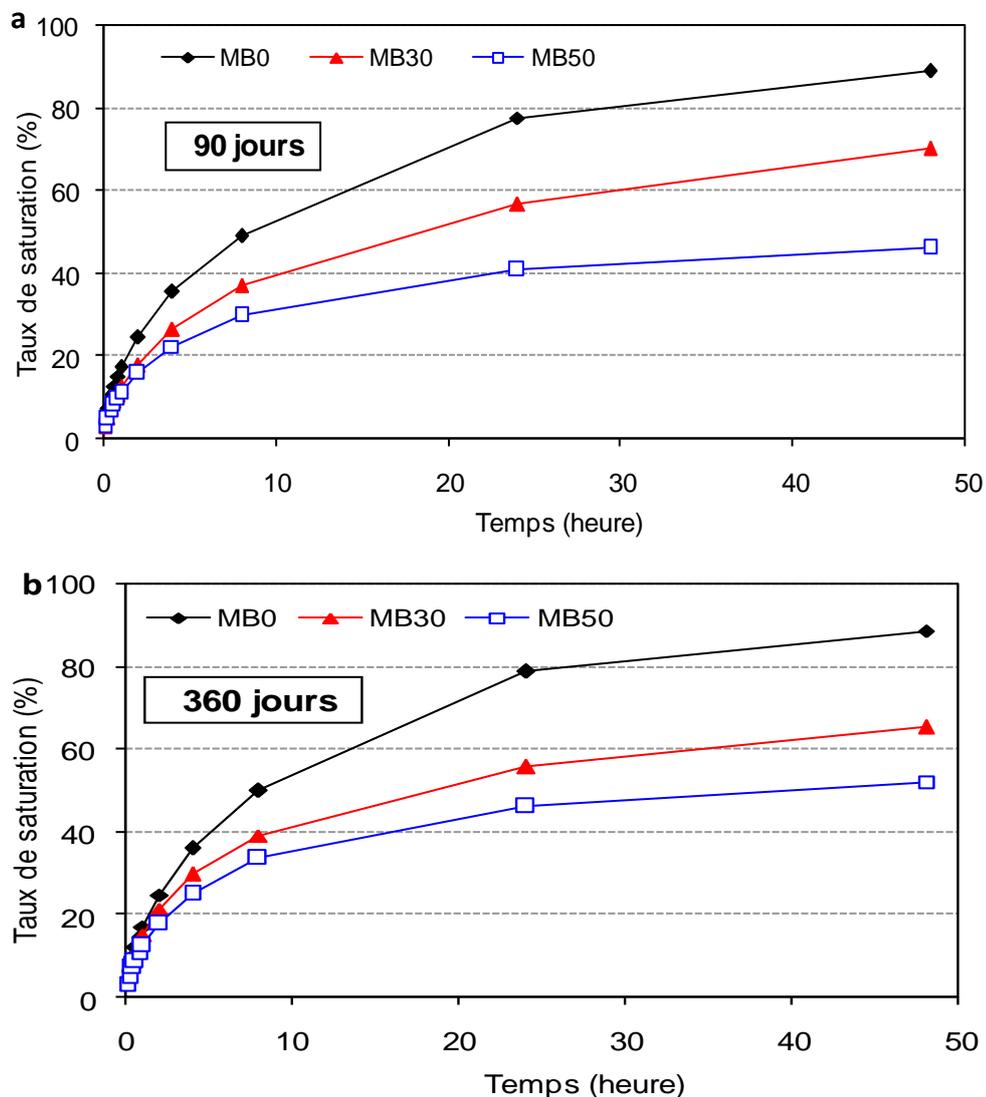


Figure 6.8: Taux de saturation des mortiers avec et sans laitier à (a) 90 jours et (b) 360

6.5 Perméabilité à l'oxygène

Les résultats de la perméabilité à l'oxygène des mortiers MB0, MB30 et MB50 à moyenne terme (90 jours) et à long terme (360 jours) sont représentés dans la figure 6.9. Dans cet essai (sur mortier), les pressions (absolues) appliquées sur les échantillons sont de 1,6, 1,9 et 2,2 bars. Les points des courbes présentées sont une moyenne de six valeurs (2 éprouvettes, 3 pressions).

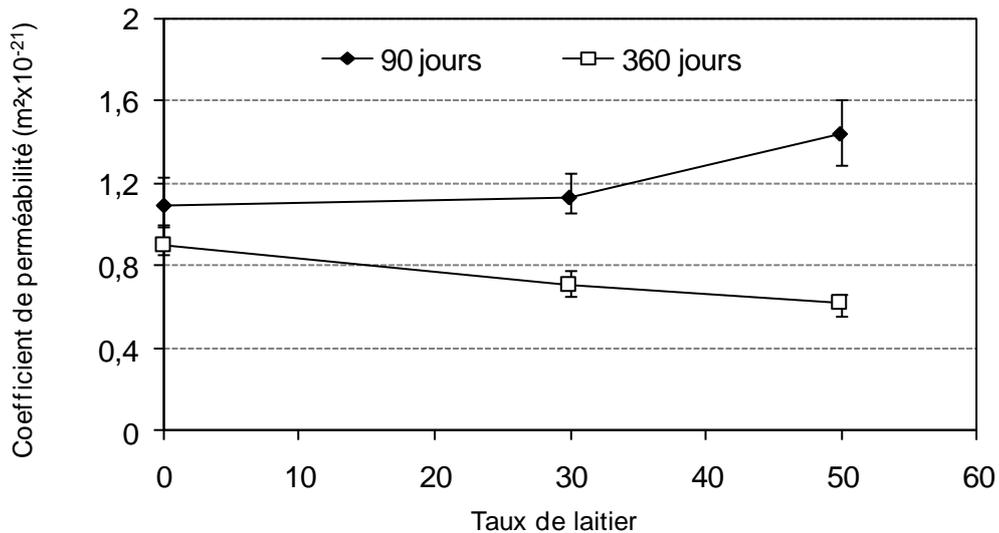


Figure 6.9 : Perméabilité à l'oxygène des mortiers en fonction du taux de laitier à 90 et 360 jours de maturation.

A 90 jours, la perméabilité la plus faible est enregistrée pour le mortier de référence MB0. A cette échéance, la perméabilité du mortier avec 30% de laitier est légèrement supérieure à celle du mortier témoin (les valeurs restent comparables). Le MB50, quant à lui, marque une augmentation de perméabilité de 32% par rapport au MB0.

A long terme (360 jours), on assiste à une variation différente. En effet, la tendance s'est inversée et une diminution de la perméabilité avec l'augmentation du taux de laitier est observée. Les mortiers MB30 et MB50 ont présentés respectivement une diminution de 21 et 31%. Ceci peut être en relation directe avec le raffinement de la porosité et la densification de la matrice observées précédemment pour les mortiers au laitier, notamment à 360 jours.

La période de 90 jours de maturation n'a pas été suffisante pour une bonne hydratation de notre laitier et n'a pas permis la densification de la microstructure nécessaire à

l'amélioration de la perméabilité des mortiers au laitier. Cependant, pour des laitiers de bonne réactivité hydraulique, une meilleure performance en perméabilité des bétons au laitier est rapportée à 28 et 90 jours [6, 100]. Dans notre cas, l'effet bénéfique n'a été observé qu'après 360 jours de cure humide. Ceci montre, une fois de plus, la faible réactivité du laitier étudié et l'importance de la cure humide pour l'amélioration de la durabilité des bétons au laitier.

6.6 Perméabilité aux ions chlorures

6.6.1 Diffusions des chlorures en régime permanent

La diffusion des chlorures (Cl^-) a été mesurée pendant 9 mois pour les mortiers avec et sans laitier, pour deux périodes de cure humide avant l'essai (90 jours et 180 jours). Les figures 6.10 et 6.11 présentent respectivement pour les périodes de cure de 90 et 180 jours, l'évolution de la concentration en ions chlore dans la cellule aval de diffusion (cellule 1, figure 4.6) en fonction du temps, pour les trois mortiers (MB0, MB30 et MB50).

Un taux de diffusion élevé pour le mortier à base de CEM I par rapport aux mortiers au laitier est observé. En effet, pour les mortiers curés pendant 90 jours, après 270 jours de diffusion, la concentration des chlorures atteint 1000 mg/l pour le MB0 comparée à 370 mg/l et 40 mg/l pour MB30 et MB50 respectivement (Figure 6.10).

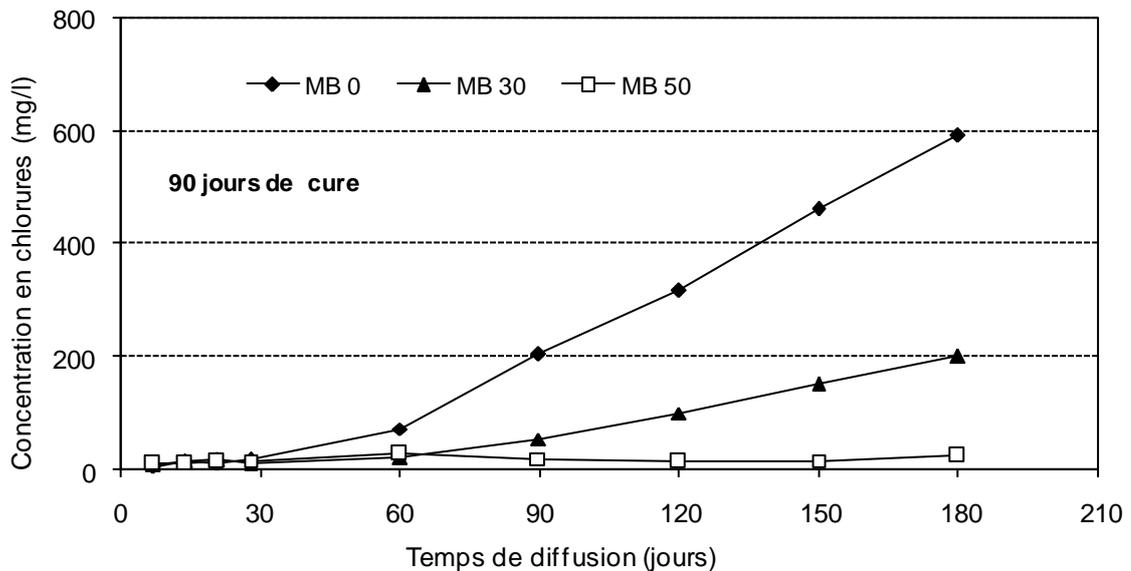


Figure 6.10 : Evolution de la concentration en chlorures en fonction du temps des mortiers (cure humide de 90 jours).

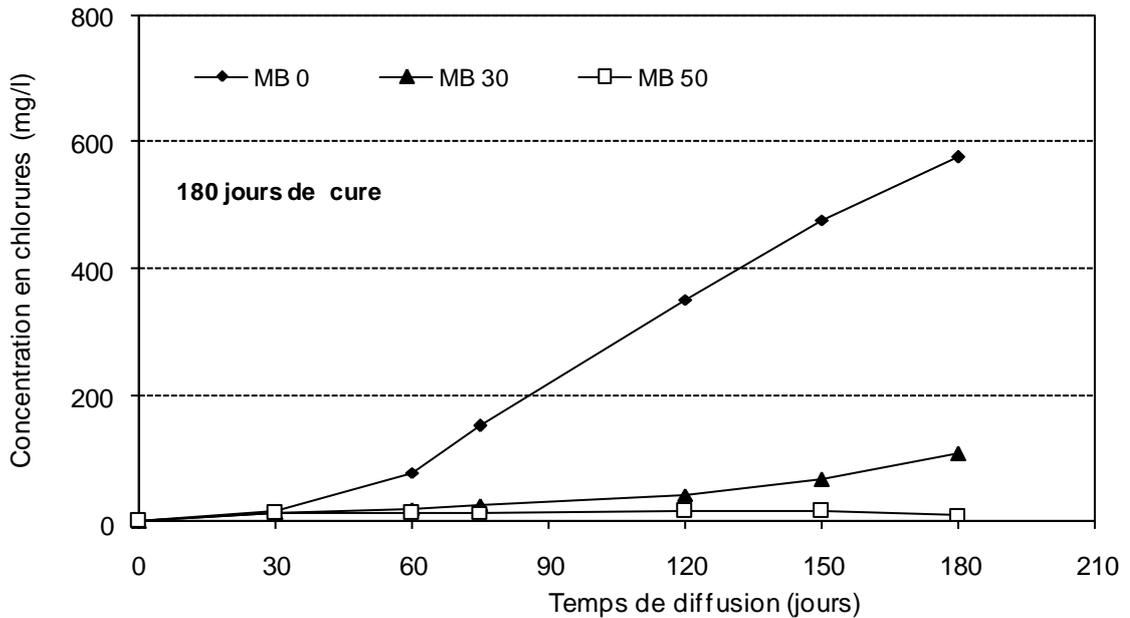


Figure 6.11 : Evolution de la concentration en chlorures en fonction du temps des mortiers (cure humide de 180 jours).

Tableau 6.5: Coefficient de diffusion et temps de passage (retard) des ions chlore.

| Mortiers | 90 jours de cure (après 270 jours de diffusion) | | 180 jours de cure (après 180 jours de diffusion) | |
|----------|--|---|---|---|
| | Temps de retard T_i (jours) | Coefficient de diffusion (m^2/s) | Temps de retard T_i (jours) | Coefficient de diffusion (m^2/s) |
| MB0 | 50 | $3,00 \times 10^{-10}$ | 52 | $2,96 \times 10^{-10}$ |
| MB30 | 70 | $1,11 \times 10^{-10}$ | 91 | $0,67 \times 10^{-10}$ |
| MB50 | 210-240 * | - | -** | - |

* Régime de diffusion permanent non atteint

** Non apparition de chlorures dans la cellule avale

Le coefficient de diffusion effective est calculé, selon l'équation 4.16, lorsque le régime permanent (Figures 6.10 et 6.11) est atteint en tenant compte de l'épaisseur et de la surface de la tranche de mortier, ainsi que du volume des cellules et leur concentration en chlorure.

Le temps de passage des chlorures (temps de retard) " Tr " est déterminé par l'intersection de la droite représentant le régime de diffusion permanent et l'horizontale ayant pour ordonnée 30 mg/l (Valeur minimale supposée pour un passage de chlorure). Dans le cas où le régime permanent n'est pas atteint, Tr est fixé lorsque un taux minimal de 30 mg/l de Cl^- est mesuré dans la cellule avale (dans ce cas, Tr est donné par un intervalle de temps,

cas du MB50). Le tableau 6.5 regroupe les valeurs du coefficient de diffusion effectif et le temps de retard T_r pour les mortiers avec et sans laitier, pour les deux périodes de cure.

Pour les mortiers ayant subi une cure humide de 90 jours, le passage des Cl^- pour le mortier MB0 s'est effectué après 50 jours, avec un coefficient de diffusion de 3.00×10^{-10} m²/s. Le temps de passage est plus important pour le MB30, avec une diminution du coefficient de diffusion de 64% par rapport au mortier MB0. Pour le mortier MB50, après 9 mois de diffusion, le régime permanent n'a pas été atteint, ce qui n'a pas permis de quantifier son coefficient de diffusion. Toutefois, le temps de passage T_r des chlorures à travers la tranche de mortier MB50 est assez important (entre 210 et 240 jours), montrant ainsi une bonne résistance à la pénétration des chlorures.

Plusieurs recherches [95, 104, 153, 154] ont montré une diminution du coefficient de diffusion des chlorures des mélanges (bétons, mortiers ou pâtes) au laitier. Selon YEAUA et al [153], le coefficient de diffusion d'un béton avec 55% de laitier est 3 fois plus faible que celui d'un béton à base de CEM I. A la suite de la réaction pouzzolanique, les mortiers au laitier atteignent une relative supériorité contre la pénétration des chlorures à cause du développement d'une microstructure plus dense [155]. Un taux élevé de $Ca(OH)_2$ dans la matrice hydratée engendre un volume important des pores continus [156]. De ce fait, la consommation de chaux lors de l'hydratation du laitier (réaction pouzzolanique) conduit à une diminution relative du volume des pores capillaires interconnectés rendant la structure plus dense, plus tortueuse et discontinue. D'autre part, le gel de CSH additionnel formé suite à l'hydratation du laitier, bien que moins dense que les CSH primaires, est très efficace pour le remplissage des pores capillaires dans la matrice [157].

L'amélioration de la diffusion peut être attribuée aussi à la capacité de fixation par adsorption des chlorures des parois d'hydrates du laitier et du clinker (CSH et CAH), qui présentent une surface spécifique élevée [92, 106, 158]. DHIR et al [105] ont constaté une augmentation des chlorures liés lorsque le ciment est partiellement substitué par du laitier. LUOA et al [154] qui ont aussi constaté une structure de pores améliorée et une quantité de chlorures physiquement liés plus importante dans le mortier avec 70% de laitier par rapport au mortier à base de CEM I.

Dans notre étude, il faut noter que les mortiers ont subi une durée de cure humide de 90 à 180 jours avant leur mise en cellule de diffusion. Cette durée de cure et la période d'essai

(de 9 mois), permettent une hydratation continue de notre laitier (même s'il est que moyennement réactif), et par conséquent, favorisent la densification de la matrice et, éventuellement, la capacité de fixation des chlorures. D'ailleurs, ceci est confirmé par la diminution de la diffusion des mortiers MB30 et MB50 quant la période de cure humide a été augmentée à 180 jours.

6.6.1.1 Effet de la durée de cure

L'augmentation de la durée de cure avant l'essai (de 90 à 180 jours) a conduit à une amélioration de la résistance aux ions chlore des mortiers au laitier (MB30 et MB50) mais pas du mortier de référence MB0. Cette amélioration se traduit par un prolongement du temps de passage des ions Cl^- ainsi qu'une diminution du coefficient de diffusion. En effet, la variation pour le MB0 reste faible : une diminution de 4% pour du temps de passage et pratiquement pas de changement dans le coefficient de diffusion (Tableau 6.5). Par contre, pour le mortier MB30, le temps de passage T_r est passé de 50 à 87 jours, soit une augmentation de 62%, en comparaison à une diminution de 40% pour le coefficient de diffusion. Comme pour 90 jours de cure, le régime permanent n'a pas été atteint pour le MB50 (avec 180 jours de cure humide) après 9 mois de diffusion.

6.6.2 Conduction des ions chlore

Les résultats de l'essai de conduction des ions chlore (essai accéléré ASTM C 1202) sont présentés pour les mortiers avec et sans laitier, à 90 et 180 jours, dans la figure 6.12.

Une diminution proportionnelle de la charge totale Q avec le pourcentage du laitier est constatée à 90 comme à 180 jours. Selon la classification de WHITING [137] (Tableau 4.10), la perméabilité aux ions chlore est modérée pour le mortier de référence MB0, faible pour le MB30 et très faible pour le MB50. Plusieurs travaux de recherche [94, 103, 155, 169] ont montré une faible conduction des ions chlore des bétons au laitier, particulièrement pour les taux de substitution élevés (supérieurs à 50%).

L'augmentation de la période de cure a conduit à une diminution de la charge Q de 27 et 28% pour les mortiers au laitier MB30 et MB50, respectivement. Pour le MB0, la diminution est négligeable (2%).

En comparant ces résultats avec ceux de la diffusion en régime stationnaire, on remarque une variation similaire, du moins, pour les mortiers de référence et ceux avec 30% de laitier. Les résultats du mortier MB50 n'ont pas pu être exploités à cause leur faible

diffusion. Cependant, les faibles valeurs de la charge Q (927 et 665 coulomb) obtenues pour le MB50, reflètent bien sa faible diffusion observée en régime permanent (Figure 6.10 et 6.11). La figure 6.12 présente la relation entre les résultats de l'essai de diffusion et l'essai de conduction des mortiers MB0 et MB30 à 90 et 180 jours de cure humide. Une très bonne corrélation linéaire ($R=0,99$) montre une diminution de la charge totale avec la diminution du coefficient de diffusion.

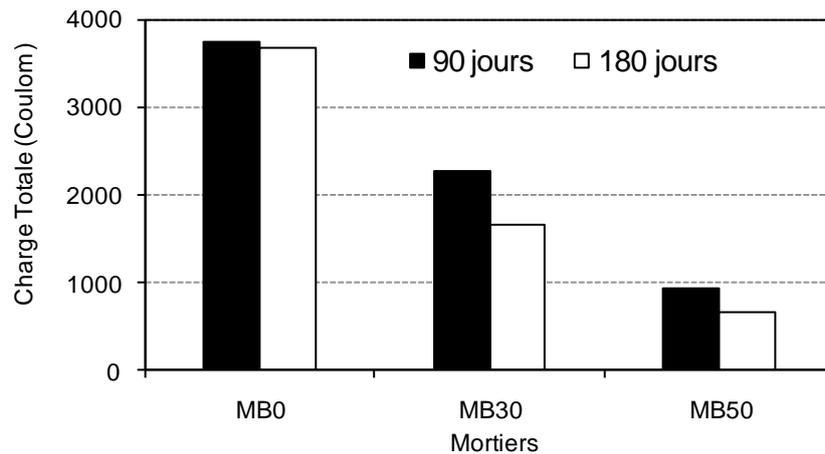


Figure 6.12 : Conduction des chlorures a travers les mortiers avec et sans laitier après 90 et 180 jours de maturation.

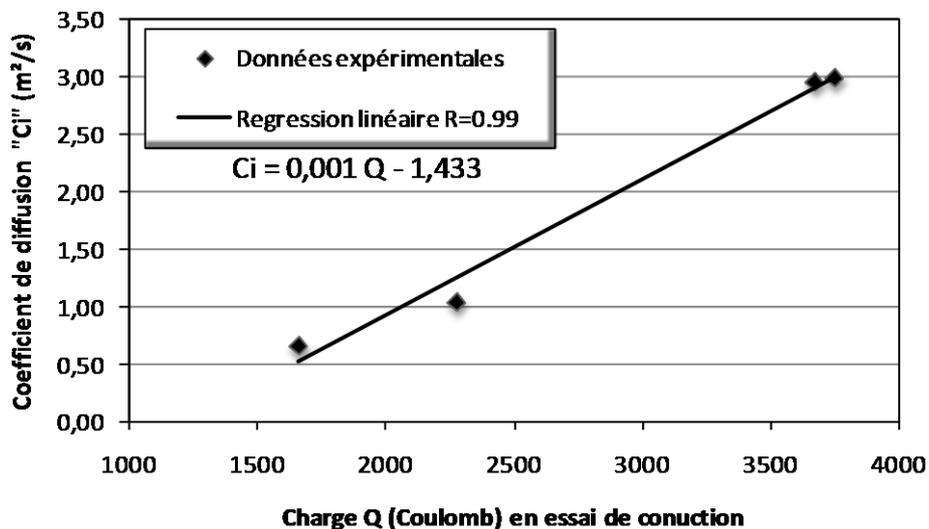


Figure 6.13 Relation entre le coefficient de diffusion et la charge totale Q .

6.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la microstructure et les propriétés de transport des mortiers au laitier d'El Hadjar. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- la porosité à l'eau ou au mercure des mortiers au laitier est plus élevée que celle du mortier à base de CEM I. Cependant, la porosité fermée, reflétant une structure de pores discontinue, est plus importante pour les mortiers au laitier, particulièrement après 90 jours de maturation ;
- après 90 jours, la distribution de la taille de pores des mortiers au laitier évolue vers les pores de petite taille (particulièrement de rayon inférieur à 50 nm), suite à une densification de la microstructure. Cet effet, plus significatif au long terme (360 jours), est la conséquence d'une bonne hydratation du laitier ;
- l'absorption capillaire et le taux de saturation sont améliorés par la présence du laitier, notamment, pour un taux de 50% de substitution. Toutefois, une faible évolution de ces paramètres est observée entre 90 et 360 jours ;
- à 90 jours, un taux de substitution de 50% conduit à une augmentation de la perméabilité à l'oxygène, mais un taux de 30 % de laitier ne l'affecte que légèrement. Au contraire, au long terme (360 jours), les mortiers au laitier (particulièrement le MB50) ont une perméabilité plus faible que celle du mortier de référence.
- après 90 jours de cure humide, 30% de laitier a réduit le temps de passage des chlorures, mais les coefficients de diffusion sont comparable. Toutefois, 50% de laitier conduit à une meilleure perméabilité aux ions chlore, avec un temps de passage important et un faible taux de diffusion. L'augmentation de la période de cure, conduit à une diminution de la diffusion dans les mortiers au laitier. La performance du mortier de référence n'a pas été considérablement influencée par la période de cure.
- Une faible conduction des ions chlore est observée pour les mortiers au laitier par rapport au mortier à base de CEM I. Les résultats d'essai de conduction (ASTM 1202) montrent une tendance similaire à ceux de l'essai de diffusion en régime permanent. Une très bonne corrélation linéaire est obtenue entre la charge totale Q et le coefficient de diffusion.

Chapitre 7

DURABILITE DES MORTIERS AU LAITIER d'EL HADJAR DANS DES MILIEUX SULFATIQUES

7.1 Introduction

Le comportement du béton dans un environnement chimiquement agressif dépend de multiples facteurs définis, d'une part, par la qualité du milieu (nature, concentration et fréquence de renouvellement) et, d'autre part, par la nature du matériau (type du liant, composition, conditions de cure,...). Généralement, pour réaliser un béton durable, il suffit de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact [88]. Cependant, le respect d'exigences supplémentaires, notamment le choix du liant, est nécessaire pour maîtriser les attaques provenant d'un milieu chimiquement agressif comme par exemple des eaux sulfatées ou de l'eau de mer. Les ciments au laitier de haut fourneau, à cause de leur pouvoir pouzzolanique réduisant la quantité de chaux dans la pâte de ciment durci, sont connus pour leur bonne tenue face à de tels environnements. De plus, ils contiennent moins d'aluminate de calcium (C_3A) dont l'influence négative sur la durabilité des ciments en présence de sulfates est bien connue.

L'objectif de cette partie d'étude est d'observer la tenue des mortiers au laitier d'El Hadjar soumis, après maturation en cure humide, à des solutions de sulfates de sodium et de magnésium ainsi que d'eau de mer.

7.2 Résistance aux sulfates de sodium et de magnésium

7.2.1 Expansion

a. Effet du type de solution

L'expansion (Appréciée par la variation de longueur) des éprouvettes de mortier au laitier à base de ciment A (CEM I 32,5) et de ciment B (CEM I 52,5), immergées dans les solutions de sulfate de sodium ou de sulfate de magnésium à 5% de concentration, est représentée sur les figures 7.1 à 7.4.

Au vu de ces résultats, on peut voir une expansion plus importante des éprouvettes de mortier (A ou B) conservées dans la solution de sulfate de sodium, comparée à celle des éprouvettes conservées dans la solution de sulfate de magnésium. A titre indicatif, pour un

mortier A avec 30% d'ajout, l'expansion après 180 jours d'immersion est de 0,98% pour les éprouvettes placées dans la solution de Na_2SO_4 (NS^-) comparée à 0,56 % pour le même mortier conservé dans la solution de MgSO_4 (MS^-).

b. Effet du taux de substitution du laitier

Au regard des figures 7.1 et 7.2, on constate que l'incorporation du laitier dans les mortiers A, conduit à une diminution de l'expansion dans les deux solutions de sulfates. Le mortier de référence MA0 (à base de CEM I 32,5) a atteint une expansion maximale (> 1%) après seulement 4 mois d'immersion dans la solution de sulfate de sodium. A cette échéance, les mortiers MA10, MA30 et MA50 présentent, respectivement, une expansion plus faible de l'ordre de 26, 30 et 73% par rapport au mortier MA0. La même tendance est observée dans la solution de sulfate de magnésium où, après 6 mois d'immersion, 10 et 30% de laitier ont conduit à une réduction de l'expansion de l'ordre de 19 et 28%, respectivement. Toutefois, cette diminution est moins importante comparativement à celle enregistrée dans la solution de sulfates de sodium, pour les mêmes mortiers. Les mortiers MA50 et MA60 ont présenté, quant à eux, dans les deux solutions de sulfate, une très faible expansion qui n'excède pas les 0,06% après 6 mois et 0,40% après 12 mois d'immersion. La même variation est constatée pour les mortiers B, particulièrement pour le MB50.

c. Effet du type du ciment

Sur les figures 7.3 et 7.4, on peut constater une faible expansion pour les mortiers B, avec et sans laitier, qui reste inférieure à 0,10% après 9 mois d'immersion, par rapport à celles des mortiers A, qui dépasse les 0,80% après 6 mois d'immersion. Cette diminution était prévisible et est due à la résistance plus élevée des mortiers B (CEM I 52,5) par rapport aux mortiers A (CEM I 32,5). D'autre part, comme constaté pour les mortiers A, l'incorporation du laitier dans les mortiers B, a conduit à une expansion plus faible (Figures 7.3 et 7.4). Cet effet est plus visible pour le taux de substitution de 50% de laitier. En effet, l'expansion du mortier MB50, après 9 mois d'immersion, représente seulement 20% et 25% de celle du mortier MB0 dans les solutions de sulfates de sodium et de magnésium, respectivement. Toutefois, on remarque que l'efficacité du laitier est moins importante pour le mortier B que pour le mortier A (Figure 7.1 et 7.2).

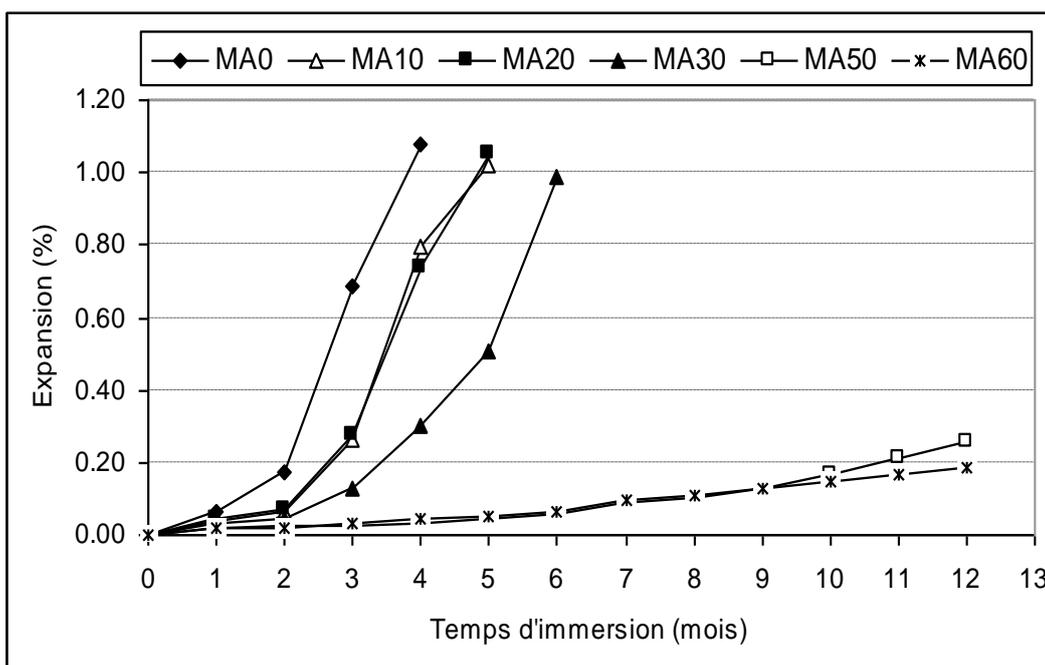


Figure 7.1 : Expansion des éprouvettes de mortier A (CEM I 32,5) dans la solution de sulfate de sodium (5% Na₂SO₄).

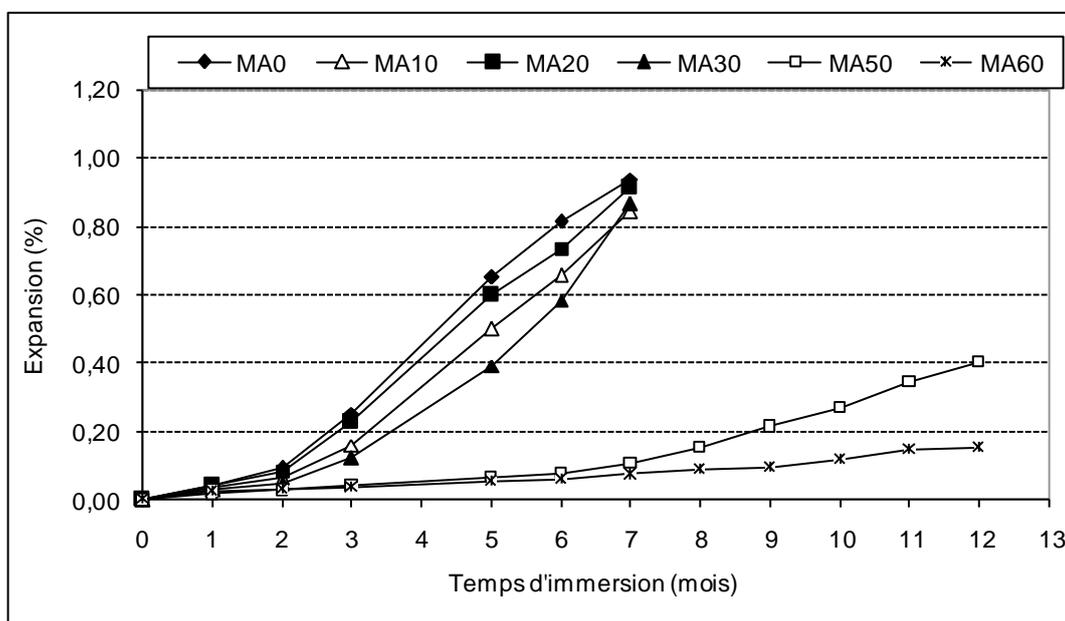


Figure 7.2 : Expansion des éprouvettes de mortier A (CEM I 32,5) dans la solution de sulfate de magnésium (5% MgSO₄).

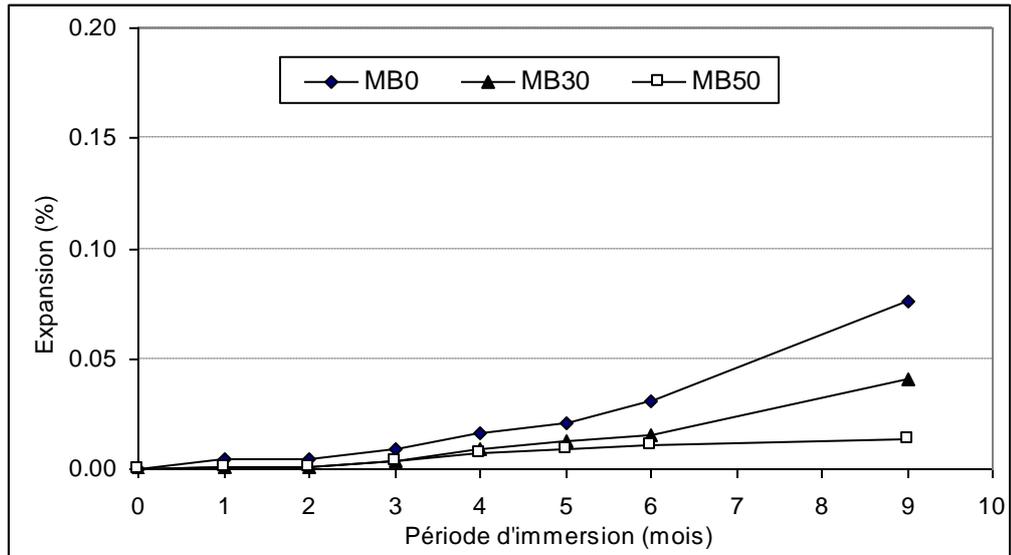


Figure 7.3 : Expansion des éprouvettes de mortier B (CEM I 52,5) dans la solution de sulfate de sodium (5% Na₂SO₄).

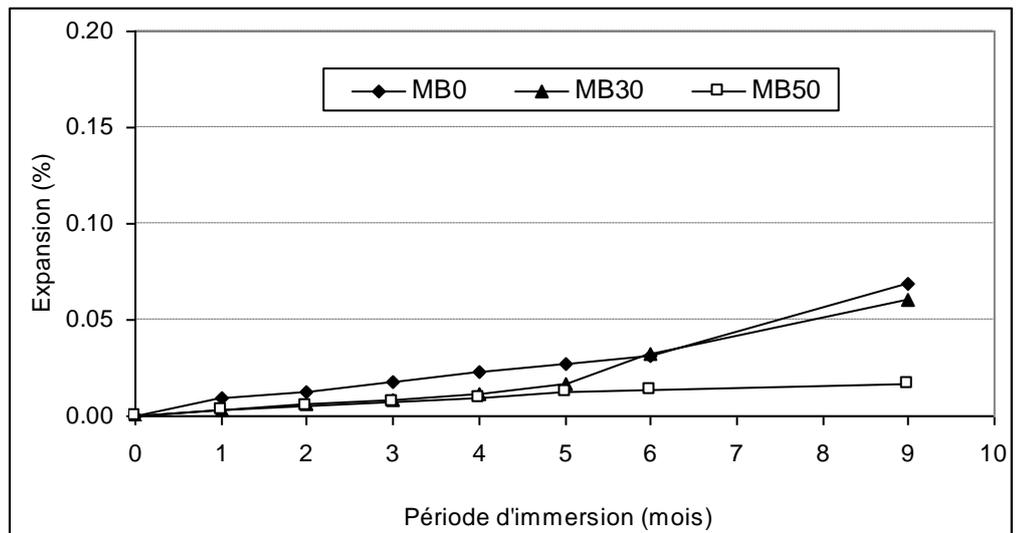
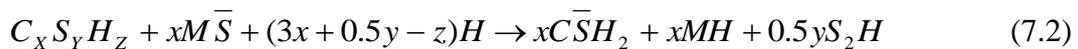


Figure 7.4 : Expansion des éprouvettes de mortier B (CEM I 52,5) dans la solution de sulfate de magnésium (5% MgSO₄).

d. Discussion

La variation observée dans cette partie reflète un comportement typique des ciments au laitier face à un environnement sulfatique. En effet, la diminution de l'expansion a été observée par plusieurs chercheurs, surtout, pour les ciments contenant un taux de laitier supérieur à 50%, particulièrement dans un environnement de sulfates de sodium [113, 116]. Toutefois, l'ordre de grandeur reste proportionnel à la composition chimique et de la finesse du ciment et du laitier utilisé, à la concentration de la solution de sulfate et à la période d'immersion.

La différence d'expansion des éprouvettes entre les deux solutions (5% \overline{NS}) et (5% \overline{MS}) indique une dissimilitude dans le mécanisme d'attaque. En effet, la détérioration du ciment par les sulfates de magnésium est contrôlée par l'attaque de magnésium - gypse sur le gel de silicate de calcium hydraté (CSH). La formation du gypse et de la brucite (MH) est due aux réactions entre \overline{MS} et CH , CSH (Equation 7.1 et 7.2) [110]. Le gypse formé réagit avec l'aluminate du ciment selon l'équation (7.3) :



La brucite, formée d'après les équations 7.1 et 7.2, étant insoluble (sa solubilité est de 0,01 g/l comparée à 1,37 g/l pour le CH) et ayant un bas pH d'environ 10,5, occasionne, d'une part, des réactions continues entre le CSH et les \overline{MS} pour former plus de \overline{CHS}_2 [111] et d'autre part, tend à déstabiliser l'ettringite formée dans l'équation 7.3 [160, 161]: ceci peut expliquer la relative faible expansion des mortiers dans la solution de \overline{MS} par rapport à la solution de \overline{NS} .

L'expansion élevée mesurée sur les mortiers immergés dans la solution de sulfate de sodium et, particulièrement, du mortier témoin (à base de CEM I), est attribuée à la formation d'ettringite secondaire. L'attaque des sulfates de sodium dépend de la teneur en C_3A du ciment et de la quantité de CH issue de l'hydratation. Le CH réagit dans un premier temps avec le \overline{NS} (voir Equation 3.1, Chapitre 3): le gypse produit réagirait ensuite avec l'aluminate hydraté, le monosulfate ou le C_3A anhydre pour produire l'ettringite secondaire, qui cause l'expansion et la fissuration.

Dans un ciment au laitier, le taux de C_3A est relativement plus faible que celui d'un ciment sans ajout (CEM I). Ce taux est d'autant plus faible que le pourcentage du laitier augmente. D'autre part, le laitier de haut fourneau à cause de la réaction pouzzolanique qui consomme de l'hydroxyde de calcium (CH), conduit à une diminution de la formation du gypse et par conséquent, de l'ettringite. Ceci peut expliquer la diminution de l'expansion constatée dans les mortiers à base de ciment au laitier.

Le ciment B étant de classe de résistance élevée (CEM I 52,5), le mortier résultant ce caractérise par une résistance élevée (58 MPa à 28 jours), par une faible porosité et présente d'emblée une certaine résistance à la pénétration des agents agressifs. De ce fait, face aux sulfates, l'effet positif apporté par le laitier est moins apparent dans le mortier B par rapport au mortier A (ciment de faible classe de résistance). Néanmoins, pour le mortier B (CEM I 52.5), la durée d'immersion étudiée (9 mois) reste insuffisante et un suivi plus long de l'expansion pourrait nous informer d'avantage.

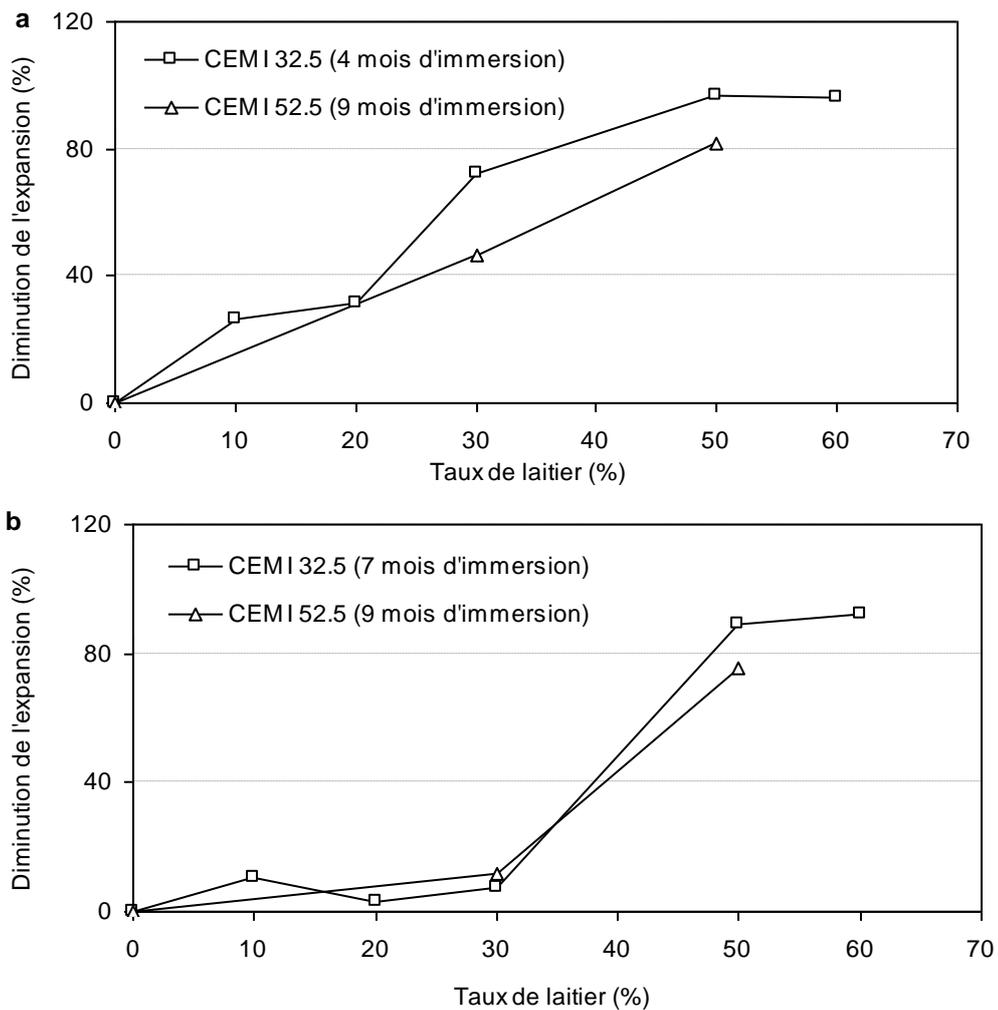


Figure 7.5 : Influence du taux de laitier sur la réduction de l'expansion des mortiers exposés en sulfate de sodium (a) et en sulfates de magnésium (b).

7.2.2 Variation des résistances mécaniques

L'étude des résistances mécaniques des mortiers au laitier immergés dans les solutions de sulfates de sodium et de sulfates de magnésium a été réalisée sur des mortiers à base de ciment A (CEM I 32,5). Les taux de substitution de laitier étaient 20, 30 et 50%, respectivement. Une série d'éprouvettes témoins ont été conservées dans l'eau à 20°C.

7.2.2.1 Résistance en flexion

Les figures 7.6 et 7.7 présentent les résultats de la résistance en flexion des éprouvettes de mortier immergées dans les solutions de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium, respectivement.

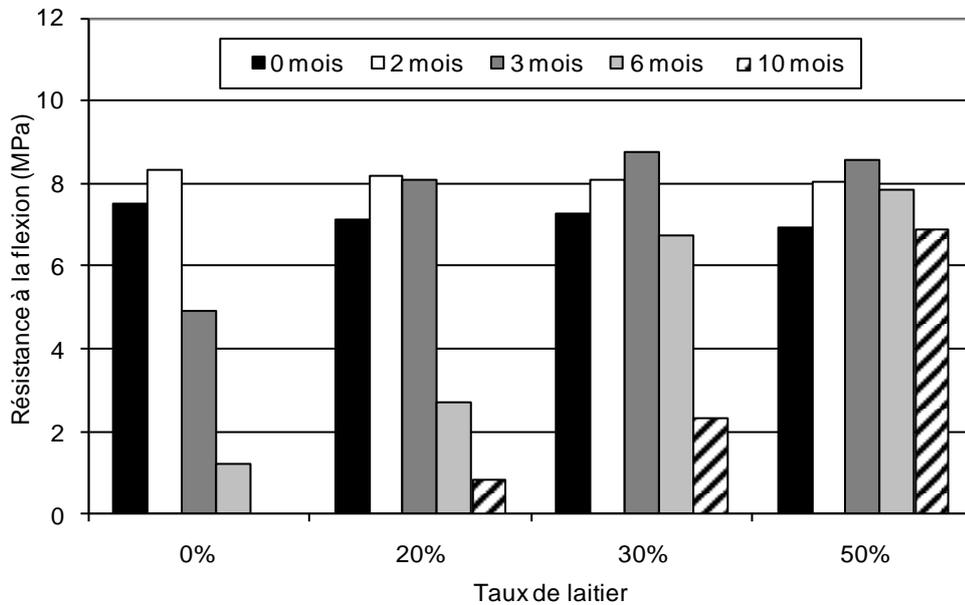


Figure 7.6 : Développement de la résistance en flexion en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de sodium (5% Na_2SO_4).

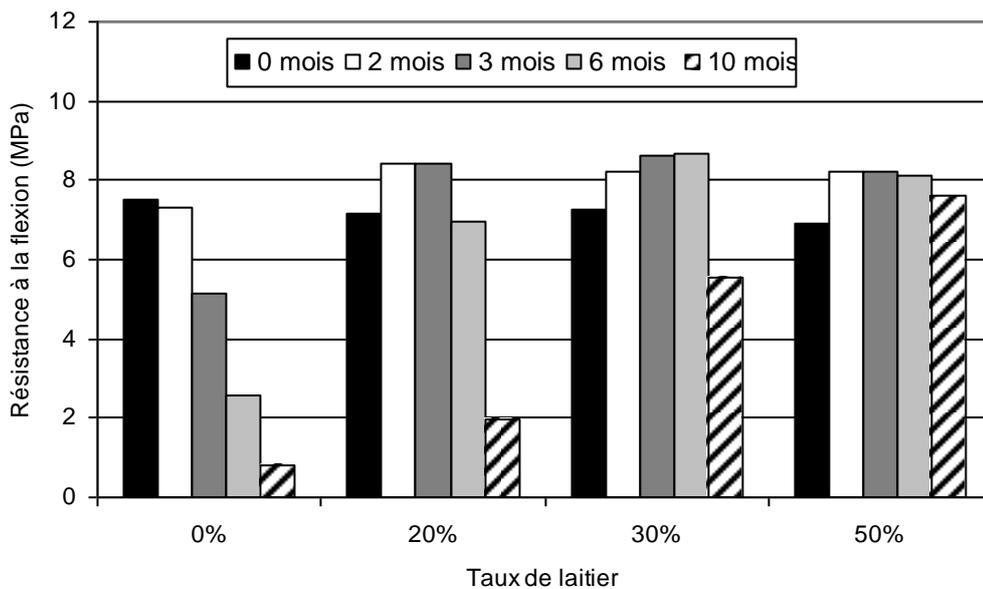


Figure 7.7 : Développement de la résistance à la flexion des éprouvettes en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de magnésium (5% MgSO_4).

Dans la solution de sulfate de sodium (Figure 7.6), on constate une augmentation de la résistance pendant une période de 2 mois à 3 mois d'immersion pour les mortiers sans et avec laitier. Cette augmentation, semble être due à l'hydratation continue du ciment. Après cette période, une diminution de la résistance est observée pour tous les mortiers. Toutefois, la diminution de résistance la plus importante est vue pour le mortier MA0 qui s'est pratiquement désintégré après 7 mois de conservation, comme le montre la figure 7.14. La diminution de résistance est d'autant moins importante que le pourcentage de laitier augmente. La même tendance est observée dans la solution de sulfate de magnésium (5% $MgSO_4$), avec toutefois, une diminution de résistance moins importante (Figure 7.7).

Les résultats de la résistance relative à la flexion des éprouvettes immergées dans les solutions de sulfates de sodium et de magnésium par rapport à celle des éprouvettes conservées dans l'eau à 20°C sont présentés dans les figures 7.8 et 7.9. Dans la solution de sulfates de sodium (5% Na_2SO_4), la variation de la résistance en flexion montre le comportement suivant : dans un premier temps (à 2 et 3 mois), la résistance est plus élevée dans la solution de sulfate que dans l'eau: cela est probablement dû au remplissage des pores par les produits de réaction des sulfates (Na_2SO_4) avec les hydrates du ciment ($Ca(OH)_2$) pour former le gypse et l'ettringite qui complètent les micropores menant à une microstructure plus dense [162]. Ensuite, la résistance est maintenue ou diminue en raison de la microfissuration générée par les produits expansifs. Cette diminution, après 6 mois d'immersion, reste faible pour les mortiers MA30 et MA50. Cependant, les mortiers MA0 et MA20 ont subi une perte de résistance importante (85% et 65% respectivement). Ceci est dû principalement aux fissures engendrées par l'expansion due à l'attaque des sulfates de sodium (Figures 7.14). Contrairement aux autres mortiers, après 10 mois d'immersion, le MA50 est le seul à avoir conservé une grande partie de sa résistance (85%).

Dans la solution de sulfates de magnésium (Figure 7.9), après 6 mois d'immersion, les mortiers au laitier n'ont subi aucune perte de résistance à l'exception du MA20 qui a accusé 12% de perte. Par ailleurs, une perte de 65% de résistance a été observée pour le MA0. Après 10 mois de conservation, les mortiers MA0, MA20 et MA30 ont subi respectivement 90%, 76% et 39% de perte de résistance, contrairement au mortier MA50, qui a maintenu 94% de sa résistance.

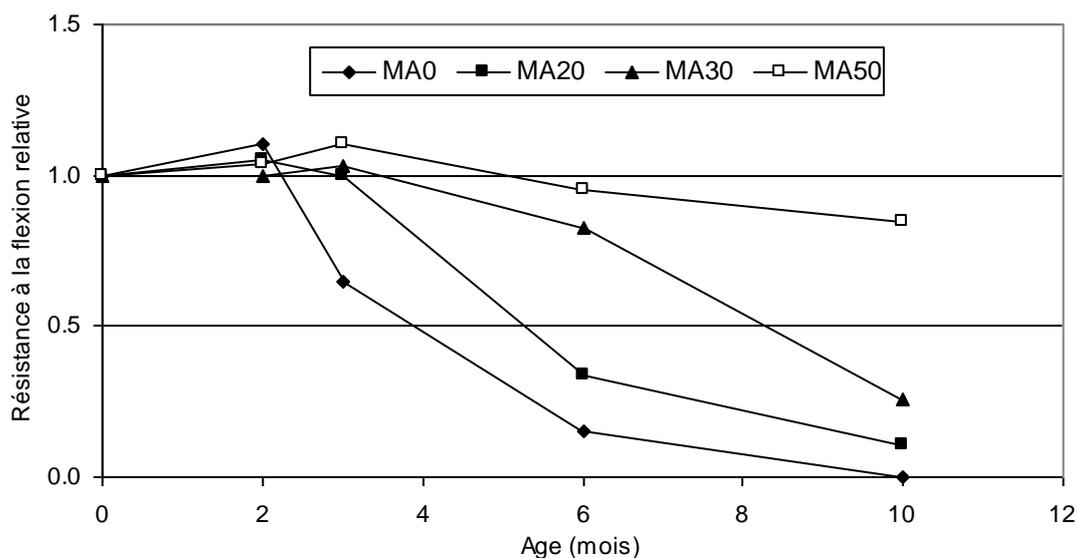


Figure 7.8 : Résistance à la flexion relative des éprouvettes immergées dans les sulfates de sodium (5% Na₂SO₄).

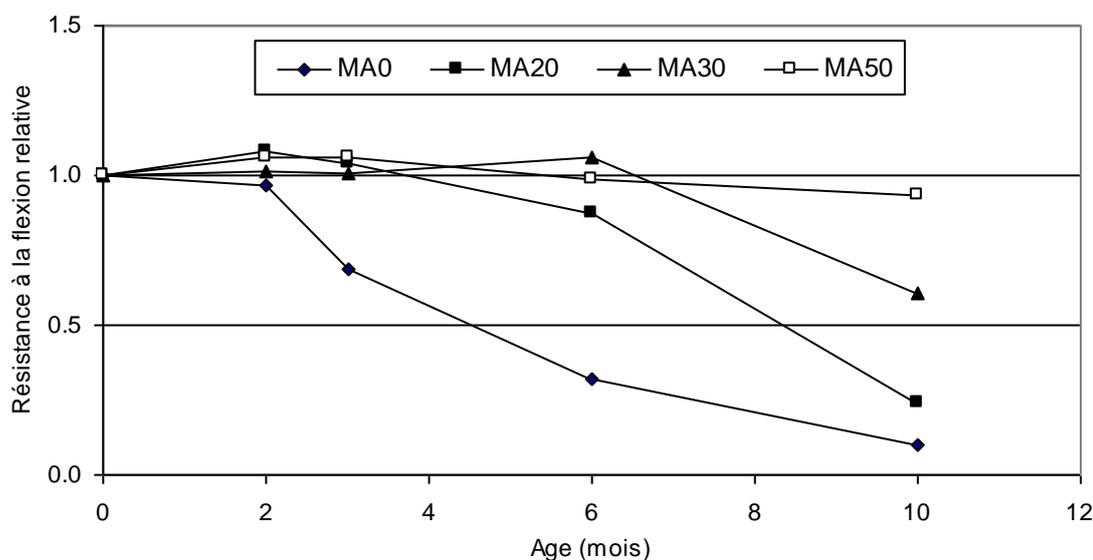


Figure 7.9 : Résistance à la flexion relative des éprouvettes immergée dans les sulfates de magnésium (5% MgSO₄).

7.2.2.2 Résistance à la compression

Le développement de la résistance en compression en fonction du temps d'immersion, dans les sulfates de sodium et de magnésium, des mortiers au laitier est représenté respectivement par les figures 7.10 et 7.11. Le comportement observé en flexion se reproduit en compression. En effet, on peut constater une augmentation de la résistance pendant les 2 à 3 premiers mois, suivie d'une diminution, plus importante pour le mortier MA0 par rapport aux mortiers au laitier. Cette variation est observée dans les deux

solutions de sulfates, pour tous les mortiers à l'exception du MA50 dont la résistance a continué son développement durant toute la période d'immersion dans les sulfates de sodium (Figure 7.10).

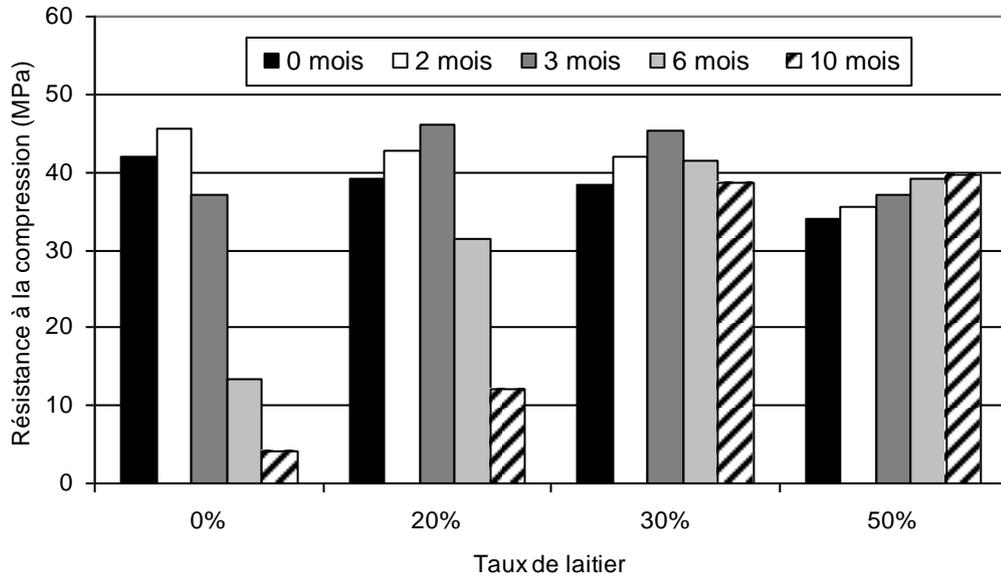


Figure 7.10 : Développement de la résistance en compression en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de sodium (5% Na₂SO₄).

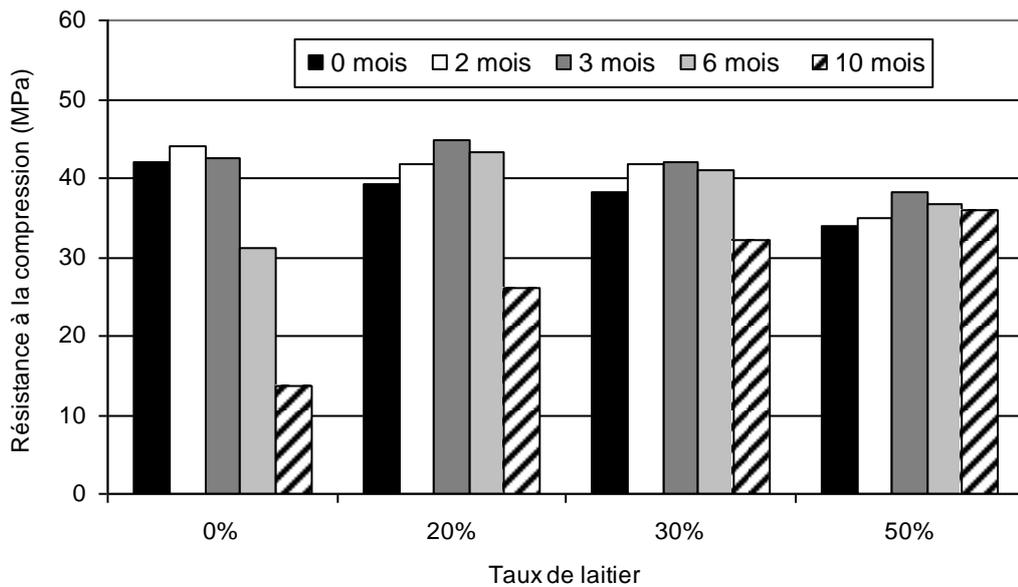
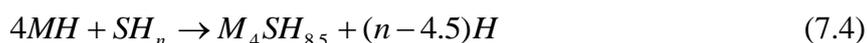


Figure 7.11 : Développement de la résistance en compression en fonction du temps d'immersion dans les sulfates de magnésium (5% MgSO₄).

Les figures 7.12 et 7.13 représentent la résistance en compression des mortiers immergés dans les solutions de sulfates, par rapport à la résistance en compression des mortiers témoins conservés dans l'eau à 20°C. De ces résultats, on constate, pour les éprouvettes immergées dans la solution de sulfate de sodium (5% Na₂SO₄), une perte de résistance à tout âge pour mortier MA0. Cependant, pour les mortiers au laitier, on remarque une légère augmentation jusqu'à 90 jours d'immersion, suivie d'une perte de résistance (de 5 à 35% après 6 mois). Après 10 mois d'immersion, les mortiers MA0 et MA20 ont subi une importante perte de résistance (Figure 7.12). A cette échéance, une perte de résistance relativement faible (18 à 25%) est constatée pour les mortiers MA30 et MA50.

Les mortiers conservés dans les sulfates de magnésium ont eux aussi subi une perte de résistance, notamment après 6 mois d'immersion. Toutefois, par comparaison aux mortiers au laitier (particulièrement le MA50), le mortier sans ajout a accusé une perte de résistance importante de l'ordre de 73% après 10 mois d'immersion.

Pour les mortiers avec 30 et 50% de laitier, la perte de résistance est plus importante dans les sulfates de magnésium (5% MgSO₄) que dans les sulfates de sodium (5% Na₂SO₄). Plusieurs recherches [114, 116] ont montré une vulnérabilité plus élevée des ciments au laitier vis-à-vis des sulfates de magnésium par rapport aux sulfates de sodium. Ceci s'explique par l'attaque préjudiciable des sulfates de magnésium. En effet, dans les sulfates de magnésium, mise à part de la formation d'ettringite expansive, une autre action nuisible peut avoir lieu dans la pâte de ciment; elle peut se résumer comme suit : la réaction entre $M\bar{S}$ et CH du ciment conduit à la formation de la brucite (équation 7.1), qui elle-même réagit avec le gel de silicates (S_2H), produit par la réaction de $M\bar{S}$ et CSH (équation 7.2). De ce fait, des silicates de magnésium hydratés (MSH) sont produits comme le montre l'équation 7.4 [111]. Les MSH étant faiblement cohésif, conduisent à une détérioration des couches surfaciques de la pâte durcie de ciment (Figure 7.15 et 7.16-b) et, par conséquent, à une perte de résistance.



Dans les ciments au laitier, la diminution de la quantité d'hydroxyde de calcium consommée par la réaction pouzzolanique conduit à une réaction directe des ions de magnésium et de sulfate avec le CSH , menant à la formation de MSH (Equations 7.2 et 7.4). Selon RASHEEDUZZAFAR et al [160] les dégradations subies par les ciments au laitier lors d'une attaque de sulfates de magnésium sont dues à l'absence de brucite (MH)

protectrice. En effet, étant relativement insoluble dans l'eau et connue pour bloquer les pores de la matrice durcie de la pâte du ciment, la brucite fournit un bouclier protecteur à l'entrée des ions de sulfate [163].

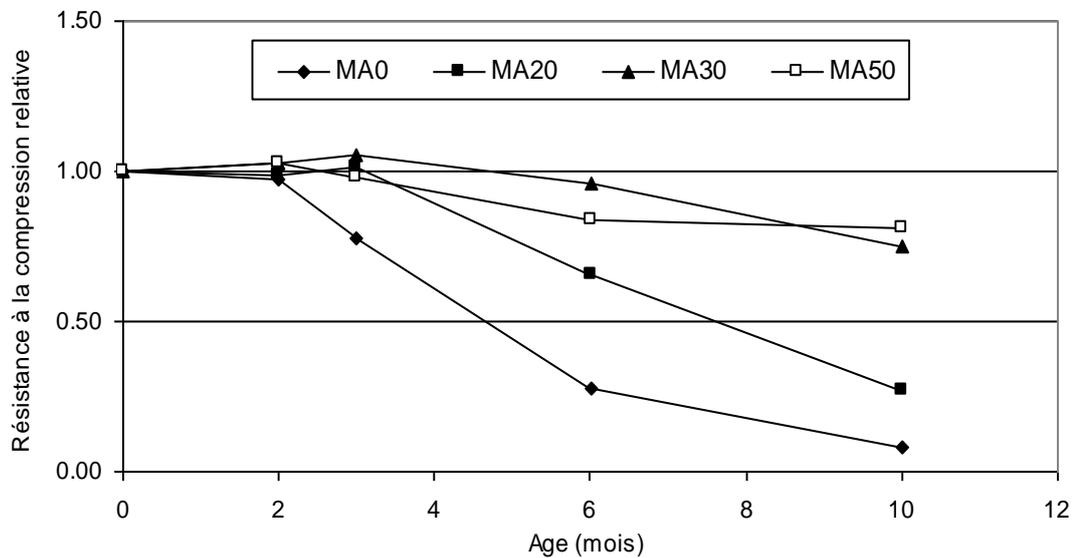


Figure 7.12 : Résistance à la compression relative des éprouvettes immergées dans les sulfates de Sodium (5% Na_2SO_4).

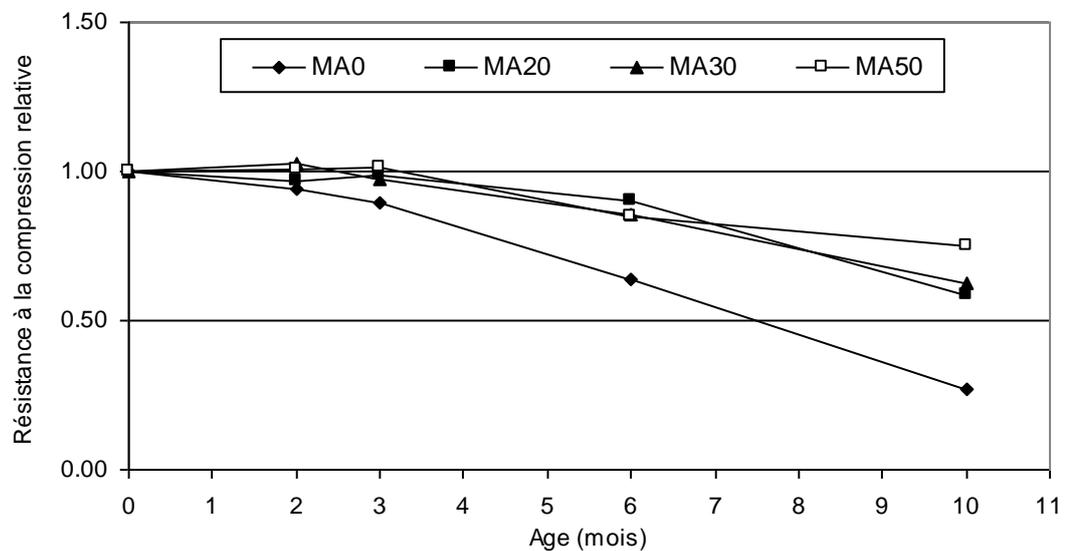


Figure.7.13 : Résistance à la compression relative des éprouvettes immergées dans les sulfates de magnésium (5% MgSO_4).

7.2.2.3 Aspect visuel

Les figures ci-dessous montrent l'état des éprouvettes de mortier A et B, avec et sans ajout laitier, après immersion dans les sulfates de sodium (5% Na_2SO_4) et sulfates de magnésium.



Figure. 7.14 : Eprouvettes de mortier A, après 7 mois (MA0 et MA20) et 6 mois (MA30, MA50 et MA60) de conservation dans les sulfates de sodium (5% de Na_2SO_4).

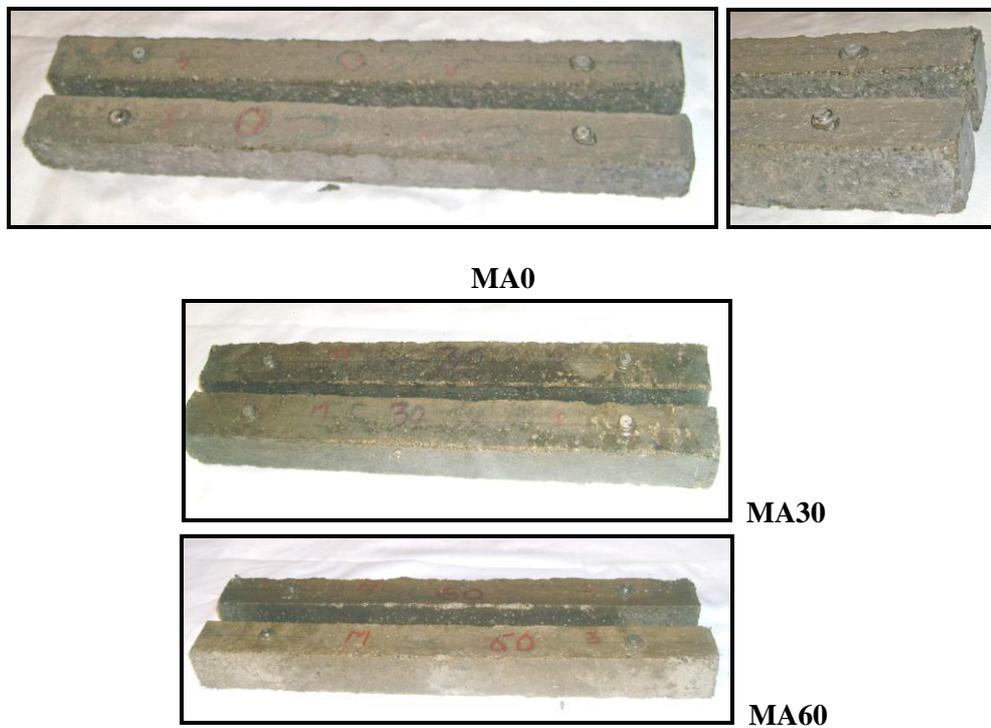


Figure 7.15 : Eprouvettes de mortier MA0, MA30 et MA60, après 6 mois d'immersion dans 5% de MgSO_4 .

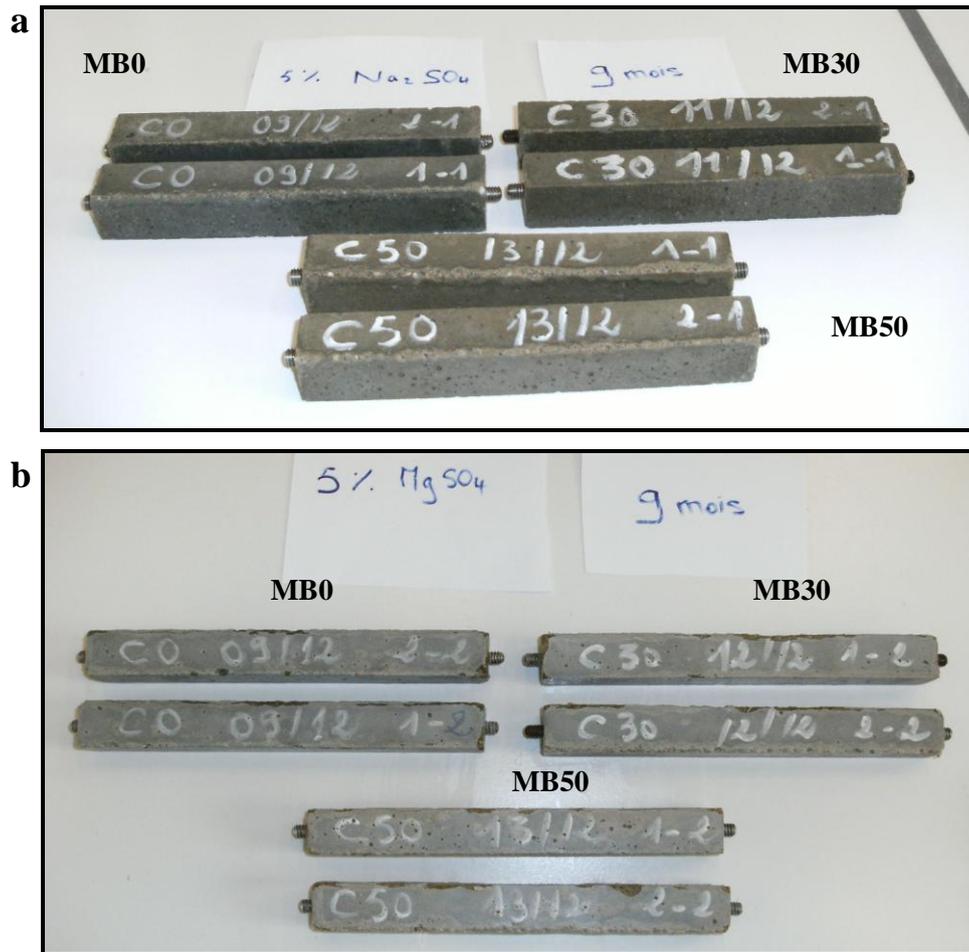


Figure 7.16 : Epreuves de mortier MB0, MB30 et MB0, après 9 mois d'immersion dans (a) 5% de Na₂SO₄ et (b) 5% de MgSO₄.

7.3 Résistance à l'eau de mer

Des éprouvettes de mortier avec et sans laitier à base de ciment B ont été immergées dans une solution d'eau de mer (EM) pendant une période de 9 mois. Une série d'éprouvettes témoins a été conservée parallèlement dans l'eau (E). L'expansion et la variation de masse mesurées durant cette période sont représentées par les figures 7.17 et 7.18.

De la figure 7.17, on observe une faible expansion (0,020-0,025% après 9 mois) et peu variable entre les trois mortiers étudiés avec et sans laitier, en comparaison avec l'expansion observée dans les solutions de sulfates de sodium ou de magnésium. Toutefois, une expansion légèrement supérieure des mortiers au laitier (notamment MB50) est constatée.

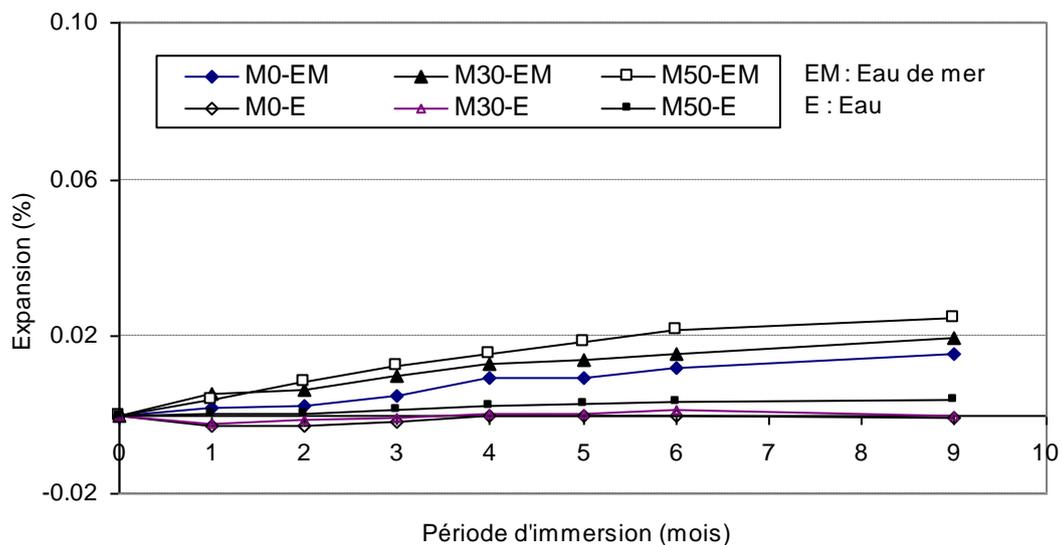


Figure 7.17: Expansion des mortiers au laitier dans l'eau de mer.

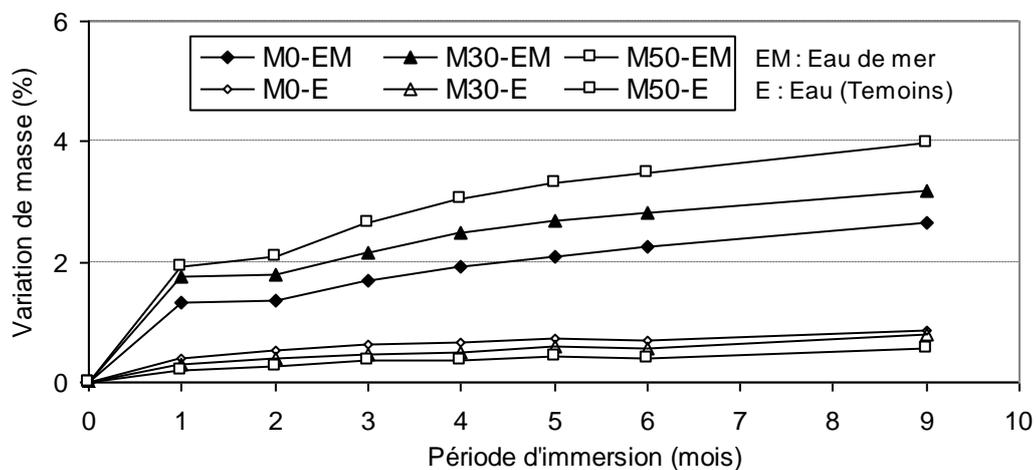


Figure 7.18: Variation de masse des mortiers au laitier dans l'eau de mer.

La variation de la masse (Figure 7.18), qui augmente avec le temps, suit la même tendance que l'expansion. Une augmentation plus importante est observée pour les mortiers avec 30 et 50% de laitier par rapport au mortier à base de CEM I. BEHIM [88], dans son étude sur le laitier d'El Hadjar, a constaté une variation similaire sur des pâtes de ciment avec 50% de laitier conservés dans l'eau de mer.

L'expansion des mortiers immergés dans les solutions de sulfates seuls est plus intense que dans une solution de sulfates et de chlorures [163]. LEA [161] et BICZOK [164] ont constaté que l'expansion du béton causée par des ions sulfate en eau de mer est fortement retardée par la présence de chlorures. Ils ont attribué ce retardement à la plus grande solubilité des phases de sulfate dans des solutions de chlorure de sodium et de calcium. En effet, CORNOR et al, cité par HARRISON [165], ont observé une solubilité trois fois plus

grande de l'ettringite dans des solutions de chlorure que dans l'eau. De ce fait, l'ettringite cristallise sous une forme moins expansive à partir de la solution [92, 163].

De plus, l'expansion plus importante, observée dans les solutions de sulfate comparées à l'eau de mer, peut être attribuée à la différence du taux de diffusion des ions Cl^- et SO_4^{-2} , celui des Cl^- étant le plus élevé. Ceci permet aux ions de Cl^- de pénétrer dans la matrice plus rapidement que les ions de SO_4^{-2} . Les chlorures réagissent ainsi avec les C_3A pour former des chloroaluminates de calcium (Sel de Friedel), diminuant ainsi la quantité de C_3A disponible pour réagir avec les ions sulfates pour former le gypse ou l'ettringite expansive [163].

Il faut toutefois noter que la concentration des sulfates en eau de mer (sulfates de magnésium 5,0 g/l et sulfates de calcium 1,5 g/l) est beaucoup moins importante que celle des solutions de sulfates de sodium ou de magnésium étudiées précédemment (50 g/l).

7.4 Conclusion

Les résultats de cette étude nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- l'incorporation du laitier d'El Hadjar dans les mortiers à base de ciment A ou B conduit à une diminution de l'expansion des éprouvettes conservées dans les sulfates de sodium ou de magnésium. Cette amélioration est plus évidente pour des taux de substitution supérieurs à 30% et devient très intéressante pour un taux de 50% de laitier;
- l'utilisation du ciment B (CEM I 52.5) dans le mortier avec ou sans laitier conduit à un meilleur comportement des mortiers vis-à-vis des sulfates de sodium et de magnésium, qui se traduit par une expansion plus faible. Toutefois, la période étudiée (9 mois) pour le mortier B reste insuffisante;
- après une période d'immersion de 10 mois dans les sulfates de sodium, seul un taux de substitution de 50% de laitier a permis au mortier de conserver sa résistance mécanique. Dans les sulfates de magnésium, les mortiers au laitier ont subi moins de perte de résistance que le mortier sans ajout mais, ils semblent être plus vulnérables dans les sulfates de magnésium que dans les sulfates de sodium;

- l'attaque de l'eau de mer semble être moins préjudiciable que celle des solutions de sulfates de sodium et de magnésium. Dans cet environnement, l'incorporation du laitier a eu un effet négligeable sur l'expansion des mortiers.

Chapitre 8

RESISTANCE ET DURABILITE DES BETONS A BASE DE CIMENTS AU LAITIER D'EL HADJAR

8.1 Introduction

Le laitier granulé est très souvent utilisé dans la confection des bétons, comme substituant du ciment ou comme addition au béton, particulièrement dans les centrales à béton [6]. Cette utilisation est liée aux avantages qu'il peut apporter au béton en améliorant ses propriétés à l'état frais et à l'état durci, notamment au long terme [148].

L'étude des bétons utilisant des ciments au laitier permet de valider les résultats obtenus sur mortier et de vérifier l'influence du laitier sur les caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton. Pour cela, le présent chapitre propose d'étudier l'influence des ciments au laitier d'El Hadjar sur la résistance en compression et sur différentes propriétés relatives à la durabilité du béton: l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité au gaz et la pénétration d'eau sous pression. Pour mieux comprendre le comportement des bétons au laitier, deux rapport Eau/Liant ($E/L=0,65$ et $0,42$) ont été étudiés.

8.2 Résistance en compression

La résistance en compression des bétons à base de ciment au laitier d'El Hadjar, dont la composition est présentée par le tableau 4.9 (chapitre 4), est représentée par les figures 8.1 et 8.2, respectivement pour les rapports E/L de $0,65$ et $0,42$.

Au regard de la figure 8.1, pour les bétons avec un rapport $E/L=0,65$, une diminution de la résistance à la compression à 28 jours avec l'augmentation du taux de laitier est observée. Néanmoins, cette diminution reste faible pour les bétons avec 15 et 30% de laitier (A15 et A30) par rapport au béton avec 50% de laitier (A50) qui, par comparaison avec le béton témoin A0, a développé une faible résistance de 16,30 MPa. Après 90 jours de maturation, la résistance des bétons A15 et A30 reste comparable à celle du béton témoin. D'autre part, la résistance du béton A50 s'est développée jusqu'à 33 MPa mais, reste inférieure à celle du béton A0. La même variation est constatée au long terme (360 jours) avec, néanmoins, une plus faible résistance pour le béton A50 (de l'ordre de 16%), toutefois moins importante que celle enregistrée à 90 jours (22%) par rapport au béton A0.

Cette variation a été rapportée par Kenai et Amrane [166], qui ont montré la possibilité d'utilisation du laitier Algérien à un taux n'excédant pas les 35% (substitution du ciment), sans affecter les propriétés mécaniques d'un béton avec un rapport E/C de 0,55. Ce taux de laitier, relativement faible, a été attribué à la faible réactivité du laitier étudié. D'autre part, cette tendance confirme l'évolution des résistances déjà constatée sur les mortiers à base de ciment au laitier (Chapitre 5).

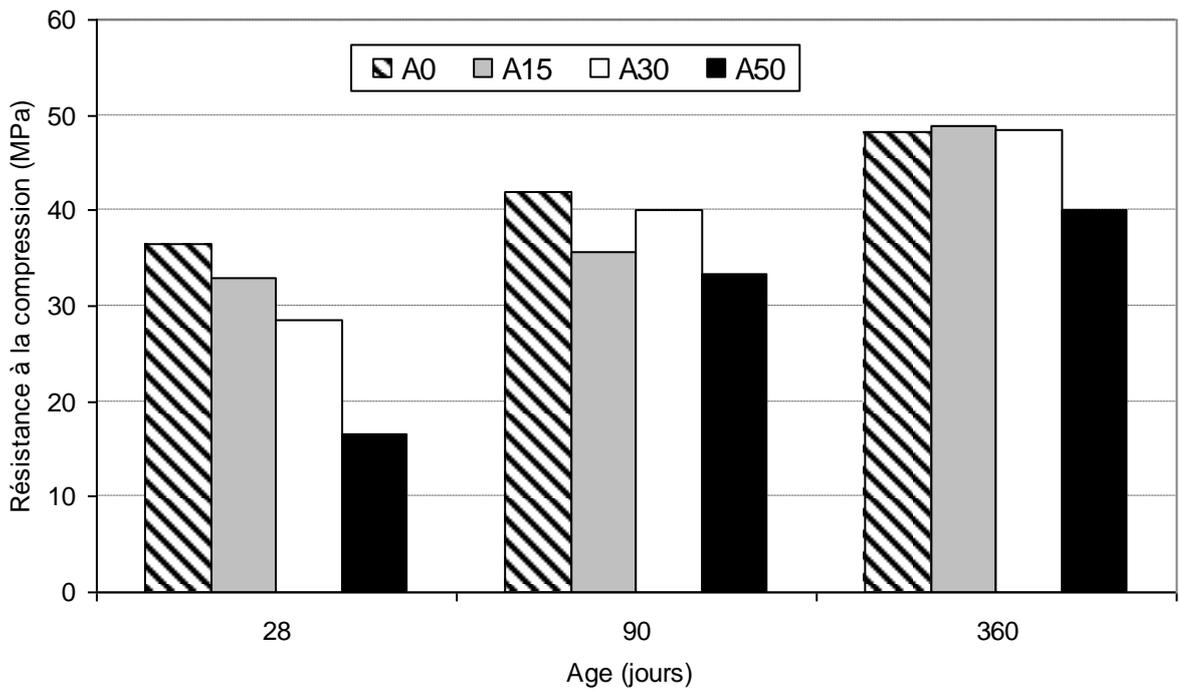


Figure 8.1: Résistance en compression des bétons "A" (E/L=0,65) à base de ciment au laitier.

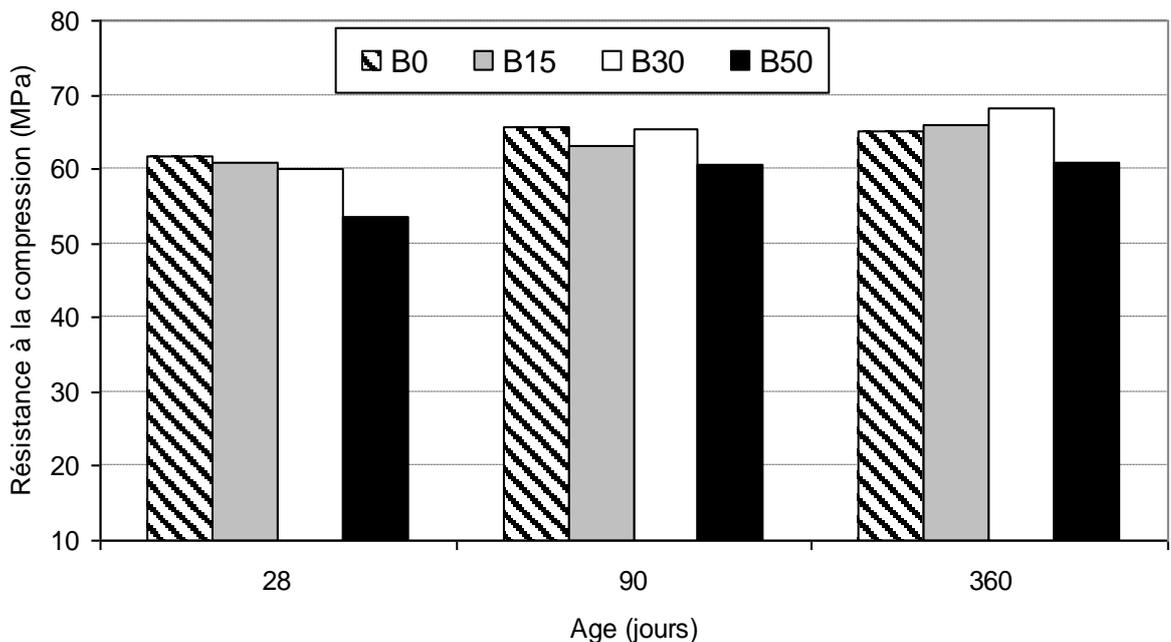


Figure 8.2 : Résistance en compression des bétons "B" (E/L=0,42) à base de ciment au laitier.

La diminution du rapport E/L de 0,65 à 0,42 semble avoir un effet bénéfique sur la résistance en compression des bétons au laitier (Figure 8.2 et 8.3). En effet, à 28 jours, la résistance des bétons B15 et B30 sont identiques que celle du béton témoin B0. Toutefois, 50% de laitier a conduit à une légère diminution de la résistance (~ 13%). A 90 jours comme à 360 jours, tous les bétons étudiés présentent des valeurs de résistance en compression plus au moins comparables. Les valeurs varient entre 62 à 65 MPa à 90 jours et entre 62 à 68 MPa à 360 jours.

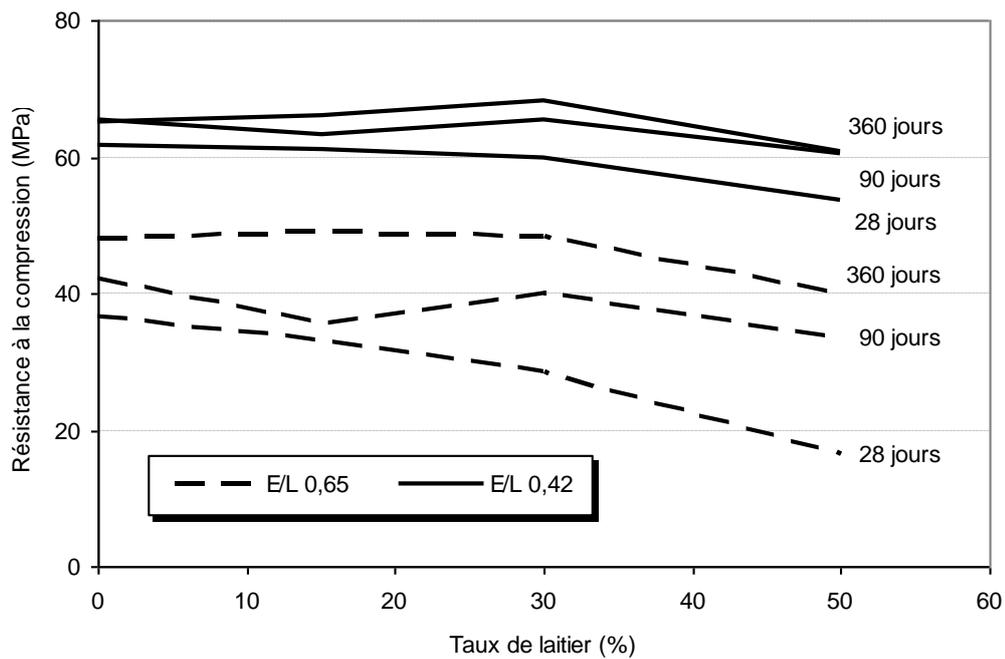


Figure 8.3 : Influence du rapport E/L et du taux de laitier sur l'évolution de la résistance en compression des bétons.

8.3 Absorption capillaire

Les figures 8.4 et 8.5 montrent la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction du temps, pour les bétons au laitier, avec un rapport E/L de 0,65 et de 0,42 respectivement. Le tableau 8.1 présente le coefficient d'absorption capillaire S , calculé par régression linéaire de l'ensemble des mesures (Equation 4.9).

Tableau 8.1: Coefficient d'absorption d'eau capillaire des bétons au laitier.

| Coefficient d'absorption " S " (kg/mm ² /h ^{1/2}) | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| E/L | 0,65 | | | | 0,42 | | | |
| Béton | A0 | A15 | A30 | A50 | B0 | B15 | B30 | B50 |
| Laitier (%) | 0 | 15 | 30 | 50 | 0 | 15 | 30 | 50 |
| 28 jours | 10,73 | 11,32 | 11,46 | 11,60 | 3,24 | 3,53 | 3,38 | 3,22 |
| 90 jours | 7,45 | 6,95 | 9,23 | 9,26 | 3,23 | 2,97 | 3,38 | 3,08 |

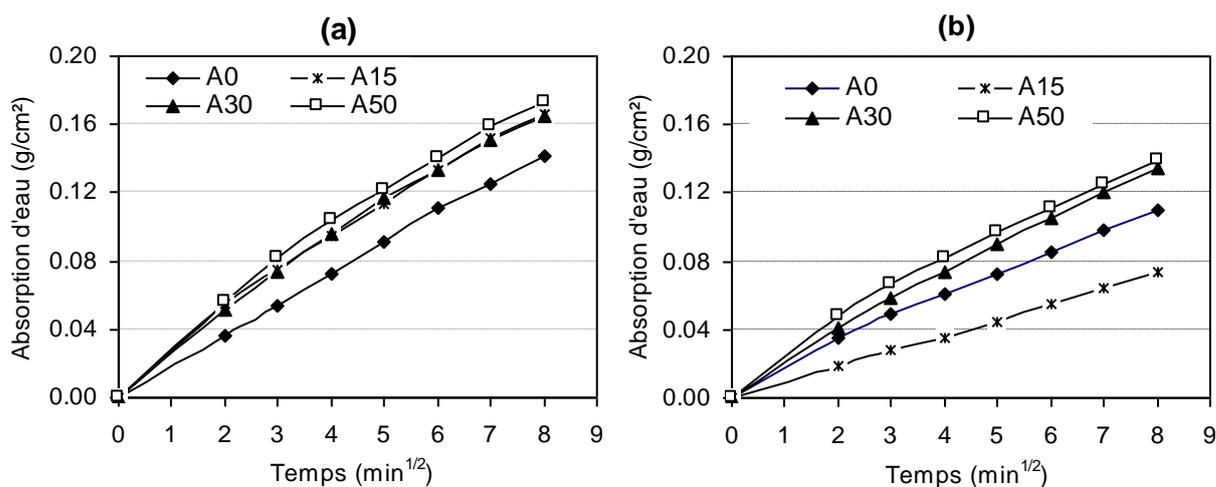


Figure 8.4: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons à base de ciments au laitier ($E/L=0,65$), après 28 jours (a) et 90 jours (b).

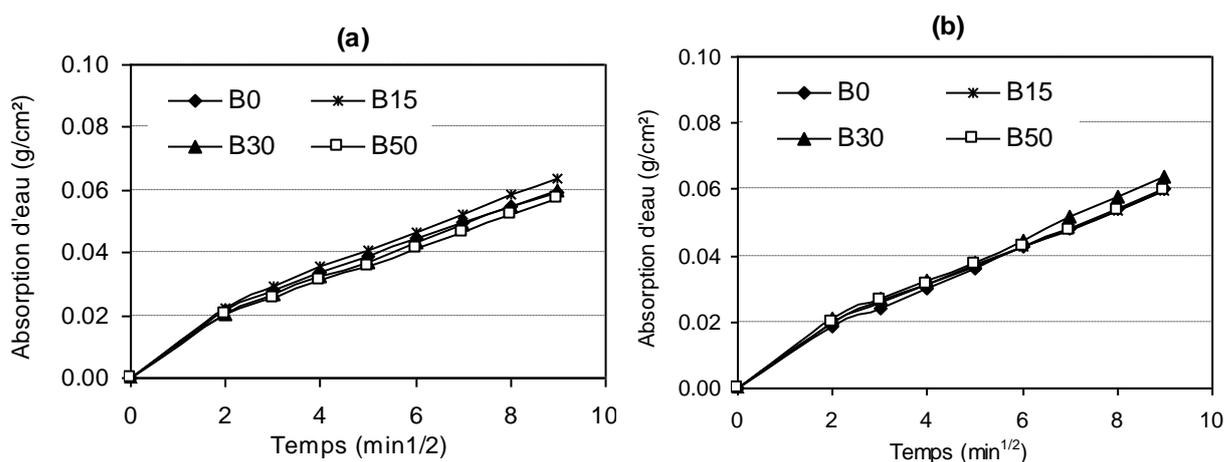


Figure 8.5: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons à base de ciments au laitier ($E/L=0,42$), après 28 jours (a) et 90 jours (b).

Au regard de ces résultats, l'absorption d'eau diminue avec l'âge et avec le rapport E/L . Néanmoins, la présence du laitier a engendré une augmentation de l'absorption d'eau pour les bétons avec $E/L = 0,65$ (Figure 8.4), à 28 comme à 90 jours; le béton A15 constitue une exception puisque, après 90 jours, il présente une absorption moins importante que celle des autres bétons.

Lorsque le rapport E/L diminue à 0,42 (Figure 8.5), l'absorption d'eau par capillarité à 28 jours est comparable pour tous les bétons étudiés. A 90 jours, une légère diminution de l'absorption d'eau pour les bétons au laitier est enregistrée, notamment pour le B50 qui

présente une valeur du coefficient d'absorption de $3,05 \text{ kg/mm}^2/\text{h}^{1/2}$ comparée à $3,23 \text{ kg/mm}^2/\text{h}^{1/2}$ pour le béton B0 (Tableau 8.1). Alexander et al [100] ont trouvé que l'incorporation de 50% de laitier dans un béton avec un rapport E/L de 0,49, diminue le coefficient d'absorption de 9%. Ce résultat est confirmé par d'autres recherches montrant une diminution de l'absorption d'eau par capillarité pour les bétons au laitier, particulièrement pour des taux de laitier supérieurs à 50% [167]. Cette diminution reflète une structure de pores plus raffiné et une diminution de la porosité capillaire, due à la formation de CSH secondaire issu de l'hydratation du laitier [2].

Les résultats présentés à la figure 8.6 représentent les valeurs expérimentales du coefficient d'absorption d'eau capillaire en fonction de la résistance à la compression des bétons au laitier, avec les deux rapports E/L étudiés. Une courbe de régression linéaire semble représenter les données expérimentales des bétons avec E/L de 0,65 avec un coefficient de corrélation, R de 0,65, montrant une augmentation du coefficient d'absorption avec la diminution de la résistance à la compression. Les résultats des bétons avec E/L de 0,42 sont groupés, montrant une faible variation du coefficient d'absorption en fonction de la résistance.

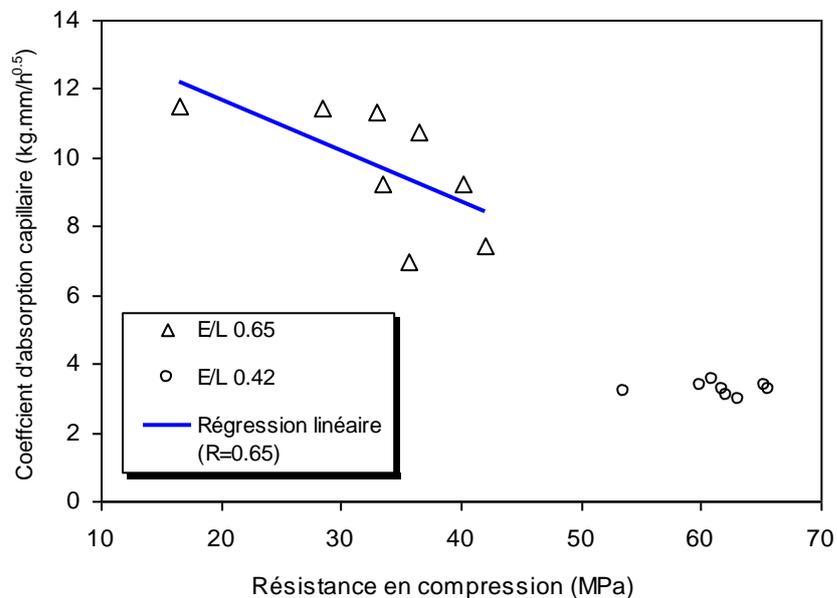


Figure 8.6: Relation entre la résistance en compression et le coefficient d'absorption capillaire.

8.4 Perméabilité à l'azote

Les résultats de perméabilité au gaz des bétons pour des rapports E/L de 0,65 et 0,42 sont présentés, respectivement, sur les figures 8.7 et 8.8. Ils montrent, une fois de plus, pour les bétons avec un rapport E/C élevé (0,65), la faible réactivité hydraulique du laitier étudié. En effet, l'augmentation du taux du laitier a conduit à une augmentation du coefficient de perméabilité. L'effet est plus apparent à 28 jours (Figure 8.7a), où les bétons avec 30% et 50% de laitier (A30 et A50) ont atteint les valeurs les plus élevées du coefficient de perméabilité (95×10^{-17} et 107×10^{-17} m² respectivement) par rapport au béton à base de CEM I (21×10^{-17} m²).

Après 90 jours (Figure 8.7b), on constate une diminution du coefficient de perméabilité pour tous les bétons. Cependant, le taux de diminution est beaucoup plus important pour les bétons A30 et A50. Toutefois, même si le coefficient de perméabilité reste toujours plus important pour les bétons au laitier par rapport au béton témoin, la différence demeure faible et les valeurs varient entre 10×10^{-17} m² pour le béton A0 et 27×10^{-17} m² pour le béton A50. Ce résultat peut être mis en relation, au moins partiellement, avec la faible résistance à la compression des bétons A15, A30 et A50 par rapport à celle du béton témoin.

Au contraire, les bétons au laitier avec un rapport E/L de 0,42 (Figure 8.8) présentent une perméabilité très proche de celle du béton témoin et qui varie entre $4,50 \times 10^{-17}$ m² et $6,15 \times 10^{-17}$ m². Toutefois, une légère diminution du coefficient de perméabilité est enregistrée pour le béton avec 50% de laitier "B50". Plusieurs recherches ont montré qu'une substitution partielle du ciment par des taux de laitier supérieur à 50% conduit, après 28 jours, à une diminution de la perméabilité du béton [100, 168]. Néanmoins, cette amélioration de la perméabilité est conditionnée par plusieurs paramètres et notamment, la cure humide prolongée du béton et de l'activité hydraulique du laitier [6, 101, 169]. La diminution du rapport E/L conduit à une réduction de la porosité capillaire et, par conséquent, de l'espace entre les grains du clinker et du laitier. Ceci engendre une relative augmentation du volume d'hydrate dans la matrice cimentaire et favorise ainsi, l'activation du laitier par l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) issu de l'hydratation du clinker [6, 117]. Ceci pourrait expliquer l'amélioration de la perméabilité des bétons au laitier avec un rapport E/L de 0,42 par rapport à celle des bétons avec E/L élevé de 0,65.

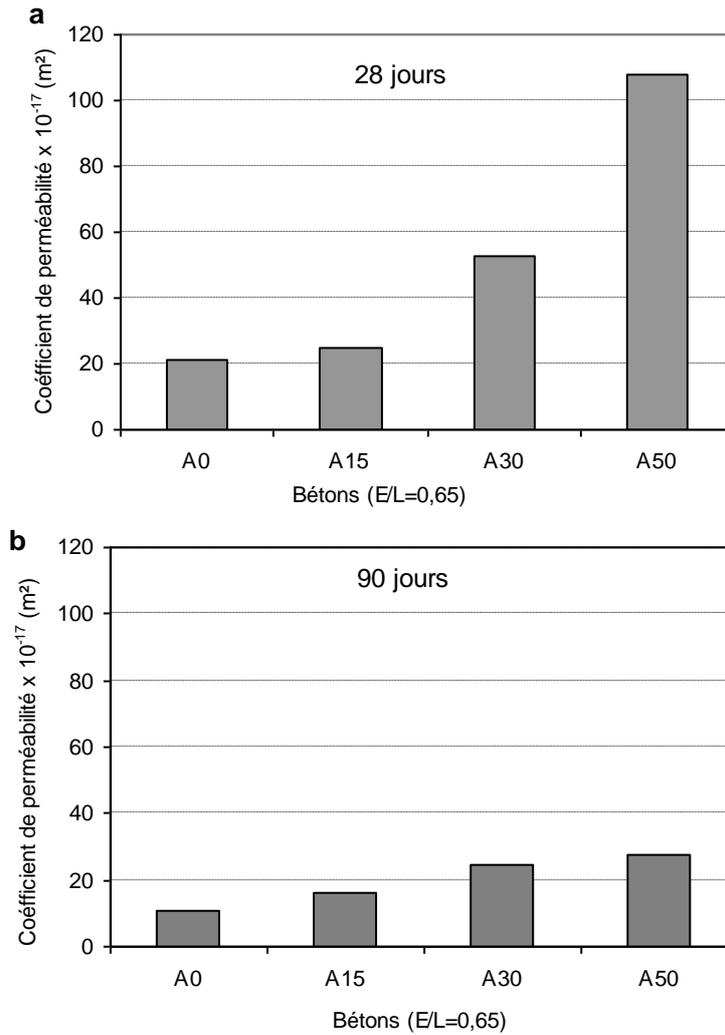


Figure 8.7: Coefficient de perméabilité à l'azote des bétons à base de ciments au laitier (E/L=0,65), après 28 jours (a) et 90 jours (b).

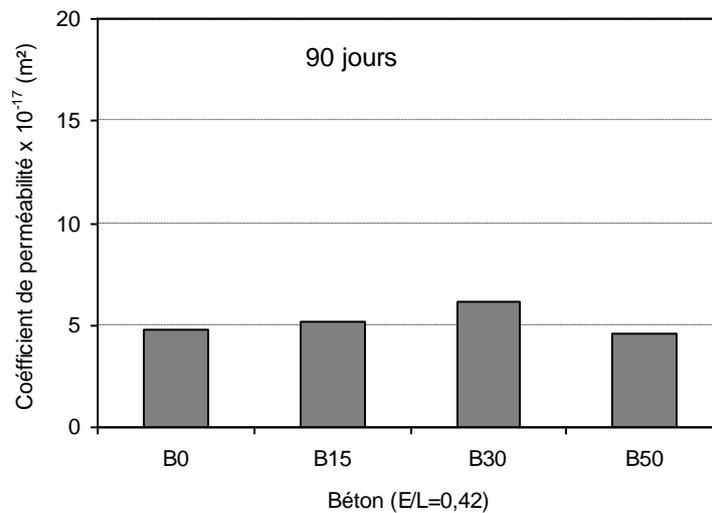


Figure 8.8: Coefficient de perméabilité à l'azote des bétons à base de ciments au laitier (E/L=0,42), après 90 jours.

La figure 8.9 représente les valeurs expérimentales du coefficient de perméabilité en fonction de la résistance à la compression des bétons au laitier. Une bonne corrélation linéaire est proposée entre les deux paramètres pour les bétons avec E/L de 0,65 avec un coefficient de corrélation, R de 0,95, montrant une diminution du coefficient de perméabilité avec l'augmentation de la résistance à la compression. Les résultats sur béton avec E/L de 0,42 montrent une faible variation du coefficient de perméabilité en fonction de la résistance à la compression; aucune corrélation n'a pu être établie.

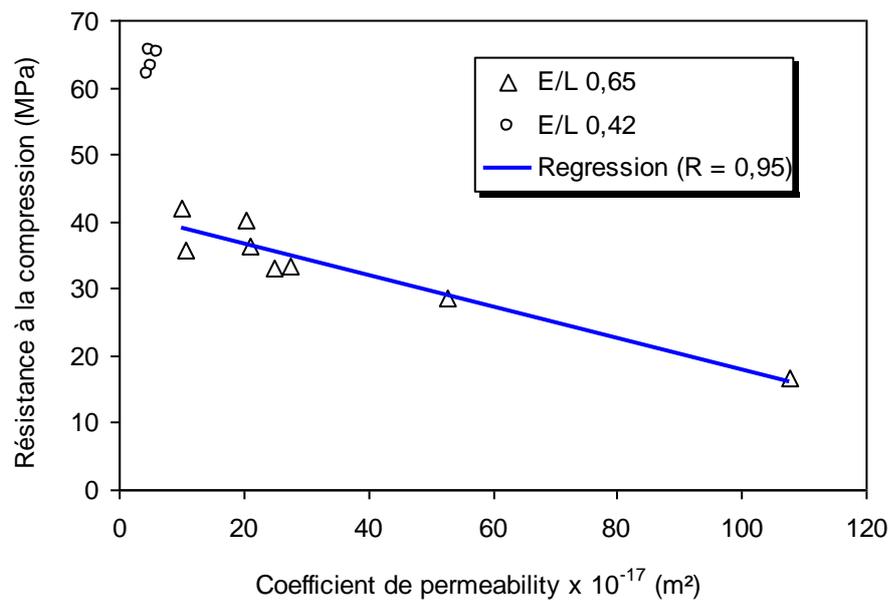


Figure 8.9: Relation entre la résistance en compression et le coefficient de perméabilité à l'azote.

8.5 Pénétration d'eau sous pression

Le tableau 8.2 regroupe les résultats de pénétration d'eau sous pression des bétons à base de ciment, avec et sans laitier, pour des rapports E/L de 0,65 et de 0,42.

La figure 8.10 représente les résultats des bétons avec un rapport E/L de 0,65 en fonction de l'âge des éprouvettes (28 et 90 jours). A 28 jours, les bétons au laitier (E/L de 0,65) présentent une profondeur de pénétration d'eau nettement plus importante que celle du béton à base de CEM I. Cet effet est plus visible pour les bétons A30 et A50 où l'augmentation atteint 18 et 16% respectivement. Après 90 jours de maturation, la perméabilité à l'eau des bétons au laitier est comparable à celle du béton témoin, à l'exception du béton A50 qui a présenté une petite augmentation de 11%. L'amélioration

de la perméabilité des bétons au laitier, entre 28 et 90 jours, peut être expliquée par l'hydratation tardive du laitier, qui contribue plus tardivement au remplissage de pores et au raffinement de porosité de la matrice cimentaire.

Dans la littérature, les avis divergent. CHENG et al [94] notent une réduction de la perméabilité à l'eau du béton avec 50% de laitier. El-AMIRI [170] a trouvé une amélioration de la perméabilité de l'ordre de 40%, pour un béton avec 30% de laitier, par rapport au béton sans laitier, après 6 mois de cure humide. Cependant, KENAI et AMRANE [166] ont observé une augmentation de la profondeur de pénétration d'eau sous pression pour des bétons avec 30 et 50% laitier, avec un rapport E/C de 0,55, en expliquant cette variation par la faible réactivité du laitier utilisé. Selon IYODA et al [169], à court terme, en absence de cure humide, un béton avec 55% de laitier présente une perméabilité à l'eau élevée. Cependant, une cure humide de 7 à 28 jours conduit à une amélioration de la perméabilité à ce dernier.

Tableau 8.2: Valeurs moyennes de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons au laitier pour les deux rapports E/L (0,65 et 0,42).

| | | Profondeur de pénétration (mm) | | | |
|--------------------|----------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| Taux de laitier | | 0% | 15% | 30% | 50% |
| Béton A (E/L=0,65) | 28 jours | 70,75 | 73,00 | 84,00 | 82,50 |
| | 90 jours | 67,30 | 69,55 | 69,00 | 74,75 |
| Béton B (E/L=0,42) | 90 jours | 57,40 | 58,70 | 57,00 | 56,50 |

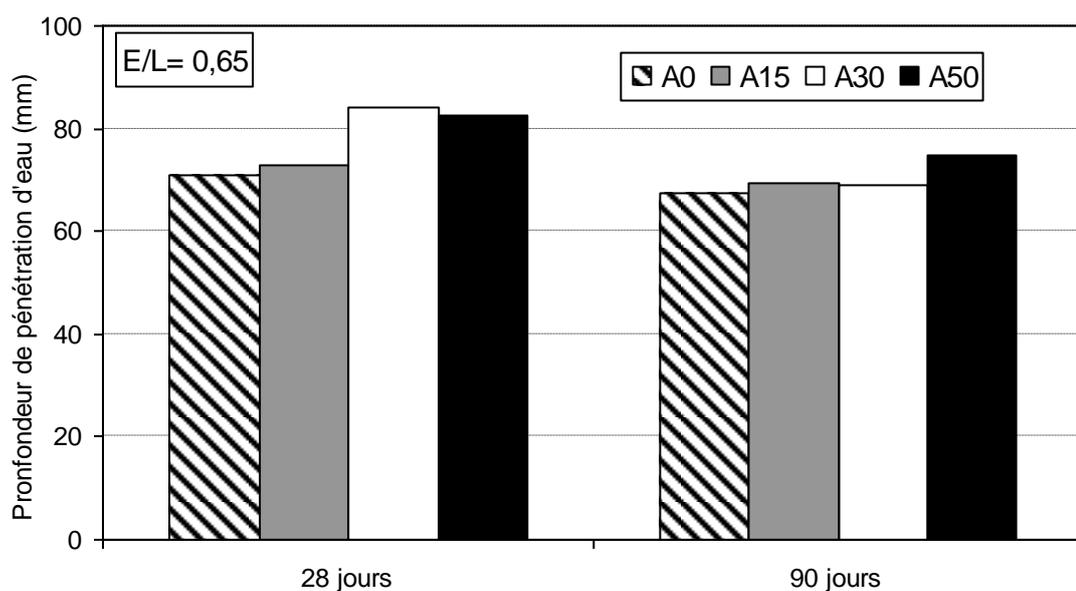


Figure 8.10: Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons avec E/L 0.65.

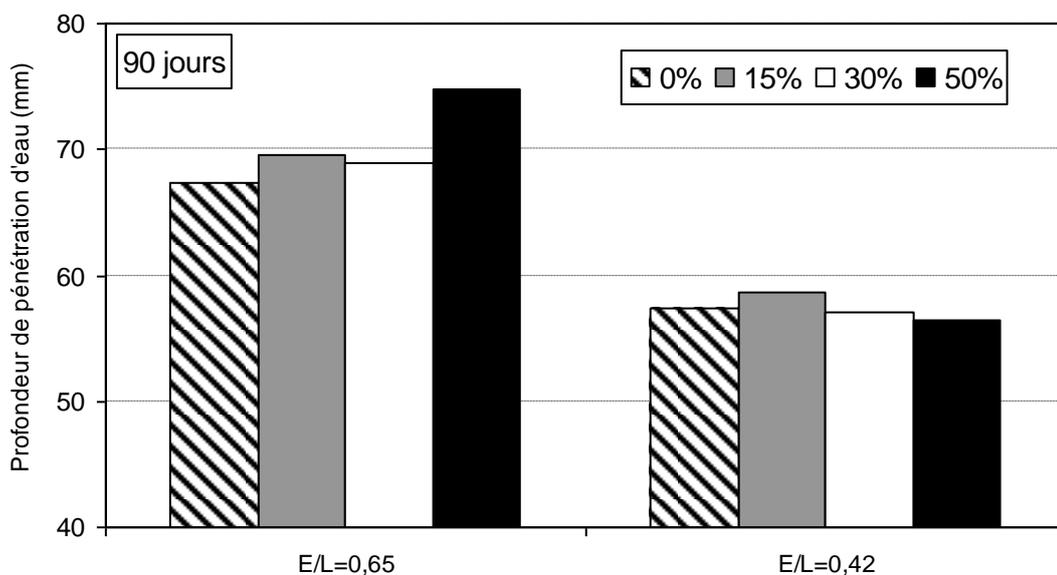


Figure 8.11: Effet du rapport E/L sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression à 90 jours de maturation.

Selon la figure 8.11, qui montre l'effet du rapport E/L sur la perméabilité après 90 jours, on observe une diminution de la profondeur de pénétration d'eau avec la diminution du rapport E/L, pour tous les bétons étudiés. Cela est dû principalement à la diminution de la porosité du béton. D'autre part, on constate un comportement différent entre les bétons au laitier avec un rapport E/L de 0,42, par rapport aux bétons avec E/L de 0,65. En effet, la profondeur de pénétration est assez comparable pour tous les bétons à E/L de 0,42, même si on observe une légère diminution pour les bétons avec 30% et 50% de laitier. Cet effet peut être expliqué par une meilleure activation du laitier et, par conséquent, un meilleur remplissage des grands pores capillaires. D'autre part, la surface spécifique interne résultante, plus élevée, permet une plus importante fixation d'eau par adsorption dans les parois de pores, qui pourrait réduire la profondeur de pénétration d'eau. S'ajoute à cela le faible dégagement de chaleur d'hydratation des bétons au laitier, qui peut réduire les fissures d'origine thermique, améliorant ainsi la perméabilité du béton [48, 94].

8.6 Conclusion

Les résultats de cette partie d'étude, relatives aux propriétés mécaniques et de durabilité des bétons au laitier d'El Hadjar, nous ont permis de délivrer les conclusions suivantes :

- l'incorporation de taux de laitier inférieurs à 30% est possible sans affecter les propriétés mécaniques du béton avec un rapport E/L élevée (0,65). La diminution du

rapport E/L à 0,42 conduit néanmoins, à une résistance satisfaisante des bétons au laitier, même avec un taux de 50%, particulièrement à long terme.

- la durabilité du béton a été étudiée en travers des propriétés de transport à savoir : l'absorption d'eau par capillarité et la perméabilité à l'eau et au gaz. Pour les bétons avec un rapport E/L de 0,65, ces paramètres augmentent avec l'augmentation du taux de laitier dans le béton, particulièrement à 28 jours. Néanmoins, à 90 jours, cet effet est moins visible.
- pour un rapport E/L de 0,42, le coefficient d'absorption d'eau reste similaire pour tous les bétons après 28 jours de maturation. Une légère diminution est toutefois observée pour les bétons au laitier à 90 jours. D'autre part, les bétons avec 15 et 30 % de laitier présentent une perméabilité à l'eau et au gaz semblable à celle du béton à base de CEM I; une petite amélioration de la perméabilité pour le béton avec 50% de laitier a été constatée.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Les indices chimiques ont montrés une divergence quant à la réactivité hydraulique du laitier d'El Hadjar. Toutefois, d'après l'indice d'activité hydraulique, basé sur la résistance mécanique, le laitier d'El Hadjar est classé comme étant de faible voir à la limite de moyenne hydraulité.

Les résultats de l'étude de la caractérisation mécanique des mortiers au laitier d'El Hadjar ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- l'augmentation du taux de laitier conduit à une diminution de la résistance à court terme. Cependant, on a observé un bon développement de résistance à long terme (après 90 jours) pour les ciments avec un taux de laitier n'excédant pas 50%. Toutefois, le taux optimal semble être de 30% est observé ;
- l'utilisation d'un ciment de type CEM I 52,5 semble offrir une meilleure activation au laitier, pour un taux de substitution de 30%, que le ciment de type CEM I 32,5. Cet effet n'est pas observé lorsque 50% de laitier sont substitués ;
- en climat extérieur, sec et chaud avec cure humide initiale de 7 jours, les ciments avec 30 et 50% de laitier ont subi, après 28 jours, une perte de résistance plus importante que celle subie par les ciments CEM I et celui avec 20% de laitier.

Afin de mieux comprendre le comportement du laitier d'El Hadjar, nous avons réalisé une étude, sur mortier, de la microstructure et des propriétés de transport. Les conclusions de cette partie d'étude peuvent être résumées comme suit :

- la porosité à l'eau ou au mercure des mortiers au laitier est plus élevée que celle du mortier à base de CEM I. Cependant, la porosité fermée reflétant une discontinuité des pores, est plus importante pour les mortiers au laitier, particulièrement, après 90 jours de maturation ;
- après 90 jours, la distribution de la taille de pores des mortiers au laitier évolue vers les pores de petite taille (particulièrement de rayon inférieur à 50 nm), suite à une densification de la microstructure. Cet effet, plus significatif au long terme (360 jours), est la conséquence d'une bonne hydratation du laitier ;

- l'absorption capillaire et le taux de saturation sont améliorés par la présence du laitier, notamment, pour un taux de 50% de substitution. Toutefois, une faible évolution de ces paramètres est observée avec le temps ;
- à 90 jours, tandis qu'un taux de substitution de 50% de laitier conduit à une augmentation de la perméabilité à l'oxygène, un taux de 30 % de laitier ne l'affecte que légèrement. Au contraire, au long terme (360 jours), les mortiers au laitier (particulièrement avec 50%) sont plus imperméables à l'oxygène.
- après 90 jours de cure humide, 30% de laitier réduit le temps de passage des chlorures, mais en comparaison avec le mortier de référence, on peut voir qu'il n'y a pas une grande différence dans les coefficients de diffusion. Toutefois, 50% de laitier conduit à une meilleure perméabilité aux ions chlore, avec un temps de passage important et un faible taux de diffusion. L'augmentation de la période de cure initiale, conduit à une diminution de la diffusion dans les mortiers au laitier. La performance du mortier de référence n'a pas été considérablement influencée par la période de cure.
- Une faible conduction des ions chlore est observée pour les mortiers au laitier par rapport au mortier à base de CEM I. Les résultats d'essai de conduction (ASTM 1202) montrent une tendance similaire à ceux de l'essai de diffusion en régime permanent. Une très bonne corrélation linéaire est obtenue entre la charge totale Q et le coefficient de diffusion.

L'étude de la durabilité des mortiers au laitier d'El Hadjar dans des environnements agressifs (sulfates et eau de mer) ont permis les conclusions suivantes :

- l'incorporation du laitier d'El Hadjar dans les mortiers à base de ciment Portland, conduit à une diminution de l'expansion des éprouvettes conservées dans les sulfates de sodium ou de magnésium. Cette amélioration est plus évidente pour des taux de substitution supérieurs à 30% ;
- l'utilisation du ciment B (CEM I 52.5) dans le mortier avec ou sans laitier conduit à un meilleur comportement des mortiers vis-à-vis des sulfates de sodium et de magnésium, qui se traduit par une expansion plus faible. Toutefois, la période étudiée (9 mois) pour le mortier B reste insuffisante;
- après une période d'immersion de 10 mois dans les sulfates de sodium, seul un taux de substitution de 50% de laitier a permis au mortier de conserver sa résistance

mécanique. Dans les sulfates de magnésium, les mortiers au laitier ont subi moins de perte de résistance que le mortier sans ajout. Les mortiers au laitier semblent être plus vulnérables aux sulfates de magnésium qu'aux sulfates de sodium;

- l'attaque de l'eau de mer semble être moins préjudiciable que celle des solutions de sulfates de sodium et de magnésium. Dans cet environnement, l'incorporation du laitier a eu un effet négligeable sur l'expansion des mortiers.

Les résultats des essais sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons au laitier, nous amènent à proposer les conclusions suivantes :

- l'incorporation du laitier à des taux inférieurs à 30% n'affecte que légèrement les propriétés mécaniques du béton avec un rapport E/L élevée (0,65). La diminution du rapport E/L à 0,42 conduit néanmoins, à une résistance satisfaisante des bétons au laitier, même avec un taux de 50%, particulièrement à long terme.
- la durabilité du béton a été étudiée à travers des propriétés de transport à savoir : l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité à l'eau et au gaz. Pour les bétons avec un rapport E/L de 0,65, ces paramètres augmentent avec l'augmentation du taux de laitier dans le béton, particulièrement à 28 jours. Néanmoins, à 90 jours, cet effet est moins visible.
- pour un rapport E/L de 0,42, le coefficient d'absorption d'eau reste similaire pour tous les bétons après 28 jours de maturation. Une légère diminution est toutefois observée pour les bétons au laitier à 90 jours. D'autre part, les bétons avec 15 et 30 % de laitier présentent une perméabilité à l'eau et au gaz semblable à celle du béton à base de CEM I, une perméabilité légèrement plus faible a été constatée pour le béton avec 50% de laitier.

La présente étude nous a permis de dégager quelques éléments de réponse quant à l'activité hydraulique du laitier d'El Hadjar, les limites de son utilisation comme ajout au ciment et la performance mécanique et de durabilité des mortiers et bétons dans des environnements agressifs. Cependant, cette recherche peut être complétée par d'autres investigations. A cet effet nous suggérons :

- L'optimisation de la composition du béton pour améliorer la performance des laitiers de faible activité hydraulique.
- L'étude de l'activation, rationnelle et pratique dans l'industrie cimentaire, du laitier d'El Hadjar (particulièrement, l'activation mécanique) et son influence sur la microstructure et la durabilité du béton.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Brand R. et al., European pollutant emission register, Final report, 2004, <http://www.eper.cec.eu.int>.
2. Jiang SP., Grandet J., Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland, Cement and Concrete Research, vol.19, pp 487-495, 1989.
3. Malami Ch., Kaloidas V., Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures, Cement and Concrete Research, vol. 24, pp 1444-1454, 1994.
4. Hadj Sadok A., Kenai S., Courard L. and Darimont A., Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag, Construction & Building Materials, Article in press, 2010.
5. Hadj Sadok A., Kenai S. Courard L. and Khatib JM., Transport properties of mortars and concretes modified with medium hydraulic activity blast furnace slag, 2^{ième} International Conference on sustainable construction materials and technologies, 28 -30 June 2010, Ancona, Italy. URL: <http://www4.uwm.edu/cbu/ancona.html>
6. Neville M., Propriétés des bétons, EYROLLES, Paris, 2000.
7. Pal S., Mukherjee A., Pathak S., Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, Cement and Concrete Research, vol. 33, pp 1481-1486, 2003.
8. Hadj Sadok A., Kenai S., Menadi B., Résistance aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier, Colloque International sur la caractérisation et la modélisation des matériaux et structures, 16-18 novembre 2008, Tizi-ouzou, Algérie. www.ummtto.dz
9. Behim M., Clastres P., Habita M. et Carles-Gibergues A., Etude d'un nouveau ciment à base de laitier d'El Hadjar (ALGERIE), Annale du Bâtiment et des Travaux Publiques, pp 21 -29, 2004.
10. Dreux G., Festa J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
11. Béton Hydraulique : Constituants du ciment, technique d'ingénieur, C.2211, pp 8-14, 1984.
12. Ciment et dérivé, Revue technique de l'entreprise, ERCE Alger, 1998.
13. Mener A., Energy and its impacts on cement industry with special reference to conversion and modernisation of cement plants in Arab and development countries, Cement industry in OIC member countries, the Islamic research and training institute, Saudi Arabia, February 1990, Chapter 3, pp 6-38.
14. Swamy R.N., Editorial, Cement and concrete composite, vol. 21, n°2, 1999.

15. NF P15-301, Ciment courant : Composition, spécification, et critère de conformité, AFNOR, Paris, 1994.
16. Baron J. et Olivier J., Les Bétons ; base et données pour leurs fabrications, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, EYROLLES, France, 1999.
17. Gagné R.R., Cours de durabilité et réparation du béton (GCI-714), chapitre 2 : la durabilité du béton, Université de Sherbrooke, Canada, 2002, pp.32.
18. Baroghel-Bouny V., Caractéristiques des pâtes de ciment et des bétons ; méthodes, analyse et interprétations, LCPC, 1994.
19. Dron R., et Voinovith I., L'activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes, Le Béton Hydraulique, connaissance et pratiques, ENPC, Paris, 1982.
20. Regourd M., L'hydratation du ciment portland, Le Béton Hydraulique, connaissances te pratiques, ENPC, Paris, 1995.
21. Guillaume H., Nicolas R., Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental ?, Rencontres Universitaire de génie civil, 4-6 juin Nancy, France 2008.
22. Damtoft JS., Lukasik J., Herfort D., Sorrentio D., and Gartner EM., Sustainable development and climat change initiatives, Cement and concrete research, vol. 38, pp 115-127, 2008.
23. Bijen J., Sellevoid E.J., European Standardization, Use of addition, ACI International Conference of Fly ash, silicate fume and Natural pozzolanes in concrete supplementary papers, Istanbul, Turkey, pp.21-31, 1992.
24. Tsivilis S., Chaniotakis E., Kakali G., and Batis G., An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 24, pp.371-378, 2002.
25. Hermann K., Les ajouts : Les fillers, Bulletin du ciment, Vol.63, n°5, pp.4-7, 1995.
26. Livesey P., Strength Characteristics of Portland Limestone Cements, Construction and Building Materials, Vol.5, pp.147-150, 1991.
27. Borgholm H., Duncan H., Rasmussen S., A new blended cement based on mineralised, World Cement Research and Development, pp 27-33, 1995.
28. Menadi B., Kenai S., Khatib J. and Ait-Mokhtar A., Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, Construction and Building Materials, vol. 23, pp 625-633, 2008.
29. Schmidt M., Cement with interground additives capabilities and environmental relief, Part 1, Zement-Kalk-Gips, vol. 45, n° 2, pp. 64-69, 1992.
30. Kenai S., Soboyejo W., Soboyejo A., Some engineering properties of limestone concrete, Materials Manufacture Processes, vol.19, pp 949-961, 2004.

31. Tsivilis S., Chaniotakis E., Kakali G. and Batis G., An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, pp 371-378, 2002.
32. Sokra I., and Stern N., Effect of calcareous filler on sulfate resistance of Portland cement, *Ceramic Bulletin*, vol. 55, pp 594-595, 1976.
33. Gonzalez M.A, and Irassar E.F., Effect of limestone filler on the sulfate resistance of low C₃A Portland cement, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n°11, pp 1655-1667, 1998.
34. Ghrici M., Kenai S., Said-Mensour M., Kadri El-Hadj., Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume, *Journal of Asian Architecture and building Engineering*, vol. 5, n°2, pp349-354, 2006.
35. Meziane E., Performance des ciments à base de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf, Mémoire de magistère, sous la direction de Pr kenai S., Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie, 2002.
36. Burteaux M., Laitier de haut fourneau, technique d'ingénieur, vol. 19, M.7425, pp 2-10.
37. Laitier de haut fourneau Cristallisé Bulletin du LCPC.
38. Laitier de haut fourneau Vitriifié (Granulé ou bouleté) Bulletin du LCPC.
39. Third International Conference on used of Fly ash, Silicate fume, Slag and Pozzolanes in Concrete, Trondheim Conference 1989.
40. Satish C., Waste materials used in concrete manufacturing, NOYES, New Jersey, USA, 1997.
41. Amrane A., Etude des propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud, Thèse de magistère, sous la direction du Dr. Kenai. S, Département de Génie Civil, Université de Blida, 1995.
42. Bougara A., Etude de l'activité du laitier d'El Hadjar, Mémoire de magistère, sous la direction du Pr. Kadri A., Institut de Génie Civil, Centre Université de Chlef, 1999.
43. NF P 15-301, Liants hydrauliques : Ciments courants ; composition, spécifications et critères de conformité, AFNOR, Paris, 1994.
44. Swamy RN., Fly ash and Slag: standards and specifications, *Materials and structures*, vol. 26, pp 600-613, 1996.
45. Mantel DG., Investigation into the hydraulic activity of five granulated blast furnace slag with eight different Portland cements, *ACI Material Journal*, vol.91, pp 471-477, 1994.
46. Delove FX., Hydraulicité et Pouzzolanicité, Bulletin de LCPC, n°.184, pp 94-95, 1993.
47. Frearson J., Uren J., Investigation of a ground granulated blast furnace slag containing mervinitic crystallisation, 2nd Int. Conference on the use fly ash, silica fume, slag and natural pozzolan in concrete, Madrid, 1986.

48. Popovics S., CONCRETE MATERIALS Properties, Specifications and Testing, Second Edition, NOYES, USA, 1992.
49. Dron R., Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline, Rapport de recherche LPC, n° 38, 1973.
50. Regourd M., Mortureux B., Gautier E., Hornain H. et Volant J., Caractérisation et activation thermique des ciments aux laitiers, 7^{ème} Congrès International de la Chimie du Ciment, vol. III, pp 105-111, Paris, 1980.
51. Fernilndez-Jimhez A., Puertas F., Alkali-activated slag cements: kinetic studies, Cement and Concrete Research, vol. 27, pp 359-368, 1997.
52. QCL Group Technical Note, Application and Advantages of Blended Cement Concretes, 1999.
53. Glasser FP., Properties of cement waste composite, Waste Management, vol.6, pp 159-168, 1996.
54. Gilles VR., Etude de la réactivité des ciments riche en laitier à basse température et à temps court, sans ajout chloruré, Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles, 2006.
55. Caijun S., Robert LD., Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators, Part II; Reaction products and mechanism, Cement and Concrete Research, vol.30, pp 607-613, 2000.
56. Stevula L., Madej J., Kozankova J., Madejova J., Hydration products at the blast furnace slag aggregate cement paste interface, Cement and Concrete Research, vol.24, pp 413-423, 1994.
57. Escalante-Garcia JI., Sharp JH., Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cement, Cement and Concrete Research, 28, pp. 1259-1274, 1998.
58. Ramachandran VS., Concrete Admixtures Handbook; Properties, Science, and Technology, Second Edition, NOYES, New Jersey, USA, 1995.
59. Huiwen W., Zhonghe S., Zongshou L., Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties, Cement and Concrete Research, vol.34 pp 133-137, 2004.
60. Rachel J., Paul C., The Use of Limestone in Portland cement, A State-of-the-Art Review, Portland Cement Association, 1996.
61. Wainwright P.J., Rey N., The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete, Cement and Concrete Composites, vol.22, pp 253-257, 2000.
62. Swamy R.N., Bouikni A., Some engineering properties of slag concrete as influenced by proportioning and curing, ACI Materials Journal, vol.87, n°3, 1990.
63. Olorunsogo F.T., Particle size distribution of ggbs and bleeding Characteristics of slag cement mortars, Cement and Concrete Research, vol.28, pp 907-919, 1998.

64. Nigri G., Nemamcha A.R., et Guenfoud M., Etude de l'influence du laitier sur les propriétés du ciment, Séminaire national sur la rhéologie, Université de Béjaïa, Algérie, 2005.
65. Brooks JJ., Megat Johari M.A., and Mazloom M., Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol.22, pp 293-301, 2000.
66. Jianyong L., Yan Y0, A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, vol.31, pp1203-1206, 2001.
67. Yonekura A., Kusaka N. and Tanaka S., Tensile creep of early age concrete with compressive stress history, *CAJ Review*, vol.46, pp158-161, 1988.
68. Luke K., Glasser FP., Internal chemical evolution of the constitution of blended cements, *Cement and concrete research*, vol.18, pp. 495-502, 1988.
69. Roy DM., Hydration of blended cement containing slag, fly ash, or silica fume, *Proc. of meeting institute of concrete technology, Coventry, UK*, pp29, 29, 1987.
70. Oner M., Erdogdu K., Gunlu A., Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement, *Cement and Concrete Research*, vol.33, pp463-469, 2003.
71. Oner M., A study of intergrinding and separate grinding of blast furnace slag cement, *Cement and Concrete Research*, vol.30, pp 473-480, 2000.
72. Erdogdu K., Tokyay M., Türker P., Comparison of intergrinding and separate grinding for the production of natural pozzolan and GBFS-incorporated blended cements, *Cement and Concrete Research*, vol.29, pp 743-746, 1999.
73. Khatib JM., Hibbert JJ., Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, *Construction and Building Materials*, vol.19, pp 460-472, 2005.
74. Ujhelyi JE., Ibrahim AJ., Hot weather concreting with hydraulic additives, *Cement and Concrete Research*, vol.21, pp345-354, 1991.
75. Malek A., Caractéristiques physico - chimiques du laitier de haut fourneau, Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques, Annaba, Algérie, pp 17-25, 1998.
76. Document technique de la direction de la recherche appliquée (DRA) du complexe sidérurgique d'EL HADJAR, 1989.
77. Behim M., Cyr M., Habita MF. et Clastres P., Hauts-Fourneaux d'El HADJAR (Algérie): Réactivité du laitier granulé »; *Revue, Ciments, Bétons, Plâtres, chaux*" n°860, 2003.
78. Démoulian E., Gourdin P., Hawthorn F. et Vernet C., Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulité, 7^{ème} Congrès International de la Chimie du Ciment, vol. 2, thème 3, pp 89 -94, Paris, 1980.

79. Guettache M.N., Contribution à la valorisation des laitiers de haut-fourneau d'El-Hadjar dans le domaine de la construction: caractérisation des matériaux élaborés, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine, 2002.
80. Kriker A., Durabilité du béton au laitier, Mémoire de Magister, ENP Alger, 1992.
81. Mezghiche B., Résistance et déformabilité des bétons basiques, Premier séminaire national de génie civil, pp 86-93, Biskra, 8-9 Décembre 1996.
82. Zéghichi L., Mezghiche B., Merzougui A., Activation alcaline du ciment au laitier, Premier Colloque Maghrébin de Génie Civil, pp 295-303, Biskra, 16-17 Novembre 1998.
83. Bougara A., Ezziane K., Hallal A. Etude de l'activation du laitier d'El-Hadjar par des solutions alcalines, Algérie Equipement, n°40, pp 3-5, 2005.
84. Bougara A., « Etude de l'activation du laitier d'El Hadjar (Activation thermique, mécanique et chimique), Mémoire de magister, université de Chlef, 1999.
85. Ezziane K., Bougara A., Kassoul A., Kadri A., Variation du coefficient d'efficacité du laitier d'El-Hadjar dans les modèles de prédiction des résistances, CITDUB 1, BabEzzouar, pp8, 24-26 mai 2004.
86. Behim M., Habitat M.F., Clastres P., Influence de la teneur en laitier granulé et de sa finesse de mouture sur les propriétés mécaniques des ciments à sa base, Colloque Maghrébin de Génie Civil, pp.3-7, Annaba, 30 Nov-Déc, 1999.
87. Amrane A., Kenai S., Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud, Proceedings du Séminaire International sur la qualité du béton en climat chaud, pp.106-122, Ghardaia, 22-24 Mars 1994.
88. Behim M., Sous produits industriels et développement durable : Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire, Thèse de doctorat d'état, université de Annaba, 2005.
89. Soukatchouff P., Etude de résistance à l'eau douce de quelques ciments, Matériaux de construction, RILEM, vol.18, n°104, pp 115-122, 1985.
90. Behim M., Julien S., Habita M.F., Clastres P, Durabilités de pâtes de ciments contenant du laitier d'El-Hadjar conservées dans des milieux agressifs et à des températures de climat chaud, CITDUB 1, pp 13, 24-26 mai, BabEzzouar, Algérie, 2004.
91. Ezziane K., Etude des Modifications Physico-Mécaniques Apportées par les Ajouts Minéraux aux Bétons, Thèse de Doctorat d'Etat, Université d'Oran, 2006.
92. Baron J., et Ollivier JP., La durabilité des bétons, ENPC, Paris, 1992.
93. Courard L., Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre le béton et un système de réparation », Thèse de doctorat, université de liège, Belgique, 1999.

94. Cheng A., Huang R., Jiann-Kuo W. et Cheng-Hsin C., Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 93, pp 404-411, 2005.
95. Han Young M., Hong Sam K., Doo Sun C., Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes, *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp 725-732, 2006.
96. Bouikni A., Swamy R.N., Bali A., Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag, *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp 2836-2845, 2009.
97. Larbi J.A., Bijen J.M., Effect of Mineral Admixtures on the Cement Paste-Aggregate Interface, *Proceedings of the CANMET/ACI Fourth International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, Vol. 1, pp. 655-669, Istanbul, Turkey 1992.
98. Hardt R., Chemical binding of water during the hydration of Portland cement et blast-furnace slag blended cement with fly ash, *Ninth international congress of the chemistry of cement*, vol. 2, pp 678-683, Paris, 1992.
100. Alexander MG., Magee BJ., Durability performance of concrete containing condensed silica fume, *Cement and Concrete Research*, vol.29, pp 917-922, 1999.
101. Shi HS., Xu BW., Zhou XC., Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete, *Construction and Building Materials*, vol.23, pp 1980-1985, 2009.
102. Daube J., Bakker R., Portland blast-furnace slag cement, a review, in: *Blended Cement*, Frohnsdorff G. (Ed.), ASTM Sp. Tech. Publ. , n°897, pp 5, 1983.
103. Cho S.W., Chiang S.C., *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties; using the chloride migration rate to predict the chloride penetration resistance of concrete*, Springer Netherlands, 2006.
104. Shiqun Li., Roy DM., Investigation of relations between volume of pore, pore structure and Cl⁻ diffusion of fly ash and blended cement paste, *Cement and Concrete Research*, vol.16, n°5, pp749-759, 1986.
105. Dhir R K., EL-Mohr M A K. and Dyer T D., Chloride binding in GGBS concrete, *Cement and Concrete Research*, vol.26, pp 1767-1773, 1996.
106. Glasser F.P., Marchand J., Samson E., Durability of concrete; Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, vol.38, pp 226-246, 2008.
107. Nguyen T S., Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, 2006.
108. Arya C., Xu Y., Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp 893-902, 1995.

109. Divet L., Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des purites continues dans les granulats ; Synthèse bibliographique, Bultin du LCPC, n°3931, 1996.
110. Alamoudi O.S., Maslehuddin M., Saadi M., Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cement, *ACI Materials Journal*, vol.92, n°1, pp15-24, 1995.
111. Omar S., Al-Amoudi B., Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, *Cement and Concrete Composite*, vol. 24, pp 305-316, 2002.
112. Rafat S., *Waste Materials and By-Products in Concrete*, Springer, Verlag, Berlin, 2008.
113. Cao HT., Bucea L., Ray A., Yozghatlian S., The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements, *Cement and Concrete Composites*, vol.19, pp 161-171, 1997.
114. Gollop RS., Taylor H F W., Micro structural and micro analytical studies of sulfate attack ; Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp1013-1028, 1996.
115. El-Darwish I., Kurdi A., Mahmoud H., El-Kair HA., Mechanical properties and durability of Portland cement concrete incorporating ground steel making slag, *AEJ Alexandria Engineering Journal*, vol. 36, 1997.
116. Higgins DD., Increased sulfate resistance of GGBS concrete in the presence of carbonate, *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp 913-919, 2003.
117. Kropp J., Hilsdorf H.K., Performance criteria for concrete durability, RILEM rapport n°12, London, 1995.
118. Sulapha P., Wong SF., Wee TH., Swaddiwudhipong S., Carbonation of concrete containing mineral admixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15, pp 134-143, 2003.
119. Parrott L J., Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete, *Materials and Structures*, vol. 29, pp 164-173, 1996.
120. Roper H., Composition, morphologie, hydratation et propriétés adhésives de quelques laitiers granulés, Actes on proceeding, 7^{ème} Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, pp 13 – 17, 1980.
121. Michel F., Courard L., Apport de la granulométrie laser dans la Caractérisation physique des fillers calcaires. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, 19-20 juin 2006, Toulouse, France, pp 40-49.
122. Demoulian E., Gourdin P., Hawthorn F. et Vernet C., Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulicité, 7^{ème} Congrès International de la chimie du ciment, Paris, volume 2, thème 3, pp 89-94, 1980.

123. Smolczyk H G., Structure et caractérisation du laitier, 7^{ème} Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, pp 1-16, 1980.
124. NF P 18-506, Addition pour béton hydraulique, laitier vitrifié moulu de haut fourneau, AFNOR, paris, 1992.
125. NF P 18-403, Sable normal et mortier normal, AFNOR, Paris, 1996.
126. NF P 18-404, Bétons-Essais d'étude, de convenance et de contrôle-confection des éprouvettes, AFNOR, Paris, 1981.
127. NF P 18-405, Bétons-Essais d'Informations-Confection et conservation des éprouvettes, AFNOR, Paris, 1981.
128. EN 196-1, Méthodes d'essais de ciments, détermination des résistances mécaniques, 1987.
129. Baroghel-Bouny V., Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages- indicateurs de durabilité, Groupe de travail AFGC, Paris, 2004.
130. NBN B 15-215, Essais des bétons, Absorption d'eau par immersion, Bruxelles, 1969.
131. NBN B 24-213 Essais des matériaux de maçonnerie; Absorption d'eau sou vide, Bruxelles, 1976.
132. Ramachandran VS., Beaudoin J., Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology ; Principles, techniques and applications, NOYES USA, 2001.
133. Baroguel-Bouny V. et al, Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons Méthode de mesure et d'essai de laboratoire ; Méthode d'essai N°58, LCPC, 2002.
134. EN 13057, Produit et systèmes pour réparation des structures en béton – Méthode d'essai- Détermination de l'absorption capillaire, 2002.
135. NBN B 15-217, Essais des bétons ; Absorption d'eau par capillarité, Bruxelles, 1984.
136. ASTM C 1202-94, Standard method for electrical indication of concretes ability to resist chloride-ion penetration, Annual book of ASTM Standards,1995.
137. Whiting D., Rapid Determination of the chloride Permeability of Concrete, Report n° FHWA/RD-81/119, 1981.
138. pr ENV 196-10, Methods of testing cement: Determination of the resistance of cements to attack by sulfate solution or by sea water, 1997.
139. ASTM C-267 Standards test of method for chemical resistance of mortar, 1997.
140. EN 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, 2009.
141. Kollek JJ., The determination of the permeability of concrete to oxygen by Cembereau method : a recommendation, Materials and structures, vol. 22, pp 225-230, 1989.

142. DIN 1048, Testing method for concrete – Determination of the depth of penetration of water under pressure, 2000.
143. Hogan F J., Meusel J W., Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast furnace slag, *Cement Concrete Aggregate*, pp 40-52, 1981.
144. Gengying Li., Xiaohua Z., Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp 293-299, 2003.
145. Corina M A, Francis Y, Kejin W, Surendra P S, Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp 465-472, 2000.
146. Salt F O., Hover K C., Microcracking in concrete, in *Fracture mechanics of concrete, Material Characterization and Testing*, pp. 137-158, 1984.
147. Ramezani pour A., Malhotra V M., Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, *Cement and Concrete Composites*, vol.17, pp 125-133, 1995.
148. Duran A C., Bilim C., Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag, *Building and Environment*, vol. 42, pp 3060-3065, 2007.
149. Perlot C., Verdier J., Carcass`es M., Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage, *Materials and Structures*, vol. 39, pp 511-523, 2006.
150. Reinhardt H W., Gaber K., From pore size distribution to an equivalent pore size of cement mortar, *Materials and Structures*, vol. 23, pp 3-15, 1990.
151. Targan S., Olgun A., Erdigan Y., Sevinc V., Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash and fly ash on the properties of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp 1175-1182, 2003.
152. Vejmelkova E., Pavlikova M., Kerner Z., Rovnanikova P., Ondracek M., Sedlmajer M., Cerny R., High performance concrete containing lower slag amount: A complex view of mechanical and durability properties, *Construction and Building Materials*. Article in press, 2008.
153. Yeaua K Y., Kimb E K., An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp 1391- 1399, 2005.
154. Luo R., Caib Y., Wangb C., Huanga X., Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp 1-7, 2003.
155. Wee T H., Suryavanshi A K. and TIN S S., Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) result for concrete containing mineral admixture, *ACI Material journal*, vol. 97, n°02, pp 221-232, 2000.

156. Feldman R F., Significance of porosity Measurements on Blended Cement Performance, Proceedings, SP-79, V M. Malhotra, ed., ACI, Farmington hill, Mich, pp 415-433,1985.
157. Mehta P K., Sulfate resistance of binding Portland cements containing pozzolanic and granulated blast furnace slag, Proceeding Fifth International Symposium on Concrete Technology, pp 1495-1508, Mexico, 1981.
158. Arya C., Buenfeld N R., Newman J B., Factors influencing chloride binding in concrete, Cement and Concrete Research, vol. 20, n°2, pp 291-300, 1990.
159. Chung-Chia Y., Relationship between migration coefficient of chloride ions and charge passed in steady state, ACI Material journal, vol.101, n°14, pp124-130, 2004.
160. Rasheeduzzafar, Al-Amoudi OSB., Abduljauwad SN., Maslehuddin M., Magnesium sodium sulfate attack in plain and blended cements, ASCE J Mater Civil Eng, vol. 6, n°2, pp 201-222, 1994.
161. Lea FM., The chemistry of cement and concrete, 3rd ed, ARNOLD, London, 1970.
162. Ghrici M., Kenai S., Meziane E., Mechanicals and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana, Journal Material Science, vol.41, pp 6965-6972, 2006.
163. Al-Amoudi OSB., Maslehuddin M., Abdul-Al Y., Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments, Construction and Building Materials. vol. 9, n°1, pp 25-33, 1995.
164. Biczok I., Concrete Corrosion; concrete Protection, 8th edn, Akademiai Kiado, Budapest, 1980.
165. Harrison W H., Effect of chloride in mix ingredients on sulphate resistance of concrete. Mug. Concr. Res., vol. 42, pp 113-126, 1990.
166. Kenai S., Amrane A., Mechanical properties and permeability of slag in Algerian hot climate, Fourth international conference of concrete technology for developing countries, North Cyprus, 1996.
167. Guneyisi E., Gesoglu M., A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag, Materials and Structure, vol.12, pp225-230, 2008.
168. Feldman RF., Significance of porosity measurements of blended cement performance, 1st International conference on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral products in concrete, Montebello, 1983.
169. Iyoda T., Sagawa Y., The effect of curing period on the durability of concrete using blast-furnace slag blended cement, The 3rd ACF International Conference, ACF/VCA 2008.
170. El Amiri A., Durability of concrete in hot Climate, PhD thesis, Leeds University, England, 1988.

ANNEXE I

Matériaux et essais

I-1 Courbes granulométrique des sables et graviers utilisés

I.1.1 Sable normalisé

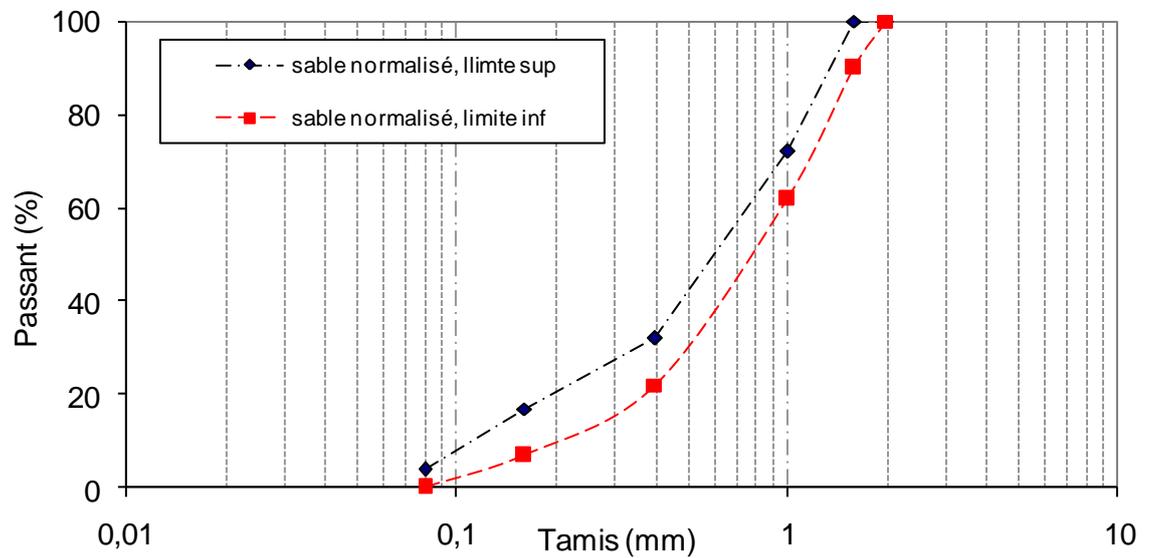


Figure I.1 : Fuseau granulométrique d'un sable normal [100].

I.1.2 Graviers

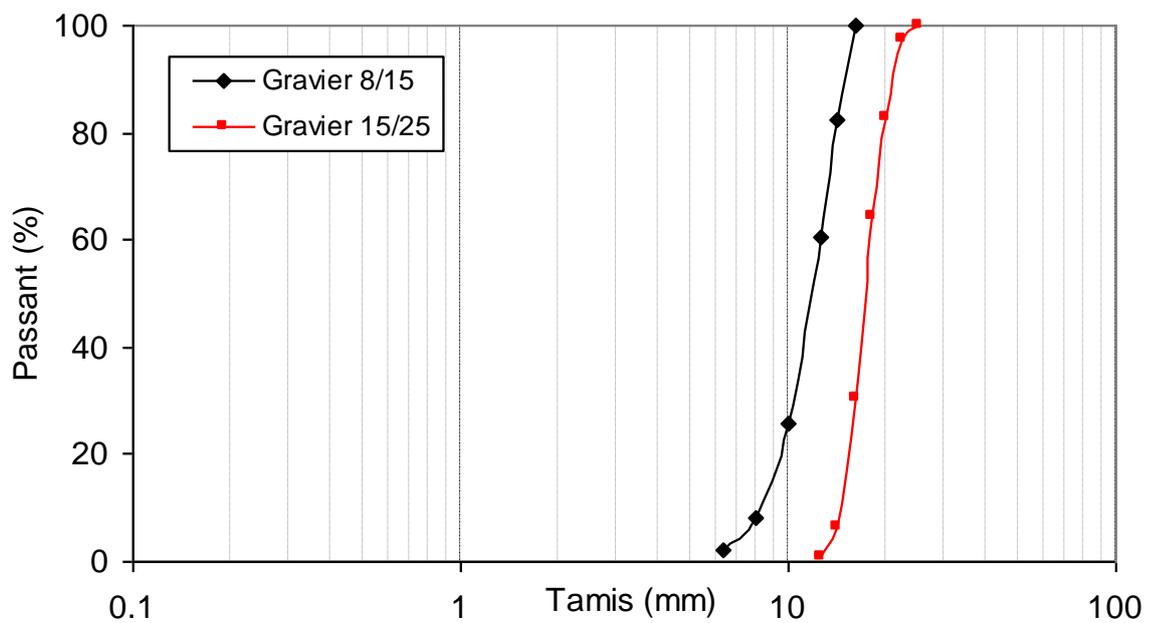


Figure I.2 : Courbes granulométrique des graviers

I.2 Fiche technique du superplastifiant

Construction

Notice technique
Edition octobre 2006
Numéro 2.11
Version n°136,2006 R 001
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.



Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



| RHÉOLOGIE | RÉSISTANCES INITIALES | RÉDUCTION D'EAU |
|-----------|-----------------------|-----------------|
| 5 | 3 | 4 |

Caractéristiques

Aspect Liquide brun clair

Conditionnement

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

Stockage Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation 1 an en emballage intact

Données techniques

densité 1,06 ± 0,01

pH 6 ± 1

Teneur en Na₂O Eq. ≤ 1 %

Extrait sec 30,2 ± 1,3 %



I.3 Données climatiques

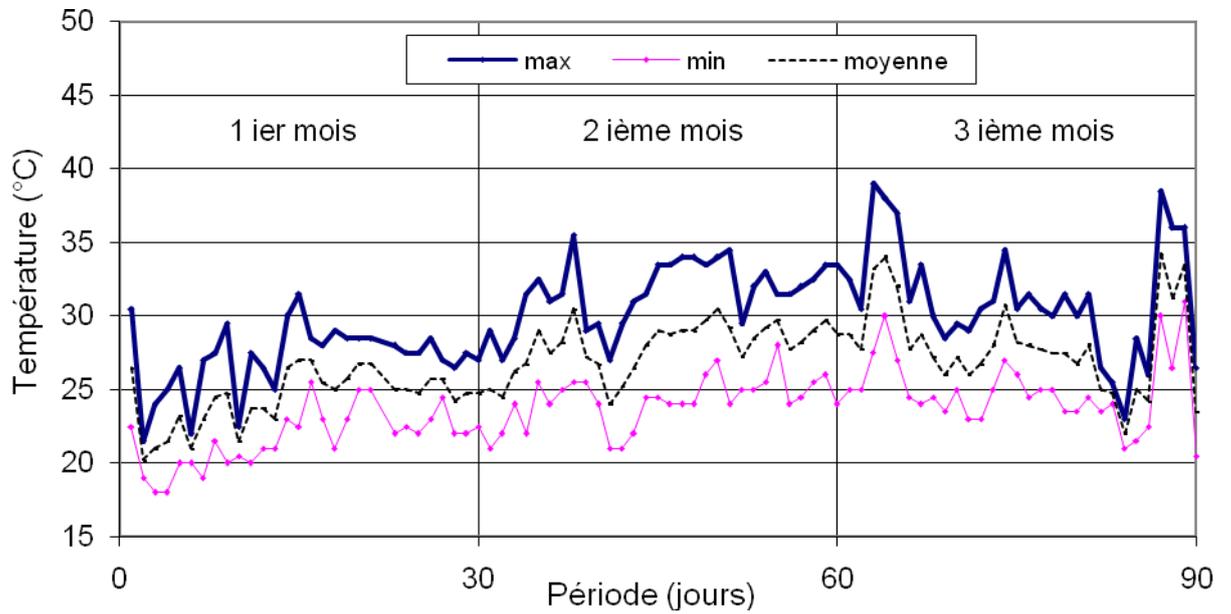


Figure I.3 : Température à l'extérieur du laboratoire (min, max et moyenne) juin – aout 2007.

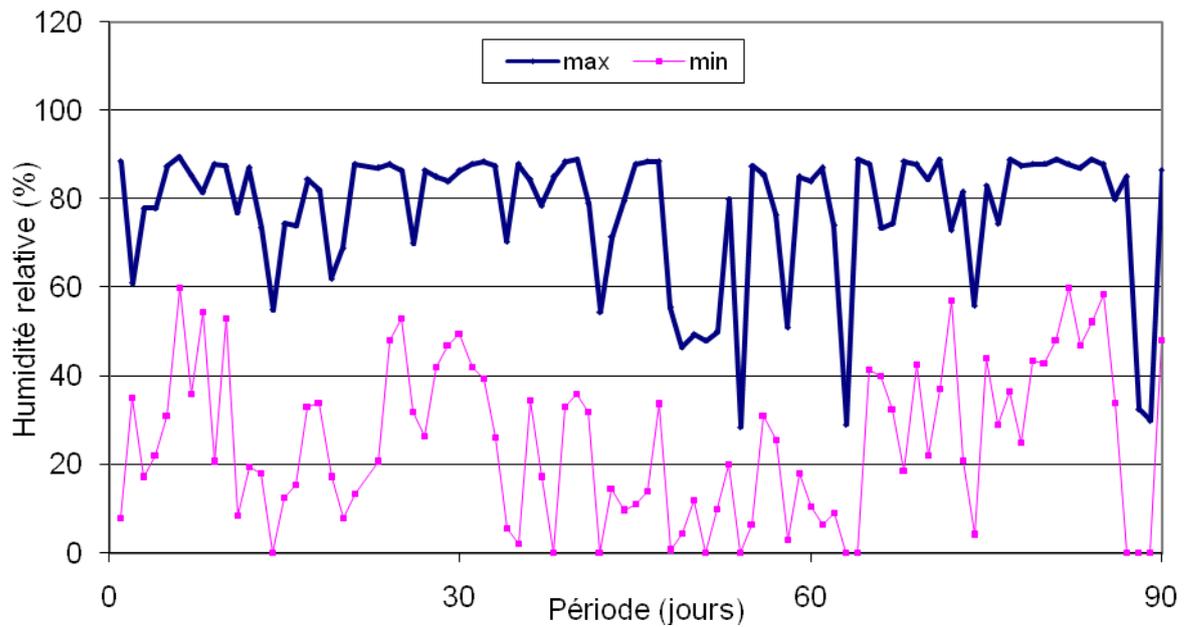


Figure I.4 : Humidité relative à l'extérieur du laboratoire (min et max) juin – aout 2007.

I.4 Dispositif expérimental (cellule de diffusion)

Les cellules sont composées de tubes ($\varnothing 60$ mm) et de plaques (80x80 mm) en plexiglas transparent. Le tout est assemblé par collage. Un orifice est mise en place dans chaque cellule pour permettre le remplissage ainsi que les prélèvements.

Pour que la diffusion des chlorures soit possible, il est impératif que la tranche de mortier soit saturée avant et après montage des cellules de diffusion. Pour cela, les étapes de montage des cellules de diffusion sont :

- 1- Assemblage des deux compartiments.
 - 2- Saturation de la tranche de mortier par de l'eau saturée et chaux.
 - 3- Collage de la tranche sur les deux compartiments (prise de la colle dans la chambre humide pendant 24 heures). Pour cela une colle spéciale, qui fait prise sur support humide a été utilisée.
 - 4- Application d'un joint en silicone aux jonctions tube-mortier.
 - 5- Application d'une couche de résine époxyde sur les bords extérieurs de la tranche de mortier pour l'isoler du milieu extérieur.
 - 6- Mise en solution des compartiments 1 et 2.
- Cellule 1 : eau *déminéralisée* saturée en chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (3 g/l).
 - Cellule 2 : solution de 1 Mole de chlorure de sodium (NaCl) soit 58,44 g de NaCl.
 -

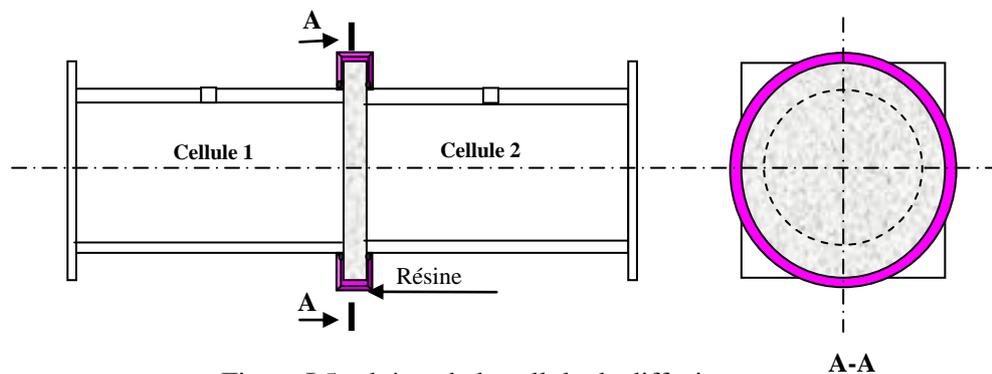


Figure I.5 schéma de la cellule de diffusion

I.5 Titrage potentiométrique.

I.5.1 Préparation de la solution

- La solution prélevée est versée dans un berlin.
- Pour que la réaction puisse se produire, le pH de la solution est ramené à une valeur entre 2.6 et 2.7 à l'aide d'acide (HNO₃) et de base (NaOH).

I.5.2 Titrage

La solution de titrage « titrante » est une solution de nitrate d'argent (AgNO₃) à une concentration à 0,01N. Le voltage est mesuré (en mV) par une électrode d'argent disposée dans la solution. Le voltage augmente avec l'ajout de la solution titrante. Pour chaque quantité ajoutée, la valeur du voltage donné par le potentiomètre est notée. Ainsi, on peut établir la courbe donnant le voltage en fonction de la quantité de nitrate d'argent ajoutée.

Lorsque la solution contient des ions de chlorure, un saut de potentiel appelé "point d'équivalence" est visible sur la courbe, mettant en évidence l'équilibre de la réaction (I.1) et qui se produit entre les ions Cl⁻ et Ag⁺ :



La concentration en chlorures dans la solution prélevée est déterminée en sachant que la quantité de AgNO₃ nécessaire pour atteindre le point d'équivalence est la même que celle des Cl⁻ dans la solution.

Si V (ml) est volume d'argent ajouté lors du titrage (valeur correspondante du point équivalent), sachant que la concentration en AgNO₃ de la solution prélevée est de 0,01 N (mol/l) et la masse d'une mole de Cl⁻ est de 35,5 g donc on peut calculer :

- la masse de chlore $M_{\text{Cl}^-} = V \times 0,355 \cdot 10^{-3} \text{ g}$
- la concentration $C_i = V \times 0,0355 \text{ g/l}$, pour les 10 ml de solution prélevée.

I.5.3 Appareil de mesure

Le titrage potentiométrique a été effectué à l'aide d'un titrateur automatique (Figure I.6)

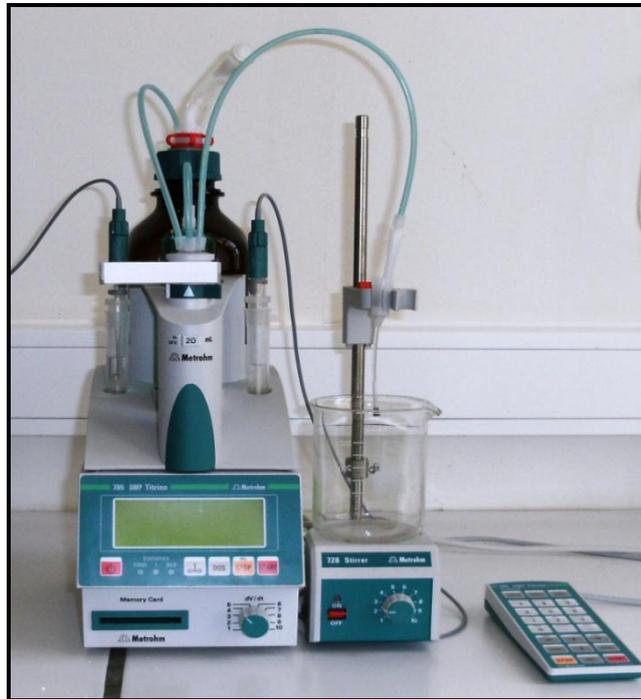


Figure I.6 Titrateur potentiométrique

Annexe II

Résultats et analyses

II.1 Résistances mécaniques des mortiers au laitier

Tableau II.1 : Résistance en compression (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier

| % de laitier | Mortier A (CEM I 32,5 + laitier) | | | | | Mortier B (CEM I 52,5 + laitier) | | | | |
|-------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours |
| 0% | 12,6 | 26,3 | 35,9 | 42,6 | 52,2 | 23,9 | 42 | 54,9 | 70,1 | 76,2 |
| | 12,9 | 25,5 | 35,5 | 44,1 | 49,4 | 23,3 | 42,6 | 53,0 | 65,1 | 76,1 |
| | 12,9 | 26,6 | 36,4 | 41,1 | 51,6 | 24,5 | 29,7 | 61,0 | 68,3 | 75,7 |
| | 13,2 | 25,5 | 37,2 | 42,1 | 50,4 | 24,8 | 33,3 | 62,9 | 70,5 | 74,5 |
| | 13,1 | 26,0 | 36,4 | 41,5 | 50,1 | 24,3 | 29,7 | 60,2 | 68,5 | 75,4 |
| | 12,5 | 24,6 | 36,7 | 40,3 | 51,0 | 24,9 | 34,2 | 61,4 | 69,1 | 78,2 |
| Moyenne | 12,87 | 25,75 | 36,35 | 41,95 | 50,79 | 24,28 | 35,25 | 58,90 | 68,60 | 76,00 |
| Ecart type | 0,27 | 0,71 | 0,60 | 1,32 | 1,25 | 0,601 | 5,764 | 3,97 | 1,921 | 1,377 |
| 30% | 7,3 | 18,5 | 29,1 | 35,2 | 51,1 | 14,1 | 29,4 | 52,3 | 66,4 | 74,5 |
| | 7,3 | 18,6 | 28,9 | 39,2 | 52,2 | 13,8 | 28,8 | 53,9 | 66,0 | 73,6 |
| | 7,6 | 18,1 | 29,9 | 38,7 | 50,8 | 13,8 | 31,4 | 52,5 | 66,7 | 74,5 |
| | 7,5 | 17,9 | 31,7 | 38,6 | 52,2 | 14,1 | 32 | 52,2 | 69,6 | 76,2 |
| | 7,5 | 18,1 | 28,9 | 40,3 | 50,8 | 14,1 | 30,5 | 50,1 | 67,2 | 72,8 |
| | 7,8 | 18,6 | 30,4 | 38,4 | 50,4 | 13,8 | 31,1 | 53,6 | 66,3 | 73,8 |
| Moyenne | 7,50 | 18,30 | 29,82 | 38,40 | 51,25 | 13,92 | 30,76 | 52,46 | 67,16 | 74,53 |
| Ecart type | 0,19 | 0,30 | 1,17 | 1,90 | 0,81 | 0,164 | 1,22 | 1,50 | 1,436 | 1,447 |
| 50% | 4,4 | 13,1 | 26,7 | 32,0 | 48,9 | 6,39 | 18,8 | - | 56,8 | 62,5 |
| | 4,2 | 12,4 | 25,8 | 30,8 | 47,5 | 6,72 | 19,4 | 44 | 54,9 | 62,1 |
| | 4,2 | 13,3 | 25,9 | 33,1 | 50,2 | 6,7 | 18,1 | 40,9 | 56,2 | 63,7 |
| | 4,4 | 13,0 | 25,6 | 31,2 | 48,7 | 6,7 | 19,8 | 39,3 | 55,5 | 62,8 |
| | 4,2 | 12,7 | 24,9 | 34,4 | 49,5 | 6,66 | 19,6 | 41,3 | 55,3 | 63,0 |
| | 4,3 | 12,6 | 25,5 | 30,8 | 47,0 | 6,67 | 18,3 | 39,4 | 55,3 | 62,5 |
| Moyenne | 4,28 | 12,85 | 25,73 | 32,05 | 48,64 | 6,64 | 19,00 | 40,98 | 55,67 | 67,52 |
| Ecart type | 0,10 | 0,34 | 0,59 | 1,62 | 0,74 | 0,124 | 0,707 | 1,90 | 0,700 | 0,602 |

Tableau II.2 : Résistance en flexion (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier

| % de laitier | Mortier A (CEM I 32,5 + laitier) | | | | | Mortier B (CEM I 52,5 + laitier) | | | | |
|-------------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours | 2 Jours | 7 Jours | 28 Jours | 90 Jours | 360 Jours |
| 0% | 3,57 | 4,84 | 6,50 | 7,64 | 8,66 | 4,43 | 6,95 | 7,28 | 9,11 | 7,9 |
| | 3,57 | 5,35 | 6,75 | 7,64 | 7,72 | 4,64 | 7,02 | 7,87 | 8,89 | 8,5 |
| | 2,93 | 5,22 | 7,13 | 7,26 | 8,20 | 4,38 | 7,24 | 8,33 | 7,39 | 8,4 |
| Moyenne | 3,36 | 5,14 | 6,79 | 7,51 | 8,19 | 4,48 | 7,07 | 7,83 | 8,46 | 8,29 |
| Ecart type | 0,37 | 0,27 | 0,32 | 0,22 | 0,66 | 0,14 | 0,15 | 0,53 | 0,94 | 0,30 |
| 30% | 1,78 | 4,33 | 6,36 | 7,52 | 9,09 | 3,09 | 5,92 | 7,99 | 8,84 | 8,7 |
| | 2,04 | 4,33 | 7,01 | 7,39 | 9,13 | 3,13 | 5,58 | 8,28 | 9,14 | 8,6 |
| | 2,04 | 4,20 | 6,62 | 6,88 | 9,13 | 3,19 | 6,21 | 8,00 | 8,44 | 9,2 |
| Moyenne | 1,95 | 4,29 | 6,66 | 7,26 | 9,11 | 3,14 | 5,90 | 8,09 | 8,81 | 8,81 |
| Ecart type | 0,15 | 0,08 | 0,33 | 0,34 | 0,02 | 0,05 | 0,32 | 0,16 | 0,35 | 0,30 |
| 50% | 1,02 | 3,31 | 6,50 | 7,13 | 7,96 | 1,68 | 4,23 | 7,90 | 9,32 | 8,1 |
| | 1,28 | 3,18 | 6,12 | 6,50 | 8,31 | 1,45 | 3,90 | 8,33 | 8,88 | 9,5 |
| | 1,10 | 3,44 | 6,12 | 7,13 | 8,14 | 1,80 | 3,84 | 7,07 | 8,34 | 9,4 |
| Moyenne | 1,13 | 3,31 | 6,25 | 6,92 | 8,13 | 1,64 | 3,99 | 7,77 | 8,85 | 8,99 |
| Ecart type | 0,18 | 0,13 | 0,22 | 0,36 | 0,25 | 0,18 | 0,21 | 0,64 | 0,49 | 0,79 |

Tableau II.3 : Résistance en compression (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier en climat chaud.

| | | Mortier A (CEM I 32,5 + laitier) | | | |
|--------------|-------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| % de laitier | | 7 Jours | 14 Jours | 28 Jours | 90 Jours |
| 0% | | 26,30 | 33,60 | 31,00 | 37,50 |
| | | 25,50 | 34,20 | 32,60 | 33,80 |
| | | 26,60 | 35,80 | 34,40 | 36,10 |
| | | 25,50 | 34,20 | 33,00 | 36,00 |
| | Moyenne | 25,75 | 34,45 | 32,75 | 35,85 |
| | Ecart type | 0,71 | 0,94 | 1,40 | 1,53 |
| 20% | | 21,40 | 32,00 | 30,10 | 35,00 |
| | | 20,10 | 32,50 | 31,60 | 32,70 |
| | | 18,70 | 31,80 | 33,20 | 33,10 |
| | | 20,60 | 30,90 | 32,10 | 34,80 |
| | Moyenne | 20,10 | 31,80 | 31,75 | 33,90 |
| | Ecart type | 0,97 | 0,67 | 1,29 | 1,17 |
| 30% | | 18,50 | 30,90 | 27,90 | 30,70 |
| | | 18,60 | 30,00 | 27,10 | 30,50 |
| | | 18,10 | 28,10 | 28,50 | 30,10 |
| | | 17,90 | 27,70 | 26,20 | 30,10 |
| | Moyenne | 18,30 | 29,18 | 27,43 | 30,35 |
| | Ecart type | 0,30 | 1,53 | 1,00 | 0,30 |
| 50% | | 13,10 | 20,90 | 20,90 | 24,33 |
| | | 12,40 | 20,60 | 20,40 | 22,20 |
| | | 13,30 | 21,30 | 21,00 | 21,70 |
| | | 13,00 | 20,90 | 21,20 | 22,30 |
| | Moyenne | 12,85 | 20,93 | 20,88 | 22,63 |
| | Ecart type | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 1,16 |

Tableau II.4 : Résistance en flexion (MPa) des mortiers à base de ciments au laitier en climat chaud.

| | | Mortier A (CEM I 32,5 + laitier) | | | |
|--------------|----------------|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| % de laitier | | 7 jours | 14 jours | 28 jours | 90 jours |
| 0% | | 4,84 | 8,15 | 7,52 | 8,15 |
| | | 5,35 | 8,19 | 8,28 | 7,77 |
| | | 5,22 | \ | \ | \ |
| | Moyenne | 5,14 | 8,17 | 7,90 | 7,96 |
| | | Ecart type | 0,27 | 0,03 | 0,54 |
| 20% | | 5,1 | 7,26 | 6,88 | 7,9 |
| | | 4,71 | 7,13 | 6,88 | 8,03 |
| | | 4,84 | \ | \ | \ |
| | Moyenne | 4,88 | 7,20 | 6,88 | 7,97 |
| | | Ecart type | 0,20 | 0,09 | 0,00 |
| 30% | | 4,33 | 6,15 | 5,86 | 6,37 |
| | | 4,33 | 6,15 | 6,88 | 6,5 |
| | | 4,2 | \ | \ | \ |
| | Moyenne | 4,29 | 6,15 | 6,37 | 6,44 |
| | | Ecart type | 0,08 | 0,000 | 0,721 |
| 50% | | 3,31 | 4,71 | 4,08 | 4,66 |
| | | 3,18 | 4,71 | 3,82 | 4,2 |
| | | 3,44 | \ | \ | \ |
| | Moyenne | 3,31 | 4,71 | 3,95 | 4,43 |
| | | Ecart type | 0,13 | 0,00 | 0,18 |

II.2 Courbes de distribution logarithmique des volumes des pores des mortiers au laitier

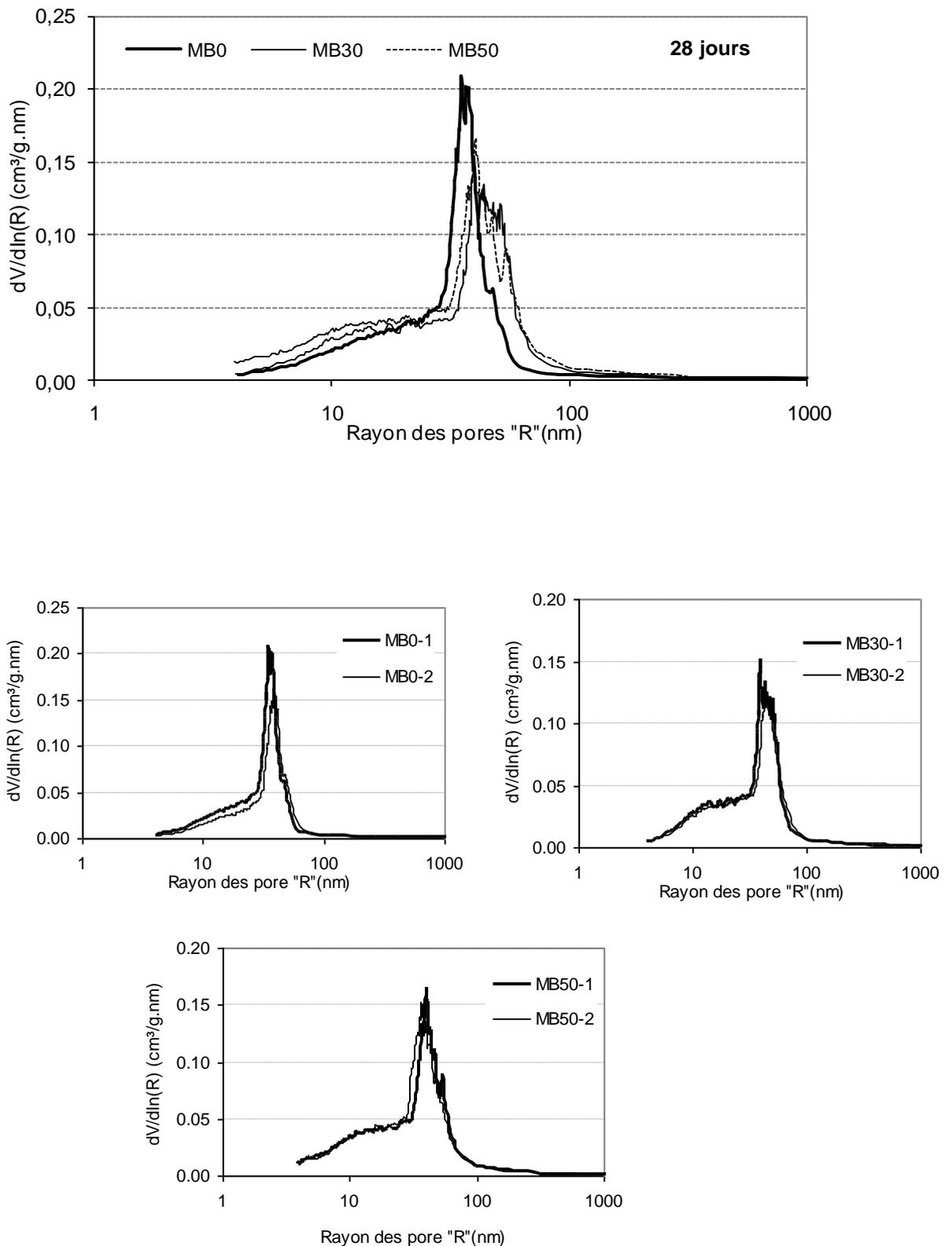


Figure II.1 : Distribution des volumes de pores des mortiers à 28 jours : comparaison et reproductibilité des résultats.

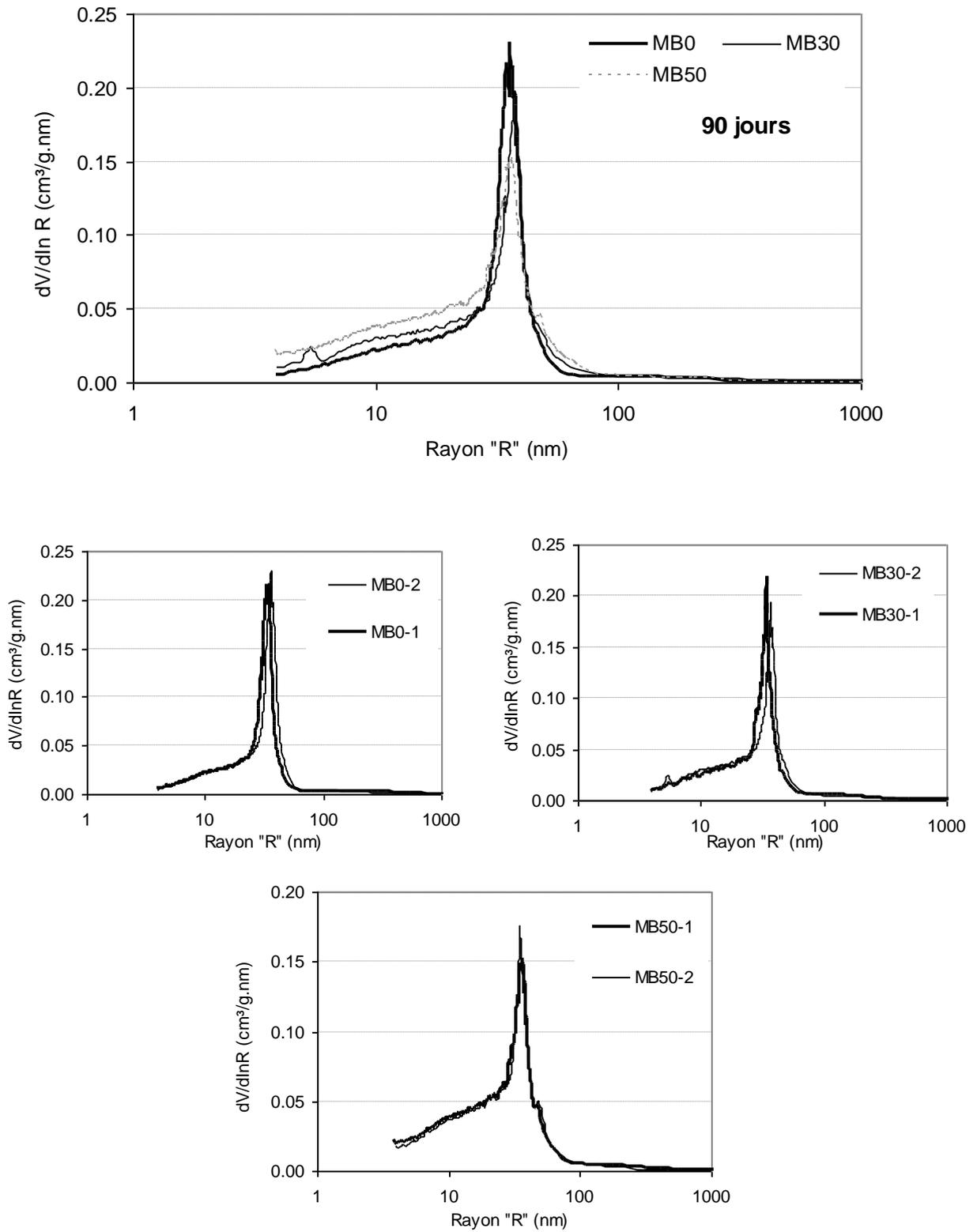


Figure II.2 : Distribution des volumes de pores des mortiers à 90 jours : comparaison et reproductibilité des résultats.

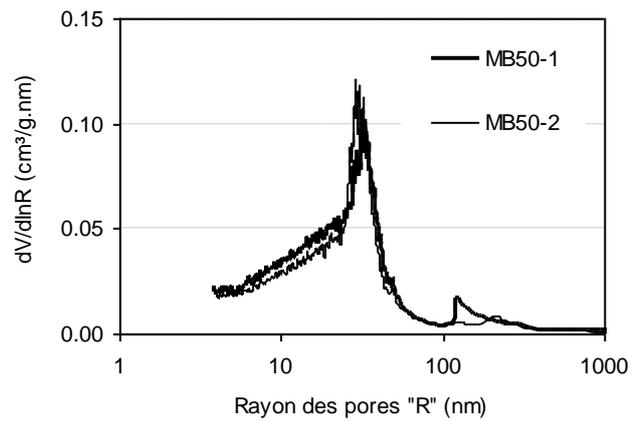
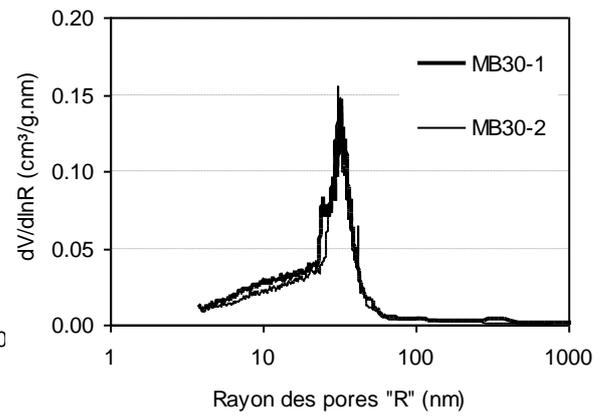
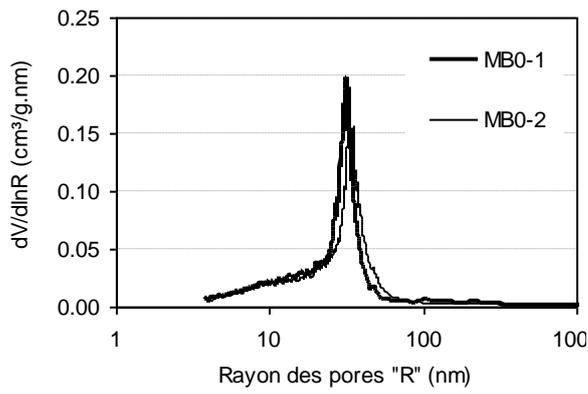
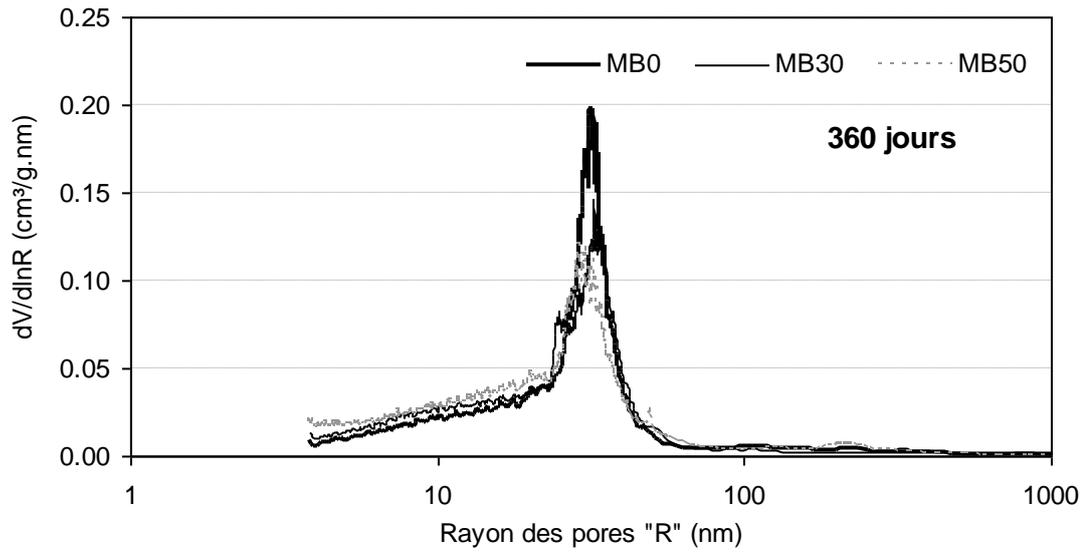


Figure II.3 : Distribution des volumes de pores des mortiers à 360 jours ; comparaison et reproductibilité des résultats.

II.3 Raisonnement comparatif des gammes de diamètres mesurables par la porosimétrie au mercure et l'absorption d'eau sous vide ainsi que le volume mesuré par les deux méthodes.

A partir des coefficients intervenant dans les lois de POSEUILLE et de WASHBURN (Tableau II.5) on peut établir les calculs suivants :

Tableau II.5 : Caractéristiques physique de l'eau et du mercure

| Liquide | Viscosité (mPa.s) | Tension superficielle (mN/m) | Angle de contact (°) |
|------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Eau (H_2O) | 1 | 71,1 | 57.5 |
| Mercure (Hg) | 1,6 | 475 | 140 |

1- En calculant la différence de pression nécessaire pour obtenir un débit identique dans un capillaire cylindrique de rayon r et de longueur L , d'après la loi de POSEUILLE :

$$Qi = \frac{\pi P_i r^4}{8\eta L} \quad ;$$

Nous obtenons $\frac{\Delta P_{Hg}}{\Delta P_{H_2O}} = 1,6$ puisque le rapport des pressions est directement proportionnel au rapport des viscosités. Ce rapport peut expliquer les valeurs plus importantes de la porosité à l'eau P_{wv} par rapport à la porosité au mercure P_{Hg} .

2- À partir de la loi de WASHBURN :

$$r_p = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{p} \quad ;$$

le rayon des capillaires atteint avec une pression exercée sur le mercure de 2000 bars (essais de porosimétrie au mercure) est de 3.7 nm. Ce rayon peut être atteint avec de l'eau pour une pression de 210 bars soit pratiquement 10 fois moins. Toutefois, la dépression appliquée au cours de l'essai d'absorption d'eau sous vide n'atteint que 950 mbars, ce qui permet de pénétrer des capillaires de 820 nm de rayon au minimum.