

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار - عنابة



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

Faculté des sciences de l'ingénieur Année : 2005

Département de Génie Civil

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT D'ETAT

**SOUS PRODUITS INDUSTRIELS ET DEVELOPPEMENT DURABLE :  
REACTIVITE, ROLE ET DURABILITE DES LAITIERS D'EL HADJAR DANS LES  
MATERIAUX A MATRICE CIMENTAIRE**

Option

Matériaux

Par

**Mourad BEHIM**

DIRECTEURS DE THESE : Pierre CLASTRES Professeur INSA – UPS - Toulouse  
Mohamed Faouzi HABITA Professeur Université d'Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Bachir REDJEL Professeur Université d'Annaba

EXAMINATEURS : Mohamed Tahar ABADLIA Professeur Université de Boumerdes  
Hacene HOUARI Professeur Université de Constantine

### **A LA MEMOIRE DE MOSTEFA ARRAR**

*Mostefa ARAAR est décédé le 23 juin 2004 suite à un tragique accident de la route .Il avait 43 ans.*

*Mostefa ARRAR était Ingénieur d'état de l'Université d'Annaba et Docteur en génie civil de l'INSA de Lyon.*

*Il a effectué sa carrière en qualité d'enseignant et chercheur au département de Génie Civil de l'Université d'Annaba et a occupé divers postes de responsabilités en relation avec ses aptitudes et ses qualités.*

*Directeur de recherche, il a dirigé de nombreux projets de recherche, des mémoires de Magister et d'ingénieurs.*

*Président du conseil scientifique et du comité scientifique, il a fait preuve d'une honnêteté scientifique irréprochable.*

*Ma pensée va à sa femme et ses enfants que je prie de trouver ici l'expression de ma compassion et de ma sympathie.*

*Notre communauté scientifique a perdu un ami et un homme de grandes qualités.*

Mourad BEHIM

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au laboratoire de génie civil de l'Université d'Annaba et le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'Institut des sciences appliqués (INSA) de Toulouse.

Il s'inscrit dans le cadre de la coopération interuniversitaire algéro – française pour la finalisation de la thèse d'état algérienne, et soutenue financièrement par le Comité Mixte d'Evaluation et de Prospective (CMEP).

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mme la Professeure G. ARLIGUIE directrice du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Cette recherche a été réalisé sous la codirection de Mr le Professeur P. CLASTRES. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour la confiance et l'aide qu'il m'a apporté. Qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Mes plus vifs remerciements s'adressent :

à Monsieur le Professeur B. REDJEL directeur du laboratoire de génie civil pour ses conseils et d'avoir bien voulu présider le jury,

à Monsieur le Professeur M.T. ABADLIA, directeur du laboratoire de béton et liant de l'Université de Boumerdes d'avoir accepté de juger ce travail,

à Monsieur le Professeur H. HOUARI directeur du laboratoire durabilité des bétons de l'Université de Constantine d'avoir accepté de juger ce travail,

à Monsieur M.F. HABITA codirecteur de thèse de m'avoir permis de réaliser ce travail avec beaucoup d'autonomie,

à Monsieur le Professeur émérite A. CARLES – GIBERGUES pour ses conseils très précieux, sa disponibilité et son intérêt pour ce travail.

à Madame S. JULIEN et Monsieur M. CYR pour leurs aides et collaborations.

à Monsieur T. RIZI directeur du parc à scories pour son aide précieuse et approvisionnement en laitiers.

aux responsables de la cimenterie de HADJR ESSOUD et l'équipe du laboratoire pour leur aides, disponibilité et approvisionnement en matériaux.

à tous mes collègues des départements de génie civil, d'hydraulique et d'architecture pour leur soutien moral.

Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leur aide et leurs encouragements , m'ont permis de réaliser cette thèse.

## ملخص

خبث القرن العالي لإنجاز الأسمنت و العمل المقدم في هذه الأطروحة يدخل في إطار التطور المستديم الذي طبق على الخرسانة.

التعريف الفيزيائي، الكيميائي و الميكانيكي لخبث القرن العالي المحبب لمصنع الحجار للحدي و الصلب بين نسبة عالية من التزجي ج، حركية تصلب بطيئة لكنها متزايدة على المدى الطويل مما يسمح باستعماله في الأسمنت.

التفاعلات بين خبث القرن العالي و قالب الأسمنت درست على عينات من عجائن خالصة و ملاط تحتوي على إسمنت حضر خصيصا من الأسمنت الفج و الجبس لمصنع حجر السود و خبث القرن العالي المحبب لمصنع الحجار للحدي و الصلب سحق إلى مختلف نعومات. استغلال نوعي لنتائج هذه الدراسة سمح بإظهار دور خبث القرن العالي المحبب بدلالة الوقت، و نسبة خبث القرن العالي المحبب في الأسمنت و نعومته. النتائج المحصل عليها تسمح بتقديم اقتراح لأعداد إسمنت الفرن العالي يحتوي على 50 بالمائة من خبث القرن العالي المحبب.

لقد تعرضنا كذلك لدراسة تأثير خبث الفرن العالي على دوام العجائن الخالصة و الملاط بطرق وتجارب مختلفة منها طرق إستعجالية. تحقيقات بنيوية دقيقة أثبتت طبيعة العدوانية الكيميائية (الوسط الكيميائي الذي أستعمل للاحتفاظ بالمواد المختبرة، فوحمة متسارعة، نسبة خبث الفرن العالي في الإسمنت، مدة ودرجة حرارة الاحتفاظ) على نوعية و كمية الهيدراتات المكونة. دومومة إسمنت الفرن العالي تتعلق أساسا بشروط و مدة الاحتفاظ بالعينات قبل تعرضها للوسط العدوانية.

بحثنا على إنجاز خرسانة تحتوي على خبث الفرن العالي ليس فقط في الإسمنت بل كذلك و لاسيما كحصى لاستبدال رمل الكثبان الناعم و الحصى الغليظ المفتت (الكلسي) المستعملان عادة في الخرسانة المحلية. نتائج التجارب الميكانيكية من خلال الضغط و الشد عن طريق الشق هي العناصر الأساسية التي استعملت للتعريف بخصوصيات الخرسانة المدروسة. النتائج المحصل عليها تبين أثر خبير مرتبط باستعمال خبث الفرن العالي كحصى في الخرسانة.

## ABSTRACT

The work of the thesis that follows enters in the idea of durable development, appropriate to blast high furnace slag to use in cement and concrete.

The physical, chemical and mechanical characterisation of slag of EL HADJAR has shown a high level of vitrification, a kinetic of hardness sufficiently slow but growing faster in time, with an eventual opportunity to use in cement works.

The interaction between slag and other cementaries has been studied on mortar containing cementing agents reconstituted especially from clinker, granulated slag crushed at different sizes and gypsum. A specific exploitation will allow us to put in evidence the role of granulated slag in function of time. The amount of slag in the cement and its fineness Blaine.

The obtained results allow us to propose the formulation of a cement with high furnace containing 50 % of granulated slag of EL HADJAR.

We have studied the influence of slag on the durability of pure paste and mortar from different classic and speeded tests.

Micro structural investigations show the effect of the chemical aggression's nature (condition and nature of cure, speed carbonation), of the amount of slag in the cement, of the time and the conservation temperature on the nature and the quantity of formed hydrates.

The durability of cement containing granulated slag of EL HADJAR depends mostly on the conditions and the duration of the cure.

We have tried to make concretes containing slag not only in the cement, but most of all as aggregate in replacement of sand and crushed chalk usually used.

The granulated slag has been introduced in concretes as a partial or total substitution of natural sand and the crystallised slag could be used instead of crushed chalk. The characterisation of concretes has been made on the results of tests of compression and traction. The use of slag in concrete gives a beneficial effect on the mechanical properties.

## RESUME

Le travail de thèse présenté ci-après s'inscrit dans le cadre du concept de développement durable appliqué au laitier de haut – fourneau dans le domaine des ciments et des bétons.

La caractérisation physique, chimique et mécanique du laitier granulé d'EL HADJAR a montrée un fort taux de vitrification, une cinétique de durcissement assez lente mais croissante dans le temps, donc une opportunité d'emploi en cimenterie.

Les interactions entre laitier et matrices cimentaires ont été étudiées sur mortiers contenant des liants reconstitués spécialement à partir de clinker, de laitier granulé broyé à différentes finesses et de gypse. Une exploitation spécifique nous permettra de mettre en évidence le rôle du laitier granulé en fonction du temps, du taux de laitier dans le ciment et de sa finesse Blaine. Les résultats obtenus permettent d'avancer une proposition d'élaboration d'un ciment de haut fourneau contenant 50% de laitier granulé d'EL HADJAR.

Nous avons abordé aussi l'étude de l'influence du laitier sur la durabilité de pâtes pures et de mortiers à partir de différents essais classiques et accélérés. Des investigations micro structurales permettent de mettre en évidence l'effet de la nature de l'agression chimique (type de bain de conservation, carbonatation accélérée,...), du taux de laitier dans le ciment, du temps et de la température de conservation sur la nature et la quantité des hydrates formés. La durabilité des ciments au laitier d'EL HADJAR dépend surtout des conditions et de la durée de cure.

Nous avons cherché à réaliser des bétons contenant du laitier, non seulement dans le ciment, mais aussi et surtout en tant que granulats, en remplacement du sable de dune et du calcaire concassé habituellement utilisé. Le laitier granulé a été introduit dans les bétons, en remplacement partiel ou total du sable de dune, et le laitier cristallisé a pu remplacer totalement le gravier calcaire concassé. La caractérisation de ces bétons a été faite à partir des résultats d'essais de compression simple et de traction par fendage. Les résultats, montre un effet bénéfique lié à l'utilisation de laitier dans les bétons.

## NOTATIONS ET ABREVIATIONS

Il est courant d'utiliser dans l'industrie cimentière les abréviations suivantes :

Pour les oxydes :

C pour CaO  
A pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
S pour SiO<sub>2</sub>  
F pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
M pour MgO  
H pour H<sub>2</sub>O  
S pour SO<sub>3</sub>  
C pour CO<sub>2</sub>

Pour les minéraux du ciment

C<sub>3</sub>S pour 3.CaO.SiO<sub>2</sub> (Silicate tricalcique)  
C<sub>2</sub>S pour 2.CaO. SiO<sub>2</sub> (Silicate bi calcique)  
C<sub>3</sub>A pour 3.CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Aluminate tricalcique)  
C<sub>4</sub>AF pour 4.CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Ferro aluminate tétra calcique)

Nous avons également utilisés des abréviations non conventionnelles qui sont explicités sur diffractogrammes par exemple :

E pour Ettringite  
CA pour carboalumionate de calcium  
P pour Portlandite  
G pour Gypse  
An pour anhydres du clinker (C<sub>3</sub>S + C<sub>2</sub>S)

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b>	3
<b>ملخص</b>	4
<b>ABSTRACT</b>	5
<b>RESUME</b>	6
<b>Table des matières</b>	7
<b>NOTATION ET ABREVIATION</b>	13
<b>INTRODUCTION</b>	15
<b>CHAPITRE I - LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU</b>	18
<b>Introduction</b> .....	20
<b>1. Formation et traitement du laitier</b> .....	20
<b>1.1. Formation du laitier</b> .....	20
<b>1.2. Traitement du laitier</b> .....	21
1.2.1. Laitier granulé.....	21
1.2.2. Laitier bouleté.....	22
1.2.3. Laitier cristallisé.....	23
<b>2. Le laitier granulé</b> .....	23
<b>2.1. Caractéristiques</b> .....	23
2.1.1. Composition chimique.....	24
2.1.2. Composition minéralogique potentielle du laitier.....	24
2.1.3. Granulométrie.....	24
<b>2.2. Réactivité hydraulique du laitier granulé</b> .....	24
2.2.1. But de la tempe.....	24
2.2.2. Taux de vitrification.....	25
2.2.3. Critères chimiques.....	25
2.2.4. Test à la soude.....	26
2.2.5. Indice d'efficacité hydraulique h.....	27
2.2.6. Influence du pH.....	27
2.2.7. Autres facteurs influençant la réactivité du laitier granulé.....	27
2.2.8. Laitier de crassier.....	28
<b>2.3. Hydratation et activation du laitier granulé</b> .....	28
2.3.1. Activation chimique.....	30
2.3.2. Activation mécanique.....	31
2.3.3. Activation thermique.....	31
<b>2.4. Utilisation du laitier dans les bétons</b> .....	32
2.4.1. Dans les ciments.....	32
2.4.2. Dans les bétons.....	38
2.4.3. Dans les briques de laitier.....	39
2.4.4. Dans la construction d assises de chaussées.....	39

2.4.5. Dans divers autres domaines.....	39
<b>3. Le laitier cristallisé.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Caractéristiques.....</b>	<b>39</b>
3.1.1. Composition chimique.....	39
3.1.2. Composition minéralogique.....	40
3.1.3. Masse volumique absolue.....	41
3.1.4. Masse volumique apparente.....	42
3.1.5. Masse volumique apparente du grain.....	42
3.1.6. Porosité.....	42
3.1.7. Absorption d'eau et remontée capillaire.....	42
3.1.8. Résistance mécanique.....	43
3.1.9. Résistance à l'attrition, au choc et à l'abrasion.....	43
3.1.10. Hydraulité du laitier cristallisé.....	43
<b>3.2. Utilisation du laitier cristallisé.....</b>	<b>43</b>
3.2.1. Dans les bétons.....	44
3.2.2. Constructions des assises de chaussées.....	45
3.3.3 Ballast pour voies ferrées.....	46
3.3.4. Autres utilisations.....	46
<b>Conclusion.....</b>	<b>46</b>

## **CHAPITRE II – CARACTERISATION DES LAITIERS SIDERURGIQUES D'EL HADJAR..... 48**

Introduction.....	49
<b>1. Elaboration des laitiers D'EL HADJAR.....</b>	<b>51</b>
<b>1.1. Les matières premières.....</b>	<b>51</b>
<b>1.2. Formation du laitier.....</b>	<b>51</b>
<b>1.3. Traitement du laitier.....</b>	<b>51</b>
1.3.1. Refroidissement lent.....	52
1.3.2. Refroidissement brutal.....	53
<b>2. Caractérisation du laitier granule D'EL HADJAR.....</b>	<b>54</b>
<b>2.1. Propriétés physiques.....</b>	<b>54</b>
2.1.1. Masses volumiques.....	54
2.1.2. Granulométrie.....	54
<b>2.2. Etude de la réactivité hydraulique.....</b>	<b>55</b>
2.1.1. La composition chimique.....	55
2.1.2. Analyse aux rayons X et détermination du taux de vitrification.....	55
2.1.3. Le module chimique I.....	57
2.2.4. Les indices d'activité.....	57
2.2.5. L'essai accéléré à la soude.....	58
2.2.6. L'indice d'efficacité hydraulique h.....	59
<b>2.3. Discussion.....</b>	<b>60</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>61</b>
3. Caractérisation du laitier granulé d'EL HADJAR.....	62
<b>3.1. Propriétés physiques.....</b>	<b>62</b>
3.1.1. Masses volumiques.....	62
3.1.2. Porosité.....	62
3.1.3. Granulométrie.....	62

<b>3.2. Propriétés chimiques</b> .....	62
3.2.1. Composition chimique.....	62
3.2.2. Composition minéralogique.....	63
<b>3.3. Discussion</b> .....	63
<b>Conclusion</b> .....	64

CHAPITRE III - ELABORATION ET CARACTERISATION DE CIMENTS AU LAITIER GRANULE D'EL HADJAR..... 66

<b>Introduction</b> .....	68
<b>1. Matériaux et méthodes</b> .....	68
<b>1.1. Matériaux</b> .....	68
1.1.1. Le laitier.....	68
1.1.2. Le clinker.....	69
1.1.3. Le gypse.....	69
1.1.4. Le sable.....	69
<b>1.2. Méthodes expérimentales</b> .....	70
1.2.1. Préparation des mélanges clinker – laitier – gypse.....	70
1.2.2. Confection et conditions de conservation des éprouvettes.....	70
1.2.3. Essai d’ouvrabilité de béton.....	70
1.2.4. Essais mécaniques.....	70
1.2.5. Mesure de la chaleur d'hydratation.....	70
1.2.6. Mesure du retrait.....	71
1.2.7. pH – métrie.....	71
1.2.8. Analyse aux rayons X.....	71
<b>2. Etude de l’influence du dosage et de la finesse du laitier sur les résistances mécaniques</b> .....	72
<b>2.1. Influence du dosage en laitier sur les résistances mécaniques</b> .....	72
<b>2.2. Influence de la finesse de mouture du laitier sur les résistances mécaniques</b> ....	76
<b>2.3. Discussion</b> .....	78
<b>3. Elaboration et caractérisation de CPJ et CHF</b> .....	78
<b>3.1. Composition</b> .....	78
<b>3.2. Cinétique de durcissement</b> .....	79
<b>3.3. Chaleur d'hydratation</b> .....	80
<b>3.4. Retrait et perte de masse</b> .....	82
<b>3.5. pH des solutions de ciments et du laitier seul</b> .....	83
<b>3.6. Analyse aux rayons X</b> .....	83
<b>3.7. Conclusion</b> .....	85
<b>4. Application au béton standard</b> .....	86
<b>4.1. Contexte de l’étude</b> .....	86
<b>4.2. Matériaux</b> .....	86
4.2.1. Ciments.....	86
4.2.2. Granulats.....	86
<b>4.3. Formulation du béton standard</b> .....	87
4.3.1. Les données.....	87
4.3.2. Principe de base de la méthode de SKRAMTAEV.....	87
<b>4.4. Résultats</b> .....	90
<b>4.5. Commentaires et conclusion</b> .....	91
<b>5. Mode d’action du laitier dur l’hydratation du clinker</b> .....	

<b>5.1. Effets des additions minérales sur les ciments</b> .....	92
5.1.1.Effet filler.....	92
5.1.2.Effet chimique.....	92
5.1.3. Effet physique ou de surface.....	92
<b>5.2. Exploitation des résultats</b> .....	93
5.2.1. Résistance des mortiers de référence.....	93
5.2.2. Accroissement des résistances par effet physique.....	96
5.2.3. Accroissement des résistances par effet chimique.....	96
<b>5.3. Discussion</b> .....	97
<b>Conclusion</b> .....	98

CHAPITRE IV - ETUDE DE LA DURABILITE DE PATES DE CIMENTS  
CONTENANT DU LAITIER CONSERVEES DANS DES MILIEUX  
AGRESSIFS ET A DES TEMPERATURES DE CLIMAT CHAUD..... 101

Introduction.....	103
<b>1. Les milieux agressifs et les mécanismes de dégradation</b> .....	104
<b>Les milieux agressifs</b> .....	104
<b>1.1. Les mécanismes de dégradation</b> .....	105
1.2.1.Action chlorures.....	105
1.2.2.Action des sulfates.....	106
1.2.3.Action du dioxyde de carbone.....	107
1.2.4.Action du nitrate d'ammonium.....	108
1.2.5.Action de la température.....	108
1.2.6.Conclusion.....	109
<b>2. Durabilité des ciments au laitier s'hydratant en milieux chimiquement agressifs couplé à la température</b> .....	110
<b>2.1. Introduction</b> .....	110
<b>2.2. Mode opératoire</b> .....	110
2.2.1.Composition des ciments.....	110
2.2.2. Choix des éprouvettes.....	110
2.2.3. Caractéristiques des milieux de conservation.....	110
2.2.4. Confection cure et conservation des éprouvettes.....	111
2.2.5. Mesures et essais.....	111
<b>2.3. Cure à 20 °C</b> .....	111
2.3.1. Cinétique de durcissement.....	111
2.3.2. Influence des milieux de cure sur le rapport $\sigma_i / \sigma_D$ .....	112
2.3.3. Influence des milieux de cure sur le rapport $\varepsilon_i / \varepsilon_D$ .....	114
2.3.4. Discussion.....	116
<b>2.4. Cure à 40 °C</b> .....	120
2.4.1. Cinétique de durcissement.....	120
2.4.2. Influence des milieux de cure sur le rapport $\sigma_i / \sigma_D$ .....	120
2.4.3. Influence des milieux de cure sur le rapport $\varepsilon_i / \varepsilon_D$ .....	122
2.4.4. Commentaires.....	123
<b>2.5. Discussion</b> .....	124
<b>Conclusion</b> .....	125
<b>3. Essai accéléré d'agression chimique couplé à la température : conservation après cure humide dans un bain de nitrate d'ammonium</b> .....	126

<b>3.1. Introduction</b> .....	126
<b>3.2. Conduite des essais</b> .....	126
<b>3.3. Résultats expérimentaux</b> .....	127
3.3.1. Cinétique de dégradation en terme de résistance.....	127
3.3.2. Perte de masse.....	128
3.3.3. Variations dimensionnelles.....	129
3.3.4. Epaisseur de dégradée.....	130
3.3.5. Etude qualitative par diffraction des rayons X et par analyse thermique différentielle du processus de dégradation des ciments d'étude attaqués par une solution de nitrate d'ammonium.....	132
<b>3.4. Discussion</b> .....	135
<b>3.5. Conclusion</b> .....	136
<b>4. Action du dioxyde de carbone sur les ciments au laitier (essai accéléré)</b> .....	138
<b>4.1. Introduction</b> .....	138
4.2. Procédure expérimentale.....	138
4.2.1. Eprouvettes utilisées.....	138
4.2.2. Confection des éprouvettes.....	138
4.2.3. Conservation des éprouvettes.....	138
4.2.4. Conditionnement des éprouvettes.....	139
4.2.5. Echéancier des essais.....	139
4.2.6. Mesure de la profondeur du front carbonaté.....	139
<b>4.3. Résultats sur pâtes pures</b> .....	139
4.3.1. Profondeur carbonatée.....	139
4.3.2. Augmentation de la masse.....	140
4.3.1. Résistance en traction par fendage.....	140
<b>4.4. Résultats sur mortiers (I) étuvé pendant 2 jours</b> .....	141
4.4.1. Profondeur carbonatée.....	141
4.4.2. Résistance en traction par fendage.....	141
4.4.3. Augmentation de masse.....	142
<b>4.5. Résultats sur mortier (II) étuvé pendant 7 jours</b> .....	142
4.5.1. Profondeur carbonatée.....	142
4.5.2. Résistance en traction par fendage.....	143
4.5.3. Augmentation de la masse.....	143
<b>4.6. Résultats sur mortier (III) cure humide de 28 jours</b> .....	144
4.6.1. Profondeur carbonatée.....	144
4.6.2. Augmentation de la masse.....	144
4.6.3. Résistance en traction par fendage.....	145
4.6.4. Vitesse de propagation des ondes ultrasonique.....	145
<b>4.7. Discussion</b> .....	146
<b>Conclusion</b> .....	147
Conclusion du chapitre.....	147



## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Le travail de thèse présenté ci-après s'inscrit dans le cadre du concept de développement durable appliqué au laitier de haut – fourneau, sous-produit industriel de la filière fonte de production d'acier.

Ce concept nous amène à privilégier, pour un matériau donné, un mode de production et de gestion de fin de vie qui préserve au mieux l'environnement, et notamment les ressources naturelles.

Le laitier de haut fourneau, au début du développement à l'échelle industrielle de cette filière, était considéré comme un déchet destiné à être stocké en terrils. C'est ce qui s'est aussi passé dans les années 1970, premières années de mise en service du complexe sidérurgique d'El HADJAR, non pas par ignorance, mais par manque de débouchés.

Depuis les années 1980, le laitier d'El Hadjar est partiellement valorisé en cimenterie (pour le laitier granulé refroidi brusquement par trempe à l'eau) et en technique routière, avec cependant de grandes fluctuations annuelles (tableau1) qui dépendent essentiellement des conditions économiques locales (production de ciment, construction de routes,...).

**Tableau 1 - Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR**

Désignation	Production *10 <sup>3</sup>									
	1987		1988		1989		1995		2002	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
<b>Laitier granulé</b>	167	57.3	484	71.2	347	62.7	129	34	467	82.5
<b>Laitier cristallisé</b>	124	41.7	196	28.8	206	37.3	250	66	99	17.5
<b>Total</b>	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

C'est ainsi que, afin d'économiser les ressources en eau, la granulation du laitier se fait à la demande, en fonction des débouchés en cimenterie. Ceux ci sont aussi limités par le taux d'utilisation dans les ciments, qui reste inférieur ou égal à 20% (tableau 2) pour la cimenterie de HADJR SOUD de 1994 à 2002.

**Tableau 2 - Consommation du laitier granulé par la cimenterie de HADJR SOUD**

Année	1994	1995	1996	1997	2002
<b>Consommation du laitier granulé en %</b>	19.74	18.28	17.08	13.55	20

Un des objectifs de ce travail de thèse sera donc d'étudier divers scénarios de valorisation des laitiers d'El HADJAR, par augmentation du taux d'utilisation dans les ciments d'une part, par introduction comme addition au béton d'autre part.

Sur le plan scientifique, ont été abordés les questions de caractérisation de la réactivité, en relation avec la composition chimique, et surtout du rôle et du mode d'action de l'addition de laitier dans les ciments et les bétons.

Après une synthèse bibliographique sur la valorisation des laitiers, présentée dans un premier chapitre, nous présentons au début d'un second chapitre quelques données sur le contexte économique, industriel et environnemental de la gestion du laitier d'El HADJAR.

Le laitier de haut fourneau peut avoir des compositions, granulométries, morphologie, et par suite des propriétés et applications très différentes en fonction des minerais, des

combustibles, du procédé de fabrication de la fonte et surtout du mode de refroidissement après la coulée. Nous avons donc, dans la deuxième partie de ce second chapitre, cherché à caractériser les laitiers d'El HADJAR du point de vue physique et réactivité chimique, propriété importante pour les utilisations dans les matériaux à matrice cimentaire.

Les interactions entre laitier et matrices cimentaires ont été étudiées sur mortiers contenant des liants reconstitués spécialement à partir de clinker, de laitier granulé broyé à différentes finesses et de gypse. Une exploitation spécifique nous permettra de mettre en évidence le rôle du laitier granulé en fonction du temps, du taux de laitier dans le ciment et de sa finesse Blaine. C'est l'objet principal du chapitre 3, qui contient aussi la proposition et caractérisation complète d'un ciment de haut fourneau contenant 50% de laitier granulé d'El HADJAR.

Dans le quatrième chapitre, nous avons abordé l'étude de l'influence du laitier sur la durabilité de pâtes pures et de mortiers à partir de différents essais accélérés. Des investigations microstructurales permettent de mettre en évidence l'effet de la nature de l'agression chimique (type de bain de conservation, carbonatation accélérée,...), du taux de laitier dans le ciment, du temps et de la température de conservation sur la nature et la quantité des hydrates formés.

L'utilisation principale des ciments est la réalisation de bétons. Nous avons dans un dernier chapitre cherché à réaliser des bétons contenant du laitier, non seulement dans le ciment, mais aussi et surtout en tant que granulats, en remplacement du sable de dune et du calcaire concassé habituellement utilisé. Le laitier granulé a été introduit dans les bétons, en remplacement partiel ou total du sable de dune, et le laitier cristallisé a pu remplacer totalement le gravier calcaire concassé. La caractérisation de ces bétons a été faite à partir des résultats d'essais de compression simple et de traction par fendage. A partir de ces résultats, nous avons aussi cherché à faire ressortir un éventuel effet bénéfique lié à l'utilisation de laitier dans les bétons, utilisation peu répandue actuellement, même en Europe.

**CHAPITRE I**  
**LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU**

# CHAPITRE I – LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU

## Introduction

### 1. FORMATION ET TRAITEMENT DU LAITIER

- 1.1. Formation du laitier
- 1.2. Traitement du laitier.
  - 1.2.1. Laitier granulé
  - 1.2.2. Laitier bouleté
  - 1.2.3. Laitier cristallisé

### 2. LE LAITIER GRANULE

#### 2.1. Caractéristiques

- 2.1.1. Composition chimique
- 2.1.2. Composition minéralogique potentielle du laitier
- 2.1.3. Granulométrie
- 2.1.4. Masses volumiques

#### 2.2. Réactivité hydraulique du laitier granulé

- 2.2.1. But de la tempe
  - 2.2.2. Taux de vitrification
  - 2.2.3. Critères chimiques
  - 2.2.4. Test à la soude
  - 2.2.5. Influence du pH
  - 2.2.6. Indice d'efficacité hydraulique h
  - 2.2.7. Autres facteurs influençant la réactivité
  - 2.2.8. Laitier de crassier
- 2.3. Hydratation et activation du laitier granulé

- 2.3.1. Activation chimique
  - 2.3.1.1. Activation alcaline
  - 2.3.1.2. Activation sulfatique
  - 2.3.1.3. Activation sulfo – calcique
  - 2.3.1.4. Autres modes d'activation
- 2.3.2. Activation mécanique
- 2.3.3. Activation thermique

#### 2.4. Utilisation du laitier granulé

- 2.4.1. Dans les ciments:
  - 2.4.1.1. Les constituants du ciment
    - 2.4.1.1.1 Les constituants principaux
    - 2.4.1.1.2. Les constituants secondaires
    - 2.4.1.1.3. Rappel des normes algériennes
  - 2.4.1.2. Caractéristiques des ciments au laitier
    - 2.4.1.2.1. Masse volumique
    - 2.4.1.2.2. Chaleur d'hydratation
    - 2.4.1.2.3. Retrait
    - 2.4.1.2.4. Prise et cinétique de durcissement
    - 2.4.1.2.5. Hydratation
    - 2.4.1.2.6. Résistance chimique
    - 2.4.1.2.7. Emplois
- 2.4.2. Dans les bétons

- 2.4.3. Dans les briques de laitier
- 2.4.4. Dans la construction des assises de chaussées
- 2.4.5. Dans divers autres domaines

### **3. LE LAITIER CRISTALLISE**

#### **3.1. Caractéristiques**

- 3.1.1. Composition chimique
- 3.1.2. Composition minéralogique
- 3.1.3. Masse volumique absolue
- 3.1.4. Masse volumique apparente
- 3.1.5. Masse volumique apparente du grain
- 3.1.6. Porosité
- 3.1.7. Absorption d'eau et remontée capillaire
- 3.1.8. Résistance mécanique
- 3.1.9. Résistance à l'attrition, au choc et à l'abrasion
- 3.1.10. Hydraulicité du laitier cristallisé

#### **3.2. Utilisation du laitier cristallisé**

- 3.2.1. Dans les bétons
  - 3.2.1.1. Définition des bétons de laitier
  - 3.2.1.2. Propriétés des bétons de laitier
    - 3.2.1.2.1. Caractéristiques mécaniques
    - 3.2.1.2.2. Rapport eau / ciment
    - 3.2.1.2.3. Retrait
    - 3.2.1.2.4. Comportement au feu
    - 3.2.1.2.5. Isolation phonique et thermique
    - 3.2.1.2.6. Durabilité
- 3.2.2. Constructions des assises de chaussées
- 3.3.3. Ballast pour voies ferrées
- 3.3.4. Autres utilisations

### **CONCLUSION**

## INTRODUCTION

Le laitier est un sous produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO<sub>2</sub>) et alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). L'élaboration du laitier peut conduire, selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques [1] :

- le **laitier vitrifié** (granulé) obtenu par refroidissement rapide par trempe
- le **laitier cristallisé** obtenu par refroidissement lent .

Ces deux formes minéralogiques sont fondamentalement différentes du point de vue cristallographique et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une **hydraulicité** latente.

Au contraire, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste.

Dans le cadre de notre étude, c'est à dire la valorisation du laitier de haut fourneau dans le domaine des ciments et des bétons, nous avons structuré ce chapitre en trois parties :

1. la première partie sera consacrée aux modes d'élaboration et de traitement du laitier
2. la deuxième partie traitera du laitier granulé, ses caractéristiques, sa réactivité, les modes d'activation et son utilisation, en particulier dans les ciments.
3. la troisième partie traitera du laitier cristallisé, de ses caractéristiques et son utilisation dans le béton.

## 1. FORMATION ET TRAITEMENT DU LAITIER

### 1.1. Formation du laitier

Dans le haut fourneau (figure 1), en plus du minerai de fer et du coke, on introduit un fondant, généralement à base de chaux, pour abaisser le point de fusion de la gangue et permettre ainsi au minerai de s'extraire à une température de 1400 à 1500 (°C). Les oxydes de la charge non transformés en métal constituent le laitier. Le laitier est évacué du haut fourneau à l'état liquide, à la température de fusion de la gangue, surnageant la fonte par différence de densité (figure 1).

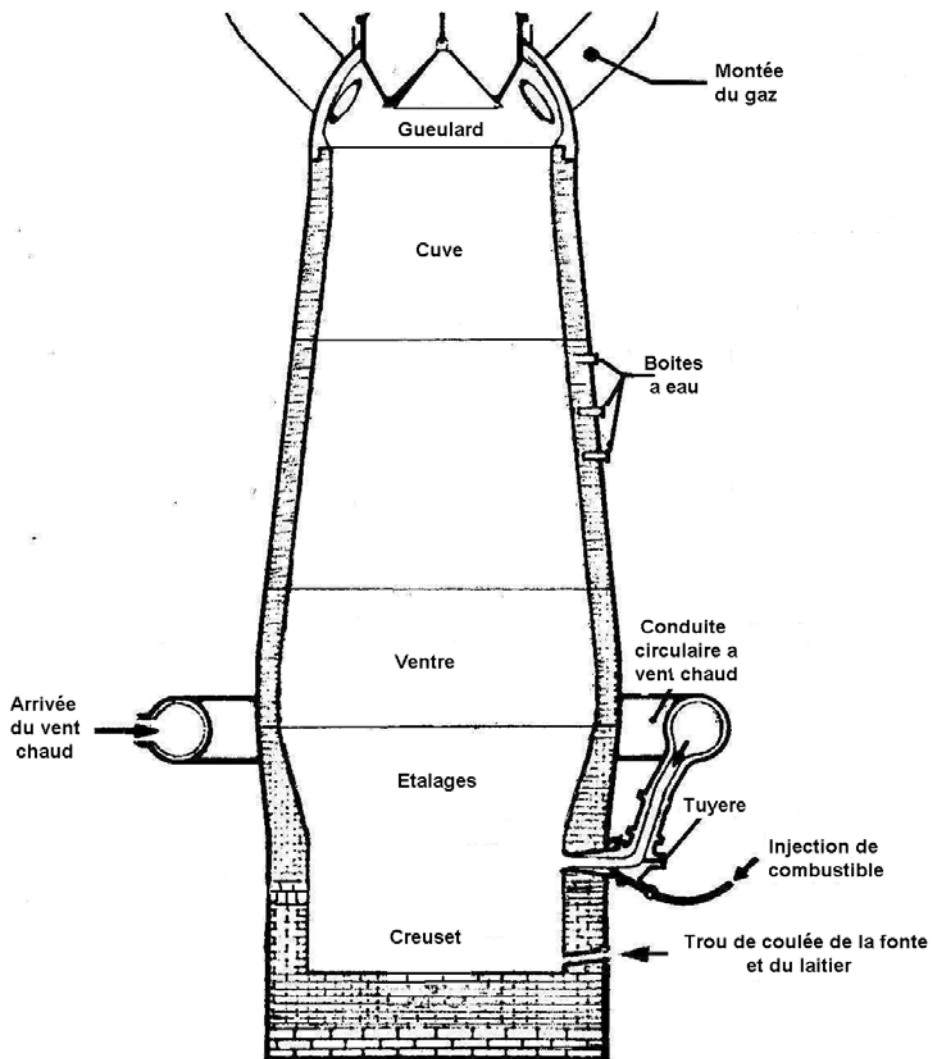


Figure 1 – Coupe schématique du haut fourneau

## 1.2. Traitement du laitier

Selon le produit et surtout la structure qu'on désire obtenir à partir du laitier fondu, on utilise le procédé de refroidissement correspondant.

### 1.2.1. Laitier granulé

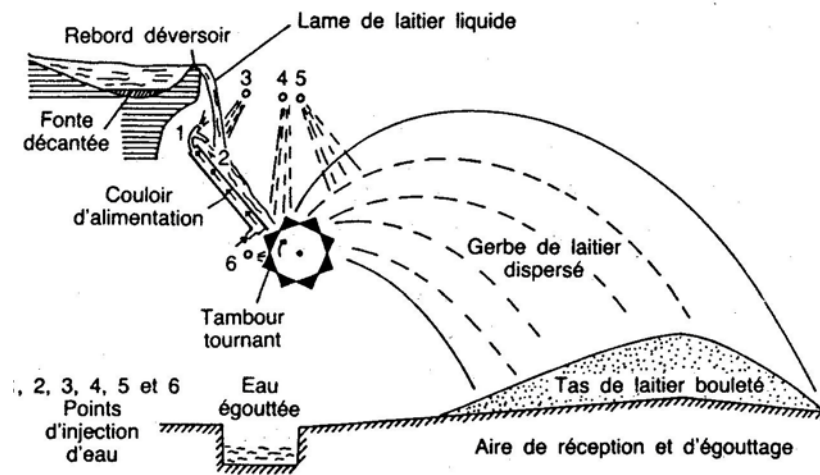
La granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation du laitier pour faciliter sa manutention. Elle se faisait très simplement en déversant le jet de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau [2]. On s'avisait ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du **laitier granulé** (figure 2) ainsi obtenu [1].



**Figure 2** – Laitier cristallisé et laitier vitrifié granulé de haut fourneau

### 1.2.2. Laitier bouleté

La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air (figure 3). Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses. C'est pendant cette trajectoire aérienne que la trempe a lieu. Le matériau s'égoutte ensuite naturellement



**Figure 3** – Schéma d'élaboration du laitier bouleté

### 1.2.3 Laitier cristallisé

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le matériau constitue un granulat pour la construction routière et pour la confection des bétons [1].

Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé. Après solidification de la surface, on active le refroidissement avec un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier. Le laitier refroidi est repris ensuite à la pelle mécanique de la même manière qu'en carrière. Le laitier cristallisé résultant d'un refroidissement lent est une roche artificielle qui peut être utilisée en l'état : c'est le laitier tout - venant ou concassé et calibré.

## **2. LE LAITIER GRANULE**

### **2.1. Caractéristiques**

#### **2.1.1. Composition chimique**

Le laitier de haut fourneau est avant tout un sous produit du processus d'élaboration de la fonte. Sa composition chimique est ajustée de façon à lui permettre :

- d'avoir une bonne fluidité à la température d'élaboration de la fonte.
- d'éliminer une bonne partie des éléments nuisibles à la marche du haut fourneau et à la qualité de la fonte.

La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et le procédé employé. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux (CaO) de 30 à 50 (%), la silice (SiO<sub>2</sub>) de 28 à 38 (%), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de 8 à 24 (%), le soufre (S) de 1 à 2.5 (%). Le tableau 1 récapitule les compositions chimiques du laitier dans quelques pays producteurs de fonte [1, 3 et 4].

La composition chimique est un paramètre déterminant de la réactivité des laitiers, qui induit d'ailleurs beaucoup d'autres paramètres. Ainsi le calcium, l'aluminium et le magnésium sont des éléments qui favorisent la vitrification des laitiers [5], et on sait que l'état vitreux est le plus actif chimiquement. D'autres travaux [6 et 7] ont montrés l'influence non négligeable des éléments mineurs tels que P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO, Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O sur l'évaluation de l'activité hydraulique des laitiers.

**Tableau 1 - Composition chimique du laitier en % [1, 3 et 4]**

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO <sub>2</sub>	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO <sub>3</sub> , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO <sub>2</sub>	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na <sub>2</sub> O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K <sub>2</sub> O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
<b>Total</b>	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

### 2.1.2. Composition minéralogique potentielle du laitier

La composition minéralogique potentielle des laitiers a été calculée [8] à partir des principaux oxydes (CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) par analyse chimique. Les phases cristallisées susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la méilélite qui est une solution solide de la gehlélite (C<sub>2</sub>AS) et de l'akermanite (C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>), la pseudowollastonite (CS), la rankinite (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>), la merwinite (C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub>), le silicate bicalcique (C<sub>2</sub>S), le diopside (CMS<sub>2</sub>), la montécélite (CMS) et la forstérite (MS<sub>2</sub>). Les résultats des calculs chimiques conduisent à conclure que les laitiers de haut fourneau utilisés en cimenterie sont potentiellement constitués de (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>AS et C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>) pour 95 % et de (CS ou C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S) pour 5 % [8].

### 2.1.3. Granulométrie

Le laitier granulé se présente sous forme d'un gros sable de granulométrie 0 /5 et de module de finesse voisin de 3.

### 2.1.4. Masses volumiques

La masse volumique apparente du laitier granulé peut varier de 900 à 1000 kg / m<sup>3</sup> et sa masse volumique absolue de 2800 à 3000 kg / m<sup>3</sup>.

## 2.2. Réactivité hydraulique du laitier granulé

### 2.2.1. But de la tempe

Le but de la tempe du laitier est d'empêcher la cristallisation, par figeage à la température ambiante, d'une configuration instantanée désordonnée du laitier, de structure vitreuse. Les laitiers vitreux présentent en diffraction des rayons X un halo large et diffus (figure 4). Ce halo est l'image du degré de l'ordre local qui existait dans le liquide et qui a été figé par la trempe. L'hydraulicité du laitier dépend dans de larges limites de sa structure [9].

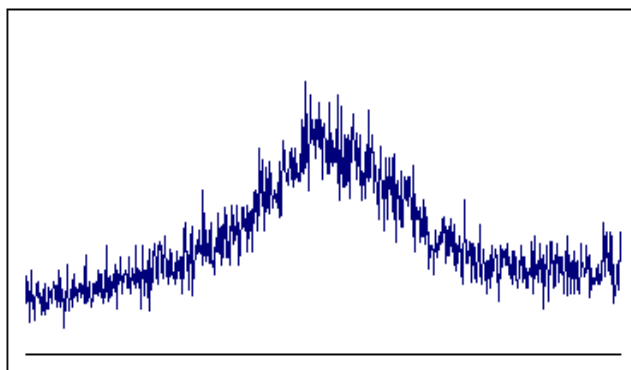


Figure 4 - Diffractogramme des rayons X d'un laitier vitrifié [10]

### 2.2.2. Taux de vitrification

Une analyse à la microsonde électronique des éléments Ca, Al, Si, et Mg révèle dans certains cas une distribution homogène d'un grain à l'autre et à l'intérieur de chaque grain. En fait, les laitiers totalement vitreux et de composition homogène sont rares [8]. Une vitrification parfaite n'est pas le critère d'une réactivité maximale [6]. Les cristaux de merwinite ( $C_3MS_2$ ) présents au taux de 0 à 5 (%) (figure 4) accroissent les résistances mécaniques, et au-delà de 5 % et jusqu'à 35 %, les baisses de résistances mécaniques sont de faibles amplitudes.

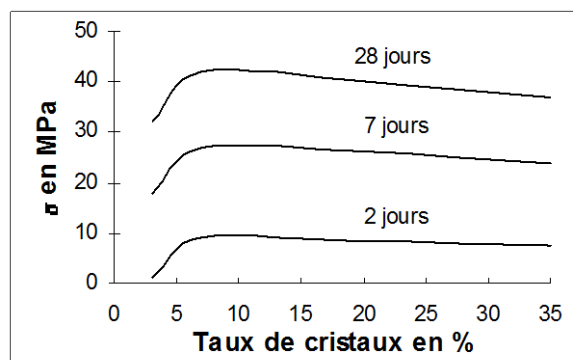


Figure 5- Influence du taux de cristallinité dans le laitier d'après DEMOULIAN et al. [6]

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) [11] montrent des zones hydratées plus larges autour des grains de laitier vitreux contenant en inclusions des cristaux de merwinite qu'autour des grains entièrement vitreux. En effet, on s'est aperçu que plusieurs types de défauts dans la structure engendraient une meilleure réactivité hydraulique. Ainsi les défauts de surface agissent comme centres privilégiés d'activité hydraulique [6].

### 2.2.3. Critères chimiques

On parle souvent de critères de réactivité hydraulique alors que l'appréciation est essentiellement faite à partir de critères chimiques et plus exactement d'indices de basicité. L'analyse chimique tente de relier les caractéristiques des produits anhydres à leur réactivité et par conséquent aux résistances mécaniques des ciments au laitier.

Les indices chimiques sont calculés à partir de la composition chimique du laitier et sont supposés être reliés à son activité hydraulique. De nombreux indices (Tableau 2) [1,6 et 12] ont été proposés par plusieurs auteurs, mais ils sont souvent contradictoires les uns avec les autres et pas toujours pertinents, notamment par rapport à l'objectif visé qui est de prédire la réactivité du laitier à partir de sa seule composition chimique. DEMOULIAN et al [6] et [13] ont passé en revue et testé de nombreux indices en cherchant ceux qui donnaient les meilleures corrélations avec les résistances mécaniques. Ils ont constaté que les indices  $I_8$ ,  $I_9$ ,  $I_6$ ,  $I_{10}$  et  $I_1$ , ont dans un ordre décroissant, les plus forts coefficients ( $r$ ) de corrélation:  $r$  varie de 0.91 à 0.85 pour les résistances à 2 jours, de 0.82 à 0.78 pour celles à 7 jours et de 0.84 à 0.76 pour 28 jours. Ce sont ces indices qui ont été retenus pour caractériser le laitier d'EL HADJAR.

**Tableau 2** - Inventaire des indices chimiques utilisés pour l'estimation des laitiers granulés de haut fourneau [1, 6 et 12]

<b>Formules</b>	
$I_1 = \frac{CaO}{SiO_2}, I_2 = \frac{CaO}{Al_2O_3}, I_3 = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$I_9 = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0.5 MgO - 2SiO_2$
$I_4 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}, I_5 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$	$I_{10} = \frac{CaO + MgO + 0.66Al_2O_3}{SiO_2 + 0.33Al_2O_3}$
$I_6 = \frac{CaO + 0.56Al_2O_3 + 1.4MgO}{SiO_2}$	$I_{11} = \frac{CaO + Al_2O_3 + 0.5MgO + CaS}{SiO_2 + MnO}$
$I_7 = \frac{CaO + 1.4Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + 0.33Al_2O_3}$	$I_{12} = \frac{CaO + 0.33Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + 0.66Al_2O_3}$
$I_8 = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2}$	$I_{13} = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + 10}$

Cependant, selon SMOLCYCK [7] et MANTEL [12], les modules chimiques de basicité ne sont pas très valables comme indices d'hydraulicité parce que l'alumine n'est pas considérée comme il le faudrait. Il s'en suit que l'appellation " Laitier acide " pour les laitiers à indice inférieur à 1 n'est pas une limite aux laitiers hydrauliques si la teneur en chaux plus faible est compensée par les teneurs en alumine ou magnésie.

#### 2.2.4. Test à la soude

Cette méthode, non normalisée, consiste à préparer des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm en mortier normal, l'eau étant remplacée par une solution constituée de 200g de soude concentrée et la partie liante étant composée de laitier granulé moulu, le rapport solution / laitier étant égal à 0,5. Les éprouvettes sont démoulées et testées en compression après 6 et 24 heures de durcissement. Les résistances mécaniques doivent être comprises respectivement entre 7 à 8 MPa après 6 h de durcissement et 12 à 15 MPa après 24 h [14].

L'essai accéléré à la soude n'est pratiqué qu'occasionnellement quand il n'est pas abandonné [1]. Si l'essai à la soude a le mérite de fournir des informations rapidement, le mode opératoire reste à préciser notamment la finesse du laitier et le rapport E / L imposé à 0.5 (mortier normal pour CPA) ce qui est trop fort pour le laitier car la consistance normale est inférieure à celle d'un CPA [15].

### 2.2.5. Influence du pH

Le pH est l'un des facteurs agissant sur les solubilités des principaux éléments (Ca, Si Al et Mg) du laitier qui participent à la formation des hydrates. La nature de ces derniers en dépend, car elle est fonction du rapport Ca / Si [16 - 19].

Un fort pH augmente les concentrations des ions aluminium et silicium et diminue celles des ions calcium et magnésium dans la solution interstitielle et active l'hydratation du laitier par la solubilisation de la mince enveloppe imperméable qui couvre la surface des grains de laitier [20].

Cependant le pH doit être supérieur à 11.5 pour activer l'hydratation du laitier. Pour un pH < 11.5 le laitier ne se dissout pas [21 – 22] et dans le cas d'une activation au clinker l'hydratation du silicate tricalcique est fortement ralentie [23].

### 2.2.6. Indice d'efficacité hydraulique h

Le pouvoir hydraulique est estimé conventionnellement à l'aide de l'indice d'efficacité hydraulique h (norme française NF P 18 – 506 [24]). Cet indice est défini par le rapport, à un âge donné, de la résistance à la compression d'un mortier dont la partie liante est composée en masse de 50 % de laitier et de 50 % de ciment portland témoin à celle obtenue au même âge sur mortier témoin à partir du même ciment. Le ciment témoin doit être un CPA 55 de teneur en C<sub>3</sub>A (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) comprise entre 6 et 10 % et de teneur maximale en SO<sub>3</sub> de 3 %. En fonction de la valeur numérique de h, on classe le laitier en trois catégories (h<sub>1</sub> à h<sub>3</sub>) de réactivité croissante (Tableau 3).

**Tableau 3** - Classification des indices d'efficacité hydraulique en fonction des résultats des essais mécaniques [24]

Indice	7 jours	28 jours
<b>h<sub>1</sub></b>	-	> 0.60
<b>h<sub>2</sub></b>	> 0.60	> 0.75
<b>h<sub>3</sub></b>	> 0.70	> 0.85

### 2.2.7. Autres facteurs influençant la réactivité du laitier granulé

L'activité hydraulique du laitier croit dans le même sens que celui des liaisons ioniques, mais jusqu'à une certaine limite qui correspond à la cristallisation des silicates. La réactivité des anhydres décroît dans l'ordre suivant : C<sub>2</sub>S > C<sub>2</sub>AS > C<sub>3</sub>S<sub>2</sub> > CS [25].

La composition minéralogique potentielle des laitiers vitrifiés, qui fait une distinction entre les structures en chaîne et les structures en doubles ou simples tétraèdres permettrait une appréciation de leur activité [26]. En effet, le silicium forme des tétraèdres plus ou moins polymérisés, mais la longueur des éléments de la structure n'est pas uniforme comme dans le cas d'une structure cristalline. La structure vitreuse dépend ainsi de la ramification de certains cations Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>1+</sup>, K<sup>1+</sup> et en particulier Al<sup>3+</sup> et Mg<sup>2+</sup> qui agissent pour partie comme formateurs et pour partie comme modificateurs de la structure. Les cations occupent les

cavités libres entre les tétraèdres [27] et l'on constate que plus leur part dans la structure est importante plus les groupes  $\text{Si}_x\text{O}_y$  sont isolés. Le verre devient alors d'autant plus instable et plus réactif chimiquement.

La réactivité semble être en relation directe avec la richesse du laitier en éléments structuraux silicatés basiques  $\text{SiO}^{3-}$ , donc avec la basicité, et avec celle des éléments alumineux  $\text{AlO}_2$  [28]. Les micro hétérogénéités et défauts superficiels modifient l'état énergétique du système et influencent favorablement l'hydratation [29].

### 2.2.8. Laitier granulé de crassier

Une étude [30] a été menée sur cinq laitiers, dont trois étaient stockés à l'air libre sous l'action des agents atmosphériques pendant dix ans et les deux autres de fraîche production, pour déterminer leur réactivité en vue d'un éventuel emploi dans les ciments.

Dans cette étude les paramètres de quantification de la réactivité étaient exprimés en terme de résistance mécanique en compression simple à 28 jours de durcissement sous l'eau à une température de 23 °C, sur des mélanges de clinker – laitier (de 0 à 60 %) – gypse broyés à une finesse Blaine de 4000 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ). L'auteur de cette étude conclut que pour des dosages en laitier de 30 à 50 (%), on note un gain de résistance de 10 à 15 (%) en faveur des laitiers de fraîche production. Par contre pour un dosage inférieur à 30 %, les résistances obtenues sont comparables.

### 2.3. Hydratation et activation du laitier granulé :

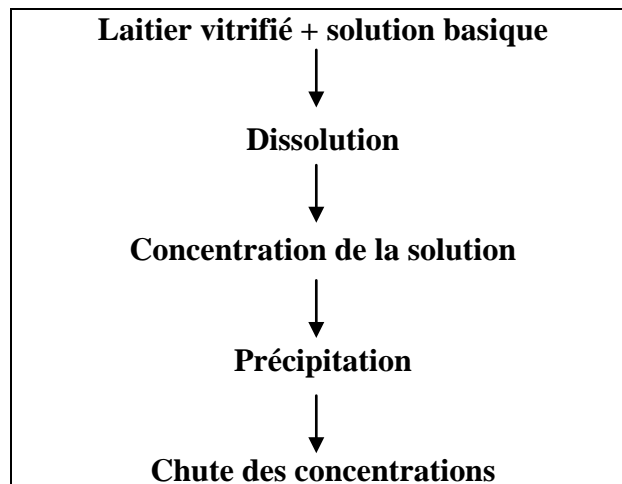
Contrairement au ciment, le laitier granulé ne développe pas de propriétés liantes dans l'eau à température ambiante, car la dissolution du laitier, même si elle est possible du point de vue thermodynamique, a une cinétique tellement lente que le système peut être considéré comme figé [31]. De ce fait peu d'études ont été consacrées à l'hydratation du laitier seul dans l'eau. On peut citer les travaux de DRON et BRIVOT [28], KONDO [32] et REGOURD et al.[33].

En étudiant un composé amorphe de la composition de la géhlénite ( $\text{C}_2\text{AS}$ ) en suspension liquide (Liquide/ Solide = 20), KONDO [32] montre que les concentrations en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont nulles. Seul le calcium est détecté en solution le premier jour. Il en déduit que les grains de laitier sont recouverts d'un film de 0.2  $\mu\text{m}$  d'épaisseur de composition proche de celle de  $\text{ASH}_6$ . L'analyse de l'évolution de la composition à la surface par spectroscopie de photo électrons X (XPS) [33] d'un laitier immergé dans l'eau au cours des deux premières heures montre que dès les premières minutes qui suivent son immersion, le rapport Ca / Si atomique de la surface passe de 1.2 à 0.8 et se stabilise à 0.8, ce qui signifie que la surface contient encore du calcium. En outre, REGOURD [33] et RICHARDSON [19] indiquent que la phase CSH dans les laitiers activés possède un rapport Ca / Si inférieur à celui observé dans les ciments portland.

De ces travaux on déduit que pratiquement seule la concentration en hydroxyde de calcium en solution augmente, ce qui diminue le rapport Ca / Si à la surface du laitier. Cependant, le pH de la solution reste inférieur à 9, ce qui ne permet pas la dissolution des silicates et aluminates du laitier. Dans ces conditions, on peut penser que les concentrations atteintes en solution correspondent à la solubilité du verre, ou au moins restent telles que la solution n'atteint pas la sursaturation nécessaire à la nucléation des hydrates [34].

L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution d'où résulte une précipitation des hydrates formés, conduisant à des résistances mécaniques se développant progressivement dans le temps au fur et à mesure que se poursuit le phénomène comme le montre la figure n°6 [1].

Le laitier n'est soluble que dans une solution alcaline et a donc besoin pour faire prise d'un agent appelé ACTIVANT [31].



**Figure 6 -** Prise du laitier vitrifié [1]

La nécessité d'un agent basique ou d'un activant pour déclencher la prise résulte selon DRON [35] du fait que l'hydratation est provoquée par la succession de deux phénomènes ou la chaux intervient:

- Le premier est le passage en solution dans l'eau interstitielle des éléments aluminium, silicium et calcium. Cette solubilisation intervient par les sites aluminium et l'attaque a lieu par les ions  $\text{OH}^-$  de la solution. Elle devient notable à partir de  $\text{pH} = 12$  ( $\text{pH} > 11.5$ ).
- Le second est la cristallisation à partir de la phase aqueuse, de composés hydratés dont la composition globale est plus riche en chaux que ne l'est le laitier. Un apport en calcium est donc nécessaire [1].

L'activant a un double rôle, il doit:

- Répondre à une condition de pH: apport de chaux, suffisant pour saturer la solution aqueuse et atteindre le pH correspondant, de 12 à 13 en général [36].
- Contribuer à la formation d'hydrates: l'activant ne se limite pas à un seul rôle catalytique d'alcalinisation de l'eau interstitielle mais participe aux réactions de formation des hydrates par lesquelles il est consommé.

Les procédés d'activation sont pluriels : chimique, mécanique et thermique. Dans tous les cas le produit d'hydratation est le même : c'est le CSH

### 2.3.1. Activation chimique

L'activation chimique du laitier, c'est le maintien du laitier dans un milieu à pH suffisamment élevé par addition de substances permettant de répondre à cette condition en apportant une quantité de chaux au moins égale à celle que nécessite la saturation de la solution interstitielle en chaux pour atteindre un pH de 12 à 13.

Les trois principaux modes d'activation sont selon [1]

- a - Activation alcaline (sodique ou calcique),
- b - Activation sulfatique
- c- Activation sulfato-calcique

#### 2.3.1.1. Activation alcaline (sodique ou calcique) :

Lors d'une activation alcaline, il s'agit de créer une solution fortement basique (pH >12.6), afin de permettre le passage en solution des composants de laitier qui vont pouvoir par la suite former des produits d'hydratation [35].

D'après CHAPELLE [36], dans le cas d'une activation par la soude, l'activant n'est en fait qu'un catalyseur qui ne réagit pas avec les constituants du laitier. Il se forme dans ce cas trois hydrates : les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminates de calcium hydratés ( $C_4AH_{13}$ ) et la géhlénite hydratée ( $C_2ASH_8$ ) [1 et 12].

Dans le cas d'une activation du laitier par la chaux, il existe d'après DRON et CHAPELLE [35 et 36] une phase initiale où le pH de la solution est alors celui d'une solution saturée en chaux (environ 12.6). C'est largement suffisant pour solubiliser la silice et l'alumine du laitier, favorisant ainsi la formation des CSH qui précipitent en premier. Au fur et à mesure que la silice est consommée, la concentration de l'alumine dans la solution augmente jusqu'à sa cristallisation. On retrouve finalement comme hydrates les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminates de calcium hydratés ( $C_4AH_{13}$ ) et la portlandite.

#### 2.3.1.2. Activation sulfatique :

L'activation sulfatique s'écarte davantage de l'action strictement catalytique. Il s'agit d'un véritable réactif puisque le sulfate de calcium se combine avec les éléments du laitier solubilisés. Dans ce cas, les produits d'hydratation sont essentiellement les silicates de calcium hydratés (CSH), l'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$ , et l'ettringite ( $3.CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32.H_2O$ ) [37] et [38].

Pour que cette activation puisse avoir lieu, il est nécessaire de se retrouver à un pH de 11 – 11.5. Il y a alors formation d'ettringite primaire, et il faut éviter de se retrouver à un pH trop élevé sinon la réaction de cristallisation ne peut plus se produire suivant un processus normal : la cristallisation est trop rapide et il y a risque de formation d'ettringite secondaire. REGOURD [14] précise que cette activation est lente et qu'elle peut être obtenue avec les sulfates suivants : anhydrite, hemihydrate, gypse et phosphogypse.

### **2.3.1.3. Activation sulfo-calcique**

Dans le cas d'une activation sulfo-calcique, la formation d'aluminat de calcium hydraté ( $C_4AH_{13}$ ) ou d'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$  est remplacée par celle d'ettringite ( $3.CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32.H_2O$ ) [1 et 14].

### **2.3.1.4. Autres modes d'activation chimique**

L'activation du laitier peut être obtenue également par le silicate de soude ( $SiO_2Na_2O$ ), le carbonate de sodium, le sulfate de sodium  $Na_2SO_4$ , et le chlorure de calcium  $CaCl_2$  [39 - 43].

L'activation du laitier par le  $CaCl_2$  à 2 % peut parfois donner de meilleurs résultats que 30 % de clinker [44].

Dans les ciments au laitier de type CPJ (normes algériennes) ou de type CEM II (normes européennes), l'activant principal est le clinker. Des recherches ont pu mettre en évidence les couplages chimiques entre le clinker et le laitier, qui se dissolvent simultanément mais à des vitesses différentes [45].

L'influence réciproque du laitier sur le clinker a été étudiée dans les ciments contenant 80 % de laitier. Le clinker active le laitier mais les résistances mécaniques à 1 jour sont davantage fonction de la qualité du laitier que de la nature du clinker. A 28 jours, la composition du clinker est prépondérante, et les meilleures performances sont obtenues avec les clinkers riches en  $C_3S$  et  $C_3A$  tétragonne [5].

### **2.3.2. Activation mécanique**

La finesse de broyage du laitier intervient dans son couplage avec le clinker [5] et joue un rôle très important dans l'évolution des résistances mécaniques, aussi bien à court terme qu'à long terme. Les ciments au laitier peuvent être activés mécano – chimiquement dans un broyeur à jet qui détruit le squelette du réseau silicaté et active les ions oxygènes [5].

### **2.3.3. Activation thermique**

L'observation au MEB (microscope électronique à balayage) a mis en évidence des différences significatives des structures hydratées des ciments peu ou pas réactifs à 20 °C, lorsque ces mêmes ciments subissent un traitement thermique à 80 °C [46].

Il est ainsi possible de comprendre qu'un laitier peu réactif à la température ordinaire donne de bonnes résistances lorsqu'il est traité par la chaleur, car les hydrates formés ont un aspect normal alors que ce même traitement à la température appliqué à des laitiers très actifs à la température ordinaire engendre une structure d'hydrates peu favorable à la cohésion du mortier avec des amas de mono - sulfo – aluminates [46- 47].

L'étuvage exerce un effet favorable sur la compacité des ciments au laitier ce qui leur confère une grande résistance au gel et rend possible l'emploi des adjuvants plastifiants et entraîneurs d'air [48]. Les ciments à haute teneur en laitier se caractérisent par des CSH de structure dense et homogène avec absence d'ettringite. Les sulfates sont piégés dans les gels de CSH sous forme de solution solide, lorsque ces ciments subissent un étuvage [49].

## 2.4. Utilisation du laitier granulé

### 2.4.1. Dans les ciments

Dés le début du siècle, VICAT [50] avait entrevu le pouvoir hydraulique du laitier et pensé à l'utiliser pour en faire du ciment. Aussi dès que la forme trempée exista, la sidérurgie allemande développa ses propres fabrications de liants hydrauliques constitués d'un mélange de chaux et de laitier granulé moulu, conformément à la découverte de LANGEN [51].

PRUSSING [52] introduit à partir de 1882 le laitier granulé en cimenterie non sidérurgique ; le laitier est mélangé au clinker en toutes proportions de 5 à 90 (%), donnant toute la gamme des ciments au laitier aujourd'hui normalisée.

C'est en 1890 que fut produit les premiers ciments au laitier en France. En Algérie, l'emploi du laitier en cimenterie est très récent et remonte aux années 1980, la fabrication de ciment type CPJ résultant d'un broyage simultané de clinker (70 à 80)%, de laitier granulé (15 à 25%) et de gypse naturel (5%) [1].

#### 2.4.1.1. Les constituants des ciments au laitier

Le ciment résulte d'un mélange de composants et peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur dosage comme le définit la norme algérienne NA 442 [53].

##### 2.4.1.1.1. Les constituants principaux

Les constituants principaux du ciment sont nombreux et peuvent être d'origine artificielle tel que le **clinker** et le **laitier de haut fourneau** ou naturelle tel que les pouzzolanes naturelles et les calcaires. Dans notre étude, nous allons nous intéresser uniquement au clinker et au laitier comme constituants principaux du ciment.

#### a - Le clinker

résulte à l'origine du mélange de deux matières premières: le calcaire (80 % environ) et l'argile (20 % environ). Ces matériaux sont transformés en poudre fine, mélangés et homogénéisés avant d'être cuits dans un four rotatif à une température de l'ordre de 1450 °C pour donner ce qu'on appelle le clinker. Le clinker doit être constitué d'au moins 2/3 de silicates de calcium  $[(CaO)_3.SiO_2]$  et  $[(CaO)_2.SiO_2]$ , la partie restante contenant de l'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ), de l'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ) et d'autres oxydes. Le rapport en masse (CaO /  $SiO_2$ ) doit être supérieur à 2.0. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5.0 % [NF P 15- 301] [54].

#### b - Le laitier granulé :

Le laitier granulé de haut fourneau, sous produit de l'élaboration de la fonte, est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue à la sortie du haut fourneau. Le laitier granulé est un matériau hydraulique latent, s'il est utilisé en qualité de constituant principal (sa proportion est supérieur à 5 % en masse dans le ciment). Il doit contenir au moins 2/3 en masse de laitier vitreux et il doit être constitué d'au moins 2/3 en masse de la somme de CaO,  $SiO_2$  et MgO, le restant étant  $Al_2O_3$  avec en outre de faibles quantités d'autres oxydes. Le rapport en masse (CaO + MgO) /  $SiO_2$  doit dépasser 1.0 [NF P 15- 301] [54]. Le laitier vitrifié par trempe intervient comme constituant dans la fabrication de nombreux ciments.

### 2.4.1.1.2. Les Constituants secondaires du ciment

Les constituants secondaires sont introduits dans une proportion qui n'excède pas 5 % en masse. Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de réguler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse dihydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre  $\text{CaSO}_4$ ) ou tout mélange de ceux-ci.

### 2.4.1.1.3. Rappel de la norme algérienne NA – 442 [53]

La norme algérienne N.A 442 relative aux liants hydrauliques divise les ciments en catégories, selon la quantité et la nature des constituants (tableau 4) et en classes et sous classes selon les résistances (Tableau 5 et 6) :

**Tableau 4 - Catégories de ciment**

Types de Ciments	Désignation	Constituants en %			
		Clinker	Laitier	Cendres	Fillers
Ciment Portland	CPA	$\geq 97$	-	-	$\leq 3$
	CPJ	$\geq 65$	$\leq (97 - 40)$		-
Ciment de Haut fourneau	CHF	(25 – 60)	(40 – 75)	-	$\leq 3$
Ciment de Laitier au Clinker	CLK	$\leq 20$	$\geq 80$		$\leq 3$
Ciment de Laitier aux Cendres	CLC	(25 – 60)	(20 – 45)	(20 – 45)	$\leq 3$

**Tableau 5 - Classes de résistance**

Désignation		Résistance à la compression en MPa		
Classes	Sous Classes	2 jours	28 jours	
		Limite inférieur	Limite inférieur	Limite supérieur
35	-	-	25	45
45	-	-	35	55
	R*	15	35	55
55	-	-	45	65
	R*	22.5	45	65
HP	-	-	55	-
	R*	27	55	-

**Tableau 6 - Valeurs minimales garanties des résistances à la compression]**

Résistance à la compression en MPa			
Classes	2 jours	7 jours	28 jours
35	-	10	25
45	-	17.5	25
45 R	12	-	35
55	10	-	45
55 R	17	-	45
HP	15	-	55
HP R	22	-	55

## 2.4.1.2. Principales caractéristiques des ciments au laitier

### 2.4.1.2.1 Masse volumique

La masse volumique réelle d'un ciment dépend de sa composition : elle varie de 3050 à 3200 kg/m<sup>3</sup> pour les ciments portland sans addition, de 2950 à 3050 kg/m<sup>3</sup> pour les ciments au laitier, la masse volumique réelle du laitier broyé variant de 2800 à 2900 kg/m<sup>3</sup> [1].

La masse volumique apparente du ciment varie en général de 800 à 1200 kg/m<sup>3</sup>. On compte en moyenne 1100 kg/m<sup>3</sup> pour un ciment en vrac non tassé

### 2.4.1.2.2 Chaleur d'hydratation

La prise du ciment est caractérisée par un échauffement de la pâte. La quantité de chaleur dégagée renseigne sur la vitesse et le degré d'hydratation. Les ciments de haut fourneau et les ciments de laitier au clinker présentent une chaleur d'hydratation faible. Avec un CPA 55, le flux de chaleur maximal (calorimétrie adiabatique) sur mortier normalisé dépasse 40 J/g.h, 7 à 8 heures après le gâchage. Avec un CPJ 45, ce même flux maximal ne dépasse pas 15 J/g.h vers 10 heures d'hydratation et avec un CLK 45 on descend à 10 J/g.h au bout d'un jour environ [55]. Les chaleurs d'hydratation mesurées par la méthode du calorimètre de LANGAVANT après sept jours sont données au tableau 7 [1].

**Tableau 7 - Chaleur d'hydratation des ciments à 7 jours [1]**

Type de ciment	Quantité de chaleur en Joule / g
Ciment alumineux	500 – 630
Ciment portland artificiel de classe élevée (CPA)	360 – 420
Ciment portland artificiel (CPA) ordinaire et ciment portland composé (CPJ)	250 – 360
Ciment de haut fourneau (CHF) et ciment de laitier au clinker (CLK)	190 – 260
Ciment prompt	170 – 210

### 2.4.1.2.3. Le retrait

Le retrait du ciment est la diminution du volume apparent de l'éprouvette de pâte pure ou de mortier. L'hydratation du ciment et les échanges d'eau avec l'atmosphère provoquent sur les mortiers et les bétons, indépendamment de toute sollicitation mécanique externe, des déformations de retrait. On peut attribuer le retrait à trois phénomènes :

- Le retrait thermique : la réaction d'hydratation du ciment est exothermique, ce qui conduit à l'élévation de la température. Cependant des gradients de contraintes se développent pendant le refroidissement et en particulier pour les pièces épaisses, ou la différence de température entre le noyau et la peau est importante.

- Le retrait chimique : le retrait ainsi causé résulte d'une auto - dessiccation de la pâte de ciment due à la poursuite de l'hydratation, sachant que le volume des hydrates est inférieur à la somme du volume d'eau et des anhydres. Il est appelé également retrait endogène.

- Le retrait hydrique : le séchage naturel entraîne des variations dimensionnelles considérables de la pâte du ciment durci. Ce retrait est appelé retrait de dessiccation.

Le retrait dépend de plusieurs facteurs notamment la nature du ciment, la nature et la proportion et des additions.

La norme NA 442 [53] impose les valeurs limites mesurées sur mortier à 28 jours de:

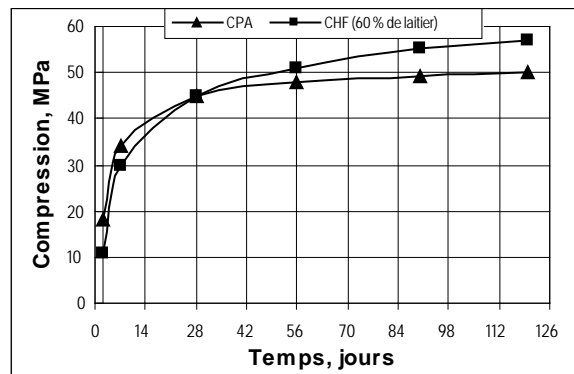
800  $\mu\text{m} / \text{m}$  pour les ciments portland CPA – CEM I et CPJ – CEM II de la classe 32.5.  
1000  $\mu\text{m} / \text{m}$  pour des types de ciment identiques mais des classes 32.5 R – 42.5 et 42.5 R.

Les nouvelles normes européennes n'imposent plus de limite pour le retrait.

#### 2.4.1.2.4. Prise et durcissement des ciments au laitier

Les ciments à forte teneur en laitier type CHF et CLK ont des temps de prise plus longs que ceux des ciments portland sans addition, surtout par temps froid. La cinétique de prise et de durcissement des ciments au laitier est en effet bien différente de celle des ciments portland. Si les résistances mécaniques à 28 jours sont équivalentes, les résistances aux jeunes âges (2 jours) des ciments à forte teneur en laitier sont inférieures. Mais au-delà de 28 jours, la pente des courbes de résistance mécanique obtenue à long terme peut être sensiblement supérieure pour les ciments au laitier.

Les courbes des résistances mécaniques respectives de ciment à forte teneur en laitier (CHF) et de ciment portland montrent que le premier a une évolution plus lente et plus progressive (figure 7). Les courbes se croisent à 28 jours à 20°C, voire plus tard si la température est plus basse [27].



**Figure 7** - Cinétiques comparées de durcissement d'un CHF (1) avec 60 % de laitier et d'un CPA (2), d'après HG SMOLZCYK [27]

#### 2.4.1.2.5. Hydratation des ciments au laitier

L'hydratation du ciment au laitier est aussi complexe que celle du ciment portland. En effet au cours de l'hydratation du ciment au laitier, il existe des périodes caractéristiques, où laitier et aluminates réagissent simultanément, mais à des vitesses différentes [45]. Le mode d'hydratation du ciment au laitier est donc le même que celui du CPA [45] et [56]. Ce

comportement est lié à l'existence de phénomènes de couplage chimique et thermique des cinétiques des réactions d'hydratation [45].

Les mécanismes réactionnels sont essentiellement du type dissolution – cristallisation [38], selon l'hypothèse formulé dès 1887 par LE CHATELIER [57]. Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'étude et la compréhension de la cinétique d'hydratation des ciments au laitier, notamment la mesure de l'évolution de la composition ionique de la solution [56], la conductimétrie calorimétrique [58], la diffraction des rayons X, l'analyse thermique différentielle et les observations au MEB [56]. En présence du clinker, le laitier granulé manifeste des propriétés hydrauliques dès les premiers instants de l'hydratation.

L'hydratation du clinker se caractérise principalement par la dissolution de l'alite qui libère l'hydroxyde de calcium, après formation de nouvelles phases hydratées. Le passage de la chaux en solution par la libération des cations de calcium  $\text{Ca}^{2+}$  accélère l'hydratation du laitier par la dissolution du film acide qui s'est constitué autour des grains de laitier et permet la continuité des réactions d'hydratation. La consommation de la chaux par le laitier augmente la vitesse de dissolution de l'alite du clinker, ce qui conduit en général à une sous saturation et une consommation de la portlandite dans l'étape finale [45]. Ainsi le clinker agit sur la vitesse de dissolution du laitier et le laitier accélère la vitesse d'hydratation de l'alite.

La teneur en chaux dans la solution diminue d'autant plus vite que la finesse du laitier augmente de façon significative, de même que la teneur en  $\text{S}^{2-}$ . En effet le soufre disparaît au fur et à mesure de sa dissolution, pour être fixé dans les nouvelles phases hydratées insolubles de type sulfoaluminate sous forme de solution solide.

La présence de sulfures dans le laitier et leur diminution dans la solution s'accompagne de la précipitation d'un composé de couleur verdâtre dont l'examen aux rayons X a montré qu'il était proche du  $\text{C}_4\text{A}\cdot\text{H}_8$  [45]. Parmi les produits d'hydratation des ciments au laitier on peut citer le silicate de calcium hydraté (CSH), l'aluminate de calcium hydraté ( $\text{C}_x\text{A}\cdot\text{H}_y$ ), l'alumino – silicate de calcium hydraté (CASH), l'aluminate de magnésium hydraté (MAH), l'ettringite et la géhlénite hydratée ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) [59] et [60]. Cependant les hydrates clairement identifiés sont : les hydrosilicates de calcium ( $\text{C}_x\text{A}\cdot\text{H}_y$ ) contenant une partie de l'alumine dans une solution solide, l'hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  sous forme de solution solide dans les CSH, car on ne l'a pas détecté dans les ciments au laitier [61], éventuellement l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour les ciments au laitier durcissant dans les conditions normales, l'aluminate tétra calcique hydraté ou sous forme de solution solide  $3\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , et l'ettringite  $3\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$  [62].

L'existence relative entre le tri et le mono sulfo aluminate de calcium hydraté qui se forme à un stade précoce de l'hydratation, dépend de la vélocité de la réaction de l'alumine et de la quantité de gypse dans la solution. Cependant la formation du mono sulfo aluminate de calcium hydraté est favorisée [62].

La présence de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  varie en fonction du clinker, de la quantité de laitier ajoutée, des conditions de durcissement et de l'âge des éprouvettes, car des analyses aux rayons X ont confirmées l'absence de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à un stade reculé de l'hydratation [62]. On rencontre quelquefois la géhlénite hydratée ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) [63 - 64], qui se transforme après consommation de beaucoup de chaux, au bout d'une année de conservation dans l'eau, sous forme de ( $\text{C}_3\text{ASH}_4$ ) [34] et [65]. On peut rencontrer également dans les ciments au laitier, mais en faibles quantités, les hydrates suivants :  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_4$  et plus rarement encore,  $\text{C}_2\text{AH}_8$ .

L'addition au ciment portland d'ajout tel que le laitier granulé de haut fourneau ne change pas la nature des produits d'hydratation responsables de la prise et du durcissement et du point de vue qualitatif, les produits d'hydratation sont identiques. Du point de vue

quantitatif, les produits d'hydratation diffèrent par leurs proportions respectives, la cinétique d'hydratation étant très différente, selon qu'il s'agit de clinker ou de laitier.

La texture de la masse hydratée présente des aspects très variables. L'hydrosilicate de calcium hydraté (CSH) est d'autant moins cristallisé qu'il se forme rapidement. C'est ainsi que l'hydratation du silicate tricalcique ( $C_3S$ ) donne naissance à des CSH pratiquement amorphe par suite d'une précipitation avec l'hydroxyde de calcium et le taux d'hydratation à une échéance donnée dépend de la réactivité des constituants de base. [60].

#### **2.4.1.2.6. Résistance chimique des ciments au laitier**

L'addition du laitier au ciment réduit les perméabilités et les coefficients de diffusion. Ainsi, avec la substitution d'au moins 50 % de clinker par le laitier et pour un même rapport eau / liant, on observe une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre de 10 par rapport au CPA [66].

Le béton de ciment au laitier présente une résistance élevée à la diffusion des chlorures et des alcalis, la richesse en laitier du ciment ayant plus d'importance dans ce domaine que le rapport E / C du béton.

L'imperméabilité croît avec la teneur en laitier dans le ciment. La pâte de ciment de laitier développe beaucoup plus de CSH micro – poreux et une porosité capillaire plus faible que celle de la pâte de ciment portland artificiel. En effet, on observe une diminution simultanée du nombre des pores capillaires (rayon  $< 300\text{Å}$ ) et de la dimension moyenne des pores, d'où il résulte une diminution globale de la porosité capillaire de 25 à 30 % [1].

Certains auteurs rapportent que les ciments au laitier fixent une plus grande quantité de chlorures que le CPA [4] et [56]. Cette plus grande capacité de fixation de chlorures serait due à la forte adsorption sur les pores des ciments hydratés. Ainsi, l'influence bénéfique de l'ajout de laitier sur la diminution de la vitesse de corrosion est confirmée [59] et [62].

Corrélativement, on constate que les ciments sont d'autant plus résistants à l'attaque par les eaux douces qu'ils sont moins riches en calcium et ont une plus grande stabilité chimique. C'est le cas des ciments avec additions minérales (laitiers, cendres volantes, etc...) dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des CSH de rapport CaO /SiO<sub>2</sub> faible.

De façon générale, beaucoup d'auteurs ([67] et [68]) indiquent que les ajouts de laitier dans le béton accroissent de façon significative la carbonatation par rapport à un béton de CPA. L'effet d'une cure humide prolongée est particulièrement bénéfique lorsque les ciments contiennent un fort pourcentage de laitier (> 50 %).

#### **2.4.1.2.7. Emplois des ciments au laitier [69]**

La réalisation d'un ouvrage nécessite l'emploi de matériaux adaptés aux contraintes auxquelles il est soumis et à la nature de l'environnement dans lequel il est situé. Ces données conduisent à privilégier certains ciments et rejeter d'autres dont l'emploi pourrait entraîner des désordres à plus ou moins long terme. Le choix du ciment est très important dans la confection d'un béton.

Les principales utilisations des ciments portland composés (CPJ, CEM II), en fonction de la classe de résistance dans un ordre croissant, sont les suivantes :

- Béton courant, armé ou non armé.
- Tous travaux de génie civil et de maçonnerie.
- Travaux routiers, travaux de bétonnage en grande masse.
- Préfabrication avec ou sans traitement thermique.

- Béton prêt à l'emploi, béton projeté.
- Béton précontraint.
- Béton à très haute résistance mécanique, résistance au gel et imperméable.

Les ciments composés CPJ (CEM II) représentent les ciments les plus utilisés en France pour les cas courants de construction.

Les ciments de haut fourneau (CHF, CEM III/A et B) et ciments de laitier au clinker (CLK, CEM III/C) sont utilisés pour :

- Bétonnage en milieu humide
- Construction d'ouvrages à la mer.
- Construction en milieu agressif.
- Construction d'ouvrages souterrains.
- Construction d'ouvrages massifs.
- Construction de fondations profondes et traitement des sols.

Comme pour tous les types de ciments, il est nécessaire de prendre les mesures d'usage contre la dessiccation pendant le durcissement, notamment pour les travaux en plein air ou pour les ouvrages à faible épaisseur. Des précautions particulières doivent aussi être prises dès que la température ambiante descend au dessous de 5°C. Les résistances mécaniques de ces ciments continuent de croître de façon significative au delà de 28 jours. Ces ciments peuvent contenir des chlorures en faibles quantités. La quantité de chlorure liée est plus élevée dans les ciments composés au laitier ou aux cendres volantes que dans les ciments portland. Cette grande capacité de fixation serait due à la forte adsorption des chlorures sur les pores du ciment hydraté [70].

Les CLK, CEM III / C sont particulièrement résistants aux milieux agressifs, ce qui permet leur utilisation dans les domaines suivants :

- Travaux souterrains en présence d'eaux à haute teneur en sulfates.
- Murs de soutènement.
- Construction d'égouts.
- Ouvrages au contact avec l'eau de mer, eaux pures et eaux industrielles.

#### **2.4.2. Dans le béton [1]**

Le laitier granulé peut intervenir comme constituant dans la composition des bétons hydrauliques. Il peut être ainsi utilisé dans les bétons classiques comme sable actif de part son caractère hydraulique, soit à l'état brut, soit sous forme de laitier pré broyé. Il peut également être moulu et incorporé dans le béton comme filer actif .

L'incorporation du laitier granulé brut dans un béton classique de granulats naturels, en remplacement de tout ou partie du sable, se traduit par une augmentation des résistances mécaniques (à dosage en ciment constant). Le malaxage et la mise en œuvre provoquent l'attrition des fines hydrauliques dont l'action vient se cumuler avec celle de la liaison pâte de ciment – sable de laitier granulé (les deux produits sont hydrauliques et présentent une affinité réciproque). Par contre, la rhéologie des mélanges peut se trouver affectée, le béton devenant rêche et perdant sa maniabilité, à dosage en eau constant.

Pour améliorer la rhéologie des mélanges, on introduit des ajouts, telles les cendres volantes qui non seulement améliorent la rhéologie de ces bétons mais ont de surcroît des propriétés pouzzolaniques. Elles lubrifient les mélanges et augmentent leur compacité par remplissage des vides. L'amélioration de la maniabilité peut aussi être assurée par une charge inerte tel qu'un filler naturel, le plus souvent du calcaire. Indépendamment de son action sur l'ouvrabilité (onctuosité du produit, plastifiant rétenteur d'eau), la chaux grasse jouera un rôle d'activation du laitier.

L'emploi des adjuvants améliore la rhéologie des bétons de laitier granulé, mais peut répondre à d'autres critères (réduction du dosage en eau à maniabilité constante, soit une augmentation de la résistance mécanique à dosage en ciment constant).

### **2.4.3. Dans les briques de laitier**

Le procédé mis en place par LURMANN [71] consistait à mélanger 85 % de laitier granulé avec 15 % de chaux éteinte et 20 % d'eau, et à mouler le mélange à la presse. Les briques étaient mises à durcir à l'air libre pendant 6 à 8 semaines. Le durcissement à la vapeur constitue la dernière évolution de la fabrication des briques de laitier. Le procédé consistait à mélanger du laitier granulé et de la chaux éteinte, le mélange étant broyé avant d'être pressé et durcissant en autoclave à vapeur sous une pression de 0.8 à 1 MPa pendant 8 heures [1].

### **2.4.4. Dans la construction d'assises de chaussées**

C'est vers 1958 que naquit l'idée d'utiliser en corps de chaussée les mélanges à trois constituants que l'on allait appeler grave - laitier à partir de 1965. Ces mélanges comportent des granulats de laitier cristallisé éventuellement liés par le sable de laitier granulé, dont la prise est accélérée par de faibles pourcentages d'activant basique [1].

### **2.4.5. Dans divers autres domaines**

- Comme matière première dans la fabrication du verre.
- Soit comme matière première dans la fabrication de la céramique soit sous forme de matériau fondu à haute température puis refroidi et traité thermiquement pour donner naissance à de la vitro céramique.
- Comme dégraissant des argiles pour les terres cuites.

## **3. LE LAITIER CRISTALLISÉ**

### **3.1. Caractéristiques :**

#### **3.1.1. Composition chimique**

Le laitier cristallisé, lorsqu'il est refroidi lentement en couche épaisse, présente une texture poreuse essentiellement due à une libération de soufre en cours de refroidissement. La réaction serait limitée par la quantité de sulfure et le potentiel d'oxygénation de laitier. Les laitiers les plus désulfurants donc les plus basiques et les plus chauds provoquent des réactions soufre / oxygène plus énergiques avec une tendance à une plus grande porosité.

On peut considérer le laitier cristallisé, pour 95 à 98 (%) de sa composition, comme le mélange de quatre oxydes  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$ , le complément étant constitué par des oxydes secondaires  $\text{FeO}$  et  $\text{MnO}$  et des composés sulfurés [1]. Le laitier cristallisé par refroidissement lent à l'air a atteint son degré de stabilité maximal. L'analyse aux rayons X

donne un diffractogramme (figure n°8) comportant un petit dôme de phase amorphe et les raies des phases cristallines.

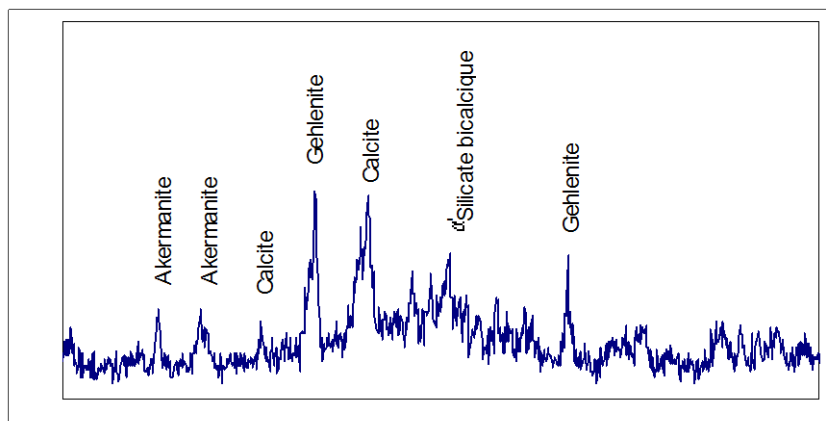


Figure 8 - Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé [9]

### 3.1.2. Composition minéralogique

Le laitier cristallisé est composé de constituants cristallisés, essentiellement des silicates et des silicoaluminates de chaux, mais aussi des sulfures et exceptionnellement des nitrures.

R. W. NURSE, cité dans [72], indique dans le diagramme quaternaire CaO – MgO – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, un certain nombre de compositions minéralogiques probables indiquées dans le tableau n° 8. On remarque que le nombre de composés entre les quatre oxydes de base est généralement de quatre mais il convient de préciser que la présence d'oxydes secondaires et de soufre est susceptible de modifier dans la pratique ces compositions théoriques.

Le tableau n°9 indique les composés susceptibles d'être rencontrés dans le laitier cristallisé d'après ALEXANDRE et al. [1].

Tableau 8- Produits de cristallisation finale dans le système CaO + MgO + SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 100% d'après R.W. NURSE [72]

C <sub>2</sub> AS	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>								
C <sub>2</sub> AS	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S			C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>							
C <sub>2</sub> AS	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>				C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>	M						
C <sub>2</sub> AS	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>					A			CAS <sub>2</sub>			
C <sub>2</sub> AS	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>		CS			M			CAS <sub>2</sub>			
C <sub>2</sub> AS	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>		CS	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>		A						
	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>		CS				CMS <sub>2</sub>		CAS <sub>2</sub>			
	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>						CMS <sub>2</sub>		CAS <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> S		
	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>					M			CAS <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> S		
	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>				C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>	M						
	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>					A						
						A						
					C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>	M						
						A	CMS <sub>2</sub>	CMS	CAS <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> S	MS	M

**Tableau 9 - Constituants du laitier cristallisé [72]**

Appellation	Composition	Formule simplifiée
<b>CLASSE DES SILICATES</b>		
Mellilite:		
- Gehlénite	2CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> AS
- Akermanite	2CaOMgO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>
Silicate bi calcique:	2CaO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	α C <sub>2</sub> S
- Bredigite: α	α 2CaO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	β C <sub>2</sub> S
- Larnite: β	β 2CaO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	γ C <sub>2</sub> S
- γ	γ 2CaO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	
Rankinite		C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
Wollastonite	3CaO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	
- β	β CaOSiO <sub>2</sub>	β CS
- αpseudowollastonite	α CaOSiO <sub>2</sub>	α CS
Forsterite	2MgOSiO <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> S
Merwinite	3CaOMgO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>
Montécéllite	CaOMgOSiO <sub>2</sub>	CMS
Anorthite	CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>	CAS <sub>2</sub>
Diopside	CaOMgO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	CMS <sub>2</sub>
Leucite	(K <sub>2</sub> O – Na <sub>2</sub> O) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 4SiO <sub>2</sub>	(K – N) AS <sub>4</sub>
Augite (Silicate complexe de)	(Ca – Mg – Fe – Ti – Al)	
<b>CLASSE DES OXYDES</b>		
Spinelles	MgO – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	M – A
	FeO – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Perowskite	CaO – TiO <sub>2</sub>	
<i>Classe des sulfures</i>		
Oldhamite	CaS	
	MnS	
	FeS	
<i>Autres constituants possibles</i>		
Carbures – Nitrures – Thiosulfates alcalins		

### 3.1.3. Masse volumique absolue:

Elle varie habituellement entre 2.85 et 3.05 g/cm<sup>3</sup> et reste très voisine de 3.0 g/cm<sup>3</sup>. A titre indicatif on donne dans le tableau n° 10 les masses volumiques absolues des minéraux constitutifs du laitier cristallisé.

**Tableau 10 - Masse volumique absolue des minéraux constituant le laitier cristallisé [1]**

Appellation	Formule simplifiée	Masse volumique absolue en g/cm <sup>3</sup>
Pseudowollastonite	CS	2.80 – 2.90
Wollastonite	CS	2.91
Bélite	C <sub>2</sub> S	3.28
Akermanite	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>	3.12
Gehlénite	C <sub>2</sub> AS	2.9 – 3.07
Merwinite	C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>	3.15

### 3.1.4. Masse volumique apparente:

La masse volumique apparente du laitier cristallisé varie suivant la coulée et les conditions de refroidissement, les valeurs les plus courantes étant comprises entre 1.20 et 1.40 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.5. Masse volumique apparente du grain:

Elle dépend des conditions de refroidissement et surtout de la porosité interne du grain, et varie habituellement de 2.65 à 2.90 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.6. Porosité

Elle est définie comme étant le pourcentage des vides existant dans l'unité de volume de granulat, les vides pris en compte étant les vides ouverts communiquant avec l'extérieur. Elle varie de 3 à 20%. La structure poreuse du laitier est favorable à l'adhésivité des liants hydrocarbonés dans les enrobés. De même la réaction physico – chimique liant – minéral avec les liants hydrauliques est favorisée par l'existence de pores et de fissures, la solidité des liaisons cristallines augmentant par effet d'ancrage dans les pores.

### 3.1.7. Absorption d'eau et remontée capillaire:

Si l'absorption d'eau dépend de la porosité, la remontée capillaire dépend de la dimension des canaux reliant les vides entre eux et n'est donc liée que très grossièrement à la porosité. Le tableau n° 11 montre la relation porosité – remontée capillaire.

**Tableau 11 - Relation porosité – absorption capillaire d'eau [1]**

Echantillon	Porosité en poids, %	Pourcentage de reprise d'eau par capillarité en demi – immersion après		
		1h	2h	3h
Laitier compact	1.4	0.0	0.0	0.3
Laitier à porosité fine	18.0	0.0	0.0	3.5
Laitier à porosité grossière	32.5	6.3	8.7	9.5

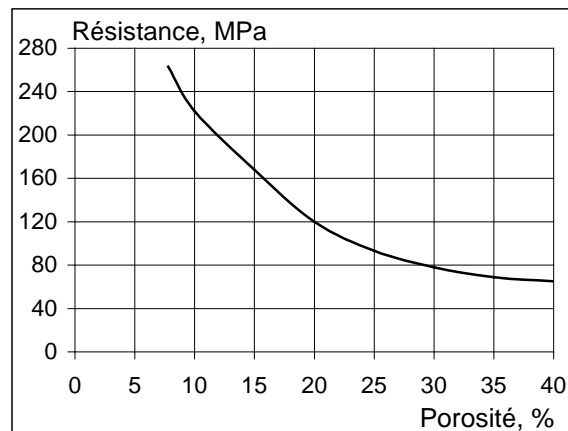
### 3.1.8. Résistance mécanique:

La résistance mécanique du laitier cristallisé est fonction de la nature des constituants minéraux, de la dimension des cristaux, de leur dureté et des conditions de refroidissement. La dureté sur l'échelle de MOHS des différents constituants est donnée dans le tableau n° 12.

**Tableau n° 12 - Dureté des constituants du laitier cristallisé sur l'échelle de MOHS [1].**

Constituants	Formule simplifiée	Dureté
Akermanite	C <sub>2</sub> MS <sub>2</sub>	5.5 – 6.0
Gehlénite	C <sub>2</sub> AS	5.5 – 6.0
Merwinite	C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>	6.0
Anorthite	CAS <sub>2</sub>	6.0 – 6.5

Les résistances mécaniques à la compression simple sur cubes de laitier cristallisé sont habituellement comprises entre 130 et 180 MPa. L'immersion est sans effet sur les résistances, qui restent relativement importantes même à porosité élevée comme le montre la figure 9.



**Figure 9** - Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression d'après F. KEIL [73]

### 3.1.9. Résistance à l'attrition, au choc et à l'abrasion.

Selon sa porosité, le laitier cristallisé présente des différences de comportement vis-à-vis de l'essai Los Angeles. Les laitiers cristallisés micro poreux et peu denses sont sensibles à la fois aux chocs et à l'attrition, les parois des alvéoles étant d'autant plus fragiles que les pores sont gros et qu'il y a production de sable. Les laitiers denses et compacts sont assez sensibles aux chocs, mais leur résistance à la compression reste élevée et leur comportement à l'attrition est favorable. Il y a production de gros sable et de micro gravillon. Le laitier cristallisé présente par ailleurs une bonne résistance à l'abrasion.

### 3.1.10. Hydraulicité du laitier cristallisé

Le refroidissement lent à l'air du laitier liquide aboutit à une forme cristalline ne présentant théoriquement pas de pouvoir hydraulique. Cependant le refroidissement ne peut être uniforme dans toute la masse de la coulée et il y a des gradients de température plus ou moins importants, ce qui explique la présence en faibles quantités dans le laitier cristallisé de parties vitreuses plus ou moins réactives.

## 3.2. Utilisation du laitier cristallisé

Les propriétés physiques et mécaniques du laitier cristallisé concassé induisent un large éventail d'usages dans le bâtiment, les ouvrages d'art, le génie civil et les routes. Le laitier cristallisé concassé intervient comme granulat notamment dans le béton hydraulique, dans les enrobés et dans les graves traitées.

### **3.2.1. Dans le béton**

Le laitier cristallisé, concassé, peut être utilisé comme gravillon avec un sable naturel roulé dans un béton mixte binaire. On obtient un béton de laitier. Lorsque en outre le sable utilisé dans le béton est un laitier granulé (brut ou pré broyé), on parle de béton tout laitier.

#### **3.1.1.1. Définition du béton de laitier**

L'appellation **béton de laitier** est généralement utilisé pour les bétons utilisant des granulats de laitier cristallisé concassé [1]. Le béton de laitier peut être un béton mixte, composé de gravillons de laitier cristallisé et de sable naturel roulé. Les formulations sont éprouvées et donnent satisfaction aux utilisateurs.

Lorsqu'on choisit d'utiliser comme sable du laitier granulé ou bouleté, on parle de **béton tout laitier**. Ce béton permet d'obtenir des résistances mécaniques élevées du fait de la remarquable compatibilité liant /granulat et de son frottement interne élevé. Il est par contre peu maniable et difficilement pompable.

Comme pour un béton classique de granulats naturels, la maniabilité et la pompabilité du béton de laitier peuvent être améliorées par l'ajout au mélange de cendres volantes ou encore d'adjuvants, notamment réducteurs d'eau ou fluidifiants.

L'amélioration de la rhéologie du béton de laitier peut également être faite par une optimisation de la formulation du béton (composition granulométrique, fractions granulaires, rapport gravillon / sable ...).

#### **3.1.1.2. Propriétés des bétons de laitier**

##### **3.2.1.2.1. Caractéristiques mécaniques**

Les bétons de laitier ont des caractéristiques mécaniques au moins égales et très souvent supérieures à celles des bétons traditionnels à base de granulats naturels. Cette supériorité est habituellement plus sensible en traction qu'en compression (la liaison granulat / liant est meilleure du fait de la texture superficielle du granulat), surtout à moyen et long terme (gain de 10 à 20 %).

##### **3.2.1.2.2. Le rapport E / C**

La rétention d'eau par le laitier granulé ou concassé conduit à réaliser les bétons de laitier avec des rapports E/C supérieurs à ceux des bétons classiques si l'on tient compte de l'eau totale. Mais pour la formulation de béton, l'eau d'imbibition des granulats ne doit pas être prise en compte, et on prend en compte seulement l'eau efficace.

##### **3.2.1.2.3. Le retrait**

Le retrait des bétons de laitier est du même ordre de grandeur que celui des bétons classiques.

#### **3.2.1.2.4. Comportement au feu**

Le comportement au feu des bétons au laitier est très supérieur à celui des bétons de granulats naturels. En effet le coefficient de dilatation thermique du laitier est uniforme entre (25 et 1000)° C [1] et est voisin de celui de l'acier, ce qui explique que les tensions internes dues à la dilatation soient moins élevées avec les bétons de laitier.

#### **3.2.1.2.4. Isolation phonique et thermique**

Par son couple densité / résistance particulièrement favorable, le béton de laitier offre, à masse égale, un gain important d'isolation thermique et phonique par rapport aux matériaux alvéolaires habituellement utilisés.

#### **3.2.1.2.5. Durabilité des bétons de laitier**

Comme pour tout béton, la densité des bétons de laitier dépendra de sa formulation ainsi que de sa mise en place. On obtient pour un béton humide des valeurs supérieures ou égales à 2400 kg / m<sup>3</sup>. L'emploi de laitier cristallisé concassé comme granulats dans un béton n'augmente pas la perméabilité de celui – ci, la porosité des grains de laitier étant fermée, c'est à dire que les pores et cavités ne communiquent pas entre eux. De ce fait la remontée capillaire est faible.

La résistance aux milieux chimiquement agressifs n'est pas seulement le fait de la nature des granulats, mais surtout de la compacité du béton réalisé. Comme on l'a déjà dit, la porosité des grains de laitier étant fermée, elle n'influe pas sur celle du béton. Leur comportement aux cycles gel / dégel est excellent..

Enfin les bétons de laitier offrent, du fait de leur compacité, une excellente protection des aciers contre la corrosion par carbonatation, les sulfures présents dans le laitier cristallisé concassé jouant un rôle anti – oxygène par transformation en sulfates .

#### **3.1.1.3. Quelques réalisations en béton de laitier**

- des habitations à caractère collectif et individuel
- des structures industrielles (fondations de hauts fourneaux, halls d'aciéries)
- des ouvrages d'art

#### **3.2.2. Construction des assises de chaussées**

Le laitier cristallisé concassé occupe une place de choix en technique routière où on l'utilise en association avec les liants hydrauliques ou hydrocarbonés dans toutes les couches de chaussée, de la couche de fondation à la couche de roulement incluse.

Il sert aussi de granulats dans les enrobés des couches de roulement, et de grave dans les graves hydrauliques utilisées en assises de chaussées (couches de base et de fondation).

Les granulats de laitier cristallisé concassé, par leur angularité et leur rugosité naturelles conviennent pour la fabrication d'enrobés bitumineux (bonne adhésivité) en empêchant le déchaussement des granulats.

Le laitier concassé peut être utilisé comme granulats dans les graves hydrauliques quelque soit le liant utilisé.

### 3.2.3. Ballast pour voies ferrées

Le ballast de voies ferrées est l'un des emplois les plus anciens du laitier cristallisé concassé et criblé. Cette utilisation du laitier, apparue vers 1885, s'est très vite développée.

### 3.3.4. Autres utilisations:

Le laitier concassé est également utilisé en préfabrication pour la confection des blocs, panneaux, hourdis agglomérés, pavés, ainsi que dans d'autres usages assez particuliers (granulats de lits filtrants).

L'emploi du laitier concassé en tout venant se fait en remblai, couches de forme, travaux de viabilité et plus généralement en voiries et réseaux divers (VRD).

Les granulats de laitier cristallisé présentent un large éventail de propriétés spécifiques qui s'accompagnent d'une grande polyvalence d'emploi.

## CONCLUSION

Dans le ciment de laitier, le laitier joue un rôle bénéfique vis à vis des agressions de nature chimique, notamment les eaux sulfatées [74], lorsque la teneur en laitier est supérieure ou égale à 60 % et l'eau de mer lorsque le matériau cimentaire est en immersion totale.

Le béton de ciment au laitier présente une résistance élevée à la diffusion des chlorures et des alcalis, la richesse en laitier du ciment ayant plus d'importance dans ce domaine que le rapport E / C du béton.

L'imperméabilité croît avec la teneur en laitier dans le ciment. La pâte de ciment de laitier développe beaucoup plus de CSH micro – poreux et une porosité capillaire plus faible que celle de la pâte de ciment portland artificiel. En effet on observe une diminution simultanée du nombre des pores capillaires (rayon < 300 Å) et de la dimension moyenne des pores, d'où résulte une diminution globale de la porosité capillaire de 25 à 30 % [1].

Les granulats de laitier confèrent aux bétons des améliorations remarquables telles que le gain de résistance en traction, la diminution de la perméabilité et d'autres qualités que nous avons déjà cités.

L'utilisation des diverses formes de laitier (granulé) dans les ciments et (granulé et cristallisé) dans les bétons est surtout intéressante dans les régions proches des lieux de production du laitier ou les granulats naturels sont manquant ou de qualité discutable (sable fin). Il ne faut pas perdre de vue également le caractère économique et écologique de l'emploi des granulats artificiels en substitution partielle ou totale aux granulats naturels.

A cet effet nous avons consacré le chapitre II à la caractérisation complète du laitier de haut fourneau du complexe sidérurgique d'EL HADJAR.

Les principales caractéristiques étudiés sont :

- chimiques : étude de la composition chimique et du pouvoir hydraulique par les différents indices et modules.
- physiques : détermination de la quantité de phase vitreuse, et des masses volumiques.
- Mécaniques : résistances mécaniques.

**CHAPITRE II**  
**CARACTERISATION DES LAITIERS SIDERURGIQUES D'EL HADJAR**

## **CHAPITRE II – CARACTERISATION DES LAITIERS SIDERURGIQUES D’EL HADJAR**

### **INTRODUCTION**

#### **1. ELABORATION DES LAITIERS D’EL HADJAR**

##### **1.1.Les matières premières**

##### **1.2.Formation du laitier**

##### **1.3.Traitement du laitier**

###### 1.3.1. Refroidissement lent

###### 1.3.2. Refroidissement brutal

#### **2. CARATERISATION DU LAITIER GRANULE D’EL HADJAR**

##### **2.1.Propriétés physiques**

###### 2.1.1. Masses volumiques

###### 2.1.2. Granulométrie

##### **2.2.Etude de la réactivité hydraulique**

###### 2.2.1. La composition chimique

###### 2.2.2. Analyse aux rayons X et détermination du taux de vitrification

###### 2.2.3. Le module chimique I

###### 2.2.4. Les indices d’activité

###### 2.2.5. L’essai accéléré à la soude

###### 2.2.6. L’indice d’efficacité hydraulique h

##### **2.3.Discussion**

##### **2.4.Conclusion**

#### **3. CARACTERISATION DU LAITIER CRISTALLISE D’EL HADJAR**

##### **3.1.Propriétés physiques**

###### 3.1.1. Masses volumiques

###### 3.1.2. Porosité

###### 3.1.3. Granulométrie

##### **3.2.Propriétés chimiques**

###### 3.2.1. Composition chimique

###### 3.2.2. Composition minéralogique

##### **3.3.Résultats et discussion**

##### **3.4. Conclusion**

### **CONCLUSION**

## INTRODUCTION

Le complexe sidérurgique d'EL HADJAR génère des déchets industriels de deux types:

- des déchets non utilisables et qui sont mis en décharge
- des déchets valorisables, qu'on appelle sous - produits

Les principaux déchets sidérurgiques sont les laitiers de hauts fourneaux. Selon le mode de refroidissement on peut obtenir deux types de laitier : granulé et cristallisé. Une tonne de fonte produite génère à EL HADJAR en moyenne 380 kg de laitier [75]. Ce chiffre dépend en effet du minerai de fer et du procédé. La capacité de production de laitier granulé et cristallisé par les hauts fourneaux d'EL HADJAR est de l'ordre de 600 000 tonnes par an [75] dont en moyenne 430 000 tonnes de laitier granulé et 170 000 tonnes de laitier cristallisé. [76].

La granulation du laitier à sa sortie du haut fourneau n'est pas une opération automatique mais elle est programmée en fonction de la demande en laitier granulé. Cette restriction est dû au manque d'eau, l'Algérie ayant vécu une grande sécheresse durant les dix dernières années.

Le tableau n°1 résume les statistiques de production du laitier granulé et cristallisé par les hauts fourneaux d'EL HADJAR [75 - 78].

**Tableau 1 - Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR**

Désignation	Production *10 <sup>3</sup>									
	1987		1988		1989		1995		2002	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
<b>Laitier granulé</b>	167	58	484	70	347	63	129	34	467	83
<b>Laitier cristallisé</b>	124	42	196	29	206	37	250	66	99	17
<b>Total</b>	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

La production du laitier granulé par le complexe sidérurgique d'El HADJAR a connu trois périodes:

- La première période de production (les années 1970): la production de laitier granulé et cristallisé était mise en décharge ce qui a conduit à la formation de deux terrils, aujourd'hui inexploités à cause de leur solidification.

- La deuxième période remonte aux années 1980: des tentatives à l'échelle industrielle ont été menées pour l'emploi du laitier dans la construction des assises de chaussées et en cimenterie, mais en faible quantité ne permettant pas d'absorber totalement la production des hauts fourneaux.

- La troisième période (actuelle): si l'emploi du laitier pour la construction des assises de chaussée s'est sensiblement réduit pour des raisons de récession économique, son emploi en cimenterie est toujours constant, de l'ordre de 20% en ajout au clinker (tableau 2), mais actuellement dans quatre cimenteries, ce qui explique une plus grande production de laitier granulé que de laitier cristallisé, notamment en 2002 (tableau 1).

Les premières utilisations du laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR dans le domaine du génie civil concernent deux axes :

- Réalisation des assises de chaussées :

Les résultats satisfaisants donnés par des planches d'essais réalisées sur les tronçons des routes nationales (RN 44 et RN 16) dans les années 1970, en utilisant le laitier granulé du premier haut fourneau sous forme de grave – laitier et de sable – laitier ont permis de réaliser le tronçon de la voie express Est – Ouest (Annaba – Tlemcen), reliant les villes d'ANNABA et de BERRAHAL, avec un mélange de laitier granulé moulu, de chaux et de ciment [79 -81].

Le complexe sidérurgique s'est ensuite retrouvé avec une production de laitier granulé qu'il ne pouvait pas mettre en valeur, en particulier après l'entrée en production du second haut fourneau.

En effet, les cimenteries de l'Est, notamment HAMMA BOUZIANE et surtout celle de HADJR SOUD ne pouvaient pas absorber toute la production potentielle de laitier granulé des hauts fourneaux d'EL HADJAR car elles n'en utilisaient que très peu (15 %) dans leur ciment.

- Fabrication de ciment composé (CPJ)

L'intégration du laitier granulé de hauts fourneaux d'EL HADJAR dans la fabrication des ciments a été faite pour la première fois en 1982 par la cimenterie de HADJR SOUD après des essais satisfaisant en laboratoire, validés plus tard par une autre étude [15], suivis d'essais à l'échelle industrielle. Cependant le dosage adopté qui était de 15 % ne permettait pas d'absorber tout le laitier granulé de fraîche production et encore moins les stocks de laitier.

Aujourd'hui on estime la quantité de laitier, en majorité granulé, stocké à l'intérieur du complexe sidérurgique, à 2 millions de tonnes [75].

L'intégration du laitier granulé dans les ciments a posé un problème aux cimentiers car sa teneur en eau est trop élevée, en moyenne 14 %, ce qui nécessitait son séchage. La cimenterie de HADJR SOUD s'est doté d'un séchoir spécialement pour sécher le laitier granulé. Le dosage en laitier granulé dans le ciment de type CPJ fluctue entre 15 et 25 % en fonction de la qualité du clinker produit.

Le tableau 2 donne les dosages de laitier granulé utilisés par la cimenterie de HADJR SOUD de 1994 à 2002 [3 et 82].

**Tableau 2 - Consommation du laitier granulé par la cimenterie de HADJR SOUD**

Année	1994	1995	1996	1997	2002
<b>Consommation du laitier granulé en %</b>	19.74	18.28	17.08	13.55	20

- Granulats pour bétons :

L'utilisation du laitier granulé ou cristallisé d'EL HADJAR en qualité de granulats dans le béton est restée au stade expérimental [83 - 84]. Ces deux études ont montré toutefois l'intérêt de l'emploi du laitier en qualité de granulats dans les bétons.

Dans le cadre de cette étude qui traite de la valorisation du laitier (cristallisé et granulé) dans les ciments et bétons, nous avons structuré ce chapitre en trois parties. L'étude du processus d'élaboration du laitier granulé et cristallisé constitue la première partie, la deuxième partie est consacrée à la caractérisation physique, chimique et à l'approche de la réactivité hydraulique du laitier granulé par différentes méthodes dans l'optique de son utilisation en cimenterie après broyage ou son emploi à l'état brut dans le béton. La dernière

partie traite de la caractérisation physique et chimique du laitier cristallisé pour une éventuelle utilisation comme granulats dans le béton en substitution au granulats naturels.

## 1. ELABORATION DES LAITIERS D'EL HADJAR:

### 1.1. Les matières premières

Le minerai de fer utilisé provient de deux gisements, BOUKHADRA et EL OUENZA situés dans la wilaya de Tébessa à environ 250 km du complexe sidérurgique d'EL HADJAR.

Le minerai de fer est composé de différents oxydes de fer ( $Fe_3O_4$  et  $FeO$ ) dont la plus forte proportion est sous hématite ( $Fe_2O_3$ ), de roches stériles principalement du quartz ( $SiO_2$ ), de la kaolinite ( $Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$ ) et de carbonates de calcium et de magnésium ( $CaCO_3$  et  $MgCO_3$ ).

Les compositions chimiques du minerai de fer des deux gisements sont données dans le tableau 3 [75]

**Tableau 3 - Composition chimique du minerai de fer**

Origine du Minerai de fer	Oxydes, valeurs moyennes en %			
	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	Pertes au feu
<b>EL OUENZA</b>	46.1	9.77	5.56	13.2
<b>BOUKHADRA</b>	50.1	3.77	8.80	9.45

### 1.2. Formation du laitier :

Dans le haut fourneau, à une température de l'ordre de 1400 à 1500°C, les constituants non métalliques et non gazeux (la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie) se liquéfient et se séparent de la fonte par différence de densité. Les oxydes du laitier réagissent entre eux pour former des minéraux tels que la gehlenite, l'akermanite, la merwinite, la melilite et le silicate bicalcique dont la forme ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ ) [1 et 27] dépend de la vitesse de refroidissement du laitier à sa sortie du haut fourneau.

Les dispositions des hauts fourneaux d'EL HADJAR comportent un trou de coulée, permettant d'évacuer la fonte (plus dense) d'abord, ensuite le laitier.

### 1.3 Traitement du laitier

A sa sortie du haut fourneau (figure 1), par le trou de coulée haut à la température d'environ 1400°C, le laitier subit un refroidissement qui peut être lent ou brusque en fonction de son usage ultérieur.



**Figure 1** – Coulée de laitier à la sortie du haut fourneau

### **1.3.1. Refroidissement lent**

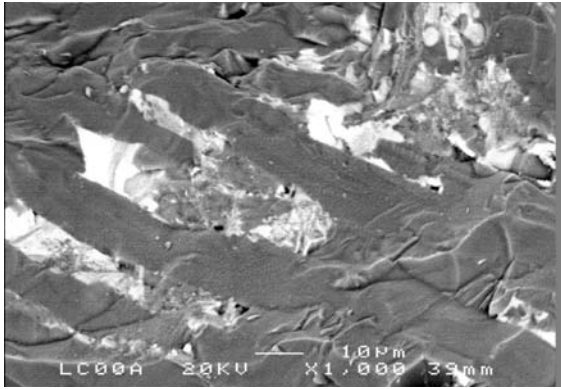
Le refroidissement lent est un procédé simple qui n'a pas changé depuis l'apparition de l'industrie sidérurgique. Le laitier à l'état liquide séparé de la fonte coule dans une rigole vers un camion à benne qui le transporte vers la fosse où il sera déversé et où il se refroidit naturellement et se solidifie en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé.

Le matériau ainsi obtenu peut être utilisé en l'état comme remblai, soit sous forme de granulat avec une gamme de classes granulaires (de 0 à 20 mm) élaborées par concassage et criblage. La porosité des granulats de laitier concassé est plus ou moins hétérogène selon les conditions de refroidissement et en particulier la situation des granulats dans la fosse. Au début de la cristallisation, les bulles formées par réaction entre le soufre et l'oxygène (S et O<sub>2</sub>) peuvent monter à la surface, et il y a diminution de la porosité des couches inférieures, mais quand la cristallisation est avancée, les bulles ne peuvent plus se dégager d'où la formation de pores [1].

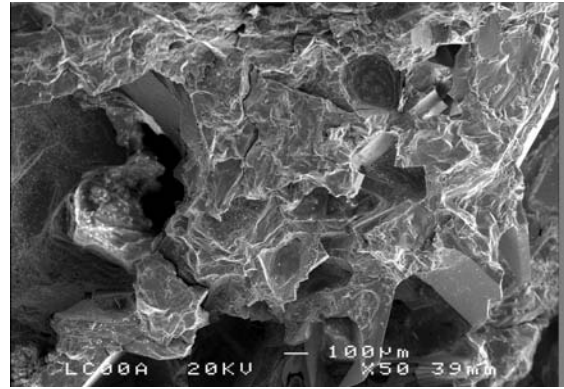
#### **- Observation au microscope électronique à balayage de la structure du laitier:**

Le principe du microscope électronique à balayage (MEB) est de balayer un échantillon avec un faisceau d'électrons incidents ( $3\text{mm} < \text{diamètre du faisceau} < 10\text{ mm}$ ). L'interaction de ce faisceau avec un matériau conduit alors à l'émission d'électrons secondaires qui proviennent de la zone superficielle du matériau (quelques mm). L'intensité de l'émission dépend de la topographie de surface du matériau, du potentiel local et du numéro atomique de l'élément excité. Les matériaux observés sont généralement recouverts de métaux conducteurs (or, carbone) qui améliorent leur conductibilité superficielle, donc "l'écoulement" des charges. Le faisceau d'électrons émis est transformé en signal électrique, ce dernier modulant l'intensité du faisceau d'un tube à balayage synchrone. L'image est obtenue après balayage complet de l'écran.

Les observations au microscope électronique à balayage du laitier cristallisé de hauts fourneaux d'El HADJAR ont permis de voir sur un même échantillon deux formes de structure, compacte (figure 2) et poreuse (figure 3).



**Figure 2 – Laitier cristallisé compact**



**Figure 3 – Laitier cristallisé poreux**

### 1.3.2. Refroidissement brutal

Le procédé consiste à refroidir rapidement le laitier liquide par un jet d'eau sous pression au moment de son déversement de la rigole de plancher de coulée vers le bassin d'eau. Le jet d'eau est perpendiculaire à la trajectoire de la coulée de laitier ce qui permet de le fragmenter en grains (figure 4). Il est appelé alors laitier granulé et le procédé : « Procédé de granulation ».



**Figure 4 – Granulation et trempe du laitier à sa sortie du haut fourneau d'EL HADJAR**

L'eau utilisée pour la trempe du laitier à sa sortie du haut fourneau à la température de 1400 °C est une eau douce non traitée pompée du barrage de la CHAFIA situé à 15 km d'EL HADJAR. Le laitier nécessite beaucoup d'eau pour son refroidissement brutal et son passage de l'état liquide à l'état solide. Le calcul du bilan thermique, qui tient compte de la variation de l'enthalpie, quand le laitier passe de 1400 °C à moins de 100°C, montre qu'il faut près de 600 l d'eau par tonne de laitier [75]. Dans la pratique pour éviter une réaction explosive due à la décomposition instantanée de la molécule d'eau en ses constituants (l'oxygène et l'hydrogène) provoquée par la présence de la fonte entraînée accidentellement par le laitier, la quantité d'eau est au moins décuplée [1 et 75]. En conséquence bien que une partie de l'eau contenue dans le laitier granulé s'évapore, sa teneur en eau reste quand même élevée en

moyenne 14% [75]. Les sidérurgistes recommandent une mise en stock prolongée (emmagasiner) sans préciser la durée pour réduire l'humidité du laitier granulé. Cette technique, si elle est économique, pose de nombreux aléas :

- si le stockage se fait à l'air libre, le séchage peut être perturbé par les pluies ou les condensats dû aux baisses de température la nuit.
- comme le laitier est stocké sous forme de tas, le séchage sera hétérogène, la teneur en eau du laitier granulé est différente d'un point à un autre.
- Si la durée de stockage est longue, le laitier granulé risque de se solidifier.

Le séchage artificiel à une température de l'ordre de 100°C reste le moyen le plus efficace et le plus rapide pour réduire la teneur en eau dans le laitier. Il faut aussi souligner que si le laitier granulé nécessite un séchage, ce qui laisse supposer qu'il sera utilisé en ajout au clinker, les cimentiers ont la possibilité, afin de réduire le coût de séchage, de récupérer les gaz chauds du four rotatif à clinker et de les injecter dans le séchoir à laitier.

## 2. CARACTERISATION DU LAITIER GRANULE

### 2.1. Propriétés physiques

#### 2.1.1. Masses volumiques

Le laitier granulé d'EL HADJAR se présente sous forme de grains sphériques, de couleur jaune claire, de structure poreuse et de masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) de 1000 kg / m<sup>3</sup> et de masse volumique réelle ( $\rho_{abs}$ ) de 2800 kg / m<sup>3</sup>.

#### 2.1.2. Granulométrie

Le laitier granulé d'EL HADJAR est un sable gros de classe granulométrique 0 / 5 mm et de module de finesse voisin de 3. Sa courbe granulométrique est présentée sur la figure 5.

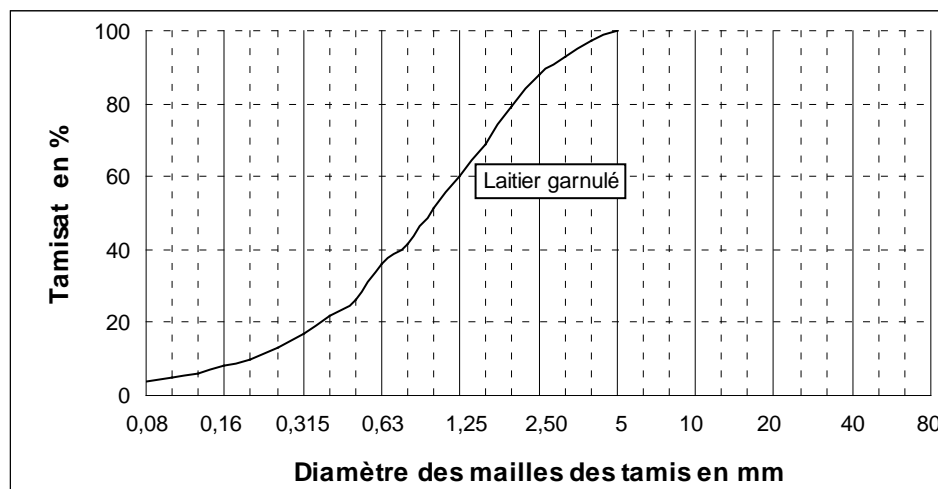


Figure 5 – Courbe granulométrique du laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR

## 2.2. Etude de la réactivité hydraulique

### 2.2.1. Composition chimique

La composition chimique résultant du contrôle et du suivi de fabrication effectué par l'entreprise est donnée dans le tableau 4. La dernière ligne du tableau correspond à la composition chimique moyenne d'un laitier français donnée par DEMOULIAN [6].

Le laitier granulé d'EL HADJAR se caractérise par une teneur en silice élevée et une teneur en alumine plutôt faible par rapport à la composition chimique moyenne des laitiers [4].

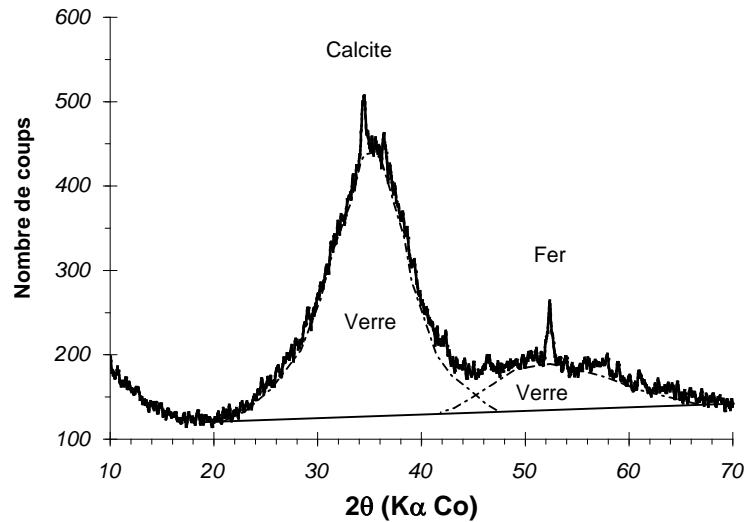
**Tableau 4 - Composition chimique du laitier granulé de hauts fourneaux d'EL HADJAR**

Année	Composition chimique en %									
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	S	Total
1987	39.2	39.5	9.50	8.75	0.80	-	-	-	1.10	<b>98.85</b>
1995	39.3	39.4	6.00	8.20	0.70	2.35	-	-	0.07	<b>96.02</b>
2000	40.1	40.2	4.68	6.00	2.0	2.64	1.07	1.16	0.15	<b>98</b>
[14]	33.5	42.2	5.99	13.3	1.24	0.64	0.70	0.55	0.94	<b>99.06</b>

### 2.2.2. Analyse aux rayons X et détermination du taux de vitrification.

Le laitier granulé se caractérise par une structure vitreuse. En effet, le gradient thermique est suffisamment important, la température du laitier passant de 1400°C à moins de 100°C, pour qu'il y ait trempe des particules solides que forme le laitier liquide mis brutalement au contact de l'eau. Elles acquièrent aussi une structure vitrifiée qui correspond à la température ambiante, c'est à dire que leur évolution normale vers une structure organisée est stoppée. Le laitier granulé conserve ainsi une énergie latente qui constitue en partie son potentiel de réactivité hydraulique. A cet effet, nous allons quantifier la phase vitreuse du laitier par DRX.

L'analyse par diffraction des rayons X a été réalisé à l'aide d'un diffractomètre Siemens D 5000, utilisant une anticathode de cobalt ( $K\alpha$  Co,  $\lambda = 1.789\text{Å}$ ), sur une plage de 10 à 70° (2 $\theta$ ) avec un pas d'avancement de 0.02° et un temps de comptage de 12 s. La figure 1 présente le diffractogramme du laitier, typique d'un matériau essentiellement vitreux. En effet les laitiers vitreux présentent en diffraction des rayons X un ou plusieurs halos larges et diffus: ces halos sont l'image du désordre local qui existait dans le liquide et qui a été figé pendant la trempe. Outre la fraction vitreuse, le laitier présente de faibles quantités de minéraux cristallisés, probablement sous la forme de calcite (CaCO<sub>3</sub>,  $d = 3.035\text{Å}$ ), de fer métallique (Fe,  $d = 2.021\text{Å}$ ) et de traces de gehlénite et / ou akermanite. (figure 6).



**Figure 6** - Diffractogramme aux rayons X du laitier granulé D'EL HADJAR

Il est généralement reconnu que la réactivité du laitier granulé dépend non seulement de sa structure mais aussi de la teneur en phase vitreuse [6]. Pour être utilisé en cimenterie, le laitier granulé de haut fourneau doit contenir au moins 2/3 en masse de laitier vitreux selon la norme NF EN 197 – 1 [85]. A partir du diagramme de diffraction des rayons X, nous avons cherché à évaluer le pourcentage de phase vitreuse. La méthode utilisée consiste à soustraire de 100 % la somme des teneurs des phases cristallisées ( $\text{CaCO}_3$  et Fe), ces dernières étant déterminées par analyse quantitative en DRX et par analyse chimique [86 - 87].

- La quantité de fer est calculée à partir de l'analyse chimique du laitier (Tableau 3, composition moyenne de l'année 2000), en considérant que tout le fer présent est sous forme métallique (relation 1).

$$\chi_{\text{Fer}} = \frac{M_{\text{Fe}} \cdot C_{\text{Fe}}}{M_{\text{mol(Fe)}}} \cdot 100\% = 1,6\% , \quad (1)$$

$\chi_{\text{Fer}}$  : quantité de fer métallique dans l'échantillon (%).

$C_{\text{FeO}}$  : quantité de FeO dans le laitier granulé (Tableau 3 : 2,0%)

$M_{\text{Fe}}$  : masse atomique du fer (55,8 g/mol)

$M_{\text{FeO}}$  : masse moléculaire du FeO (71,8 g/mol)

- La quantité de calcite est calculée à partir des résultats de DRX, par analyse quantitative (relation 2)

$$\chi_{\text{Calcite}} = \frac{I_{\text{Calcite}} \cdot \mu_{\text{Laitier}}}{I_{\text{Calcite pure}} \cdot \mu_{\text{Calcite pure}}} \cdot 100\% = 0,7\% , \quad (2)$$

$\chi_{\text{Calcite}}$  : quantité de calcite dans l'échantillon (%)

$I_{\text{Calcite}}$  : intensité de la raie de la calcite ( $3,03\text{\AA}$ ) dans le diffractogramme du laitier ( $I_{\text{Calcite}} = 3$  coups)

$I_{\text{Calcite pure}}$  : intensité de la raie de la calcite pure ( $3,03\text{\AA}$ ) d'un échantillon étalon ( $I_{\text{Calcite pure}} = 427$  coups).

- $\mu_{\text{Laitier}}$  : coefficient d'absorption massique du laitier granulé  
( $\mu_{\text{Laitier}} = 118 \text{ cm}^2/\text{g}$ )
- $\mu_{\text{Calcite pure}}$  : coefficient d'absorption massique de la calcite pure  
( $\mu_{\text{Calcite pure}} = 113.4 \text{ cm}^2/\text{g}$ )

- La quantité de **phase vitreuse** dans le laitier de haut fourneau peut alors être estimée à environ **97%** (en considérant les traces de gehlénite et / ou akermanite)

### 2.2.3. Module chimique I.

D'après la norme NF P 18 - 506 [24] concernant l'utilisation de laitier comme addition au béton, la qualité de laitier est caractérisée par le module chimique  $I = C \times A$ , produit du pourcentage en CaO par le pourcentage en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les valeurs trouvées sont comprises entre 241 et 344, ce qui classe ce laitier dans la catégorie 1 ( $C \times A < 425$ ). Les valeurs normalisées du module chimique I sont données au tableau 5.

**Tableau 5 - valeurs normalisées du module chimique I [24]**

Catégorie	Valeurs normalisées
<b>1</b>	$C \times A < 425$
<b>2</b>	$425 < C \times A < 450$
<b>3</b>	$C \times A > 425$

### 2.2.4. Les indices d'activité

Les indices chimiques sont calculés à partir de la composition chimique du laitier et sont supposés être reliés à son activité hydraulique. De nombreux indices [1, 6 et 12] ont été proposés par de plusieurs auteurs, mais ils sont souvent contradictoires les uns avec les autres et pas toujours pertinents, notamment par rapport à l'objectif visé qui est de prédire la réactivité du laitier à partir de sa seule composition chimique. DEMOULIAN et al. [6] ont passé en revue et testé de nombreux indices en cherchant ceux qui donnaient les meilleures corrélations avec les résistances mécaniques. Ils ont constaté que les indices  $I_8$ ,  $I_9$ ,  $I_6$ ,  $I_{10}$  et  $I_1$  ont, dans un ordre décroissant, les plus forts coefficients ( $r$ ) de corrélation:  $r$  varie de 0.91 à 0.85 pour les résistances à 2 jours, de 0.82 à 0.78 pour celles à 7 jours et de 0.84 à 0.76 pour 28 jours. Ce sont ces indices qui ont été retenus pour caractériser le laitier granulé d'El HADJAR. Ils sont présentés au tableau 6.

**Tableau 6 - Calcul des indices chimiques**

Indices	Valeurs calculées		Valeurs optimales trouvées dans la littérature
	(1)	(2)	
$I_8 = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2}$	1.26	1.83	1.3 à 1.4
$I_9 = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0.5 MgO - 2SiO_2$	-11.56	11.57	12 < I < 20
$I_6 = \frac{CaO + 0.56Al_2O_3 + 1.4MgO}{SiO_2}$	1.25	1.73	> 1.65
$I_{10} = \frac{CaO + MgO + 0.66Al_2O_3}{SiO_2 + 0.33Al_2O_3}$	1.16	1.49	-
$I_1 = \frac{CaO}{SiO_2}$	1.00	1.25	Maximum 1.4
(1) Selon la composition chimique du laitier d'El HADJAR (cf. tableau 3)			
(2) Selon la composition chimique du laitier donnée par DEMOULIAN (cf. tableau 4)			

### 2.1.5. L'essai accéléré à la soude

Cette méthode, non normalisée [14], consiste à préparer des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm de mortier normal, l'eau étant remplacée par une solution constituée de 200g de soude concentrée dissoute dans un litre d'eau et la partie liante étant composée de laitier granulé moulu. Le rapport solution/laitier est égal à 0,5. Les éprouvettes sont démoulées et testées en compression après 6 et 24 heures de durcissement. Les résistances mécaniques doivent être comprises respectivement entre 7 à 8 MPa après 6 h de durcissement et 12.5 à 15 MPa après 24 h. Les tableaux 7 et 8 présentent les résultats obtenus du test accéléré à la soude pour trois finesses (Blaine) de broyage du laitier granulé : 2800, 3600 et 4600 cm<sup>2</sup>/g.

**Tableau 7 : Test à la soude: Résultats des essais de compression sur mortier de laitier activé**

N°	Surfaces spécifiques Blaine, cm <sup>2</sup> /g					
	2800		3600		4600	
	6	24	6	24	6	24
	en compression $\sigma_c$ (MPa)					
1	1.03	3.75	3.06	3.12	3.13	4.50
2	1.25	3.37	2.5	3.12	3.13	2.87
3	1.25	3.37	2.44	3.75	3.25	3.88
4	1.03	3.37	2.38	4.00	3.06	4.62
5	1.15	3.15	2.00	3.88	3.25	4.62
6	1.15	3.15	-	4.00	-	4.88

**Tableau 8** - Test à la soude: rapport K entre la résistance moyenne des mortiers de laitier et les valeurs limites minimales exigées. Influence de la finesse de mouture du laitier.

Finesse	2800 cm <sup>2</sup> /g		3600 cm <sup>2</sup> /g		4600cm <sup>2</sup> /g	
	6 h	24 h	6 h	24	6	24
Age	6 h	24 h	6 h	24	6	24
K = $\sigma_m / \sigma_l$	0.15	0.24	0.33	0.26	0.42	0.30

$\sigma_m$  : Résistance moyenne à un âge donné (Tableau 8)

$\sigma_l$  : Résistance limite à un âge donné (à 6h: 8 MPa et à 24 h: 15 MPa)

### 2.1.6. Indice d'efficacité hydraulique h

Le pouvoir hydraulique est estimé conventionnellement à l'aide d'un l'indice d'efficacité hydraulique **h** (norme française NF P 18 – 506 [24]. Cet indice est défini par le rapport, à un âge donné, de la résistance à la compression d'un mortier dont la partie liante est composée en masse de 50 % de laitier et de 50 % de ciment portland témoin à celle obtenue au même âge sur mortier témoin à partir du même ciment. Le ciment témoin a une teneur en C<sub>3</sub>A comprise entre 6 et 10 % et une teneur maximale en SO<sub>3</sub> de 3 %.

Le ciment utilisé est un CPA 45 conforme à la norme algérienne NA 442 [53] fabriqué par la cimenterie de HADJR ESSOUD sans aucune addition, de masse volumique apparente  $\rho_{app} = 1108 \text{ kg/m}^3$  et de masse volumique absolue  $\rho_{abs} = 3150 \text{ kg/m}^3$ . D'après la norme algérienne [53] la résistance minimale garantie à 28 jours est de 35 MPa. Le tableau 9 donne la composition chimique du clinker [82] et le tableau 9 sa composition minéralogique calculée d'après les formules de BOGUE corrigées [88].

**Tableau 9** - Composition chimique du clinker

Oxydes	CaO (libre)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	SiO <sub>2</sub> insoluble	Pertes au feu	SO <sub>3</sub>
Teneurs %	65.7 (0.1)	5.20	2.70	21.7	0.70	0.44	0.70	0.01	0.3	0.3	0.6

**Tableau 10** - Composition minéralogique estimée du clinker

	Les minéraux	Désignation	Formule chimique	Teneur %
1	Le silicate tricalcique	C <sub>3</sub> S	3.CaO.SiO <sub>2</sub>	58.2
2	Le silicate bicalcique	C <sub>2</sub> S	2.CaO. SiO <sub>2</sub>	18.5
3	L'aluminate tricalcique	C <sub>3</sub> A	3.CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.3
4	Le ferro-aluminate- tétra calcique	C <sub>4</sub> AF	4.CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.2
<b>Total</b>				<b>94.2</b>

Le sable utilisé dans cette étude et qui a servi à la confection des éprouvettes en mortier est un sable siliceux de rivière, de granulométrie fine 0 / 1.25 mm, de module de finesse  $M_f = 2.04$ , de masse volumique apparente  $\rho_{app} = 1450 \text{ kg/m}^3$  et de masse volumique absolue  $\rho_{abs} = 2700 \text{ kg/m}^3$ .

En fonction de la valeur numérique de h, on classe le laitier en trois catégories (h<sub>1</sub> à h<sub>3</sub>) de réactivité croissante (Tableau 11).

Le tableau 12 donne l'indice d'efficacité hydraulique h du laitier d'EL HADJAR pour quatre finesse (Blaine) cm<sup>2</sup> / g ( 2500, 3000, 3500 et 4000).

**Tableau 11** - Classification des indices d'efficacité hydrauliques des laitiers en fonction des résultats des essais mécaniques [24]

Indice	7 jours	28 jours
<b>h<sub>1</sub></b>	-	> 0,60
<b>h<sub>2</sub></b>	> 0,60	> 0,75
<b>h<sub>3</sub></b>	> 0,70	> 0,85

**Tableau 12** : Indice d'efficacité hydraulique h du laitier d'EL HADJAR

	Résistance à la compression en MPA							
	7 jours				28 jours			
	Finesse du laitier cm <sup>2</sup> /g							
$\Sigma_{CHF = CPA + 50 \% \text{ de laitier}} \text{ en MPa}$	2500	3000	3500	4000	2500	3000	3500	4000
$\Sigma_{CPA} \text{ en MPa}$	15.0	18	20.5	21.5	31.5	36	39	44.5
$h = \sigma_{CHF} / \sigma_{CPA}$	0.42	0.51	0.58	0.68	0.70	0.75	0.81	0.92

### 2.3. Discussion

Le degré de vitrification du laitier d'El HADJAR est satisfaisant, ainsi que sa composition chimique qui s'inscrit dans les limites préconisées par la norme [24]. Cependant les teneurs en CaO et SiO<sub>2</sub> sont proches alors que la plupart des laitiers, la teneur en CaO est généralement supérieure à celle de SiO<sub>2</sub> de l'ordre de 5 à 10 %.

On peut noter aussi que la composition chimique du laitier a peu varié entre 1987 et 2000; il est vrai que dans cette période il y a eu peu de modification de procédé d'une part, de l'origine du minerai d'autre part.

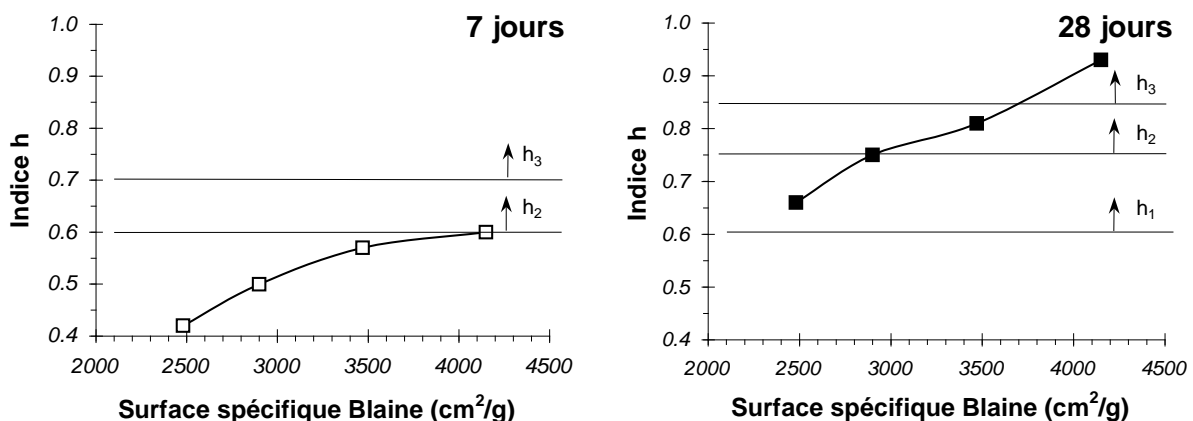
L'approche de l'activité hydraulique du laitier granulé d'El HADJAR par les indices est délicate. Nous avons tenté d'utiliser les indices susceptibles de donner les meilleures corrélations avec les résistances mécaniques [6]. La composition chimique donnée au tableau 4 (année 2000) conduit au calcul d'indices (tableau 6) qui classent 2 fois sur 4 le laitier d'El HADJAR comme étant de très faible hydraulité. Il faut pondérer toutefois ce résultat car le même calcul à partir de la composition moyenne donnée par DEMOULIAN [6] conduit à des valeurs à peine meilleures. Peut-être faut-il se poser la question de la pertinence de ces indices ou plus sûrement des valeurs limites trouvées dans la littérature. En effet SMOLCZYK [27] affirme que ces modules n'ont pas de caractère de corrélation fonctionnelle, d'application générale, entre hydraulité et composition chimique, et ne sont pas valables pour classer des laitiers de haut fourneau provenant de différentes origines.

Les essais sur mortier de laitier activé à la soude (tableau 7) confirment ce mauvais classement (tableau 8), les valeurs atteintes étant de 2 et 7 fois plus faibles que les minima requis. Tout au plus peut-on remarquer qu'un accroissement de la finesse de mouture de 62 % active la réaction initiale de 180 %. La résistance à 6h est presque triplée, mais n'influe que très peu sur sa capacité totale de réaction (l'augmentation à 24h n'est que de 34 %), qui demeure à un niveau très faible seulement 30 %, par rapport au niveau fixé par l'essai. Il faut cependant remarquer que la soude ne peut pas être considérée comme un activant mais alcalinisant et ne participe pas aux réactions d'hydratation.

Par contre les résistances mécaniques en compression (tableau 12) obtenues sur un ciment composé de 50 % de CPA et de 50 % de laitier moulu (équivalent à un CHF) sont satisfaisantes aussi bien à 7 jours qu'à 28 jours, principalement pour le laitier le plus finement broyé à 4150 cm<sup>2</sup>/g. Le classement du laitier selon le tableau 11 doit prendre en compte sa finesse et l'âge de durcissement (figure 7) :

- A 7 jours de durcissement, les laitiers broyés à 2480, 2900 et 3470 cm<sup>2</sup>/g sont déclassés par rapport aux indices h<sub>2</sub> et h<sub>3</sub>, car les indices sont trop faibles (0.42 et 0.57); le laitier le plus fin à 4150 cm<sup>2</sup>/g de finesse est classé en 2<sup>ème</sup> catégorie (h = 0.60).
- A 28 jours de durcissement tous les laitiers sont classés : en catégorie 1 pour celui de finesse de 2500 cm<sup>2</sup>/g, en catégorie 2 pour ceux de finessses 3000 et 3500 cm<sup>2</sup>/g et en catégorie 3 pour le plus fin, à 4000 cm<sup>2</sup>/g grâce à son indice h = 0.93.

On constate donc que la finesse de mouture du laitier est un facteur fortement influent sur sa réactivité et que le laitier d'El HADJAR présente une assez faible réactivité à court terme, mais plus intéressante à 28 jours, traduisant ainsi une cinétique de réaction plus lente que pour un laitier granulé standard.



**Figure 7** - Evolution de l'indice h à 7 et à 28 jours en fonction de la finesse du laitier granulé d'El HADJAR.

## 2.4. Conclusion

L laitier granulé d'El HADJAR est vitreux à environ 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 [6]. Sa composition chimique montre une quantité de silice (SiO<sub>2</sub>) un peu forte et une quantité d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) inférieure à la moyenne des laitiers granulés.

Plusieurs indices d'activités ont été calculés à partir de la composition chimique. Deux d'entre eux I<sub>1</sub> et I<sub>8</sub>, pour lesquels on a trouvé dans la littérature des valeurs optimales, donnent des valeurs satisfaisantes. Deux autres indices I<sub>9</sub> et I<sub>6</sub>, sont hors limites, mais le même calcul effectué sur un laitier moyen donne une valeur juste limite pour l'un (I<sub>9</sub>) et hors limite pour l'autre (I<sub>6</sub>).

La détermination normalisée de l'indice d'activité classe ce laitier dans les catégories  $h_2$  et  $h_3$ , ce qui est satisfaisant. Il est apparu que la cinétique de durcissement est assez lente et que la finesse de mouture influe grandement sur les résistances mécaniques, particulièrement pour les échéances tardives (28 jours). Pour une plus grande efficacité de ce laitier, dans un ciment de type CPJ ou CHF, un broyage d'au moins  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  avant ajout au clinker est donc recommandé.

### **3. CARACTERISATION DU LAITIER CRISTALLISE D'EL HADJAR**

#### **3.1. Propriétés physiques**

##### **3.1.1. Masses volumiques**

La **masse volumique apparente** du laitier cristallisé de haut fourneau d'EL HADJAR varie selon la porosité du granulat de 1200 à 1450 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ), la moyenne des résultats obtenus est de 1300 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ). La masse volumique apparente des laitiers Français varie dans les mêmes limites que le laitier algérien de 1200 à 1400 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ).

La **masse volumique absolue** du laitier cristallisé d'EL HADJAR est assez homogène égale à 2680 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ), légèrement inférieure à celle des laitiers français qui est de l'ordre de 2800 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ).

La **masse volumique réelle des grains** varie en fonction de la structure des grains de 2455 à 2585  $\text{kg} / \text{m}^3$ , la moyenne des résultats est de l'ordre de 2480  $\text{kg} / \text{m}^3$ . Les laitiers cristallisés français sont plus denses, la masse volumique apparente du grain variant de 2650 à 2900  $\text{kg} / \text{m}^3$ . La masse volumique des grains est assez faible en comparaison avec les valeurs données par ALEXANDRE [1] et qui correspondent aux laitiers français, ce qui a une influence directe sur la porosité et la résistance mécanique du granulat.

##### **3.1.2. Porosité**

La porosité totale du laitier cristallisé est de 13 %, calculée à partir de la masse volumique apparente et absolue du grain. La porosité des laitiers français varie de 3 à 20 (%). La porosité est un facteur important car il influe directement sur la résistance mécanique. Le laitier cristallisé a des propriétés mécaniques similaires à celle du basalte selon certains auteurs [89 – 92].

##### **3.1.3. Granulométrie**

#### **3.2. Propriétés chimiques**

##### **3.2.1. Composition chimique**

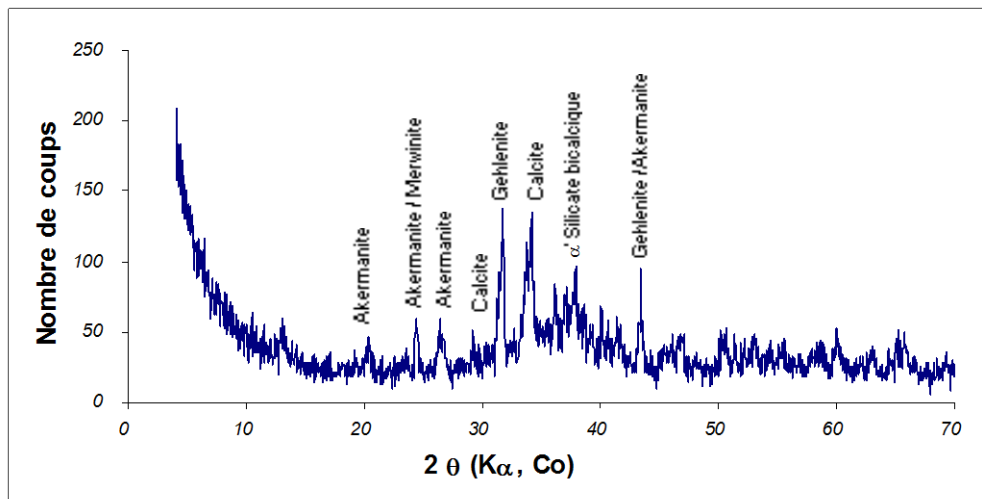
La composition chimique du laitier cristallisé est la même que celle du laitier granulé donnée au tableau 4 du § 2.2.1.

### 2.4.2. Composition minéralogique

Le tableau 13 donne les minéraux formés dans ce laitier lorsque ce matériau est refroidi lentement à l'air libre [75] déduit de l'analyse aux rayons x effectuée sur un laitier cristallisé de hauts fourneaux d'EL HADJAR présenté par la figure 8.

**Tableau 13** - Composition minéralogique du laitier cristallisé d'EL HADJAR [75]

N°	Les minéraux	Désignation	Formule chimique
1	Gehlénite	$C_3AS_2$	$3.CaO.Al_2O_3.2.SiO_2$
2	Akermanite	$C_2MS_2$	$2.CaO.MgO.2.SiO_2$
3	Calcite	CC	$CaCO_3$
4	$\alpha'$ Silicate bicalcique	$\alpha' C_2S$	$2.CaO.SiO_2$



**Figure 8** - Diffractogramme du laitier cristallisé d'EL HADJAR

### 3.3. Discussion

La composition minéralogique du laitier cristallisé donnée au tableau 13 est en accord avec les données bibliographiques, sauf que nous n'avons pas détecté la merwinite. Selon SMOLCZYK [27], ce minéral se forme dans les laitiers basiques seulement. Par contre, le silicate bicalcique sous la forme  $\alpha'$  a été détecté par DRX et selon la même référence, la larnite ne peut être détectée que dans les laitiers acides, c'est à dire lorsque le rapport  $CaO / SiO_2$  est inférieur à 1. Cependant lorsque le rapport  $CaO / SiO_2$  est inférieur à 1, cela n'est pas une limite aux laitiers hydrauliques car si la teneur en CaO est faible, elle est compensée par les teneurs en MgO et  $Al_2O_3$ .

## CONCLUSION

La caractérisation par différentes méthodes du laitier granulé, notamment sa réactivité pour une utilisation en cimenterie, a permis de mettre en évidence une certaine contradiction entre les résultats obtenus sur mortiers et les divers indices calculé, qui peuvent d'ailleurs être eux mêmes, contradictoires les uns par rapport aux autres. Ces résultats demandent à être d'une part confirmés et affinés, par une étude sur mortier de l'influence de la finesse et du taux de laitier sur les résistances mécaniques et chimiques et d'autre part validés par une étude sur béton. Ces questions seront abordées dans les chapitres 3 et 5 de cette thèse.

Aucune application dans le béton n'a été faite en Algérie et assez peu dans le monde. Ceci est dû au fait que le laitier est surtout produit sous forme de granulé, essentiellement pour l'industrie cimentière, et que le laitier cristallisé produit est utilisé exclusivement en technique routière.

L'utilisation du laitier granulé comme granulat à l'état brut dans le béton peut être envisagée surtout comme sable actif.

L'utilisation du laitier cristallisé comme granulat dans le béton peut également être intéressante, compte tenu de ses propriétés minéralogiques et physiques comparables à celles données par la bibliographie [1 et 27].

Le taux d'intégration actuel du laitier granulé dans le ciment ( 20 % en moyenne) est faible et ne permet pas d'absorber la production des hauts fourneaux d'EL HADJAR.

Le chapitre suivant a pour objectif d'étudier la possibilité d'augmenter ce taux de 20 % et de montrer et quantifier l'influence de la finesse de mouture de ce laitier.

Les ciments au laitier issus de cette première étude seront ensuite caractérisés du point de vue physique et mécanique.

**CHAPITRE III**  
**ELABORATION ET CARACTERISATION DE CIMENTS AU LAITIER**  
**GRANULE D'EL HADJAR**

# **CHAPITRE III - ELABORATION ET CARACTERISATION DE CIMENTS AU LAITIER GRANULE D'EL HADJAR**

## **INTRODUCTION**

### **1. MATERIAUX ET METHODES**

#### **1.1. Matériaux**

- 1.1.1. Le laitier
- 1.1.2. Le clinker
- 1.1.3. Le gypse
- 1.1.4. Le sable

#### **1.2. Méthodes expérimentales**

- 1.2.1. Préparation des mélanges clinker – laitier - gypse
- 1.2.2. Confection et conditions de conservation des éprouvettes
- 1.2.3. Essai d'ouvrabilité de béton
- 1.2.4. Essais mécaniques
- 1.2.5. Mesure de la chaleur d'hydratation
- 1.2.6. Mesure du retrait
- 1.2.7. pH - métrie
- 1.2.8. Analyse aux rayons X
- 1.2.9. Observation au microscope électronique à balayage

### **2. ETUDE DE L'INFLUENCE DU DOSAGE ET DE LA FINESSE DU LAITIER SUR LES RESISTANCES MECANIQUES**

- 2.1. Influence du dosage en laitier sur les résistances mécaniques**
- 2.2. Influence de la finesse de mouture du laitier sur les résistances mécaniques**
- 2.3. Discussion**

### **3. ELABORATION ET CARACTERISATION DE CPJ ET CHF**

- 3.1. Composition**
- 3.2. Cinétique de durcissement**
- 3.3. Chaleur d'hydratation**
- 3.4. Retrait et perte de masse**
- 3.5. pH des solutions de ciments et du laitier seul**
- 3.6. Analyse aux rayons X**

#### **Conclusion**

### **4. APPLICATION AU BETON STANDARD**

#### **4.1. Introduction**

#### **4.2. Matériaux**

- 4.2.1. Ciments
- 4.2.2. Granulats

#### **4.3. Formulation du béton standard**

- 4.3.1. Les données
- 4.3.2. Principe de base de la méthode
  - 4.3.2.1. Le rapport Ciment / Eau (C / E)
  - 4.3.2.2. Dosage en eau
  - 4.3.2.3. Dosage en ciment
  - 4.3.2.4. Dosage en gravier
  - 4.3.2.5. Dosage en sable
  - 4.3.2.6. Composition des bétons

#### **4.4. Résultats**

#### **4.5. Commentaires**

### **5. MODE D'ACTION DU LAITIER GRANULE SUR L'HYDRATATION DU CLINKER**

#### **5.1. Effets des additions minérales sur les ciments**

5.1.1. Effet filler

5.1.2. Effet chimique

5.1.3. Effet physique ou de surface

#### **5.2. Exploitation des résultats**

5.2.1. Résistance des mortiers de référence

5.2.2. Accroissement des résistances par effet physique

5.2.3. Accroissement des résistances par effet chimique

#### **5.3. Discussion**

### **CONCLUSION**

## INTRODUCTION

Le laitier granulé de haut fourneau d'El HADJAR est utilisé principalement par les cimenteries de l'Est (HADJR ESSOUD, HAMMA BOUZIANE et AIN TOUTA) comme ajout au clinker à raison de 25 % maximum ( 15 à 20% en moyenne) pour l'élaboration d'un ciment composé de type CPJ.

L'ajout de laitier au clinker permet en effet d'obtenir des ciments faisant prise et durcissant avec moins d'exothermicité que le ciment portland et de surcroît susceptibles de mieux se comporter en environnement agressif, de type salin ou sulfatique.

Les résultats du chapitre 1, consacré notamment l'évaluation de la réactivité du laitier granulé d'El HADJAR, a mis en évidence une réactivité moyenne permettant toutefois une utilisation cimentière.

Le but de ce travail est d'élargir la fourchette d'utilisation de ce laitier dans les ciments, en d'autres termes mettre au point des ciments de type CHF, voire CLK, et de borner cette utilisation: quel taux de laitier peut on ajouter au clinker, pour une classe de résistance visée? Quelle est l'influence de la finesse de mouture du laitier? Pour cela, nous avons dans un premier temps caractérisé les matériaux et mesuré les résistances mécaniques en fonction du taux de laitier ajouté au clinker (de 0 à 90%) et en fonction de la finesse BLAINE du laitier variant de 2500 à 4000 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Dans une deuxième partie, nous avons caractérisé le plus complètement possible un CPJ et un CHF et les avons comparé à un CPA utilisant le même clinker, afin de mieux positionner le CHF, ciment non produit et non utilisé en Algérie, par rapport aux deux autres ciments, d'usage courant. Une application au béton standard a été aussi réalisée pour confirmer et préciser les performances mécaniques.

Nous avons enfin cherché à mieux comprendre le mode d'action du laitier granulé vis à vis des phénomènes d'hydratation et de durcissement en utilisant une démarche scientifique originale.

## 1. MATERIAUX ET METHODES

### 1.1. Matériaux

#### 1.1.1. Le laitier

Le laitier granulé d'El HADJAR se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm (la courbe granulométrique est donnée au chapitre II) de couleur jaune clair, de structure poreuse, de masse volumique apparente ( $\rho_{\text{app}}$ ) de  $1000 \text{ kg/m}^3$  et de masse volumique réelle ( $\rho_{\text{abs}}$ ) de  $2800 \text{ kg/m}^3$ . La composition chimique, résultant du contrôle et du suivi de fabrication effectué par l'entreprise, est rappelée dans le tableau 1. Elle révèle une quantité de silice un peu forte et une quantité d'alumine inférieure à la moyenne des laitiers granulés. L'exploitation quantitative du diagramme de diffraction des rayons X [10] montre que le laitier d'El HADJAR est vitreux à 97 %, ce qui est un indice de bonne réactivité, mais pas nécessairement optimale. Le laitier granulé sera broyé séparément avant d'être mélangé au clinker.

**Tableau 1 - Composition chimique du laitier granulé d'El HADJAR.**

Composition chimique en %									
SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	S	MnO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Total
40,1	40,2	4,68	6,0	2,0	0,15	2,64	1,07	1.16	98

### 1.1.2. Le clinker

Le clinker utilisé est fabriqué par la cimenterie de HADJR ESSOUD; sa composition chimique est rappelée au tableau 2, et sa composition minéralogique calculée par les formules de Bogue [88] corrigées est rappelée au tableau 3. Le clinker est broyé à une seule finesse, celle utilisée par la cimenterie qui est de 3000 cm<sup>2</sup>/g.

**Tableau 2 - Composition chimique du clinker de la cimenterie de HADJR ESSOUD (%)**

Oxydes	CaO (libre)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	SiO <sub>2</sub> insoluble	Pertes au feu	SO <sub>3</sub>
Teneurs (%)	65,7 (0,1)	5,2	2,7	21,7	0,7	0,4	0,7	0,0 1	0,3	0,3	0,6

**Tableau 3 - Composition minéralogique estimée du clinker [88]**

	Minéraux	Désignation	Formule chimique	Teneur calculée (%)
1	Silicate tricalcique	C <sub>3</sub> S	3.CaO.SiO <sub>2</sub>	58.2
2	Silicate bicalcique	C <sub>2</sub> S	2.CaO. SiO <sub>2</sub>	18.5
3	Aluminate tricalcique	C <sub>3</sub> A	3.CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.3
4	Ferro-aluminate- tétra calcique	C <sub>4</sub> AF	4.CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.2

### 1.1.3. Le gypse

Le gypse utilisé est une roche naturelle provenant des carrières de Ain M'lila, et pris à la cimenterie de HADJR SOUD. Le taux de sulfate de calcium hydraté (CaSO<sub>4</sub>2H<sub>2</sub>O) dans le gypse est de 76.4 % et sa composition chimique est donnée au tableau 4.

**Tableau 4 - Composition chimique du gypse**

Teneur des oxydes en %									
CaO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	Pertes au feu
31.4	35.5	6.7	2.1	1.2	0.93	0.42	0.23	0.07	21.5

### 1.1.4. Le sable

Le sable utilisé dans cette étude et qui a servi à la confection des éprouvettes en mortier et en béton est un sable siliceux de dune, de granulométrie 0 / 1.6 mm, de module de finesse M<sub>f</sub> = 1.54, de masse volumique apparente ρ<sub>app</sub> = 1350 kg/m<sup>3</sup> et de masse volumique absolue ρ<sub>abs</sub> = 2650 kg/m<sup>3</sup>.

## 1.2. Méthodes expérimentales

### 1.2.1. Préparation des mélanges clinker – laitier – gypse

Les ciments sont préparés au laboratoire de génie civil à partir de stocks de clinker et de gypse provenant de la cimenterie de HADJR SOUD et de laitier granulé de haut fourneau

d'EL HADJAR. Les constituants sont broyés séparément et dosés en poids, de 5 à 95 % de clinker portland, de 0 à 90 % de laitier granulé avec un pas de 5% et ajout dans toutes les formulations de 5 % de gypse naturel à titre de régulateur de prise et / ou d'activant du laitier. La finesse du clinker portland est fixée à 3000 cm<sup>2</sup>/g et celle du laitier varie de 2500 à 4000 cm<sup>2</sup>/g avec un pas de 500 cm<sup>2</sup>/g.

### **1.2.2. Confection et conditions de conservation des éprouvettes**

Les éprouvettes en mortier sont prismatiques de dimensions 4.4.16 cm, confectionnées conformément à la norme EN 196 – 1 [93].

Les éprouvettes en béton sont cubiques, de dimensions 10.10.10 cm. La confection des éprouvettes est réalisée dans une bétonnière à axe inclinée, de capacité 30 litres. La mise en place du béton est réalisée sur une table vibrante selon la norme NF P 18 – 421 [94].

Les éprouvettes en mortier et en béton sont démoulées 24 h après le coulage et conservées sous l'eau à une température ambiante de 24 °C environ.

### **1.2.3. Essai d'ouvrabilité du béton**

L'essai d'ouvrabilité des bétons est réalisé par la méthode dite "Slump Test" à l'aide du cône d' ABRAMS conformément à la norme NF P 18 – 451 [95].

### **1.2.4. Essais mécaniques**

Les essais mécaniques en compression simple et en traction par flexion sont réalisés sur les éprouvettes en mortier à différentes échéances de 2, 7, 28, 90 et 360 jours. Les éprouvettes en mortier sont testées en flexion et en compression simple conformément à la norme NF EN 196 – 1 [3]. Le nombre d'éprouvettes écrasées en flexion est de 3.

**L'essai de compression simple est réalisé sur le béton selon la norme BS - 1881 [96] à différentes échéances (7, 28, 90 et 180) jours et le nombre d'éprouvettes écrasées par échéance est égal à 6.**

### **1.2.5. Mesure de la chaleur d'hydratation**

Dans le cadre de notre étude, il s'agit d'évaluer l'effet du taux d'addition de laitier au clinker portland sur les variations de températures, les flux thermiques et les quantités de chaleur dégagées, car ce sont ces derniers qui vont conditionner en partie le comportement des ciments à court, moyen et long termes. L'essai est réalisé sur trois types de ciment (CPA, CPJ et CHF). Les variations de température sont évaluées à l'aide du calorimètre LANGAVANT. La calorimétrie semi adiabatique LANGAVANT est définie par la norme NF P 15 – 436 [97]. Cette méthode consiste à introduire un mortier normal, dès sa gâchée, dans un vase DEWAR afin de déterminer d'après l'évolution de la température la quantité de chaleur dégagée.

### **1.2.6.. MESURE DU RETRAIT**

A l'aide d'un rétractomètre, conformément à la norme NF P 15 – 433 [98], on mesure les déformations de retrait dans l'axe des éprouvettes confectionnées en mortier normal de dimensions 4.4.16 (cm), entre deux plots en laiton noyés dans le matériau au coulage. Les éprouvettes sont conservées dans une atmosphère contrôlée à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %.

### 1.2.7. pH - métrie

La mesure du pH des ciments et du laitier granulé a été réalisée sur des solutions diluées dont le rapport Solide/Eau est de (1/ 10) à l'aide d'un ph-mètre à enregistrement automatique, la température pendant l'essai étant de 20 ° C.

### 1.2.8. Analyse aux rayons X

La diffraction des rayons X est un moyen fiable et rapide dans la détection des différents constituants minéralogiques. Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes ( $0.1 < \lambda < 10$  Angströms). Les cristaux constituent des réseaux naturels dont les intervalles caractéristiques (intervalle entre plans réticulaires) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X. En conséquence, les rayons X sont diffractés par les cristaux et donnent des phénomènes d'interférence.

Chaque espèce cristalline donne un diagramme caractéristique, c'est à dire un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure cristalline. Les analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées à l'aide d'un diffractomètre Siemens D 5000, utilisant une anticathode de cobalt ( $K\alpha$  Co,  $\lambda = 1.789 \mu$ ), sur une plage de 10 à 70° (2 $\theta$ ) avec un pas d'avancement de 0.02° et un temps de comptage de 1s, sur des poudres anhydres et des pâtes pures hydratées, broyées et tamisées à 80  $\mu$ m .

## 2. ETUDE DE L'INFLUENCE DU DOSAGE ET DE LA FINESSE DU LAITIER SUR LES RESISTANCES MECANIQUES :

**2.1. Influence du dosage en laitier sur les résistances mécaniques en compression (figures 1 à 4) et en traction par flexion (figures 5 à 8).**

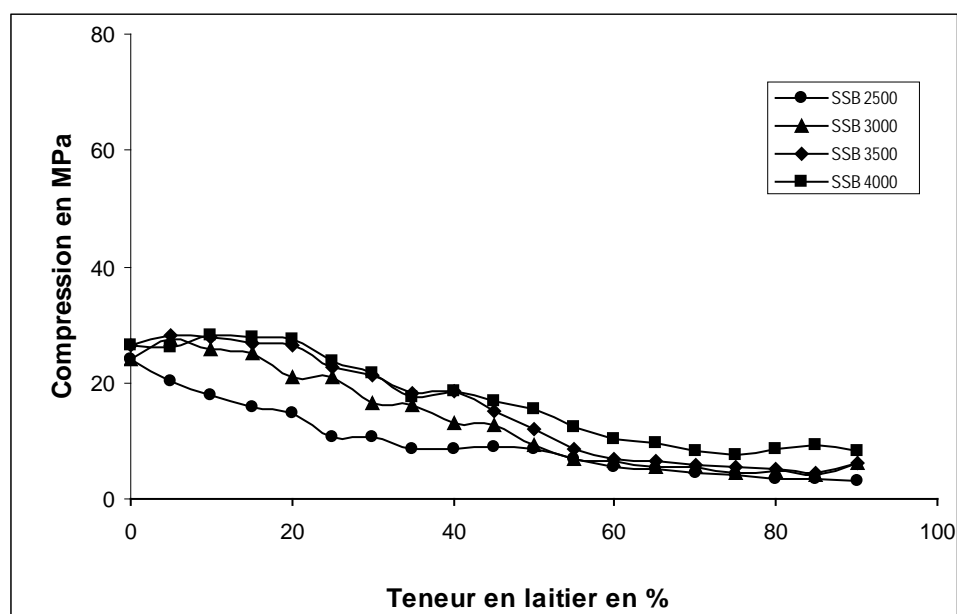
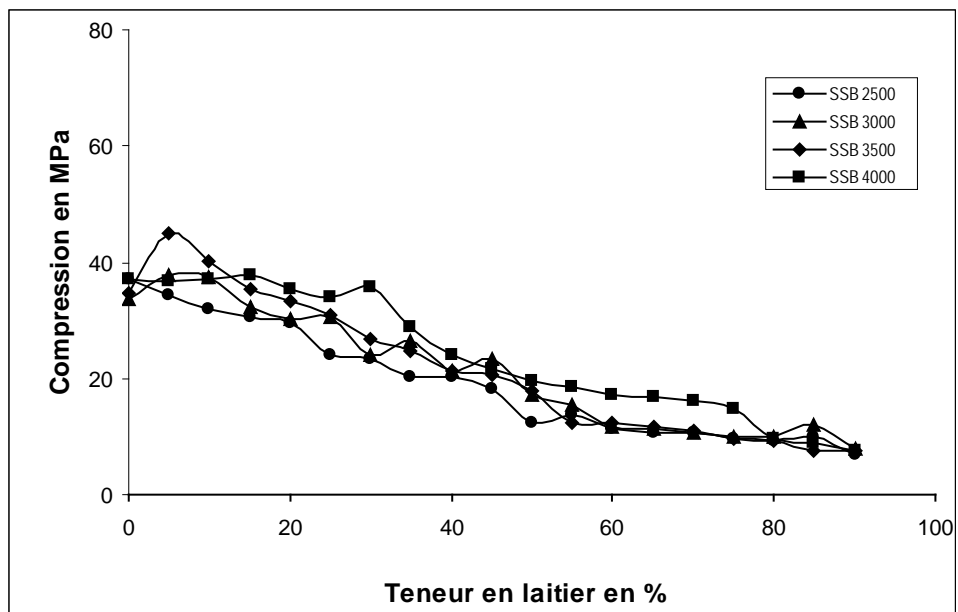
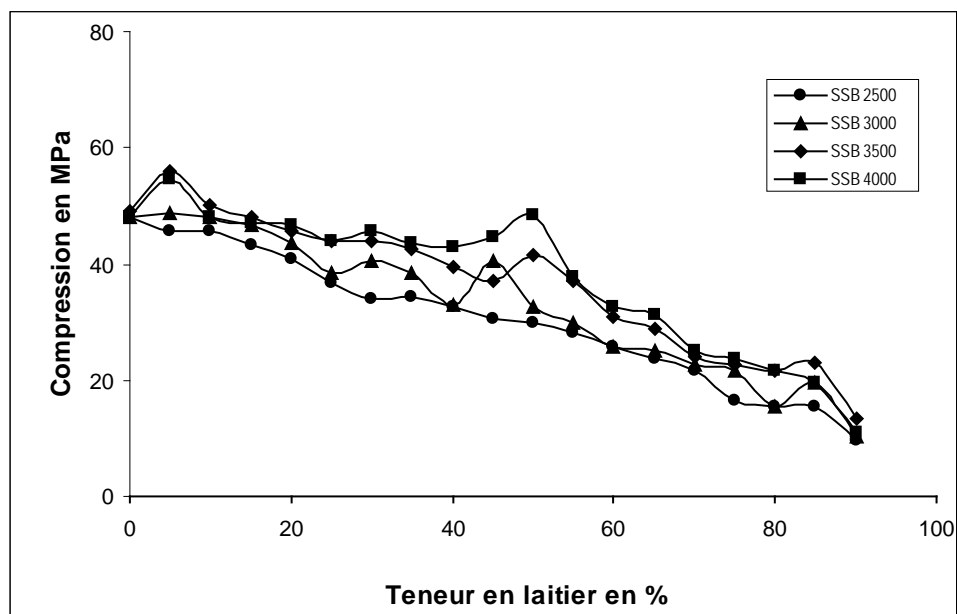


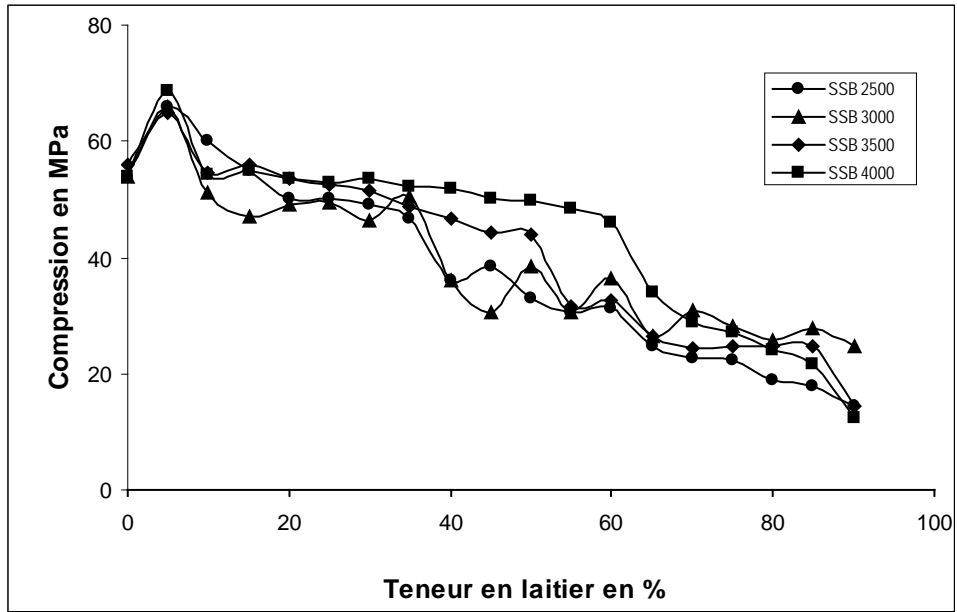
Figure 1 – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 2 jours



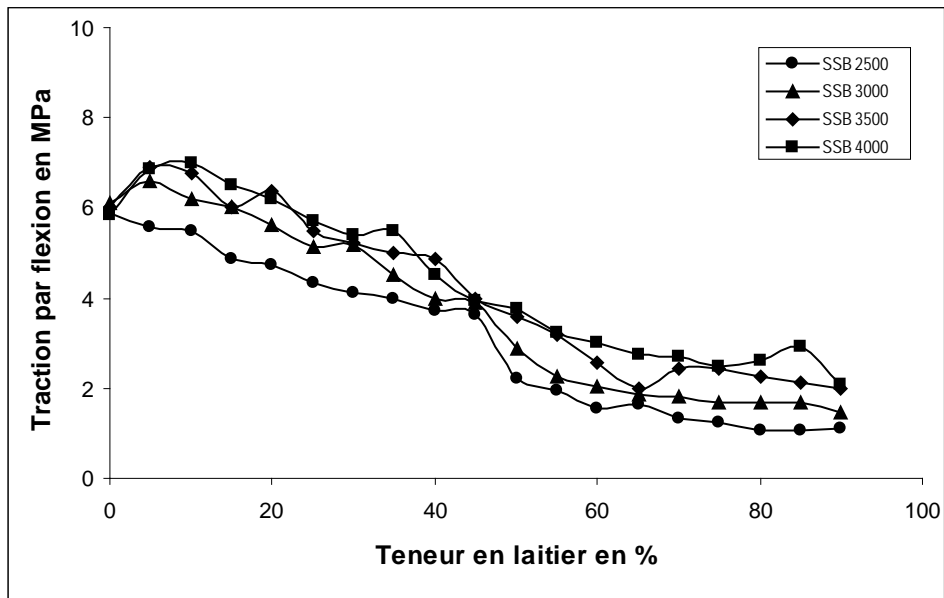
**Figure 2** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 7 jours



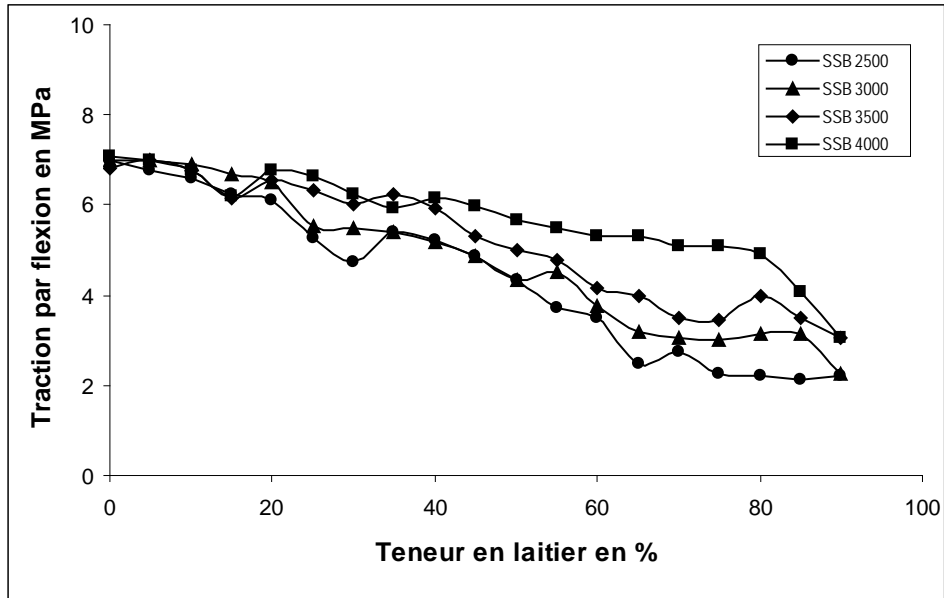
**Figure 3** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 28 jours



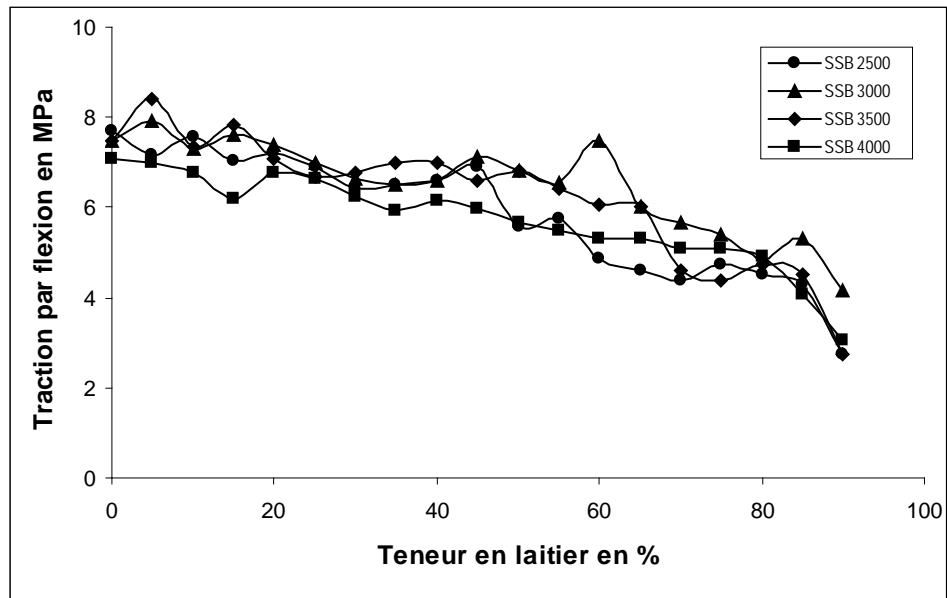
**Figure 4** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 90 jours



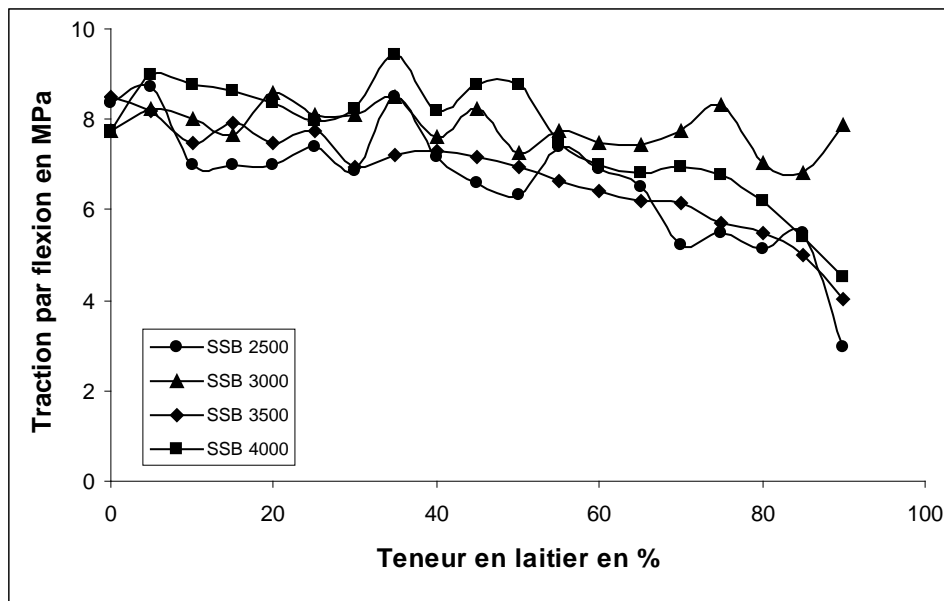
**Figure 5** – Influence du taux de laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 2 jours



**Figure 6** – Influence du taux de laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 7 jours



**Figure 7**– Influence du taux de laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 28 jours

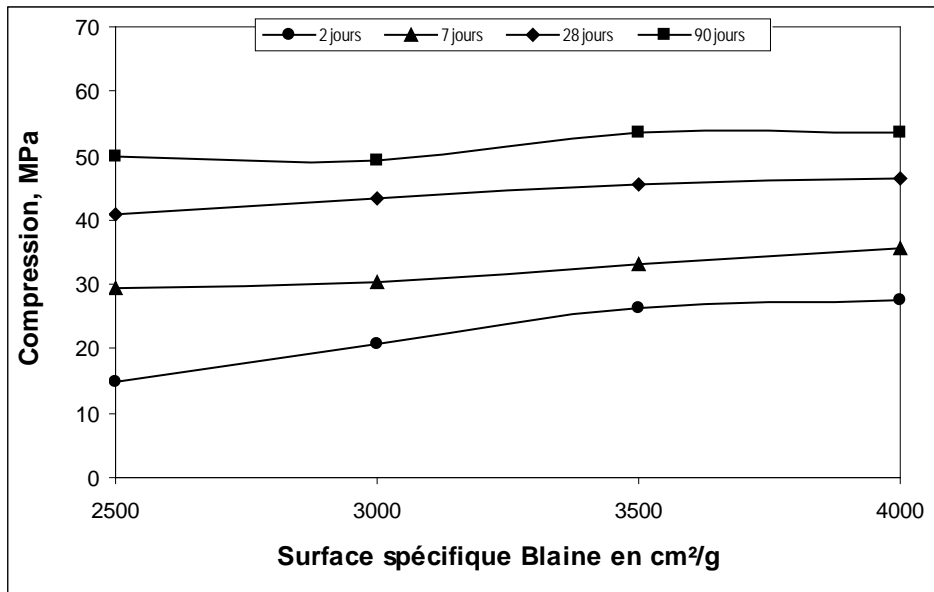


**Figure 8** – Influence du taux de laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 90 jours

L'augmentation du dosage en laitier dans le ciment conduit à une diminution approximativement directement proportionnelle des résistances mécaniques, effet plus fort en compression qu'en traction. Une étude plus attentive montre, outre une certaine dispersion des résultats, un effet d'activation pour les faibles % de laitier, jusqu'à 30% de laitier environ. Cette plage de % de laitier a d'ailleurs tendance à augmenter avec l'âge du mortier, surtout en traction - flexion, signe d'une synergie réactionnelle certaine entre le laitier et le clinker. Pour des dosages de 5 à 10 % on constate une augmentation des résistances mécaniques dû probablement à une germination hétérogène. Ces hypothèses seront reprises et développées dans la dernière partie de ce chapitre.

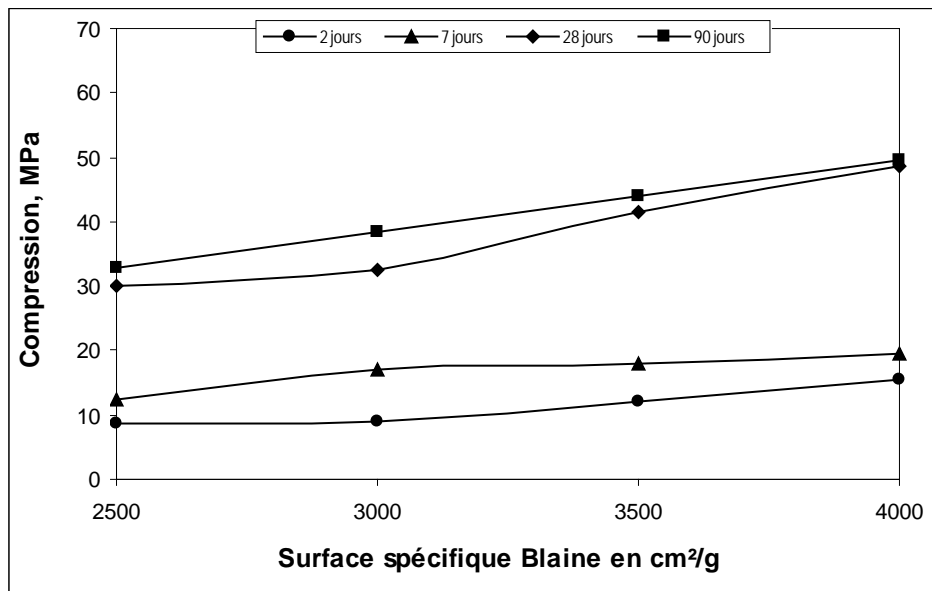
## 2.2. Influence de la finesse de mouture du laitier sur les résistances mécaniques

La finesse de mouture du laitier granulé agit globalement favorablement sur les résistances mécaniques comme l'indique les figures 9 et 10. Ces figures donnent en effet pour chaque échéance et pour deux pourcentages de laitier (20 et 50 %), l'influence de la surface spécifique du laitier sur les résistances mécaniques en compression. Ces deux pourcentages correspondent à deux types de ciment bien définis, un CPJ et un CHF qui sont d'ailleurs étudiés au § suivant. Un broyage du laitier poussé au minimum à 3500 cm<sup>2</sup>/g est plus favorable pour les résistances mais suppose un broyage séparé, car actuellement le laitier est industriellement co-broyé avec le clinker à environ une finesse de 3000 cm<sup>2</sup>/g environ.



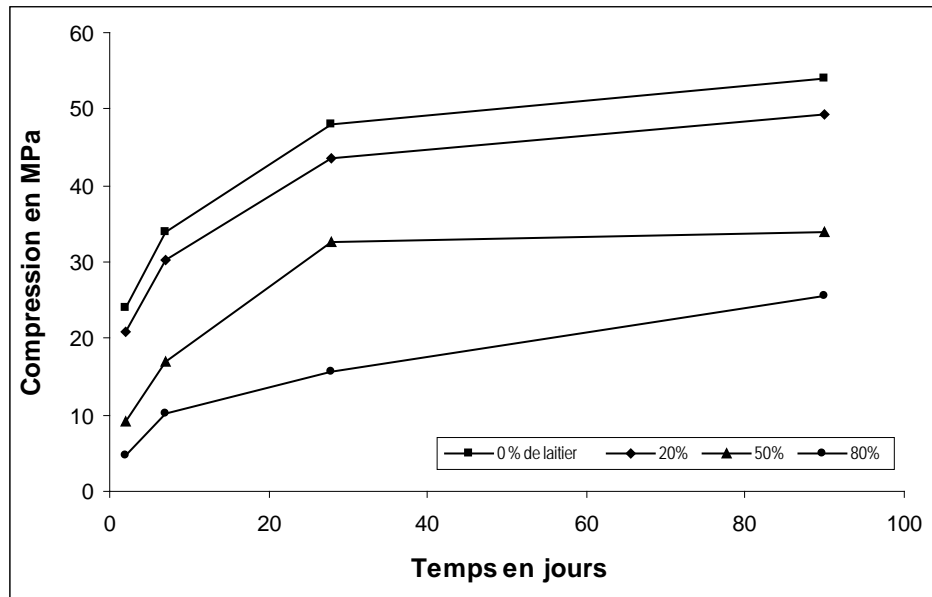
**Figure 9** - Influence de la surface spécifique BLAINE du laitier granulé sur la résistance à la compression de mortier confectionné avec ciment à 20 % de laitier.

L'influence de la finesse de laitier sur les résistances mécaniques en compression est nette pour le CHF à partir de 28 jours (figure 10).



**Figure 10** - Influence de la surface spécifique BLAINE du laitier granulé sur la résistance à la compression de mortier confectionné avec ciment à 50 % de laitier.

La cinétique de développement des résistances (figure 11 pour le laitier broyé à 3000 cm<sup>2</sup>/g) est assez lente pour les forts pourcentages, tout en devenant plus favorable à partir de 28 jours jusqu'à 90 jours et même au delà comme on le verra au § suivant.



**Figure 11** – Cinétique de durcissement en compression de liants contenant 0,20,50 et 80 % de laitier moulu à 3000 cm<sup>2</sup>/g

## Discussion

Cette première étude justifie le choix actuel des cimentiers utilisant ce laitier, de limiter le dosage à (15 – 20) % en moyenne. Cependant, vu l'intérêt du laitier concernant les résistances à long terme et sa résistance supposée aux agents agressifs, il est tentant d'élaborer un CHF contenant 50% de laitier et de le caractériser aussi complètement que possible, en le comparant à deux ciments de même composition que ceux produits actuellement: le CPA et un CPJ à 20% de laitier. La finesse de broyage du laitier sera de 3000 ou 3500 cm<sup>2</sup>/g, afin de prendre en compte ce qui est respectivement possible et souhaitable. L'objectif de cette deuxième étude sera de mieux décrire l'action du laitier, à ces dosages élevés, et de positionner ce nouveau ciment dans le cadre de la normalisation algérienne NA 442.[53]

## 3. ELABORATION ET CARACTERISATION DE CPJ ET CHF

### 3.1. Composition des ciments

La composition des ciments d'étude est donnée au tableau 5.

**Tableau 5 - Composition des ciments**

Type de ciment	Dosage des constituants en %		
	Clinker	Laitier	Gypse
<b>CPA</b>	95	0	5
<b>CPJ</b>	75	20	5
<b>CHF</b>	45	50	5

Les caractéristiques physiques et mécaniques des ciments d'étude (CPA, CPJ et CHF) sont données dans le tableau 6. Nous notons pour le CHF une demande en eau plus faible et une cinétique de prise nettement plus lente.

**Tableau 6 - Caractéristiques des ciments**

Caractéristiques	Unité	Type de ciment		
		CPA	CPJ	CHF
Masse volumique apparente	Kg / m <sup>3</sup>	1100	1070	1060
Masse volumique absolue	Kg / m <sup>3</sup>	3100	3080	2950
Consistance normale	%	25	25	24
Prisométrie VICAT				
- début de prise	h et min	2 h 07 min	2 h 10 min	3 h 10 min
- fin de prise	h et min	3 h 06 min	3 h 05 min	4h 05 min
Retrait à 28 jours	□m/m	810	790	710
Résistance vraie à 28 jours	MPa	44	42	38

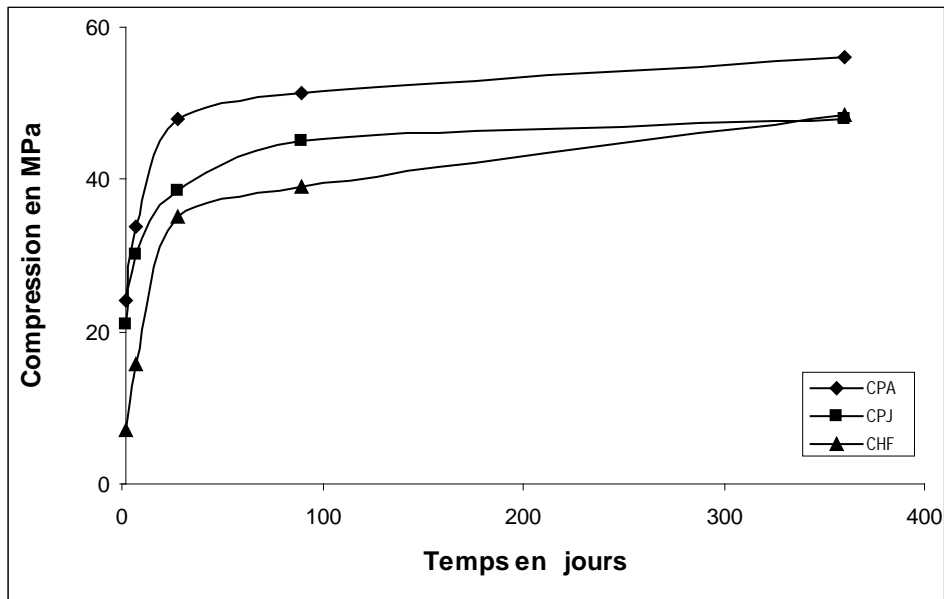
Ces caractéristiques ont été déterminées avec un clinker broyé à 3000 cm<sup>2</sup>/g et un laitier broyé à 3500 cm<sup>2</sup>/g de surface spécifique Blaine.

### 3.2. Cinétique de durcissement des ciments (CPA, CPJ et CHF)

Dans cette partie de l'étude le laitier sera broyé à deux finesses (3000 et 3500 cm<sup>2</sup>/g) et le clinker à une seule finesse de 3000 cm<sup>2</sup>/g.. Les résultats sont présentés dans les tableaux 7 et 8.

**Tableau 7 – Résultats des essais de traction - flexion et de compression sur trois types de ciment (finesse du laitier 3000 cm<sup>2</sup>/g)**

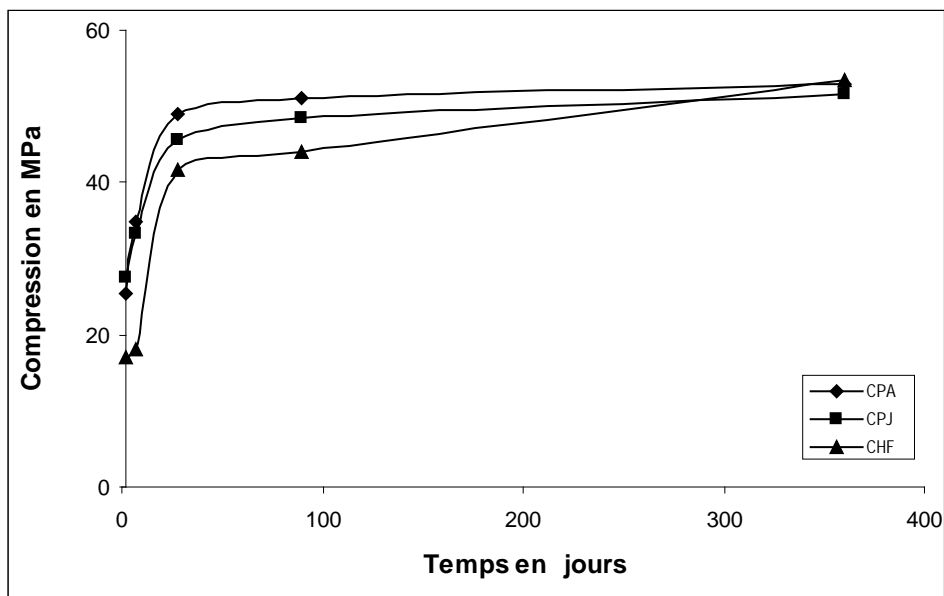
Type de ciments	Résistance à la flexion (MPa)					Résistance à la compression (MPa)				
	2	7	28	90	360	2	7	28	90	360
CPA	6	6,8	7,5	8,5	11,3	24,1	33,8	48	51,4	56
CPJ	6,3	6,6	7,1	7,9	10,2	21	30,2	38,6	45	48
CHF	3,6	5	6,8	7,3	9,0	7,1	15,6	35	39	48,5



**Figure 12** - Cinétique de durcissement comparée de trois ciments CPA, CPJ (20 % de laitier) et CHF (50% de laitier)- SSB 3000 cm<sup>2</sup>/g

**Tableau 8** – Résultats des essais de traction - flexion et de compression sur trois types de ciment (finesse du laitier : 3500 cm<sup>2</sup>/g)

Type de ciments	Résistance à la flexion, MPa					Résistance à la compression, Mpa				
	2	7	28	90	360	2	7	28	90	360
CPA	6,1	7,0	7,5	7,8	11,3	25,5	34,8	49	51	53
CPJ	5,6	6,5	7,4	8,6	10	27,6	33,2	45,6	48,5	51,5
CHF	2,9	4,4	6,8	7,3	8,5	17	18	41,6	44,1	53,5



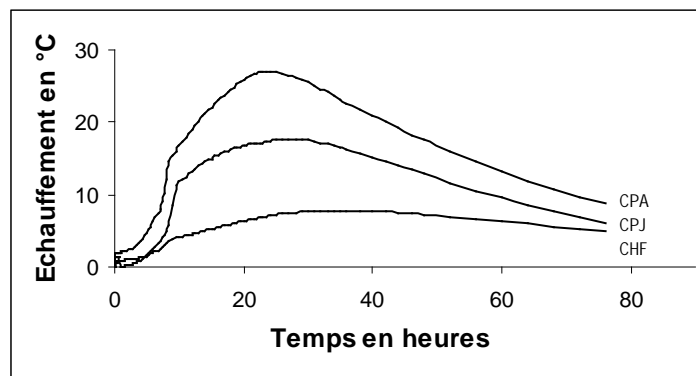
**Figure 13** - Cinétique de durcissement comparée de trois ciments CPA, CPJ (20 % de laitier) et CHF (50% de laitier, SSB 3500 cm<sup>2</sup>/g)

Les essais avec le CPA ont été menés quatre fois, pour chaque étude de finesse. Les résultats montrent une dispersion relativement faible et permettent de ce fait d'avoir une idée sur la variance expérimentale :  $\pm 0.4$  MPa en traction - flexion et  $\pm 1.5$  MPa en compression.

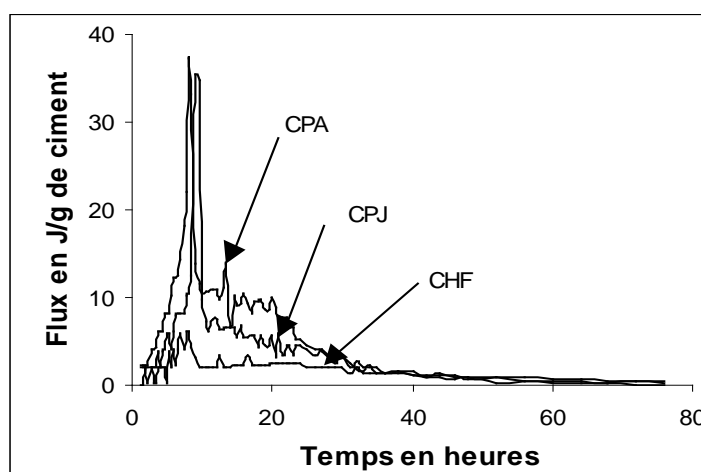
Les courbes cinétiques de durcissement (figures 12 & 13 ) montrent bien la plus faible cinétique des ciments au laitier par rapport au CPA. On note également l'effet favorable de la finesse du laitier sur cette cinétique de durcissement ainsi que sa plus longue durée de durcissement, de sorte que les résistances au bout d'un an des CHF se rapprochent quelque peu de celles du CPA, ou sont même supérieures pour le laitier broyé à  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

Un calcul de l'indice d'efficacité hydraulique à 28 jours au sens de la norme NF P 18-506 [24] donne  $i = 0.729$  et  $i = 0.849$  dans le cas du laitier respectivement moulu à 3000 et  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  de surface spécifique. Le coefficient d'équivalence  $k$  au sens de la norme européenne EN 450 [99] donne toujours à 28 jours des valeurs respectivement égales à 0.59 et 0.77 . On note ici aussi la forte influence de la finesse de mouture du laitier

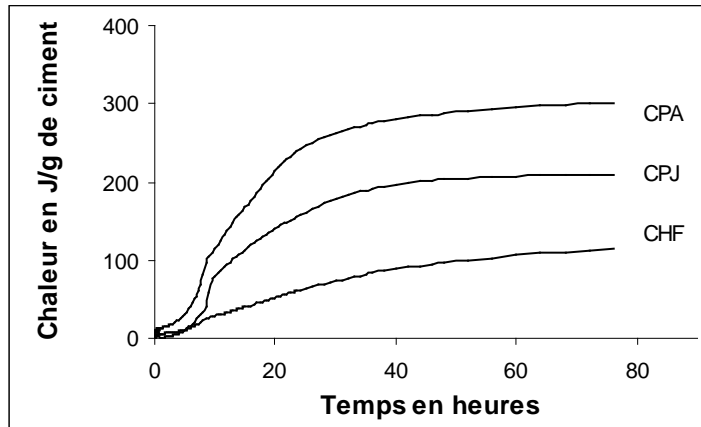
### 3.3. Chaleur d'hydratation des ciments (CPA, CPJ et CHF)



**Figure 14-** Echauffement comparé de trois types de ciments CPA – CPJ – CHF



**Figure 15 -** Flux thermique de trois types de ciments CPA – CPJ – CHF



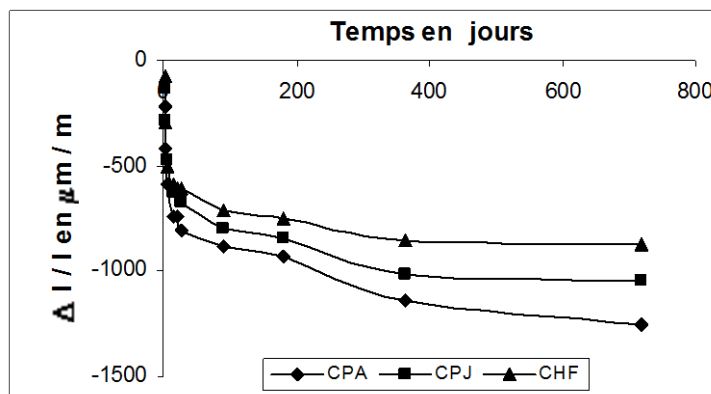
**Figure 16 - Chaleur dégagée de trois types de ciments CPA – CPJ – CHF**

Les résultats obtenus par calorimétrie pseudo - adiabatique (figures 14, 15 & 16) sont conformes aux données bibliographiques [1], à savoir une diminution de l'exothermicité d'un liant lorsqu'on ajoute du laitier au clinker. Les valeurs maximales des quantités de chaleur enregistrées sur les trois ciments sont données dans le tableau 9 et comparées avec celles proposées par Alexandre [1]. Nous notons une très faible valeur pour le CHF, inférieure à la fourchette proposée.

**Tableau 9 - Quantités de chaleur dégagées par les ciments étudiés**

Type de ciment	Quantité de chaleur dégagée en J / g de ciment	
	Mesurées	Selon Alexandre
CPA de classe élevée	-	360 – 420
CPA ordinaire et CPJ	CPA : 300.5 – CPJ : 209.4	250 – 360
CHF et CLK	CHF : 115	190 – 260

### 3.4. Retrait et perte de masse des ciments (CPA, CPJ et CHF)



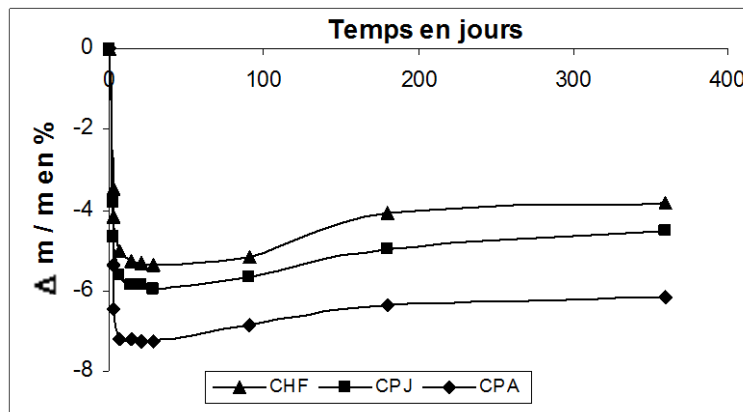
**Figure 17- Evolution comparée du retrait de trois ciments CPA – CPJ – CHF**

La présence de laitier dans le ciment diminue sensiblement le retrait (figure 17), le tableau 10 donnant pour chaque ciment la valeur à 28 jours, comparativement à la norme NA

[62]. Notons à ce sujet que les nouvelles normes européennes ne reprennent plus en compte ce paramètre.

**Tableau 10** - Valeurs du retrait mesurées sur trois types de ciments

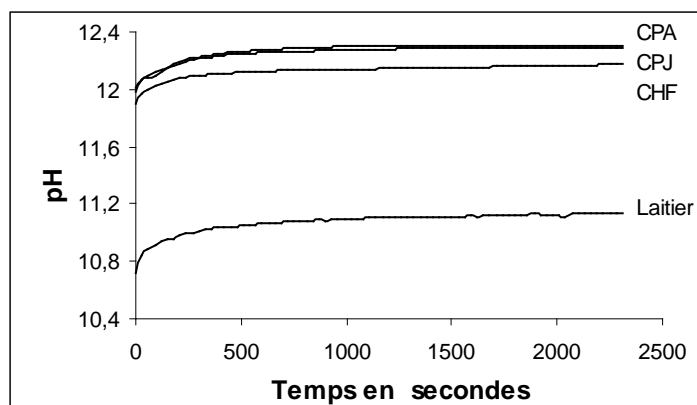
Classe de résistance	Retrait en $\square$ m / m			
	La norme à 28 jours [13]	Types de ciments		
		CPA	CPJ	CHF
35 et 45	< 800	810	630	610
45 R et 55	<1000	-	-	-



**Figure 18** - Evolution comparée de la perte de masse de trois ciments CPA – CPJ – CHF

La masse des éprouvettes diminue normalement avec le séchage pendant les premiers mois, puis se stabilise et augmente ensuite à cause d'un phénomène de carbonatation superficielle (figure 18).

### 3.5. pH des solutions de ciments (CPA, CPJ et CHF) et du laitier seul



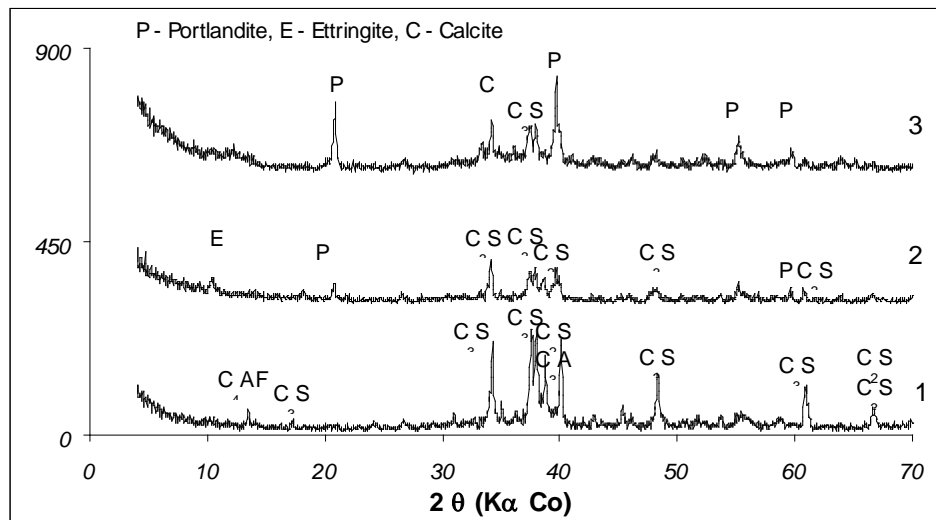
**Figure 19** - Valeurs comparées du pH de trois types de ciments (CPA – CPJ – CHF) et du laitier granulé

La mesure du pH sur des solutions diluées des trois ciments (CPA, CPJ et CHF) fait apparaître (figure 19) pour la solution de CHF un pH égal à 12,17, plus faible par rapport au CPA, résultat logique quand on note pour le laitier brut un pH voisin de 11 et pour le CPA une valeur supérieure à 12,3 (tableau 11).

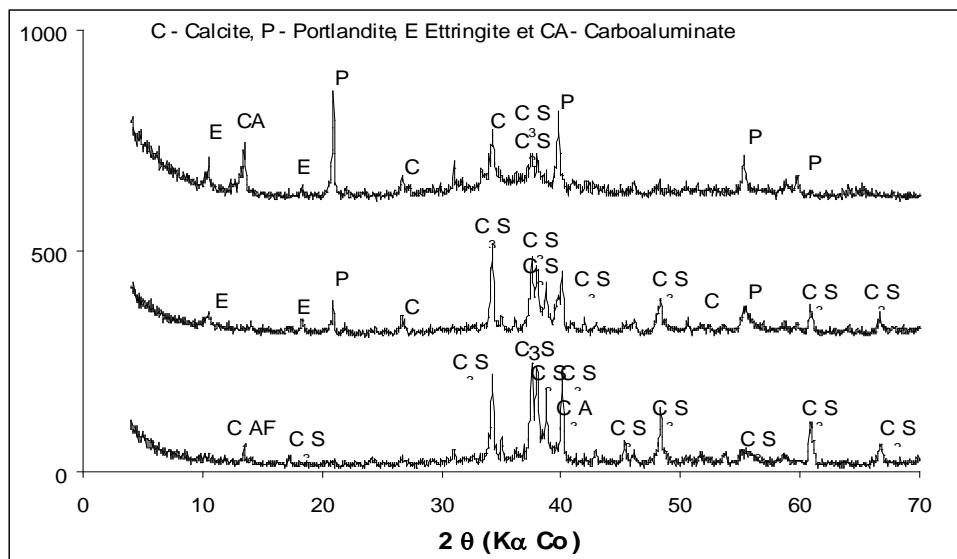
**Tableau 11** - Valeurs du pH de trois ciments (CPA, CPJ et CHF) et du laitier

Matériaux	CPA	CPJ	CHF	Laitier
PH	12.31	12.29	12.17	11.14

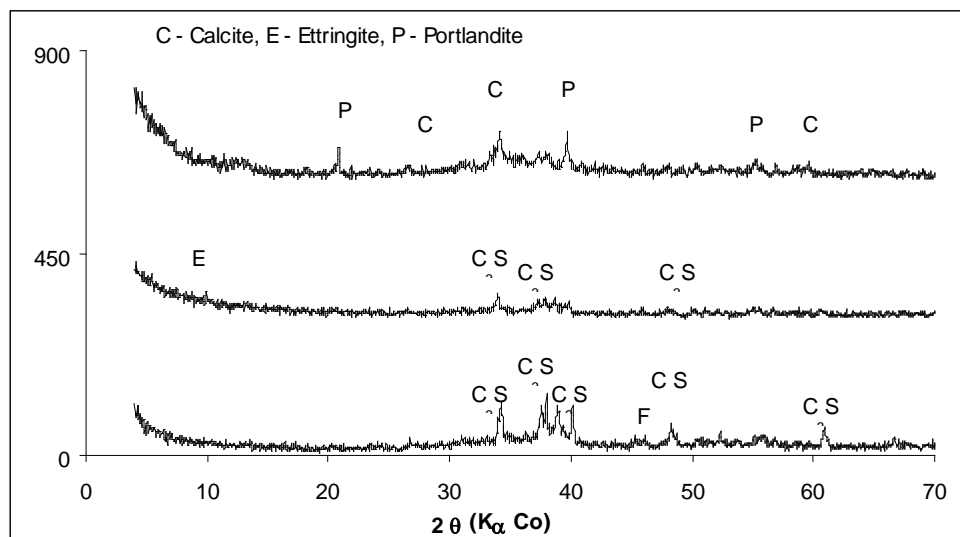
**3.6. Analyse aux rayons X des ciments (CPA , CPJ et CHF) anhydres et hydraté**  
(figures 20, 21 et 22)



**Figure 20-** Diffractogramme du CPA (1 anhydre - 2 hydraté à 2 j - 3 hydraté à 360 j)



**Figure 21** - Diffractogramme du CPJ (1. Anhydre - 2. Hydraté à 2 j - 3. Hydraté à 360 j)



**Figure 22** - Diffractogramme du CHF (1. Anhydre - 2. Hydraté à 2 j - 3. Hydraté à 360 j)

L'analyse par diffraction des rayons X du CPA anhydre permet de mettre en évidence les minéraux classiques du clinker notamment le silicate tricalcique, le silicate bicalcique ( $\beta$ ), l'aluminate tricalcique et le ferro – aluminate tétracalcique (figure 20).

Le diagramme du même ciment à 2 jours (figure 20) montre un début d'hydratation avec l'apparition de la portlandite, de l'ettringite et la diminution des anhydres notamment le silicate tricalcique, le silicate bicalcique ( $\beta$ ), et l'aluminate tricalcique. Cette tendance d'accroissement du pic de portlandite au dépend des pics des anhydres se confirme bien sûr à 360 jours avec de surcroît une apparition très nette du pic de la calcite, signe d'une certaine carbonatation de la pâte de ciment.

L'analyse effectuée dans les mêmes conditions sur le CPJ anhydre et sur les pâtes hydratées au mêmes échéances (figure 21) donne globalement les mêmes renseignements: mêmes hydrates, mêmes évolutions des pics.

Les résultats sont assez différents en ce qui concerne le CHF anhydre et hydraté (figure 22). Le diagramme du CHF diffère de celui du CPA ou CPJ par l'apparition de la bosse vitreuse du laitier, qui était peu ou pas visible sur le CPJ, eu égard au faible % de laitier dans ce dernier ciment. Nous notons aussi la faible vitesse d'hydratation, puisque à 2 jours, les pics d'hydrates sont très peu visibles. A 360 jours, les pics de portlandite et de calcite sont visibles, mais de bien moindre importance que dans le cas des CPJ et surtout CPA.

D'autres hydrates ont été identifiés, résultant de l'hydratation du laitier activé par le gypse et la portlandite. Dans les laitiers pauvres en alumine comme le laitier d'El HADJAR, on obtient en effet de l'aluminate de calcium hydraté ( $C_4AH_{13}$ ) majoritairement par rapport à la géhlenite hydratée [34].

Nous n'avons pas par contre détecté de minéraux contenant la phase magnésie. Il est vrai que DRON [35] ne détecte lui aussi aucun produit contenant le magnésium lorsque le laitier contient moins de 5 % de magnésium ( $MgO$ ), et selon d'autres travaux l'hydroxyde de magnésium ( $Mg(OH)_2$ ) se trouve sous forme de solution solide dans les CSH [35], donc dans la partie amorphe.

## **Conclusion**

Les résistances aux jeunes âges (2 et 28 jours) dépendent de la quantité de laitier dans le ciment, ce qui explique la lente cinétique de durcissement des ciments au laitier.

La croissance des résistances mécaniques d'un CHF (50 de laitier) se fait entre 28 et 90 jours et continue d'augmenter au-delà de 360 jours.

Les ciments à forte teneur en laitier se caractérisent par une faible chaleur d'hydratation, qui peut être mise à profit pour le coulage d'éléments massifs et le bétonnage par temps chaud.

Le dosage en laitier d'El HADJAR dans les ciments dépend du type de ciment, de la classe de résistance et de l'usage du ciment qu'on veut fabriquer. Cependant l'élaboration de ciment type CHF avec un dosage en laitier de 50 % est possible à condition de broyer suffisamment le laitier à une finesse de 3500 à 4000  $cm^2/g$  avant de le mélanger au clinker.

Nous avons en effet montré que la finesse de mouture du laitier exerçait un effet favorable sur les résistances mécaniques, notamment à court terme.

Dans cette étude sur les trois ciments, nous avons donc pu mettre en évidence l'intérêt d'augmenter le taux de laitier dans le ciment: hydratation plus lente avec moins d'exothermicité mais plus longue, de sorte que les résistances à très long terme sont équivalentes. Il nous a paru intéressant de vérifier ces résistances sur béton standard.

## 4. APPLICATION AU BETON STANDARD

### 4.1. Contexte de l'étude

L'étude des bétons utilisant des ciments au laitier permet de valider les résultats obtenus sur les mortiers, et de vérifier l'influence du type de ciment sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la composition du béton. Nous avons utilisé la méthode des "volumes absolus" élaborée par B.G. SKRAMTAIEV [2].

Cette méthode pratique repose sur une hypothèse simple qui dit qu'un béton frais correctement formulé et vibré se rapproche de la compacité maximale. Se basant sur cette hypothèse, on peut dire que la somme des volumes absolus des matériaux entrant dans la composition d'un m<sup>3</sup> de béton est égale au volume de 1000 litres du béton composé.

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g} = 1000 \text{ (litres)}, \quad (1)$$

C, E, S et G : respectivement les dosages de ciment, d'eau, de sable et de gravier pour 1 m<sup>3</sup> de béton.

$\rho_c$ ,  $\rho_e$ ,  $\rho_s$  et  $\rho_g$  : respectivement les masses volumiques réelles de ciment, d'eau, de sable et de gravier en kg /l.

### 4.2. Matériaux

#### 4.2.1. Les ciments

Les ciments utilisés dans cette étude sont le CPA, CPJ et CHF dont les compositions et toutes les caractéristiques sont données au tableau 6 de ce même chapitre.

#### 4.2.2. Les granulats

Le sable utilisé dans cette étude est du sable naturel de dune, siliceux et fin provenant de la région d'Annaba. Le gros granulat est un gravier concassé, roche naturelle calcaire d'origine locale extraite des carrières de OUED EL ANNEB dans la région d'Annaba.

Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 12

**Tableau 12-** Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Gravier concassé
Masse volumique apparente	Kg /m <sup>3</sup>	1350	1450
Masse volumique absolue	Kg /m <sup>3</sup>	2630	2700
d/D	-	0/ 3	5/20
Module de finesse	-	1.54	-

Remarque : la masse volumique réelle et la masse volumique absolue des granulats sont voisines.

Les courbes granulométriques du sable et du gravier sont présentées sur la figure 23

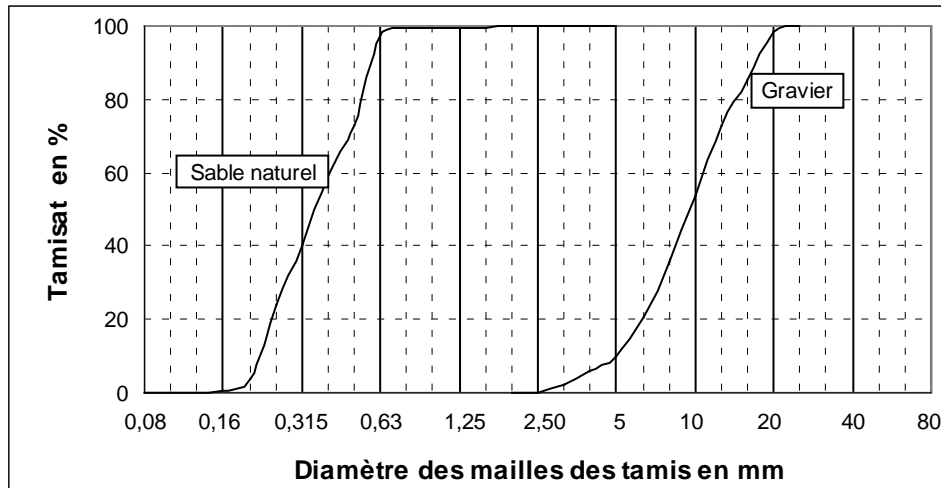


Figure 23 – Courbes granulométriques du sable naturel et du gravier concassé

### 4.3. Formulation du béton standard

#### 4.3.1. Les données

**Type de béton: Ordinaire**

Résistance du béton projetée à 28 jours:  $R_b = 25$  MPa

Résistance vraie du ciment :  $R_c = 30$  MPa

**Béton plastique: affaissement = 5 cm**

Gravier concassé et sable roulé :  $A' = 0.60$

#### 4.3.2. Principe de base de la méthode

##### 4.3.2.1. Le rapport Ciment / Eau (C / E)

- Pour les bétons à rapport ciment / eau (C / E) > 2.5

$$R_b = A' R_c \left( \frac{C}{E} + 0,5 \right) \quad (2)$$

$$\text{d'ou } \frac{C}{E} = \frac{R_b}{A' R_c} - 0,5 \quad (3)$$

$R_b$  : Résistance du béton (MPa)

$A'$  : Coefficient qui tient compte de la qualité des granulats (tableau 13)

$R_c$  : Résistance vraie du ciment (MPa)

C : Dosage en ciment (kg / m<sup>3</sup> de béton)

E : Dosage en eau (kg / m<sup>3</sup> de béton)

- Pour les bétons à rapport ciment / eau (C / E) ≤ 2.5

$$R_b = A.R_c \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (4)$$

$$\text{d'ou } \frac{C}{E} = \frac{R_b}{A.R_c} + 0,5 = 1.88 \quad (5)$$

A' = Coefficient qui tient compte de la qualité des granulats (tableau 13)

**Tableau 13 - Valeurs des coefficients A et A'**

Qualité des granulats	A	A'
Bonne	0.65	0.43
Moyenne	0.60	0.40
Médiocre	0.55	0.37

#### 4.3.2.2. Dosage en eau

Le dosage en eau peut être pris dans le tableau 10 en fonction de la valeur D<sub>max</sub> des granulats et de la plasticité recherchée du béton frais (185 litres).

**Tableau 14 - Quantité d'eau nécessaire au béton**

Plasticité du béton frais		Quantité d'eau nécessaire en fonction de D <sub>max</sub> en l / m <sup>3</sup>		
Affaissement, cm	Maniabilité, secondes	D <sub>max</sub> en mm		
		10	<u>20</u>	40
0	150 – 200	145	130	120
0	90 – 120	150	135	125
0	60 – 80	160	145	130
0	30 – 50	165	150	135
0	15 – 30	175	160	145
1	15 – 30	175	170	155
2	15 – 30	185	175	160
3	15 – 30	195	180	165
<u>5</u>	15 – 30	200	<u>185</u>	170
7	15 – 30	205	190	175
8	15 – 30	210	195	180
10	15 – 30	215	200	185

Remarque :

- Pour les granulats concassés, il peut être nécessaire d'augmenter le dosage en eau de 10l/m<sup>3</sup>.
- Pour le sable fin, il peut être nécessaire d'augmenter le dosage en eau de 10 l / m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2.3. Dosage en ciment

Le dosage en ciment ne peut pas être inférieur aux limites minimales préconisées par les normes (350 kg / m<sup>3</sup>)

$$C = \left(\frac{C}{E}\right) \cdot E \quad (\text{kg / m}^3) \quad (6)$$

C / E = 1.88 et E théorique = 185 l / m<sup>3</sup> de béton ==> C = 350 kg / m<sup>3</sup>

Le dosage en ciment est conservé égal à 350 kg / m<sup>3</sup> pour les trois bétons.

#### 4.3.2.4. Dosage en gravier

Le mélange ciment – sable remplit les vides entre les gros granulats avec un certain écartement des grains de gravier

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{S}{\rho_s} = V_{cav(g)} \frac{G}{\rho_{app(g)}} \cdot \alpha, \quad (7)$$

S : Dosage en sable pour 1 m<sup>3</sup> de béton frais

G : Dosage en gravier pour 1 m<sup>3</sup> de béton frais

$\rho_c$   $\rho_e$   $\rho_s$  : Masses volumiques réelles du ciment; de l'eau et du sable

V<sub>cav</sub> : Volume des vides entre grains de gravier (relation 8)

$$V_{cav} = \frac{\rho_{abs} - \rho_{app}}{\rho_{abs}}, \quad V_{cav} = 0.46 \quad (8)$$

$\rho_{app(g)}$  : La masse volumique apparente du gravier

$\alpha$  : Coefficient d'écartement des grains de gravier dans la masse de béton (tableau 15)

**Tableau 15** - Valeurs du coefficient  $\alpha$  en fonction du rapport E / C

Dosage en ciment dans 1 m <sup>3</sup> de béton frais	Rapport eau / ciment				
	0.4	<b>0.5</b>	0.6	0.7	0.8
	Valeur de $\alpha$				
250	-	-	1.26	1.32	1.83
300	-	1.30	1.36	1.42	-
<b>350</b>	1.32	<b>1.38</b>	1.44	-	-
400	1.40	1.46	-	-	-

En résolvant les relations (1 et 7) on obtient :

$$G = \frac{1000}{V_{cav} \frac{\alpha}{\rho_{app(g)}} + \frac{1}{\rho_g}}, \quad (\text{kg / m}^3) \quad (9)$$

#### 4.3.3.5. Dosage en sable

$$S = [1000 - (\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{G}{\rho_g})] \rho_s \quad (\text{kg/m}^3) \quad (10)$$

#### 4.3.2.6. Composition des bétons

**Tableau 16 – Dosage des constituants des bétons**

Matériaux		Quantité de matériaux pour 1 m <sup>3</sup> de béton en kg		
Ciment	CPA	350	-	-
	CPJ	-	350	-
	CHF	-	-	350
Eau	Calculée	185	185	180
	Corrigée	195	195	190
Sable		650	650	650
Gravier		1230	1230	1230
Rapport C/E		0.56	0.56	0.54
Rapport G/S		1.892	1.892	1.892
Masse volumique		2410	2410	2405

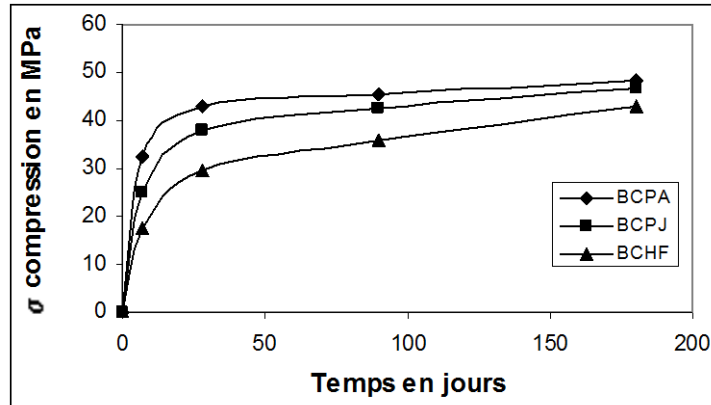
Le ciment CHF ayant une demande en eau légèrement plus faible la seule différence entre les trois compositions concerne le dosage en eau réel (tableau 16).

#### 4.4. Résultats

Les résistances mécaniques en compression mesurées sur des éprouvettes cubique en béton sont données au tableau 17 et présentées sur la figure 24.

**Tableau 17– Résultats des résistances sur bétons**

Ages des éprouvettes en jours	Type de ciment		
	CPA	CPJ	CHF
<b>0</b>	0	0	0
<b>7</b>	32,6	25	17,5
<b>28</b>	43	38	29,5
<b>90</b>	45,5	42,3	36
<b>180</b>	48,3	46,7	43
<b><math>\sigma_{180} / \sigma_7</math></b>	<b>1.48</b>	<b>1.87</b>	<b>2.5</b>



**Figure 24** - Résistance en compression sur éprouvettes cubiques 10.10.10 cm en béton à base de trois types de ciments (CPA – CPJ et CHF)

#### 4.5. Commentaires et conclusion

Les courbes cinétiques de durcissement des bétons (figure 24) montrent une plus faible cinétique de durcissement du béton de CHF par rapport aux bétons de CPA et CPJ à court terme entre 2 et 28 jours. Cependant la cinétique du béton de CHF s'accélère entre 28 et 180 jours de sorte que les résistances des trois bétons sont voisines au bout de 180 jours.

Les courbes confirment l'évolution des résistances déjà constatée sur mortier (tableau 8 et figure 13), même si les résistances obtenues sont un peu plus faibles sur les bétons, sans doute en partie à cause de la granulométrie très discontinue entre le sable 0/ 1.6 et le gravier 5 /20. Ceci étant, l'objectif de 25 MPa est atteint pour les trois bétons.

## 5. MODE D'ACTION DU LAITIER GRANULE SUR L'HYDRATATION DU CLINKER

### 5.1. Effet des additions minérales sur les ciments

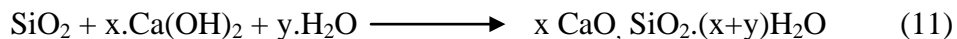
L'activité d'une addition minérale peut avoir trois effets différents selon BARON [88].

#### 5.1.1. Effet filler ou effet de remplissage

Une addition minérale incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente. Cet accroissement de la résistance est appelé effet filler.

#### 5.1.2. Effet chimique ou pouzzolanique :

L'activité chimique est le résultat de réactions chimiques entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. Par exemple les cendres volantes donnent lieu à la réaction pouzzolanique. La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment selon la relation 11.



La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances [100 – 101], dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, hydrate sous produit de la formation du CSH du clinker.

#### 5.1.3. Effet physique ou de surface

L'incorporation dans les liants hydrauliques d'une addition minérale, même inerte est favorable au développement de la résistance à court terme. Cet effet est observé par de nombreux auteurs [102 – 113], aussi bien sur des pâtes de ciment que des mortiers. Sans que les processus mis en jeu soient clairement précisés et quantifiés, l'action de l'addition est généralement désignée sous le terme de germination hétérogène.

Les hydrates nouvellement formés par l'hydratation du ciment pourraient précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrates qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

Ce processus d'hydratation différentielle entraîne une apparente accélération d'hydratation. La germination hétérogène reposant sur des phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance des mortiers augmente avec l'augmentation de la finesse des additions. Mais, en fait, plus que la surface spécifique, c'est vraisemblablement le nombre de particules d'addition par unité de volume de pâte qui est le paramètre essentiel de ce phénomène.

## 5.2. Exploitation des résultats

### 5.2.1. Résistance des mortiers de référence [114]

L'objectif de cette étude est de quantifier et montrer l'origine de l'accroissement des résistances mécaniques dans les mortiers expérimentaux résultant de la substitution dans le ciment d'une quantité variable de clinker par le laitier par rapport à une addition inerte.

Nous supposons que la résistance d'un mortier avec une addition inerte résulte de deux effets antagonistes non couplés qui sont :

- L'effet de dilution du ciment qui est dû à l'incorporation de l'addition dans la composition. Lorsque le taux de substitution augmente, la quantité de ciment diminue (à quantité d'eau constante), entraînant en répercussion une baisse de la résistance ;

- L'effet de surface dû à la germination hétérogène, provoquant un supplément de résistance.

Par cette approche, nous supposons qu'il est possible de découpler l'effet de dilution et l'effet physique. La résistance d'un mortier résulte de la somme des deux effets : l'effet de dilution du ciment et l'effet de germination hétérogène engendré par l'addition inerte chimiquement (expression 12).

$$\sigma_m = \sigma_{\text{(dilution)}} + \Delta \sigma_{\text{(germination hétérogène)}} \quad (12)$$

$\sigma_m$  – Résistance du mortier avec addition inerte chimiquement.

$\sigma_{\text{(dilution)}}$  – Résistance du mortier par effet de dilution.

$\Delta \sigma_{\text{(germination hétérogène)}}$  – Accroissement de la résistance du mortier avec addition inerte chimiquement résultant de l'effet de germination hétérogène

La difficulté réside dans la séparation des effets de dilution et physique. L'utilisation d'une addition inerte chimiquement et surtout grossière nous permet de supposer que l'accroissement de la résistance par effet de surface peut être négligé ( $\Delta \sigma_{\text{(germination hétérogène)}} \rightarrow 0$ )

C'est la raison pour laquelle l'estimation de l'effet de dilution a été réalisée en utilisant des mortiers dits de références dans lesquels une addition grossière à faible surface spécifique et inerte chimiquement a été utilisée. On a adapté les courbes obtenues par Lawrence [114] à nos courbes (figures 25, 26 et 17).

La somme des deux courbes de référence du CPA et du laitier donnent les courbes théoriques présentées sur la figure 27. On peut dire que ces courbes sont obtenues sous l'effet unique de dilution puisque l'addition utilisée est inerte chimiquement (sans effet chimique), elle est grossière (sans effet physique).

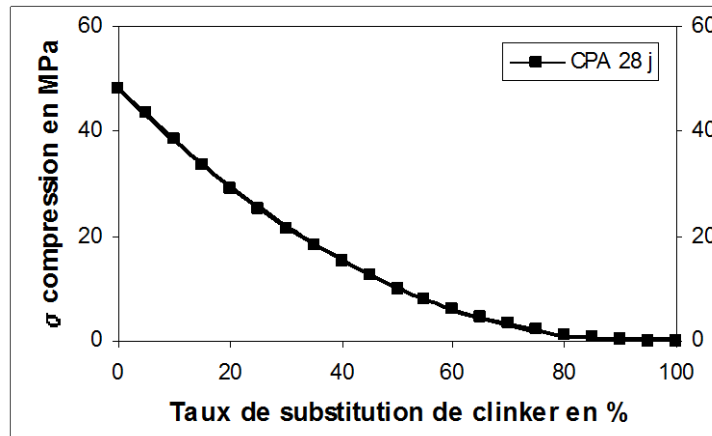


Figure 25 - Résistance expérimentale des mortiers confectionnés à partir de l'addition de référence en fonction du taux de substitution du CPA

+

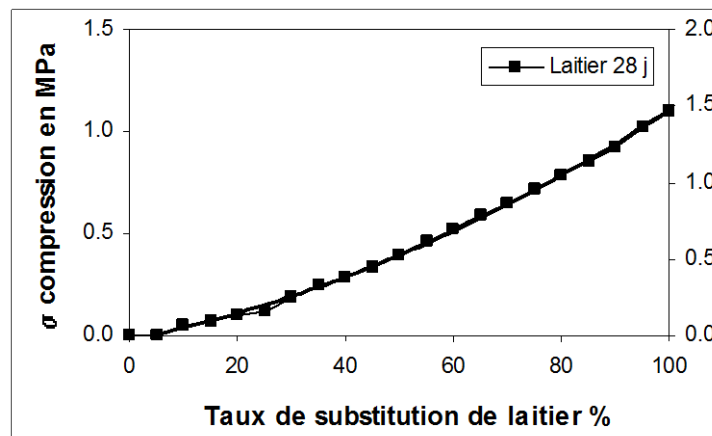


Figure 26 - Résistance expérimentale des mortiers confectionnés à partir de l'addition de référence en fonction du taux de substitution du laitier

=

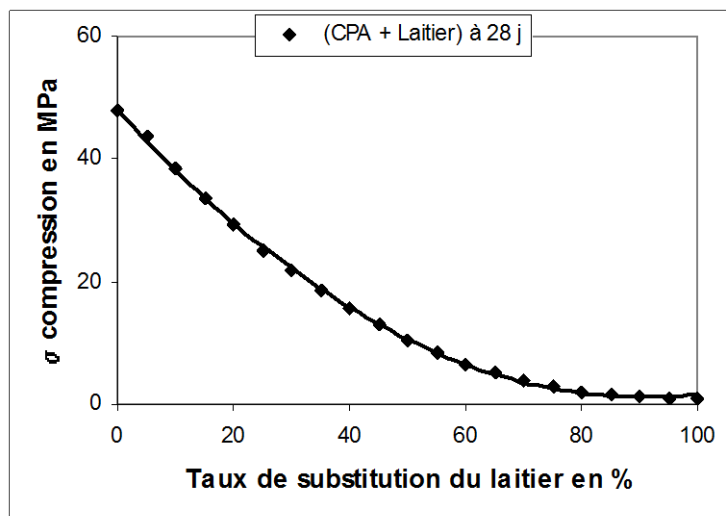


Figure 27 - Résistance des mortiers confectionnées avec addition de laitier

En utilisant les courbes obtenues par effet de dilution, on peut estimer les effets physique et chimique lorsqu'on utilise une addition minérale chimiquement active tel que le laitier granulé.

En effet l'accroissement des résistances est déterminé par différence entre les résultats obtenus sur les mortiers avec addition de laitier (figures 1 à 8) et les résultats obtenus sur les mortiers avec addition inerte chimiquement (courbes de référence) pour un même taux de substitution et le même âge (figure 27).

L'accroissement des résistances mécaniques dû à l'introduction du laitier (effet physique et chimique) sera calculé par l'écart entre les deux courbes portées sur les mêmes axes (figure 28) en utilisant l'expression (13).

$$\Delta \sigma_j = \sigma_j (\text{laitier}) - \sigma_j (\text{référence}) \quad (13)$$

- $\Delta \sigma_j$  : Accroissement des résistances total par effet physique (germination hétérogène) et par effet chimique (réaction pouzzolanique) à un âge j.
- $\sigma_j (\text{laitier})$  : résistance en compression des mortiers avec addition de laitier à un âge j.
- $\sigma_j (\text{référence})$  : résistance en compression des mortiers avec addition de référence à un âge j

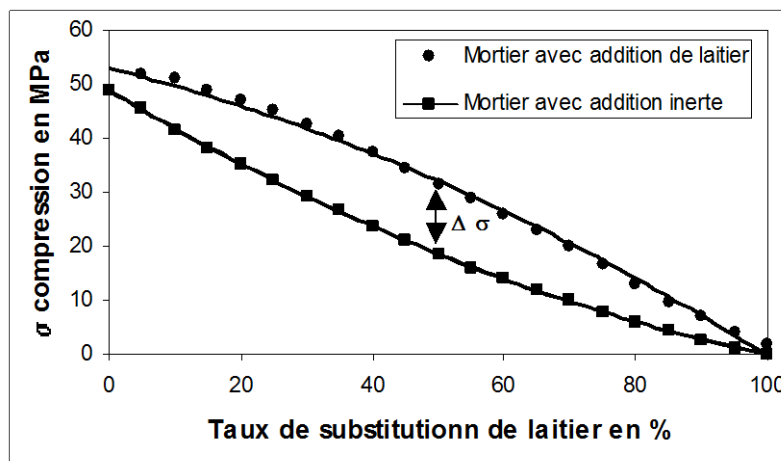


Figure 28 - Principe de calcul de l'accroissement de résistance ( $\Delta \sigma$ ) en fonction du taux de substitution de l'addition de laitier

La difficulté réside dans la séparation quantitative des deux effets (physique et chimique). Cependant l'effet chimique est dû à la réaction pouzzolanique. C'est un effet qui se produit sur la durée, d'autant que le laitier d'EL HADAJR est moyennement réactif et que sa cinétique de durcissement est lente. Un accroissement des résistances ( $\Delta \sigma$ ) à court terme à 2 jours sera dû majoritairement à un effet physique de germination hétérogène, favorisant la croissance des hydrates.

### 5.2.2. Accroissement des résistances par effet physique

La substitution dans le ciment d'une partie variable du clinker par le laitier est favorable au développement des résistances à court terme ce qui est rapporté par les données bibliographiques [102 - 113].

L'augmentation des résistances par effet physique dépend de la finesse du laitier et de son taux de substitution. Les résultats sont présentés sur la figure 29.

L'accroissement maximum des résistances est obtenu avec le laitier le plus fin, de finesse de mouture BLAINE de 4000 cm<sup>2</sup>/g, est de 10 MPa à 2 jours pour des taux de laitier compris entre 20 et 40 %.

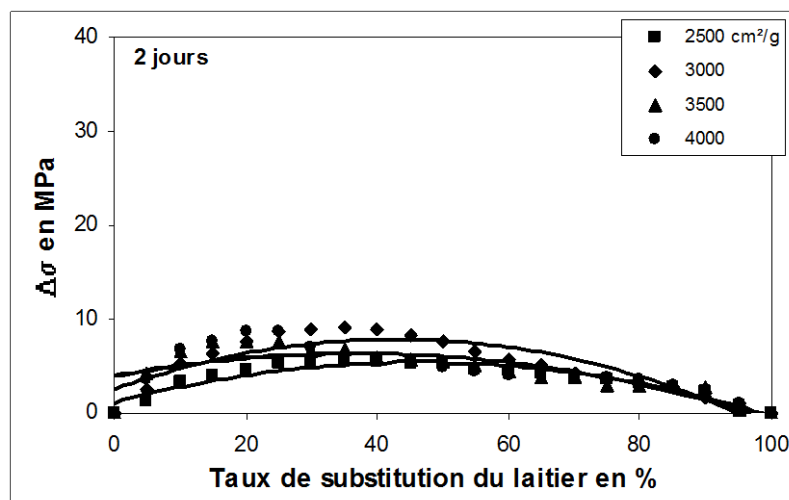


Figure 29 – Influence de la finesse du laitier et de son taux de substitution sur le gain de résistance à 2 jours de durcissement

### 5.2.3. Accroissement des résistances par effet chimique

A des échéances plus élevées et des finesses plus grossières l'accroissement des résistances mécaniques peut être attribué majoritairement à une action chimique (réaction pouzzolanique figures 30 et 31).

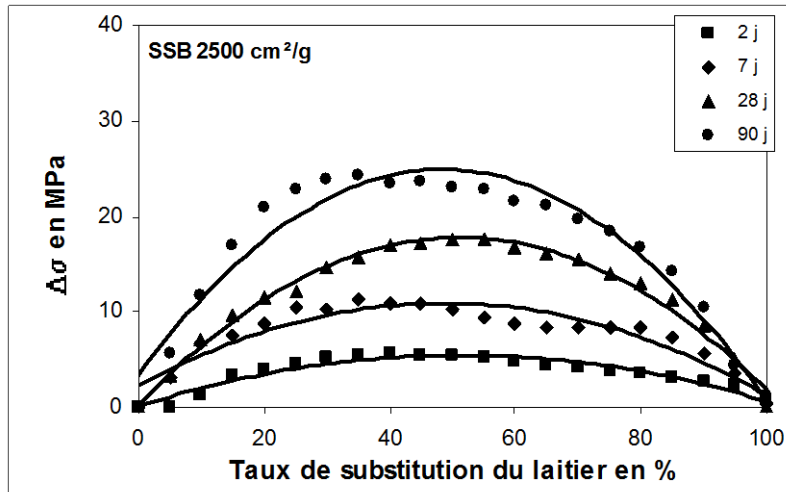


Figure 30 – Influence du temps sur le gain de résistance en fonction du taux de substitution du laitier à une finesse de 2500 cm<sup>2</sup>/g

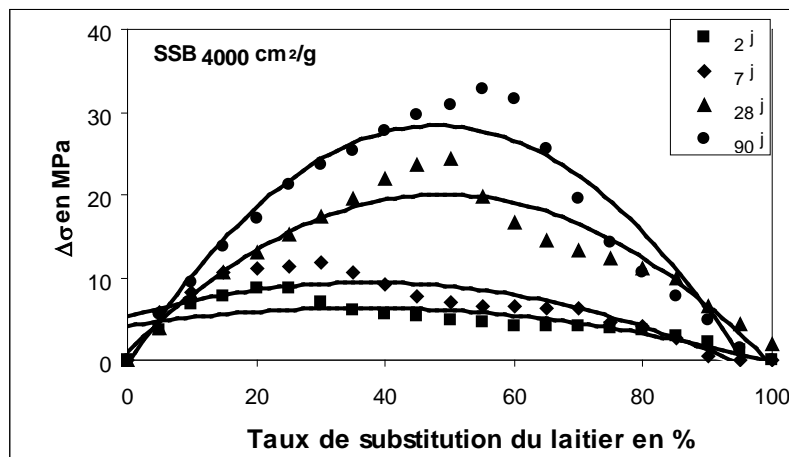


Figure 31 – Influence du temps sur le gain de résistance en fonction du taux de substitution du laitier à une finesse de 4000 cm<sup>2</sup>/g

### 5.3. Discussion

L'accroissement de résistance par effet pouzzolanique prend toute son ampleur à long terme (90 jours). Il atteint 20 à 24 MPa à 90 jours pour des taux de 20 et 60 % de laitier de finesse de 2500 cm<sup>2</sup>/g.

L'accroissement des résistances dépend donc de deux facteurs: la finesse de l'addition (laitier) et son taux de substitution. L'influence de la finesse du laitier sur l'accroissement des résistances est à court terme (2 jours) de 5 MPa pour une finesse de 2500 cm<sup>2</sup>/g et 10 MPa pour une finesse de 4000 cm<sup>2</sup>/g. A long terme (90 jours) l'accroissement est 24 MPa pour 2500 cm<sup>2</sup>/g et de 32 MPa pour 4000 cm<sup>2</sup>/g.

## CONCLUSION

L'ajout de laitier granulé diminue les résistances à court et moyen terme à peu près proportionnellement au % de laitier rajouté. Mais les cinétiques de durcissement étant différentes, les résultats obtenus par ailleurs jusqu'à 360 jours montrent que les ciments contenant 50% de laitier présentent des résistances à long terme voisines ou peu inférieures à celles d'un ciment portland constitué à 100% du même clinker.

Les résultats obtenus permettent aussi de mettre en évidence l'intérêt d'un broyage fin du laitier. Une surface spécifique BLAINE de 3000 cm<sup>2</sup>/g est un minimum, un broyage séparé à 4000 cm<sup>2</sup>/g étant préférable.

Nous proposons d'augmenter le dosage en laitier jusqu'à 50%. Les résultats obtenus sur mortier (résistances moyennes) permettent, en fonction du dosage et de la finesse du laitier, de garantir selon la norme algérienne NA 442 [53] les différentes classes et sous-classes de résistance normalisées (tableau 18) pour deux catégories de ciment: le CPJ et le CHF. Seul le CPJ est actuellement commercialisé; le CHF peut l'être jusqu'à la classe 45R dans le cas du laitier moulu à 3000 cm<sup>2</sup>/g (45% de laitier) et à 3500 cm<sup>2</sup>/g (50% de laitier)

**Tableau 18** – Le dosage en laitier dans les CPJ et CHF conformément à la norme NA 442 [53]

Type de ciment	Classe de Résistance	Dosage en laitier autorisé par la norme en %	Dosage en laitier maximum en %			
			Finesse du laitier minimale en cm <sup>2</sup> /g			
			2500	3000	3500	4000
CPJ	35	0 – 35	35	a	a	a
	45		25	35	a	a
	45 R		20	35	a	a
	55		10	15	20	30
	55 R		10	15	20	30
CHF	35	40 – 75	60	65	65	70
	45		b	45	50	55
	45 R		b	45	50	55
	55		b	b	b	45

a – La finesse de 2500 cm<sup>2</sup>/g est suffisante pour assurer un dosage maximum de laitier (35%) pour un CPJ 35

b – Le laitier granulé d'El Hadjar ne permet pas la production de CHF de la classe de résistance définie par la norme NA 442. [53]

**Grâce à une exploitation originale de nos données, nous avons pu mettre en évidence les deux rôles joués par une addition de laitier, indépendamment du phénomène normal de dilution du ciment.**

Aux faibles âges, les grains de laitier jouent le rôle de noyaux de cristallisation (germination hétérogène) et permettent un accroissement significatif des résistances mécaniques, d'autant plus élevé que le nombre de grain est élevé (surface spécifique élevée). Aux plus fortes échéances (après 7 jours) se superpose un effet chimique dû aux réactions pouzzolaniques et devient dominant dans le temps.

Les essais menés sur béton ont confirmé les résultats obtenus sur mortier. Les résistances des ciments au laitier sont faibles à court terme à cause de leur cinétique de durcissement lente. Cependant les résistances mécaniques à 90 jours augmentent sensiblement et deviennent comparables à celles du CPA à 360 jours.

Nos mesures confirment par ailleurs les caractéristiques connues des laitiers granulés de haut - fourneau et des ciments au laitier: une très faible exothermicité, des variations dimensionnelles de retrait nettement inférieures à celles des pâtes de CPA, un milieu moins basique permettant une meilleure résistance en milieu acide agressif. Ces caractéristiques plaident en faveur du développement de ces ciments pour des ouvrages massifs, des structures soumises à des environnements salins ou sulfatiques, des travaux n'exigeant pas des résistances importantes à très court terme. Ces propriétés de durabilité seront étudiées au chapitre suivant.

**CHAPITRE IV**  
**ETUDE DE LA DURABILITE DE PATES DE CIMENTS CONTENANT**  
**DU LAITIER**

# CHAPITRE IV - ETUDE DE LA DURABILITE DE PATES DE CIMENTS CONTENANT DU LAITIER

## INTRODUCTION

### 4. LES MILIEUX AGRESSIFS ET LES MECANISMES DE DEGRADATION

#### 4.1. Les milieux agressifs

#### 4.2. Les mécanismes de dégradation

- 4.2.1. Action des chlorures
- 4.2.2. Action des sulfates
- 4.2.3. Action du dioxyde de carbone
- 4.2.4. Action du nitrate d'ammonium
- 4.2.5. Action de la température

#### 1.3. Conclusion

### 5. DURABILITE DES CIMENTS AU LAITIER S'HYDRATANT EN MILIEU CHIMIQUEMENT AGRESSIF COUPLEE A LA TEMPERATURE

#### 5.1. Introduction

#### 5.2. Mode opératoire

- 5.2.1. Composition des ciments
- 5.2.2. Choix des éprouvettes
- 5.2.3. Caractéristiques des milieux
- 5.2.4. Confection, cure et conservation des éprouvettes
- 5.2.5. Mesures et essais

#### 5.3. Cure à 20 °C

- 5.3.1. Cinétique de durcissement
- 5.3.2. Influence des milieux de conservation sur le rapport  $\sigma_i / \sigma_D$
- 5.3.3. Influence des milieux de conservation sur le rapport  $\varepsilon_i / \varepsilon_D$
- 5.3.4. Discussion

#### 5.4. Cure à 40 °C

- 5.4.1. Cinétique de durcissement
- 5.4.2. Influence des milieux de conservation sur le rapport  $\sigma_i / \sigma_D$
- 5.4.3. Influence des milieux de conservation sur le rapport  $\varepsilon_i / \varepsilon_D$
- 5.4.4. Discussion

#### 5.5. Discussion générale

#### 5.6. Conclusion

### 6. ESSAI ACCELERE D'AGRESSION CHIMIQUE COUPLEE A LA TEMPERATURE : conservation après cure humide dans un bain de nitrate d'ammonium

#### 6.1. Introduction

#### 6.2. Conduite des essais

#### 6.3. Résultats expérimentaux

- 6.3.1. Cinétique de dégradation en terme de résistance
- 6.3.2. Perte de masse
- 6.3.3. Variations dimensionnelles
- 6.3.4. Epaisseur dégradée
- 6.3.5. Etude qualitative par diffraction des rayons X et par analyse thermique différentielle du processus de dégradation des ciments d'étude attaqués par une solution de nitrate d'ammonium.

- 6.3.6. Discussion
- 6.3.7. Conclusion

#### **6.4. Discussion**

#### **6.5. Conclusion**

### **7. ACTION DU DIOXYDE DE CARBONE SUR LES CIMENTS AU LAITIER (essai accéléré)**

#### **7.1. Introduction**

#### **7.2. Mode opératoire**

- 7.2.1. Eprouvettes utilisées
- 7.2.2. Confection des éprouvettes
- 7.2.3. Conservation des éprouvettes
- 7.2.4. Conditionnement des éprouvettes
- 7.2.5. Echéancier des essais
- 7.2.6. Mesure de la profondeur du front carbonaté.

#### **7.3. Résultats sur pâtes pures**

- 7.3.1. Profondeur carbonatée
- 7.3.2. Augmentation de la masse
- 7.3.3. Résistance en traction par fendage

#### **7.4. Résultats sur mortiers (I) étuvé pendant 2 jours**

- 7.4.1. Profondeur carbonatée
- 7.4.2. Variation de masse
- 7.4.3. Résistance en traction par fendage

#### **7.5. Résultats sur mortier (II) étuvé pendant 7 jours**

- 7.5.1. Profondeur carbonatée
- 7.5.2. Augmentation de la masse de masse
- 7.5.3. Résistance en traction par fendage

#### **4.6 Résultats sur mortier (III) cure humide de 28 jours**

- 7.5.4. Profondeur carbonatée
- 7.5.5. Augmentation de la masse de masse
- 7.5.6. Résistance en traction par fendage

#### **7.6. Discussion**

#### **7.7. Conclusion**

### **CONCLUSION**

## INTRODUCTION

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

Pour réaliser un béton durable, il suffit, dans la majorité des cas, de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact. Le respect d'exigences supplémentaires, notamment le choix du ciment, est nécessaire pour maîtriser des situations plus sévères, telle qu'une conservation en milieu chimique agressif (eau de mer, eau séléniteuse, nitrate d'ammonium etc...) éventuellement couplée à une température de climat chaud.

On sait par ailleurs que l'hydroxyde de calcium est le principal hydrate concerné par les agressions chimiques du béton, par dissolution et recombinaison éventuelle. Il en résulte que les liants à effet pouzzolanique (consommation d'hydroxyde de calcium et formation d'hydrates) tel que le laitier granulé broyé de haut - fourneau peuvent, en limitant la présence de chaux, contenir en partie les effets de ces agressions [115]. De surcroît, les ciments au laitier de type CHF et CLK contiennent moins d'aluminate de calcium ( $C_3A$ ) dont l'influence négative sur la durabilité des ciments est connue.

Le premier but de cette étude est de décrire et comprendre la tenue des ciments au laitier d'EL HADJAR soumis pendant l'hydratation à des conditions de cure proches des conditions pouvant être rencontrées localement : des milieux agressifs tels que eaux séléniteuses ou eau de mer et température de 20 et 40 °C.

Les phénomènes étant prévus assez lents et des études microstructurales étant nécessaires, nous avons décidé de travailler avec de petites éprouvettes de pâte pure.

Cette procédure s'avérant en définitive peu agressive pour le matériau, malgré une durée d'expérimentation de douze mois, et un renouvellement mensuel des bains sur les six derniers mois, nous avons poursuivi par des essais accélérés, et en utilisant des mortiers et ou des pâtes pures.

Ce chapitre est donc structuré en quatre parties :

**La première partie** est consacrée à une synthèse bibliographique sur les milieux agressifs et les mécanismes de dégradation afin de mieux comprendre le rôle que peut jouer le laitier de haut fourneau comme ajout au clinker sur la résistance chimique des ciments.

**La deuxième partie** traite de l'effet de la cure en eau de mer (M), en eau séléniteuse (S) chargée en sulfate de calcium [ $CaSO_4$ ] et en eau doublement sulfatée (SS) chargée en sulfates de calcium et d'ammonium [ $CaSO_4$  et  $NH_4SO_4$ ] sur la durabilité des pâtes de ciments. L'hydratation des éprouvettes en eau déminéralisée (D) sert de milieu de référence.

**La troisième partie** s'inscrit dans la continuité de la deuxième partie, par l'étude de la dégradation chimique des mêmes pâtes de ciments conservées dans une solution de nitrate d'ammonium, qui se caractérise par une cinétique de dégradation plus rapide (essai accéléré) [116 - 117].

**La quatrième partie** présente des résultats de carbonatation accélérée des mêmes ciments menée sur pâtes pures et sur mortiers. Cet essai permet de suivre dans le temps l'évolution de la profondeur de carbonatation pour chaque type de ciment.

Dans cette étude les paramètres de quantification de la durabilité des ciments sont :

- la résistance en compression simple.
- la résistance en traction par fendage.
- les variations dimensionnelles et massiques.

l'analyse aux rayons X par diffraction (DRX) et l'analyse thermique différentielle (ATD) sont utilisées pour décrire et analyser les résultats.

## 1. LES MILIEUX AGRESSIFS ET LES MECANISMES DE DEGRADATION (rappel de la norme NF P 18 – 011)

La norme Française NF P 18 – 011 [118] définit les environnements agressifs les plus courants :

### 1.1. Les milieux agressifs

Trois catégories peuvent être distinguées :

- milieux gazeux: gaz et vapeur.
- Milieux liquides: eaux douces, eaux de mer, solutions de sel, d'acides ou de bases, eaux résiduaires, liquides organiques (huile, pétrole, solvants)
- milieux solides: sols, produits de stockage. Ils agissent surtout par extraction ou dissolution, le plus souvent par l'eau, des agents nocifs.

Quatre classes d'agressivité sont définies: environnement faiblement agressif, moyennement agressif, fortement agressif et très fortement agressif. Elles sont regroupées dans le tableau 1 qui donne en outre leurs symboles et les niveaux de protection correspondants.

**Tableau 1 - Définition des classes d'agressivité**

Environnement	Symbole	Niveau de protection
Faiblement agressif	A <sub>1</sub>	1
Moyennement agressif	A <sub>2</sub>	2
Fortement agressif	A <sub>3</sub>	3
Très fortement agressif	A <sub>4</sub>	4

Le tableau 2 donne le degré d'agressivité des solutions et des sols les plus courants.

**Tableau 2 - Agressivité des solutions et des sols**

a) agressivité des solutions en fonction de leur concentration en agents et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale				
<b>Degré d'agressivité</b>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
<b>Agents agressifs</b>	<b>Concentration en mg / l</b>			
CO <sub>2</sub> agressif *	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	250 à 600	600 à 1500 (1)	1500 à 6000	> 6000
Mg <sup>++</sup>	100 à 300	300 à 1500	1500 à 3000	> 3000
NH <sub>4</sub> <sup>++</sup>	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
PH	6.5 à 5.5	5.5 à 4.5	4.5 à 4	< 4
La limite est fixée à 3000 mg / l pour l'eau de mer				

b) Cas de l'eau douce				
T A C **	< 1 mé / l	-	-	-

c) Agressivité des sols en fonction de la teneur en SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>				
% SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> dans le sol sec ***	0.24 – 0.6	0.8 – 1.2	1.2 – 1.4	> 2.4
Mg / SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> extrait du sol ****	1200 à 2300	2300 à 3700	3700 à 6700	> 6700

Niveau de protection	1	2	2	3
----------------------	---	---	---	---

\* CO<sub>2</sub> agressif = excès de CO<sub>2</sub> dissous par rapport au CO<sub>2</sub> nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de Ca et Mg

\*\* **T A C titre alcalimétrique complet (norme NF T 90 – 036)**

1 mé = 5 degrés français = 2.8 degrés allemand

\*\*\* Extraction par HCl à chaud

\*\*\*\* Extraction par l'eau (rapport eau / solution = 2 / 1)

## 1.2. LES MECANISMES DE DEGRADATION

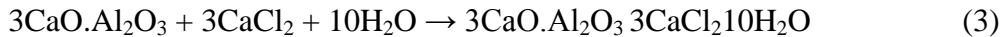
### 1.2.1. Action des chlorures

Indépendamment de leur effet nocif sur les aciers du béton armé, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevée. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre partie se combine avec le C<sub>3</sub>A sous forme de monochloroaluminate de calcium (3CaO,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,CaCl<sub>2</sub>,10H<sub>2</sub>O) [74].

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite selon la réaction 1 :



La brucite ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) est insoluble et se dépose à la surface du béton. Le chlorure de calcium réagit avec l'aluminate tricalcique ( $\text{C}_3\text{A}$ ) du ciment selon la relation 2 ou 3 pour former le monochloroaluminate de calcium ( $3.\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaCl}_2.10\text{H}_2\text{O}$ ) ou sel de Friedel [74 et 119], ou le trichloroaluminate de calcium ( $3.\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3.\text{CaCl}_2.10\text{H}_2\text{O}$ ) :



### 1.2.2. Action des sulfates

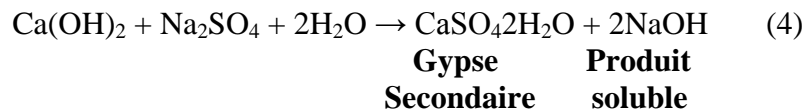
Les sulfates représentent le risque majeur d'agression chimique pour le béton [120]. L'action du sulfate de calcium est connue depuis longtemps ; elle a été signalée en 1887 par CANDLOT [121].

#### a - Action du sulfate de sodium

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation de gypse ou d'ettringite secondaire expansive [1]. Cela peut être résumé comme suit :

#### - Formation du gypse secondaire

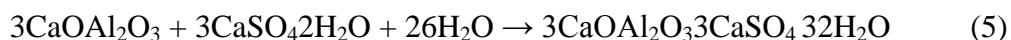
La formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate selon la relation (4) :



Une expansion peut se manifester mais dans la majorité des cas elle restera limitée dans la mesure où le gypse secondaire se forme selon un processus de dissolution et de cristallisation [74].

#### - Formation de l'ettringite secondaire

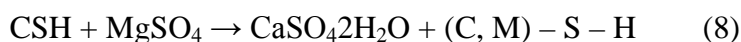
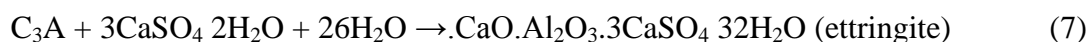
La formation de l'ettringite secondaire peut résulter de la réaction chimique entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium anhydres ( $\text{C}_3\text{A}$ ) selon la relation (5) ou hydratés ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) :



Suivant la teneur en chaux de la phase liquide, la cristallisation de l'ettringite peut être expansive ou non [5].

## **b - Action du sulfate de magnésium**

Le sulfate de magnésium est particulièrement agressif par la double action du cation  $Mg^{2+}$  qui s'échange avec le cation  $Ca^{2+}$  selon les relations (6), (7) et (8) [74]:



Les échanges de  $Mg^{2+}$  avec  $Ca^{2+}$  conduisent à la formation de la brucite  $Mg(OH)_2$  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. De plus la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation du gypse secondaire

### **1.2.3. Action du dioxyde de carbone**

La carbonatation du béton à l'air résulte de la fixation du gaz carbonique ( $CO_2$ ) par les hydrates du ciment et principalement la portlandite  $Ca(OH)_2$ . La réaction est favorisée par une humidité du milieu comprise entre 60 et 70 %.

Il faut préciser que l'agent réel de carbonatation est l'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ) résultant de la réaction (9), car le dioxyde de carbone à l'état gazeux n'est pas réactif.



L'action du dioxyde de carbone se manifeste même à de très faibles concentrations telles celles que l'on rencontre dans l'air qui varie de 0.03 % (en volume) dans un milieu non pollué à 0.3 % dans les grandes villes et peut atteindre exceptionnellement 1 % dans les lieux fortement pollués [122].

Le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) réagit avec la portlandite  $Ca(OH)_2$ , le carbonate de calcium précipite sous forme d'aragonite et de calcite selon la relation (10), mais d'autres hydrates peuvent être décomposés, des silicates hydratés, de l'alumine et de l'oxyde de fer étant formés.



La carbonatation en soi n'endommage pas directement le béton. Cependant ses effets constituent un risque de corrosion de l'acier. La carbonatation de la portlandite entraîne une diminution du pH de la pâte de ciment hydratée, qui peut descendre à une valeur inférieure à celle que nécessiterait la protection de l'acier (pH = 9 environ) [1]. Lorsque toute la portlandite est carbonatée, la valeur du pH descend à 8.3 [123].

La baisse du pH couplée à une profondeur de carbonatation suffisante (égale ou inférieure de quelques millimètres à l'épaisseur de l'enrobage) [122] conduisent inévitablement à la disparition de la couche de passivation de l'acier et la corrosion peut alors se développer.



### 1.3. Conclusion

Le mécanisme de base de dégradation d'une pâte de ciment durcie exposé à l'eau de mer ou à des eaux sulfatées est de nature chimique. Il s'agit d'une décalcification progressive de la pâte de ciment durcie, principalement par dissolution de la portlandite par contact avec la solution aqueuse. Cette décalcification est alors susceptible d'altérer les propriétés mécaniques de la pâte de ciment durcie par modification de la porosité. On notera que d'autres phénomènes chimiques peuvent exister, comme la précipitation de produits d'espèces secondaires expansifs en relation avec les aluminates de calcium.

En effet, les additions minérales de laitier améliorent les résistances des bétons à l'eau de mer et aux sulfates [74]: en première analyse on peut estimer que l'amélioration est due à la dilution des aluminates et à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compacts au moins pour les bétons âgés. Ce comportement est dû :

- à la réduction de la teneur en chaux et en aluminate tricalcique.
- à l'accroissement de la compacité des hydrates en relation avec une diminution du volume poreux pouvant atteindre 25 % dans le cas d'ajout de laitier en quantité importante ( $\geq 60$  %).
- au mode de cristallisation de l'ettringite formée par précipitation à partir de la phase liquide et non expansive. Le laitier réduit les expansions dues aux sulfates [74].

Les ciments pour lesquels la teneur en laitier est supérieure ou égale à 60 % (CHF et CLK) sont considérés comme résistant aux sulfates, indépendamment du clinker de base, avec lequel ils ont été fabriqués. Toutefois selon certains travaux [124 - 125] les laitiers à forte teneur en alumine (supérieure ou égale à 11 %) se comporteraient moins bien.

Compte tenu de la spécificité du laitier d'EL HADJAR et des conditions environnementales d'Annaba, nous avons jugés utile d'étudier la durabilité des ciments contenant ce laitier.

## 2. DURABILITE DES CIMENTS AU LAITIER S'HYDRATANT ET DURCISSANT EN MILIEU CHIMIQUEMENT AGRESSIF COUPLEE A LA TEMPERATURE.

### 2.1. Remarque préliminaire

L'agressivité des milieux a été modifiée au cours de l'essai. Au bout de 180 jours de conservation des ciments CPA, CPJ et CHF dans les bains, ne constatant pas une dégradation significative des éprouvettes, nous avons décidé pour la suite des essais d'augmenter l'agressivité des bains par des renouvellements périodiques des solutions. Les éprouvettes ont donc été traitées en deux phases :

- Première phase : Dégradation dans des bains non renouvelés pendant 210 jours
- Deuxième phase : Dégradation dans des bains renouvelés pendant les 180 jours suivants.

### 2.2. Mode opératoire

#### 2.2.1. Composition des ciments

Les ciments sont préparés au laboratoire à partir de stocks de clinker, de laitier granulé et de gypse. Le clinker et le laitier granulé sont broyés séparément à des finesses BLAINE de 3000 cm<sup>2</sup>/g . Le tableau 3 donne les compositions des ciments d'étude.

Tableau 3 - Composition des ciments

Type de ciment	Dosage massique des constituants en %		
	Clinker	Laitier	Gypse
CPA	95	0	5
CPJ	75	20	5
CHF	45	50	5

#### 2.2.2. Choix des éprouvettes

Pour les raisons données en introduction, nous avons utilisés des éprouvettes cylindriques de pâte pure de petites dimensions : 25 mm de diamètre et 75 mm de hauteur.

#### 2.2.3. Caractéristiques des milieux de conservation

Les solutions constituant les milieux agressifs sont préparés au laboratoire (tableau 4), notamment l'eau de mer qui a été reconstituée selon la référence [126] donnée au tableau 5.

Tableau 4 – Caractéristiques chimiques des bains de conservation

Milieu	Concentration g /l	PH
Eau déminéralisée (D)	0	7
Eau de mer (A)	35	7.8
Sulphate de calcium (S)	2	6.8
Sulfate	de calcium	6.7
	d'ammonium	

**Tableau 5 - Composition ionique moyenne de l'eau de mer [126]**

Ions	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Molarités mmol/l	460.0	52.0	14.2	2.0	538.0	27.1	2.0

#### 2.2.4. Confection, cure et conservation des éprouvettes

Les pâtes sont préparées dans un malaxeur normalisé [EN 196 - 1][93] en suivant le mode opératoire indiquée par la norme [EN 196 - 3] [127] relatif à la consistance normale des pâtes pures. Le remplissage des moules est réalisé en deux couches avec piquage et vibration de 5 à 10 secondes pour chaque couche. Les éprouvettes sont conservées dans une chambre à température standard (T = 20 °C) et à 60 % d'humidité relative, puis démoulées au bout de 48 heures et plongées dans les bains agressifs, dans deux salles régulées à 20 °C et 40 °C.

Les pâtes de ciment sont gâchées avec un rapport Eau /Ciment correspondant à leur consistance normale donnée au tableau 6.

**Tableau 6 - Quantité d'eau de gâchage correspondant à la consistance normale [127]**

N°	Type de ciment	Consistance normale en %
1	CPA	25
2	CPJ	25
3	CHF	24

#### 2.2.5. Mesures et essais

Le nombre d'éprouvettes par ciment, par essais et par échéance est de 3. Les éprouvettes sont retirées des différents bains de conservation à différentes échéances (28, 56, 90, 180 et 360) jours pour subir les essais indiqués en introduction

Les éprouvettes servant à l'essai d'écrasement en compression simple sont tranchées à leurs extrémités de telle sorte que l'élançement soit égal à deux puis leurs surfaces sont rectifiées pour que les deux faces soient parfaitement parallèles ce qui permet une répartition uniforme des forces. L'essai de compression simple est réalisé sur une presse de capacité maximale de 237.5 kN à une vitesse de chargement constante de 15 kN / mn.

### 2.3. Cure à 20 °C

#### 2.3.1. Cinétique de durcissement :

La cinétique de durcissement des différentes pâtes de ciment conservées dans l'eau déminéralisée à différentes échéances (28, 90, 180 et 360) jours est présentée sur la figure 1.

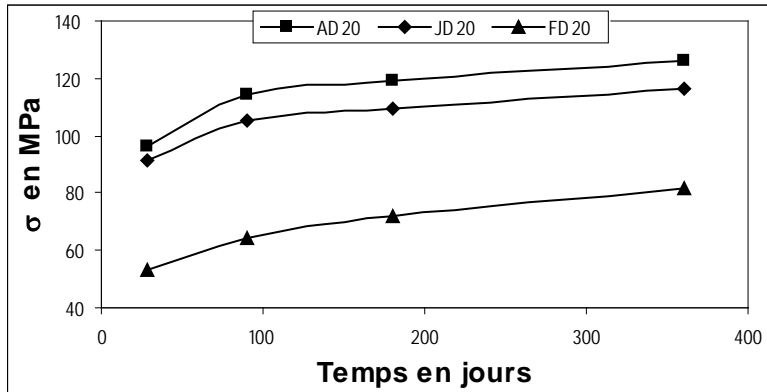


FIGURE 1 - CINÉTIQUE DE DURCISSEMENT DE TROIS CIMENTS CPA (A), CPJ (J) ET CHF (F) DANS L'EAU DÉMINÉRALISÉE (D) À 20 °C

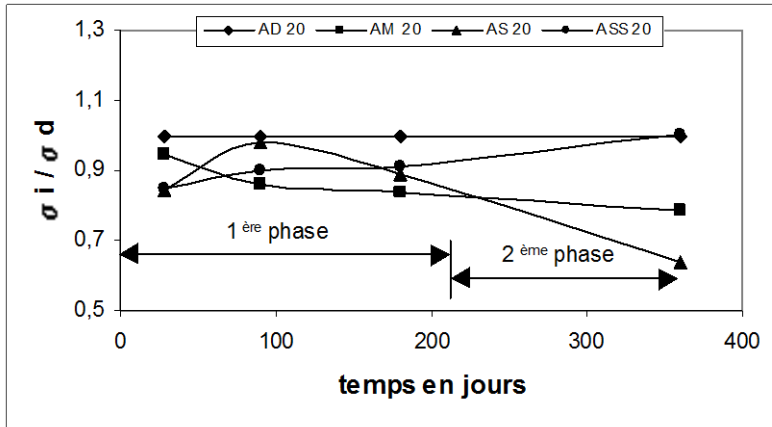
L'observation de ces courbes montre que, d'une part le CHF présente une cinétique différente du CPA et du CPJ, cinétique lente en particulier à court terme, et que d'autre part les résistances des pâtes de CHF sont fortement inférieures à celles des deux autres ciments. Ceci nous a incité à présenter par la suite les résultats de résistance mécanique en terme de rapport de résistance ( $\sigma_i / \sigma_D$ ), la référence étant la résistance des pâtes de même ciment conservées dans l'eau déminéralisée. On fait ainsi abstraction des problèmes de cinétique et de résistances différentes entre ciments pour ne prendre en compte que l'agressivité du milieu de cure, comparativement au bain de référence, c'est à dire l'eau déminéralisée.

$\sigma_i$  : Contrainte de rupture (MPa) en compression simple de la pâte conservée dans un milieu  $i$  (eau de mer ou eau séléniteuse ou eau doublement sulfatée).

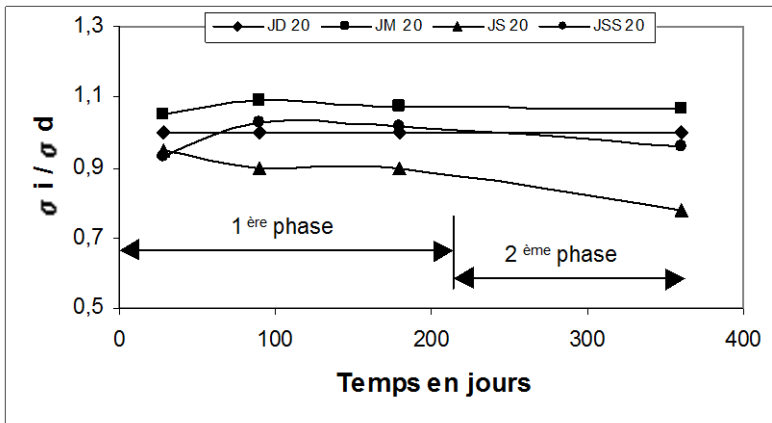
$\sigma_D$  : Contrainte de rupture (MPa) de la même pâte conservée en eau déminéralisée.

### 2.3.2. Influence du milieu de cure sur le rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )

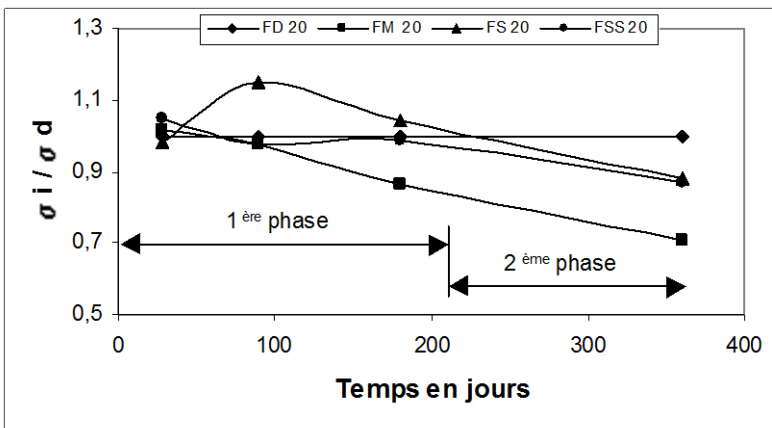
La comparaison du comportement mécanique de trois types de ciments (CPA, CPJ et CHF) s'hydratant dans quatre milieux (eau déminéralisée, eau de mer, eau séléniteuse et eau doublement sulfatée), réalisée au moyen du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ ) est présentée par les figures 2, 3 et 4). Comme valeur caractéristique on peut prendre la moyenne des trois résultats obtenus pour chaque échéance. Certains chercheurs, dans le cas de trois éprouvettes, pensent que la médiane est plus représentative. Nous avons opté en fait pour la moyenne entre ces deux valeurs.



**Figure 2** – Cinétique de dégradation du CPA (A) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )



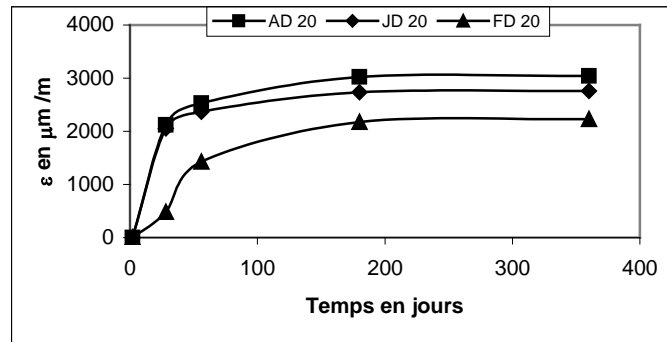
**Figure 3** – Cinétique de dégradation du CPJ (J) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )



**Figure 4** – Cinétique de dégradation du CHF (F) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )

Nous constatons que l'effet d'une conservation en milieu agressif se fait sentir seulement après 90 jours et de façon modérée. Le ciment CHF présente de surcroît le meilleur comportement en milieu sulfaté. La conservation en eau de mer apparaît ici comme étant la plus préjudiciable pour le CHF par rapport aux CPA et CPJ.

### 2.3.3. Influence du milieu de cure sur les variations dimensionnelles et le rapport $\varepsilon_i / \varepsilon_D$



**Figure 5** - Evolution du gonflement de trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) s'hydratant dans l'eau déminéralisée (D) à 20 °C

Les gonflements  $\varepsilon$  sont observés dans toutes les pâtes de ciment, dans un ordre décroissant des valeurs de  $\varepsilon$  successivement du CPA, CPJ et CHF (figure 5).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 10^3, [\mu\text{m}] \quad (12)$$

$\varepsilon_i$  : Déformation relative en  $\mu\text{m}/\text{m}$

$\Delta l$  : Déformation absolue en  $\mu\text{m}$

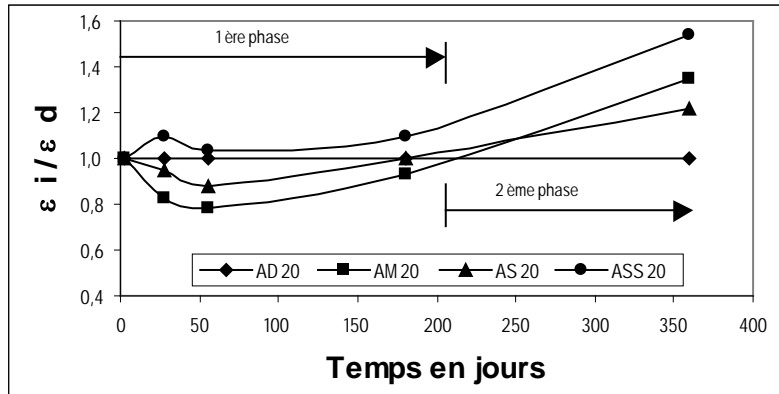
$l$  : Longueur réelle de l'éprouvette en mm

Conservées dans l'eau déminéralisée, comme d'ailleurs dans tous les autres bains, les éprouvettes présentent un gonflement assez important, essentiellement lors des premiers 28 jours pour le CPA et le CPJ, avec une cinétique plus lente et un gonflement final plus faible pour le CHF (figure 5). Afin de faire abstraction des problèmes de cinétique et de valeurs absolues de gonflement différentes selon les ciments, nous avons ici aussi exploité les résultats de variations dimensionnelles en terme de rapport de déformations relatives ( $\varepsilon_i / \varepsilon_D$ , figures 6,7 et 8) afin de mettre en relief uniquement l'influence du bain de cure, par rapport au bain d'eau déminéralisé, qui servira donc de référence.

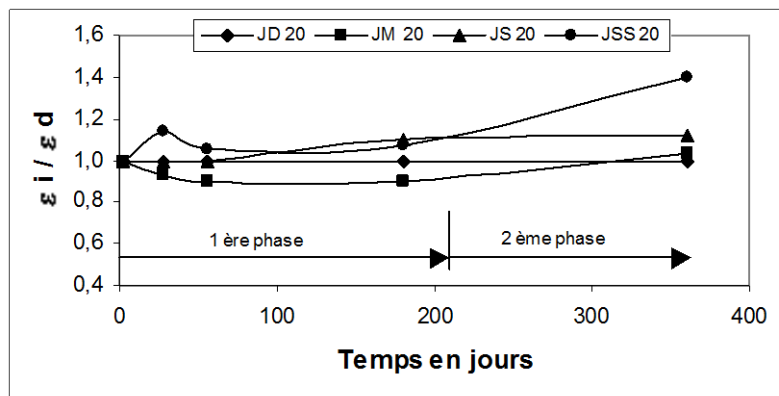
Avec:

$\varepsilon_i$  : déformation relative (moyenne de trois résultats) des éprouvettes conservées dans un milieu  $i$  (eau de mer ou eau séléniteuse ou eau très sulfatée)

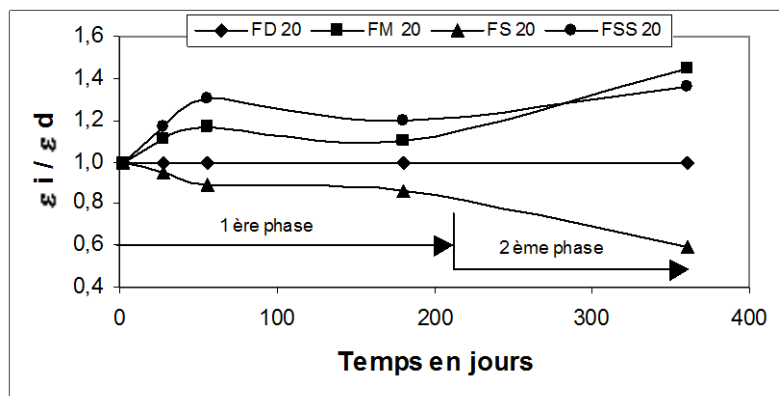
$\varepsilon_D$  : déformation relative (moyenne de trois résultats) des éprouvettes conservées dans l'eau déminéralisée.



**Figure 6** – Cinétique de dégradation du CPA (A) en fonction du rapport ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ )



**Figure 7** – Cinétique de dégradation du CPJ (J) en fonction du rapport ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ )



**Figure 8** – Cinétique de dégradation du CHF (F) en fonction du rapport ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ )

### 2.3.4. Discussion

Pour mieux interpréter les résultats, il est nécessaire de revenir sur plusieurs points :

- Il est utile de rappeler que les éprouvettes n'ont pas subi de cure préalable. Elles ont été plongées dans les solutions agressives au démoulage (24 heures après le coulage). Par conséquent le laitier n'a pas pu développer librement son caractère pouzzolanique. On sait que les constituants du laitier sont solubles à partir d'un  $\text{pH} \geq 11$  [34], or le pH de toutes les solutions se situe entre (6.8 - 7.9) et (9 - 10) (figure 9).
- Des mesures de pH (figures 9) ont en effet montré que les solutions sont passées de pH neutre (6.8 - 7.9) à moyennement basique (8.9 - 9.5) à la température de 20 °C, alors qu'à 40 °C les pH des solutions ont atteint des valeurs légèrement plus élevées (9.3 - 10.1) au bout de quelques jours. D'autres mesures de pH effectuées à 180 jours à la température de 20 °C ont données des valeurs proches de 10 (9.5 - 9.9) pour tous les bains. Il est connu que lorsque le pH est  $> 9$ , la cinétique de dégradation est lente. Les indications données dans la bibliographie montrent que c'est un pH peu agressif pour les matériaux cimentaires.
- Certes l'hydratation des ciments se déroule dans un milieu basique avec un pH compris entre 12 et 13, de sorte que tout autre milieu dont le pH est inférieur peut être considéré comme agressif car augmentant fortement les solubilités de certains hydrates, telle que la portlandite [125]. Il n'empêche que l'évolution rapide du pH traduit bien l'effet de la dissolution de la portlandite, et diminue de ce fait rapidement l'agressivité chimique du milieu de cure. Pour augmenter cette agressivité, nous avons suivi l'évolution du pH et renouvelé les bains périodiquement (figure 9). Une autre possibilité, applicable par exemple pour l'eau de mer, serait de conserver les éprouvettes in situ, en milieu marin naturel.

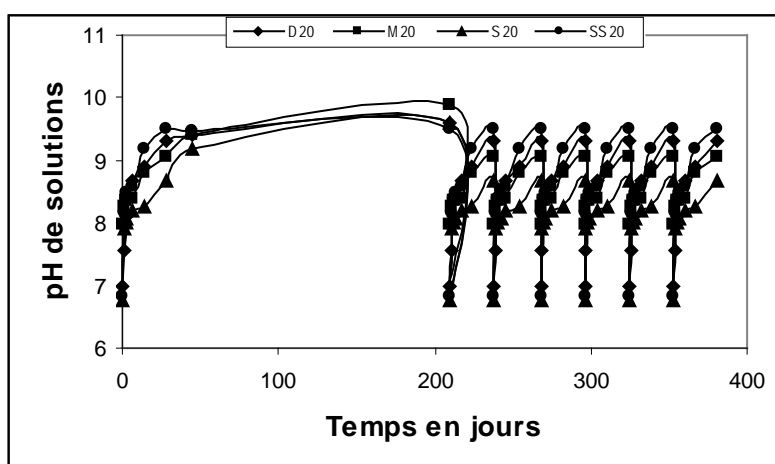
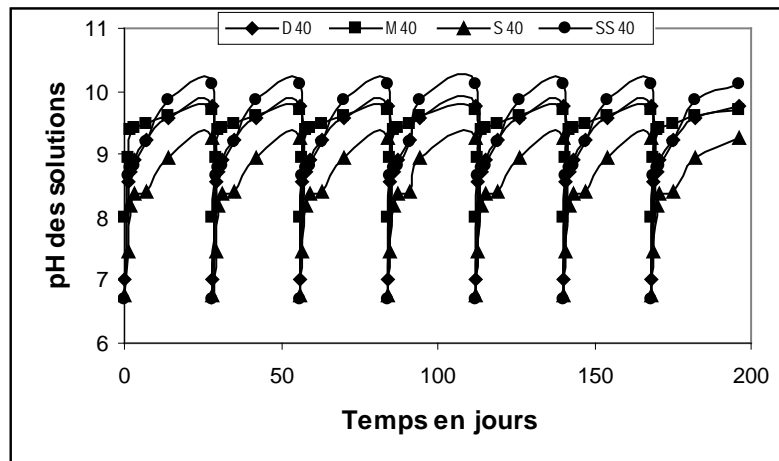


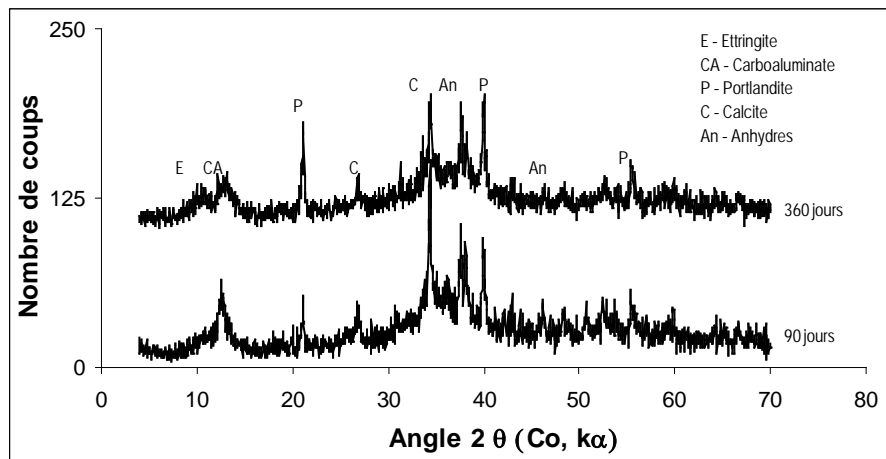
Figure 9 – Evolution du pH des solutions de conservation à 20°C en fonction du temps



**Figure 9 bis** – Evolution du pH des solutions de conservation à 40°C en fonction du temps

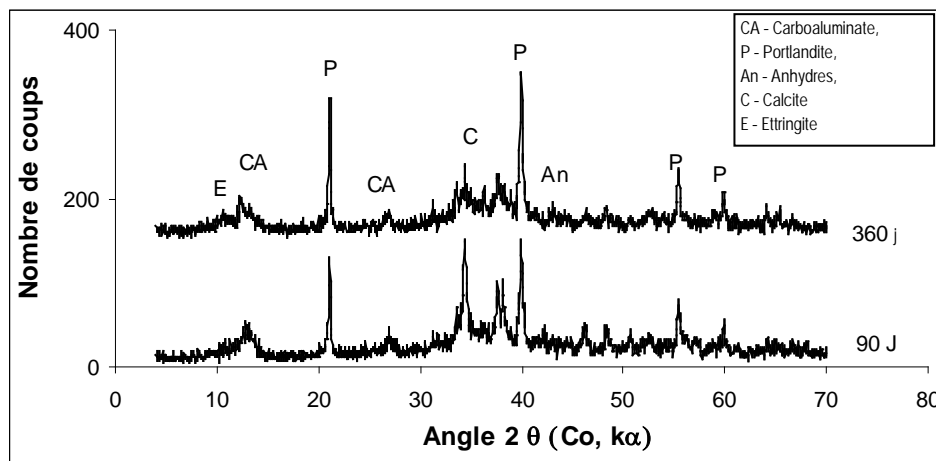
Quelques enseignements peuvent malgré tout être tirés de cette étude :

- Les cinétiques de durcissement du CPA et CPJ sont différentes de celle du CHF. Celle du CHF est plus lente, et sa classe de résistance est très inférieure à celles du CPA et du CPJ (figure 1).
- Les résultats obtenus montrent une faible agressivité qui se caractérise par une cinétique de dégradation très lente et tout particulièrement pendant la première phase (pour rappel, les bains n'ont pas été renouvelés pendant cette période, ce qui peut être assimilé dans la pratique à une eau stagnante). Cette faible agressivité des bains s'est traduite par des pertes de résistance modérées de l'ordre de 15 % et de faibles gonflements (figures 2,3 et 4).
- Pendant la deuxième phase, l'agressivité des bains a été augmentée par leur renouvellement fréquent et la diminution du rapport (surface éprouvette / volume solution agressive), ce qui a entraîné des pertes de résistance mécanique de l'ordre de 30 % (figures 2,3 et 4) et des gonflements plus importants (figures 6,7 et 8).
- De façon classique les bains sulfatés (S et SS) sont les plus agressifs (figures 2 et 3) et en particulier le sulfate d'ammonium (figures 6 et 7) [5] pour le CPA et le CPJ. Par contre l'eau de mer constitue le bain le plus agressif pour le CHF (figures 4 et 8). Les diagrammes de diffraction des rayons X du CHF présentés sur la figure 9, hydraté en eau de mer à 90 et 360 jours, montrent une diminution des pics de carbonate lorsque les bains sont fréquemment renouvelés. On peut donc en tirer deux enseignements :
  1. le CHF a une bonne tenue en eau de mer (cas d'une eau stagnante peu agressive) mais pas en milieu marin (cas très agressif).
  2. cette relative bonne tenue du CHF en eau de mer est due vraisemblablement à la stabilité des carbo - aluminates et de la calcite [128 - 129] (figure 10).



**Figure 10** - Diagramme de diffraction des rayons X à 90 et 360 jours du CHF durcissant en eau de mer à 20 °C

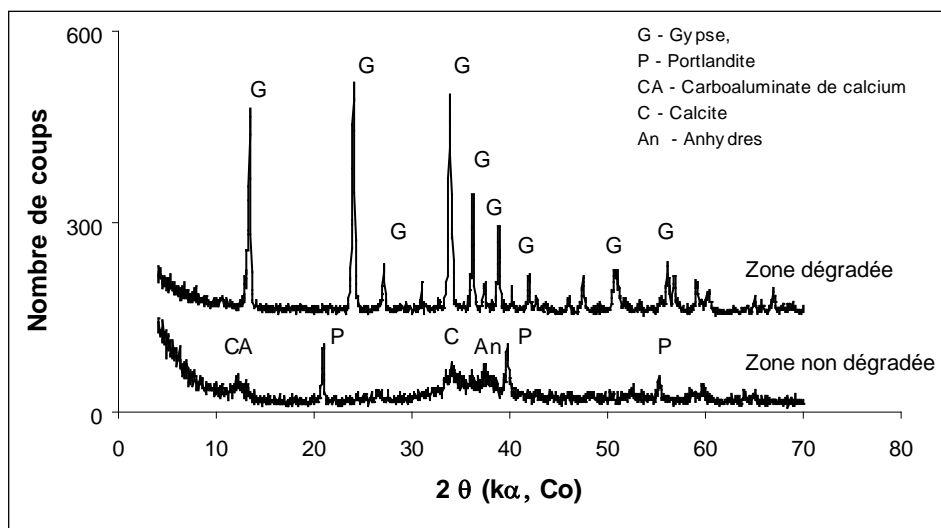
- L'hypothèse avancée concernant la bonne tenue du CHF pendant la première phase grâce à la stabilité des carbonates est observée pour le CPJ également conservé en milieu sulfaté (S) avec une tendance à la diminution de leurs pics et l'apparition du pic de l'ettringite (figure 11), lorsque l'agressivité du bain est augmenté par des renouvellements fréquents pendant la deuxième phase.



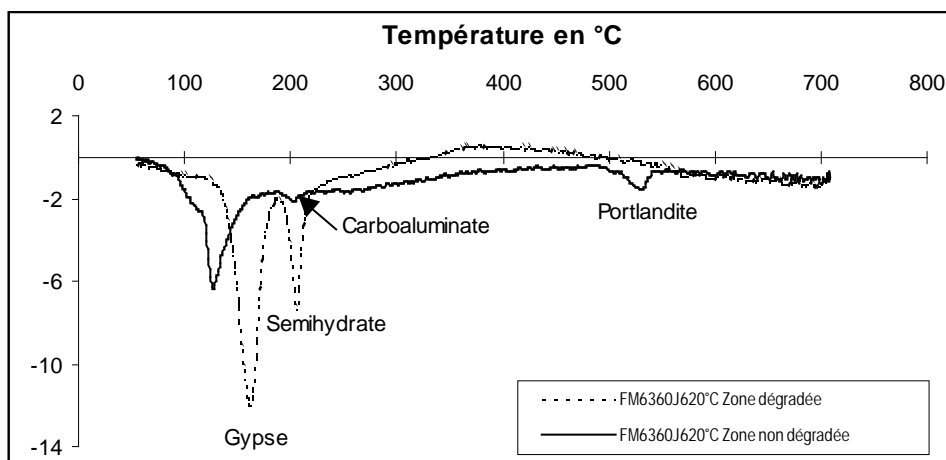
**Figure 11** – Diagramme de diffraction des rayons X à 90 j et 360 j du CPJ durcissant en eau sulfatée (S) à 20 °C

- L'analyse par diffraction aux rayons X effectuée sur deux échantillons de CHF conservés pendant 360 jours en eau doublement sulfatée (SS), prélevés dans le cœur et dans la peau d'une éprouvette est présentée sur la figure 10. Effectivement on peut voir clairement deux états :

1. Un diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon prélevé dans le cœur de l'éprouvette (partie saine qu'on appellera zone non dégradée (ZND)) avec les hydrates habituels (figure 12).
2. Un diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon prélevé dans la peau de l'éprouvette correspondant à la zone dégradée (ZD) révélant la cristallisation du gypse. La formation du gypse pourrait être le résultat d'interaction entre les ions sulfates ( $\text{SO}_4^-$ ) du bain et les ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) résultant de la dissolution des hydrates du ciment. Une analyse thermique différentielle (figure 13) menée sur les mêmes échantillons ayant servi aux analyses DRX a vérifié et complété les résultats des analyses DRX. Ces résultats confirment les données bibliographiques concernant la forte agressivité du sulfate d'ammonium [74].



**Figure 12** – Diagramme de diffraction des rayons X du CHF durcissant en eau doublement sulfatée (SS) à 20 °C après 360 jours de conservation.

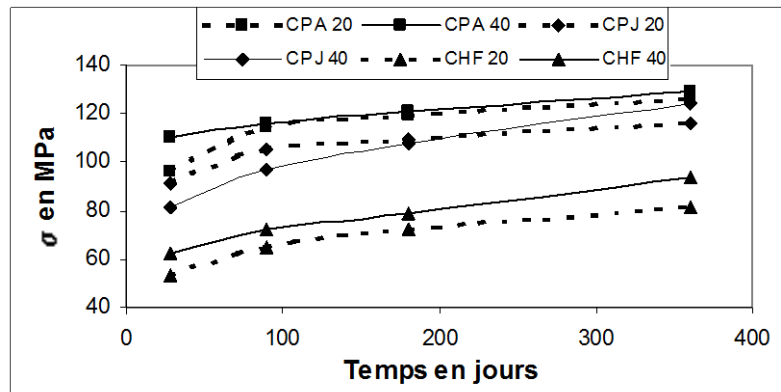


**Figure 13** – Diagramme d'analyse thermique différentielle du CHF durcissant en eau doublement sulfatée à 20 °C après 360 jours de conservation.

## 2.4. Cure à 40 ° C

### 2.4.1. Cinétique de durcissement :

La cinétique de durcissement des trois ciments (CPA, CPJ et CHF) conservés dans l'eau déminéralisée à une température de 40 °C à différentes échéances (28, 90, 180 et 360) jours est présentée sur la figure 14.

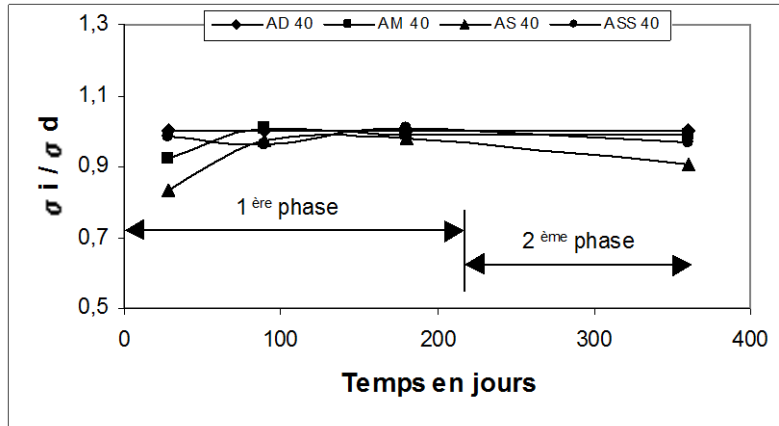


**Figure 14** - Cinétique de durcissement des trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) dans l'eau déminéralisée (D) Comparaison entre 20 et 40°C.

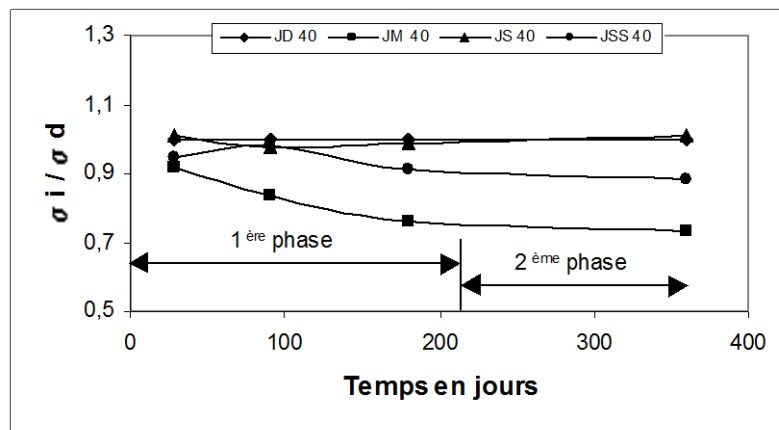
Les résistances sont supérieures à celles obtenues à 20°C de conservation à 28 jours et se rejoignent à plus long terme, sauf pour le CHF où la température améliore de façon très nette les résistances aussi bien à court terme qu'à long terme [49]. Les cinétiques des trois ciments (CPA, CPJ et CHF) sont toutefois proches de celles rencontrées à 20 °C et le CHF présente, comme à 20°C, des résistances notablement inférieures à celles du CPA.

### 2.4.2. Influence du milieu de conservation sur le rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )

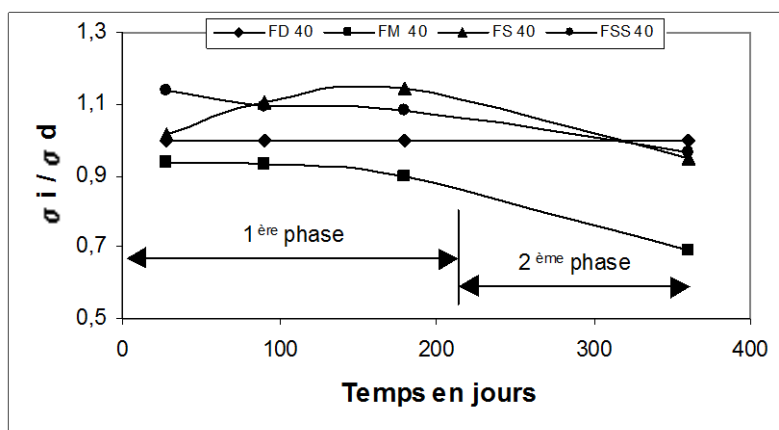
La même méthode d'exploitation des résultats qu'à 20°C donne les courbes ( $\sigma_i / \sigma_D$ ) présentées sur les figures 15, 16 et 17.



**Figure 15 - Cinétique de dégradation du CPA (A) en terme de rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )**



**Figure 16 – Cinétique de dégradation du CPJ (J) en terme de rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )**



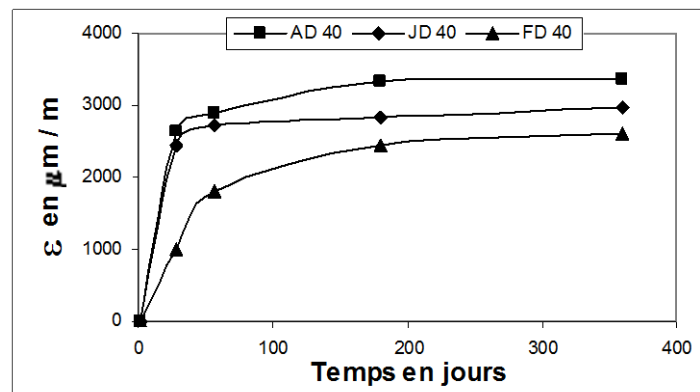
**Figure 17– Cinétique de dégradation du CHF (F) en terme de rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )**

Les résultats sont peu différents de ceux obtenus à 20°C. En effet, ces mêmes bains, à 40°C, apparaissent quelque soit le ciment comme peu agressifs, comme à 20°C, le milieu eau

de mer étant ici aussi le plus agressif vis à vis du CHF et les sulfates plus agressifs par rapport aux CPA et CPJ.

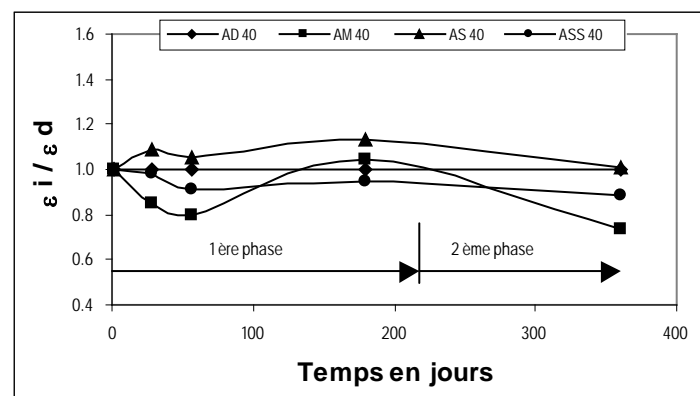
### 2.4.3. Influence du milieu de conservation sur les variations dimensionnelles et le rapports $\epsilon_i / \epsilon_d$ de trois types de ciments (CPA, CPJ et CHF)

La cinétique des variations dimensionnelles est voisine de celle constatée à 20°C, la pâte de CPJ présentant des variations plus faibles, intermédiaires entre celles du CPA et du CHF (figure 18).



**Figure 18** – Evolution du gonflement des trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) conservés à 40°C en eau déminéralisée (D)

Les gonflements sont peu influencés par la température, et les rapports de gonflement ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ ) dépendent surtout de la nature du bain et du type de ciment (figures 19, 20 et 21).



**Figure 19** – Cinétique de dégradation du CPA (A) à 40°C en terme de rapport ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ )

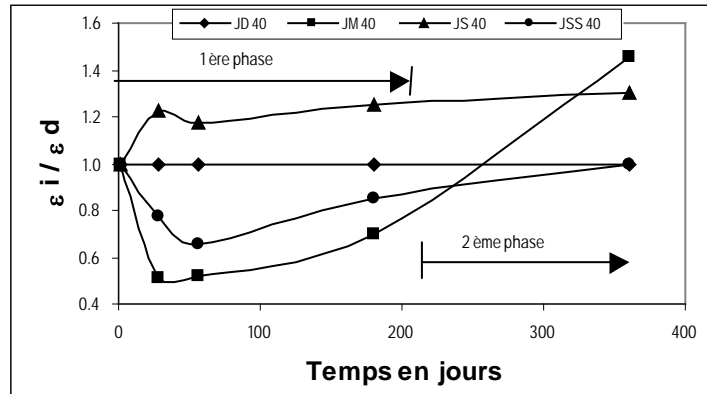


Figure 20 – Cinétique de dégradation du CPJ (J) à 40°C en terme de rapport ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ )

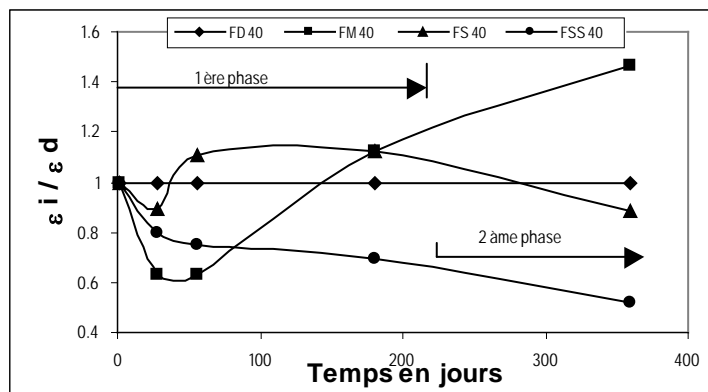


Figure 21– Cinétique de dégradation du CHF (F) à 40°C en terme de rapport ( $\epsilon_i / \epsilon_d$ )

### Commentaires

- La cinétique de durcissement du CPA, CPJ et CHF est peu influencée par la température, même si un gain de résistance est observé pour le CHF aussi bien à court qu'à long terme (figure 14) par rapport à une hydratation à 20 °C.
- A 40 °C, les baisses de résistance dues à l'agression chimique des bains de conservation ne sont pas plus importantes qu'à 20 °C (figures 15, 16 et 17). On sait que la température a une action double sur les pâtes de ciment : elle accélère la cinétique de durcissement et la cinétique de dégradation. Il se pourrait donc que les deux effets se soient neutralisés, d'autant que les éprouvettes étaient en cours d'hydratation dans les milieux agressifs.
- Le CHF résiste assez bien aux sulfates et est sensible à l'eau de mer, comme à 20 °C. Les bains sulfatés (S et SS) restent les plus agressifs vis à vis du CPA et du CPJ.

## 2.5. Discussion

- Pourquoi les résistances mécaniques diminuent - elles légèrement dans le cas d'agression chimique par les sulfates et les chlorures ? Essentiellement pour nos ciments, par des phénomènes de dissolution, sans formation de produits de réactions insolubles. Ceci conduit en général à une augmentation de la porosité, principale cause de baisse des résistances.
- L'influence de la nature des bains de conservation sur la résistance en compression des trois ciments n'est pas très forte à 20°C, mais on peut constater que la conservation en eau de mer (M) est préjudiciable pour le CHF et que l'eau séléniteuse (S) est le milieu le plus agressif pour le CPA et le CPJ.
- L'influence de la température de conservation doit être étudiée en veillant aux éventuels couplages. En effet, les résultats montrent que les mêmes bains à 40°C sont peu, voire pas agressifs. On vérifie ici aussi que le paramètre essentiel qui régit la durabilité d'un ciment, c'est la résistance, révélateur notamment de sa compacité. Il faut aussi souligner que la solubilité de la portlandite est plus faible à 40° qu'à 20°C [74].
- La durabilité du CHF étudié dans les conditions expérimentales c'est à dire en s'hydratant en milieu agressif n'est ni meilleure ni pire que celles des deux autres ciments. La comparaison avec les données bibliographiques [74, 126 et 128] ne peut pas se faire car d'un côté le dosage minimum requis de laitier doit être d'au moins 60 % pour résister en milieu agressif et de l'autre côté les études sont menées sur des éprouvettes n'ayant pas subi de cure préalable.
- Les faibles résistances mécaniques développées par le CHF par rapport aux CPA et CPJ sont dues principalement au fait que la finesse Blaine de 3000 cm<sup>2</sup>/g n'est pas suffisante pour assurer une cinétique de durcissement normale du CHF en milieu agressif. Selon Alexandre [1] les ciments au laitier sont broyés plus finement (3500 à 4000 cm<sup>2</sup>/g) que les ciments sans ajout (3000 à 3500 cm<sup>2</sup>/g).
- Toutes les pâtes de ciment gonflent dans l'eau, les gonflements les plus importants se produisant dans les bains sulfatés ( eau doublement agressive SS à 20°C (figures 6, 7 et 8) et eau séléniteuse S à 40°C (figures 15, 16 et 17). Le CHF est dans tous les cas le ciment qui gonfle le moins (figures 5 et 14).
- Le suivi par diffraction des rayons X de l'hydratation des pâtes conservées dans différents milieux nous a permis de confirmer dans les ciments anhydres la présence de faible quantité de gypse, sans doute bien en dessous de ce qui est permis par les normes [53] (teneur en sulfate de calcium CaSO<sub>4</sub> ≤ 3.5 %), ce qui a entraîné la formation de très faibles quantités d'ettringite dans les ciments hydratés, ainsi que la formation avec le C<sub>3</sub>A restant d'une nouvelle phase hydratée, le carbo - aluminat de calcium hydraté, minéral assez stable. En effet les carbo – aluminates sont peu solubles [34], on les retrouve à toutes les échéances (figure 9), et ils sont donc en grande partie à l'origine de la résistance des trois ciments aux agressions chimiques utilisées dans cette étude.

## 2.6. Conclusion

Les études de durabilité sur pâte de ciment nécessitent des temps d'expérimentation conséquents. Notre travail cherche à montrer l'effet du laitier sur la durabilité des ciments en milieux chimiquement agressifs tels que l'eau de mer ou les eaux sulfatées, par rapport au ciment portland pur.

Les résultats obtenus durant une année d'expérimentation ne permettent pas de montrer une influence majeure des milieux agressifs sur la résistance mécanique en compression simple et sur les variations dimensionnelles, et par suite un effet dû à la présence de laitier dans le ciment.

On peut certes noter une légère supériorité du CHF sur les autres ciments (CPA et CPJ), mais cette supériorité est moindre que celle à laquelle on pouvait s'attendre, vraisemblablement pour les raisons indiquées ci - après .

Deux jours de conservation dans les conditions standard ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $H \geq 50 \%$ ) sont insuffisants pour permettre au laitier de réagir avec la portlandite du clinker (réaction pouzzolanique). Certains auteurs [115] considèrent même qu'une cure humide de 28 jours des ciments au laitier reste insuffisante. VERNET [126] écrit : "ce n'est pas le même matériau qu'on expose lorsque la cure humide est de 1 jour, 2 jours ou un mois".

L'influence de l'ajout de laitier sur la résistance chimique des ciments est bénéfique pour des taux de substitution supérieur à 60 % [22, 27 et 74] et en assurant au ciment une bonne cure (délais, humidité et température).

Certains chercheurs [128] attribue l'agressivité relativement faible de l'eau de mer à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du béton. L'effet bénéfique de la carbonatation sur la stabilité des bétons conservés en eau de mer a été également démontrée par M.REGOURD [129].

Les pâtes conservées dans des bains de sels ont des cinétiques de dégradation très lentes. L'unité de mesure du temps d'altération des pâtes est plutôt en nombre d'années. Par exemple SOUKATCHOF [115] a mesuré 12 et 18 mm de profondeur dégradée sur respectivement un CPA et un CHF après 15 ans d'exposition aux eaux douces faiblement agressives

Le pH d'une solution influe directement sur sa cinétique de dégradation [130]. La vitesse de saturation en chaux, la fréquence de renouvellement des solutions et le rapport (surface des éprouvettes / volume de solution) n'ont pas permis de maintenir le pH suffisamment bas pour obtenir des résultats significatifs dans les délais imposés par la durée de la thèse.

Les divers résultats présentés ici ne montrent pas une influence majeure et rapide des conditions de cure (milieu et température) sur la durabilité des trois pâtes pures étudiées. La durée des essais est peut être trop courte pour ce genre de milieu (eau de mer et eaux sulfatées) qui se caractérisent par une très lente cinétique d'agressivité même à une température de 40 °C. Ceci nous a conduit à chercher un moyen pour accélérer les processus de dégradation.

Un moyen aurait pu être de baisser encore le pH, mais dans ce cas la méthodologie expérimentale serait devenue lourde et délicate à gérer.

Notre choix s'est porté sur l'attaque accélérée des pâtes de ciments dans le cadre de deux essais qui ont des cinétiques de dégradation rapide :

1. Bain de nitrate d'ammonium [117]
2. Carbonatation accélérée en milieu contrôlé

### **3. ESSAI ACCELERE D'AGRESSION CHIMIQUE COUPLEE A LA TEMPERATURE : CONSERVATION APRES CURE HUMIDE DANS UN BAIN DE NITRATE D'AMMONIUM.**

#### **3.1. Introduction**

L'étude de la durabilité nécessite des temps d'expérimentation conséquents comme nous l'avons vu dans la première partie. C'est pourquoi, pour faire aboutir notre démarche qui consiste à étudier la résistance chimique de trois ciments (CPA, CPJ et CHF) et pour mettre en évidence l'effet du laitier, nous avons préconisé de conserver nos éprouvettes en pâte pure dans un milieu plus agressif. Selon DUTRUEL [116] pour qu'un sel soit très agressif vis à vis du béton, il doit satisfaire aux trois conditions :

- être soluble dans l'eau
- être le sel d'une base plus faible que la chaux
- l'anion correspondant, c'est à dire la partie acide du sel doit former un composé soluble avec la chaux

Selon CARDE [117], les sels d'ammonium et en particulier le nitrate d'ammonium constituent un milieu très agressif et rapide. La cinétique de dégradation des pâtes est liée à la concentration du nitrate d'ammonium dans la solution. L'augmentation de cette concentration amplifie en effet l'intensité des réactions chimiques avec la chaux de la pâte de ciment durcie. Les études menées jusqu'à aujourd'hui concernant l'action du nitrate d'ammonium sur les bétons, les mortiers et les pâtes de ciment [131 - 133] ont été effectuées avec des solutions faiblement concentrées en  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  sur des durées d'expérimentation de 7 ans. D'autres études [117] et [134] ont été menées avec des solutions de nitrate d'ammonium concentrées sur des durées plus courtes.

Dans ces études, la cinétique de diffusion a été quantifiée par les mesures d'épaisseur dégradée et les quantités de calcium lixiviées.

Dans le cadre de notre étude et dans la mesure où notre travail est limité dans le temps, nous avons choisi d'augmenter la concentration du  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  de la solution afin d'obtenir une cinétique de dégradation rapide. La concentration retenue est de 6 mol / l de solution soit 480 g/l, ce qui correspond à la demi saturation.

Le suivi de la dégradation est quantifié par l'évolution relative des résistances mécaniques en compression simple, les pertes de masse et les variations dimensionnelles.

#### **3.2. Conduite des essais**

Le nitrate d'ammonium est dissout dans l'eau à une concentration de 6 moles / litre. Le pH est voisin de 5. L'agressivité de la solution est maintenue constante par le maintien du pH de la solution entre deux valeurs (5 et 8) au cours de l'essai. Pour cela, deux méthodes sont utilisées:

- en ajoutant périodiquement à la solution de nitrate d'ammonium de l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ .
- par le renouvellement de la solution de nitrate d'ammonium.

La fréquence de l'ajout de l'acide nitrique et de renouvellement de la solution ont été choisis afin de respecter au mieux l'hypothèse d'une solution agressive de composition constante. De même le choix du rapport (Surface des éprouvettes / Volume de la solution) égal à  $8 \text{ m}^{-1}$  assure une cinétique de dégradation rapide [117].

Les attaques des éprouvettes de pâte de ciment (CPA – CPJ – CHF) au nitrate d'ammonium ont été réalisées à deux températures (20 et 40°C).

Le pH de la solution de nitrate d'ammonium évolue entre 5 et 8 à 20 °C et 5 et 9 à 40 °C pendant 24 heures, période utilisée pour l'appoint en acide nitrique.

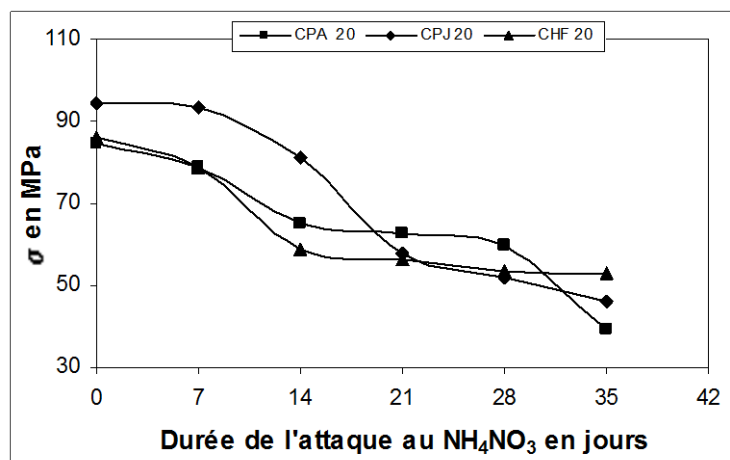
Les éprouvettes ont subi une cure humide (sous l'eau) à la température de 20 °C pendant 90 jours avant d'être placées dans la solution de nitrate d'ammonium. Trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque échéance.

Les échéances des mesures, notamment de résistance mécanique en compression simple, ont été déterminées, en l'absence de données bibliographiques, en se basant uniquement sur les résultats concernant l'observation visuelle de l'épaisseur dégradée [117], la première échéance étant égale à 7 jours. Les autres mesures ont été effectuées à 14, 21, 28 et 35 jours de conservation dans la solution de Nitrate d'ammonium.

### 3.3. Résultats expérimentaux

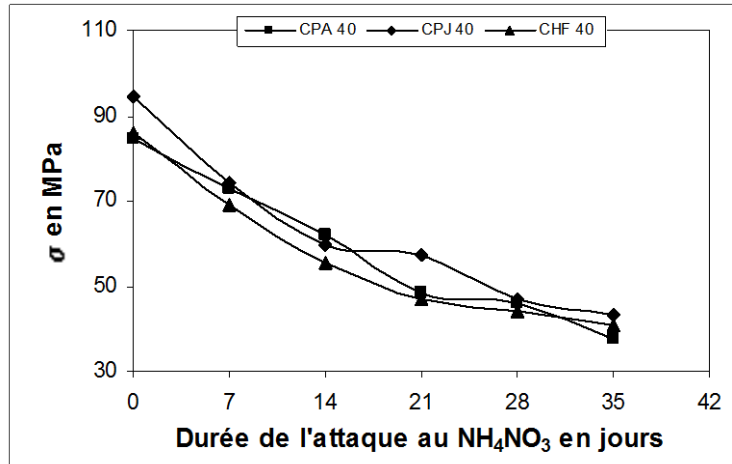
#### 3.3.1. Cinétique de dégradation en terme de résistance

Les résistances des trois ciments après une cure de 90 jours sont voisines avec une légère supériorité pour le CPJ (figures 22 et 23).



**Figure 22** – Cinétique de diminution de la résistance en compression simple ( $\sigma$ ) de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à une température de 20 °C

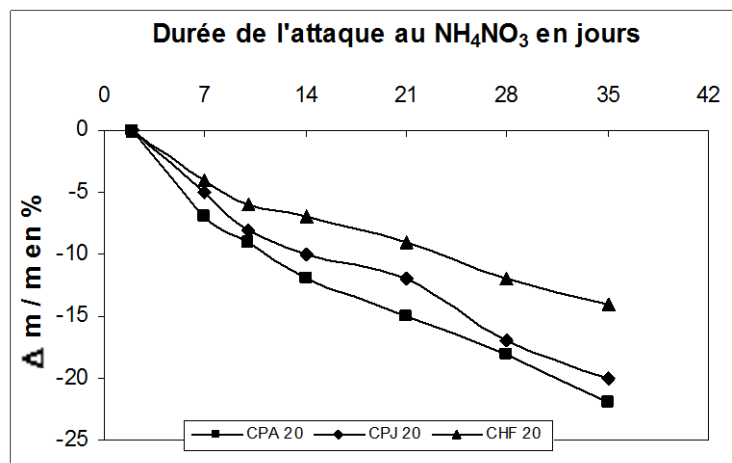
L'action agressive du nitrate d'ammonium sur les pâtes pures de ciment est très rapide, au bout de 35 jours seulement les résistances des ciments ont diminuées de plus de 50% (figures 22 et 23).



**Figure 23** – Cinétique de diminution de la résistance en compression simple ( $\sigma$ ) de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à une température de 40 °C

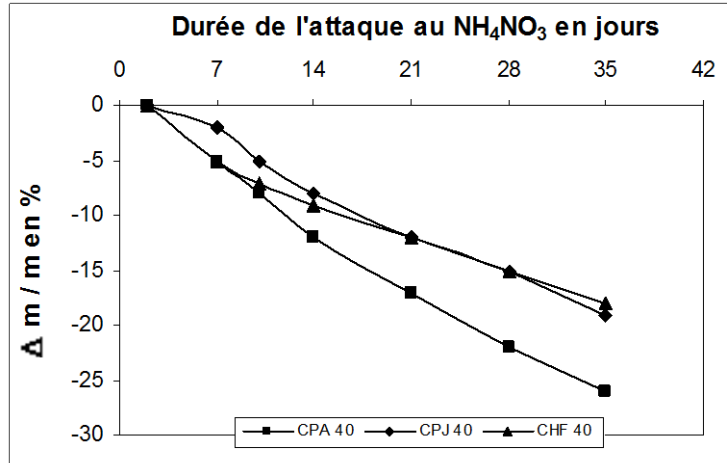
Les pertes de résistance sont plus importantes et plus rapide à 40 °C pour tous les ciments (figure 23). On sait ici que la température accélère le processus de dégradation .

### 3.3.2. Perte de masse



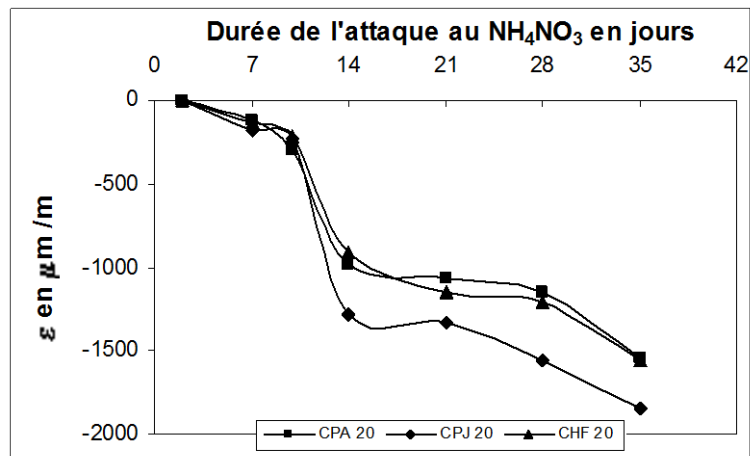
**Figure 24** –Perte de masse de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à une température de 20 °C

Les pertes de masse sont assez importantes, de 15 à 20 (%) à 20 °C (figure 24) et de 20 à 25 (%) à 40°C (figure 25). La perte de masse du CHF est la plus faible dans les deux cas, ce qui est en parfaite corrélation avec la diminution des résistances mécaniques.

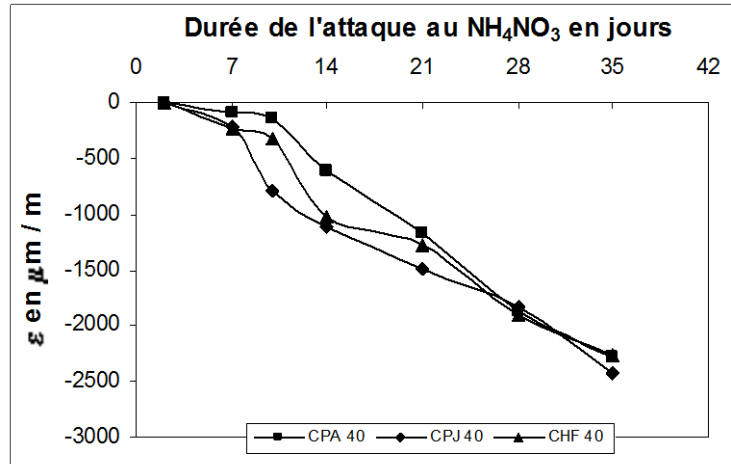


**Figure 25** – Perte de masse de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d’ammonium à 40 °C

### 3.3.3. Variations dimensionnelles



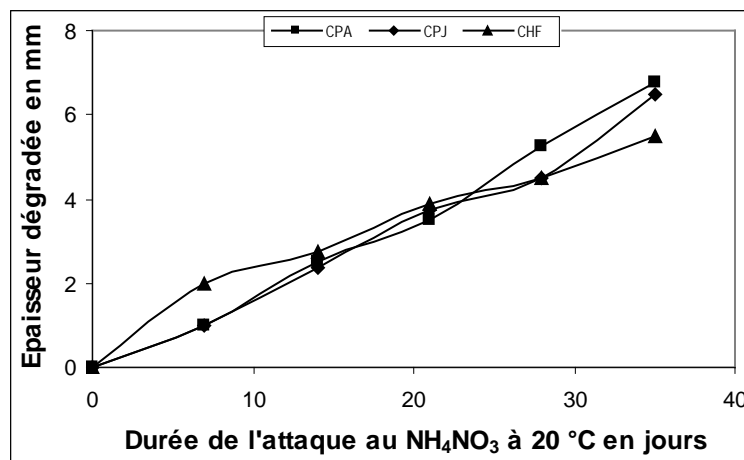
**Figure 26** – Retrait de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d’ammonium à 20 °C



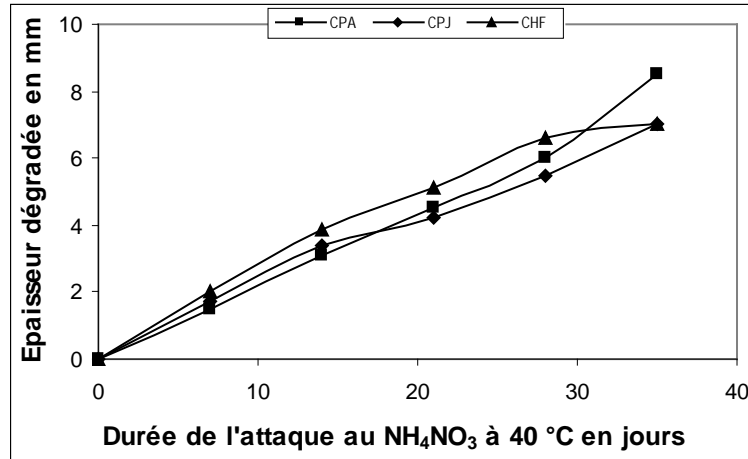
**Figure 27** – Retrait de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 40 °C

Le retrait est 1.5 fois plus important à 40 °C qu'à 20 °C pour tous les ciments ;

### 3.3.4. Epaisseur dégradée

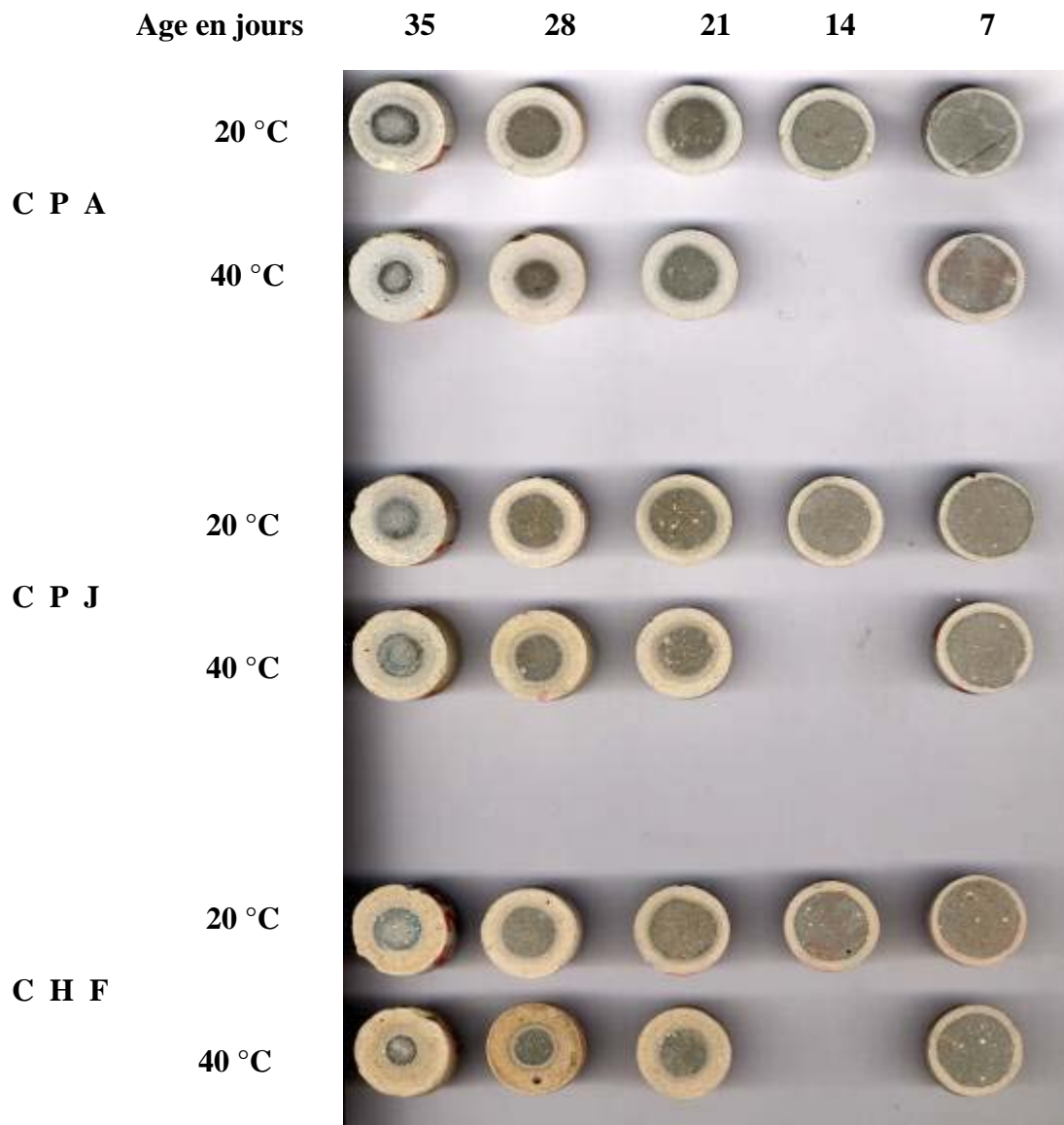


**Figure 28** – Profondeur dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C



**Figure 29** – Profondeur dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d’ammonium à 40 °C

L’épaisseur de la zone dégradée est mesurée à l’aide d’un régle à  $\pm 1$  mm près. L’augmentation de l’épaisseur de la zone dégradée entraîne la diminution de l’épaisseur de la zone saine et par conséquent la diminution de la surface saine (efficace) qui assure la résistance en compression  $\sigma = \frac{F}{S}$  (figures 28 et 29). Donc on cherchera à établir une corrélation entre la résistance mécanique et l’épaisseur de la zone dégradée (voir discussion). L’épaisseur de la zone dégradée constitue donc un autre paramètre intéressant de quantification de la durabilité des trois ciments. Le ciment le plus résistant qui présente une épaisseur dégradée minimale après 35 jours de conservation dans une solution de nitrate d’ammonium est le CHF à 20°C. Par contre à 40 °C, c’est le CPJ qui présente l’épaisseur de la zone dégradée la plus faible. La figure 30 permet de distinguer l’épaisseur de la zone dégradée de couleur claire et le cœur sain des éprouvettes en fonction du temps, de la température et du type de ciment.

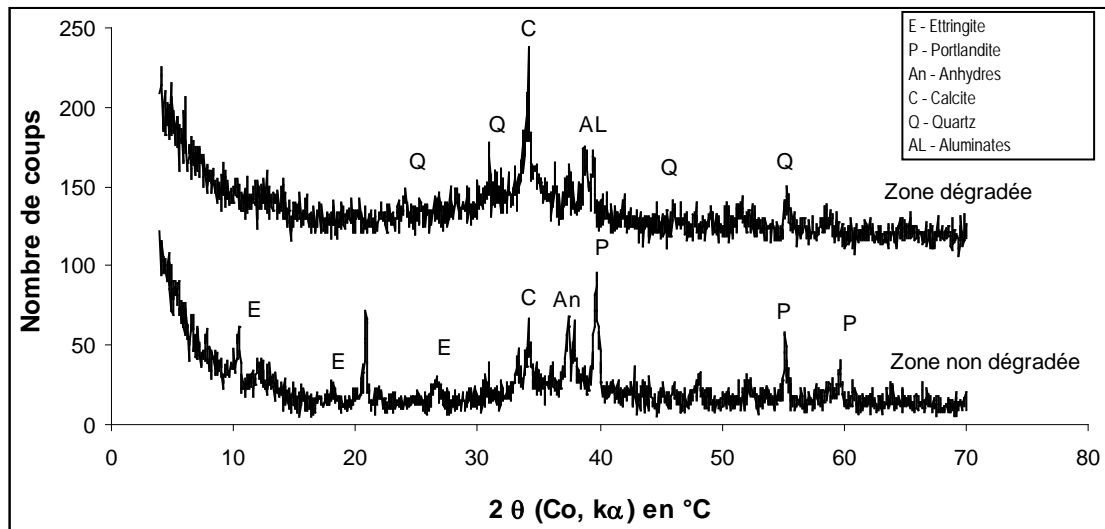


**Figure 30** – Mise en évidence des zones dégradées et des auréoles des pâtes de ciments conservées dans une solution de nitrate d'ammonium

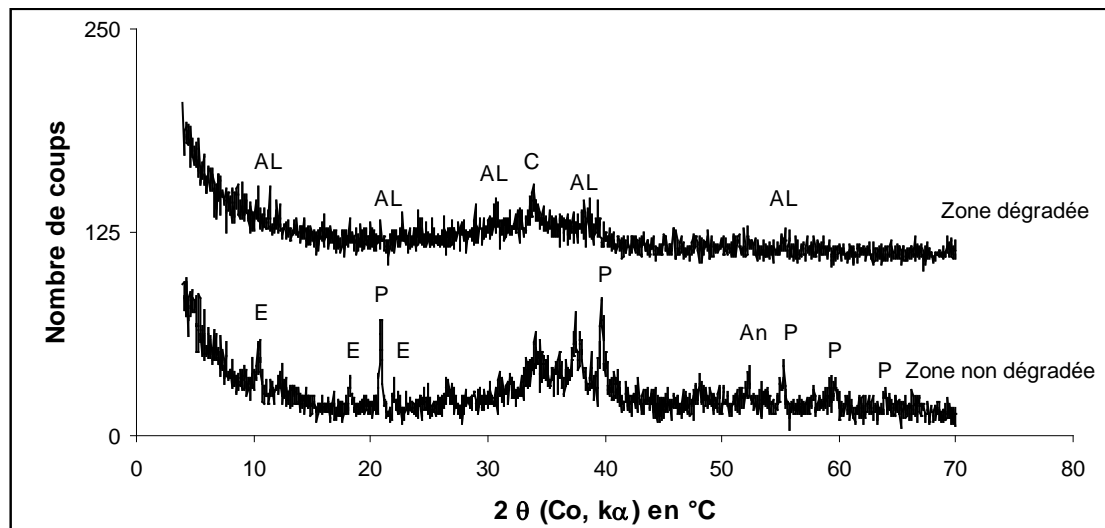
### 3.3.5. Etude qualitative par diffraction des rayons X et par analyse thermique différentielle du processus de dégradation des trois pâtes de ciments (CPA, CPJ et CHF) dans une solution de nitrate d'ammonium

Les analyses par diffraction des rayons X ont été réalisés sur des échantillons de pâtes pures prélevés sur les éprouvettes des trois ciments CPA, CPJ et CHF dans les zones dégradées et dans les zones non dégradées à 28 jours

L'observation des diagrammes DRX (figures 31 et 32) et ATD (figures 33 et 34) met en évidence certaines modifications dans les zones dégradées:



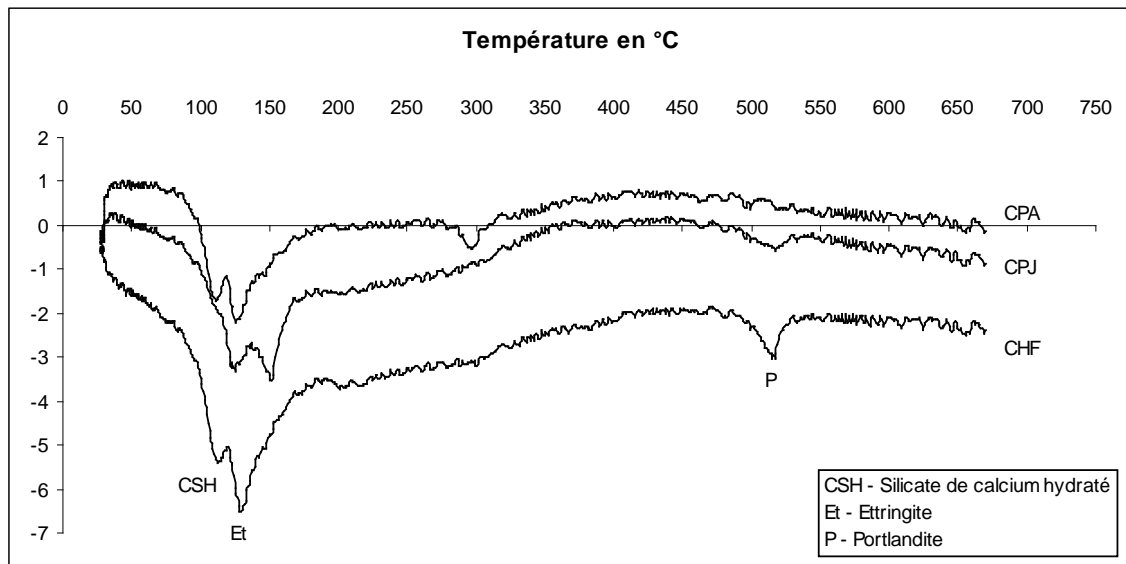
**Figure 31** – Diagramme de diffraction des rayons X de la pâte de CPJ conservée dans une solution de nitrate d’ammonium pendant 28 j



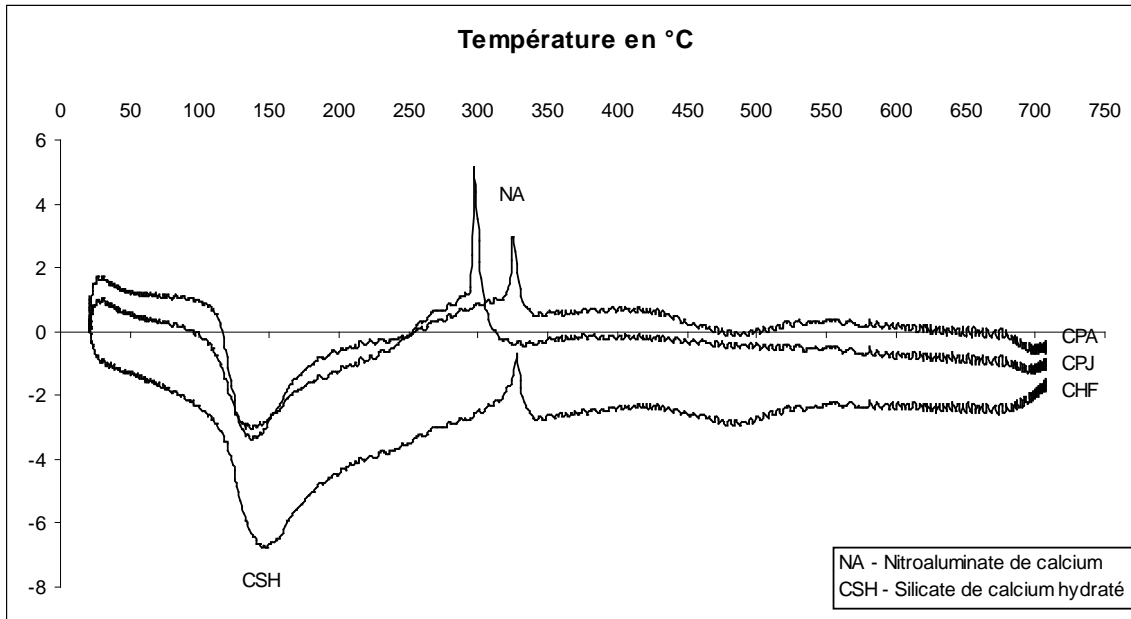
**Figure 32** – Diagramme de diffraction des rayons X de pâte de CHF conservée dans une solution de nitrate d’ammonium pendant 28jours

- dissolution progressive et totale de la portlandite, révélée par DRX (figures 30 et 31) et vérifiée par analyse thermique différentielle (figures 33 et 34) ce qui confirme les constatations de CARDE et ADENOT [117 et 135].
- dissolution totale de l’ettringite au bout de 28 jours de conservation dans la solution de nitrate d’ammonium. Contrairement aux constatations de Carde [117]. Ce minéral est mis en solution lorsque la dégradation est effectuée par action de l’eau faiblement ionisée à pH 4.5 mais ne l’est pas en présence de nitrate d’ammonium.
- stabilité de la calcite déjà formée, augmentation de la carbonatation.

- apparition du quartz, Selon CARDE [117], la concentration du silicium augmente dans la zone dégradée, et le matériau dégradé perd ses propriétés mécaniques et devient friable, ce qui vraisemblablement correspond à la décalcification des CSH, même si l'analyse thermique différentielle a révélée la présence de CSH dans la zone dégradée, ce qui est normal car la décalcification des CSH n'est pas totale.
- Présence des anhydres, principalement les aluminates ( $C_3A$ ) de calcium.
- une nouvelle formation a été mise en évidence par l'ATD (figure 23) mais que la DRX n'a pas révélée, selon certaines données bibliographiques [131] la formation du nitro-aluminate de calcium ( $3.CaOAl_2O_3.Ca(NO_3)_2.10.H_2O$ ) dépend de la nature et la concentration du nitrate utilisé, des conditions expérimentales et du type de ciment.



**Figure 33** – Analyse thermique différentielle de la zone non dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) conservées dans une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C pendant 28 jours



**Figure 34** – Analyse thermique différentielle de la zone dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) conservées dans une solution de nitrate d’ammonium à 20 °C pendant 28 jours

### 3.4. Discussion

En premier lieu il est utile de rappeler que cette étude a été menée sur des éprouvettes en pâtes pures qui ont subi une cure humide de 90 jours.

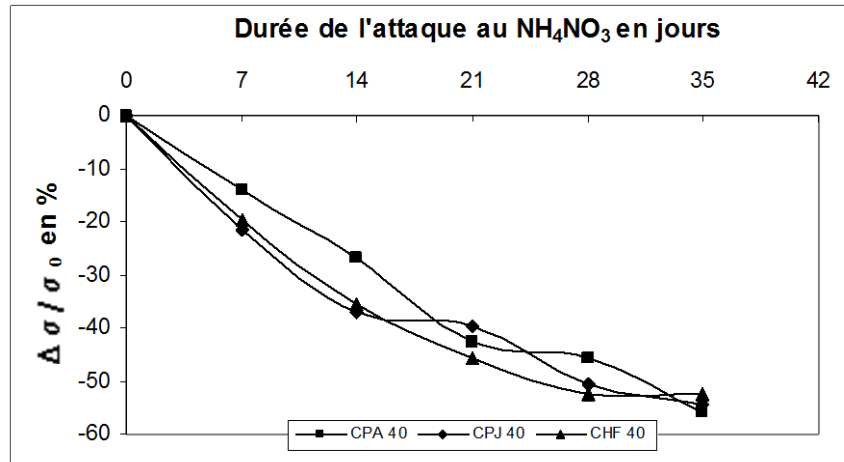
Le processus de dégradation des ciments attaqués par le nitrate d’ammonium conduit essentiellement à la dissolution totale de la portlandite et de l’ettringite, à la décalcification partielle des CSH et la formation du nitro – aluminate de calcium. [117].

Les résultats obtenus mettent en évidence l’influence favorable du laitier sur la résistance chimique des ciments. Les pertes de résistances exprimés en % présentées par la figure 35 montrent la supériorité du CHF par rapport au CPA et CPJ.

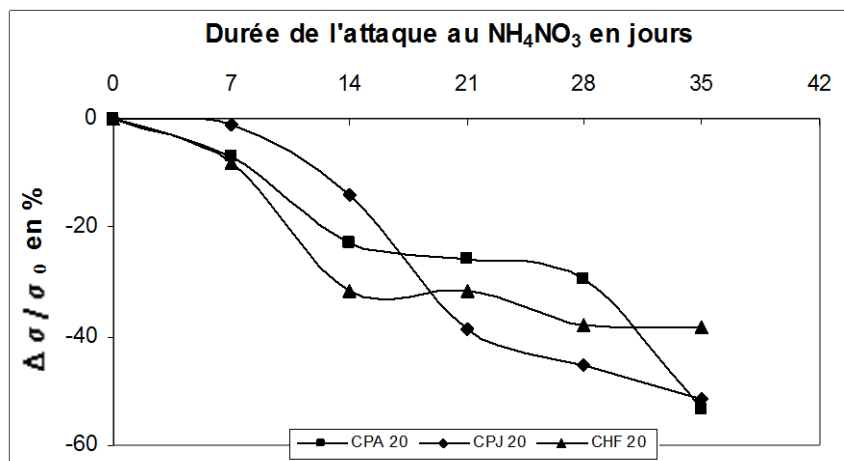
La perte de résistance du CHF est de l’ordre de 35 % alors que celles du CPA et CPJ sont supérieures à 50 % au bout de 35 jours de conservation dans la solution de nitrate d’ammonium (figure 35).

L’action de la température est assez nette, elle accélère la cinétique de dégradation des ciments et en particulier le CHF. Les pertes de résistance des trois ciments sont pratiquement égales, elles sont supérieures à 50 % à 40 °C (figure 35)

La dégradation est plus progressive jusqu’à 21 jours, on observe un ralentissement pour le CPJ et le CPA à partir du 14<sup>ème</sup> jour d’attaque, alors que pour le CHF le ralentissement se situe au 21<sup>ème</sup> jour de conservation dans la solution de nitrate d’ammonium. La dégradation se situe principalement entre le 7<sup>ème</sup> et le 14<sup>ème</sup> jour pour la température de 20 °C (figure 35). Pour la température 40 °C la dégradation est progressive et sensiblement linéaire pendant toute la durée de la conservation dans la solution de nitrate d’ammonium.



**Figure 35** – Perte de résistance de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d’ammonium à 20 °C



**Figure 36** – Perte de résistance de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d’ammonium à 40 °C

### 3.5. Conclusion

La dégradation de la pâte de ciment par le nitrate d’ammonium met en solution la portlandite, l’ettringite et la décalcification partielle des CSH. La chaux dissoute par réaction avec le nitrate d’ammonium conduit à la formation d’un nitrate de calcium soluble et d’un nitro – aluminat de calcium.

Le processus de dégradation des pâtes de ciments (CPA, CPJ et CHF) au nitrate d'ammonium est très rapide, les résultats obtenus au bout de 35 jours de conservation dans une solution de nitrate d'ammonium fortement concentrée (6 moles par litre de solution) montrent une supériorité dans le comportement mécanique du CHF par rapport au CPA et CPJ notamment à une température de conservation de 20 °C. A la température de 40 °C la durabilité des trois ciments (CPA, CPJ et CHF) est comparable, cependant de part sa composition (50 % de laitier granulé de haut fourneau) et son coût, le CHF garde sa performance par rapport aux deux autres ciments.

## **4. ACTION DU DIOXYDE DE CARBONE SUR TROIS CIMENTS cpa – CPJ ET CHF (TEST ACCELERE)**

### **4.1. Introduction**

L'étude de la carbonatation constitue un facteur important pour évaluer la durabilité des ouvrages en béton armé. La migration du CO<sub>2</sub> dans la matrice cimentaire s'accompagne d'une diminution importante du pH de la solution interstitielle. Lorsque la carbonatation atteint les armatures d'acier, celles – ci ne sont plus protégées par le milieu basique que constitue par nature le béton de ciment, la corrosion peut alors s'amorcer.

Du point de vue cinétique, la carbonatation dépend plusieurs facteurs, notamment le type de ciment, de la nature et de la teneur de l'addition minérale.

Cette étude porte sur l'étude de la carbonatation des mêmes types de ciments CPA, CPJ et CHF dont les compositions sont données au tableau 1 en introduction à ce chapitre .

Les paramètres de quantification de la carbonatation sont :

- la mesure de la profondeur de matériau carbonaté.
- la variation de la masse.
- la résistance mécanique en traction par fendage.
- la vitesse de propagation des ultrasons.

### **4.2 Procédure expérimentale [136]**

#### **4.2.1. Eprouvettes utilisées**

Les éprouvettes utilisées pour cette étude sont de forme prismatique de dimensions 4.4.16 (cm) en mortier normal et en pâte pure. Le nombre d'éprouvette par ciment, par échéance et par essais est de trois.

#### **4.2.2. Confection des éprouvettes**

Les éprouvettes en pâte pure sont confectionnées conformément à la norme EN 196 – 3 [127] relative à la détermination de la consistance normale des ciments avec des rapports E / C de 0.26 pour le CPA et le CPJ et 0.25 pour le CHF.

La confection des éprouvettes en mortier normal de composition en poids (ciment 450 g, sable normal 1350 g et 225 g d'eau) est conforme à la norme EN 196 – 1 [93] relative à la préparation des mortiers.

#### **4.2.3. Conservation des éprouvettes**

Les éprouvettes en pâte pure sont démoulées 24 h après le coulage et immergées sous l'eau à une température de 20 °C pendant 90 jours

Les éprouvettes en mortier normal sont démoulées 24 h après le coulage et une première série (Mortier I) a subit un traitement thermique de 2 jours, une deuxième série (Mortier II) a subit un étuvage de 7 jours à une température de 60 °C et une humidité de 100 % et une troisième série (Mortier III) a subi une cure humide (sous l'eau) pendant 28 jours à 20 °C

#### **4.2.4. Conditionnement des éprouvettes**

Toutes les éprouvettes sont séchées à une température de 50 °C pendant 48 heures avant d'être placées dans la cellule de carbonatation. La concentration du dioxyde de carbone est maintenue constante et égale à 50 % et une humidité de 65 %

#### **4.2.5. Echéances des essais**

Les éprouvettes sont retirées de la cellule de carbonatation aux échéances prévues :

- les échéances d'essais sur pâte pure : 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 et jours.
- les échéances d'essais sur mortier normal : 1, 2, 3, 7, 14, 21 et 28 jours.

#### **4.2.6. Détermination de la profondeur carbonatée [136]**

La carbonatation des matériaux à matrice cimentaire, conduit à une diminution du pH de la solution interstitielle . Le pH du ciment non carbonaté est voisin de 13, en revanche le pH du ciment carbonaté est de l'ordre de 8.5. La pulvérisation d'une solution de phénol phtaléine sur une surface partiellement carbonatée permet de distinguer deux zones :

- à la périphérie du corps d'épreuve la couleur du ciment reste la même qu'avant la pulvérisation de la solution du phénol phtaléine, il s'agit de la zone carbonatée.
- au centre du corps d'épreuve la couleur du ciment vire franchement au rose vif, il s'agit de la zone saine.

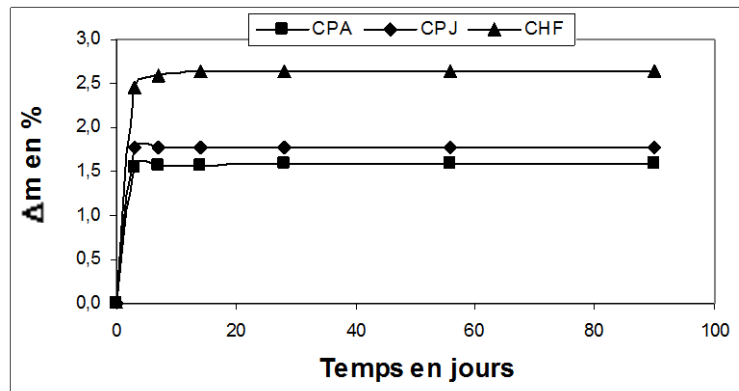
A chaque échéance les corps d'épreuve sont sortis de l'enceinte de carbonatation, un morceau de mortier ou de pâte pure est prélevé sur chaque éprouvette par fracturation par fendage. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte

### **4.3. Résultats sur pâtes pures**

#### **4.3.1. Profondeur de carbonatation**

Après 120 jours de conservation dans la cellule de carbonatation l'épaisseur du front de carbonatation mesuré sur les éprouvettes par la méthode du phénol phtaléine est de 0 cm, c'est à dire qu'il n'y a pas eu de carbonatation.

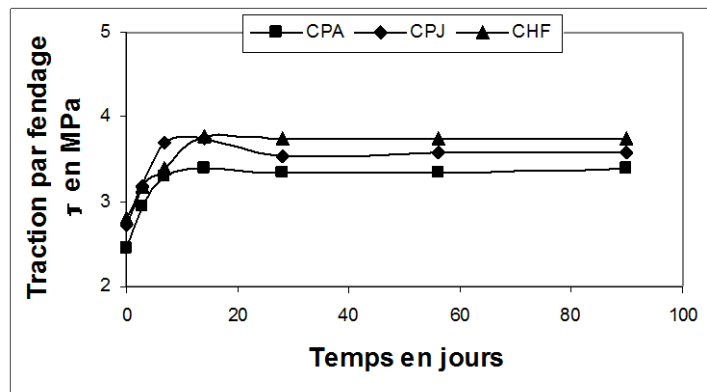
#### 4.3.2. Augmentation de la masse



**Figure 37** – Augmentation de la masse mesurée sur pâtes pures de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

L'augmentation de la masse pendant les premiers jours de conservation dans la cellule de carbonatation n'est pas dû à un début de carbonatation mais à la mise en équilibre hygrométrique des éprouvettes avec le milieu.(figure 37)

#### 4.3.3. Résistance en traction par fendage

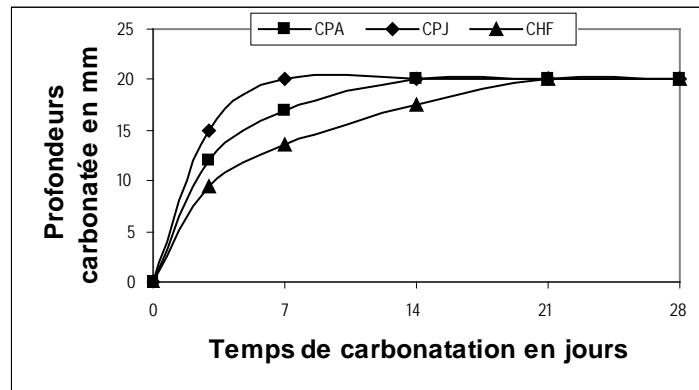


**Figure 38**– Evolution de la résistance en traction par fendage ( $\tau$ ) mesurée sur pâtes pures conservées en cellule de carbonatation

La résistance en traction par fendage des pâtes pures a peu évolué au cours de l'essai de carbonatation .

## 4.4. Résultats sur mortier (I) étuvé pendant 2 jours

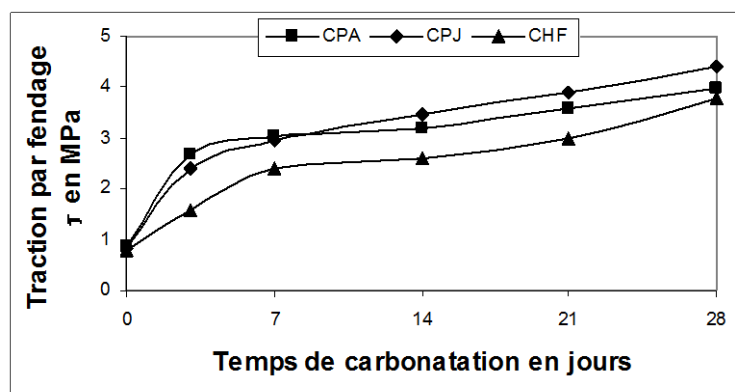
### 4.4.1. Profondeur carbonatée



**Figure 39** – Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier (1) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

Contrairement aux essais menés sur pâtes pures, la carbonatation des éprouvettes en mortier a été très rapide. Le CHF se carbonate moins vite que le CPA et le CPJ, mais après 28 jours, les trois ciments ont subi la même dégradation.

### 4.4.2. Résistance en traction par fendage



**Figure 40** – Evolution de la résistance en traction par fendage ( $\tau$ ) mesurée sur mortier (1) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

L'essai de carbonatation accéléré sur des éprouvettes en mortier a donné une augmentation significative des résistances mécaniques en traction par fendage. Les ciments qui se carbonatent le plus vite sont ceux qui ont enregistré le gain maximum en résistance.

### 4.4.3. Augmentation de la masse

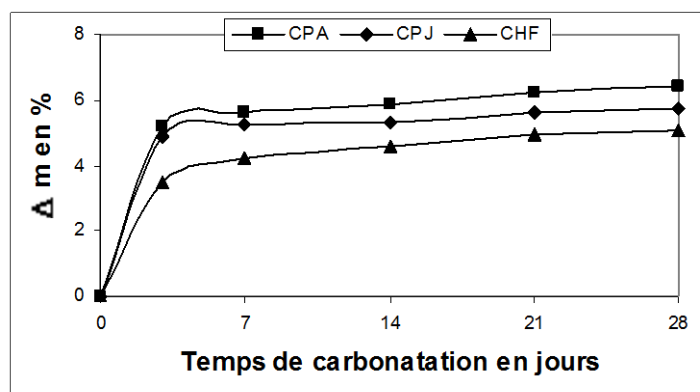


Figure 41 – Evolution de la masse de trois mortiers mesurée sur mortier (1) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

Le gain de masse les premiers jours est dû à la mise en équilibre hygrométrique des éprouvettes et à la carbonatation (figures 40 et 41), la masse continue à augmenter progressivement par effet de carbonatation .

### 4.5. Résultats sur mortier (II) étuvé pendant 7 jours

La durée d'étuvage est plus longue 7 jours au lieu de 2 jours à la température de 60 °C

#### 4.5.1. Profondeur carbonatée

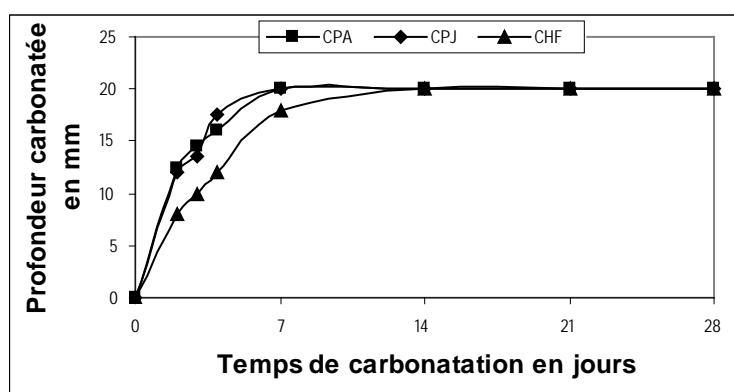
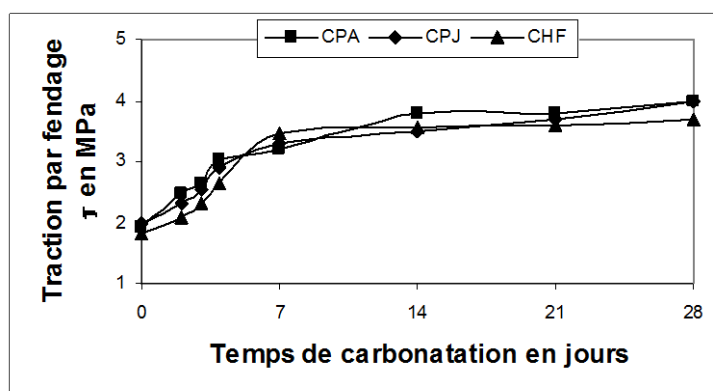


Figure 42– Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier (II) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

La vitesse de carbonatation ne dépend pas de la durée du d'étuvage.

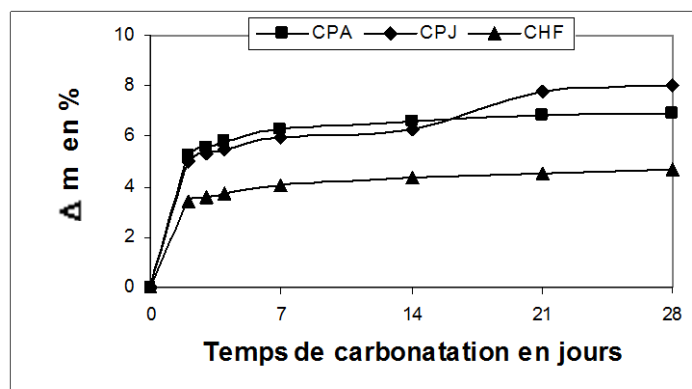
#### 4.5.2. Evolution de la résistance en traction par fendage



**Figure 43**– Evolution de la résistance en traction par fendage ( $\tau$ ) mesurée sur mortier (2) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

La résistance en traction par fendage augmente de façon significative pendant les 7 premiers jours de carbonatation (figure 44), c'est d'ailleurs pendant la même période que nous avons enregistré une évolution rapide du front de carbonatation (figure 43).

#### 4.5.3. Evolution de la masse



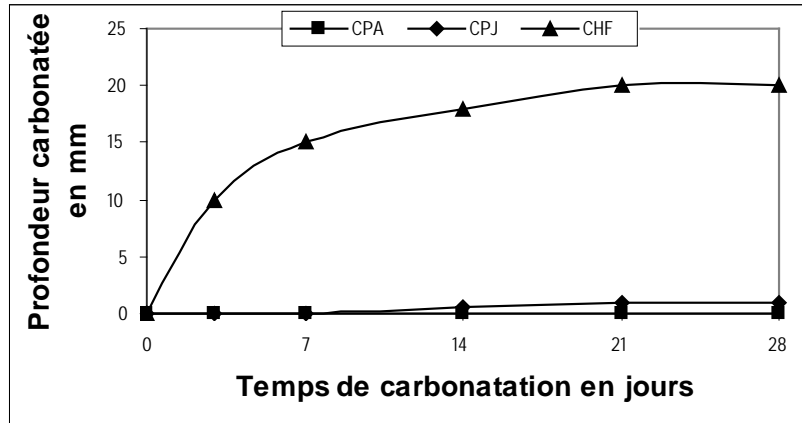
**Figure 44** – Evolution de la masse mesurée sur mortier (2) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

L'augmentation rapide de la masse (figure 4) est le résultat de deux phénomènes simultanés, humidification et carbonatation, à 2 jours nous avons enregistré une profondeur carbonatée en mm de 12.5 pour le CPA, 12 pour le CPJ et 8 pour le CHF.

#### 4.6. Résultats sur mortier (III) :

Le mortier (III) a subi une cure humide de 28 jours à la température standard de 20 °C

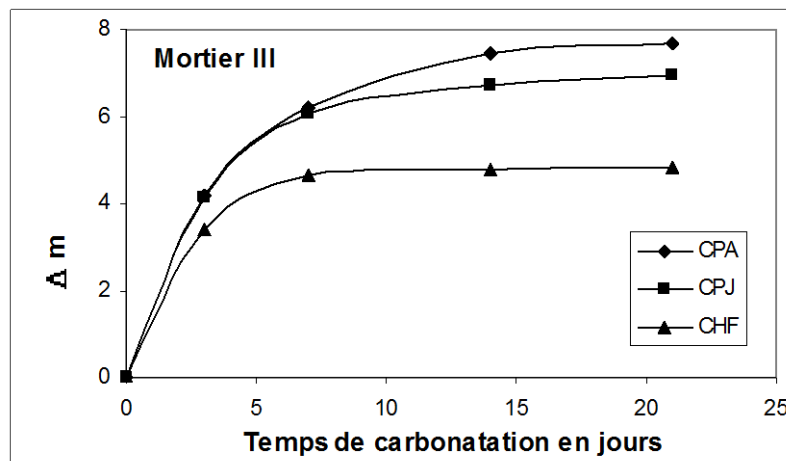
##### 4.6.1. Profondeur carbonatée



**Figure 45** – Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier (3) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

Le ciment de type CHF (50 % de laitier) a une vitesse de carbonatation relativement rapide. Cela peut s'expliquer par la faible quantité de portlandite dans le ciment.

##### 4.6.2. Augmentation de la masse



**Figure 46** – Evolution de masse mesurée sur mortier (3) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

#### 4.6.3. Profondeur carbonatée

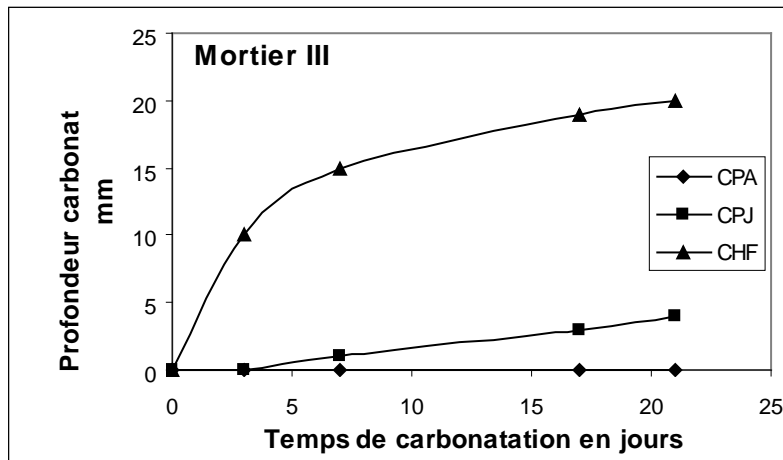


Figure 47– Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier (3) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

#### 4.6.4 Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

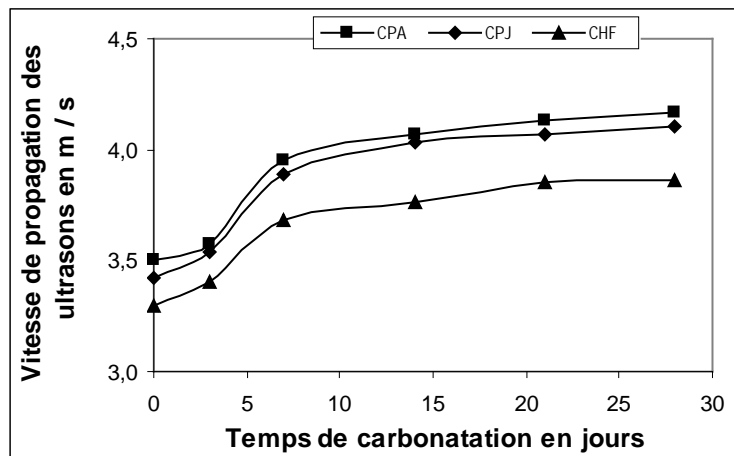


Figure 48 – Evolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques mesurée sur mortier (3) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

Les résultats obtenus sont conformes avec ceux obtenus avec les mesures des profondeurs carbonatées.

#### 4.7. Discussion

La résistance des trois ciments (CPA, CPJ et CHF) vis à vis de la carbonatation accéléré était prévisible même après 90 jours d'exposition à l'action du dioxyde de carbone,

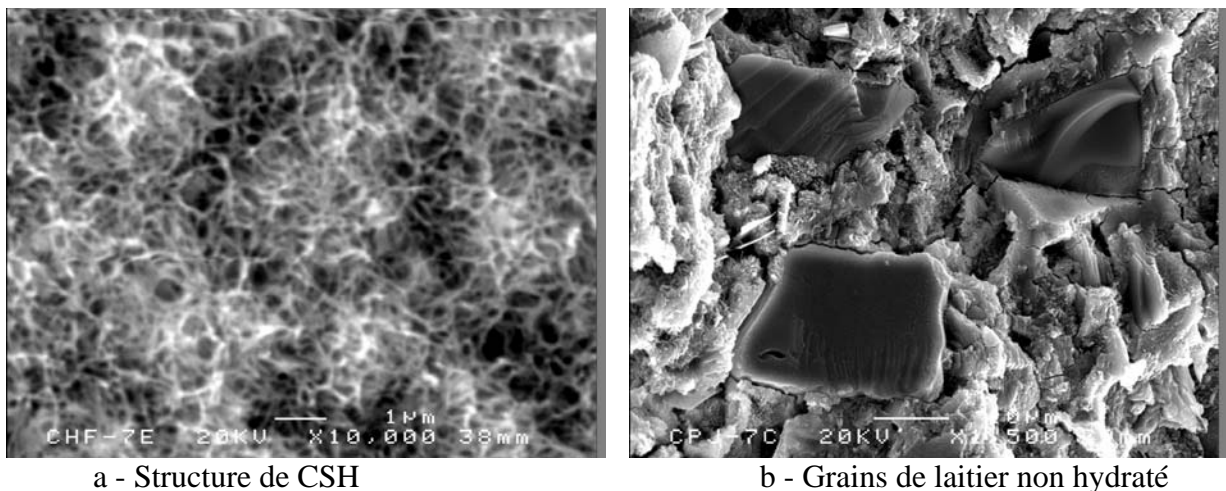
car d'un coté ces essais ont été conduit sur des éprouvettes en pâtes pures (plus homogènes et plus compactes que les mortiers et les bétons) et de l'autre coté les éprouvettes ont subi une cure humide de 90 jours.

Lorsque ces mêmes essais sont conduits sur des éprouvettes en mortier et étuvées, leur carbonatation est totale au bout de 21 jours seulement. La durée d'étuvage a peu d'influence sur la vitesse de carbonatation.

Selon la bibliographie, les ciments au laitier se carbonatent plus vite que le ciment portland [126]. Les ciments au laitier contiennent moins de portlandite que le ciment portland. La formation de la calcite pendant la carbonatation du CPA entraîne la formation d'une couche protectrice dans la peau du matériaux qui ralentit la diffusion du dioxyde de carbone, par conséquent la carbonatation peut être stoppée. Dans les ciments au laitier, en l'absence de quantité suffisante de portlandite pour la formation de la couche protectrice, le dioxyde de carbone diffuse plus rapidement. C'est notamment le cas du mortier III, on constaté une carbonatation totale dans les mortiers de CHF au bout 14 jours. Pour la même durée les mortiers de CPJ et de CPA n'ont pas été carbonatés.

Les ciments au laitier peuvent être aussi résistants que le CPA à l'action du dioxyde de carbone lorsqu'ils subissent une cure humide et de longue durée (90 jours). Ce comportement a été observé sur des éprouvettes en pâtes pures, après 90 jours d'exposition au dioxyde de carbone on n'a pas observé de carbonatation sur les trois ciment (CPA, CPJ et CHF). Il est vrai que les pâtes sont plus denses et plus compactes que les mortiers et les bétons.

Mieux encore, les ciments au laitier peuvent avoir une meilleure résistance que le CPA sous l'action du dioxyde de carbone. Lorsque les ciments au laitier et en particulier de type CHF subissent un étuvage à 60 °C et 100 % d'humidité, ils se carbonatent moins vite que le CPA. Une étude que nous avons réalisé sur l'influence de la température sur la réactivité hydraulique du laitier granulé d'EL HADJAR [49], nous a permis d'observer au microscope électronique à balayage une structure dense des silicates de calcium hydratés dans le CHF (figure 45) ce qui est confirmé par les données bibliographiques [46 et 48].



**Figure 45** - Observation au MEB d'un CHF(a) étuvé à 60 °C et H = 100% et d'un CHF (b) conservé dans les condition standards pendant 28 jours

## 4.8. Conclusion

La cure est un facteur déterminant dans le comportement des ciments vis à vis de l'action du dioxyde de carbone. Les ciments au laitier sont aussi résistants que les autres ciments par rapport à la carbonatation si les conditions et la durée de cure sont suffisantes.

Les ciments au laitier et en particulier les CHF se carbonatent moins vite que les CPA et CPJ lorsqu'ils sont étuvés. Dans les conditions standards de cure les ciments au laitier se carbonatent plus vite que le CPA.

## CONCLUSION DU CHAPITRE

Cette étude comparée de trois ciments CPA, CPJ et CHF a pour objectif de mettre en évidence l'effet favorable du laitier granulé de haut fourneau sur la durabilité des ciments avec des taux de substitution de 20 % (CPJ) et de 50 % (CHF) par rapport au CPA comme témoin. L'étude de la durabilité des ciments su – cités a montrée que:

- les milieux chimiquement agressifs « naturels » telles que l'eau de mer, l'eau séléniteuse se caractérisent par une cinétique d'agressivité très lente de façon générale, le renouvellement des bains augmente de façon très modérée leurs agressivités, d'ou l'intérêt de tests accélérés.

- La cure est un paramètre déterminant dans le comportement des ciments [126 et 49] car ce n'est pas le même le matériaux que l'on expose à l'environnement si la cure en atmosphère humide a duré 1 jour, 2 jours ou un mois : nous avons montrés que lorsque les éprouvettes en pâtes pures de trois ciments s'hydratent dans les milieux agressifs (absence de cure) avec un pH variant entre 7 et 9 au cours des essais, le CHF avait une faible résistance mécanique ( $\sigma_{28} = 60$  MPa) par rapport au CPA ( $\sigma_{28} > 120$  MPa). La réaction pouzzolanique permettant de fixer la chaux ne s'est pas produite, par conséquent le CHF se comporte moins bien que le CPA et le CPJ en eau de mer. En effet la nature du milieu et la concentration des ions agressifs influe sur le comportement du ciment, ainsi les milieux sulfatées (S et SS) sont les plus agressifs par rapport au CPA et CPJ. Une température de 40 °C n'accélère pas les cinétiques de dégradation, d'une part les résistances mécaniques sont augmentées lors d'un traitement thermique, d'autre part la portlandite voit sa solubilité diminuée entre 20 et 40 °C.

- Le bon comportement du CHF attaqué par une solution de nitrate d'ammonium fortement concentrée qui se caractérise par une cinétique d'agressivité très rapide (test accéléré) est dû à la cure humide et prolongée (90 jours). Les résistances mécaniques en compression du CPA et CHF avant l'immersion des éprouvettes dans la solution de nitrate d'ammonium sont pratiquement les mêmes ( $\sigma_{90} > 80$  MPa), celle du CPJ est supérieure ( $\sigma_{90} > 90$  MPa). Après 35 jours d'attaque au nitrate d'ammonium, le CHF montre une durabilité supérieure à celle du CPJ et du CPA, les pertes de résistance finales sont respectivement de 38, 51 et 53 (%) à 20 °C et 52, 54 et 55 (%) à 40 °C.

- La carbonatation des ciments dépend du mode de cure, lorsque celle ci est humide et prolongé les ciments aux laitiers se comportent aussi bien que les autres ciments. Cependant L'étuvage des ciments au laitier de type CHF diminue la vitesse de carbonatation par rapport au CPA.

**CHAPITRE V**  
**UTILISATION DES LAITIERS D'EL HADJAR DANS LES**  
**BETONS**

# CHAPITRE V - UTILISATION DES LAITIERS D'EL HADJAR DANS LES BETONS

## INTRODUCTION

### 1. Matériaux et essais

#### 1.1.MATERIAUX

1.1.1.Le ciment

1.1.2. Les granulats

1.1.2.1. Les granulats naturels

1.1.2.2. Les granulats de laitier de haut fourneau

1.2.1. Formulation des bétons

#### 1.2. LES ESSAIS

1.2.1. Choix et confection des éprouvettes

1.2.2. Cure et conservation des éprouvettes

1.2.3. Essai d'ouvrabilité

1.2.4. ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

1.2.5. ESSAI DE TRACTION PAR FENDAGE

12.6. MESURE DE LA PERMEABILITE AU GAZ

### 2. Résultats

2.1 Résistance en compression

2.2. Résistance en traction par fendage

2.3. Perméabilité au gaz

### 3. DISCUSSION

#### Conclusion

## Introduction

L'utilisation du laitier sous ses deux formes granulé et cristallisé comme granulat dans la confection des bétons est peu répandu dans le monde. Peu d'études ont été faites [1] et peu de travaux lui ont été consacrés [1], [83 – 84] et [137 - 139 ], cela pour plusieurs raisons :

- la plus grande partie de la production est granulé pour être utilisée en cimenterie.
- le laitier cristallisé est utilisé exclusivement en assise de chaussée.
- la méconnaissance du laitier cristallisé en qualité de granulat.

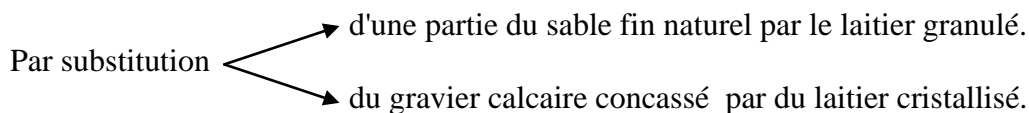
En ce qui concerne l'emploi des laitiers du complexe sidérurgique d'EL HADJAR dans la fabrication des bétons, cette option est restée au stade d'étude dans les laboratoires [4 et 5]. La vulgarisation du laitier cristallisé par des études et à travers des rencontres (congrès et séminaires), son bas prix et sa disponibilité sont des facteurs qui pourraient inciter les constructeurs à s'intéresser à ce granulat et l'intégrer dans la composition des bétons.

Nous savons que le laitier granulé est un produit hydraulique, il peut donc être utilisé sous sa forme brute comme sable actif dans la composition des bétons hydrauliques. Par ailleurs le laitier cristallisé est un granulat disponible pouvant être utilisé comme gros granulat dans le béton qui est alors appelé béton de laitier [1]. Lorsque au sein du béton on marie les deux formes de laitier granulé et cristallisé comme granulat, on obtient un béton tout laitier.

### - Objectif de l'étude

A partir du béton de granulats ordinaires et du béton tout laitier, on a formulé des bétons qu'on a appelé améliorés. Dans le béton ordinaire on a substitué une partie du sable naturel qui est trop fin (Module de finesse = 1.54) par une partie de sable de laitier granulé plus gros (module de finesse = 2.85). Dans le béton tout laitier nous avons au contraire remplacé une partie du sable de laitier granulé par du sable naturel. Le mélange des deux sables a permis ainsi de corriger le module de finesse du sable initial.

La valorisation du laitier d'EL HADJAR dans le béton a été faite à deux niveaux:



Les paramètres de caractérisation des bétons formulés sont les résistances mécaniques en compression, en traction par fendage et la perméabilité au gaz comme facteur de durabilité.

Le tableau 1 donne les différentes combinaisons des constituants des bétons qui font l'objet de cette étude.

**Tableau 1** - Différentes combinaisons des granulats dans les compositions des bétons

Type de béton	Référence	Les granulats utilisés dans la composition des bétons			
		Sable naturel	Laitier granulé	Gravier concassé	Laitier cristallisé
Béton ordinaire	B I	X	-	X	-
Béton ordinaire amélioré	B II	X	X	X	-
Béton tout laitier	B III	-	X	-	X
Béton tout laitier amélioré	B IV	X	X	-	X

## 1. MATERIAUX ET ESSAIS

### 1.1 Matériaux

#### 1.1.1. Le Ciment

Le ciment utilisé dans la confection des différents bétons est un CPJ 45 industriel fabriqué par la cimenterie de HADJR ESSOUD dont les principales caractéristiques sont fournies par le laboratoire de la cimenterie et données au tableau 2

**Tableau 2** - Caractéristiques du CPJ (industriel) utilisé pour la confection des bétons

Caractéristiques	Unité	Valeur
Masse volumique apparente*	Kg /m <sup>3</sup>	1050 – 1100
Masse volumique absolue*	Kg /m <sup>3</sup>	3050 – 3100
Consistance normale*	%	25 – 26
Temps de prise**	h, mn	
Début de prise		2h 06 min - 2h 10 min
Fin de prise		3h - 3h 10 min
Classe de résistance**	MPa	45
Valeur moyenne**	MPa	40 – 42
Résistance vraie*	MPa	40
Finesse (BLAINE)**	cm <sup>2</sup> /g	3200 – 3400

\* Résultats obtenus au laboratoire

\*\* Résultats communiqués par le laboratoire de la cimenterie de HADJR ESSOUD [3]

#### 1.1.2. Les granulats

##### 1.1.2.1. Les granulats naturels

Dans cette étude sont: le sable naturel de dune, siliceux et fin provenant de la région d'Annaba. Le gros granulat est un gravier concassé, roche naturelle calcaire d'origine local extraite des carrières de OUED EL ANEB dans la région d'Annaba. Les courbes granulométrique sont présentées sur la figure 1. Pour obtenir un sable de module de finesse correcte, un calcul simple montre qu'il faut mélanger environ 70 % de laitier granulé et 30 % de sable naturel.

### 1.1.2.2. LES GRANULATS DE LAITIER DE HAUTS FOURNEAUX

Les granulats de laitier sont constitués par le sable de laitier granulé et de gravier de laitier cristallisé et concassé, provenant des hauts fourneaux du complexe sidérurgique d'EL HADJAR.

Nous constatons que le laitier granulé se présente sous forme de sable relativement grossier (module de finesse égal à 2.85) alors que le sable naturel de dune, pourtant habituellement utilisé dans le béton courant à Annaba, est un sable fin de module de finesse égal à 1.54.

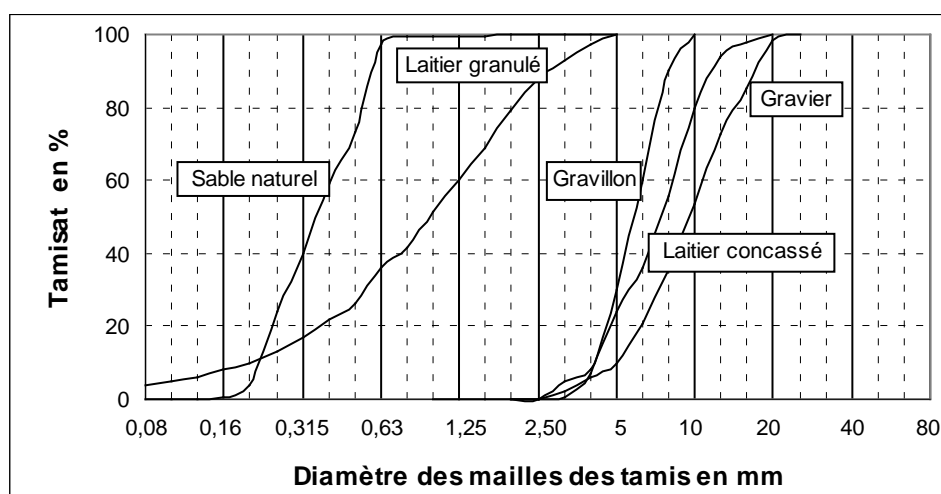


Figure 1 – Courbes granulométriques des granulats

Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 3.

Tableau 3- Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Unité	Type de granulat				
		Sable naturel de dune	Gravier calcaire concassé	Gravillon calcaire concassé	Sable de laitier	Gravier de laitier concassé
Masse volumique apparente	Kg /m <sup>3</sup>	1450	1350	1345	1000	1360
Masse volumique apparente des grains	Kg /m <sup>3</sup>	-	-	-	2050	2360
Masse volumique absolue	Kg /m <sup>3</sup>	2700	2630	2630	2800	2800
d/D	-	0/2	10/20	3/8	0/5	0/20
Module de finesse	-	1.54	-	-	2.85	-
Absorption d'eau	%	-	-	-	44	4

### 1.1.3. Formulation des bétons

La méthode de formulation des bétons utilisé est celle de DREUX [69], en apportant +les corrections nécessaires surtout aux dosages en eau en fonction des types de granulats utilisés, afin de satisfaire la condition d'ouvrabilité souhaitée.

#### - Données du problème

Type de béton : Ordinaire

Ouvrabilité du béton : Plastique (affaissement  $9 \pm 1$  cm)

Résistance projetée à 28 jours pour le béton de référence I:  $\sigma_{28} = 25$  MPa

Dosage en ciment pour le BR I =  $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ , conservé pour les autres bétons

Les compositions des bétons sont données au tableau 4

**Tableau 4 – Compositions des bétons**

Composants		Unités	Type de béton			
			B I	B II	B III	B IV
CPJ 45		Kg / m <sup>3</sup>	350	350	350	350
Eau	Calculée		180	180	180	180
	Réel		190	220	240	240
Sable naturel			507	172	0	175
Laitier granulé			0	400	562	409
Gravillon			149	0	0	0
Gravier			1220	1192	0	0
Laitier concassé			0	0	1141	1178
Affaissement		cm	9	9	8	10
E <sub>totale</sub> / C		-	0,542	0,628	0,685	0,685
G / S		-	2,7	2,083	2,03	1,953
Masse volumique	Calculée	Kg / m <sup>3</sup>	2416	2334	2293	2352
	Réelle		2436	2341	2295	2366

## 1.2 Les essais

### 1.2.1. Choix et confection des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont cubiques, de dimensions 10.10.10 cm. La confection des éprouvettes est réalisée dans une bétonnière à axe inclinée, de capacité 30 litres. La mise en place du béton est réalisée sur une table vibrante selon la norme NF P 18 – 421 [94].

### 1.2.2. Cure et conservation des éprouvettes

Pour chaque référence, 30 éprouvettes ont été coulées en deux gâchées. Les éprouvettes en béton sont démoulées après 24 h de cure à l'air libre et immergées sous l'eau à la température et l'humidité ambiantes.

Pour chaque échéance, six éprouvettes ont été testées:

- quatre en compression simple.
- deux en traction par fendage.

### 1.2.3. Essai d'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité est évaluée par l'essai d'affaissement à l'aide du cône d'Abrams conformément à la norme NF P 18 – 451 [95].

### 1.2.4. Essai de compression simple

L'essai de compression simple est réalisé selon la méthodologie prescrite par la norme BS 1881 - partie 116 [96] à différentes échéances (7, 28, 90, 180 et 360) jours. La presse est manuelle, de capacité 500 kN.

### 1.2.5. Essai de traction par fendage

L'essai de traction par fendage est réalisé sur le même type éprouvettes que l'essai de compression, défini dans la norme BS 1881- partie 17 [140]. La presse est manuelle, de capacité 10 kN et les résultats sont exprimés par la formule suivante [122].

$$\sigma_t = \frac{2.F}{\pi.a^2} \text{ en MPa} \quad (2)$$

$\sigma_t$  - Contrainte de traction

F - Charge de rupture

$a^2$  - Section de l'éprouvette.

### 1.2.6. Mesure de la perméabilité du béton à l'aide du perméabilimètre à oxygène de type CEMBUREAU [136 et 141]

La perméabilité est un indicateur de durabilité. Le béton est un matériaux poreux et comme tout milieu poreux, présente une phase solide et un espace de vide rempli d'eau et d'air, dans une proportion variant avec le degré de saturation du matériau.

Le béton et plus généralement les matériaux à matrice cimentaire sont d'autant plus durables qu'ils résistent à la pénétration d'agents externes.

Les transferts de matière au sein d'un matériau peuvent se réaliser suivant deux mécanismes : diffusion ou perméation.

- La diffusivité d'un matériau caractérise son aptitude à se laisser traverser par une espèce chimique sous gradient de concentration

- La perméabilité d'un matériau caractérise son aptitude à se laisser traverser par un gaz ou un fluide sous gradient de pression.

Théoriquement, le coefficient de perméabilité intrinsèque d'un béton donné devrait être le même indépendamment du fait que l'on utilise un gaz ou un liquide pour les essais [122]. Cependant les gaz donnent une valeur plus élevée de ce coefficient en raison d'un phénomène de glissement, car à la limite de l'écoulement la vitesse du gaz n'est pas nulle. La différence entre la perméabilité au gaz et à l'eau est d'autant plus grande que le coefficient de perméabilité intrinsèque est plus faible. La perméabilité à l'air est grandement influencée par les conditions de cure, en particulier pour les bétons à faible ou moyenne résistance [142].

La perméabilité à l'air d'un béton est fortement influencée par son degré d'humidité : on a observé que, en passant d'un état pratiquement saturé à un état sec (séchage au four), le coefficient de perméabilité au gaz  $k$  augmente de près de deux ordres de grandeurs

La porosité capillaire du béton crée des chemins dans le matériau pour le transfert d'agents agressifs, c'est donc un paramètre influençant la durabilité.

La perméabilité du béton à l'oxygène peut être déterminée par la méthode dite CEMBUREAU.

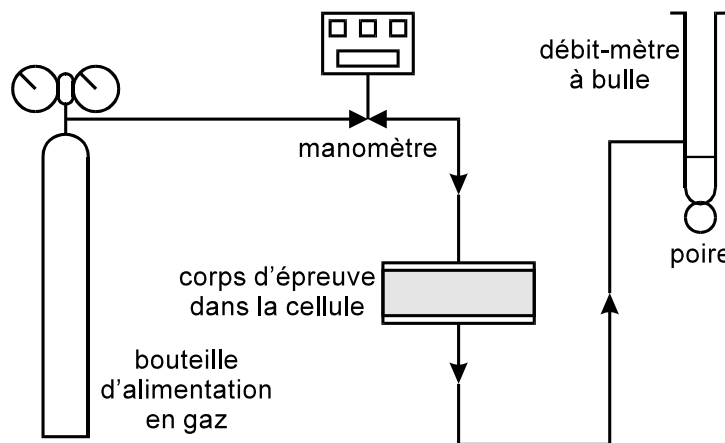
### - Principe de la méthode

Cette méthode est applicable aux corps d'épreuve moulés ou carottés dans les limites des dimensions (tableau 5) imposées par l'appareil, elle permet de mesurer les perméabilités comprises entre  $10^{-15}$  et  $10^{-19}$  m<sup>2</sup>

**Tableau 5** - Dimensions des éprouvettes

Φ de l'échantillon en cm	15 ± 1	12 ± 1	11 ± 1
H de l'échantillon en cm	5 ± 1		

L'essai consiste à soumettre un corps d'épreuve cylindrique à un gradient de pression constant et à mesurer le temps d'écoulement du gaz en régime permanent à travers l'épaisseur de l'échantillon. Le schéma de principe du perméabilimètre est donnée par la figure 2.



**Figure 2** – Schéma de principe du perméabilimètre à oxygène de type CEMBUREAU

La formule suivante donne la perméabilité de chaque corps d'épreuve :

$$k = \frac{2 \cdot P_a \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{A \cdot (P_0^2 - P_a^2)} \quad k \text{ est ici exprimé en m}^2 \quad (3)$$

- A : section du corps d'épreuve (m<sup>2</sup>)
- L : épaisseur du corps d'épreuve (m)
- D : diamètre du corps d'épreuve (m)
- k : perméabilité (m<sup>2</sup>)

$P_0$  : pression absolue à l'entrée (Pa)

$P_a$  : pression atmosphérique (Pa)

$Q$  : débit volumique ( $m^3 s^{-1}$ )

$V$  : portion volumique entre deux repères du débitmètre à bulle ( $m^3$ )

$t$  : temps mis par la bulle pour parcourir la portion volumique  $V$  (s)

$t_{moy}$  : moyenne des temps de parcours (s)

$\mu$  : viscosité dynamique de l'oxygène ( $2,02 \cdot 10^{-5}$  Pa s à  $20^\circ C \pm 2^\circ C$ )

$$\text{avec : } Q = \frac{V}{t_{moy}} \quad (4)$$

Calcul simplifié du coefficient de perméabilité  $k$  à l'oxygène.

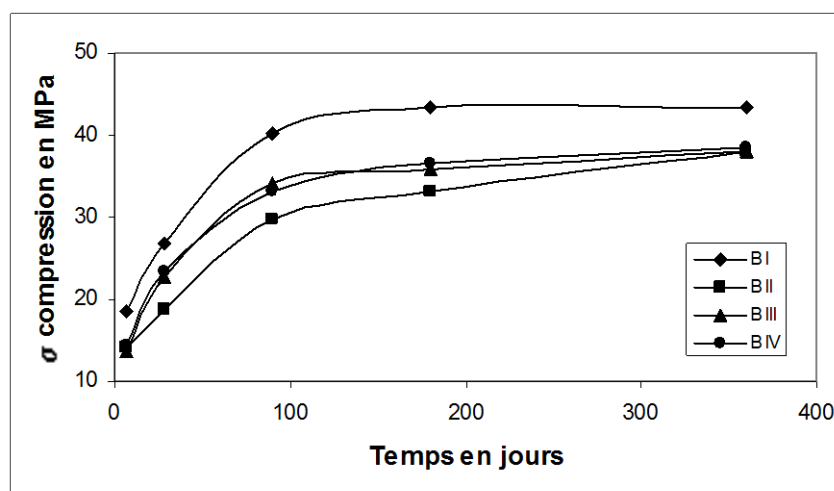
$$k = \frac{404 \times L}{A} \times \frac{Q}{\Delta P} \cdot 10^{-16} m^2 \quad (5)$$

$$\text{avec : } \Delta P = P_0^2 - P_a^2 \text{ en Pa}^2 \quad (6)$$

## 2. Résultats

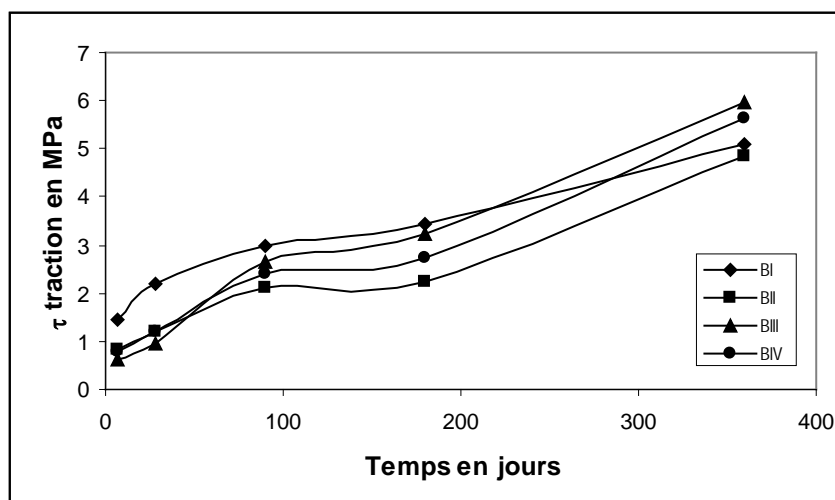
### 2.1. Résistance en compression

L'évolution des résistances en compression dans le temps des quatre bétons est présentée sur la figure 4. Une première exploitation des résultats montre des cinétiques de durcissement légèrement différentes entre les bétons de laitier (BII, BIII et BIV) par rapport au béton BI. Cependant l'évolution de la résistance en compression des bétons de laitier augmentent avec le temps. Au contraire celle du béton BI tend à se stabiliser à partir de 180 jours.



**Figure 4** – Evolution des résistance en compression simple mesurées sur bétons BI, BII, BIII et BIV

## 2.2. Résistance en traction par fendage



**Figure 5** – Evolution des résistances en traction par fendage mesurées sur bétons BI, BII, BIII et BIV

Le comportement de la résistance en traction par fendage des bétons au laitier est différent de leur comportement en compression. L'augmentation de la résistance en traction par fendage des bétons BII, BIII et BIV est plus accélérée que celui du béton BI (figure 5). Les bétons BIII et BIV composés majoritairement de laitier (concassé et granulé) donnent les meilleures résistances en traction par fendage à 360 jours. Ce comportement montre l'influence positive de la nature des granulats sur les liaisons granulat - matrice cimentaire qui déterminent la résistance en traction de façon générale. Les pentes des courbes de durcissement montrent clairement des vitesses plus fortes des bétons BII, BIII et BIV par rapport à celle du béton BI.

## 2.3. Perméabilité au gaz

L'étude de la perméabilité au gaz a été menée sur les quatre bétons BI, BII, BIII et BIV. Les éprouvettes ont subi une cure humide pendant 28 jours puis ont été exposées à l'air libre pendant 56 jours.

Les éprouvettes en béton ont subi un séchage dans une étuve ventilée à une température de 80 °C pendant 48 heures.

Les résultats des essais de perméabilité à l'oxygène sont donnés au tableau 6

**Tableau 6** – Résultats des mesures de perméabilité de quatre bétons (BI, BII, BIII et BIV)

Type de béton	Perméabilité au gaz K en $m^2 * 10^{-17}$		
	Pression des essais en bars		
	2	3	4
BI	2.4	2.5	3.5
BII	2.7	3.2	3.8
BIII	2.8	3.1	3.8
BIV	1.6	1.6	1.9

Les essais de perméabilité au gaz effectués sur les quatre bétons donnent le béton BIV comme étant le béton le plus imperméable. En effet la valeur du coefficient de perméabilité au gaz  $K$  ( $m^2 * 10^{-17}$ ) est la plus faible pour toutes les pressions.  $K$  varie de 1.6 pour une pression d'oxygène de 2 bars à 1.9 pour une pression de 4 bars pour le béton BIV, alors que  $K$  varie de 2.0 pour une pression d'oxygène de 2 bars à 3.5 pour une pression d'oxygène de 4 bars pour le béton BI (tableau 4). Les perméabilités des bétons BII et BIII sont comparables à celle du béton BI.

### 3. Discussion

La substitution d'une partie de sable naturel par le sable de laitier granulé dans le béton BII, permet non seulement de corriger le module de finesse à une valeur de 2.5 correspondant à un sable moyen, mais permet aussi d'améliorer certaines caractéristiques des bétons (figures 6 et 7), notamment la résistance en traction par fendage qui prend toute son ampleur à long terme.

La substitution des granulats naturels (sable et gravier) par les granulats de laitier (granulé et concassé) dans les bétons BIII et BIV est encore plus intéressant puisque les résultats obtenus sont meilleurs que ceux obtenus avec le béton BII. Vraisemblablement le laitier concassé renforce les liaisons granulat - matrice cimentaire, ce qui s'est traduit par une augmentation sensible des résistances en traction par fendage dans les bétons BIII et BIV.

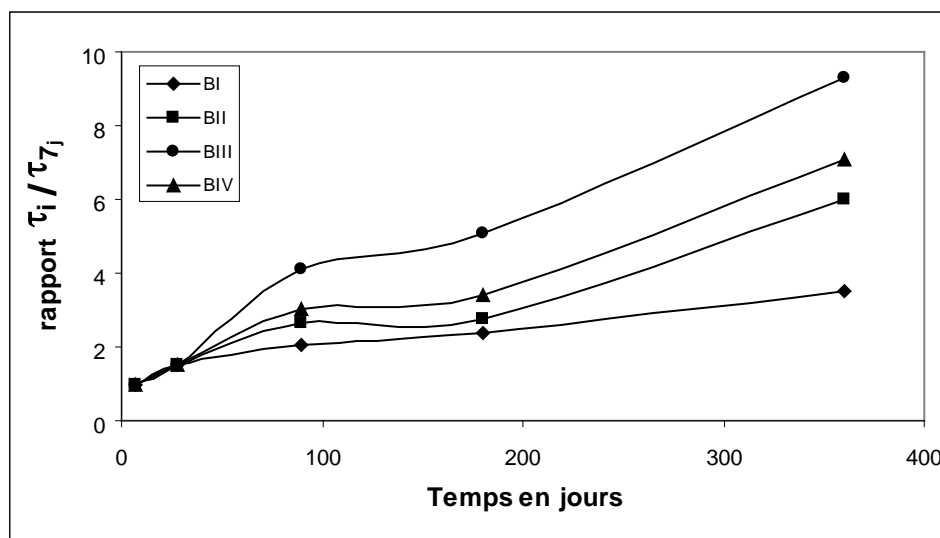


Figure 6 - Rapport  $\tau_i / \tau_{7j}$  en traction par fendage

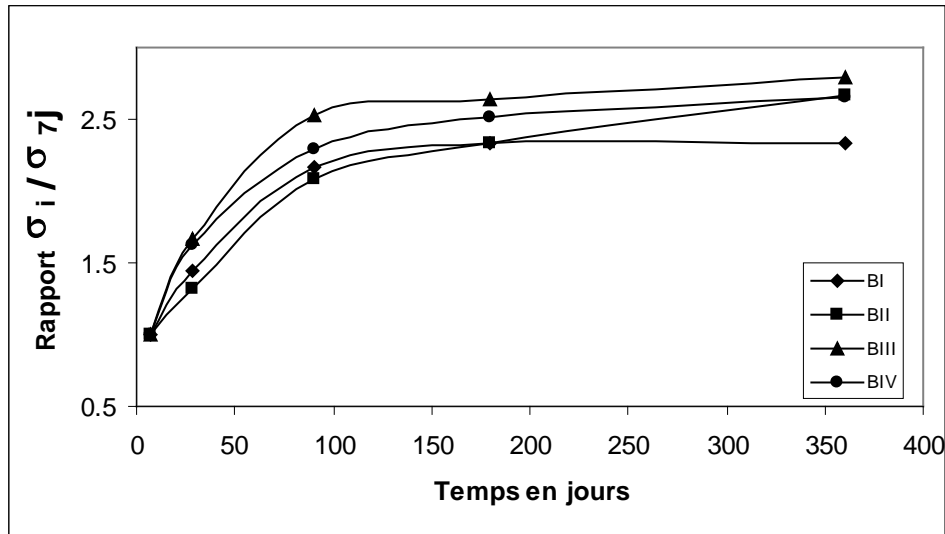


Figure 7 - Rapport  $\sigma_i / \sigma_{7j}$  en compression

## CONCLUSION

On a montré que l'utilisation des granulats de laitier (concassé et granulé) ne répond pas uniquement à un souci environnemental mais contribue à l'amélioration de certaines propriétés mécaniques notamment la résistance en traction par fendage et physiques.

La quantité d'eau de gâchage utilisée dans les bétons au laitier est plus importante que le béton de granulat calcaire ou silico-calcaire. Car il faut prendre en compte l'absorption d'eau par les granulats de laitier, notamment granulé. Ceci peut être un inconvénient, mais cette difficulté peut être contournée par une saturation préalable des granulats.

Comme le laitier granulé est obtenu avec une humidité importante, cette sujétion peut devenir facile à gérer si le laitier granulé est utilisé rapidement pour la réalisation du béton.

Le comportement des bétons de laitier en traction par fendage est différent du comportement des mêmes bétons en compression. On peut comprendre l'influence forte des granulats de laitier sur les liaisons granulat - matrice cimentaire.

Les essais de perméabilité au gaz menés sur les quatre bétons BI, BII, BIII et BIV ont montrés la bonne tenue du béton BIV.

L'utilisation des bétons de laitier dans le domaine de la construction peut être envisagé, dans plusieurs types d'ouvrages: les routes, les ouvrages en masse et les ouvrages hydrauliques.

**CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'étude de la valorisation du laitier de haut fourneau d'EL HADJAR dans les ciments et les bétons a apporté quelques éléments de réponse quant à la possibilité d'introduire le laitier granulé dans les ciments comme addition minérale active et à quel taux de substitution.

Ainsi la caractérisation du laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR par différentes méthodes chimiques (calcul des indices d'activité hydraulique et de basicité), physique (analyse par diffraction des rayons X) et mécaniques (essais de compression simple sur des mortiers), a montré une contradiction entre les différents résultats obtenus. Les indices calculés contredisent les résultats mécaniques et physiques. Selon les indices chimiques le laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR est classé dans toutes les catégories (médiocre, moyen et bon) ce qui montre encore une fois la contradiction des indices entre eux. Les résultats mécaniques classent le laitier de qualité moyenne lorsqu'il est mélangé avec le clinker ( 50 % de laitier et 50 % de ciment) et finement broyé (finesse BLAINE 4000 cm<sup>2</sup>/g). Les analyses par diffraction des rayons X donnent un taux de vitrification supérieur à 95 %, très correct par ailleurs puisque selon les normes NA 442, pour qu'un laitier soit utilisable en cimenterie, il doit avoir un taux de vitrification supérieur à 70 %.

Même si les résultats obtenus ne permettent pas de dégager un consensus sur la qualité du laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR, c'est malgré tout un produit réactif et un broyage fin augmente cette réactivité. Ce laitier peut donc être utilisé en cimenterie, mais à quel taux de substitution, à quelle finesse et pour quelle type de ciment ?

Pour répondre à ces questions, nous avons élaboré des mélanges de laitier et de clinker à teneurs et à finesses variables avec addition de gypse et les avons testés en compression simple et en traction par flexion sur des mortiers. Les conclusions peuvent être résumées comme suit :

- Pour un taux de substitution du clinker par le laitier de 5 à 10 %, on enregistre une augmentation des résistances mécaniques de 10 à 20 %.

- Pour des taux de substitution de 10 à 90 %, on note une diminution des résistances mécaniques à court et moyen terme à peu près proportionnelle au pourcentage de laitier ajouté.

- Cette diminution des résistances mécaniques s'estompe dans le temps, notamment pour les ciments de type CHF de dosage en laitier de l'ordre de 50 % . En effet les résistances mécaniques de ces ciments sont à long terme (360 jours) peu inférieures, voire comparables, à celles du CPA seul préparé avec le même clinker.

- Les mesures de chaleur d'hydratation des ciments CPA, CPJ et CHF ont montré des différences importantes entre eux . L'exothermicité du CHF est très faible, en deçà même des valeurs moyennes habituelles, ce qui explique en partie la cinétique de durcissement très lente de ce ciment, ce qui n'est pas un inconvénient dans le cas des bétons de masse.

- Les résultats obtenus permettent aussi de mettre en évidence l'intérêt d'un broyage fin du laitier granulé. Une finesse BLAINE de 3000 cm<sup>2</sup>/g est un minimum, un broyage séparé à 4000 cm<sup>2</sup>/g pour le laitier étant recommandé.

- L'augmentation du dosage en laitier jusqu'à 35 % pour les ciments de type CPJ est possible à condition de broyer séparément le laitier et le clinker.

- L'élaboration de ciment de type CHF avec un taux de substitution du clinker par le laitier de 50 % est réalisable pour différentes classes de résistance. Le passage d'une classe de résistance à une autre nécessite, soit l'augmentation de la finesse du laitier et le maintien de

son dosage constant, soit à l'inverse, le maintien de sa finesse constante et la diminution de son taux de substitution dans le ciment. Dans ce cas, le facteur d'efficacité économique est primordial et doit guider l'utilisation rationnelle du laitier.

- Grâce à une exploitation originale de nos données, nous avons pu mettre en évidence les deux rôles joués par une addition de laitier, indépendamment du phénomène normal de dilution du ciment. Aux faibles âges, les grains de laitier jouent le rôle de noyaux de cristallisation (germination hétérogène) et permettent un accroissement significatif des résistances mécaniques, d'autant plus élevé que le nombre de grain est élevé (surface spécifique élevée). Aux plus fortes échéances (après 7 jours) se superpose un effet chimique dû aux réactions pouzzolaniques et devient dominant dans le temps.

L'étude de la durabilité des ciments au laitier a montré que les conditions et la durée de cure déterminent leurs comportements ultérieurs. Lorsque les ciments d'étude (CPA, CPJ et CHF) n'ont pas subi de cure préalable et s'hydratent dans les milieux chimiquement agressifs [eau déminéralisée, eau de mer (M), eau séléniteuse (S) et eau très sulfatée (SS)], on a montré que :

- Les résistances du CHF à 28 jours étaient très inférieures à celles du CPA et du CPJ.
- Les pertes de résistances mécaniques du CHF sont aussi importantes que celles du CPA et du CPJ.
- Les gonflements sont observés dans tous les ciments, mais le CHF est le ciment qui gonfle le moins.

Ces résultats ne sont pas en contradiction avec certaines données bibliographiques, car les conditions expérimentales sont différentes. C'est ce qui nous a poussé à lancer des essais accélérés en préconisant une cure humide sous l'eau à 20 °C et prolongée pendant 90 jours des ciments d'étude (CPA, CPJ et CHF). Les conclusions sont alors les suivantes :

- Les résistances mécaniques en compression simple du CHF sont équivalentes à celles du CPA, alors que celles du CPJ sont supérieures après la cure humide.
- La durabilité du CHF est légèrement meilleure que celle du CPA et du CPJ par rapport à la conservation dans le bain de nitrate d'ammonium.
- L'action de la température entraîne l'accélération du mécanisme de dégradation. Les pertes de résistance sont plus importantes à 40 qu'à 20 °C.

Le comportement des ciments au laitier vis à vis du dioxyde de carbone est directement lié aux conditions et à la durée de cure. Lorsque la cure est humide (sous l'eau) et prolongée (90 jours), les ciments au laitier CPJ et CHF se comportent aussi bien que le CPA et ne présentent aucun signe de carbonatation après 120 jours d'exposition au dioxyde de carbone (l'environnement de la cellule de carbonatation est composé de 50 % de CO<sub>2</sub> et 50 % d'air à une humidité de 65 ± 5 %). Il faut signaler que ces résultats sont obtenus sur pâtes pures.

La même étude a été reconduite sur des éprouvettes en mortier avec les mêmes conditions de cure (sous l'eau à 20 °C) mais la durée de cure a été modifiée et écourtée à 28 jours. Les résultats obtenus confirment encore une fois l'importance de la durée de cure. En effet le CHF se carbonate plus vite que le CPA, alors que le CPJ se comporte aussi bien que le CPA.

Par contre lorsque les mêmes ciments au laitier sont étuvés à une température de 60 °C et une humidité de 100 %, leurs comportements vis à vis du dioxyde de carbone est différent. La vitesse de carbonatation du CHF est plus faible que celle du CPA et du CPJ dont la carbonatation est la plus rapide.

On sait que certains laitiers, notamment le laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR, sous l'action de la température, développent des silicates de calcium hydratés de

structure dense ce qui a pour effet de ralentir sensiblement la vitesse de diffusion du dioxyde de carbone.

L'utilisation des laitiers granulé et cristallisé dans les bétons en substitution partielle ou totale des granulats naturels constitue une autre voie pour la valorisation de ces matériaux. Cela peut aussi concerner les vieux terrils situés à l'intérieur de l'usine sidérurgique d'EL HADJAR.

La substitution des granulats naturels par les granulats de laitier d'EL HADJAR est intéressante dans la mesure où nos essais préliminaires ont donné des résultats encourageants. Nous nous sommes limités à des formulations simples de composition de béton sans les optimiser. La forte absorption d'eau des granulats de laitier et en particulier du laitier granulé (absorption de 44 % d'eau) nécessite l'emploi d'adjuvants. Or on sait que l'emploi des plastifiants permet de réduire la quantité d'eau réelle, tout en maintenant l'ouvrabilité constante, ce qui a pour effet classique une augmentation des résistances mécaniques.

En dépit de tout, on a pu mettre en évidence une des plus importantes propriétés que développent les bétons de laitier par rapport aux bétons ordinaires, il s'agit de la résistance en traction par fendage. La résistance en traction par fendage des bétons de laitier est améliorée, or on sait que les résistances en traction directe, par flexion ou par fendage dépendent essentiellement de la qualité des liaisons granulat – matrice cimentaire.

Cette étude sur l'emploi des granulats de laitier dans les bétons, pas uniquement routiers, est un axe intéressant à développer dans l'avenir.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [2] **KOMAR A.**, « Matériaux et éléments de construction », 3<sup>ème</sup> édition Mir, 1978, 380 p.
- [3] **Document technique** du laboratoire de la cimenterie de HADJR SOUD, Décembre 2002.
- [4] **ROPER H.**, « Composition, morphologie, hydratation et propriétés adhésives de quelques laitiers granulés », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 13 - 17
- [5] **REGOURD M.**, « Les laitiers de haut fourneau », rapport principal du 8<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Rio, volume 1, thème 3, 1986, p 200 - 229
- [6] **DEMOULIAN E., GOURDIN P., HAWTHORN F. et VERNET C.**, « Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulité », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 89 - 94.
- [7] **SMOLCZYK H. G.**, Duisburg, Rheinhausen, « L'influence de la chimie du laitier sur les résistances des ciments de haut fourneau », Zement, Kalk Gips n°6, 1978
- [8] **GOURDIN P.**, « Composition minéralogique potentielle des laitiers vitrifiés de haut fourneau », Ciments – bétons – plâtres et chaux. N° 727, 6, 1980, p 363.
- [9] **WANG.P Z., TRETTIN R. and HUBERT V.**, « Influence of structural change of granulated blast furnace slag on the hydraulic reactivity », 11<sup>ème</sup> Congrès International sur la Chimie du Ciment, Dublin, p 1020 – 1026, 2003.
- [10] **BEHIM M., CYR M., HABITA M F. et CLASTRES P.** « Hauts-Fourneaux d'El HADJAR (Algérie): Réactivité du laitier granulé »; Revue : "Ciments, Bétons, Plâtres, chaux" N° 860 - Avril - Mai 2003.
- [11] **FREARSON J. P. H. and UREN J.M.**, « Investigation of a ground granulated blast furnace slag containing mervinitic crystallisatin » to be presented at the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. On the use fly ash, silica fume, slag and natural pozzolan in concrete, Madrid april, 1986, p 21 – 26.
- [12] **MANTEL D. G.**, « Activity of five granulated blast furnace slag with eight different portland cements », ACI, Materials Journal, vol 91, n°5, 1994, 471 – 475.
- [13] **WOLTER A., FRISCHAT G.H. and OLBRICH E.**, « Investigation of granulated blast furnace skag reactivity by Secondary Neutral Mass Spectrometry » (SNMS)
- [14] **REGOURD M.**, « Structure and behaviour of slag portland cement hydrates », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 10.
- [15] **BEHIM M.**, « utilisation du laitier de haut fourneau d'El Hadjar en cimenterie », Thèse de Magister, Université d'Annaba – Algérie, 1987, pp 118.
- [16] **GENNINGS H. M.**, Am. Ceram.soc, 1986, 614 – 618.
- [17] **HAKKINEN T.**, Cem.Con.Res 23, 1993, pp 407 – 421.
- [18] **HAKKINEN T.**, Cem.Con.Res 23, 1993, pp 518– 530.
- [19] **RICHARDSON I. G., GROVES G W.**, J.Mater.Sci 27, 1992, p 6204 – 6212.
- [20] **MEHTA P K.**, 3<sup>rd</sup> International Conference on Fly Asc, Silica Fume and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp 1 – 43.
- [21] **SUJIN S., HAMLIN M. Gennings**, « Pore solution chemistry of alkali – actived ground granulated blast furnace slag », Cem Con Res, 29, 1999, pp 159 – 170.
- [22] **VAN EUW M.**, « Structure des laitiers et hydratation des ciments au laitier », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la chimie des ciments, Volume 4, Thème 3, pp 63 – 84.
- [23] **MCKURDY K. G, STEIN H N.**, Cem.Con. Res., 3, 1973, pp 247 – 262.

- [24] **Normes Françaises NF P 18 – 506**, « Addition pour béton hydraulique , laitier vitrifié moulu de haut fourneau », mai 1992.
- [25] **RUN ZHANG Y. and QIONG YING G.**, « Influence of structural features of slags on their hydraulic activity , silicates industriels, 12, 1982, p 279 - 281
- [26] **DRON R.**, « structure et réactivité des laitiers vitreux », thèse de doctorat ès sciences, Paris VI, janvier, 1984.
- [27] **SMOLCZYK H. G.**, « Structure et caractérisation du laitier », rapport principal du 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, P 1 - 16.
- [28] **DRON R. et BRIVOT**, « Approche du problème de la réactivité du laitier granulé », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Volume 2, Thème 3, p 134 –139, Paris, 1980
- [29] **FIERENS P. et POSWILK P.**, « Nouveaux aspects de l’hydratation des laitiers industriels, 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Volume 2, Thème 3, p 112 –116, Paris, 1980
- [30] **BATTAGIN A. F. and PECCHIO H.**, « Blast furnace slag wathering study », 11<sup>ème</sup> Congrès International sur la Chimie du Ciment, Dublin, p 905 – 912, 2003.
- [31] **OUILI A.**, «Contribution à l’activation alcaline des laitiers de hauts fourneaux », Thèse Génie Civil, INSA Lyon, 1994, 153 p.
- [32] **KONDO R. and UEDEA S.**, 5th ISCC, vol 2, 1969, p 203.
- [33] **REGOURD M., THOMAS J. H., BAILLEF P. and TOURAY J. C.**, « Blast furnace slag hydratation surface analysis », Cement and Concrete Research 13, 1983, 549 - 556.
- [34] **LOGNOT I.**, « Etude de l’hydratation du laitier de hauts fourneaux et de ses produits en présence de différents activants : application aux coulis d’injection », Thèse de Doctorat, Université de Dijon, 1996.
- [35] **DRON R.**, « Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline », Rapport de recherche LPC, 1973, n° 38.
- [36] **CHAPELLE**, «Attaque sulfocalcique des laitiers et pouzzolanes, CERILH, 1958,63 p.
- [37] **KORTBAOUI A.**, « Introduction au laitier de haut fourneau et activation des laitiers par les alcalis: Caractérisation chimiques et mécaniques », projet de fin d’étude de session, université de Sherbrooke 1992, non paginé.
- [38] **D’ANS J., EICK H.**, « The system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O at 20 °C », Zement-Kalk-Gips, 1953, Vol.6, n° 9, pp 302 -311
- [39] **DOUGLAS E. and BANDSTETR J. A.**, « preliminary study of alkali activation of gypsum anhydrite - slag mixtures », ACI, Journal Materials, Vol 25, n° 2, 1990.
- [40] **SINGH MANJIT and GARG MRIDUL**, « Activation of gypsum anhydrite - slag mixtures », ACI, Journal Materials, n° 2, Vol 25, 1995.
- [41] **CAIJIN SHI and ROBERT L. DAY**, « Early hydratation alkali - actived slag », ACI, Journal Materials, n°3, Vol 26, 1996.
- [42] **KUKKO H. and MANNONEN R.**, « Chemical and mechanical properties of alkali actived blast furnace slag », F . Concrete, Nordic Concrete Research, The Nordic Concrete Federation, publication n° 1, Oslo, 16, 1982.
- [43] **MCKURDY K G., STEIN H N.**, Cem Con Res, 3, 1973, pp 509 – 520
- [44] **TEOREANU.I et GEORGESCU.M**, « Activation de quelques composés alumineux au système CaO – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>, revue Roumaine, Vol 12, p 529 – 534, 1969
- [45] **VERNET C. DEMOULIAN E., GOURDIN P., HAWTHORN F.**, « Cinétique de l’hydratation des ciments au laitier », 7<sup>ème</sup> congrès international de la chimie du ciment, Paris, 1980, volume 2, thème 3, pp 128 – 133.

- [46] **REGOURD M., MORTUREUX B., GAUTIER E., HORNAIN H. et VOLANT J.**, « Caractérisation et activation thermique des ciments au laitier », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 105.
- [47] **FRIGIONE G., SERSALE R. et COLLELA C.**, « Manufacts obtained by compaction and hydrothermal treatment of granulated blast furnace slag, Silicates Industriels, 42, p 4 – 5, 1996.
- [48] **SATARINE.V I., VCHESTOPEROV S., SYRKINEY M., CHOKOTOVA B. G., ZDOROV A. I. et FEDWER L. A.**, « Intensification des processus de durcissement du ciment portland de laitier et perfectionnement de la structure du ciment durci », 7<sup>ème</sup> Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, vol 2, thème 3, 1980, p 69.
- [49] **BEHIM M., REDJEL B., JAUBERTHIE R.**, « Réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment, Journal de Physique IV, 12, France, p223 – 228, 2002.
- [50] **VICAT**, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [51] **LANGEN**, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [52] **PRUSSING**, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [53] **Normes algériennes NA 442**, « Liants hydrauliques - Définition, classification et spécification des ciments », 1994.
- [54] **Norme Française NF P 15 – 301**, « Liants hydrauliques, ciments courants, composition, spécification et critères de conformité », juin 1994.
- [55] **DETRICHE C. H.**, « La maîtrise de la fissuration précoce: condition de la durabilité des ouvrages » , Durabilité des bétons, chapitre 4, presse de l'école nationale des ponts et chaussés, 1992, Paris, pp 107 – 128.
- [56] **SHI C et DAY R. L.**, « Early hydration characteristics of alkali slag cements » , Cement and concrete research, volume 25, n° 6, 1995, pp 1333 – 1346.
- [57] **LE CHATELIER**, « Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques, thèse, 1887, Paris
- [58] **SHI C., DAY R. L. et LIM T. H.** 1996, « Hydration alkali actived slag » , ACI journal materials, volume 26, n° 2, pp 439 – 448.
- [59] **ZHANG X., DING X Z., LIM T H., ONG C K. et TAN, YANG J.**, « Microware study of hydration of slag cement blends in early period », Cement and concrete research, n°5, volume 25, 1995, pp 1086 – 1094.
- [60] **MASCOLO G.**, « Hydration products of synthetic glasses similar to blast furnace slag », Cem Con Res, 3, 207 – 213, 1973
- [61] **LUDWING U.**, « Zement - kalk – gips in the chemistry of cement and concrete", 3<sup>ème</sup> édition, Edouard arnold publishers, London, 1970
- [62] **LEA M. F.**, « the chemistry of cement and concrete, 3<sup>ème</sup> édition, Edouard arnold publishers, London, 1970.
- [63] **LOCHER F. W.**, symposium Washington, 1960, 267, in M F LEA, the chemistry of cement and concrete, 3<sup>ème</sup> édition, Edouard arnold publishers, London, 1970,
- [64] **SCHWIETE H E., LUDWIG et WURTH K E.**, Zement - Kalk – Gips", 22, 154, 1969, in the chemistry of cement and concrete, 3<sup>ème</sup> édition, Edouard arnold publishers, London, 1970
- [65] **SEARSALE R., ARELLO R. et AMECARELLI V.**, Recerca scient, 36, 453, 1966, in the chemistry of cement and concrete, 3<sup>ème</sup> édition, Edouard arnold publishers, London, 1970

- [66] **BUIL M. et OLLIVIER J.P.**, « Conception des bétons : la structure poreuse » in La durabilité des bétons, Presses des Ponts et chaussées, 1992.p 453.
- [67] **SKJOLSVOLD O.**, «Carbonatation depths of concrete with and without condensed silica fume, in: Proceeding: 2<sup>nd</sup> Internatioanl Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, V.m. Malhotra, ed, 1986, ACI, SP 91, 2, pp 1031 – 1048.
- [68] **LITWAN G.g. et MEYER A.**, Carbonatation of granulated blast furnace slag cement, concrete during twenty years of field exposure, in: Proceeding: 2<sup>nd</sup> Internatioanl Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, V.m. Malhotra, ed, 1986, ACI, SP 91, 2, pp 1031 – 1048.
- [69] **DREUX G.** Nouveau guide du béton, Edition Eyrolles, 1998.
- [70] **ARYA C., BUENFELD N. R. and NEWMAN J B..** « Factors influencing chloride binding in concrete », Cement and Concrete Research, 2, pp 291 – 300, 1990.
- [71] **LURMAN**, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [72] **NURSE**, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [73] **KEIL**, cité par **ALEXANDRE L. et SEBILEAU J. L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [74] **DUVAL R. et HORNAIN H.**, « La durabilité des bétons vis à vis des eaux agressives », in la durabilité des bétons. Presses de l'ENPC, 1992
- [75] **MALEK A.**, « Caractéristiques physico - chimiques du laitier de haut fourneau ». Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Nov. 1998 (Algérie), p17 - 25
- [76] **Document technique** de la direction de la recherche appliquée (DRA) du complexe sidérurgique d'EL HADJAR, 1989.
- [77] **RIZI T.**, « Valorisation et commercialisation des coproduits de SIDER », Séminaire sur la valorisation des laitiers de hauts fourneaux et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Nov. 1998 (Algérie), p 26 - 43
- [78] **Document technique**, statistiques de production de COPROSID, Janvier 2003.
- [79] **ADJABI A.**, « Utilisation du laitier en technique routière », wilaya Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Nov. 1998 (Algérie), p 72 – 79.
- [80] **NOUADRIA N.**, « Utilisation du laitier de haut fourneau de SIDER en technique routière », Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Nov. 1998 (Algérie), p 49 – 65.
- [81] **BOUDJELLALI A.**, « Utilisation du laitier en techniques routières », Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Nov. 1998 (Algérie), p 44 - 48
- [82] **MECHOIUAK**, « Utilisation des laitiers granulés a la cimenterie de HADJR SOUD », Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Nov. 1998 (Algérie), p 80 – 90.
- [83] **MENADI S.**, « Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons de laitier », thèse de magister, université d'Annaba, département de génie civil, 1994.
- [84] **GUETTECHE N.**, « Valorisation des laitiers dans les ciments et les bétons », thèse d'état, université de Constantine, département de génie civil, 2002.
- [85] **Norme Européenne NF EN 197 – 1**, « ciment – partie 1, février 2001 »
- [86] **KLUG H. P. et ALEXANDER L.E.**, «X ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials», John Willey, New York, United states, 1974.

- [87] **CYR M., HUSON B. et CARLES – GIBERGUES A.**, « Détermination par diffraction des rayons X de la teneur en phase amorphe de certains matériaux », Journal de physique IV. (1998)
- [88] **BARRON J. et OLLIVIER J.P.**, « LES BETONS, bases et données pour leur formulation », Eyrolles Editeur, Paris. (1997)
- [89] **KEIL F.**, « Hochofenschlacke », 2, Auflage, Verlag, Stahleisen, Dusseldorf. 1963
- [90] **GUTT W. et NIKON J.P.**, « Use of waste materials in the construction industry », Matériaux et construction, 12, 1979, p 255 – 306.
- [91] **DUSSART J.**, « Blastfurnace and steel slag in France », symposium on the utilisation of steel plant slag, Illawara of mining and metallurgy, 1979. P25 - 34
- [92] **BLUNK G.**, « utilisation of blastfurnace slag steel making slag in the federal republic of germany », Slag symposium, Illawara, 1979, p 35 – 39.
- [93] **Norme Européenne EN 196 – 1**, « Liants, méthodes d'essais des ciments, partie 1, détermination des résistances mécaniques », août 1995.
- [94] **Norme Française NF P 18 – 421**, « béton frais, mise en place par micro table vibrante », décembre 1981.
- [95] **Norme Française NF P 18 – 451**, « béton frais, essais d'affaissement au cône », décembre 1981.
- [96] **British Standard – 1881 – partie 116 – 1983.**
- [97] **Norme Française NF P 15 - 436**, « Liants, mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi - adiabatique dite méthode du calorimètre LANGAVANT », Septembre 1988
- [98] **Norme Française NF P 15 – 433**, « Méthodes d'essais des ciments, Détermination du retrait et du gonflement », Février 1994.
- [99] **Norme Française et Européenne NF EN 450**, « Cendres volantes pour béton – Définitions, exigences et contrôle de qualité.
- [100] **CARLES –GIBERGUES A.**, « Contribution minéralogique à l'étude des propriétés pouzzolaniques des cendres volantes des principales centrales thermiques françaises, Doctorat de spécialité, Université de Toulouse, 1961.
- [101] **TORBEN C. HANSEN**, « Long term strength of high fly ash Concretes, Cement and Concretes Research, vol 20, pp 193 – 196, 1990.
- [102] **SOROKA I. et STERN N.**, « The effects of fillers on strength of cement mortars », Cement and Concretes Research, vol 7, pp 449 – 456, 1977.
- [103] **TAKEMOTO K. et UCHIKAWA H.**, « Hydration of pozzolanic cement », Proceeding of the 7<sup>th</sup> International congress on the chemistry of cement, vol 1, principals reports, S.IV.2/1-IV , pp2 – 29.
- [104] **COSTA U. et MASAZZA F.**, « Natural pozzolans=as and fly ashes », Boston material research society, proceedings symposium annual meeting.
- [105] **MOHAN K. et TAYLOR F.W.**, « Pastes of tricalcium silicate with fly ash analytical electron microscopy triphyl silication and other studies », Boston materia research society : effects of fly sh incorporation in cement and concrete , 16 – 18, pp 194 – 203, 1981.
- [106] **MELLAND I.** « Influence of condensed silica fume and fly ash on the heat evolution in cement pastes, SP 79-34, in fly ash, Silica Fumes, Slag and other mineral by products in concrete, pp 665 – 676, 1983.
- [107] **HANNA B.**, « Contribution à l'étude de la structuration des mortiers de ciment portland contenant des particules ultra fines », Doctorat INSA, 1987.
- [108] **MINOUX M. A.**, « Cendres volantes et micro cendres : procédés d'obtention, conséquences physiques et chimiques, Doctorat INSA, 1994.

- [109] **NONAT A.**, « Interaction between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate, *Materials and Structures*, 27, 168, pp 187 – 195.
- [110] **JIANG S. et VAN DAMME H.**, « Influence de fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C<sub>3</sub>S, Université d'Orléans , CNRS, rapport CRMD – ATILH, 1996
- [111] **MALTAIS Y. et MARCHAND J.**, « Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars », *Cement and Concrete Research*, vol 27, n°7, pp 1009 – 1020, 1997.
- [112] **WALLER V.**, « relation entre composition des bétons, exothermicité en cours de prise et résistance en compression » , thèse ENPC, 1999.
- [113] **LAM L., WONG Y. et POON C.S.**, « Degree of hydration and gel / space – volume fly ash / cement », *Cement and Concrete Research*, vol 30, n°5, pp 747-756, 2000.
- [114] **LAWRENCE P.**, « Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Doctorat UPS, 2000.
- [115] **P SOUKATCHOUFF**, « Etude de résistance à l'eau douce de quelques ciments », *Matériaux de construction*, RILEM, 18, 104, 1985, pp. 115 – 122.
- [116] **DUTRUEL.F et GUYADER.R.**, « Etude de la corrosion des canalisations en béton », Centre d'études et de recherche de l'industrie du béton manufacturé, monographie n°7.
- [117] **CARDE.C**, « Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques de la lixiviation des matériaux cimentaires », Doctorat – INSA de Toulouse, 1996
- [118] **Normes Françaises**, NF P 18 – 011, « Bétons – Classification des environnements agressifs », juin 1982.
- [119] **DUVAL. R.**, « La durabilité des armatures et du béton d'enrobage », in : *La durabilité des bétons*, presse de l'ENPC, 1992, p 453.
- [120] **LAFUMA. H.**, « Liants hydrauliques, propriétés, choix et conditions d'emploi », Dunot, 3<sup>ème</sup> Ed, Paris 1964, p 117.
- [121] **CONDLOT.E.**, « Ciments et chaux hydrauliques, fabrication, propriétés et emploi », 3<sup>ème</sup> Ed, Librairie Polytechnique Ch Berranger Ed, Paris, 1906, p 408.
- [122] **NEVILLE A.M.**, « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000, p 806.
- [123] **DOUGLAS.E.**, « Mortier de ciment au laitier et béton de laitier, caractéristiques de durabilité », *Matériaux complémentaires en cimentation*, CANMET, V.M. Malhore Ed, 1989, p 330.
- [124] **LOCHER.F.W.**, « Zur frage des sulfatatwider standes von hütten zementen, Z.K.G, 1966, 19,9,395 – 401.
- [125] **KOLLEK.J.J and LUMLEY.J.S.**, « Comparative sulphate resistance of SRPC and Portland slag cement », 5<sup>th</sup> International Symposium on Concrete Durability, Brighton, 1990, pp 383 – 394.
- [126] **VERNET C.**, « stabilité chimique des hydrates – Mécanisme de défense du béton face aux agressions chimiques » in « *La durabilité des bétons* », Presses de l'ENPC, 1992
- [127] **Norme Européenne**, EN 196 – 3, méthodes d'essais des ciments, partie 3, détermination du temps de prise et de la stabilité, août 1995.
- [128] **LOCHER.F.W.**, « Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack », *Proceeding*, 5<sup>th</sup> International on the chemistry of cement, Tokyo 1968, 3, pp 323 - 335
- [129] **REGOURD.M.**, « Carbonatation accélérée et résistance des ciments aux eaux agressives », symposium international, RILEM, sur la carbonatation du béton, Slough, 5 et 6 april 1976, Cement and Concrete Association.

- [130] **REVERTERGAT.E, RICHEL.C et GEGOUT.P**, « Effect of pH on the durability of cement pastes », Cement and Concrete Research, Vol 15, n°2, p 320, 1992.
- [131] **LEA.F.M**, « The action of ammonium salts on concrete », Magazine of Concrete Research, Vol 17, n°52, pp. 115 – 116, 1965.
- [132] **BAJZA**, « Corrosion of hardened cement pastes by  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  solution », 8<sup>th</sup> International Congress of Chemistry of cement, IV, pp 99 – 103, Bresil , Rio de Janeiro, 1986.
- [133] **BIZOCK.I**, « Concrete corrosion, concrete protection », Akademiai, Kiado, Budapest, 1972.
- [134] **TOGNAZZI.C**, « Couplage fissuration – dégradation chimique dans les matériaux cimentaires ; caractérisation et modélisation », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 1998, p 211.
- [135] **ADENOT.F**, « Caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation de ciment » Thèse de Doctorat, Orléans, 1992.
- [136] **Journées Techniques**, « Méthodes recommandées pour la mesure de grandeurs associées à la durabilité, LMDC – INSA de Toulouse, 1997.
- [137] **CHAPELLE J.A** cité par **ALEXANDRE L.**, « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [138] **PONTEVILLE P.**, « Le béton hydraulique de granulats de laitier », revue Laitiers de Hauts Fourneaux n° 43, 1978.
- [139] **BOUSLAMA S. et DJELIDI A.**, « Elaboration de bétons hydrauliques à base de laitiers de haut fourneau Tunisien », Matériaux et constructions, Vol 36, 2003, pp 59-63.
- [140] **British Standard 1881 - BS** partie 117 - 1983.
- [141] **KOLLEK J.J.**, « The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method », a recommendation, Materials and Structures, 22, n° 129, pp 225, 1989.
- [142] **BEN BASSAT M., NIXON P.J. et HARDCASTLE**, « The effect of differences in the composition of portland cement on the properties of hardened concrete, Mag. Concrete Res, 42, n° 151, 1990.

## **LES ANNEXES**

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1

**Figure 1** – Coupe schématique du haut fourneau

**Figure 2** – Laitier cristallisé et laitier granulé de hauts fourneaux

**Figure 3** – Schémas d'élaboration du laitier bouleté

**Figure 4** - Diffractogramme des rayons X d'un laitier vitrifié

**Figure 5** - Influence du taux de cristaux dans le laitier

**Figure 6** - Prise du laitier vitrifié

**Figure 7** - Cinétiques comparées de durcissement d'un CHF (1) avec 60 % de laitier et un CPA (2)

**Figure 8** - Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé

**Figure 9** - Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression

### Chapitre II

**Figure 1** – Coulée de laitier à la sortie du haut fourneau

**Figure 2** – Laitier cristallisé compact

**Figure 3** – Laitier cristallisé poreux

**Figure 4** – trempe du laitier à sa sortie du haut fourneau d'EL HADAJAR

**Figure 5** – Courbe granulométrique du laitier granulé de hauts fourneaux d'EL HADAJAR

**Figure 6** - Diffractogramme du laitier granulé d'EL HADJAR

**Figure 7** - Evolution de l'indice h à 7 et à 28 jours en fonction de la finesse du laitier granulé d'EL HADJAR.

**Figure 8** - Diffractogramme du laitier cristallisé d'EL HADAJAR

### Chapitre III

**Figure 1** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 2 jours

**Figure 2** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 7 jours

**Figure 3** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 28 jours

**Figure 4** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en compression à 90 jours

**Figure 5** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 2 jours

**Figure 6** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 7 jours

**Figure 7** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 28 jours

**Figure 8** – Influence du laitier et de sa finesse sur la résistance en traction par flexion à 90 jours

**Figure 9** - Influence de la surface spécifique BLAINE du laitier granulé sur la résistance à la compression de mortier confectionné avec CPJ.

**Figure 10** - Influence de la surface spécifique BLAINE du laitier granulé sur la résistance à la compression de mortier confectionné avec CHF.

**Figure 11** – Cinétique de durcissement en compression de liants contenant 0,20,50 et 80 % de laitier moulu à 3000 cm<sup>2</sup>/g

**Figure 12** - Cinétique de durcissement comparée de trois ciments CPA, CPJ (20 % de laitier) et CHF (50% de laitier, SSB 3000 cm<sup>2</sup>/g)

**Figure 13** - Cinétique de durcissement comparée de trois ciments CPA, CPJ (20 % de laitier) et CHF (50% de laitier, SSB 3500 cm<sup>2</sup> / g)

**Figure 14-** Echauffement comparé de trois types de ciments CPA – CPJ – CHF  
**Figure 15 -** Flux thermique de trois types de ciments CPA – CPJ – CHF  
**Figure 16 -** Chaleur dégagée de trois types de ciments CPA – CPJ – CHF  
**Figure 17-** Evolution comparée du retrait de trois ciments CPA – CPJ – CHF  
**Figure 18 -** Evolution comparée de la perte de masse de trois ciments CPA – CPJ – CHF  
**Figure 19 -** Valeurs comparées du pH de trois types de ciments (CPA – CPJ – CHF) et du laitier granulé  
**Figure 20-** Diffractogramme du CPA (1 anhydre - 2 hydraté à 2 j - 3 hydraté à 360 j)  
**Figure 21 -** Diffractogramme du CPJ (1. Anhydre - 2. Hydraté à 2 j - 3. Hydraté à 360 j)  
**Figure 22 -** diffractogramme du CHF (1. Anhydre - 2. Hydraté à 2 j - 3. Hydraté à 360 j)  
Figure 23 - schéma descriptif de la germination hétérogène  
Figure 24 - Résistance expérimentale des mortiers confectionnés à partir de l'addition de référence en fonction du taux de substitution du CPA  
Figure 25 - Résistance expérimentale des mortiers confectionnés à partir de l'addition de référence en fonction du taux de substitution du laitier  
Figure 26 – Résistance des mortiers confectionnées avec addition de laitier  
Figure 27 - Principe de calcul du gain de résistance ( $\Delta \sigma$ ) en fonction du taux de substitution  
Figure 28 – Influence de la finesse du laitier et des on taux de substitution sur le gain de résistance à 2 jours de durcissement  
Figure 29 – Influence du temps sur le gain de résistance en fonction du taux de substitution du laitier à une finesse de 2500 cm<sup>2</sup>/g  
Figure 30 – Influence du temps sur le gain de résistance en fonction du taux de substitution du laitier à une finesse de 3000 cm<sup>2</sup>/g  
Figure 31 – Influence du temps sur le gain de résistance en fonction du taux de substitution du laitier à une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g  
Figure 32 – Influence du temps sur le gain de résistance en fonction du taux de substitution du laitier à une finesse de 4000 cm<sup>2</sup>/g  
**Figure 33 –** Courbes granulométriques du sable naturel et du gravier concassé  
**Figure 34 -** Résistance en compression sur éprouvettes cubiques 10.10.10 cm en béton à base de trois types de ciments (CPA – CPJ et CHF)

## Chapitre IV

**Figure 1 -** Cinétique de durcissement de trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) dans l'eau déminéralisée (D) à 20 °C  
**Figure 2 –** Cinétique de dégradation du CPA (A) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )  
**Figure 3 –** Cinétique de dégradation du CPJ (J) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )  
**Figure 4 –** Cinétique de dégradation du CHF (F) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )  
**Figure 5 -** Evolution du gonflement de trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) curées dans l'eau déminéralisée (D) à 20 °C  
**Figure 6 –** Cinétique de dégradation du CPA (A) en fonction du rapport ( $\varepsilon_i / \varepsilon_d$ )  
**Figure 7 –** Cinétique de dégradation du CPJ (J) en fonction du rapport ( $\varepsilon_i / \varepsilon_d$ )  
**Figure 8 –** Cinétique de dégradation du CHF (F) en fonction du rapport ( $\varepsilon_i / \varepsilon_d$ )  
**Figure 9 –** Evolution du pH des solutions de cure en fonction du temps  
Figure 9 bis – Evolution du pH des solutions en fonction du temps  
**Figure 10 -** Diagramme de diffraction des rayons X à 90 et 360 jours du CHF durcissant en eau de mer à 20 °C  
**Figure 11 –** Diagramme de diffraction des rayons X à 90 j et 360 j du CPJ durcissant en eau sulfatée (S) à 20 °C

**Figure 12** – Diagramme de diffraction des rayons X du CHF durcissant en eau doublement sulfatée (SS) à 20 °C à 360 jours de cure

**Figure 13** – Diagramme d'analyse thermique différentielle du CHF durcissant en eau doublement sulfatée à 20 °C pendant 360 jours

**Figure 14** - Cinétique de durcissement de trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) dans l'eau déminéralisée (D)

**Figure 15** - Cinétique de dégradation du CPA (A) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )

**Figure 16** – Cinétique de dégradation du CPJ (J) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )

**Figure 17**– Cinétique de dégradation du CHF (F) en fonction du rapport ( $\sigma_i / \sigma_D$ )

**Figure 18** – Evolution du gonflement de trois ciments CPA (A), CPJ (J) et CHF (F) conservées en eau déminéralisée (D)

**Figure 19** – Cinétique de dégradation du CPA (A) en fonction du rapport ( $\varepsilon_i / \varepsilon_d$ )

**Figure 20** – Cinétique de dégradation du CPJ (J) en fonction du rapport ( $\varepsilon_i / \varepsilon_d$ )

**Figure 21**– Cinétique de dégradation du CHF (F) en fonction du rapport ( $\varepsilon_i / \varepsilon_d$ )

**Figure 22** – Cinétique de diminution de la résistance en compression simple ( $\sigma$ ) de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à une température de 20 °C

**Figure 23** – Cinétique de diminution de la résistance en compression simple ( $\sigma$ ) de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à une température de 40 °C

**Figure 24** –Perte de masse de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à un température de 20 °C

**Figure 25** – Perte de masse de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 40 °C

**Figure 26** – Retrait de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C

**Figure 27** – Retrait de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 40 °C

**Figure 28** – Profondeur dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C

**Figure 29** – Profondeur dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 40 °C

**Figure 30** – Mise en évidence des zones dégradées et des auréoles des pâtes de ciments conservées dans une solution de nitrate d'ammonium

**Figure 31** – Diagramme de diffraction des rayons X de la pâte de CPJ conservée dans une solution de nitrate d'ammonium pendant 28 j

**Figure 32** – Diagramme de diffraction des rayons X de pâte de CHF conservée dans une solution de nitrate d'ammonium pendant 28 jours

**Figure 33** – Analyse thermique différentielle de la zone non dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) conservées dans une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C pendant 28 jours

**Figure 34** – Analyse thermique différentielle de la zone dégradée de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) conservées dans une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C pendant 28 jours

**Figure 35** – Perte de résistance de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 20 °C

**Figure 36** – Perte de résistance de trois pâtes de ciment (CPA, CPJ et CHF) attaquées par une solution de nitrate d'ammonium à 40 °C

**Figure 37** – Augmentation de la masse mesurée sur pâtes pures de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

**Figure 38** – Evolution de la résistance en traction par fendage ( $\tau$ ) mesurée sur pâtes pures conservées en cellule de carbonatation

**Figure 39** – Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier (I) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

**Figure 40** – Evolution de la résistance en traction par fendage ( $\tau$ ) mesurée sur mortier (1) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

**Figure 41** – Evolution de la masse de trois mortiers mesurée sur mortier (1) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

**Figure 42** – Evolution de la profondeur carbonatée mesurée sur mortier (2) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

**Figure 43** – Evolution de la résistance en traction par fendage ( $\tau$ ) mesurée sur mortier (2) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

Figure 44 – Evolution de la masse mesurée sur mortier (2) de trois ciments CPA, CPJ et CHF conservées en cellule de carbonatation

**Figure 45** - Observation au MEB d'un CHF(a) étuvé à 60 °C et H = 100% et d'un CHF (b) conservé dans les condition standards pendant 28 jours

## Chapitre V

**Figure 1** – Courbes granulométriques des granulats

**Figure 2** – Relation entre la perméabilité à l'oxygène et la résistance à la compression de bétons mûris pendant 28 jours dans l'eau et dans l'air à une humidité relative de 65 % [12]

**Figure 3** – Schémas de principe du perméabilimètre à oxygène de type CEMBEREAU

**Figure 4** – Evolution des résistance en compression simple mesurées sur bétons I, II, III et IV

**Figure 5** – Evolution des résistance en traction par fendage mesurées sur bétons I, II, III et IV

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

**Tableau 1** - Composition chimique du laitier en %

**Tableau 2** - Inventaire des indices chimiques utilisés pour l'estimation des laitiers granulés de haut fourneau

**Tableau 3** - Classification des indices d'efficacité hydraulique en fonction des résultats des essais mécaniques

**Tableau 4** - Norme Algérienne - Catégorie de ciments

**Tableau 5** - Norme Algérienne - Classes de résistance

**Tableau 6** - Norme Algérienne - Valeurs minimales garanties des résistances à la compression

**Tableau 7** - Chaleur d'hydratation des ciments

**Tableau 8** - Produits de cristallisation finale dans le système  $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 100\%$

**Tableau 9** - Constituants du laitier cristallisé

**Tableau 10** - Masse volumique absolue des minéraux constituant le laitier cristallisé

**Tableau 11** - Relation porosité – absorption d'eau

**Tableau n° 12** - Dureté des constituants du laitier cristallisé sur l'échelle de MOHS

### Chapitre II

**Tableau 1** - Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR

**Tableau 2** - Consommation du laitier granulé par la cimenterie de HADJR SOUD

**Tableau 3** - Composition chimique du minerai de fer

**Tableau 4** - Composition chimique du laitier granulé de hauts fourneaux d'EL HADJAR

**Tableau 5** - valeurs normalisées du module chimique I

**Tableau 6** - Calcul des indices chimiques

**Tableau 7** : Test à la soude: Résultats des essais de compression sur mortier de laitier activé

**Tableau 8** - Test à la soude: rapport K entre la résistance moyenne des mortiers de laitier et les valeurs limites minimales exigées. Influence de la finesse de mouture du laitier.

**Tableau 9** - Composition chimique du clinker

**Tableau 10** - Composition minéralogique estimée du clinker

**Tableau 11** - Classification des indices d'efficacité hydrauliques des laitiers en fonction des résultats des essais mécaniques

**Tableau 12** : Indice d'efficacité hydraulique h du laitier d'EL HADJAR

**Tableau 13** - Composition minéralogique du laitier cristallisé d'EL HADJAR

### Chapitre III

**Tableau 1** - Composition chimique du laitier granulé d'El HADJAR.

**Tableau 2** - Composition chimique du clinker de la cimenterie de HADJR ESSOUD (%)

**Tableau 3** - Composition minéralogique estimée du clinker

**Tableau 4** - Composition chimique du gypse

**Tableau 5** - Composition des ciments

**Tableau 6** - Caractéristiques des ciments

- Tableau 7** – Résultats des essais de traction - flexion et de compression sur trois types de ciment (finesse du laitier 3000 cm<sup>2</sup>/g)
- Tableau 8** – Résultats des essais de traction - flexion et de compression sur trois types de ciment (finesse du laitier 3500 cm<sup>2</sup>/g)
- Tableau 9** - Quantités de chaleur dégagées par les ciments étudiés
- Tableau 10** - Valeurs du retrait mesurées sur trois types de ciments
- Tableau 11** - Valeurs du pH de trois ciments (CPA, CPJ et CHF) et du laitier
- Tableau 12**- Caractéristiques des granulats
- Tableau 13** - Valeurs des coefficients A et A'
- Tableau 14** - Quantité d'eau nécessaire au béton
- Tableau 15** - Valeurs du coefficient  $\alpha$  en fonction du rapport E / C
- Tableau 16** – Dosage des constituants des bétons
- Tableau 17** - Résultats des résistances sur bétons
- Tableau 18** – Le dosage en laitier dans les CPJ et CHF conformément à la norme NA 442

#### Chapitre IV

- Tableau 1** - Définition des classes d'agressivité
- Tableau 2** - Agressivité des solutions et des sols
- Tableau 3** - Composition des ciments
- Tableau 4** – caractéristiques chimiques des bains de conservation
- Tableau 5** - Composition ionique moyenne de l'eau de mer
- Tableau 6** - Quantité d'eau de gâchage correspondant à la consistance normale

#### Chapitre V

- Tableau 1** - Différentes combinaisons des granulats dans les compositions des bétons
- Tableau 2** - Caractéristiques du CPJ (industriel) utilisé pour la confection des béton
- Tableau 3**- Caractéristiques des granulats
- Tableau 4** – Compositions des bétons
- Tableau 5** - Dimensions des éprouvettes
- Tableau 6** – Résultats des mesures de perméabilité de quatre bétons (BI, BII, BIII et BIV)

**ANNEXE III – 1.1**  
**PROPRIETES MECANQUES DES MELANGES DE CLINKER ET DE LAITIER**  
**(SSB = 2500 cm<sup>2</sup> / g)**

Teneur en Laitier	Flexion par traction en MPa				Compression en MPa			
	2 j	7 j	28 j	90 j	2 j	7 j	28 j	90 j
0	5.88	7.00	7.68	8.35	24.00	37.00	48.00	54.00
5	5.58	6.75	7.16	8.70	20.10	34.40	45.60	65.90
10	5.50	6.60	7.58	7.00	17.80	31.90	45.70	55.70
15	4.88	6.25	7.05	7.00	15.80	30.60	43.34	57.60
20	4.75	6.10	7.20	7.00	14.90	29.40	40.80	59.60
25	4.34	5.25	6.91	7.37	10.50	24.00	36.90	61.30
30	4.11	4.75	6.41	6.87	10.50	23.40	34.00	66.90
35	4.00	5.40	6.50	8.50	8.70	20.40	34.30	46.80
40	3.70	5.20	6.58	7.16	8.70	20.10	32.70	36.10
45	3.62	4.87	6.90	6.58	8.80	18.10	30.40	38.40
50	2.20	4.34	5.58	6.33	8.60	12.40	29.90	38.50
55	1.96	3.70	5.75	7.37	6.90	13.80	28.30	30.60
60	1.56	3.50	4.87	6.91	5.40	11.50	25.60	31.40
65	1.62	2.50	4.62	6.50	5.20	10.80	23.60	24.80
70	1.31	2.75	4.37	5.20	4.30	10.50	21.80	22.50
75	1.25	2.25	4.75	5.50	4.20	9.50	16.60	22.30
80	1.06	2.20	4.50	5.12	3.40	9.20	15.60	19.00
85	1.04	2.12	4.30	5.50	3.40	10.10	15.50	18.00
90	1.12	2.20	2.75	2.97	3.20	7.00	9.50	14.50

**Annexe III – 1.2**  
**SSB = 3000 cm<sup>2</sup> / g)**

Teneur en Laitier	Flexion par traction en MPa				Compression en MPa			
	2 j	7 j	28 j	90 j	2 j	7 j	28 j	90 j
0	6.10	7.00	7.50	7.75	24.10	33.80	48.00	54.00
5	6.60	7.00	7.90	8.25	27.50	37.90	48.90	66.00
10	6.20	6.91	7.30	8.00	25.90	37.40	48.10	51.00
15	6.00	6.67	7.60	7.66	24.90	32.20	46.80	47.00
20	5.60	6.50	7.40	8.57	20.80	30.20	43.50	49.20
25	5.15	5.55	7.00	8.08	21.10	30.50	38.60	49.40
30	5.16	5.50	6.62	8.08	16.40	23.90	40.50	46.40
35	4.50	5.42	6.50	8.50	16.30	26.60	38.50	50.40
40	4.00	5.16	6.58	7.62	13.00	21.20	33.00	35.90
45	3.90	4.87	7.12	8.25	12.60	23.40	40.40	30.50
50	2.88	4.34	6.83	7.25	9.10	17.00	32.50	32.80
55	2.25	4.50	6.54	7.75	7.00	15.60	29.90	30.50
60	2.04	3.78	7.50	7.50	6.40	11.80	25.80	36.40
65	1.87	3.20	6.00	7.42	5.50	11.20	25.00	26.50
70	1.80	3.04	5.66	7.75	5.60	10.60	22.50	30.90
75	1.66	3.00	5.42	8.33	4.60	9.80	21.60	28.20
80	1.66	3.16	4.87	7.05	4.80	10.10	15.60	25.60
85	1.66	3.16	5.33	6.83	4.10	11.90	19.60	27.80
90	1.45	2.25	4.16	7.87	6.20	7.90	10.20	24.80

**Annexe III – 1.3**  
**(SSB = 3500 cm<sup>2</sup> / g)**

Teneur en Laitier	Flexion par traction en MPa				Compression en MPa			
	2 j	7 j	28 j	90 j	2 j	7 j	28 j	90 j
0	6.00	6.80	7.50	8.50	26.50	34.80	49.00	55.80
5	6.90	6.98	8.41	8.20	28.00	45.00	56.00	64.80
10	6.75	6.76	7.33	7.50	27.80	40.10	50.00	54.50
15	6.00	6.16	7.83	7.91	26.70	35.40	48.00	56.00
20	6.35	6.57	7.08	7.50	27.60	33.20	45.60	53.60
25	5.50	6.33	6.66	7.75	22.50	31.00	43.80	52.40
30	5.20	6.00	6.75	6.95	21.40	26.80	44.10	51.40
35	5.00	6.24	7.00	7.20	18.20	24.60	42.70	48.90
40	4.85	5.92	7.00	7.30	18.50	21.20	39.40	46.80
45	4.00	5.33	6.60	7.16	15.20	20.50	37.20	44.40
50	3.60	5.00	6.80	6.96	17.00	18.00	41.60	44.10
55	3.20	4.80	6.40	6.63	8.50	12.50	37.20	31.70
60	2.57	4.15	6.05	6.42	6.70	12.50	30.80	32.50
65	2.00	4.00	6.00	6.20	6.50	11.70	28.70	26.30
70	2.42	3.50	4.62	6.15	6.00	11.10	24.10	24.40
75	2.42	3.46	4.37	5.70	5.50	9.60	22.50	24.70
80	2.25	3.99	4.75	5.50	5.00	9.30	21.50	24.70
85	2.12	3.50	4.50	5.00	4.50	7.70	23.10	24.70
90	2.00	3.05	2.75	4.02	6.30	7.50	13.30	14.50

**Annexe III – 1.4**  
**(SSB = 4000 cm<sup>2</sup> / g)**

Teneur en Laitier	Flexion par traction en MPa				Compression en MPa			
	2 j	7 j	28 j	90 j	2 j	7 j	28 j	90 j
0	5.85	7.10	7.50	7.75	26.50	37.00	48.00	54.00
5	6.88	7.00	8.33	9.00	26.00	36.80	54.50	68.70
10	7.00	6.75	8.42	8.75	28.10	37.20	48.00	54.20
15	6.50	6.20	8.33	8.64	27.80	37.60	47.00	55.10
20	6.20	6.75	7.66	8.37	26.30	35.50	46.60	53.60
25	5.70	6.65	7.25	7.95	23.60	34.10	44.00	53.00
30	5.42	6.25	6.75	8.25	21.60	35.80	45.50	53.40
35	5.50	5.95	7.45	9.42	17.50	29.00	43.60	52.30
40	4.50	6.17	6.66	8.20	18.50	24.20	43.00	51.80
45	3.92	5.97	6.60	8.75	16.80	21.80	44.50	50.10
50	3.75	5.65	7.20	8.75	15.60	19.50	48.50	49.70
55	3.25	5.50	7.00	7.50	12.50	18.60	37.90	48.50
60	3.00	5.32	6.40	7.00	10.30	17.20	32.60	45.90
65	2.75	5.30	6.75	6.83	9.60	16.70	31.10	33.90
70	2.70	5.07	6.20	6.95	8.10	16.20	25.00	28.90
75	2.50	5.10	5.90	6.75	7.70	14.70	23.60	27.00
80	2.60	4.92	5.25	6.20	8.60	9.70	21.50	24.10
85	2.90	4.07	4.90	5.40	9.10	8.80	19.70	21.70
90	2.10	3.07	4.32	4.50	8.30	7.70	10.90	12.20

**ANNEXE III - 2**  
**Résultats de l'analyse calorimétrique de trois ciments**

Temps en heure Type de ciment	Echauffement (° C)			Chaleur (J/g de ciment)			Flux (J/g de ciment)		
	CPA	CPJ	CHF	CPA	CPJ	CHF	CPA	CPJ	CHF
0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,07	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,10	0,0	0,5	0,2	0,0	3,1	1,2	0,0	91,8	36,3
0,13	1,1	0,7	0,4	6,9	4,3	2,4	208,3	36,8	36,4
0,17	1,5	0,9	0,5	9,5	5,5	3,0	76,0	36,8	18,2
0,25	1,6	1,0	0,6	10,1	6,1	3,6	7,9	7,5	7,4
0,33	1,6	1,0	0,7	10,2	6,2	4,3	0,3	0,2	7,4
0,42	1,7	1,0	0,8	10,8	6,2	4,9	7,9	0,2	7,4
0,50	1,7	1,1	0,8	10,8	6,8	4,9	0,3	7,5	0,2
0,58	1,7	1,1	0,8	10,9	6,8	4,9	0,3	0,2	0,2
0,67	1,8	1,1	0,9	11,5	6,8	5,5	7,9	0,2	7,4
0,83	1,8	1,1	0,9	11,6	6,9	5,6	0,3	0,2	0,2
1,00	1,9	1,1	0,9	12,3	6,9	5,6	4,1	0,2	0,2
1,33	2,0	1,2	1,0	13,0	7,6	6,2	2,3	2,0	2,0
1,67	3,2	1,2	1,1	20,8	7,7	6,9	23,2	0,2	2,0
2,00	3,3	1,3	1,1	21,6	8,3	7,0	2,5	2,1	0,2
2,33	3,6	1,4	1,2	23,7	9,0	7,7	6,3	2,1	2,0
2,67	3,8	1,5	1,3	25,2	9,7	8,4	4,5	2,1	2,1
3,00	4,0	1,6	1,4	26,7	10,4	9,0	4,5	2,1	2,1
3,33	4,3	1,8	1,4	28,8	11,8	9,1	6,5	4,0	0,3
3,67	4,6	1,9	1,6	31,0	12,5	10,4	6,5	2,2	3,9
4,00	4,8	2,1	1,7	32,6	13,8	11,2	4,7	4,0	2,1
4,33	5,2	2,3	1,8	35,4	15,2	11,9	8,5	4,1	2,2
4,67	5,5	2,6	2,0	37,6	17,2	13,2	6,7	6,0	4,0
5,00	5,9	2,9	2,1	40,5	19,2	13,9	8,6	6,0	2,2
5,33	6,4	3,1	2,3	44,1	20,6	15,3	10,6	4,2	4,1
5,67	6,9	3,5	2,6	47,6	23,2	17,3	10,7	7,9	5,9
6,00	7,4	3,8	2,9	51,2	25,3	19,3	10,8	6,2	6,0
6,33	8,0	4,3	3,3	55,5	28,6	21,9	12,8	9,9	7,9
6,67	8,6	4,7	3,6	59,8	31,3	23,9	12,9	8,2	6,1
7,00	9,3	5,1	4,0	64,8	34,1	26,6	15,0	8,2	8,0
7,33	10,1	5,6	4,5	70,5	37,5	29,9	17,0	10,2	9,9
7,67	11,2	6,1	4,9	78,1	40,9	32,6	22,9	10,3	8,2
8,00	12,8	6,8	5,2	88,9	45,6	34,8	32,6	14,0	6,4
8,50	14,8	8,5	5,4	102,9	56,7	36,5	27,9	22,2	3,5
9,00	15,7	12,1	5,6	110,1	79,7	38,2	14,3	46,0	3,5
9,50	16,4	13,0	5,7	116,0	86,4	39,4	12,0	13,4	2,3
10,00	16,9	13,5	5,9	120,8	90,7	41,2	9,6	8,7	3,6
10,50	17,5	13,9	6,0	126,3	94,5	42,4	10,9	7,5	2,4
11,00	18,1	14,3	6,3	131,8	98,3	44,8	11,1	7,6	4,8
11,50	18,7	14,7	6,5	137,4	102,1	46,6	11,2	7,7	3,7
12,00	19,3	15,1	6,7	143,1	106,0	48,5	11,3	7,8	3,7
12,50	19,8	15,5	6,9	148,1	109,9	50,4	10,2	7,8	3,8
13,00	20,3	15,8	7,1	153,3	113,2	52,3	10,3	6,7	3,8

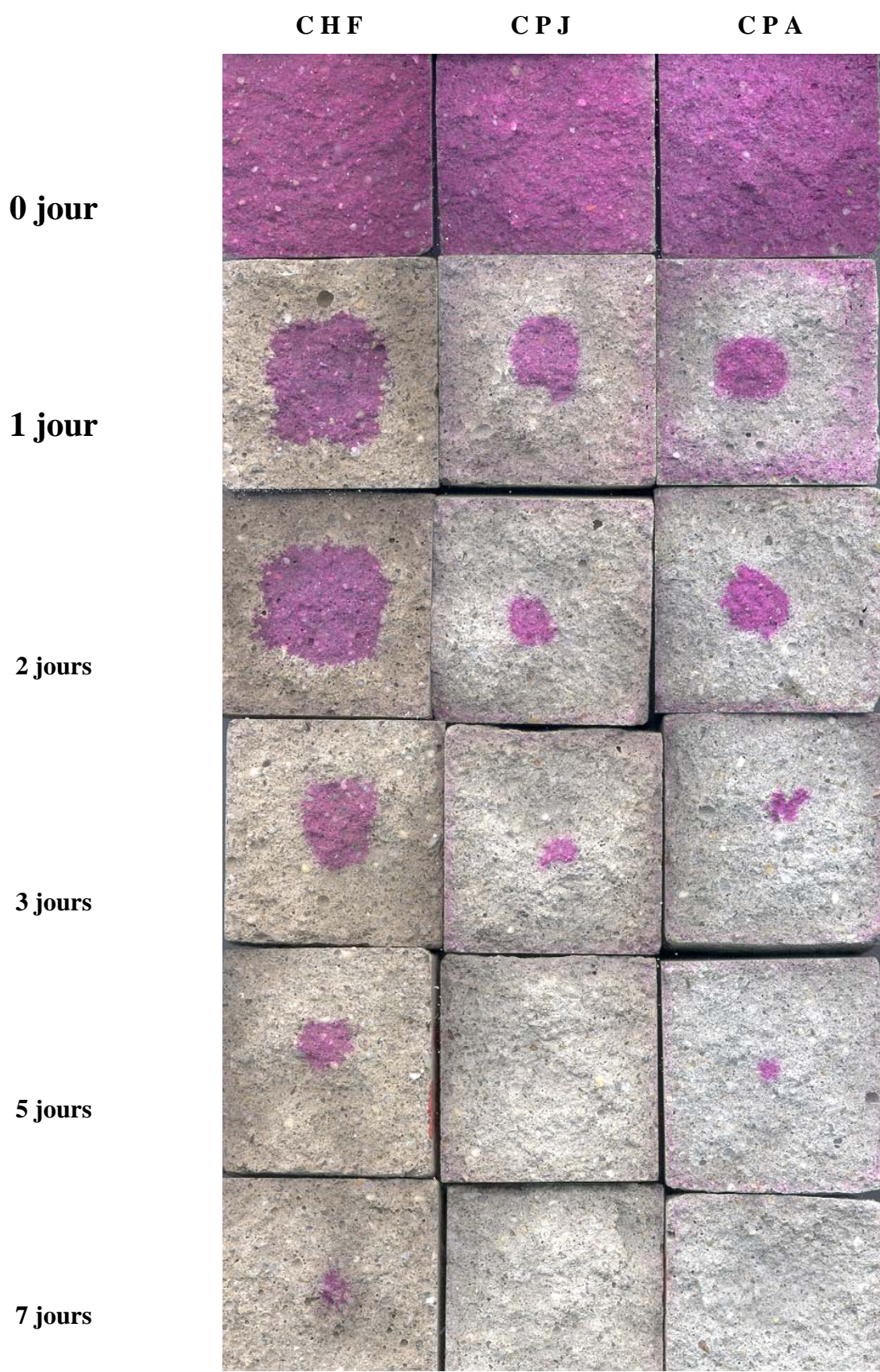
**Suite Annexe III - 2**

Temps en heure	Echauffement (° C)			Chaleur (J/g de ciment)			Flux (J/g de ciment)		
	CPA	CPJ	CHF	CPA	CPJ	CHF	CPA	CPJ	CHF
13,50	20,8	16,1	7,3	158,5	116,6	54,2	10,4	6,8	3,8
14,00	21,3	16,4	7,6	163,7	120,0	56,7	10,5	6,8	5,1
14,50	21,7	16,7	7,9	168,4	123,5	59,3	9,3	6,9	5,2
15,00	22,1	17,0	8,1	173,1	126,9	61,3	9,4	6,9	4,0
15,50	22,5	17,2	8,3	177,8	129,8	63,4	9,5	5,8	4,0
16,00	22,9	17,5	8,6	182,6	133,3	66,0	9,6	7,0	5,3
16,50	23,6	17,7	8,8	189,3	136,3	68,1	13,5	5,9	4,1
17,00	23,7	18,0	9,0	192,3	139,9	70,2	6,0	7,1	4,2
17,50	23,9	18,1	9,2	196,0	142,2	72,3	7,3	4,7	4,2
18,00	24,2	18,3	9,4	200,2	145,2	74,4	8,6	6,0	4,3
18,50	24,5	18,5	9,6	204,6	148,2	76,6	8,7	6,0	4,3
19,00	24,8	18,7	9,8	208,9	151,3	78,7	8,7	6,1	4,3
19,50	25,1	18,8	10,0	213,3	153,7	80,9	8,8	4,9	4,4
20,00	25,4	18,9	10,1	217,8	156,2	82,5	8,9	4,9	3,2
20,50	25,6	19,1	10,3	221,6	159,3	84,8	7,6	6,2	4,5
21,00	25,9	19,1	10,4	226,1	161,1	86,4	9,0	3,7	3,3
21,50	26,1	19,3	10,5	230,0	164,2	88,1	7,8	6,2	3,3
22,00	26,3	19,4	10,7	233,9	166,7	90,3	7,8	5,0	4,5
22,50	26,4	19,5	10,8	237,1	169,2	92,0	6,6	5,0	3,4
23,00	26,5	19,6	10,9	240,4	171,8	93,7	6,6	5,1	3,4
23,50	26,5	19,7	11,0	243,1	174,3	95,4	5,3	5,1	3,4
24,00	26,6	19,7	11,1	246,4	176,2	97,1	6,6	3,9	3,4
25,00	26,5	19,9	11,4	251,1	181,3	101,2	4,7	5,1	4,1
26,00	26,4	20,0	11,6	255,8	185,9	104,7	4,7	4,5	3,5
27,00	26,2	20,1	11,6	259,9	190,4	107,0	4,0	4,5	2,3
28,00	25,9	20,0	11,6	263,2	193,7	109,3	3,4	3,3	2,3
29,00	25,6	20,0	11,5	266,5	197,7	111,0	3,3	3,9	1,7
30,00	25,2	19,9	11,4	269,1	201,0	112,7	2,6	3,3	1,7
31,00	24,9	19,7	11,0	272,2	203,6	112,5	3,1	2,7	-0,2
32,00	24,5	19,6	10,5	274,7	206,9	111,6	2,4	3,2	-0,9
33,00	24,1	19,4	9,9	277,0	209,5	110,0	2,3	2,6	-1,6
34,00	23,7	19,1	9,3	279,3	211,4	108,3	2,3	1,9	-1,7
35,00	23,1	18,9	8,7	280,1	213,9	106,5	0,9	2,5	-1,8
36,00	22,7	18,7	8,0	282,2	216,3	103,9	2,0	2,5	-2,6
38,00	21,9	18,1	7,4	286,0	219,9	103,3	1,9	1,8	-0,3
40,00	21,0	17,5	6,8	288,8	223,1	102,5	1,4	1,6	-0,4
42,00	20,0	16,9	6,2	290,6	226,1	101,4	0,9	1,5	-0,5
44,00	19,3	16,3	5,7	293,9	228,9	100,7	1,7	1,4	-0,3
46,00	18,5	15,7	5,2	296,3	231,4	99,8	1,2	1,3	-0,4
48,00	17,7	15,1	4,7	298,4	233,7	98,8	1,0	1,1	-0,5
52,00	16,2	13,9	4,3	302,1	237,5	99,9	0,9	1,0	0,3
56,00	14,8	12,8	4,0	305,4	241,0	101,3	0,8	0,9	0,4
60,00	13,6	11,7	3,6	308,8	243,6	101,8	0,9	0,7	0,1
64,00	12,4	10,8	3,3	311,2	246,7	102,7	0,6	0,8	0,2
68,00	11,4	9,9	3,1	314,0	249,0	104,0	0,7	0,6	0,3
72,00	10,4	9,0	2,8	316,1	250,7	104,5	0,5	0,4	0,1

**ANNEXE III - 3**  
**pH des ciments (CPA – CPJ – CHF) et du laitier mesurés sur des solutions diluées**

<b>pH</b>										
<b>Temps, seconde</b>	<b>CPA</b>	<b>CPJ</b>	<b>CHF</b>	<b>Laitier</b>		<b>Temps Seconde</b>	<b>CPA</b>	<b>CPJ</b>	<b>CHF</b>	<b>Laitier</b>
0	11,984	12,016	11,896	10,726		1170	12,302	12,279	12,144	11,104
30	12,06	12,072	11,965	10,838		1200	12,303	12,28	12,144	11,102
60	12,08	12,093	11,999	10,881		1230	12,304	12,281	12,145	11,103
90	12,096	12,116	12,022	10,91		1260	12,305	12,282	12,146	11,111
120	12,125	12,136	12,04	10,937		1290	12,305	12,283	12,146	11,107
150	12,156	12,153	12,054	10,955		1320	12,305	12,284	12,147	11,107
180	12,176	12,168	12,066	10,958		1350	12,305	12,284	12,148	11,109
210	12,192	12,183	12,075	10,98		1380	12,306	12,285	12,149	11,105
240	12,204	12,196	12,083	10,995		1410	12,306	12,285	12,15	11,106
270	12,216	12,206	12,089	11		1440	12,306	12,285	12,15	11,111
300	12,225	12,213	12,095	11,007		1470	12,306	12,286	12,15	11,107
330	12,234	12,221	12,1	11,02		1500	12,305	12,285	12,152	11,11
360	12,239	12,226	12,104	11,026		1530	12,306	12,285	12,153	11,11
390	12,246	12,231	12,108	11,032		1560	12,306	12,286	12,154	11,112
420	12,251	12,236	12,112	11,042		1590	12,306	12,284	12,155	11,116
450	12,255	12,241	12,114	11,042		1620	12,306	12,285	12,155	11,115
480	12,26	12,245	12,117	11,043		1650	12,306	12,286	12,155	11,118
510	12,264	12,246	12,119	11,053		1680	12,306	12,286	12,156	11,122
540	12,268	12,25	12,121	11,056		1710	12,306	12,286	12,157	11,119
570	12,271	12,253	12,123	11,058		1740	12,306	12,286	12,158	11,122
600	12,274	12,255	12,125	11,061		1770	12,306	12,286	12,158	11,121
630	12,276	12,258	12,127	11,066		1800	12,306	12,286	12,16	11,126
660	12,279	12,259	12,128	11,069		1830	12,306	12,286	12,16	11,126
690	12,281	12,261	12,13	11,07		1860	12,306	12,286	12,16	11,127
720	12,284	12,263	12,131	11,077		1890	12,306	12,286	12,161	11,13
750	12,285	12,265	12,133	11,076		1920	12,306	12,286	12,162	11,125
780	12,288	12,266	12,134	11,082		1950	12,306	12,286	12,163	11,128
810	12,288	12,266	12,134	11,079		1980	12,306	12,286	12,164	11,126
840	12,29	12,267	12,135	11,081		2010	12,306	12,286	12,165	11,128
870	12,292	12,27	12,136	11,09		2040	12,306	12,286	12,166	11,113
900	12,293	12,271	12,137	11,087		2070	12,306	12,286	12,166	11,131
930	12,295	12,272	12,137	11,092		2100	12,306	12,286	12,168	11,133
960	12,296	12,273	12,138	11,09		2130	12,306	12,286	12,169	11,134
990	12,297	12,275	12,139	11,097		2160	12,306	12,286	12,17	11,136
1020	12,297	12,276	12,14	11,099		2190	12,306	12,286	12,17	11,134
1050	12,298	12,276	12,141	11,098		2220	12,306	12,286	12,171	11,136
1080	12,299	12,276	12,141	11,096		2250	12,306	12,286	12,172	11,137
1110	12,3	12,277	12,142	11,103		2280	12,306	12,286	12,173	11,138
1140	12,301	12,278	12,143	11,102		2310	12,306	12,286	12,174	11,138

**Annexe IV – 1**  
**Carbonatation des mortiers de ciment**



**ANNEXE V - 1**

**Résultats des essais de traction par fendage sur béton**

<b>RESISTANCE EN TRACTION PAR FENDAGE SUR BETON (10*10*10)</b>								
<b>7 JOURS</b>								
<b>N°</b>	<b>Béton ordinaire BI</b>		<b>Béton amélioré BII</b>		<b>Béton tout laitier BIII</b>		<b>Béton tout laitier amélioré BIV</b>	
	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>
<b>1</b>	2,20	1,40	1,20	0,76	1,05	0,67	1,25	0,80
<b>2</b>	2,35	1,50	1,30	0,83	0,95	0,60	1,30	0,83
<b>3</b>	2,30	1,47	1,30	0,83	1,00	0,64	1,20	0,76
<b>Moyenne</b>		<b>1,45</b>		<b>0,81</b>		<b>0,64</b>		<b>0,80</b>
<b>Ecart type</b>		0,05		0,04		0,03		0,03
<b>28 JOURS</b>								
<b>1</b>	3,25	2,07	1,80	1,14	1,60	1,02	1,85	1,18
<b>2</b>	3,50	2,23	1,95	1,24	1,45	0,92	1,95	1,24
<b>3</b>	3,55	2,26	1,95	1,24	1,50	0,95	1,80	1,14
<b>Moyenne</b>		0,10						
<b>Ecart type</b>		<b>2,18</b>		<b>1,21</b>		<b>0,96</b>		<b>1,19</b>
<b>90 JOURS</b>								
<b>1</b>	4,60	2,93	3,40	2,16	4,20	2,67	3,80	2,42
<b>2</b>	4,80	3,05	3,30	2,10	4,10	2,61	3,80	2,42
<b>moyenne</b>		<b>2,99</b>		<b>2,13</b>		<b>2,64</b>		<b>2,42</b>
<b>Ecart type</b>		0,09		0,04		0,045		0
<b>180 JOURS</b>								
	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>	<b>P, t</b>	<b>s, MPa</b>
<b>1</b>	5,40	3,43	3,50	2,23	5,00	3,18	4,30	2,73
<b>2</b>	5,40	3,43	3,50	2,23	5,20	3,31	4,25	2,70
<b>moyenne</b>		<b>3,43</b>		<b>2,23</b>		<b>3,24</b>		<b>2,72</b>
<b>Ecart type</b>		<b>0</b>		<b>0</b>		<b>0,09</b>		<b>0,02</b>
<b>360 JOURS</b>								
<b>1</b>	8,5	5,41	7,8	4,96	9,5	6,04	9	5,72
<b>2</b>	7,5	4,77	7,47	4,75	9,25	5,88	8,75	5,57
<b>moyenne</b>		<b>5,1</b>		<b>4,86</b>		<b>5,96</b>		<b>5,65</b>
<b>Ecart type</b>		<b>0,45</b>		<b>0,15</b>	0,18	<b>0,11</b>		<b>0,11</b>

**Annexe V - 2**  
**Résultats des essais de compression sur béton**

<b>7 JOURS</b>								
N°	Béton ordinaire BI		Béton amélioré BII		Béton tout laitier BIII		Béton tout laitier amélioré BIV	
	P, t	s, MPa	P, t	s, MPa	P, t	s, MPa	P, t	s, MPa
<b>1</b>	17	17	15	15	13,5	13,5	14,5	14,5
<b>2</b>	20	20	15,5	15,5	14	14	15,5	15,5
<b>3</b>	19	19	14,5	14,5	13,8	13,8	13,5	13,5
<b>4</b>	18	18	13,5	13,5	13	13	14	14
<b>5</b>	19	19	13,5	13,5	13,6	13,6	14,7	14,7
<b>6</b>	20,5	20,5	13,5	13,5	13,6	13,6	14,8	14,8
<b>moyenne</b>		<b>18,6</b>		<b>14,25</b>		<b>13,58</b>		<b>14,5</b>
<b>Ecart type</b>		1,281		0,880		0,337		0,689
<b>28 JOURS</b>								
<b>1</b>	26	26	19	19	22	22	24	24
<b>2</b>	31	31	18,5	18,5	22	22	24	24
<b>3</b>	28	28	18	18	22	22	24	24
<b>4</b>	28	28	18	18	22	22	21	21
<b>5</b>	24	24	18	18	24	24	24	24
<b>6</b>	24	24	21	21	24	24	24	24
<b>moyenne</b>		<b>26,83</b>		<b>18,75</b>		<b>22,66</b>		<b>23,5</b>
<b>Ecart type</b>		2,714		1,172		1,032		1,224
<b>90 JOURS</b>								
<b>1</b>	42	42	31	31	35,5	35,5	34	34
<b>2</b>	39	39	29	29	34	34	34,5	34,5
<b>3</b>	41	41	30	30	33,5	33,5	32,5	32,5
<b>4</b>	39	39	29	29	34	34	32	32
<b>moyenne</b>		<b>40,25</b>		<b>29,75</b>		<b>34,25</b>		<b>33,25</b>
<b>Ecart type</b>		1,500		0,957		0,866		1,190
<b>1</b>	46	46	35	35	38	38	37	37
<b>2</b>	44	44	31	31	36	36	37	37
<b>3</b>	42	42	34,5	34,5	35	35	36	36
<b>4</b>	42	42	32,5	32,5	34	34	36	36
<b>moyenne</b>		<b>43,5</b>		<b>33,25</b>		<b>35,75</b>		<b>36,5</b>
<b>Ecart type</b>		1,914		1,848		1,707		0,577
<b>360 JOURS</b>								
<b>1</b>	42	<b>42</b>	37	37	37	<b>37</b>	42	<b>42</b>
<b>2</b>	44	<b>44</b>	37	37	41	<b>41</b>	41	<b>41</b>
<b>3</b>	43	<b>43</b>	38	38	38	<b>38</b>	37	<b>37</b>
<b>4</b>	45	<b>45</b>	40	40	38	<b>38</b>	36	<b>36</b>
<b>moyenne</b>		<b>42,5</b>		38	38,5	<b>38</b>	39	<b>38,5</b>
<b>Ecart type</b>		<b>1,29</b>		1,41		1,73		2,94