



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Saad DAHLEB Blida
Faculté science de l'ingénieur

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Génie civil
Spécialité :
Matatériaux

Thème :

**Effet des addition minérales sur la durabilité des
bétons**

Présenté par :

YETTOU AHMED
MAMMARI OUSSAMA

Mr. ABDELLI Kamal

Professeur, USTHB

Encadreur

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos encadreurs, Messieurs ABDELLI Kamal et BRAHMA Amar, Enseignants chercheurs, respectivement à l'USTHB et l'USDB, pour avoir acceptés de nous encadrer et de nous avoir donnés l'opportunité de réaliser ce travail, nous les remercions pour leurs constantes disponibilités, pour leurs aides, pour leurs qualités humaines et pour leurs encouragements tout au long de ce travail, nous en sommes très reconnaissants.

Nous remercions les membres du jury de nous avoir fait l'honneur, d'accepter et d'avoir pris leur temps d'évaluer ce travail.

Nous voudrions remercier toutes les personnes, Enseignants, chercheurs, Doctorants et autres, à l'USTHB et à l'Université de Blida, de nous avoir consacré beaucoup de temps pour nous aider dans la réalisation des différents essais entrant dans le cadre de ce mémoire.

Aussi, nous tenons à remercier la Faculté de Génie Civil de l'USTHB, d'avoir mis à notre disposition matériels et matériaux pour la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous souhaitons remercier, l'ensemble des enseignants ayant intervenus dans notre formation, dans tous les cycles, du primaire à l'université, plus particulièrement les enseignants de l'Université SAAD DAHLEB de Blida.

❖ Liste des symboles

CEM I : Ciment Portland.

MK : Métakaolin.

LHF : Laitier des hauts fourneaux.

CaO : Chaux.

SiO₂ : Silice.

Al₂O₃ : Alumine.

Fe₂O₃ : Oxyde de fer.

MgO : Oxyde de magnésium.

Na₂O : Oxyde de sodium. K₂O : Oxyde de potassium. SO₃ : Trioxyde de soufre.

P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore.

TiO₂ : Dioxyde de titane.

PAF : Perte au feu.

C₃S : Silicate tricalcique (Aalite). C₂S : Silicate bicalcique (bélite). C₃A : Aluminate tricalcique (célite).

C₄AF : Alumino-ferrite tétracalcique.

Ca(OH)₂ : Portlandite.

CaSO₄ : Gypse.

C-S-H : Silicates de calcium hydratés.

SSB : Surface spécifique de Blaine.

E/C : Rapport eau/ciment.

M : La masse de la poudre [g].

V : Le volume d'eau ajouté [cm³]. ρ : La densité du ciment.

e : La porosité.

V : Le volume de la cellule [cm³].

t : Temps de passage de l'air à travers la couche de ciment [s].

K : constante de l'appareil déterminée lors de l'étalonnage et relative au liquide utilisé.

K : Un coefficient de régression linéaire [N.m.s].

DÉDICACES

Je dédie ce travail aux deux soleils de ma vie, ma mère et mon père :

Mes modèles absolus dans mon existence, ceux qui ont fait l'homme que je suis aujourd'hui, et ceux à qui je serai redevant pour l'éternité, merci pour votre soutien quotidien. Puisse le tout puissant vous donner santé, bonheur et longue vie, et garder le sourire sur votre visage.

Je dédie ce travail aussi à :

A mes amis et collègues (Oussama , titeuf , ayoub , cherif , raouf , khalil , fouad) .

A tout ma famille .

A mon ame Abir et ma sœur Houda et mon frère Mossaab

A mon chère binôme Ahmed , mon ami et mon bras droit dans ce projet .

Nous remercions Allah pour nous avoir donné la santé et la force pour mener à bien tout notre cursus universitaire

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I :Recherche bibliographique	2
I-1 Le ciment	3
I-1-1 Définition du ciment	3
I-1-2 Histoire du ciment	3
I-1-3 Naissance d'une industrie cimentière	3
I-2 Fabrication du ciment courant	3
I-3 Classifications des ciments	6
I-4 Normalisation du ciment	8
I-4-1 Histoire de la normalisation européenne	8
I-4-2 Notation du ciment	9
I-4-3 Classe de résistance	10
I-5 Caractéristiques et Propriétés du ciment	10
I-5-1 Caractéristiques chimiques du ciment	10
I-5-2 Caractéristiques physiques du ciment	12
I-5-3 Propriétés physiques du ciment	13
I-6 Hydratation du ciment	13
II Le Métakaolin	19
II-1 Définition du métakaolin	19
II-2 Histoire du Métakaolin	19
II-3 Fabrication du Métakaolin	20
II-4 Type de calcination	20
II-5 Caractéristiques et propriétés du Métakaolin	21
II-5-1 Compositions chimique et minéralogique	21
II-5-2 Caractéristiques physiques de métakaolin	22
II-5-3 Propriétés physiques du métakaolin	23
II-6 Hydratation du métakaolin	23
II-7 Les avantages du métakaolin	25
III Le Laitier des hauts fourneaux	26
III-1 Définition du laitier des hauts fourneaux	26
III-2 Histoire du laitier des hauts fourneaux	27
III-3 Fabrication du laitier des hauts fourneaux	27
III-4 Caractéristiques et propriétés du laitier des hauts fourneaux	29
III-4-1 Composition chimique du laitier des hauts fourneaux	29
III-4-2 Composition minéralogique	30
III-4-3 Caractéristiques physiques du laitier des hauts fourneaux	30
III-5 Propriétés du laitier des hauts fourneaux	30
III-6 Hydratation du laitier des hauts fourneaux	31
III-7 Avantages du laitier des hauts fourneaux	33

Chapitre II : Matériels et méthodes expérimentales	34
Introduction	35
II Essai sur mortier normal	35
III Résistance mécanique à la compression	41
IV Essai de maniabilité	43
V Perméabilité au gaz	45
VI Résistance à la pénétration des ions chlorures	48
Chapitre 3 : Résultats et discussion	51
I Introduction	53
II Essai de maniabilité	53
III Résistance mécanique	54
IV Perméabilité au gaz	56
V Résistance à la pénétration des ions chlorure	57
Conclusion générale	60

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie du ciment produit 7% des émissions mondiales de CO₂. Les chercheurs étudient les possibilités de diminuer ce niveau. L'application de différents matériaux supplémentaires peuvent être la solution appropriée à ce problème. Avec le développement de l'industrie, de plus en plus de sous-produit ou de déchets ont été générés, causant de graves problèmes de pollution de l'environnement. Pour résoudre ce problème, il faut trouver un moyen de consommer ou de diminuer ces déchets. Il a été découvert que de nombreux déchets industriels peuvent être recyclés comme substitut (remplacement) pour le ciment ou les granulats dans le béton.

Les matériaux cimentaires supplémentaires sont maintenant couramment utilisés pour réduire le facteur clinker dans le ciment.

Ces matériaux peuvent améliorer les propriétés du béton telles que la résistance à la compression, la durabilité et l'imperméabilité grâce à l'activité hydraulique ou pouzzolanique.

Le composant principal des additions minérales est généralement le SiO₂ amorphe actif.

Le but de notre travail est la valorisation de certains ajouts minéraux, comme le métakaolin, le verre broyé, la pouzzolane naturelle et le laitier des hauts fourneaux, dans la fabrication des mortiers et bétons.

Dans ce mémoire on va étudier les possibilités d'obtenir, d'autres ciments composés élaborés à base de ces quatre additions minérales et voir leur influence sur le comportement des mortiers à l'état frais et à l'état durcis.

Ce dernier est réparti sur trois chapitres :

- Le premier chapitre traite des données bibliographiques concernant le ciment ainsi que les différents ajouts utilisés.
- Le deuxième chapitre est consacré aux matériaux utilisés et les différentes méthodes expérimentales réalisées pour déterminer les propriétés et les caractéristiques des matériaux.
- Le troisième chapitre contient tous les résultats expérimentaux obtenus ainsi que la discussion de ces derniers.

Chapitre I : Recherche bibliographique

I Le ciment

I-1 Le ciment

I-1-1 Définition du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu de couleur grise qui, gâché avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation, et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Le ciment est obtenu par broyage et cuisson à 1450°C, d'un mélange de calcaire et d'argile. Appelé clinker, ce mélange granulaire est pour l'essentiel d'une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer.

I-1-2 Histoire du ciment :

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolanique », qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux. En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexploitée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore en 1817 la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches.

Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née. Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait la pierre de cette région.

I-1-3 Naissance d'une industrie cimentière :

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif, et broyeur à boulets en particulier. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse. Pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, il fallait en 1870, 40 heures, il faut actuellement environ 3 minutes.

I-2 Fabrication du ciment courant :

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne 80 % / 20 %. Les différentes étapes de la fabrication sont les suivantes :

a-Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

b-Préparation de la matière première :

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage ou délayage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant en faible proportion, bauxite, oxyde de fer... Le mélange cru est préparé automatiquement sous forme de granules (voie sèche ou semi-sèche) ou de pâte (voie semi-humide ou humide), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

c- La voie sèche :

C'est de très loin la plus employée aujourd'hui. La matière première est préparée sous forme de poudre. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. A la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

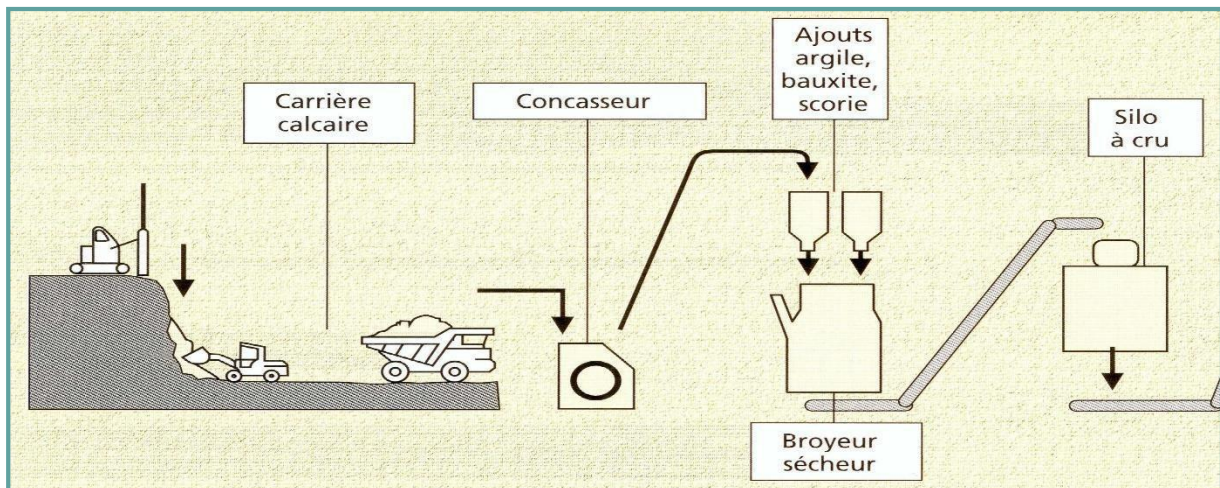


Figure I.1 : *Processus de l'extraction et de la préparation de la matière première.*

d- Cuisson du cru :

Quelle que soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties.

- Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds en sortant de ce four, et se décarbonate en partie. Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination). La poudre est ainsi portée à une température d'environ 800 °C à 1 000 °C.
- Un four horizontal rotatif cylindrique en tôle d'acier (avec revêtement réfractaire intérieur) de 60 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3

tours/minute. La matière pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (environ 1 450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre de 1 heure. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium. Tout en améliorant la qualité des produits, les industriels ont fortement réduit au cours des dernières années la consommation d'énergie nécessaire à la cuisson, qui est de plus en plus apportée par des combustibles de substitution. En outre l'industrie cimentière contribue à la protection de l'environnement grâce au recyclage de produits industriels usagés inutilisables pour d'autres emplois.

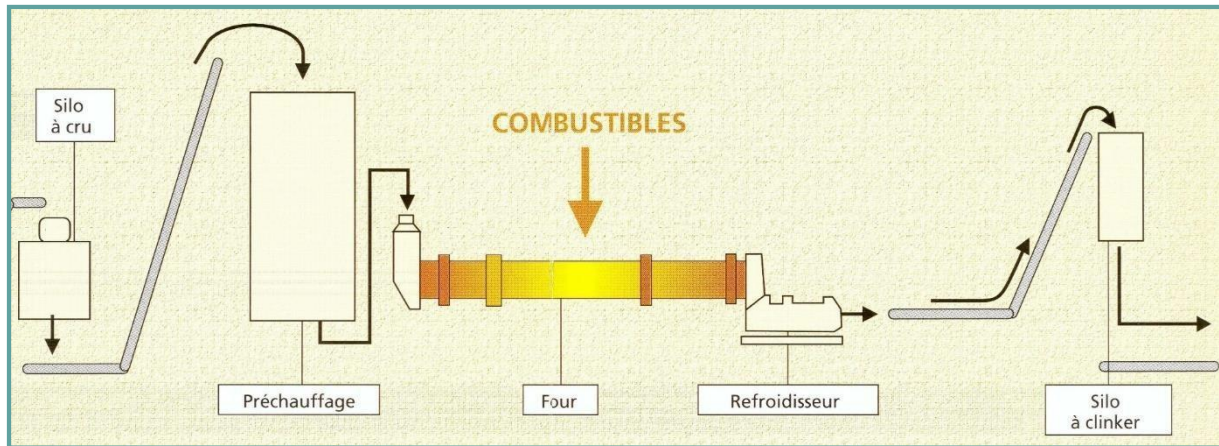


Figure I.2 : *Processus de la cuisson du cru.*

e- Broyage du clinker:

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci finement broyé avec du gypse (< 5 %) pour régulariser la prise donne le ciment Portland. Les autres catégories de ciment sont obtenues en ajoutant d'autres constituants tels que laitier granulé de haut fourneau, matériaux pouzzolaniques, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire, fumées de silice, fillers.

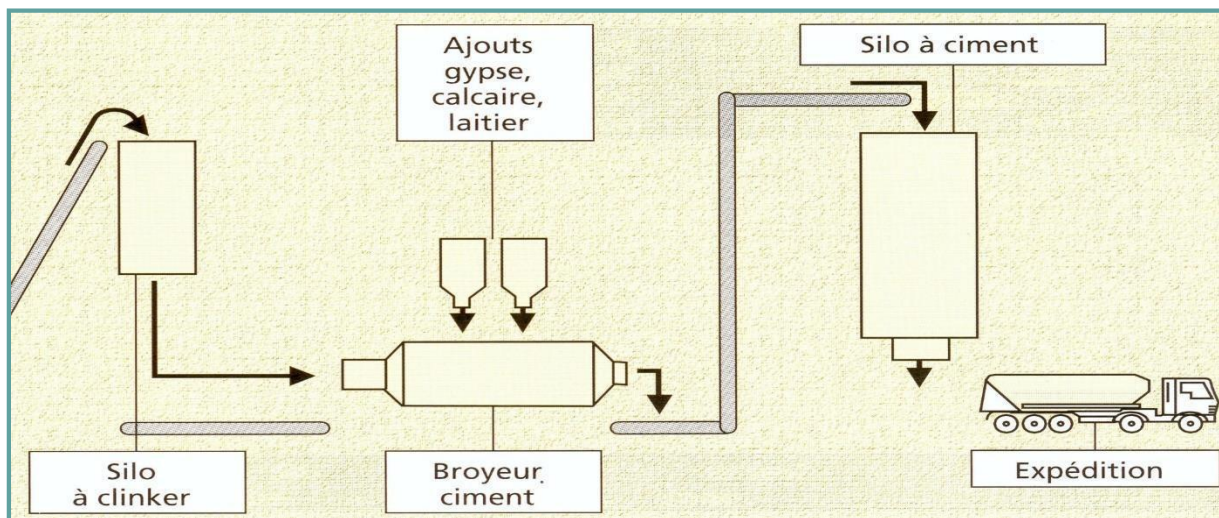


Figure I.3 : *Processus de broyage du clinker.*

I-3 Classifications des ciments :

La norme européenne EN 197-1 est publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1 «Ciment – partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants».

Les ciments courants sont subdivisés en 5 types selon leur composition :

- CEM I Ciment Portland
- CEM II Ciment Portland composé
 - CEM III Ciment de Haut Fourneau
- CEM IV Ciment pouzzolanique
 - CEM V Ciment composé

Les ciments de la norme NF EN 197-1 (ciments courants) :

La norme NF EN 197-1 concerne les ciments les plus courants. D'autres normes existent concernant soit des propriétés particulières (prise mer, résistance aux eaux sulfatées...) soit des ciments ayant des normes entièrement spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel.

La norme NF EN 197-1 est subdivisée en trois rubriques :

- une première partie descriptive qui définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments ;
- une deuxième partie qui fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques ;
- une troisième partie est consacrée aux critères de conformité, les procédures de leur vérification et les seuils de garantie.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) ^{a)}										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D ^{b)}	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire			
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V				Calciqie W	L	LL						
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
CEM II/B-LL		65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
Ciment Portland composé ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	←————— 6-20 —————→						—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	←————— 21-35 —————→						—	—	—	—	0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	←————— 11-35 —————→				—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	←————— 36-55 —————→				—	—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	←————— 18-30 —————→		—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	←————— 31-50 —————→		—	—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

Figure I.4 : Liste des ciments courants normalisés.

I-4 Normalisation du ciment :

I-4-1 Histoire de la normalisation européenne :

1969 : commencement des travaux de normalisation européenne dans le domaine des ciments (entre les 6 pays signataire du traité de Rome).

1973 : les travaux ont été promus dans le cadre du Comité européen de normalisation (CEN) au sein du comité technique 51 ciment et chaux de construction.

Objectif :

- Elaborer des normes d'essais connues pour tous les pays membres.
- Rédiger des normes de spécifications de produits.

1987 et 1989 : adaptation des normes d'essais.

1990 : évaluation de la performance de tous les ciments (même façon de tous les pays membres du CEN) □ simplification des échanges transfrontaliers.

1992 : le CEN/CT 51 reprend ses travaux et inclus tous les ciments dans le texte qu'il a adopté comme pré-norme.

Objectif :

ENV 197-1 □ - consacrer un certain niveau de consensus permettant de faire évoluer les normes nationales pour les rapprocher.

- poursuivre les travaux en considérant que les derniers points de divergence.

1994 : l'adaptation de la forme de la norme NFP 15-301 relative aux ciments courants qui conservait cependant le niveau d'exigence de la norme précédente en 1981.

21 mai 2000 : l'adaptation du projet de norme EN 197-1 (première norme harmonisée adapter dans le cadre défini par la directive européenne « produits de construction ») à l'unanimité des pays membres du CEN.

1^{er} avril 2001 : Obligation pour les ciments courants conformes à la norme EN 197-1 de porter le marquage CE sur les sacs ou sur le document d'accompagnement pour le vrac.

I-4-2 Notation du ciment :

Exemple de désignation selon ladite norme :

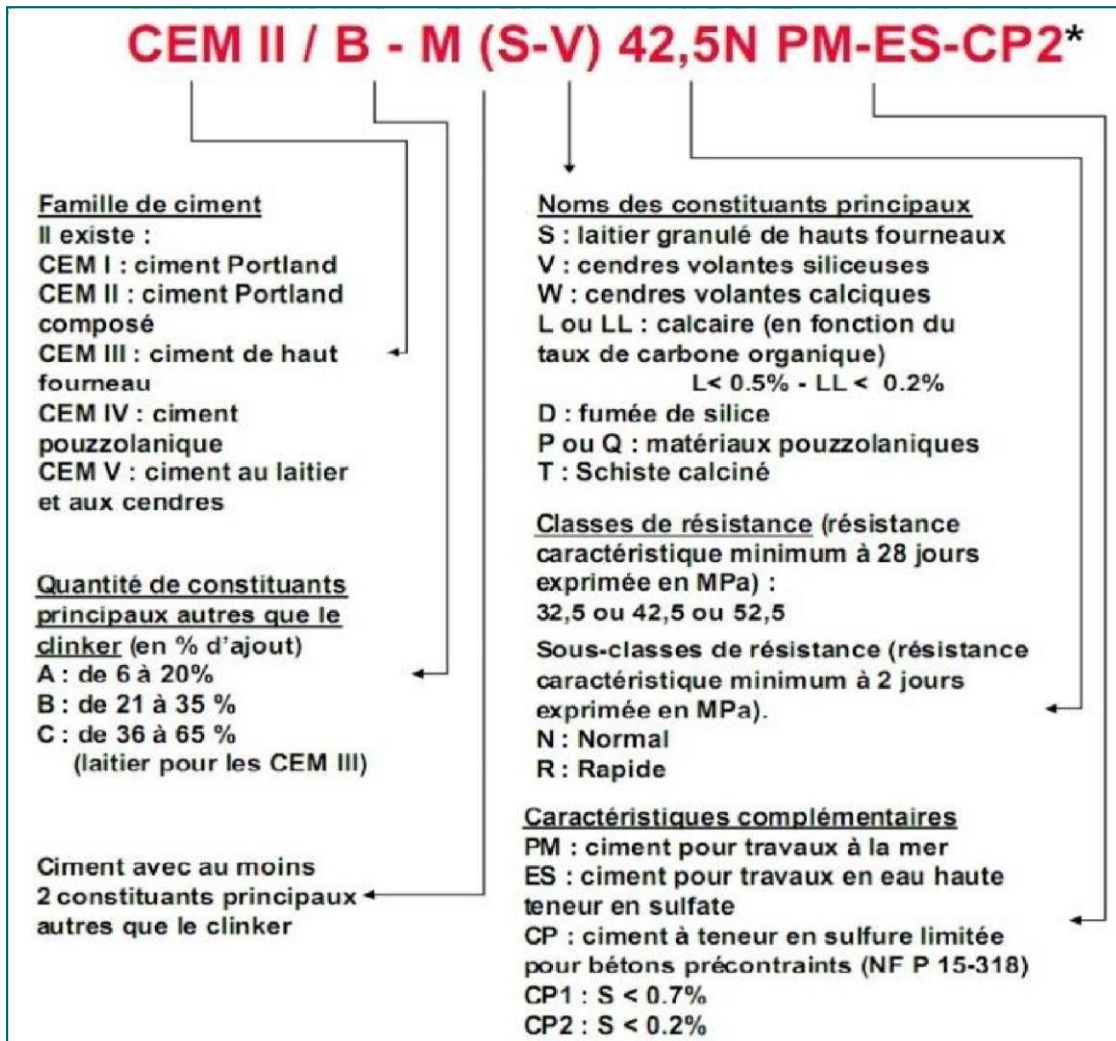


Figure I.5 : Exemples des désignations des ciments.

En matière de contribution à la protection de l'environnement, l'industrie cimentière a réduit sa production de ciments (CEM I) et a favorisé la vente de CEM III ce qui a engendré une réduction des émissions de CO₂.

I-4-3 Classe de résistance :

a) Définition de la classe :

Les ciments sont répartis en trois classes, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm² (1 N/mm² = 1 MPa = 10 daN/cm² = 10 bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau.

Tableau I.1: Représentation de la valeur maximale de la résistance normale à 28 jours.

Désignation de la classe	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance	
	courante		à 7 jours à 28 jours	
	à 2 jours			
32,5 N	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 N	≥ 10	–	≥ 52,5	–
42,5 R	≥ 20	–	–	–
52,5 N	≥ 20	–	–	–
52,5 R	≥ 30	–	–	–

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

I-5 Caractéristiques et Propriétés du ciment :

I-5-1 Caractéristiques chimiques du ciment :

❖ **Composition chimique :**

Les différents types de ciments sur le marché se distinguent principalement par leurs proportions en CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃.

La composition chimique générale de ciment selon la norme **EN 196-2** est donnée comme suit :

Tableau I.2 : *Composition chimique du ciment.*

Composants	Mesures (%)
SiO ₂	21.59
Al ₂ O ₃	4.01
Fe ₂ O ₃	4.84
CaO	63.99
MgO	1.35
SO ₃	1.55
K ₂ O	0.32
Na ₂ O	0.06

❖ Composition minéralogique :

Le ciment portland contient quatre (4) principaux constituants :

- Les silicates bicalciques (Bélite) : 2CaO, SiO₂ ou par abréviation C₂S.
- Les silicates tricalciques (Alite) : 3CaO, SiO₂ ou par abréviation C₃S.
- Les aluminates tricalciques (Célite) : 3CaO, Al₂O₃ ou par abréviation C₃A.
- Les alumino- ferrite tetracalciques (Célite) : 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ ou par abréviation C₄AF.

Formule de BOGUE :

La composition minéralogique des ciments portland est généralement déterminée à partir de la méthode de Bogue.

Le calcul de la composition minéralogique selon Bogue sera effectué dans le système :



Le calcul de pourcentage des minéraux dans le ciment selon Bogue se fait comme suit :

$$\%C_4AF = 3.04 \times f$$

$$\%CSH_2 = 2.15 \times s$$

$$\%C_3A = 2.65 \times a - 1.69 \times f$$

$$\%C_3S = 4.07 \times C_1 - 1.42 \times f - 2.85S - 7.6 \times s$$

$$\%\beta C_2S = 2.87 \times s - 0.75 \% C_3S$$

Avec :

- c_1 : représente le pourcentage de chaux(CaO) combinée.s : représente le pourcentage de silice(SiO₂).
- f: représente le pourcentage d'oxyde ferreux (Fe₂O₃).a : représente le pourcentage d'alumine Al₂O₃.
- s : représente le pourcentage de SO₃.

Ces quatre constituants se trouvent selon les proportions suivantes :

- C₂S..... 7-30 %
- C₃S..... 50-75 %
- C₃A..... 0-20 %
- C₄AF 0-12 %

La composition minéralogique du ciment selon Bogue est donnée par le tableau □-4 :

Tableau I.3 : *Composition minéralogique du ciment selon Bogue.*

Constituants	C ₄ AF	CSH ₂	C ₃ A	C ₃ S	BC ₂ S	CaO
%Pondéraux	8.31	3.96	11.31	44.21	27.88	0.46

I-5-2 Caractéristiques physiques du ciment :

➤ Masse

volumique :On note que

:

- $\rho_{\text{apparente}} = 800-1300\text{kg/m}^3$, selon le type de ciment.
- $\rho_{\text{absolue}} = 2900-3150\text{kg/m}^3$, selon le type de ciment.
- Surface spécifique de Blaine =2700 - 5000cm²/g, selon le type de ciment.

➤ La prise et le durcissement :

Le phénomène de prise qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important est lié à plusieurs paramètres :

- Le type de ciment, certains entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus court que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance.
- La finesse de mouture (broyage), le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande.
- La présence de matières organiques dans l'eau.

- L'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retarder.

La norme spécifie, selon les ciments un temps de prise minimale

de : 1h30 ; pour les ciments de classes 32.5 et 32.5 R.

1h ; pour les ciments de classe 42.5 ; 42.5 R ; 52.5 et 52.5 R.

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois, des années, au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R », c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire de «Rapide».

➤ Finesse de mouture :

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée totale des grains contenus dans une masse donnée. Cette finesse, mesurée est exprimée en cm^2/g . À une augmentation de finesse correspond une augmentation des résistances précoces (2 et 7 jours), mais aussi une tendance accrue au retrait. Elle peut atteindre $7\,000\ \text{cm}^2/\text{g}$ pour les ciments prompts. En général, la finesse de mouture des ciments varie de $2\,700$ à $3\,500\ \text{cm}^2/\text{g}$ (surface spécifique Blaine).

Certains ciments tels que les ciments prompts naturels « CNP » ont un $\text{SSB} > 450\ \text{m}^2/\text{g}$. Plus la SSB est importante et plus la résistance est élevée.

I-5-3 Propriétés physiques du ciment :

➤ Chaleur d'hydratation :

La dissolution des différents constituants est exothermique et selon leur %, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple pour les ciments riches en C_3A , qu'on utilisera pour le temps froid et en préfabrifications. Alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud, selon le type de ciment, cette chaleur est comprise entre $65\ \text{J/g}$ pour 12h pour un CEMII/B et $300\ \text{J/g}$ pour certains ciments portland et pour les CEMI.

➤ Perte au feu :

La perte au feu est une analyse qui permet de déterminer le taux de constituants qui se volatilisent à 1000°C (essentiellement CO_2 et H_2O).

I-6 Hydratation du ciment :

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté. La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide.

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

L'étude des réactions d'hydratation des composants du ciment dissocie artificiellement des mécanismes dont le déroulement est, dans les faits, simultané.

- **Hydratation des silicates :**

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) et les silicates bicalciques (Ca_2SiO_4) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible.

Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante : $(CaO)_x(SiO_4)_y(H_2O)_z$ avec $0.6 < x/y < 2$ et $1 < z < 4$. Leur composition moyenne est proche de $(CaO)_{1.7}(SiO_4)(H_2O)_4$.

L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains.

Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années.

- **Hydratation des aluminates :**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

Étape 1 : Formation d'ettringite (phase AFt)

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté) : $((CaO)_6(Al_2O_3)(SO_3)_3, 32H_2O)$. Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) : $((CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4), 12H_2O)$. Les réactions chimiques s'intensifient.

Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate (C_3A) et l'aluminoferrite (C_4AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C_3A , l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland :

L'hydratation du ciment Portland implique, nous venons de le voir, la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C_3S , c'est l'hydratation du C_3S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions.

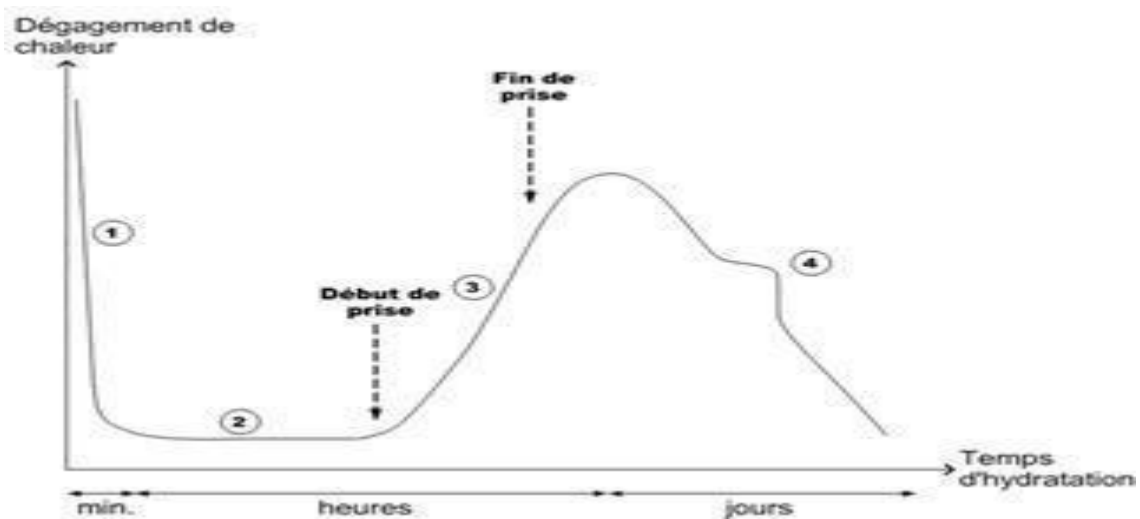


Figure I.6 : Courbe typique de calorimètre isotherme d'un ciment.

D'après Garcia Boivin (1999), ces périodes peuvent être décrites de la manière suivante :

Période 1 : réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables) : les ions entrent en solution.

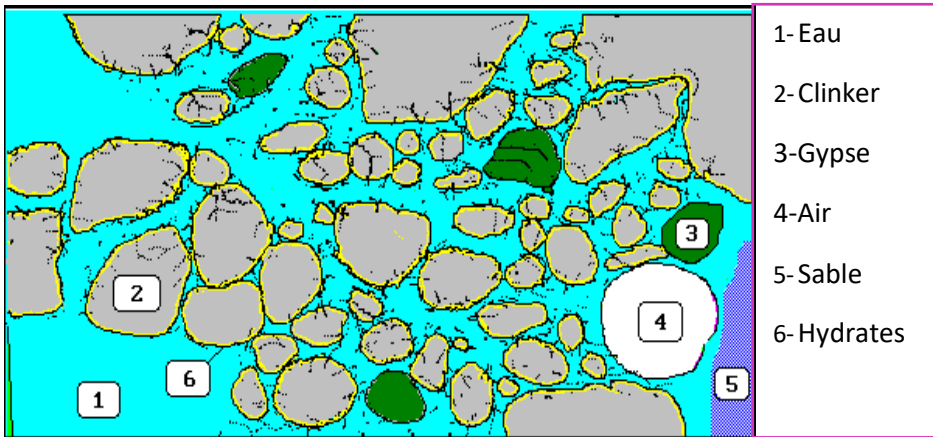


Figure I.7 : Hydratation superficielle instantanée des particules.

Période 2 : période dormante

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

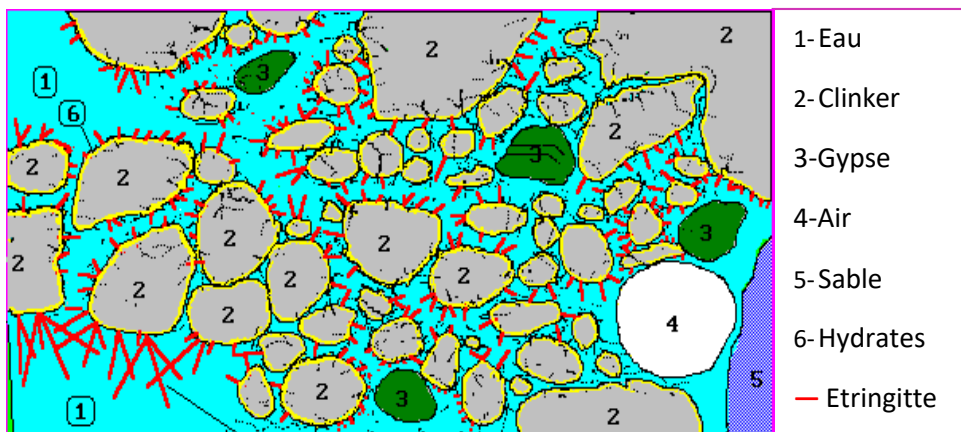


Figure I.8 : Période d'induction des silicates.

Période 3 : période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette épuisement induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

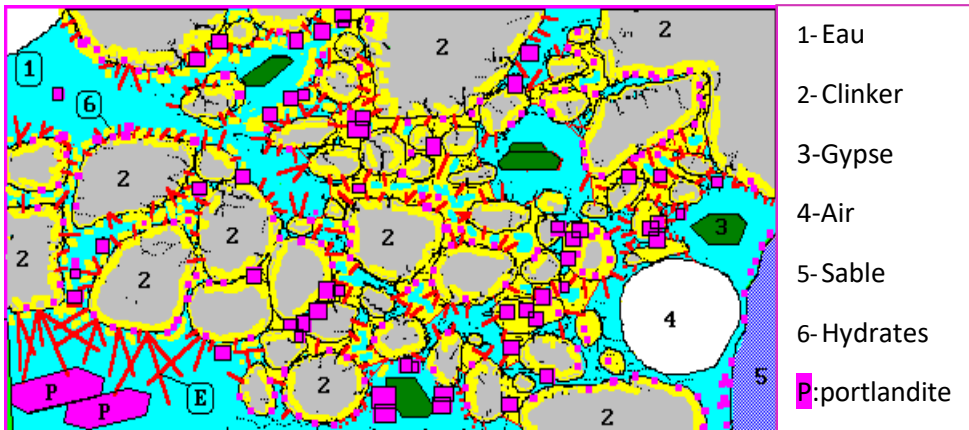


Figure I.9 : Fin de la période dormante et précipitation de la portlandite.

Période 4 : période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d’une couche d’hydrates qui s’épaissit de plus en plus. Pour que l’hydratation se poursuive, il faut que l’eau diffuse à travers les pores de gel. La chaleur dégagée diminue.

Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n’est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C’est pendant cette période que l’ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm.

Les mécanismes complexes à l’origine de la création des différents produits de l’hydratation que les silicates et les aluminates sont l’adsorption, l’hydrolyse, la dissolution, la solvataion et la cristallisation.

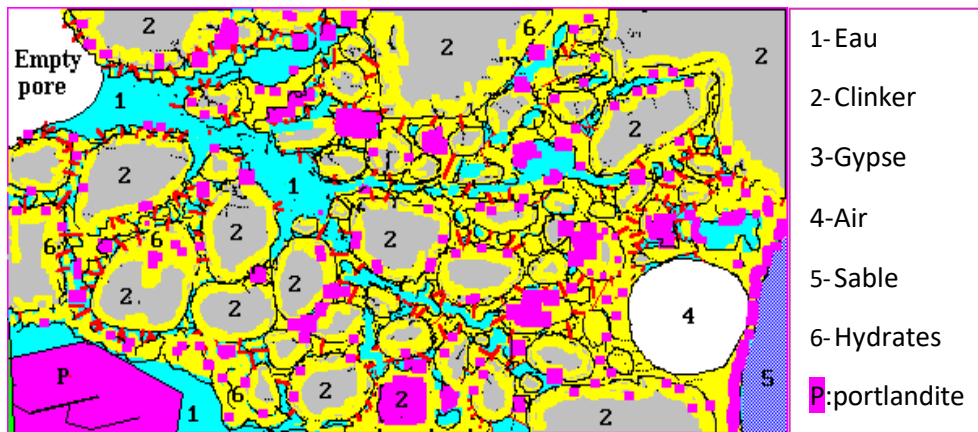


Figure I.10 : Epuisement des sulfates et conversion de l’ettringite en monosulfoaluminate.

Tableau I.4 : Régulation de prise.

Réactivité du clinker	Disponibilité des sulfates en solution	Temps d'hydratation			
		10mn	1 h	3h	
Faible	Faible				ettringite
Haut	Haut				CSH
Haut	Faible				C ₄ AH ₁₃
Faible	Haut				CaSO ₄ ·2H ₂ O

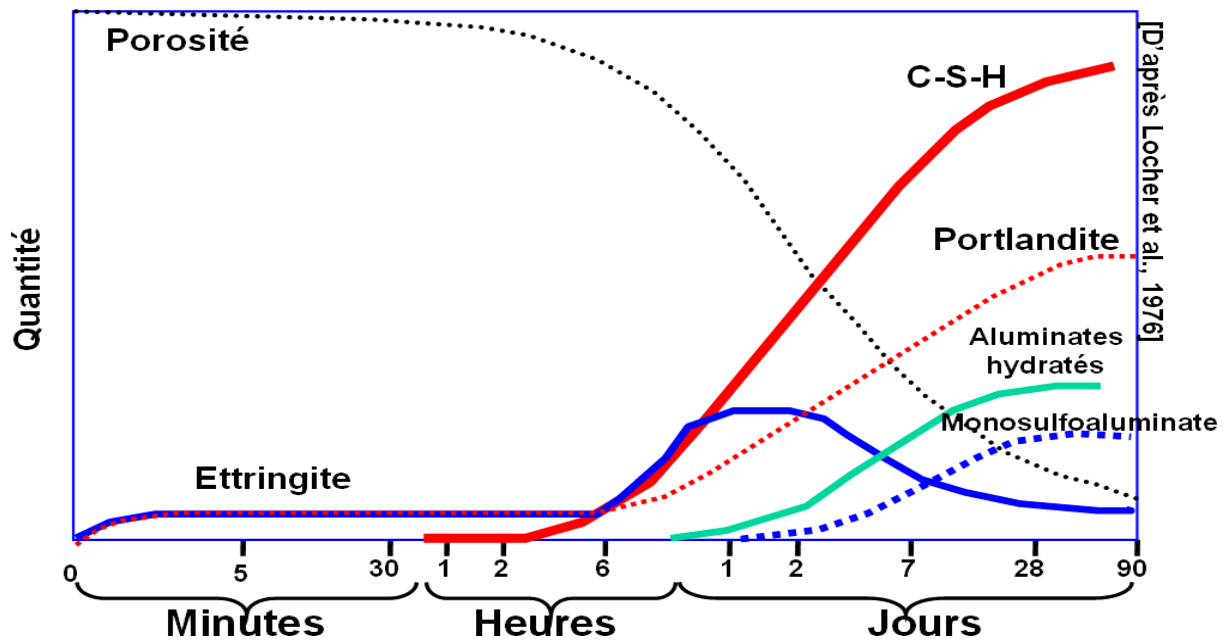


Figure I.11 : Cinétique globale de l'hydratation.

II Le Métakaolin

II-1 Définition du métakaolin :

Métakaolin : poudre de grande surface spécifique obtenue par calcination broyage ou broyage calcination d'une argile composée majoritairement de kaolinite (La **kaolinite** est une espèce minérale composée de silicate d'aluminium hydraté, de formule $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ du groupe des silicates, sous-groupe de phyllosilicates). Le métakaolin est constitué principalement de particules de silicate d'alumine amorphes ayant des propriétés pouzzolaniques ; il est composé essentiellement de SiO_2 et de Al_2O_3 réactifs.

Les métakaolins sont des produits pouzzolaniques dont les propriétés sont voisines de celles des fumées de silice. Leur utilisation permet de remplacer la fumée de silice ainsi qu'une partie du ciment lui-même.

L'usage du métakaolin améliore les performances mécaniques et la durabilité des bétons.

(b)

(c)



Figure I.12 : (a) le kaolin, (b) le métakaolin et (c) le métakaolin broyé.

II-2 Histoire du Métakaolin :

Le mot kaolin est dérivé du mot chinois gaoling (高岭), signifiant « Collines Hautes », et qui désigne une carrière située à Jingdezhen, dans la province de Jiangxi, en Chine. Le kaolin est en effet la matière première utilisée dans la fabrication de la porcelaine, découverte et invention chinoise qui a eu lieu à Jingdezhen.

C'est en 1768 que Jean-Baptiste DARNET, chirurgien du Roi, découvre l'argile blanche à Saint-Yrieix et l'apothicaire Marc-Hilaire Villaris de Bordeaux qui va l'identifier comme étant le KAOLIN nécessaire à la fabrication de cette céramique si particulière.

Le métakaolin n'est que du kaolin calciné, son utilisation remonte à l'année 1963 lorsqu'il a été intégré dans le béton du barrage Jupia au Brésil. Il est apparu sur le marché de l'Amérique du Nord au milieu des années 1980. La croissance de son utilisation est due aux avantages techniques qu'il confère au béton.

II-3 Fabrication du Métakaolin :

Les Métakaolins sont obtenus par calcination d'argiles kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures comprises entre 500 et 900°C. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolinite. La calcination entraîne la déshydroxylation et une destruction d'une structure cristalline initiale du kaolin (Le principe de cuisson du kaolin consiste à éliminer le maximum d'eau (eau chimiquement liée) dans le kaolin, qui pour cela doit passer par une rupture de la liaison O-H. Le composé formé est la métakaolinite.

Equation 1 :



Sa composition stœchiométrique est de type $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_{0.24}$. Selon la pureté du kaolin initial, le métakaolin formé peut contenir d'autres phases mineures telles que la muscovite.

En termes de méthode d'élaboration, deux dispositifs industriels distincts sont utilisés : le four rotatif en lit fixe ou la calcination flash. Cette dernière est une technique originale, issue de nombreuses années de recherche, qui permet de calciner la kaolinite au gré d'un passage de quelques secondes dans un four vertical flash (contre un temps de calcination de plusieurs heures en four rotatif ou à lit fixe). D'où le nom de métakaolin flash.

II-4 Type de calcination :

1- Calcination traditionnelle :

La calcination en traditionnelle est dite lente car le plateau de température dure en général plusieurs heures.

- Les fours rotatifs ou à lit fixe :

Les fours rotatifs sont les plus utilisés dans l'industrie cimentière. Ces fours nécessitent un broyage de la matière à l'entrée. Ils font de 60 à 90 m de longueur et 4 à 5 m de diamètre. Le cylindre en acier est recouvert d'un revêtement intérieur réfractaire, incliné sur l'horizontale de quelques degrés en tournant autour de son axe. La rotation et l'inclinaison font que la matière progresse suivant l'axe. Ces fours nécessitent plusieurs heures avant d'être à température pour la calcination. De même que pour les fours à vis, les fours rotatifs sont confrontés aux problèmes de durée de vie des réfractaires, de la dispersion thermique et des longs temps de séjours.

2- Calcination flash:

La calcination flash est une installation thermique rapide pour les matières pulvérulentes. Elle offre de larges possibilités tant au niveau de la taille des particules que de la forme ou de la densité. Cette technique permet de transformer minéralogiquement ou chimiquement

certaines produits. Cependant il est à noter qu’il faut pour chaque produit une tour de calcination différente, adaptée au produit de départ ainsi qu’au produit final. Le traitement thermique ne dure que quelques secondes, et est désigné comme flash dans le cas de particules pulvérulents subissant une transformation minéralogique.



Figure I.13 : Processus de calcination flash du kaolin.

II-5 Caractéristiques et propriétés du Métakaolin :

II-5-1 Compositions chimique et minéralogique :

Les ultrafines d’origine naturelle étant issues de roches, les oxydes majoritairement représentés sont les oxydes de calcium, de silicium, d’aluminium et de fer. Les metakaolins contiennent principalement de l’oxyde de silicium (entre 50 et 55 %) et de l’oxyde d’aluminium(entre 40 et 45 %). Des exemples de compositions chimiques de metakoaolins tirés de la littérature sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau I.5 : Exemples de composition chimiques de métakaolins.

Composition	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)
[Khatib et al., 1996a]	52,1	41,0	4,3					
[Poon et al., 2001]	53,2	43,9	0,4	0,02	0,05	0,2		1,7
[Gruber et al., 2001]	52,1	45,3	0,6	0,05		0,2	0,2	1,6
[Staquet et al., 2004]	55,0	40,0	0,6	< 0,1		1,6		
[Batis et al., 2005]	65,9	22,6	0,9	0,4	0,02			
	47,8	38,2	1,3	0,03	0,04			

Outre la composition chimique du matériau, l’assemblage minéralogique présente une grande importance car il influence la réactivité des métakaolins. La composition minéralogique des métakaolins dépend de la composition chimique de la roche mère du matériau et de son

parcours thermodynamique : traitements thermiques (calcination, déshydroxylation), traitements chimiques, transport par voie humide...

Les oxydes se répartissent dans les phases ci-dessous :

- Entre 65 et 85 % de métakaolinite sans hydroxyle résiduel ;
- Entre 5 et 25% de muscovite totalement déshydroxylée ;
- Entre 7 et 13 % de quartz (SiO_2).

II-5-2 Caractéristiques physiques de métakaolin :

• Masse volumique :

Dans la littérature, la masse volumique des métakaolins est inférieure à celles des ciments. La masse volumique des métakaolins rapportés est de 2,5 g/m³ et de 2,54 g/m³. Cette différence est due à la composition minéralogique des roches mères et le processus de fabrication des métakaolins.

La masse volumique des ciments avec des taux de substitution en métakaolin, augmente mais elle reste inférieure à celle des ciments sans métakaolin.

• La surface spécifique :

La différence de valeurs de la superficie de métakaolin varie selon la granulométrie, la morphologie et la texture des particules. On note que la SSB du Métakaolin est largement supérieure à celle du ciment et joue un grand rôle dans la réactivité de métakaolin avec la chaux mais entraîne une augmentation du besoin en eau et influence les caractéristiques rhéologiques.

Il faut noter que la surface spécifique de métakaolin est donnée par :

Tableau I.6 : Exemples des valeurs de surfaces spécifiques de métakaolins relevées dans la littérature.

Surface spécifique (m ² /g)	Référence bibliographique
7	(Garcia Diaz, 1995)
12,7	(Poon et al, 2001)
8,9	(Courard et al, 2003)
12	(Staquet et al, 2004)
12	(Khatib et al, 2004)
18	(Abdelli et al, 2017)

II-5-3 Propriétés physiques du métakaolin :

- La porosité :

L'incorporation du Métakaolin induit une diminution et un raffinement du réseau poreux dans les bétons. Cette tendance se traduit par une réduction de la macro et méso-porosité à l'échelle du béton. La pâte de ciment avec Métakaolin à un volume poreux qui diminue régulièrement au cours du temps traduisant le développement continu des hydrates.

- Chaleur d'hydratation :

L'augmentation de la vitesse d'hydratation de la pâte s'accompagne d'une augmentation de la chaleur dégagée. Pour une incorporation de 10% du Métakaolin, le pic de chaleur dégagée est à son max dans les deux premiers jours et est supérieur à un béton contenant 100% de ciment.

II-6 Hydratation du métakaolin :

L'importante réactivité des métakaolins, au jeune âge est liée aux phases aluminates qui les composent ainsi qu'à leur surface spécifique importante.

L'hydratation de métakaolin se fait par la consommation de la portlandite et la production des C-S-H et des C-A-S-H supplémentaires. La réaction pouzzolanique consiste à produire des silicates de calcium hydratés à partir de la silice réactive de l'addition (état amorphe) en consommant des cristaux de chaux formés par l'hydratation des composés principaux du clinker (C_3S , C_2S).

Selon [Prince et al. 2001], [Garcia-Diaz, 1995], la réaction pouzzolanique suit les quatre étapes suivantes :

-Dissolution par réaction hydroxylique de la pouzzolane en milieu basique : Cette dissolution est assurée par les ions hydroxyles provenant de la dissolution des phases anhydres du ciment ou d'une solution d'hydroxyde de calcium ; elle conduit à la formation d'anions. ($Al(OH)^4^-$ et $H_2SiO_4^{2-}$) en solution.

-Saturation de la solution en ions aluminates silicates et calcium.

-Germination et précipitation d'hydrates tels que : C-S-H, C_2ASH_8

Une écriture des réactions pouzzolaniques des Métakaolin a été proposée par Murat (Murat, 1983), de Silva et al (De Silva et Gasser, 1993), (Métakaolin = $AS_2 = Al_2O_3 (SiO_2)_2$).



La réaction pouzzolanique de métakaolin forme des C-S-H ainsi que les produits cristallins, qui incluent les hydrates d'aluminate de calcium et les hydrates d'aluminosilicate (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} et C_3AH_6). Les produits cristallins dépendent principalement de la température de la

réaction et du rapport AS_2/CH . Les ions Ca^{2+} et OH^- proviennent de la dissolution des phases anhydres du ciment et plus particulièrement, du silicate tricalcique C_3S (composé majoritaire du ciment). La présence des ions hydroxydes dans la solution interstitielle augmente le pH du système en permettant la dissolution du métakaolin. Ce dernier, après dissolution, réagit avec les ions Ca^{2+} et OH^- pour former des gels silico-calciques hydratés C-S-H, supplémentaires à ceux formés lors de l'hydratation du ciment, au détriment de la précipitation de la portlandite CH. Ainsi, le taux de portlandite présent dans la pâte de ciment durci est réduit. La portlandite est rapidement consommée dans les pâtes contenant jusqu'à 30% du métakaolin, la microstructure est alors riche en C-S-H et Stratlingite (C_2ASH_8), la présence de ce dernier dépend du rapport AS_2/CH .

Les mécanismes se produisant lors de l'hydratation du Métakaolin sont les suivants :

Mécanismes réactionnels :

La réaction pouzzolanique (hydratation) se déroule suivant les phases suivantes :

- La première phase (phase 0) :
Correspond au mélange des différents éléments (eau, ciment et addition minérales).
- La seconde phase (phase 1) :
Elle est principalement pilotée par le PH de la solution avec une dissolution des silicates continuellement croissante avec l'augmentation du PH= 5,6 donnant lieu à une première phase de la réaction pouzzolanique qui est généralement liée à l'hydrolyse des surfaces dessilicates.
- La troisième phase (phase 2) :
La réduction de la vitesse est souvent associée à l'apparition d'une couche protectrice constituée de Ca^{2+} adsorbée à la surface des grains ou particules aluminosilicate qui se seraient dissoutes et auraient précipité la surface des particules. Cette phase correspond aussi à l'enrichissement de la solution en ions aluminium, silicium, hydroxyde et calcium.
- La quatrième phase (phase 3) :
La fin de la période d'induction annonce une forte accélération de réactions d'hydratation, qui est due à une nucléation consécutive. Cette accélération est reliée à la conversion des CASH métastables ayant à la précipité à la surface des grains hydrates CASH plus stable.
- La cinquième phase (phase 4) :
Le développement des réactions se produit d'une manière exponentielle ; la deuxième partie de la réaction pouzzolanique intervient ensuite avec la dissolution de la portlandite viendra réagir avec le métakaolin restant. A long terme, la vitesse de réaction est diminuée de nouveau à cause de la réaction des couches d'hydrates à la surface des grains anhydres. Les vitesses de réactions seront ensuite pilotées par la diffusion des éléments à travers des couches d'hydrates. Lors de la réaction d'hydratation entre le métakaolin et le ciment portland, les principaux hydrates formés sont les CSH et les CASH issues de la réaction entre

les ions Ca^{2+} présents dans de grandes proportions dans la solution interstitielle et les silicates et les aluminates du ciment ou du métakaolin. Les autres hydrates possibles d'être retrouvés lors de l'hydratation du métakaolin sont principalement les : C_4AH_{13} , C_3AH_6 et les C_2ASH_8 . Les C_4AH_{13} sont un exemple d'aluminate hydraté qui se forme en absence des sulfates, de carbonates et de chlorures.

II-7 Les avantages du métakaolin :

Lorsqu'on l'utilise comme ajout cimentaire, le métakaolin offre plusieurs avantages :

- ◆ Augmentation de la résistance à la compression et à la flexion.
- ◆ Augmentation de la durabilité.
- ◆ Production d'un béton ayant des caractéristiques environnementales de développement durable.
- ◆ Réduction des émissions de gaz à effet de serre comparativement à un béton entièrement fait de ciment Portland.
- ◆ Perméabilité réduite (y compris la perméabilité aux ions chlorure), donc protection supplémentaire contre la corrosion des armatures en fer induite par l'utilisation de sel de déglacage.
- ◆ Réduction importante de l'efflorescence (poudre blanche qui apparaît parfois à la surface du béton ou du mortier ; ces dépôts de sel se transportent à la surface par l'humidité).
- ◆ Réduction de la réaction alcali granulat, un enjeu de taille dans les travaux d'infrastructure.
- ◆ Amélioration de la plasticité et des caractéristiques de mise en place du béton.
- ◆ Production d'un béton plus blanc qui facilite le contrôle des bétons colorés.
- ◆ Amélioration des caractéristiques de réflexion du soleil, réduit l'effet d'île de chaleur et contribue à l'obtention de structures plus stables sur le plan énergétique.

Le métakaolin contribue à relever le défi environnemental :

- ◆ Lorsqu'il est utilisé comme ajout au béton, il en augmente la résistance et la durabilité, et diminue la quantité de ciment requise.
- ◆ Il donne un béton plus durable, ce qui favorise le développement durable puisque les immeubles et les infrastructures sont plus solides et ont une durée de vie prolongée.
- ◆ Il produit un béton plus clair que lorsqu'on utilise d'autres ajouts cimentaires, ce qui augmente la réflexion des surfaces. Les bâtiments réfléchissant la lumière utilisent beaucoup moins d'énergie pour refroidir l'air en été.
- ◆ L'effet du métakaolin sur l'environnement est directement mesurable. À quantité égale, la fabrication du métakaolin génère 55 % moins de CO_2 que la fabrication du ciment. De nos jours, la capacité de réduire le bilan de CO_2 d'un produit devient de plus en plus critique avec la mise en place des taxes sur les gaz à effet de serre.

Contribution esthétique des métakaolins :

- En plus de leur contribution à la durabilité du béton et à ses performances mécaniques, les métakaolins sont également utilisés pour leur rôle au regard de la qualité du parement. En consommant la chaux libre, ils la soustraient à sa mobilisation dans les transferts responsables des efflorescences.
- Leur finesse enfin permet l'obtention de parements plus lisses et plus compacts. C'est la raison pour laquelle on les associe, dans les bétons architectoniques, aux ciments blancs.

Le métakaolin est de plus en plus reconnu par les industries et par les professionnels comme :

- L'industrie du ciment.
- L'industrie du béton.
- L'industrie de la construction.
- L'industrie du forage pétrolier.
- L'industrie minière.
- Les architectes et les ingénieurs civils.
- Les organismes de normalisation.
- La communauté scientifique.
- les maîtres d'œuvre et les entrepreneurs.

III Le Laitier des hauts fourneaux

III-1 Définition du laitier des hauts fourneaux :

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 (SiO₂) et alumine (Al₂O₃). L'élaboration du laitier peut conduire, selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques :

- 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 hydraulité latente.

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



Figure I.14 : Laitier cristallisé et vitrifié.

III-2 Histoire du laitier des hauts fourneaux :

Les hauts-fourneaux ont une longue histoire... Elle nous est bien contée dans l'ouvrage de référence « Le laitier de haut fourneau » des ingénieurs Jacques Alexandre et Jean-Louis Sébilleau (1988). Les origines de la sidérurgie sont très anciennes, elles remontent à l'antiquité. Les premiers hauts-fourneaux datent du moyen âge, et l'on peut parler de modernité dès le milieu du 19^e siècle.

Les laitiers de haut-fourneau ont longtemps constitué un produit dont on cherchait à se débarrasser, et que l'on évacuait sur des lieux de stockage qui sont devenus des « crassiers historiques », de volume très important, notamment en Lorraine.

1818 : L. Vicat avait déjà mentionné la possibilité d'utiliser du laitier en cimenterie.

1862 : Emil Langen démontre qu'un mélange de laitier broyé et de chaux donnait naissance à un liant hydraulique.

1882 : La fabrication industrielle Chapitre 2 Le ciment de laitier activé : liant prometteur
15 du ciment de laitier commença en Allemagne grâce à G. Pressing,

1928 : ces ciments apparaissent en France. Cependant, bien avant cette date, les ciments portlands additionnés de laitier et les ciments de laitiers à la chaux furent employés. Comme par exemple en 1900 pour la construction du métro à Paris. (Venuat, 1984).

Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques contenant des teneurs variées en laitier (ciments normalisés ou des ciments spéciaux).

III-3 Fabrication du laitier des hauts fourneaux :

Pour fabriquer de l'acier industriel, le minerai de fer aggloméré est chargé dans la partie supérieure du haut fourneau en couches alternées avec du coke, un combustible puissant proche du carbone pur fabriqué à partir de charbon. On insuffle de l'air chaud et du charbon pulvérisé dans le bas du haut fourneau à une température proche de 1200°C. Ceci provoque la combustion du coke qui entraîne la fusion du minerai, ainsi que la formation d'un gaz réducteur qui transforme les oxydes de fer du minerai en métal, formant ainsi du CO et du

CO₂. On recueille alors la fonte liquide à 1500°C (environ 96% Fe et 4% C) et le laitier dans le bas du haut fourneau.

Les constituants non-métalliques et/ou non absorbés par la fonte et non gazeux constituent le laitier de haut fourneau, qui est à l'état liquide. Il surnage car sa densité d'environ γ , est inférieure à celle de la fonte qui est de 7. La séparation de la fonte et du laitier se fait par un dispositif de siphonage. On parle de laitiers de fraîche production lorsqu'ils entrent, dès leur élaboration, dans la filière de valorisation par opposition aux laitiers de stock ou de crassiers, qui sont issus de productions non valorisées constituées au fil des décennies.

On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier de haut fourneau est cristallisé lorsqu'il est dirigé par une rigole vers des fosses où il refroidit et se cristallise lentement à l'air sous forme de roche dure. Après le début de la solidification, ce laitier est arrosé afin d'en abaisser la température puis fragmenté, concassé et criblé.
- Le laitier de haut fourneau est dit vitrifié, ou granulé, s'il est dirigé vers un dispositif dans lequel il subit une trempe (arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression). L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément de fines particules d'un produit vitreux désordonné. Il possède ainsi une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement [Divet et al, 2006]. Lors de son hydratation, le laitier évoluera sous une forme cristalline stable pouvant être mise à profit pour les formulations de ciments ou de bétons.

On distingue deux types de laitiers vitrifiés :

- le laitier vitrifié granulé, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps.
- le laitier vitrifié bouleté soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules.

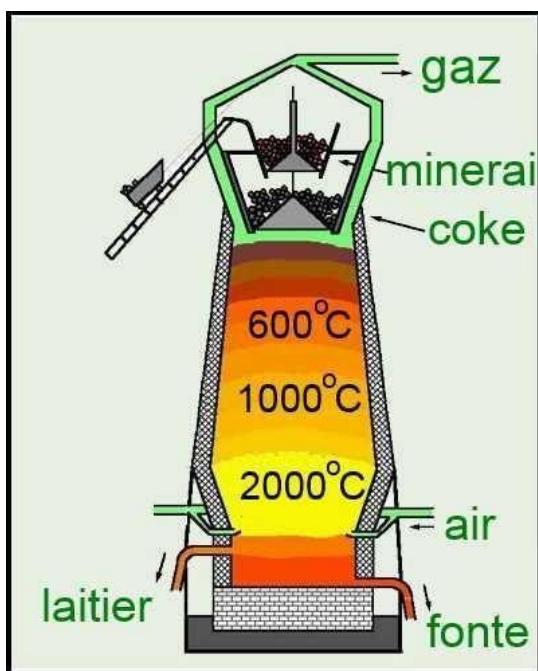


Figure I.15 : Schéma représentatif du principe d'un haut fourneau.

III-4 Caractéristiques et propriétés du laitier des hauts fourneaux :

III-4-1 Composition chimique du laitier des hauts fourneaux :

Les principaux composants chimiques de ce type de laitier sont la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie qui représentent 95 à 97% de la composition totale du laitier. Le tableau suivant nous montre les constituants majeurs sous forme d'oxydes et les teneurs pouvant être rencontrés dans ce type de laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est stable dans une même usine, mais peut varier entre usines.

Tableau I.7 : Echelle de composition chimique des laitiers de haut fourneau [Allexandre et al, 1988, Bellman et al, 2009, Rrgourdnet al, 1983].

Constituant	Teneur en %
CaO	35-48
SiO ₂	32-41
Al ₂ O ₃	9-18
MgO	1-9
MnO	0,4-0,7
Fe	0,2-3
S	0,4-1,5

Des traces de TiO₂, Na₂O, K₂O, SO₃ sont également détectées dans ce type de laitier.

La composition chimique a une très grande influence sur la réactivité du laitier, ceci est dû au fait que :

- Les oxydes (Al₂O₃ et CaO) augmentent l'activité hydraulique de laitier tandis que la (SiO₂) la fait diminuer.

- L'hydraulicité augmente quand le rapport SiO_2/CaO augmente, mais il faut signaler qu'une teneur élevée de CaO rend la granulation du laitier plus difficile.
- L'augmentation de MgO jusqu'à 18 % est favorable, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le MgO libre pendant l'hydratation, contrairement au ciment portland.
- La teneur élevée de (Al_2O_3) donne un développement de la résistance aux âges ultérieurs (une insuffisance de CaO est compensée par Al_2O_3).
- La teneur en oxydes de titane, de protoxyde et de manganèse doit être limitée.
- La teneur en (Fe_2O_3) est insignifiante, n'ayant pas d'effet considérable sur la qualité du laitier. Une faible quantité des sulfures de calcium allant jusqu'à 7 % accroît quelque peu l'activité du laitier. Plusieurs formules sont développées, afin d'obtenir une composition favorable du laitier, à partir des essais effectués sur les mélanges du laitier granulé.

III-4-2 Composition minéralogique :

La composition minéralogique du laitier a été calculée à partir des principaux oxydes (CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2) par analyse chimique. Les phases cristallisées susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la mélilite qui est une solution solide de la gehlinité (C_2AS) et de l'akermanite (C_2MS_2), la pseudowollastonite (CS), la rankinite (C_3S_2), la merwinite (C_3MS_2), le silicate bicalcique (C_2S), le diopside (CMS_2), la montcellien (CMS) et la forstérite (MS_2). Les résultats des calculs chimiques conduisent à conclure que les laitiers de haut fourneau utilisés en cimenterie sont potentiellement constitués de (C_3S_2 , C_2AS et C_2MS_2) pour 95 % et de (CS ou C_3MS_2 ou C_2S) pour 5 %.

III-4-3 Caractéristiques physiques du laitier des hauts fourneaux :

- La finesse :

L'augmentation de la finesse de mouture contribue à l'augmentation de la consistance de la pâte de ciment avec ou sans ajout. La surface de mouillage du liant augmente au fur et à mesure que le ciment est broyé plus finement, donc elle ralentit le temps de prise. La réaction pouzzolanique réagit avec la portlandite pour former des gels supplémentaires de C-S-H.

- Masse volumique :

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

III-5 Propriétés du laitier des hauts fourneaux ;

- La chaleur d'hydratation :

Durant l'hydratation du ciment au laitier, le dégagement de chaleur est relativement faible ($T=25^\circ\text{C}$), cette chaleur varie selon les ciments au laitiers de 190-260J/g (venuat, 1989), ce qui protège le béton jeune de l'apparition des fissures thermiques. La quantité de chaleur dégagée renseigne sur la vitesse et le degré d'hydratation.

- **La porosité :**

Dans la pâte de ciment durcie, un grand volume de pores est inerte dans la structure. La porosité dérive de la présence d'une quantité d'eau, l'espace restant occupé par l'eau dans la pâte de ciment devient des pores dans la pâte durcie. On peut citer :

- Pores capillaires qui dépendent du rapport E/C et du degré de l'hydratation.
- Pores de gel (produits de l'hydratation). (Mellas, 2003).

L'augmentation de la teneur en laitier a un double effet :

- Augmentation de la teneur d'eau pour avoir une consistance normale.
- Retardement du temps de prise.
- Le temps de début et fin de prise.

L'ajout du laitier qui s'explique du fait que la réaction chimique est retardée à court terme ce qui veut dire que l'hydratation sera plus lente, par contre les C-S-H (élément responsable du durcissement de la pâte existent en faible quantité aux jeunes âges).

III-6 Hydratation du laitier des hauts fourneaux :

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

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

La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie (jusqu'à 15%), mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse. Les calculs d'indices de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides. Pour une bonne activité hydraulique, l'indice de basicité CaO/SiO_2 doit être proche de 1,3.

Granulométriquement, plus le laitier est fin, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées. En effet la surface de contact entre les phases vitreuses du laitier, l'agent activateur et l'eau se trouve augmentée. Un des critères les plus importants reste la connaissance de la minéralogie du laitier. En effet, la détermination du taux de vitrification est très importante car sa structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin. L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides. Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent.

L'hydraulicité du laitier dépend donc de sa teneur en verre ainsi que de sa structure. De nos jours, la teneur en verre des laitiers de haut fourneau utilisés comme constituants des

ciments dépasse largement 90% de la masse initiale, mais on pense que de faibles proportions de matériaux cristallins peuvent avoir un effet bénéfique sur l'hydraulicité.

D'autres facteurs influent sur l'activité d'un laitier de haut fourneau et sur son hydratation. On peut citer la concentration en ions alcalins dans le milieu et la température durant les premières phases du processus d'hydratation.

❖ **Processus d'hydratation :**

Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour développer une cinétique d'hydratation satisfaisant l'objectif recherché (performances conformes aux ciments [NF EN 197-1, 2001]), d'un agent d'addition appelé activant. Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier.

Le processus d'hydratation peut être vu comme une répétition de cycles dissolution – concentration – précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à hydratation maximum des grains de laitier (quand les grains de laitier ne sont plus accessibles par la solution alcalinisée). Cette hydratation est responsable de la prise et le durcissement du laitier vitrifié. L'hydratation débute par la dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution, qualifiée d'hydroxylique par Van Rompaey aboutit à une solution basique concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés. La dissolution n'est possible que lorsque le pH du milieu dépasse une valeur de l'ordre de 1β , pH fixé par l'équilibre de dissolution – précipitation de l'hydroxyde de calcium (pH = 12,5 – 12,6). Cette précipitation fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. Les cristaux formés peuvent apparaître sur les grains de laitier ou sur les granulats. Il y a dans un premier temps une augmentation du frottement interne du squelette, puis formation de ponts cristallins qui se rejoignent en formant un maillage qui entoure les granulats, constituant un ensemble cohérent. La fixation du maillage sur les granulats, qui dépend de leur état de surface, est facilitée sur les surfaces rugueuses et anfractueuses (pourvues de cavités profondes et sinueuses). Ensuite, la précipitation des hydrates formés et leur arrangement cristallin conduisent à un développement des résistances mécaniques dans le temps, au fur et à mesure que se poursuit le phénomène. Les grains de laitiers étant plus lisses que les grains de clinker, les hydrates ont plus de mal à se développer sur ces grains et le développement des résistances mécaniques se trouve plus lent pour des ciments au laitier par rapport à des ciments Portland.

Il est important de prendre en compte l'activateur dans la réaction d'hydratation. En effet, la quantité et le choix de l'activant influent sur le gain de résistance et la nature des hydrates formés. Van Rompaey prétend que les réactions d'hydratation du laitier de haut fourneau forment des silicates de calcium hydratés ($C_xS_yH_z$), des aluminates de calcium hydratés (C_4AH_{13}) ainsi que des sulfo-aluminates de calcium hydratés ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$) et de l'ettringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H$).

III-7 Avantages du laitier des hauts fourneaux :

Domaines d'application et performances du laitier vitrifié :

Le laitier vitrifié, qui est de moins en moins employé comme sable dans la construction, estlargement utilisé dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice.

Il est principalement utilisé dans la production de ciment, en remplacement du clinker, dans les catégories CEM II et CEM III (jusqu'à 95 %) destinées notamment à la réalisation de bétons en milieux agressifs.

- En milieu alcalin ou maritime, la présence de laitier dans le béton favorise la résistance à l'alcali-réaction et protège les armatures. En outre, du point de vue environnemental, le remplacement du clinker par du laitier vitrifié réduit les émissions de gaz à effet de serre.
- Il sert également à la production de graves hydrauliques pour les routes. Il peut s'agir d'une utilisation directe (on parle alors de graves-laitier ou de graves-laitier pré-broyé, selon que le laitier vitrifié y est employé tel quel ou après un pré-broyage sommaire augmentant sa réactivité) ou en tant que constituant principal de liants hydrauliques routiers.
- Il peut aussi remplacer partiellement le ciment pour la réalisation du béton, en tant qu'addition sous forme moulue.
- Il contribue au traitement de surface des métaux où, utilisé comme grenaille, il remplace le sable naturel tout en procurant un avantage sanitaire grâce à l'absence de silice libre.
- Une résistance mécanique plus élevée à long terme.
- Une plus grande durabilité.
- Une faible perméabilité associée à une faible chaleur d'hydratation.
- Une résistance au feu plus élevée.

Chapitre II : Matériels et méthodes expérimentales

I Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation du matériel et de la méthodologie employée pour la préparation des éprouvettes, et la caractérisation des matériaux et des mortiers fabriqués.

Il a été choisi de réaliser des mortiers, car ils permettent de mettre en évidence l'influence des paramètres d'études sur la porosité à partir d'échantillons de taille réduite, tout en ayant un comportement proche de celui des bétons par rapport à l'influence des granulats sur la porosité capillaire.

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un mortier joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures.

II Essai sur mortier normal :

- **Définition du mortier normal :**

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme **EN 196-1**.

- **Préparation des matériaux:**

- **Le ciment:**

Le ciment utilisé est de type **CEM I 42.5** du groupe BISKRIA, conservé à l'abri de l'humidité.

- **Le sable:**

Dans ce travail, on a utilisé un sable normalisé, préparé dans les laboratoires de la faculté de génie civil (labo 11) selon la norme **EN 196-1**. La composition granulométrique du sable normalisé est faite selon le (Tableau **II.1**)

Tableau **II.1**: Fractions nécessaires pour un sable normalisé par tamis

<i>Ouvertures de tamis</i>	<i>Refus cumulés (%)</i>
0.08	99 ±1
0.16	87 ±5
0.5	67 ±5
1	33 ±5
1.6	7 ±5
2	0



- **Matériel utilisé:**

- *Un jeu de tamis de : 0.08 - 0.16 - 0.5 – 1 - 1.6 – 2*
- *Une balance*
- *Des bacs*

- **Eau degâchage :**

L'eau utilisée est celle du robinet à température ambiante.

- **Le métakaolin:**

Notre kaolin provient de la carrière de Tamazert dans la wilaya de Jijel. Il a tout d'abord été traité , par criblage pour éliminer toutes les impuretés pour obtenir un maximum de kaolinite. Selon les procédés de la méthodes de Monsieur ABDELLI [ABDELLI. K 2017] , le kaolin subit une calcination durant trois heures , dans un four à moufle préchauffé à 850 °C

➤ **Le laitier de hautsfourneaux :**

Le laitier que on a utilisé est le laitier granulé de haut fourneau d'El-Hadjar (Complexe Sidérurgie El-Hadjar) est obtenu par refroidissement par un jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de sable de couleur grise claire, de granulométrie de 0 à 5 mm [1].

Le laitier à était finement broyé pendant 3 heures dans un broyeur à boulet dans l'université de Boumerdès-faculté des sciences.

Le laitier broyé est ensuivi tamiser dans une série de tamis qui se conclue par une ouverture de 56 μ m afin d'avoir une grande finesse.



(b)

Figure II.1: Présentation d'un broyeur à boulet, (a) broyeur à boulets, (b) boulets en acier



(b)

Figure II.2 : procédure du broyage du laitier,

(a) laitier dans le broyeur

(b) laitier finement broyé

➤ **Formulation des mortiers:**

Nous avons pour cette étude préparée 3 formulations (F1, F2, F3) de mortier. La première est la formule témoin à 100% de ciment, les deux autres sont le mélange du ciment avec les ajouts. Le pourcentage des ajouts a été choisi en fonction des optimums de performance des ajouts déduit des études déjà faite [2] .

Tableau II.2: pourcentage du ciment et des ajouts dans les formulations des mortiers

<i>F1</i>		<i>F2</i>	<i>F3</i>
<i>Ciment</i>	100%	60%	80%
<i>Laitier</i>	0	40%	0
<i>métakaolin</i>	0	0	20%

➤ **Quantité de matériauxnécessaire :**

Selon la norme **EN 196-1**, le mélange du mortier normal se constitue de :

- Une part de ciment ;
- Trois parts de sable normalisé ;
- L'eau avec un rapport E/C = 0.5.
- L'essai de résistance mécanique à la compression se fait sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16cm), pour chaque formulation on a préparé trois éprouvettes.
- Une gâchée pour trois éprouvettes d'essai doit comporter :
 - 3x (225 g ± 1 g) d'eau ;
 - 3x (450 g ± 2 g) de ciment ;
 - 3x (1 350 g ± 5) g de sable.

Tableau II.3: quantité de matériaux nécessaire pour l'essai de résistance mécanique

<i>formulation</i>	<i>Dosage des mortiers</i>			
	Ciment (kg)	Ajouts (kg)	Eau (kg)	Sable (kg)
<i>F1</i>	1.35	0	0.675	4.05
<i>F2</i>	0.81	0.54	0.675	4.05
<i>F3</i>	1.08	0.27	0.675	4.05

L'essai de perméabilité au gaz se fait sur des éprouvettes cylindriques creuses (16x16cm)-(8.5x16cm).

Tableau II.4: quantité de matériaux nécessaire pour l’essai de perméabilité au gaz

formulation	Dosage des mortiers			
	Ciment (kg)	Ajouts (kg)	Eau (kg)	Sable (kg)
F1	2.15	0	1.075	5.6
F2	1.29	0.86	1.075	5.6
F3	1.72	0.43	1.075	5.6

L’essai de migration des ions chlorure se fait sur des éprouvettes cylindriques (10x10cm).

Tableau II.5: quantité de matériaux nécessaire pour l’essai de migration des ions chlorure

Formulation	Dosage des mortiers			
	Ciment (kg)	Ajouts (kg)	Eau (kg)	Sable (kg)
F1	0.61	0	0.305	1.592
F2	0.366	0.244	0.305	1.592
F3	0.488	0.122	0.305	1.592

➤ **Matériel nécessaire pour le gâchage du mortier:**

- Un chronomètre ;
- Des moules prismatiques (4x4x16 cm) ;
- Des moules cylindriques (16x16 cm) ;
- Des moules cylindriques (10x10 cm) ;
- Des tubes en carton pour crée le vide des éprouvettes cylindriques creuses ;
- Un malaxeur à deux vitesses : lente et rapide ;
- Une raclette ;
- Table à choc.



(a)



(b)

Figure II.3: matérielle utilisé pour le gâchage, (a) Malaxeur à deux vitesses, (b) Table à choc

➤ **Mode opératoire:**

Selon la norme **EN 196-1**, le mode opératoire du gâchage du mortier normal est le suivant :

- Introduire l'eau dans la cuve du malaxeur
- Introduire le liant, et mettre le malaxeur en marche à vitesse lente aussitôt que possible
- Après 30s de malaxage, introduire le sable régulièrement pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires
- Arrêter le malaxage pendant 1min 30s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci
- Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60s.

➤ **Préparation et réalisation des éprouvettes:**

- Nettoyer bien les moules des résidus d'ancienne utilisation ;
- Assembler bien les moules et s'assurer de leur serrage et stabilité ;
- Lubrifier les moules avant la réalisation du mortier [3], et bien les fixées à la table à choque ;
- Remplir avec précaution les compartiments des moules à moitié et les saisir verticalement pour un bon étalage ;
- Démarrer ensuite l'appareil de choc pour 60 coups ;
- Introduire la deuxième couche, démarrer l'appareil pour 60 autres coups puis araser l'excédent de mortier en laissant la surface lisse ;
- Etiqueter les moules pour leur identification puis couvrir pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage se fait après 24h [3].

➤ **Conservation et démoulage des éprouvettes:**

L'essai conventionnel suivant la norme **NF EN 12390-2** prévoit une conservation de l'éprouvette pendant 16 heures minimum et 3 jours maximum à une température de 20 °C

+/- 5 °C. Le démoulage des éprouvettes doit être effectué avec soin pour ne pas épauffer les arêtes. Pour faciliter le démoulage, il est d'usage d'appliquer un léger film d'huile sur le moule. Il est à signaler qu'un huilage trop important conduit à une régularité d'aspect des extrémités de l'éprouvette et à des résistances à l'écrasement minorées [3].

Les conditions de conservations normalisées suivant la norme NF EN 12390-2 sont [3] :

- Soit dans l'eau à température de 20 °C ± 2 °C ;
- Soit dans une chambre humide à 20 °C ± 2 °C et d'humidité relative au moins égale à 95 %.

Nos éprouvettes ont été conservées dans des bacs d'eau saturés en portlandite.

III Résistance mécanique à la compression :

L'activité des ajouts dans la formulation de systèmes cimentaires peut être évaluée grâce à des essais de résistance mécanique sur mortier [6]. Les mesures de la résistance en compression de mortiers ont été effectuées à partir de la norme **EN 196-1**.

➤ Âge des éprouvettes pour les essais de résistance mécanique:

Compter l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment avec l'eau, jusqu'au début de l'essai. Les essais de résistance se font à différents âges dans les limites suivantes :

- 72h ± 45 min ;
- 14 jours ± 2 h ;
- 28 jours ± 8 h.

➤ Matériel utilisé:

- Presse à béton
- Dispositif de compression pour moule 4x4x16 cm³.

➤ Déroulement de l'essai:

Pour chaque formulation et Age de l'essai nous avons préparé un moule contenant 3 éprouvettes (4x4x16 cm), chaque éprouvette est cassée en deux au milieu à l'aide d'un marteau, ce qui nous donne un totale de six valeurs d'essai pour chaque formulation à un Age précis.



Figure II.4: exemple d'éprouvette de laitier cassée en deux

L'appareille utiliser est de marque Controlab (machine de compression footmètre 2000 kN), avec un dispositif d'essai de compression complètent la machine suivant la norme **EN 196-1**.



(b)

Figure II.5: matériels utilisés pour essai de la résistance mécanique à la compression, (a) presse à béton, (b) dispositif de compression

L'éprouvette est introduite dans le dispositif de compression tout en s'assurons que la face arasée n'est pas en contact avec le plateau supérieur et inférieur du dispositif. Aussi, il fait bien caler l'éprouvette avec les trois boulons du dispositif.

Lancer l'essai après réglage de la machine et prendre les résultats tout en s'assurons de la rupture de l'éprouvette à travers sa fissuration.



Figure II.6: éprouvette fissuré placé dans le dispositif de l'essai de compression

IV Essai de maniabilité :

La mesure de maniabilité des bétons et des mortiers, est définie comme le temps d'écoulement dans un couloir vibrant sous l'action d'une vibration donnée.

Cette essai permet d'apprécier la facilité de mise en place dans les ouvrages et, de ce fait :

- Déterminer les quantités d'eau nécessaires
- D'affiner les compositions de bétons en recherchant la maniabilité maximale pour des teneurs en eau et en ciment données
- D'évaluer l'efficacité de certains adjuvants, plastifiants réducteurs d'eau en particulier
- De vérifier si l'on a respecté la valeur limite définie pour le béton lors de l'étude est bien respectée.

➤ **Principe:**

On mesure le temps d'écoulement d'un béton ou d'un mortier, entre deux étapes bien définies d'un processus de mise en œuvre. Cette mise en œuvre consiste en une succession d'opérations élémentaires de trois sortes : malaxage, transport, mise en place. Si l'essai proprement dit est la mesure d'un temps d'écoulement dans des conditions données, il est cependant nécessaire de préciser l'ensemble des opérations qui précèdent cette mesure. Le passage d'une étape du processus de mise en œuvre à l'autre s'effectue dans le maniabilimètre. La première étape se termine à la fin de la mise en place du béton ou du mortier dans l'appareil, la seconde lorsque, après s'être écoulé sous l'action d'une vibration de caractéristiques fixes, le béton, ou le mortier, atteint un repère géométrique.

➤ **Matériel utilisé :**

- Maniabilimètre
- Cloison amovible
- Tige de piquage
- Vibreur
- Equipement électronique
- Malaxeur
- Chronomètre



(b)



(c)



(d)

Figure II.7: composant de mniabilimètre (a) Mniabilimète, (b) cloison amovible ,
(c) Tige de piquage ,(d) boitier de commande



Figure II.8: Malaxeur de mortier

➤ **Déroulement de l'essai:**

Introduire le mortier dans le grand compartiment du maniabilimètre, délimité par la cloison amovible ;

Mise en place du mortier en quatre couches par piquage (tenir la tige de piquage parallèlement à la paroi inclinée de la cloison amovible, et piquer six coups pour chaque couche) ;

Retirer la cloison quatre minutes après la fin du malaxage, ce qui provoque le déclenchement du vibreur ;

Lancement du chronomètre avec le début de la vibration jusqu'à ce que le mortier atteigne le trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

V Perméabilité au gaz :

La perméabilité aux gaz est une propriété de transfert qui est fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité du béton. Ainsi, la mesure de la perméabilité à l'oxygène est une mesure fiable, relativement simple et utilisable pour le classement des bétons ou encore pour une évaluation de leur durabilité potentielle. De ce point de vue, elle peut constituer un bon indicateur de durabilité [15].

● **Principe de l'essai:**

L'essai consiste à soumettre un corps d'épreuve cylindrique à un gradient de pression constant. La perméabilité est déterminée à partir de la mesure du flux en régime permanent. La formule simplifiée pour calculer le coefficient de perméabilité K_a à l'oxygène est la

suivante:

$$K = \frac{128.6(R_2 - R_1)Q}{h(R_2 + R_1)\Delta P} \cdot 10^{-16}$$

Avec :

$\Delta P = P_2 - P_1$ en barsh en cm , R en cm

.

V

$Q = \frac{V}{T^{moy}}$ en $cm^3 s^{-1}$

Matériel utilisé:

Permeamètre à charge constante [16] composé de :

Trois cellules permettant de mesurer la perméabilité d'une éprouvette de 16cm, 11 cm et 10cm.

Dispositif comprenant une bouteille d'oxygène munie d'un détendeur et d'un régulateur pouvant maintenir le niveau de pression.

- Liquide savonneux.
- Trois débitmètres à bulles de volumes respectifs 20ml, 10ml et 5ml.
- Un chronomètre ;
- Un pied à coulisse avec une précision de mesure de 0.1mm.



Figure II.9: matériels utilisé pour l'essai perméabilité à gaz.

- **Préparation des éprouvette:**

Nous avons préparé trois éprouvettes cylindriques creuses avec des dimensions de 16 cm de diamètre et 10 cm de hauteur, une pour chaque formulation. La conservation initiale était faite avec une feuille de plastique en polyane recouvrant les moules pour éviter l'évaporation de l'eau pendant 24h.

Après le démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans un bassin d'eau à température ambiante de 20 °C pendant 21 jours. On a ensuite procédé à un séchage des éprouvettes

pendant 15 jours. La procédure consiste à mesurer la différence de masse d'un échantillon jusqu'à stabilisation (1%).

Le déroulement du séchage est le suivant :

Tableau II.6: poids des éprouvettes pendant le séchage

	F1 (g)	LT (g)	VB (g)
1j (40°C)	4823.6	4730.5	4701.8
2j (40°C)	3143.7 (30%)	3083.1 (35%)	3065.6 (34%)
3j (40°C)	3132.8 (0.35%)	3071.9 (0.17%)	3055.6 (0.33%)
4j (40°C)	3124.3 (0.27%)	3063.7 (0.27%)	3048.3 (0.24%)
6j (60°C)	3055.7 (2.2%)	2999.8 (2.09%)	2994.9 (1.75%)
7j (60°C)	3046.4 (0.3%)	2990.3 (0.32%)	2987.7 (0.24%)
8j (60°C)	3037.9 (0.28%)	2982.1 (0.27%)	2981 (0.22%)
9j (60°C)	3022.3 (0.51%)	2965 (0.57%)	2968.4 (0.42%)
11j (80°C)	2973.2 (1.08%)	2916.6 (1.11%)	2924.5 (1.1%)
14j (80°C)	2944.9 (0.95%)	2874.6 (1.44%)	2884.3 (1.37%)
15j (80°C)	2940.6 (0.14%)	2864.3 (0.35%)	2872.6 (0.4%)

Mise en route de l'essai :

- Mettre l'éprouvette dans la cellule et plaquer l'ensemble au fond du couvercle inférieur. Le creux de l'éprouvette doit être contre l'orifice d'entrée du gaz ;
- Raccorder la cellule au régulateur de pression par la face inférieure et la cellule au débitmètre par la face latérale ;
 - Libérer le bouton de réglage du régulateur en le tournant vers la gauche ;
- Ouvrir un des robinets des quatre colonnes de mesure du débitmètre afin d'éviter une surpression puis ouvrir la bouteille d'oxygène ;
- Tourner le bouton du régulateur vers la droite de façon à obtenir la pression relative d'essai souhaitée puis lire le résultat sur le nanomètre de précision de pression.

Mode opératoire:

- Après une demi-heure de stabilisation, sélectionner la colonne qui permet d'obtenir un temps de passe de bulle compris entre 20 et 60 secondes ;
 - Mouiller l'intérieur de la colonne choisie à l'aide de la solution savonneuse ;
- Ouvrir le robinet de la colonne choisie et refermer celui de la colonne restée ouvert pendant l'heure précédant la mesure ;

- Faire monter le niveau de la solution en appliquant une pression légère sur la poire jusqu'à l'apparition d'une bulle
- Mesurer le temps que met la bulle de savon à traverser le volume gradué de la colonne à l'aide du chronomètre ;

□ Arrêt de l'essai:

Après les mesures faites, il faut fermer la vanne d'alimentation de la bouteille d'oxygène et libérer le bouton de régulation vers la gauche. Ensuite, il faut débrancher le flexible d'alimentation de la cellule pour sortir l'éprouvette qui se trouve dans celle-ci.

VI Résistance à la pénétration des ions chlorures :

Les ions chlorures provenant de l'eau de mer pénètrent dans le béton par diffusion ou par absorption capillaire sous l'effet de différents phénomènes. Au cours du temps, ces chlorures diffusent dans la solution interstitielle du béton, atteignent les armatures. Dans toutes ces problématiques, les mécanismes de transport des agents agressifs doivent être étudiés [11].

□ Principe de l'essai:

Cette méthode consiste à mesurer la quantité du courant électrique qui passe à travers une éprouvette cylindrique de 11cm de diamètre, et de 5cm d'épaisseur, durant une période de 6 heures. Une différence de potentiel de 60 V est maintenue à travers les extrémités de l'éprouvette, une qui est immergée dans une solution de chlorure de sodium, et l'autre dans une solution d'hydroxyde de sodium. La charge totale passée (en Coulombs), et en relation avec la résistance de l'éprouvette à la pénétration des ions chlorures[17].

La charge passée à travers l'éprouvette (Q) est l'intégrale du graphique représentant le courant passé pendant 6h. La formule de calcul simplifiée est la suivante :

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (15)$$

La formule simplifiée de Q peut être appliquée dans le cas d'enregistrement des valeurs du courant avec un intervalle de 30min avec :

Q: la charge passée (en coulombs) à travers une éprouvette de 95mm de diamètre

□ Matériel utilisé:

- Scellant pour cellules d'échantillon (par exemple la silicone) capable d'isoler le dispositif de toute fuite de n'importe quel liquide (l'eau, le chlorure de sodium, et l'hydroxyde de sodium) ;
 - Une solution de chlorure de sodium de dosage de 3% de la masse de l'eau distillé ;
 - Une solution d'hydroxyde de sodium de dosage de 0.3 N ;
 - Papiers filtres ;
- Cellule de tension appliquée : deux chambres symétrique contenant des treillis électriquement conducteurs et des connecteurs externes ;
 - Multimètre ;
 - Alimentation à tension constante ;
 - Câble conducteur ;
 - Minuteur.



Figure II.10: Essai de la résistance à la pénétration des ions chlorures

□ Préparation des éprouvettes:

Nous avons préparés trois éprouvettes cylindriques de 11 centimètre de diamètre et 5 cm de hauteur. Chaque éprouvette représente une formulation du mortier normal.

Les éprouvettes après démoulage, on était conservé dans des bacs d'eau à température ambiante de 20 °C pendant 21 jours. Le pourtour des éprouvettes est ensuite recouvert d'une peinture d'étanchéité.

Mise en route de l'essai :

- Préparation des solutions de NaCl et NaOH dans les dosages suivants :
- Mettre abondamment de la silicone sur les parois intérieures des cellules de tension et laissai sécher le temps nécessaire selon le type de silicone (pour notre cas le temps d'attente est de 15 min) ;
 - Placer l'éprouvette dans le dispositif et bien serré ;
- Mettre de la silicone sur les parois extérieures de l'éprouvette en contact avec les cellules et laissai séché ;
 - Remplir les cellules avec les solutions de NaCl et NaOH ;
 - Brancher les cellules à l'alimentation et le multimètre avec des câbles conducteurs.

Mode opératoire:

- Pour lancer l'essai allumer l'alimentation qui est réglée sur une différence de potentiel de 60 V ;
- Régler le calibre du multimètre de façon à pouvoir lire avec exactitude la quantité du courant électrique passant par l'éprouvette ;
 - Noter la valeur du courant électrique chaque demi-heure.

Arrêt de l'essai:

L'essai s'arrete après 6 heures de prise de résultat.

Evaluation des résultats:

Selon la norme spécifique à l'essai, l'évaluation des résultats calculés de la charge totale passée est donnée par rapport une éprouvette de 95mm de diamètre, ce qui nous pousse à corriger la charge calculée en cas de diamètre différent. En peut en déduire donc la perméabilité aux ions chlorures avec le tableau suivant [17] :

Tableau II.7:perméabilité aux ions chlorures selon la charge passée

Charge passée (coulombs)	Pénétration des ions chlorures
>4000	Elevée
2000-4000	Modérée
1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
<100	Négligeable

❖ Chapitre 3 :

Résultats et discussion

I Introduction :

Dans ce chapitre on présente les résultats des essais effectués dans laboratoires des matériaux de construction de la faculté de génie civil USTHB sur nos mortiers contenant les différents ajouts, Cela nous permet d'avoir une vision claire sur les caractéristiques et le comportement des matériaux choisis et ce qu'apportent comme améliorations

II Essai de maniabilité :

Les essais de maniabilité effectuée nous donnent les résultats suivants :

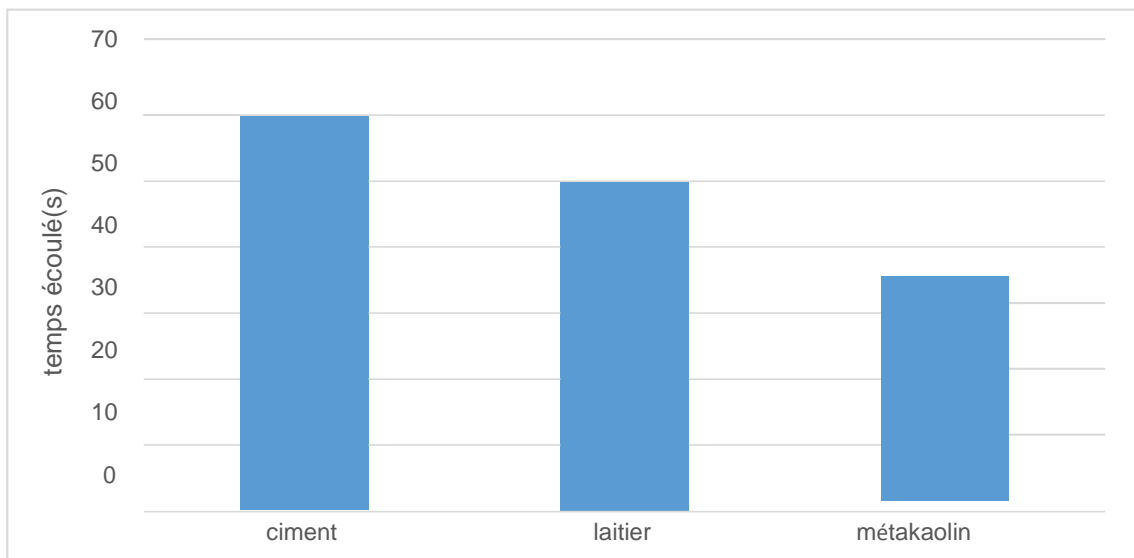


Figure III.1: résultats de l'essai de maniabilité

□ Commentaire

Le temps d'écoulement du mortier témoin est le plus grand (60s). Le temps d'écoulement du mortier à base de laitier est égal à 49s.

Le temps d'écoulement le plus petit est celui du mortier à base de poudre de verre (34s).

□ Discussion des résultats :

Le mortier à base de poudre de verre présente la plus grande aptitude à être mis en œuvre D'où sa lente hydratation à cause de sa réaction pouzolanique, contrairement au mortier témoin.

L'effet du laitier sur le mortier est le même que celui de la poudre de verre, il nous donne

aussi une maniabilité supérieure à celle du mortier témoin.

III Résistance mécanique :

Le tableau ci-dessous, nous donne les résultats des résistances à la compression des mortiers à 3, 7 et 28 jours. Les valeurs obtenues représentent la moyenne de trois éprouvettes découpées en deux chaque une testés pour chaque formulation.

Tableau **III.1**: La résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours des mortiers étudiés.

Résistance à la compression (MPa)			
	3J	7J	28j
Ciment	28	36	40
Laitier	19	33	39
métakaolin	26	30	36

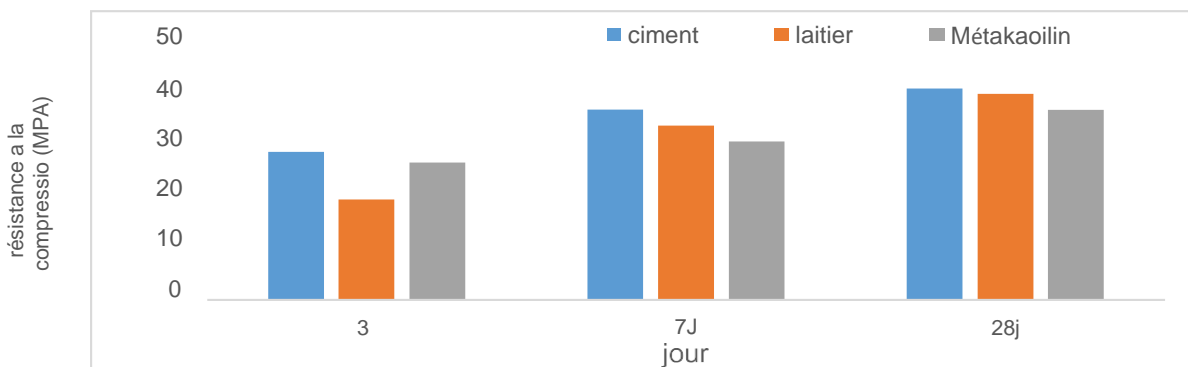


Figure **III.2**: La résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours des mortiers étudiés.

□ [Commentaire](#)

A 3j:

La résistance mécanique en compression du mortier de référence est supérieure aux autres mortiers étudiés.

Le mortier à base de laitier des hauts fourneaux a présenté la plus faible résistance à la compression parmi les autres mortiers (diminution de 31% par rapport au témoin)

La résistance mécanique en compression du mortier à base de la métakaolin est légèrement inférieure à celle de témoin 6,6%

A 7j :

La résistance mécanique en compression du mortier de référence est supérieure aux autres mortiers étudiés.

La résistance mécanique en compression du mortier à base de laitier des hauts fourneaux dépasse celle de mortier à base de PV elle est inférieure à celle de témoin de 8%

La résistance mécanique en compression du mortier à base de la métakaolin est inférieure à celle de témoin de 0,4%

A 28j :

La résistance mécanique en compression du mortier de référence reste toujours supérieure aux autres mortiers étudiés.

La résistance mécanique en compression du mortier à base de laitier des hauts fourneaux est légèrement inférieure à celle de témoin 3%

La résistance mécanique en compression du mortier à base de la métakaolin est la plus faible par rapport à tous les mortiers étudiés (11% inférieure par rapport au témoin)

□ [Discussion des résultats :](#)

❖ Influence du laitier des hauts fourneaux :

Le mortier à base de laitier des hauts fourneaux (LT) nous donne une faible résistance à la compression à jeune âge, à 3 jours on a une diminution de 31% par rapport au témoin. Cette diminution peut se traduire par le manque de portlandite dans ce mortier à cause de la substitution de 40% du ciment par le laitier. La résistance augmente d'une façon importante au cours du temps. A 28 jours on remarque que la résistance de mortier LT a presque atteint la résistance du témoin. Ce comportement de l'ajout LT est dû à sa nature pouzolanique caractérisé par une réaction d'hydratation lente et son grand pourcentage d'incorporation dans le mortier. En conséquence, la résistance augmente lentement.

❖ Influence de métakaolin :

On remarque bien que la résistance du mortier témoin est supérieure à celle de mortier PV. Cela s'explique la lente réaction du mortier substitué par 20%.

IV Perméabilité au gaz :

Tableau III.2: temps mesuré que met la bulle a traversés le débitmètre

formulation	T1 (s)	T2 (s)	T3 (s)	T_{moy} (s)
F1	23,76	22,52	21,7	22,66
LT	3,49	3,62	3,61	3,57
M K	1,97	1,97	2,03	1,99

Tableau III.3 : les résultats de la perméabilité (Ka) pour les différentes éprouvettes étudiées

Formulation	h	R_1	R_2	T_m	V	Δp (bar)	K_a (m^2)	Q ($cm^3 s^{-1}$)
F1	10	4,25	7,83	22,66	100	63	4,41	$2,67 \cdot 10^{-17}$
LT	10	4,25	7,95	3,57	100	63	27,99	$1,73 \cdot 10^{-16}$
M K	9,6	4,25	8	1,99	100	63	50,25	$3,27 \cdot 10^{-16}$

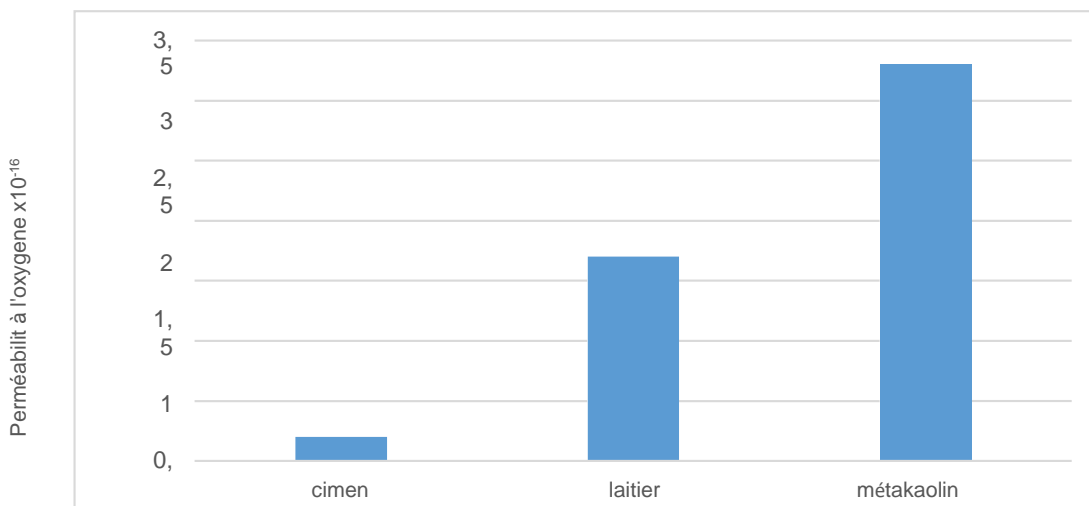


Figure III.3: les résultats de la perméabilité (Ka)

➤ Discussion des résultats :

Pour le mortier témoin on voit que sa perméabilité est très faible par rapport aux autres mortiers étudiés.

Concernant Le mortier à base de laitier de haut fourneau on trouve qu'il est moins perméable que le mortier à base de PV et plus perméable que le mortier témoin.

V Résistance à la pénétration des ions chlorure :

Tableau III.4 : les valeurs du courant électrique

	F1 (mA)	LT (mA)	MK (mA)
T0	133.5	106.8	46.2
T30	194.1	128.2	51.1
T60	200	136.7	54.8
T90	300	145.9	57.1
T120	300	152.4	59.8
T150	300	166.6	62.2
T180	300	174.7	64.3
T210	500	178.8	66.5
T240	500	182.6	68.1
T270	500	187.8	70.2
T300	500	192.6	71.5
T330	600	199.1	73.4
T360	600	200	74.1

Tableau III.5 : valeur de la charge passée

FORMULATION	Qs (coulomb)
Ciment	6123
Laitier de haut Fournaux	2684
Métakaolin	1006

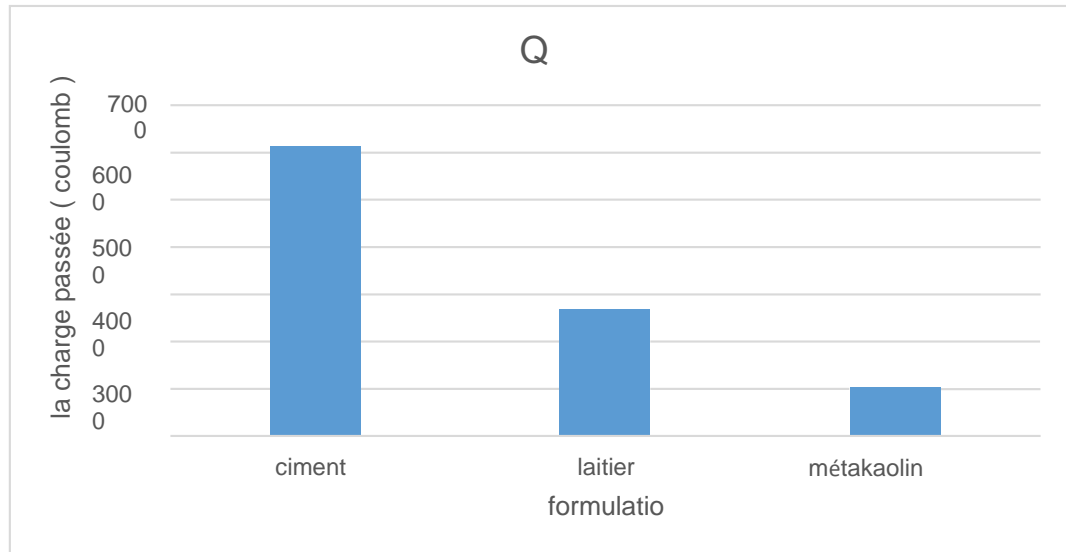


Figure III.4: charge passé à travers les différentes éprouvettes

➤ **Commentaire :**

On remarque que la conductivité du mortier de référence est beaucoup plus élevée par rapport aux autres formulations.

Le mortier à base de laitier de haut fourneau diminue la conductivité de 56%

Le mortier à base de la poudre de métakaolin diminue la conductivité de 84% par rapport au mortier de référence.

Du tableau de la perméabilité aux ions chlorures selon la charge passée on déduit que la perméabilité de mortier de référence est de catégorie élevé.

Et celle de mortier à base de MK est classés catégorie faible, pour le mortier à base de laitier sa perméabilité est classé de catégorie moyenne.

➤ **Discussion des résultats :**

❖ **Influence de la métakaolin :**

Pour l'essai de résistance à la pénétration des ions chlorure on observe un faible passage de la charge à travers l'éprouvette. Cela est dû à la bonne résistance de la métakaolin à la pénétration de substances agressives.

❖ **Influence du laitier des hauts fourneaux :**

D'après la valeur moyenne de passage de la charge, on déduit que sa perméabilité aux ions chlorure est modéré. Le laitier de haut fourneau forme un barrage contre la pénétration des ions chlorures.

❖ Conclusion générale

L'utilisation du laitier de haut fourneau et de la métakaolin, en substitution partielle du ciment dans la confection du mortier et béton, a donné des résultats encourageant en ce qui concerne les paramètres mécaniques et de durabilité par rapport à un mortier contenant 100% de ciment.

Les résultats de résistance mécanique des mortiers à base d'ajouts ont été très proches des résultats du mortier témoin. Quant aux essais de durabilité, les ajouts ont montré une bonne résistance aux attaques chimiques par rapport au témoin.

Les résultats de cette étude s'accordent avec ceux d'autres études, ce qui nous a permis de montrer le bon comportement des ajouts dans la matrice cimentaire. En plus de leur effet pouzolanique, les ajouts présentent un faible coût de production, notamment le laitier, et une amélioration au niveau écologique en comparaison avec le ciment, d'où la seule étape polluante de leur production qui est le transport.

Nous concluons ainsi que le gain économique et écologique peut être assuré par la substitution partielle du ciment dans la confection des bétons et mortiers.

❖ Liste des figures

• Figure I.1 : Processus de l'extraction et de la préparation de la matière première.	4
• Figure I.2 : Processus de la cuisson du cru.	5
• Figure I.3 : Processus de broyage du clinker.	5
• Figure I.4 : Liste des ciments courants normalisés.	7
• Figure I.5 : Exemples des désignations des ciments.	9
• Figure I.6 : Courbe typique de calorimètre isotherme d'un ciment.	15
• Figure I.7 : Hydratation superficielle instantanée des particules.	16
• Figure I.8 : Période d'induction des silicates.	16
• Figure I.9 : Fin de la période dormante et précipitation de la portlandite.	17
• Figure I.10 : Epuisement des sulfates et conversion de l'ettringite en monosulfoaluminate.	17
• Figure I.11 : Cinétique globale de l'hydratation.	18
• Figure I.12 : (a) le kaolin, (b) le métakaolin et (c) le métakaolin broyé.	19
• Figure I.13 : Processus de calcination flash du kaolin.	21
• Figure I.14 : Laitier cristallisé et vitrifié.	27
• Figure I.15 : Schéma représentatif du principe d'un haut fourneau.	29
• Figure II.1: Présentation d'un broyeur à boulet, (a) broyeur à boulets, (b) boulets en acier.	36
• Figure II.2 : procédure du broyage du laitier, (a) laitier dans le broyeur (b) laitier finement broyé .	37
• Figure II.3 : matérielle utilisé pour le gâchage, (a) Malaxeur à deux vitesses, (b) Table à choc.	39
• Figure II.4: exemple d'éprouvette de laitier cassée en deux.	41
• Figure II.5 : matérielles utilisés pour essai de la résistance mécanique à la compression, (a) presse à béton, (b) dispositif de compression.	42
• Figure II.6 : éprouvette fissuré placé dans le dispositif de l'essai de compression .	42
• Figure II.7: composant de mniabilimètre (a) Mniabilimète, (b) cloison amovible , (c) Tige de piquage ,(d) boitier de commande	44
• Figure II.8: Malaxeur de mortier	44
• Figure II.9 : matériels utilisé pour l'essai perméabilité à gaz.	46
• Figure II.10: Essai de la résistance à la pénétration des ions chlorures	49
• Figure III.1: résultats de l'essai de maniabilité	53
• Figure III.2: La résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours des mortiers étudiés.	54
• Figure III.3: les résultats de la perméabilité	56
• Figure III.4: charge passé à travers les différentes éprouvettes.	57

❖ Liste des tableaux

Tableau I.1: Représentation de la valeur maximale de la résistance normale à 28 jours.	10
Tableau I.2 : Composition chimique du ciment.	11
Tableau I.3 : Composition minéralogique du ciment selon Bogue.	12
Tableau I.4 : Régulation de prise.	18
Tableau I.5 : Exemples de composition chimiques de métakaolins.	21
Tableau I.6 : Exemples des valeurs de surfaces spécifiques de métakaolins relevées dans la littérature.	22
Tableau I.7 : Echelle de composition chimique des laitiers de haut fourneau [Allexandre et al,1988, Bellman et al, 2009, Rrgourdnet al, 1983].	29
Tableau II.1: Fractions nécessaires pour un sable normalisé par tamis.	35
Tableau II.2: pourcentage du ciment et des ajouts dans les formulations des mortiers	37
Tableau II.3: quantité de matériaux nécessaire pour l'essai de résistance mécanique.	38
Tableau II.4: quantité de matériaux nécessaire pour l'essai de perméabilité au gaz .	38
Tableau II.5: quantité de matériaux nécessaire pour l'essai de migration des ions chlorure.	38
Tableau II.6: poids des éprouvettes pendant le séchage.	47
Tableau II.7:perméabilité aux ions chlorures selon la charge passée .	50
Tableau III.1 : La résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours des mortiers étudiés.	54
Tableau III.2 : tempe mesuré que met la bulle a traversés le débitmètre.	56
Tableau III.3 : les résultats de la perméabilité (Ka) pour les différentes éprouvettes étudiées.	56
Tableau III.4 : les valeurs du courant électrique.	57
Tableau III.5 : valeur de la charge passée.	57

❖ Référence bibliographique

- A. Nacéri et I. Messaoudene, « EFFET DE L'ACTIVATION MECANIQUE DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU MORTIER », *Leban. Sci. J.*, vol. 7, n° 2, Art. n° 2, 2006.
- K. ABDELLI, M. TAHLAITI, R. BELARBI, et M. N. OUDJIT, « Influence of the pozzolanic reactivity of the blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars », *Energy Procedia*, n° 139, 2017.
- G. BAVELARD et H. BEINISH, *Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes*. CERIB, 2006.
- C. Houze, « Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganèse », Université Paris-Est, 2013.
- rabah Chaid, H. Zeroub, et damien Rangeard, « indicateurs de durabilité des bétons avec ajout de poudre de verre en milieu marin », *Algér. Equip.*, n° 56, déc. 2015.
- A.TALAH et F.KHARCHI, « A modified test procedure to measure gas permeability of hollow cylinder concrete specimens », p. 91, 2013.
- « ASTM C1202 - 12 - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride - Doccity ». <https://www.doccity.com/pt/astm-c1202-12-electrical-indication-of-concrete-s-ability-to-resist-chloride/4914863/> (consulté le juill. 04, 2021).
- Fiches techniques : le ciment et ses applications. Collection technique Cimbéton. Centre d'information sur le ciment et ses applications. Nouvelle édition 2001.
- R.Dupin, R.Lanchon, J-C Saint Arroman, granulats sols, « ciment et béton, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », 3ème édition, paris, 2004, pp 79-80.
- Ghomari Fouad. « Science des matériaux de constructions Him12 ». Université Aboubeker Belkaid.2003/2004.
- Dreux George, Festa Jean. « Nouveau guide du béton et de ses constituants ».8ème Edition. Paris.1998.
- M.N. OUDJIT. Cour de génie civil de MDC, USTHB.
- Alexa BRESSON. « Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers du ciment au jeune âge ». Mémoire de Maîtrise en Génie Civil, Faculté des Sciences et de Génie, Université deLaval, Québec, Mai 2006.

- Van Breugel, K. « Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement based materials », Delft, PhD. Thesis, 1991.
- Hamdy El-Diadamony a, Ahmed A. Amer a, *, Tarek M. Sokkary b, Samir El-Hoseny. « Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes. »2015.
- Belmenouar Salim « Recherche Bibliographique Sur La Valorisation De Métakaolin Dans Les Matériaux De Construction » mémoire master université de M'SILA promo 2015/2016.
- Raphaël Bucher. « Article paru dans Béton[s] le Magazine n° 73 », Docteur en génie civil et ingénieur R&D chez Argeco Développement, Mars2018.
- Rackel San Nicolas « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash ».
- Thinh Quang Minh. « Utilisation du Métakaolin par substitution partielle du ciment dans les applications géotechniques d'injections et de scellement d'ancrage ». Thèse de doctorat : Ingénierie en génie civil. Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse.04/07/2012.
- Philippe Souchu. « Le point sur les Métakaolin ».18/06/2010.
- Abdelli Kamal, Tahlaiti Mahfoud, Belarbi Rafik, Oudjit M.Nadjib. « Influence of the origin of metakaolin on pouzzolanic reactivity of mortars ».France.2016
- Saidat Fatma. « Activation chimique du Métakaolin dans une matrice cimentaire ». Thèse de doctorat. Toulouse, 12/02/2013.
- Mourad Behim « sous-produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire ».thèse de doctorat, université Ba dji Mokhtar-Annaba, faculté des sciences de l'ingénieur, département de génie civil, année 2005.
- A.Nacéri, I.Messaoudene. « Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier ». Université de M'sila.2006.
- Clément Houzé « Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganèse ».Thèse doctorat, Université de Paris-Est.2013.
- Chahine BELGHIT. « Contribution à la formulation d'un béton autoplaçant a base de matériaux locaux effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité ».thèse magister, universite badji-mokhtar-annaba, année 2009.
- Jacques Reynard, Jérémie Domas .Centre Technique de la Promotion des Laitiers sédérurgiques (CTPL). « Le laitier de haut fourneau granulé moulu, Utilisé en addition dans

le béton ».

-Bouzoubaa Nabil., Simon.Foo. « Utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton : guide des règles de l'art. Laboratoire de la technologie des matériaux », Canada.01/2005.

-Valérie Thirion-Merle. « Spectrométrie de fluorescence X-Collection science archéologique ». 2014.

-Ahcene ould ali. « Étude et réalisation de l'automatisation d'un four de trempe ». Mémoire de master, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, faculté de génie électrique et d'informatique, département d'automatique.2016

-Chapitre II : Caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des bétons et des mortiers.

-LOGBI Abdelaziz. « Effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du mortier. ». Thèse doctorat, université kasdi merbah – ouargla faculté des sciences appliquées département de génie civil et d'hydraulique.2019.

-Maliani Souad. « Evaluation des pouzzolanes dans le ciment selon la procédure du groupe Holcim ».Mémoire de master : Ingénierie en génie civil. Université de Sidi Mohamed Ben Abdallah.2009/2010.