



**ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION
PARTIELLE DU CEM I (CLINKER) AVEC LE METAKAOLIN
ET LE LAITIER HAUT FOURNEAU**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DE

**MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : ROUTE & OUVRAGE D'ART**

Présenté et soutenu publiquement le 22 juillet 2024 par :

Kassoum KANAZOE (20210573)

Travaux dirigés par :

Directeur de mémoire : Pr Adamah **MESSAN** professeur titulaire (CAMES)

Encadreurs : Dr Philbert **NSHIMIYIMANA** Maître assistant (CAMES)

Dr Nafissatou **SAWADOGO**

M Daniel Yawo **ADUFU**

Jury d'évaluation:

Dr Yohan **RICHARDSON** (président de jury)

M. Sidiki **KABRE** (Examineur)

M. Iliassou **NOUHOUN SALOU** (Examineur)

Promotion [2023/2024]

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

DEDICACES

Je dédie ce travail à ma famille et à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

REMERCIEMENTS

Ce travail a vu le jour grâce aux idées et au soutien de toutes les personnes impliquées. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à :

- Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)
- Mon directeur de mémoire, le Professeur Adamah MESSAN, chef du LEMHad, pour ses conseils et son soutien incondtionnel.
- Mon encadreur Dr Philbert NSHIMIYIMANI, merci pour sa disponibilité, son appui et son suivi tout au long du stage.
- Mon encadreur Dr Nafissatou SAWADOGO pour son appui et ses conseils.
- Mon encadreur Monsieur Yawo Daniel ADEFU Doctorant au LEMHaD pour son temps passé à m'encadrer, merci pour tout.
- Dr Seick Omar SORE pour ses conseils et son soutien
- Tout le personnel du Département de Génie Civil pour son soutien
- Au personnel du laboratoire CIM FASO, merci pour votre collaboration sans laquelle ce travail ne serait pas une réalité.
- Le Directeur Général de CIM METAL pour son soutien et sa collaboration
- A mes collègues stagiaires et camarades pour votre soutien multiforme
- A ma famille.

RESUME

L'objectif de cette étude, est la valorisation du laitier haut fourneau des industries du Burkina Faso comme ajout cimentaire ; l'utilisation du laitier comme substitut du métakaolin dans un ciment contenant 30% de métakaolin dans le but de réduire la consommation d'énergie dans le processus de fabrication du ciment et d'optimiser les coûts des ciments.

Les résultats expérimentaux ont montré que le laitier substitué au ciment, diminue la résistance à la compression avec des valeurs de 19 % et 27 % respectivement pour des taux de substitution de 20% et 25% à 28 jours. Ce qui prouve que nous ne devrions pas faire une substitution de plus de 20% au risque de dépasser la valeur limite de diminution qui est de 25%. Le laitier n'améliore pas les propriétés de transport des fluides du ciment mais s'est avéré très efficace pour résister aux substances agressives comme l'acide sulfurique.

La substitution du métakaolin dans le ciment par le laitier entraîne une diminution de la résistance à la compression avec une diminution de 22% ; 24% ; et 35% respectivement pour des taux de substitution de 15% ; 20% ; et 25% à 28 jours. Cependant une substitution de 20% entraîne une réduction de la résistance à la compression de 7% par rapport à un ciment sans ajout. Par ailleurs le laitier diminue les performances de durabilité d'un ciment contenant le métakaolin, mais reste meilleur qu'un ciment CEM I.

Mots clés : ciment binaire ; ciment ternaire, durabilité ; laitier haut fourneau ; Métakaolin

ABSTRACT

The aim of this study is the valorization of blast-furnace slag from industries in Burkina Faso as a cement additive; the use of slag as a substitute for as a substitute for metakaolin in a cement containing 30% metakaolin, with the aim of reducing energy consumption in the cement manufacturing process and optimize cement costs.

The experimental results showed that cement-substituted slag reduced compressive strength compressive strength, with values of 19% and 27% respectively for substitution rates of 20% and 25% at 28 days. This proves that we should not make a substitution of more than 20% at the risk of exceeding the reduction limit of 25%. Slag does not improve the fluid transport cement's fluid transport properties, but has proved highly effective in resisting aggressive substances such as sulfuric acid.

The substitution of metakaolin in cement by slag leads to a reduction in compressive strength compressive strength, with decreases of 22%, 24% and 35% respectively for substitution rates of 15%; 20%; and 25% at 28 days. However, a 20% substitution results in a reduction in compressive strength compressive strength by 7% compared with cement without additives. Slag also reduces the durability of a cement containing metakaolin, but remains better than a cement containing CEM I cement.

Keywords: binary cement; ternary cement, durability; slag blast furnace; Metakaolin

LISTES DES SIGLES ET ABREVIATIONS

- 2iE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (International Institute for Water and Environmental Engineering)
- LEMHaD** : Laboratoire des éco-matériaux et de l'habitat durable
- AFNOR** : Agence française de normalisation
- ASTM** : American Society for Testing and Materials (Société américaine pour les essais et les matériaux)
- EN** : Norme européenne
- NF** : Norme française
- C-H** : Calcium-Hydrates
- C-S-H** : Calcium-Silicates-Hydrates
- M** : Métakaolin
- L** : laitier haut fourneau
- E/L** : Eau/liant
- E/C** : Eau/ciment
- IAM** : Indice d'activité mécanique
- SP** : Super plastifiant

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
ABSTRACT	IV
LISTES DES SIGLES ET ABREVIATIONS	V
SOMMAIRE	VI
LISTES DES TABLEAUX	VIII
LISTES DES FIGURES.....	IX
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	3
INTRODUCTION	3
I.1 LE CIMENT.....	3
I.2 LES ADDITIONS MINERALES	5
I.2.1. LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU.....	6
I.2.2 LE METAKAOLIN.....	10
I.3 INFLUENCE DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES.....	13
<i>I.3.1 Propriétés physiques.....</i>	<i>13</i>
<i>I.3.2 Propriétés mécaniques</i>	<i>15</i>
<i>I.3.3 Indicateur de durabilité</i>	<i>18</i>
CONCLUSION PARTIELLE.....	22
CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE	24
INTRODUCTION	24
II.1 MATERIAUX.....	24
<i>II.1.1 Le Ciment</i>	<i>24</i>
<i>II.1.2 Le métakaolin</i>	<i>24</i>
<i>II.1.3Le laitier haut fourneau</i>	<i>25</i>
<i>II.1.4 Le sable</i>	<i>25</i>
<i>II.1.5 L'adjuvant (le super plastifiant).....</i>	<i>26</i>
II.2 PROCEDURE EXPERIMENTALE	26
<i>II.2.1 Elaboration des ciments.....</i>	<i>26</i>
<i>II.2.2 Caractérisation du ciment.....</i>	<i>28</i>
<i>II.2.2.3 Indicateurs de durabilité.....</i>	<i>30</i>
CONCLUSION.....	32

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	33
INTRODUCTION	33
III.1 PROPRIETES PHYSIQUES (A L'ETAT FRAIS)	33
<i>III.1.1 Consistance normale.....</i>	<i>33</i>
<i>III.1.2 Temps de prise</i>	<i>34</i>
<i>III.1.3 Affaissement au mini cône.....</i>	<i>35</i>
III.2 PROPRIETES MECANIQUES	36
<i>III.2.1 Résistance à la compression</i>	<i>36</i>
<i>III.2.2 Indice d'activité mécanique</i>	<i>38</i>
III.3 INDICATEUR DE DURABILITE	39
<i>III.1.1 Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente.....</i>	<i>39</i>
<i>III.1.2 Absorption d'eau par capillarité</i>	<i>41</i>
<i>III.1.3 Attaque à l'acide sulfurique</i>	<i>43</i>
<i>III.1.4 Diffusion des ions chlorures</i>	<i>46</i>
CONCLUSION.....	47
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	49
BIBLIOGRAPHIE	51
ANNEXES.....	59

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I : les quatre continuant principaux du clinker (Nigri 2018)	4
Tableau II : composition chimique des laitier haut fourneau (Houze 2013).....	7
Tableau III : Propriétés physiques du métakaolin	10
Tableau IV. Composition minéralogique de l'argile après calcination (Siddique et Klaus 2009)	11
Tableau V : Compositions chimiques des métakaolin.	11
Tableau VI : Propriétés des argiles étudié (Ramadji et al. 2022)	12
Tableau VII : Caractéristique du super plastifiant	26
Tableau VIII : Compositions du ciment binaire et ternaire.....	26
Tableau IX: Quantités de matériaux utilisés	27
Tableau X: Absorption capillaire des ciments binaire et ternaires.....	42

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Processus de fabrication de l'acier (Coulon, Château, et Gay 2013)	7
Figure 2 : Spectre de DRX du laitier cristallisé (a) et du laitier vitrifié/granulé (b)(Alexandre 1988).....	8
Figure 3 : Paramètre influençant la réactivité du laitier (Houze 2013)	9
Figure 4 : Consistance normale des ciments contenant du métakaolin (Ramadji 2022).....	14
Figure 5 : Temps de prise de laitier granulé/vitrifié (a-(Douaïssia et al. 2020)) , métakaolin et poussière de granite (b-(Ramadji 2022)).....	15
Figure 6 : Résistance à la compression des mortiers contenant du métakaolin (Ramadji 2022)	18
Figure 7 : Profondeur et diffusion des ions chlorures avec E/C = 0.45 (Perreault-Chabot 2010)	21
Figure 8 :Clinker (CEM I).....	24
Figure 9 : Le métakaolin	25
Figure 10 : Le laitier haut fourneau.....	25
Figure 11: Opération de malaxage du mortier frais	27
Figure 12: Appareil de Vicat.....	28
Figure 13 : Essais de diffusion des ions chlorure	32
Figure 14 : Consistance normale des ciments binaires (a) et des ciments ternaires (b).....	33
Figure 15 : Temps de début et fin de prise des ciments binaires (a) et ternaires (b).....	34
Figure 16 : Affaissement au mini cône des ciments binaires (a) et ciment ternaire (b).....	35
Figure 17 : Résistance à la compression des ciments binaire (a) et ternaire (b)	36
Figure 18 : Indice d'activité mécanique pour ciments binaires (a) et ternaire (b)	38
Figure 19 : Porosité accessible à l'eau des ciments binaires (a) et du ciment ternaires (b)	39
Figure 20 : Masse volumique apparente des ciments binaires (a) et ternaire(b).....	40
Figure 21: Absorption capillaire des ciments binaires (a) ternaires (b) a 28 jours de cure.....	41
Figure 22: Perte de masse à l'attaque à l'acide sulfurique des mortiers de ciment binaire mûré pendant 28 jours (a) et 90 jours (c) et ternaire mûré pendant 28 jours (b) et 90 jours (d). ...	43
Figure 23: Profondeur et coefficient de diffusion des ions chlorure des mortiers de ciment binaire (a et b) et ternaire (c et d) pour 28 jours de maturation.....	46
Figure 24 : Liste des 27 produits de la famille des ciments courants.....	59
Figure 25 : Synthèse de l'hydratation du ciment.....	60
Figure 26 : Peser hydrostatique	60

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

Figure 27: Presse hydraulique	61
Figure 28 : Aspect physique des échantillons avant et après attaque acide	61
Figure 29 : Profondeur de diffusion des ions chlorure des échantillons (ciment binaire) pendant 60 jours d'immersion	62

INTRODUCTION

Le béton est le matériau le plus couramment utilisé pour la construction dans le monde avec 14 milliards m³/an coulés (Pophillat 2024) mais sa production a un impact significatif sur l'environnement. La production de ciment, qui est un composant clé du béton, représente 8 % des émissions mondiales de CO₂ (Pophillat 2024). En outre, la production et le broyage du clinker, principal composant du ciment Portland, libèrent de grandes quantités de gaz à effet de serre et consomment une quantité substantielle d'énergie. Le transport du clinker contribue également aux émissions, en particulier dans des pays comme le Burkina Faso, où l'importation de clinker est importante. L'Afrique, avec sa population croissante et son besoin de développement urbain (Didier et Simonneau 2022; Clerc et Deboulet 2018; Ripoll 2017), connaîtra une augmentation rapide de la demande de matériaux de construction, y compris le clinker.

Outre son impact sur l'environnement, le ciment est également cher, ce qui le rend inaccessible pour de nombreuses personnes. Au Burkina Faso, par exemple, les prix du ciment restent élevés malgré une offre excédentaire imputable à la consommation d'énergie et aux importations de clinker.

Pour résoudre ces problèmes, des matériaux alternatifs ayant moins d'impact sur l'environnement sont étudiés et reste à l'étude dans le monde. L'une des approches consiste à remplacer le clinker par d'autres ingrédients, plus précisément les ressources naturelles ou des sous-produits disponibles localement.

À la lumière de ces défis, le LEMHAD (Laboratoire Eco-matériaux et Habitats Durable) vise à développer des matériaux de construction écologiques et abordables en utilisant des ressources locales. Le laboratoire se concentre sur la formulation de ciment avec des ingrédients alternatifs, afin d'améliorer ses performances et de réduire son impact sur l'environnement. En explorant des formules de ciment binaires ; ternaire et en valorisant davantage ces matériaux, le LEMHAD cherche à minimiser la consommation de ressources naturelles et à rendre le processus de fabrication du ciment plus durable. Cette approche peut également contribuer à réduire le coût du ciment, le rendant plus accessible pour les projets de construction. Plusieurs études au sein du LEMHAD ont montré le potentiel de matériaux tels que le métakaolin (Ntimugura et al. 2017), le tuf (Kabre et al. 2018), la poussière de granite (Ramadji, Messan, et Prud'Homme 2020), le mâchefer (Sawadogo 2017), les cendres de balle de riz et la poudre

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

de verre (Tameghe 2022) pour améliorer les propriétés mécaniques et les performances environnementales du ciment. Le métakaolin (Ramadji 2022; Ismael 2019) en particulier dans une formule binaire (30% de métakaolin) avec le ciment, offre des résultats prometteurs en raison de sa disponibilité au Burkina Faso et de son impact positif sur les propriétés du ciment. Cependant, sa production reste gourmande en énergie (calcination à 700 °C). La consommation d'énergie dans le processus de fabrication du ciment peut être réduite en incorporant des déchets industriels ou agricoles en remplacement partiel du métakaolin. Ceci conduirait à une approche plus durable et plus respectueuse de l'environnement. Cela permettrait également de réduire l'utilisation excessive du métakaolin, qui aurait impact négatif sur la consommation des ressources naturelles.

Le but de cette étude est de valoriser le laitier de haut fourneau produit par les industries locales comme addition au clinker (CEM I) dans un premier temps, puis de voir la possibilité de l'utiliser comme substitut partiel au métakaolin dans un système ternaire, dans le but de diminuer la consommation d'énergie et des émissions dans le processus de fabrication du ciment et du métakaolin.

C'est dans ce contexte que ce travail sur « **élaboration d'un éco-ciment par substitution partielle du CEM I (clinker) avec le métakaolin et laitier de haut fourneau** » a comme objectif de caractériser les propriétés physico-mécaniques et la durabilité de l'éco-ciment élaboré.

Ce travail comprend notamment :

- La détermination des propriétés physiques de l'éco-ciment à l'état frais
- L'évaluation des propriétés physico-mécaniques d'un éco-ciment à l'état durci
- L'évaluation des indicateurs de durabilité d'un éco-ciment à l'état durci.

Ce travail de recherche sera divisé en trois chapitres. Le premier chapitre se concentre sur la revue de la littérature et présente l'état des connaissances sur les propriétés du laitier et du métakaolin, ainsi que les propriétés de ces matériaux à l'état frais et durci en combinaison avec le clinker. Le chapitre 2 comprendra une introduction aux matériaux et aux procédures expérimentales utilisées. Enfin, le chapitre 3 abordera les questions de l'analyse et de l'interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

Introduction

L'utilisation du ciment portland est aujourd'hui de plus en plus remise en question en raison de son impact sur l'environnement. Les recherches se concentrent sur le remplacement partiel ou total du clinker (composant principal du ciment portland) par des additions minérales ou l'utilisation de géopolymères.

Dans ce chapitre, nous aborderons d'abord le ciment portland, en particulier le clinker, puis les effets des additifs minéraux sur le ciment.

I.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué d'une poudre finement broyée issue de la transformation des roches. Mélangé à l'eau, il devient une pâte qui durcit avec le temps grâce à des réactions chimiques, conservant ainsi sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (Nigri 2018). Le principal composant du ciment est le clinker, obtenu par la cuisson d'un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile. Le ciment est largement utilisé dans l'industrie de la construction en raison de ses performances mécaniques et de sa durabilité. La norme européenne (EN 196-1 206) dénombre 19 classe le ciment en 5 types, avec un total de 27 produits de ciment en fonction de la teneur en clinker et des additifs.

Ces dernières années, des efforts ont été faits pour améliorer les performances du ciment et réduire son empreinte carbone. Ainsi une nouvelle norme (EN 197-5 2021) est apparue en 2021 définissant de nouveaux types de ciment à faible teneur en carbone, tels que le CEM II/C-M et le CEM VI. Ces ciments ont un impact environnemental réduit en remplaçant partiellement le clinker par des ajouts minéraux naturels ou artificiels tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, la pouzzolane ou les cendres volantes. La teneur en clinker varie de 50 à 65 % pour le CEM II/C-M et de 35 à 50 % pour le CEM VI (Ramadji 2022). Dans l'ensemble, ces ciments à faible teneur en carbone contribuent au développement durable dans l'industrie de la construction.

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

❖ Composition d'un CEM I

Le CEM I est composé de 95% de clinker et de 5% de gypse avec quarts phases principales de deux familles d'hydrates (les Silicates et les aluminates) que sont (Ramadji 2022) :

- Silicate tricalcique ou Alite C_3S $3CaO.SiO_2$
- Silicate bicalcique ou Belite C_2S $2CaO.SiO_2$
- Aluminate tricalcique C_3A $3CaO.Al_2O_3$
- Aluminoferrite tétracalcique ou celite C_4AF $4CaO. Al_2O_3.Fe_2O_3$

Outre ces 4 composants, le clinker contient d'autre oxyde en faible teneur. L'hydratation du ciment se traduit par les réactions chimiques de ces phases différentes phase au contact de l'eau. « L'hydratation est un processus complexe durant lequel les principaux constituants du ciment (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent progressivement la prise et le durcissement de la pâte de ciment » (Ramadji 2022)

Tableau I : les quatre continuant principaux du clinker (Nigri 2018)

Constituants	Notation chimique	Notation oxyde	Notation cimentière	Pourcentage %
Silicate tricalcique	Ca_3SiO_5	$3CaO.SiO_2$	C_3S	62-68
Silicate bicalcique	Ca_2SiO_4	$2CaO.SiO_2$	C_2S	21-24
Aluminate tricalcique	$Ca_3Al_2O_6$	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	4-8
Aluminoferrite tétracalcique	$Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$	$4CaO. Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	2-5
Autres constituant minoritaires	MgO (2%), SO₃(<1%), CaO libre (<1%), Na₂O + K₂O (<1%), TiO₂ (<1%)			

❖ Les étapes d'hydratation du ciment.

La période gâchage, qui se produit lorsque l'eau se mélange au ciment anhydre, entraînant la dissolution des constituants du ciment. Les C_3S et les C_3A réagissent pour former de l'ettringite AFt et les silicates de calcium hydratés CSH. Cette étape est rapide et dégage de la chaleur.

La période de dormance, caractérisée par un faible dégagement de chaleur et aucune modification visible de la pâte de ciment. Cependant, les réactions se poursuivent, entraînant la saturation de la solution en ions calcium, silicate, hydroxyde et sulfate. Cette saturation augmente le pH et ralentit la dissolution des constituants du ciment.

La période d'accélération suit, commençant lorsque la concentration de certains ions atteint la saturation et que la portlandite [CH : Ca(OH)₂] se forme. Cela conduit à la dissolution, à la nucléation et à la précipitation de différentes phases, ce qui entraîne la formation de divers hydrates (CSH ; CH ; AFt). Une chaleur considérable est dégagée au cours de cette étape.

La période de durcissement et de ralentissement, au cours de laquelle les hydrates s'épaississent progressivement et les résistances mécaniques se développent. La diffusion de l'eau à travers le réseau de pores ralentit l'hydratation, ce qui entraîne une diminution du dégagement de chaleur. À ce stade, l'ettringite AFt se transforme en AFm (monosulfoaluminate de calcium hydraté).

I.2 Les additions minérales

Les additions minérales sont des matériaux finement broyés, dont la granulométrie est généralement inférieure à 100 µm, qui sont incorporés au béton (soit en remplacement partiel du ciment, soit en complément de celui-ci) afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières, telles que la compacité, la durabilité, la résistance à des environnements agressif, etc. Les additions minérales sont de deux types :

Les additions de type I sont celles qui sont quasi inertes et qui sont employées pour améliorer la régularité esthétique du béton frais. Les exemples illustratifs de cette catégorie sont les fillers calcaires et les pigments de coloration du béton.

Les ajouts de type II sont ceux qui ont un caractère pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils sont utilisés pour améliorer la durabilité et la résistance mécanique du béton.

Les additions minérales ont trois effets principaux sur le ciment (Fatma Zohra Melais 2016) :

- **Effet de remplissage**, c'est-à-dire que l'ajout remplit les vides dans la structure du ciment avec de fines particules, ce qui permet à l'eau d'être libérée des pores

- **Effet physique ou de surfaces** causées par la présence des particules minérales ajoutées. Cet effet modifie le processus d'hydratation du ciment et la structure des produits hydratés. Enfin, les additions minérales ont un
- **Effet chimique**, en particulier un effet pouzzolanique ou hydraulique latent. Cela signifie que les additions ont la capacité de réagir avec l'eau et les constituants du ciment pour former de nouvelles phases minérales. Ces nouvelles phases contribuent à la résistance mécanique du ciment, tout comme les produits cimentaires hydratés eux-mêmes.

I.2.1. Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit du processus de décomposition du minerai de fer dans les hauts fourneaux. Il existe deux types de laitier de haut fourneau : le laitier granulé et le laitier cristallisé, qui se distinguent par leur méthode de refroidissement (Coulon, Château, et Gay 2013).

Le laitier **cristallisé** est obtenu par refroidissement lent et possède des propriétés minéralogiques stables. Cependant, elles sont inertes et leurs propriétés hydrauliques latentes sont limitées (Alexandre 1988). En revanche, le laitier **granulé/vitrifié** est obtenu par refroidissement rapide, ce qui lui confère une structure vitreuse et un contenu énergétique plus élevé. Cette forme de laitier est instable et possède des propriétés hydrauliques latentes (Alexandre 1988).

❖ Obtention du laitier haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un matériau polyvalent qui trouve de nombreuses applications dans la construction et d'autres industries, ses propriétés variant en fonction de la méthode de refroidissement. Le procédé du haut fourneau consiste à charger du minerai de fer et du coke dans le four et à les chauffer à environ 1 500 °C. Le laitier se forme alors dans le fourneau. La réaction entre le fondant et la silice du minerai entraîne la formation de scories, tandis que le

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

fer liquide s'accumule au fond du four. Chaque tonne de fonte produit environ 250 à 300 kg de laitier est généré.

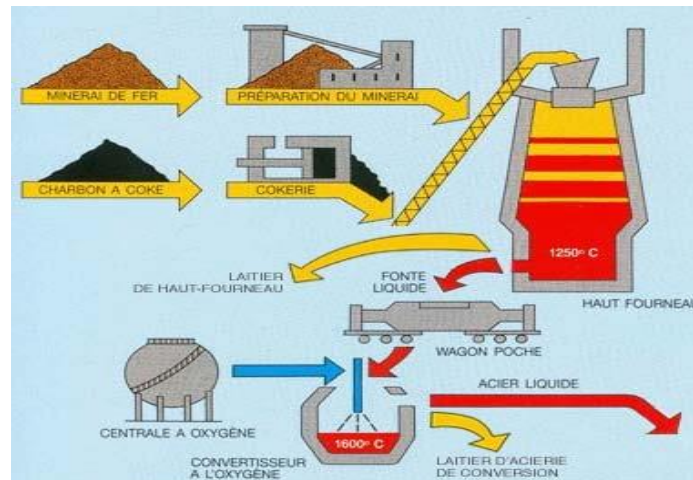


Figure 1 : Processus de fabrication de l'acier (Coulon, Château, et Gay 2013)

❖ Propriétés physico-chimiques

Les laitier cristallisées et les laitiers granulés/vitrifié peuvent sembler différentes en termes d'apparence physique et minéralogique, mais elles sont chimiquement similaires. Les laitiers cristallisés sont stables et inertes, tandis que les laitiers granulés sont instables et réactifs. Les deux types de laitier contiennent généralement de la chaux, (CaO, 40 % environ), la silice (SiO₂, 35 % environ), l'alumine (Al₂O₃, 11 % environ) et la magnésie (MgO, 8 % environ) (CTPL 2012).

Tableau II : composition chimique des laitier haut fourneau (Houze 2013).

<i>Constituant</i>	<i>Teneur en %</i>
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

Le laitier de haut fourneau a une densité de 2,5-3T/m³. Le laitier cristallisé est gris et poreux, avec une taille de grain de 0/300 mm. En revanche, le laitier granulé est de couleur jaune/beige et présente une granulométrie plus petite de 0/4 mm. La **Figure 2** montre que le laitier cristallisé a une forme minéralogique cristalline, tandis que le laitier granulé contient une phase vitreuse

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

(amorphe). Cette phase vitreuse confère au laitier granulé des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques, ce qui le rend réactif, alors que le laitier cristallisé est stable et ne possède pas ces propriétés. Globalement, la principale différence entre le laitier cristallisé et le laitier granulé réside dans leurs caractéristiques physiques et minéralogiques.

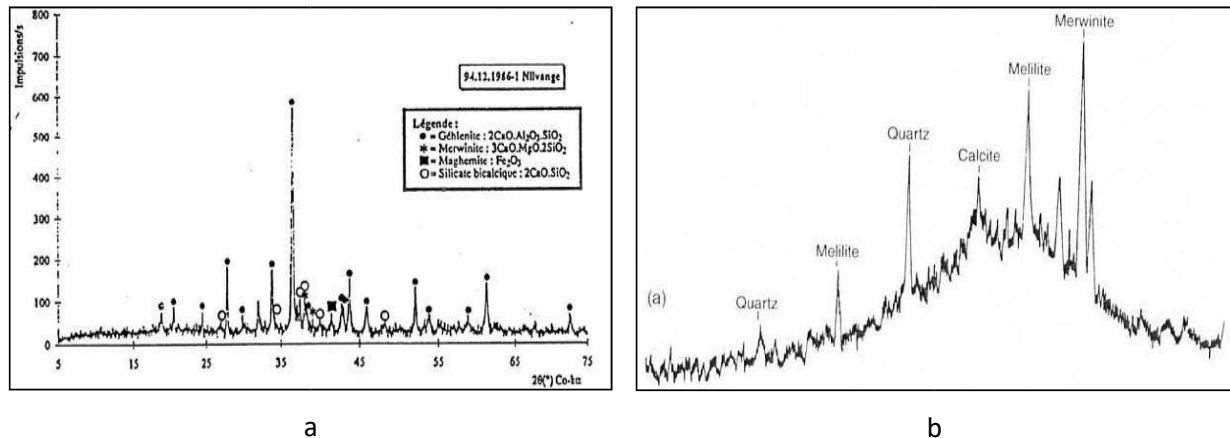


Figure 2 : Spectre de DRX du laitier cristallisé (a) et du laitier vitrifié/granulé (b)(Alexandre 1988)

❖ Hydraulicité du laitier haut fourneau

Le laitier cristallisé, contrairement au laitier granulé, n'a pas de propriétés hydrauliques et est principalement utilisé comme additif minéral pour son effet filer. En revanche, le laitier granulé ou vitrifié présente des propriétés hydrauliques et peut être activé par différentes méthodes telles que l'activation calcique, l'activation alcaline, l'activation par les sulfates et l'activation par le ciment Portland. Parmi ces activations, l'activation alcaline utilisant le silicate de sodium est la méthode la plus couramment étudiée et utilisée (Jacquemot 2015; Cornec 2019; Dahmani 2016; Houze 2013).

En présence de ciment Portland, les trois types d'activation peuvent se produire simultanément (Jacquemot 2015) : l'activation calcique due à la teneur élevée en portlandite, l'activation sulfatique facilitée par le sulfate de calcium et l'activation alcaline due à la teneur concentrée en alcalins. Les produits formés lors de l'hydratation du laitier sont similaires à ceux formés lors de l'hydratation du clinker, mais il existe des différences dans le type et la stœchiométrie du C-S-H (calcium-silicate-hydrate) formé (Dahmani 2016). Cependant, le processus de

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

durcissement des mélanges de laitier et de ciment Portland est généralement plus lent que celui du ciment Portland seul.

La réactivité du laitier dépend de plusieurs facteurs. La composition chimique du laitier affecte sa réactivité, un pH plus élevé entraînant une réactivité accrue. L'indice de basicité, qui calcule la somme des constituants basiques sur les constituants acides (CaO/SiO_2), peut être utilisé pour évaluer les propriétés hydrauliques du laitier, et un indice d'environ 1,3 est préférable (Houze 2013). La présence d'une phase vitreuse plus élevée dans le laitier améliore également sa réactivité.

La température joue un rôle crucial dans la réaction du laitier, car des températures plus élevées peuvent accélérer sa réactivité. En outre, la finesse des particules de laitier influe sur sa réactivité, les particules les plus fines présentant une meilleure réactivité. La compréhension des différents paramètres qui affectent la réactivité du laitier peut aider à optimiser son utilisation en tant que matériau hydraulique dans les applications de construction.

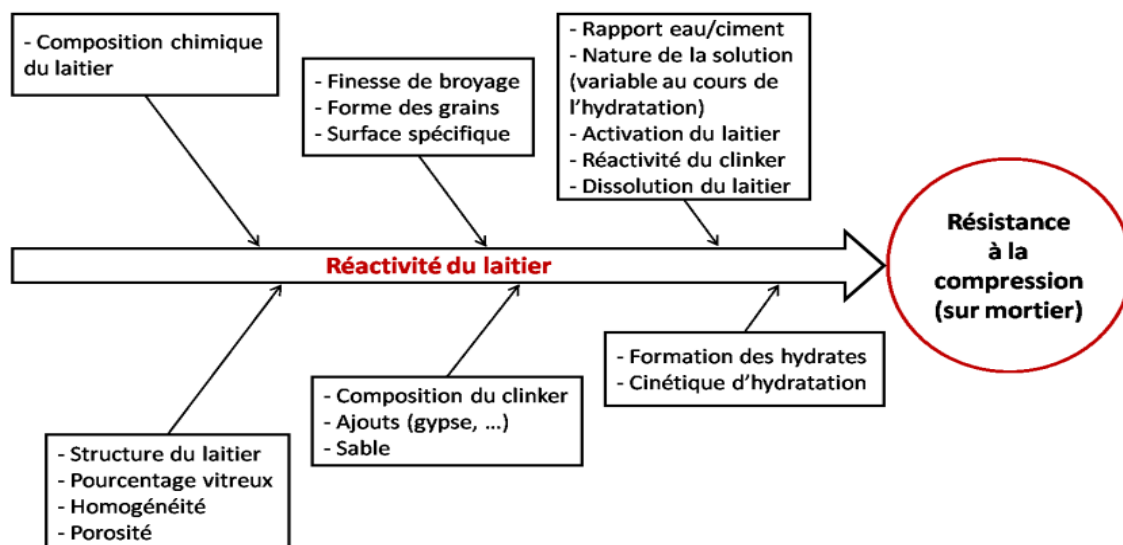


Figure 3 : Paramètre influençant la réactivité du laitier (Houze 2013)

❖ Domaine d'application du laitier

Le laitier cristallisé peut servir d'agrégat à des fins multiples et répond aux normes industrielles. Il présente une résistance élevée et une faible conductivité thermique, ce qui en fait un excellent choix pour la protection contre les incendies. En outre, elle peut servir d'agrégat léger, réduisant ainsi les charges structurelles et les coûts. En outre, le laitier cristallisé peut être transformé en laine de roche, ce qui permet une isolation thermique efficace.

Le laitier vitrifié trouve une large application dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice et est couramment utilisé comme liant hydraulique dans la production de ciment. Il peut remplacer le clinker dans la production de béton, réduire les émissions de gaz à effet de serre et servir de substitut au sable naturel dans le traitement de surface des métaux.

I.2.2 Le métakaolin

Le métakaolin est produit par la calcination d'argiles kaoliniques à des températures élevées, généralement comprises entre 600°C et 900°C. Ce processus élimine l'eau de la kaolinite, le principal composant du kaolin, ce qui entraîne la destruction de sa structure cristalline et la formation d'un aluminosilicate amorphe. Le métakaolin est connu pour sa nature amorphe et son pouvoir pouzzolanique élevé. Contrairement à la kaolinite qui est blanche ou beige et friable, le métakaolin est de couleur rougeâtre et se compose de particules minérales très fines inférieures à 10µm (Mokhtar et Oukil 2016), ce qui les rend ultrafines. Plusieurs études indiquent que le métakaolin a une densité spécifique plus faible et une surface spécifique plus élevée par rapport au ciment, ce qui entraîne une demande en eau plus importante. Toutefois, il est important de noter que ces caractéristiques peuvent varier.

❖ Propriétés physique et chimique du métakaolin

Tableau III : Propriétés physiques du métakaolin

Auteur	Densité spécifique	Surface spécifique (cm ² /g)
(El-Diadamony et al. 2018)	2,60	9 180
(Ilic, Mitrovic, et Milicic 2010)	2,54	9 810
(Tironi et al. 2013)	2,65	11 000
(Ramadji 2022)	2,63	6608

Tout comme la densité et la surface spécifique, la composition chimique et minéralogique du métakaolin dépend de l'argile brute calcinée et du procédé de calcination. Le métakaolin est donc associé à d'autres minéraux en fonction de la kaolinite utilisée (roche mère), comme le montrent le tableau V et la composition chimique du tableau VI.

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

Tableau IV. Composition minéralogique de l'argile après calcination (Siddique et Klaus 2009)

Argile calcinée	Métakaolin (%)	Quartz (%)	Illite (%)	Feldspaths (%)	Muscovite (%)
1	36,00	21,85	6,93	4,23	31,00
2	31,50	31,10	9,69	4,62	23,01
3	40,00	18,11	6,18	3,82	31,90

Tableau V : Compositions chimiques des métakaolin.

Auteur	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	K2O	Na2O	MgO	TiO2	P2O5	SO3
(El-Diady et al. 2018)	55,1	34,1	5,24	0,28	0,02	0,1	0,25	2	1	0,01
(Krishnan et al. 2018)	47,41	35,98	1,16	-	1,43	-	0,2	0,46	0,09	-
(Bich, Ambroise, et Péra 2009)	55,11	39,89	4,18	0,09	-	0,18	0,02	-	-	0,104
(Ramadji et al. 2022)	57,85	38,3	2,3	0,05	0,11	0,23	0,09	0,01	0,02	-

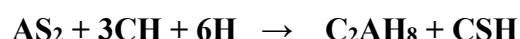
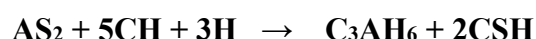
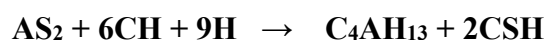
❖ Activité pouzzolanique du métakaolin

Les matériaux pouzzolaniques contiennent de la silice, qui peut réagir avec l'hydroxyde de calcium pendant l'hydratation du ciment pour former de nouveaux composés CSH (Houze 2013). Un ajout pouzzolanique doit répondre à certaines conditions, à savoir : $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 70\%$. (ASTM 618)

La réaction obtenue lors du processus d'hydratation entre l'eau et le ciment produit un dérivé secondaire, l'hydroxyde de calcium, mieux connu sous le nom de chaux. Lorsque les

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

pouzzolanes réagissent avec la chaux libre en présence d'eau, un nouveau composé doté d'excellentes propriétés de liaison est créé. L'intensité de la réaction chimique détermine la résistance du mortier, et la réaction obtenue avec le métakaolin est particulièrement intense par rapport aux autres pouzzolanes (Mokhtar et Oukil 2016). La réactivité pouzzolanique du métakaolin est décrit par différentes équations que sont :



❖ Paramètre influençant la réactivité du métakaolin

La réactivité du métakaolin est influencée par plusieurs facteurs, mais la teneur en silice amorphe et la surface spécifique sont les paramètres les plus importants. Une étude menée sur des argiles calcinées du Burkina Faso met en lumière cette relation (Ramadji 2022). Il a eu à étudier quatre argiles calcinées différentes présent dans le tableau ci-dessous

Tableau VI : Propriétés des argiles étudiées (Ramadji et al. 2022)

Argiles calcinées	A1	A2	A3	A4
Taux amorphe (%)	70	46	42.7	38.4
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	6608	4857	4487	4848

Divers tests de pouzzolanique ont été effectués sur ces argiles, notamment le test de Frattini, le modificateur de chapelle, la conductivité électrique et l'indice d'activité mécanique. L'argile A1, dont la teneur en amorphes et la surface spécifique sont plus élevées que celles des autres argiles, a obtenu de meilleurs résultats dans tous les tests. Tous les échantillons sont classés comme pouzzolanes selon la norme (ASTM C642 2008), car ils ont un indice d'activité mécanique supérieur à 75 %. Cependant, l'A1 se distingue par un indice d'activité mécanique supérieur à 100 %.

I.3 Influence des additions minérales sur les matériaux cimentaires

Les additions minérales peuvent être utilisés seuls ou en combinaison avec deux ou trois autres additifs pour remplacer partiellement le ciment. Nous définirons quelques noms différents pour le ciment, en fonction du nombre d'ajout utilisé. Le ciment binaire est un ciment composé de deux produits principaux, généralement du ciment portland et un additif cimentaire. On parle de ciment ternaire lorsque deux additifs plus le ciment sont utilisés, et un ciment quaternaire a trois constituants de plus que le ciment. Dans cette section, nous mettrons en évidence l'influence de quelques additions sur les propriétés du ciment telles que les propriétés physiques, les propriétés mécaniques et la durabilité, en nous concentrant plus particulièrement sur le métakaolin et le laitier de haut fourneau.

I.3.1 Propriétés physiques

I.3.1.1 La consistance normale

Les ajouts minéraux peuvent soit augmenter, soit diminuer ou maintenir la consistance normale du ciment. Diverses additions minérales, telles que le métakaolin (Armengaud 2016; Ismael 2019; Tamegheu 2022), le tuf (Kabre 2017), les cendres de balle de riz (Tameghe 2022), les pouzzolanes naturelles (Laoufi et al. 2016; khalida et Bentouhami 2016), le mâchefer (Sawadogo 2017) et les filer de calcaire, augmentent généralement la consistance normale par rapport au ciment Portland ordinaire. Cette augmentation est proportionnelle au pourcentage d'ajout et est attribuée à la finesse et à la surface spécifique élevées de ces additions, qui nécessitent plus d'eau pour une consistance donnée. La texture rugueuse et la distribution granulométrique fine de ces ajouts contribuent également à l'augmentation de la demande en eau. Toutefois, l'utilisation de zéolithe naturelle et de sable de dune réduit l'ouvrabilité du béton et augmente la demande en eau (Adjoudj 2015),(Rabhi Mohamed 2023; Guettala, et Mezghiche 2013; F Z Melais et al. 2015).

Les ajouts minéraux ayant un effet de remplissage, tels que la poudre de verre et le laitier de haut fourneau granulé/vitrifié ou cristallisé, améliorent la compacité du mélange et réduisent la demande en eau (Armengaud 2016). Les cendres volantes, lorsqu'elles remplacent le ciment, réduisent progressivement le dosage en eau en raison de leurs particules sphériques et non poreuses (Adjoudj 2015). La fumée de silice maintien ou réduit légèrement l'ouvrabilité. En

somme, les propriétés des ajouts minéraux influencent grandement la demande en eau et la consistance normale d'un ciment.

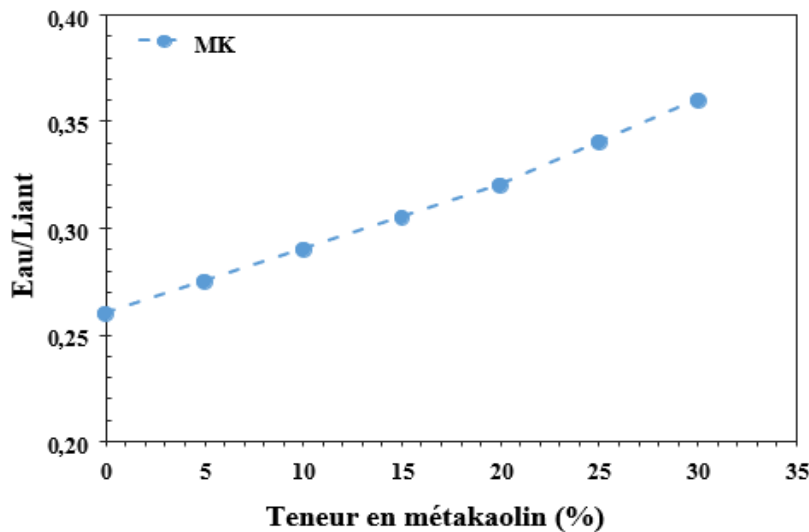
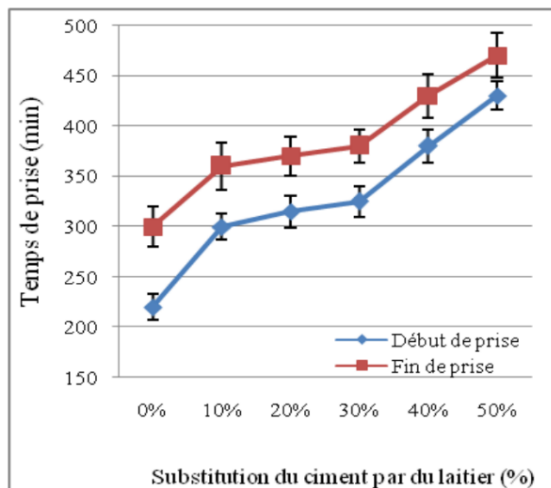


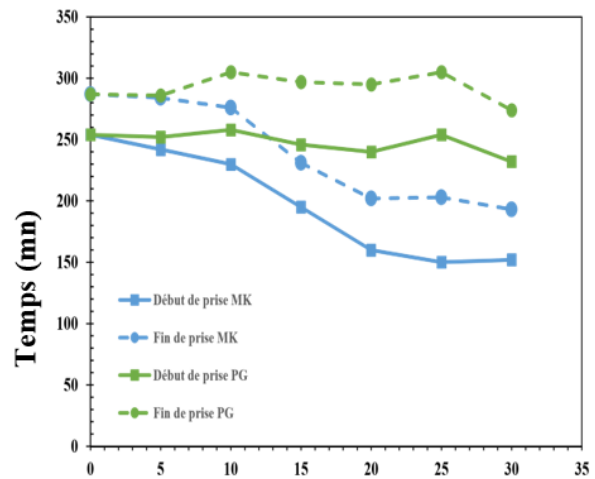
Figure 4 : Consistance normale des ciments contenant du métakaolin (Ramadji 2022)

Le temps de prise du ciment correspond au temps nécessaire pour que la pâte de ciment passe de l'état liquide à l'état solide par le biais de réactions chimiques d'hydratation. Ce processus est divisé en deux phases : le temps de début et fin de prise. Les additions incorporées au ciment peuvent modifier ce paramètre. En fonction de leur composition, de leur aspect physique et de leur interaction avec le ciment. Les additions minérales dont la morphologie des particules est plus fine ont tendance à accélérer le processus de durcissement.

Toutefois, certains additifs minéraux tels que les cendres volantes (Adjoudj 2015), le laitier de haut fourneau (Jacquemot 2015; Moula 2023; Oualit, Irekti, et Sarri 2022), les fumées de silice, le tuf (Kabre 2017), la poudre de verre, les cendres de balle de riz (Tameghe 2022) et la poudre de mâchefer (Sawadogo 2017) peuvent potentiellement ralentir le temps de prise du ciment. Le métakaolin, quant à lui, réduit le temps de prise en stimulant les réactions d'hydratation et de durcissement en raison de sa nature fine et en agissant comme un site de nucléation pendant l'hydratation (Ramadji 2022; Mokhtar et Oukil 2016). La poussière de granit, bien qu'ayant une finesse similaire à celle du ciment, n'a pas d'influence significative sur le temps de prise (Ramadji, Messan, et Prud'Homme 2020). La **Figure 5** montre le temps de début et fin de prise du laitier granulé/vitrifié, le métakaolin et la poussière de granite.



a



b

Figure 5 : Temps de prise de laitier granulé/vitrifié (a-(Douaïssia et al. 2020)), métakaolin et poussière de granite (b-(Ramadji 2022)).

I.3.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont les paramètres les plus importants (en particulier la résistance à la compression) pour un ciment. Les additifs minéraux sont considérés comme adaptés à une utilisation en tant qu'additifs minéraux en fonction de leur influence sur la résistance mécanique. En fait, les ajouts minéraux ont divers impacts sur la résistance mécanique, en fonction de leurs interactions avec le ciment.

La résistance à la compression est une propriété fondamentale des matériaux et le paramètre le plus étudié du béton ou du mortier. Les ajouts minéraux ont des effets variés sur ce paramètre. Les ajouts minéraux pouzzolaniques ou hydrauliques latents réagissent avec la portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment pour former un nouveau liant, le C-S-H. Ce dernier densifie la matrice cimentaire et améliore la résistance à la compression à court ou à long terme. Leur finesse joue également un rôle très important dans le processus d'hydratation, puisqu'ils peuvent constituer des sites de nucléation et donc accélérer l'hydratation. Ils améliorent également l'interface ciment-granulat. Les ajouts inertes, quant à eux, n'ont qu'un effet de remplissage et ne réagissent pas avec les composés cimentaires hydratés.

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

Le métakaolin améliore la résistance à la compression grâce à sa pouzzolanique élevée et sa finesse. Plusieurs études ont montré que la teneur de substitution optimal varie en fonction du type de métakaolin et de ciment, ainsi que du temps de maturation. La cinétique de réaction des bétons contenant du métakaolin est différente de celle des bétons de contrôle, avec une augmentation continue de la résistance observée même après 1 an (Guers et Bounia 2020). (Ramadji 2022 ; Ismael 2019) ont montré que la substitution du ciment par 15 % de métakaolin permettait d'obtenir une meilleure résistance que les autres substitutions entre 7 et 14 jours, tandis que 20 % était optimal à partir de 28 jours.

À 90 jours, les résistances enregistrées avec des substitutions de 20 %, 25 % et 30 % étaient à peu près les mêmes, ce qui suggère que 30 % est la teneur optimale à long terme. Les auteurs attribuent ce comportement à la cinétique d'hydratation du ciment, qui n'a pas produit suffisamment de portlandite au jeune âge pour réagir avec tous les aluminosilicates présents dans la matrice cimentaire. Cependant, (Ntimugura et al. 2017) dans les mêmes conditions a enregistré les mêmes tendances au jeune âge et a eu une teneur optimale de 25% à 90%, avec une baisse de la résistance à 90 jours pour une substitution de 30%. (Cassagnabère et al. 2010) et (Cornac et al. 2006) sont allés jusqu'à 40% du ciment par le métakaolin avec différents ciments. Le premier a eu des résistances moindres que le ciment de référence. Par contre (Cornac et al. 2006) a observé une amélioration de la résistance de l'ordre de 43 % avec 40% de métakaolin (57,1Mpa contre 82,2Mpa) ce qui montre que la réactivité du métakaolin dépend également du type de ciment utilisé. Une autre étude (Mokhtar et Oukil 2016) ont observé une augmentation linéaire de la résistance entre 7 et 28 jours avec des taux de substitution de 5 à 20% de métakaolin. En outre, (Kamel 2021) qui a fait varier le rapport eau/ciment a révélé qu'un mélange contenant 10 % de métakaolin présentait la résistance la plus élevée, surpassant le mélange de référence à 7 jours. À 28 et 90 jours, la résistance à la compression du métakaolin à 15 % était significativement plus élevée que celle du ciment de référence et des autres ciments avec des taux de substitution inférieurs ou supérieurs, quel que soit le rapport eau/ciment. En fin de compte, des rapports eau/ciment plus faibles ont entraîné des résistances plus élevées. (Armengaud 2016) constate qu'une substitution de 20 et 30% du ciment par le métakaolin entraîne des résistances inférieures au ciment sans ajout à 28 jours et attribuable à la demande exercée en eau du métakaolin.

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

Les effets du laitier de haut fourneau dépendent du type de laitier et de son origine. Le laitier de haut fourneau cristallisé, pratiquement inerte, est utilisé comme additions au ciment pour son effet de remplissage. Son utilisation en tant qu'addition au ciment entraîne une baisse de résistance proportionnelle au pourcentage de substitution. Ceci est dû à la perturbation et au ralentissement du processus d'hydratation lorsque la proportion de laitier cristallisé augmente (Fatma Zohra Melais 2016). Le laitier granulé/ vitrifié, quant à lui, possède une capacité hydraulique latente, entraînant une baisse de résistance dans le jeune âge, et une augmentation progressive de la résistance à la compression à moyen et long terme, pour atteindre le niveau du ciment de référence, voire mieux. (Sofiane et Akila 2019; Fatma Zohra Melais 2016; Amira 2015; Armengaud 2016a; Douaissia et al. 2020; Khalifa et al. 2012 ; Kolani 2012 ; Marion et al.). (Moula 2023) en étudiant le béton a haut performance BHP montre qu'en remplaçant la fumée de silice par du laitier granulé entraine des chutes de résistance au jeune âge.

(Khalida et Bentouhami 2016) ont trouvé que la combinaison de ciment avec du laitier granulé/vitrifié conduisait à des résistances légèrement plus élevées que le ciment sans ajout au jeune âge et légèrement plus faibles à 28 jours. Des études ont montré que la réactivation du laitier pouvait être accélérée et compenser ses défauts aux jeunes âges (Jacquemot 2015; Amira 2015)

Les autres additions minérales telles que la fumée de silice se comportent de la même manière que le métakaolin : ce sont des additions ultrafines et hautement réactives qui accélèrent l'hydratation du ciment et améliore la résistance à la compression à moyen et long terme. ,(Codina 2007; Moula 2023; Pinsonneault 1983; Aoual-Benslafa et al. 2011)

Les ajouts tels que le mâchefer (Sawadogo 2017), la poudre de verre (Mejdi 2009; Zidol 2011; Arab, Mehaddene, et Bouchnab 2017) et les pouzzolanes naturelles ou artificielles (Menad Mohamed; Touil et al.), les cendre volantes (Codina 2007; Guers et Bounia 2020) qui ont une réactivité pouzzolanique lente, conduisent à une diminution de la résistance dans le jeune âge et à une augmentation à long terme, atteignant ou dépassant celle du ciment témoin. En ce qui concerne le tuf, plus le taux de substitution est élevé, plus la résistance à la compression est faible. En revanche, à long terme, un taux de substitution de 5 et 10 % donne de meilleures résistances à la compression que le ciment sans ajout (Sofiane et Akila 2019).(Kabre 2017) a étudié le tuf avec différentes finesses : pour une finesse de 125um, le tuf ne correspond pas au témoin en termes de résistance, mais peut néanmoins être utilisé comme pouzzolane jusqu'à

15% de substitution. En revanche, avec une finesse plus élevée, la substitution du ciment par 10 et 15 % de tuf donne une résistance à long terme supérieure à celle du ciment de référence. De plus, le ciment peut être partiellement remplacé par du tuf jusqu'à 25%.

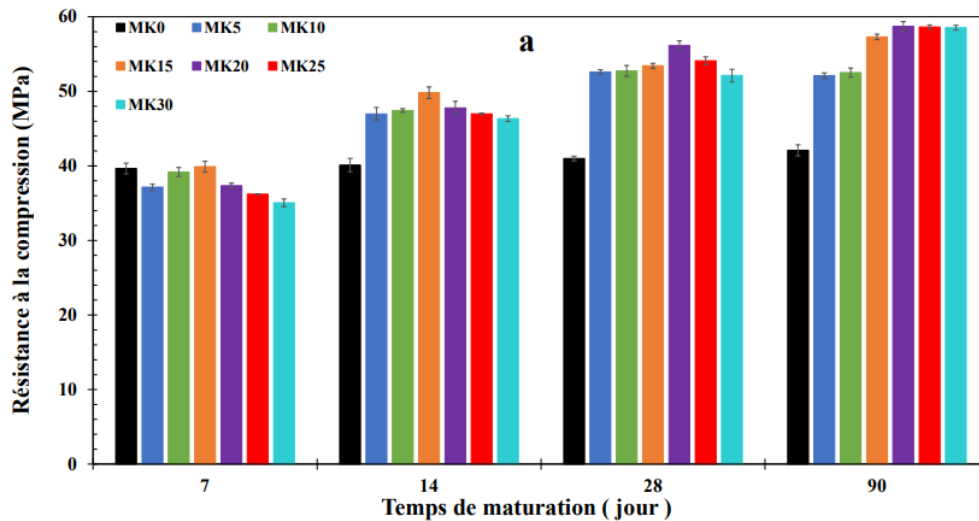


Figure 6 : Résistance à la compression des mortiers contenant du métakaolin (Ramadji 2022)

I.3.3 Indicateur de durabilité

La durabilité d'une structure est sa capacité à remplir la fonction pour laquelle elle a été conçue. C'est-à-dire sa capacité à résister aux intempéries et à conserver leurs propriétés mécaniques à long terme. Elle est gouvernée par plusieurs paramètres.

I.3.3.1 La porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est une propriété importante des matériaux cimentaires, qui influence leur résistance mécanique et leur durabilité. C'est la proportion du volume du matériau qui est accessible à l'eau et qui peut être absorbée. Elle varie de 11 à 18% pour le béton (Guers et Bounia 2020) et régit le transfert de fluides dans le mortier, tels que les ions chlorure et les sulfates. La porosité est influencée par plusieurs facteurs (Kamel 2021) : le rapport E/C, la composition du ciment ; la compacité du béton frais, le rapport pâte/granulat ou sable ; le type de granulat (Cassagnabère et al. 2010) et de sable. (Touil et al. ; Guers et Bounia 2020)B. (Touil et al.) ont montré que plus le rapport E/C est faible, plus la porosité est faible.

La plupart des études menées sur le métakaolin (Ramadji 2022; Tameghe 2022; Mokhtar et Oukil 2016; Kamel 2021; Cornac et al. 2006 ; Mosser 2023) ont montré sa capacité à réduire la porosité grâce à sa forte réactivité pouzzolanique qui modifie la microstructure en donnant naissance à une structure plus compacte tout en améliorant la résistance mécanique. Le métakaolin produit des hydrates supplémentaires (C-S-H, C-A-S-H) qui segmentent et tapissent les grands pores (affinage de la structure des pores) à long terme (jusqu'à 1 an). Kamel montre que la substitution de 15 et 20% de métakaolin réduit la porosité de 38 et 48% à 180 jours. Par contre les études de (Cassagnabère et al. 2011) et Fabrice ont montré l'effet inverse.

Quant au laitier haut fourneau ; les études révèlent que les mortiers fabriqués à partir de ciments de laitier présentaient une porosité totale plus élevée par rapport aux mortiers à base de ciment non ajouté (Bouikni, Swamy, et Bali 2009; Hadjsadok et al. 2012; Shi-Ping et Grandet 1989) et (Guers et Bounia 2020; Deboucha et al., s. d.-a). Cependant, la distribution des pores dans les mortiers à base de ciment de laitier était plus étroite et plus fine. Cela est dû à la lenteur de l'hydratation du laitier par rapport au clinker, ce qui crée des vides accessibles. Au fil du temps, le laitier est activé par le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provenant de l'hydratation du clinker et forme le gel CSH, réduisant ainsi le volume des pores capillaires et donnant une structure de pores plus fine que celle du ciment Portland ordinaire. (Fatma Zohra Melais 2016) dans ces travaux constate que 90 jours, l'ajout du laitier permet de diminuer la porosité accessible à l'eau.

Les études sur les additions minérales montrent que la poudre de verre (Cornac et al. 2006), le calcaire filer (Guers et Bounia 2020), les cendres de balle de riz (Tameghe 2022), le tuff (Kabre 2017) et la poussière de granite (Ramadji, Messan, et Prud'Homme 2020) augmentent la porosité accessible à l'eau, et le degré d'évolution dépend du taux et de l'addition.

I.3.3.2 L'absorption d'eau par capillarité

La structure poreuse joue un rôle clé dans l'absorption de l'eau par capillarité dans le mortier et le béton. Dans un premier temps, la capillarité de l'eau a lieu dans les pores les plus larges, et cette remontée est importante. Dans une deuxième phase, cette remontée se poursuit dans les pores plus petits et est relativement faible, se stabilisant dans certains matériaux. Les études réalisées sur le métakaolin montrent son effet bénéfique sur l'absorption d'eau par capillarité (Ramadji 2022; Tameghe 2022; Mokhtar et Oukil 2016; Kamel 2021; Cornac et al. 2006; Mosser 2023). Le laitier granulé, qui affine les pores, réduit également l'absorption d'eau (Fatma Zohra Melais 2016; Deboucha et al.).

La poussière de granit (Ramadji 2022), la poudre de verre (Cornac et al. 2006) le tuf, la cendre de balle de riz (Ulrich) augmentent le réseau de pores par l'absorption d'eau par capillarité. (Tameghe 2022) a constaté que la poudre de verre réduisait l'absorption d'eau, ce qui contraste avec les résultats de (Cornac et al. 2006) pour la poudre.

I.3.3.3 La résistance à l'attaque acide (acide sulfurique)

L'attaque acide est un phénomène de dégradation du mortier causé par l'exposition aux acides. Les acides réagissent avec les composants du mortier, en particulier le ciment, ce qui entraîne une perte de résistance, des fissures et une dégradation de la surface. En contact avec l'acide sulfurique ; la portlandite réagi en premier lieu avec l'acide pour former du gypse qui est facilement lessivable de l'extérieur. Le sulfate de calcium va réagir à son tour avec les phases aluminates du ciment pour former de l'ettringite secondaire (expansive) ce qui cause la perte de masse de mortier en ou le béton en contact avec de l'acide sulfurique (Kamel 2021; Benkaddour, Aoual, et Semcha 2009; Laoufi et al. 2016) et (Kannan et Ganesan 2014a; 2014b; Monteny et al. 2000). En général, les additions minérales par effet de dilution, pouzzolanique ou hydraulique, réduisent considérablement la quantité de portlandite en fonction du taux de substitution, ce qui améliore leur capacité à résister aux attaques acides.

Dans le cas du métakaolin, cela dépend de sa réactivité, car il contient d'importantes phases d'aluminates susceptibles de réagir avec le gypse formé par la réaction de la portlandite avec l'acide sulfurique. Un métakaolin à forte réactivité consommera une proportion très élevée de portlandite pour empêcher sa réaction avec l'acide, réduisant ainsi la possibilité que les aluminates réagissent à leur tour. Des auteurs tels que (Kamel 2021) et d'autres (Kannan et Ganesan 2014; Monteny et al. 2000), ont montré que le métakaolin a un impact négatif sur l'attaque acide, alors que d'autres tels que (Tameghe 2022; Ramadji 2022) et bien d'autres ont montré son apport capital en présence d'acide sulfurique.

I.3.3.4 Diffusion des ions chlorure

La diffusion des fluides dans les matériaux est un processus lent, régi par la porosité du matériau. Naturellement, un matériau moins poreux est plus difficile à pénétrer pour le fluide. Par conséquent, les ajouts minéraux augmentant la porosité des matériaux cimentaires, réduisent probablement leur capacité à résister à la diffusion des fluides. La diffusion dans les matériaux est influencée par divers paramètres, et pas seulement par la porosité. D'autres

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

facteurs tels que le rapport eau/liant, la température, la compacité et les additifs utilisés jouent également un rôle dans l'influence de la diffusion (Mezouar Mohamed et Rachid 2013) . Par exemple, les additifs minéraux tels que le laitier granulé et les cendres volantes ont des coefficients de diffusion inférieurs à ceux du ciment sans additifs (Luping 2003). D'autre part, l'ajout de poussière de granit augmente le coefficient de diffusion, tandis que le métakaolin le diminue (Ramadji 2022). (Ramadji 2022) a montré qu'avec 30 % de poussière de granit, la profondeur de pénétration passait de 15 à 35 mm après 28 jours de durcissement et 60 jours d'exposition au chlorure. (Sawadogo 2017) dans ces études indique que le mâchefer n'influence pas significativement le processus de diffusion des ions chlorure. Elle note une légère augmentation pour une substitution allant à 15% et une légère diminution pour le ciment contenant 20% de mâchefer. (Perreault-Chabot 2010) a mis en évidence l'effet de la température et du rapport E/C sur la diffusion. Ces résultats ont montré qu'après 6 mois d'immersion dans une solution de NaCl avec un E/C = 0,45, à 5°C la profondeur de pénétration était de 30mm et à 40°C de 45mm, tandis qu'à E/C = 0,65 la profondeur passait de 53mm à 65mm. (Touil et al. 2017) a également montré que la profondeur de diffusion augmentait avec le rapport W/C. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte différents facteurs lors de l'analyse de la diffusion dans les matériaux.

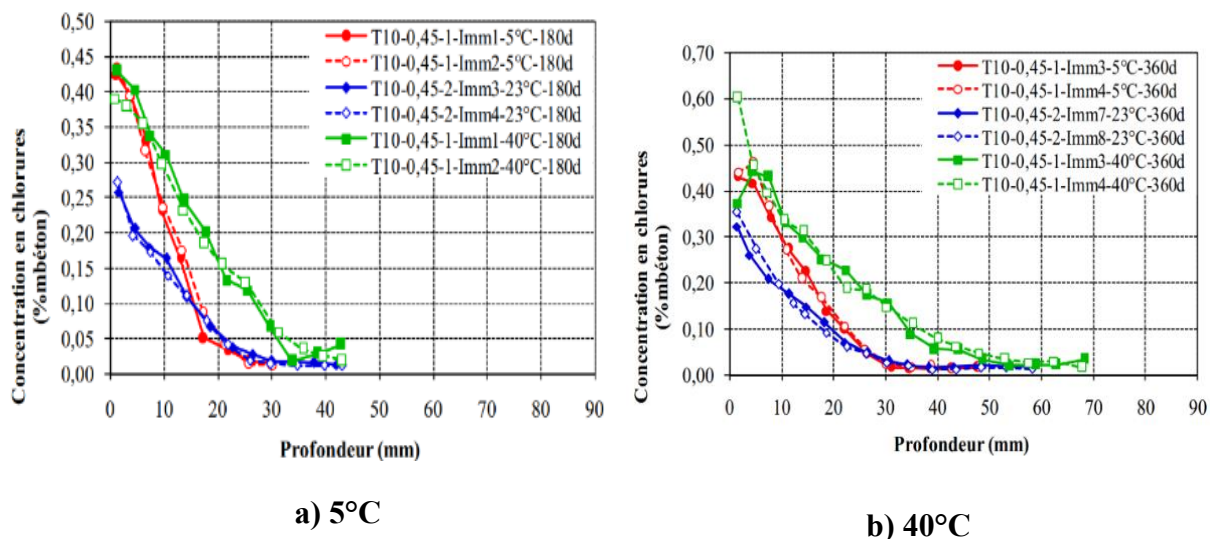


Figure 7 : Profondeur et diffusion des ions chlorures avec E/C = 0.45 (Perreault-Chabot 2010)

Conclusion partielle

Ce chapitre a abordé les aspects généraux du ciment et l'impact des additions minérales sur les propriétés du ciment. La littérature a montré que l'incorporation d'addition dans le ciment présente divers avantages, notamment la réduction des émissions de carbone, l'amélioration des performances mécaniques et l'accroissement de la durabilité. Cependant, chaque addition a ses limites. Il est néanmoins possible de combiner plusieurs additions minérales pour créer des ciments à haute performance et à faible teneur en carbone. Cette approche permet aux matériaux cimentaires supplémentaires de se compléter et de compenser leurs faiblesses respectives. Outre les propriétés chimiques et physiques, la finesse des additions minérales est également un facteur important. Cette étude se concentre sur le métakaolin et le laitier de haut fourneau, qui ont tous deux montré des résultats prometteurs dans l'amélioration des propriétés du ciment. Le métakaolin possède d'excellentes qualités à tous égards, à l'exception d'une forte demande en eau. Il est facilement disponible, mais sa production nécessite une énergie considérable. L'idée est donc de réduire l'utilisation du métakaolin en incorporant du laitier de haut fourneau, qui possède des propriétés remarquables et peut rendre le processus de fabrication du ciment plus respectueux de l'environnement. Le prochain chapitre abordera la procédure expérimentale pour la réalisation des tests liés à cette étude.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Introduction

Les matériaux faisant l'objet de notre recherche vont subir plusieurs séries d'essais pour évaluer dans quelle mesure ces derniers pourraient être utilisés en substitution du ciment. Le présent chapitre a pour objet de présenter ces différents matériaux d'une part et d'autre le protocole expérimental.

II.1 Matériaux

II.1.1 Le Ciment

Le ciment utilisé pour notre recherche est un CEM I 42.5 R fourni par CIMFASO, une cimenterie locale basée dans la ville de Ouagadougou, plus précisément dans la zone industrielle de Kossodo. Le ciment a une surface spécifique de Blaine de $3944 \text{ cm}^2/\text{g}$.



Figure 8 : Clinker (CEM I)

II.1.2 Le métakaolin

Le métakaolin est produit par la calcination à 700°C de la kaolinite de Saaba dans la ville de Ouagadougou. La kaolinite a d'abord été tamisée avec un tamis de $80 \mu\text{m}$. Le métakaolin a une densité absolue de 2.63 et une surface spécifique de $12330 \text{ cm}^2/\text{g}$.



Figure 9 : Le métakaolin

II.1.3 Le laitier haut fourneau

Le laitier de haut fourneau a été fourni par CIM METAL, une entreprise sidérurgique basée à Kossodo dans la zone industrielle de Ouagadougou. C'est un laitier cristallisé finement broyé et tamisé au tamis de 80 μm .



Figure 10 : Le laitier haut fourneau

II.1.4 Le sable

C'est un sable de rivière soigneusement lavé d'une granulométrie de 0/5mm. L'analyse granulométrique effectuée sur ce sable nous donne un module de finesse de 2,63 ; ce qui est bon pour le béton ou le mortier.

II.1.5 L'adjuvant (le super plastifiant)

Pour assurer une bonne ouvrabilité et maintenir le rapport eau/liant constant, un fluidifiant a été utilisé : Sika Cem Fluidifiant conforme à la norme NF EN 934-2 tab 3.1 et 3.2, reconnu pour son fort pouvoir réducteur d'eau.

Tableau VII : Caractéristique du super plastifiant

Caractéristique	forme/couleur	densité	Ph	cl ⁻	Na ₂ O	extrait sec
SikaCem	liquide brun foncé	1,150 ±0,03	7,5±1	< 0,1%	< 6%	32,5 ±1,6%
Dosage : 0,1 à 5% du poids de liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées						

II.2 Procédure expérimentale

II.2.1 Elaboration des ciments

Dans un premier temps, le CEM I est remplacé jusqu'à 25% par le laitier (ciment binaire) dans des proportions (10 ; 15 ; 20 et 25%). Pour le ciment ternaire, nous commencerons par un ciment binaire de composition 70 % de CEM I et 30 % de métakaolin. On remplacera ensuite partiellement le métakaolin par du laitier jusqu'à 25%, comme dans le cas du ciment binaire au laitier. Les différentes formulations de ciment binaire et ternaire utilisées dans l'étude sont présentées dans le tableau

Tableau VIII : Compositions du ciment binaire et ternaire

Nomenclature	Constituants
0	100% de CEM I
10	90% CEM I + 10% Laitier (L)
15	85% CEM I + 15% Laitier(L)
20	80% CEM I + 20% Laitier(L)
25	75% CEM I + 25% Laitier(L)
30 : 0	70% CEM I + 30% Métakaolin(M)
20 :10	70% CEM I + 20% Métakaolin(M) + 10% Laitier(L)
15 :15	70% CEM I + 15% Métakaolin(M) + 15% Laitier(L)
10 :20	70% CEM I + 10% Métakaolin(M) + 20% Laitier(L)
5 :25	70% CEM I + 5% Métakaolin(M) + 25% Laitier(L)

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

Tableau IX: Quantités de matériaux utilisés

Formule	Ciment (g)	M (g)	L(g)	Sable (g)	Eau (g)	SP (g)
0	450	-	-	1350	225	3.375
10	405	-	45	1350	225	3.375
15	382.5	-	67.5	1350	225	3.375
20	360	-	90	1350	225	3.375
25	337.5	-	112.5	1350	225	3.375
30 : 0	315	135	-	1350	225	3.375
20 :10	315	90	45	1350	225	3.375
15 :15	315	67.5	67.5	1350	225	3.375
10 :20	315	45	90	1350	225	3.375
5 :25	315	22.5	112.5	1350	225	3.375

Les différentes formulations de mortier sont réalisées selon la norme EN 196-1. Différents ratios de $E/L = 0.5$, $S/L = 3$ et $Sp/L = 0.75\%$ ont été utilisés, maintenant les masses constantes. Les quantités respectives des matériaux ont été présentées dans les tableaux. Le mortier a été introduit en deux couches dans de moule prismatique de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, en utilisant l'appareil a choc pour donner 60 coups par couche pour assurer un bon serrage. Ensuite, le mortier a été stocké dans un local à température fixée à 20°C et couvert pour éviter l'évaporation de l'eau. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et stockés dans de l'eau dans les mêmes conditions jusqu'à la maturation.

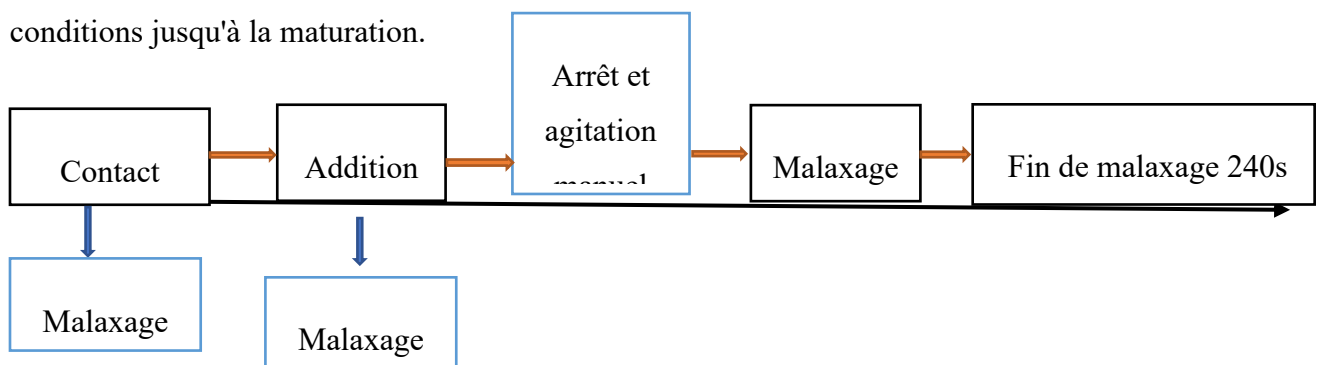


Figure 11: Opération de malaxage du mortier frais

II.2.2 Caractérisation du ciment

II.2.2.1 Propriétés physiques du ciment (à l'état frais)

Le test de consistance normale est réalisé pour déterminer la quantité optimale d'eau pour mélanger le ciment afin d'obtenir une pâte de consistance "normale". La procédure d'essai est décrite dans la norme (EN 196-3, 2009). L'essai consiste à préparer une pâte de ciment et à évaluer sa résistance à la pénétration d'une aiguille normalisée, à l'aide de l'appareil de Vicat. La consistance normale est atteinte dès lors que la distance entre la limite de la sonde et le fond de la plaque (sur laquelle est placée la pâte) est égale à 6 ± 1 mm après 30s.

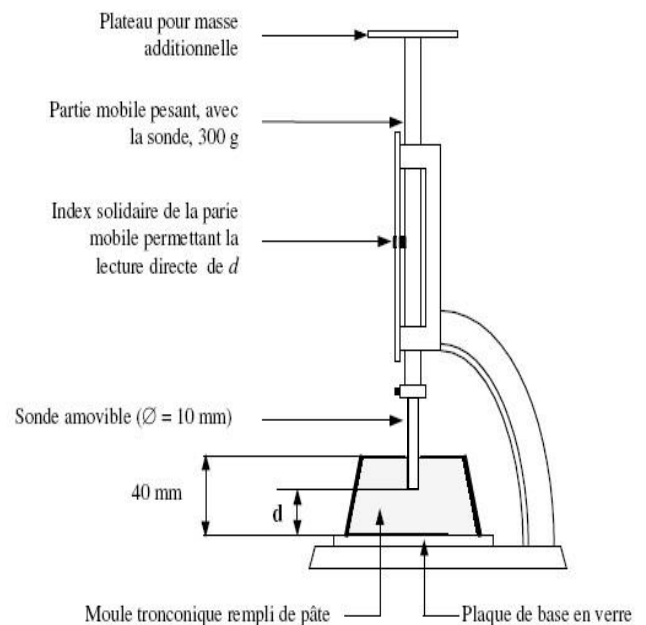


Figure 12: Appareil de Vicat

❖ Temps de prise

L'essai de temps de prise comporte deux périodes : le début de la prise et la fin de la prise. L'essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat et d'une aiguille de $1,13 \pm 0,05$ mm de diamètre. Une pâte de ciment de consistance normale est préparée et placée dans un moule sur une plaque. A intervalles réguliers, la pénétration de l'aiguille dans la pâte est mesurée sans appliquer de force ou de vitesse initiale. Le début de la prise est atteint lorsque la distance entre l'aiguille et la plaque est de 4 ± 1 mm. Une fois le début de prise atteint, le moule est retourné et la pénétration de l'aiguille est à nouveau mesurée dans les mêmes conditions. La fin de la prise est

atteinte lorsque l'aiguille n'est plus qu'à 0,5 mm de profondeur. Ce test permet de déterminer le temps de traitement disponible avant que le béton ou le mortier ne commence à durcir.

❖ **Affaissement mini-cône**

Le test d'affaissement mini-cône d'Abram, également connu sous le nom de test mini-cône, est une variante du test d'affaissement cône d'Abram, utilisé pour mesurer la consistance et l'ouvrabilité du béton frais. Il est particulièrement adapté aux bétons de petite taille ou les mortiers. Cet essai est décrit par la norme (NF EN 12350-2).

Plus l'affaissement est important, plus le béton est fluide. Un affaissement compris entre 10 et 20 mm est généralement considéré comme acceptable pour la plupart des applications. Un affaissement inférieur à 10 mm indique un béton ou un mortier rigide et difficile à travailler. Un affaissement supérieur à 20 mm indique un béton fluide et facile à couler.

II.2.2.2 Propriétés mécaniques

❖ **La résistance à la compression**

L'essai de résistance à la compression est effectué sur des mortiers durcis (éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm³) après des périodes de durcissement de 2, 28 et 90 jours. Les mortiers durcis sont retirés de la cuve d'eau saturée en chaux 24 heures avant les essais mécaniques. Tout d'abord, un essai de flexion trois points (3 éprouvettes par formulation) et un essai de compression (6 demi-éprouvettes par formulation) sont réalisés sur une presse à mortier automatisée conformément à la norme (EN 196-1 206). Ainsi, la résistance à la compression à l'âge considéré est la moyenne obtenue à partir des six résultats de chaque demi-prisme.

$R_c = \frac{F_c}{b^2}$ R_c , la résistance à la compression, F_c , la force de compression et b la base de l'éprouvette.

❖ **Indice d'activité mécanique**

L'indice d'activité mécanique (IA) est une mesure importante pour les additions minérales, indiquant le taux d'utilisation idéal pour obtenir une résistance élevée à la compression. Il fournit également le taux d'utilisation maximal d'un ajout minéral tel que défini dans la norme (ASTMC618-05 2005). Selon cette norme, l'IA doit être d'au moins 75 % après 28 jours de

durcissement. C'est le rapport entre la résistance à la compression des différentes substitutions et la résistance à la compression du mortier témoin à 100% de ciment.

$$I = \frac{R_i}{R_0} \text{ avec } R_0 \text{ la résistance du ciment témoin et } R_i \text{ la résistance du ciment avec ajout.}$$

II.2.2.3 Indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité étudiés sont : la porosité accessible à l'eau dont l'essai permet de calculer la masse volumique apparente des mortiers durcis, l'absorption d'eau par capillarité, l'attaque à l'acide sulfurique et la diffusions aux ions chlorure.

❖ Porosité accessible à l'eau

Le test de la porosité accessible à l'eau a été réalisé selon la norme (ASTM C642 2008). Avant le test, les échantillons ont été séchés à 60°C jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse constante (la variation entre deux pesées successives espacées de 24 heures doit être inférieure à 0,5%). Ensuite, ils ont été immergés dans l'eau pendant 24 heures pour saturer les pores accessibles. Les échantillons saturés ont été pesés dans l'eau et dans l'air, et la porosité a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$P (\%) = 100 * \left(\frac{M_{air} - M_{sèche}}{M_{air} - M_{eau}} \right)$$

Avec M_{air} : masse de l'échantillon saturé pesée dans l'air, M_{eau} : masse de l'échantillon saturé, pesée dans l'eau $M_{sèche}$: masse de l'échantillon sec.

La masse volumique apparente s'obtient également avec cet essai par la formule suivante :

$$M_{vap} = \frac{M_{sèche}}{M_{air} - M_{eau}}$$

❖ Absorption d'eau par capillarité

Le test de l'absorption capillaire est décrit par la norme (AFPC-AFREM) et vise à évaluer la capacité d'absorption des matériaux en contact avec l'eau. Les échantillons ont été séchés jusqu'à une masse constante à 60°C. Ensuite, ils ont été pesés et leurs masses sèches enregistrées. Les côtés des échantillons ont été scellés avec du silicone pour empêcher l'absorption latérale ou l'évaporation. Les échantillons ont ensuite été immergés dans l'eau

jusqu'à une hauteur de 3 mm. Des pesées successives ont été effectuées à des intervalles de temps prédéfinis ; 0,25h, 0,5h, 1h, 2h, 4h, 8h, 12h et 24h, et le coefficient d'absorption capillaire a été calculé à chaque pesée par la formule suivante : $C_a = \frac{M_t - M_0}{A}$

Avec C_a (kg/m^2) : coefficient d'absorption capillaire, M_t (kg) : masse de l'échantillon à un moment donné, M_0 : masse sèche de l'échantillon, A (m^2) : surface de la section transversale de l'échantillon en contact avec l'eau

❖ Résistance à l'attaque acide (acide sulfurique)

Le test de résistance à l'attaque acide évalue la dégradation d'échantillons de mortier en les immergeant dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à une concentration de 5% du volume d'eau, maintenue constante par ajustement du pH. L'objectif de ce test est de simuler une attaque chimique sur les structures. Après le temps de durcissement (28 ou 90 jours) dans l'eau, les échantillons sont retirés de l'eau, pesés et immergés immédiatement dans la solution acide, puis retirés à des intervalles de 2, 7, 14 et 28 jours. Ils sont ensuite rincés, laissés au repos pendant 30 minutes et pesés à nouveau. La perte de masse est utilisée pour évaluer les dommages causés par l'acide.

$$\text{Perte de masse (\%)} = 100 * \left(\frac{M_0 - M_t}{M_0} \right)$$

Avec M_0 la masse initiale et M_t : la masse à l'échéance donné. Une fois la perte de masse évaluée, les échantillons sont soumis à un test de résistance à la compression pour calculer leur résistance résiduelle.

❖ Diffusion des ions chlorure

Le test de diffusion des ions évalue l'étendue de la pénétration des ions chlorure dans les mortiers et de calculer le coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de la profondeur de pénétration. Ceci est important car les ions chlorure peuvent déclencher le processus de corrosion des armatures. Pour réaliser le test, les échantillons sont coupés en deux et saturés dans une solution 0,1M de NaOH pendant 48 heures, après quoi ils sont recouverts de silicone pour empêcher l'évaporation et la diffusion. Il est à noter que la solution de NaOH a été préparée et laissée en place pendant 24 heures avant le trempage des échantillons. Ceci afin de garantir une solution homogène et d'éviter d'endommager les échantillons en raison du dégagement de chaleur de la solution de NaOH. Les échantillons sont ensuite immergés dans une solution de

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

NaCl 0,5M et de NaOH 0,1M pendant 28 ;60 et 90 jours. A chaque échéance, la couche de silicone est enlevée et les échantillons sont sciés en deux. Une solution de nitrate d'argent est alors pulvérisée sur les côtés coupés en deux pour mesurer la profondeur de pénétration des ions chlorure. En déterminant les profondeurs de pénétration, le coefficient de diffusion peut être calculé à l'aide d'une équation suivante :

$$C_d(m^2/s) = \frac{X_t^2}{4t}$$

C_d (m^2/s) est le coefficient de diffusion de l'ion chlorure, X_t (m) est la profondeur de diffusion mesurée au temps t , t (s) est le temps d'immersion de l'échantillon dans la solution de NaCl.



Figure 13 : Essais de diffusion des ions chlorure

Conclusion

Les matériaux et les procédures expérimentales ont été présentés dans ce chapitre. Dans l'ensemble, ces essais fournissent des informations précieuses sur les propriétés du mortier, la résistance mécanique et la durabilité. Les résultats de ces essais, qui seront présentés dans le chapitre suivant, serviront de guide pour prendre des décisions éclairées sur la performance et l'adéquation des ciments de laitier et des ciments ternaires composés de ciment + métakaolin +

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de présenter, d'analyser et interpréter les résultats des différents essais évoquer au chapitre précédent. Ce chapitre va nous permettre de conclure si les objectifs fixés sont atteints ou non.

III.1 Propriétés physiques (à l'état frais)

III.1.1 Consistance normale

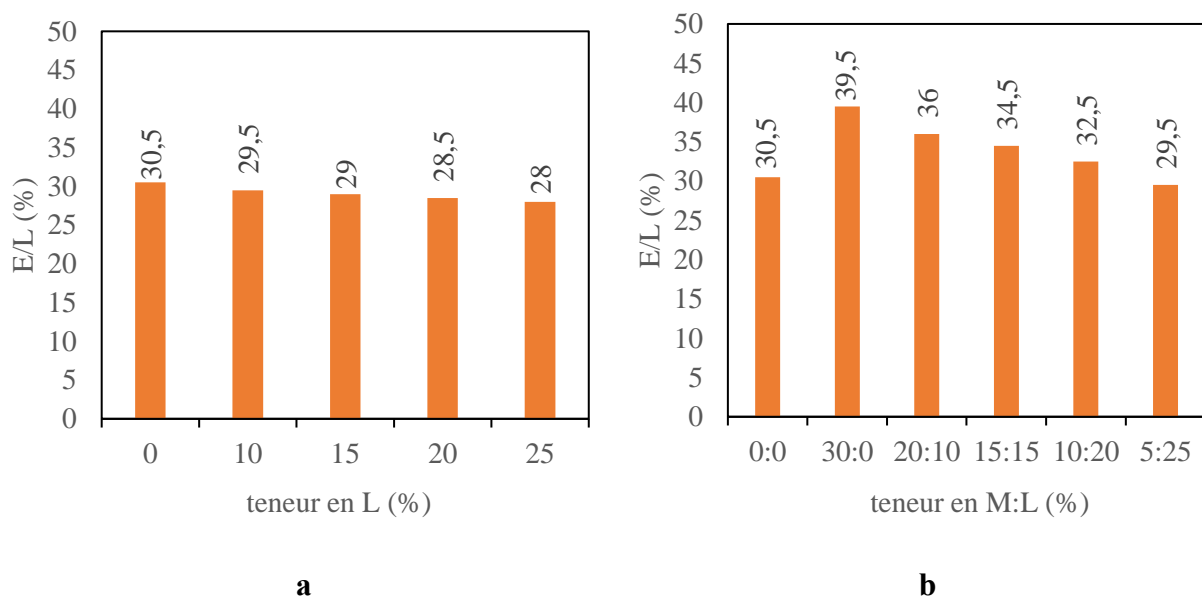


Figure 14 : Consistance normale des ciments binaires (a) et des ciments ternaires (b)

La Figure 14a montre que lorsque la teneur en laitier augmente, le rapport eau/liant (E/L) diminue, mais la réduction de la demande en eau n'est pas significative. Elle est de l'ordre de 8% pour une substitution de 25% de ciment par le laitier. Plusieurs auteurs ont indiqué que pour un même rapport E/L, le laitier augmente l'ouvrabilité des mortier (Tattersall et Banfill 1983; Zhao et al. 2015 ; Bouglada et al 2019). Le laitier utilisé est un laitier cristallisé (inerte) qui, par son effet de remplissage, améliore la compacité du mélange en comblant les interstices entre les particules. Cela libère l'eau qui était initialement nécessaire pour remplir ces vides, améliorant ainsi la fluidité et diminuant la consistance normale

Dans la Figure 14b, la substitution de 30 % du CEM I par le métakaolin augmente de 29 % de la demande en eau. Cette augmentation de la demande en eau s'explique par la finesse et la

surface spécifique élevées du métakaolin, qui nécessite plus d'eau pour obtenir une pâte de consistance donnée (Ramadji 2022; Ismael 2019; Kamel 2021). De plus, des études ont montré que le métakaolin a une structure en feuillet (Perlot et Rougeau 2007) ce qui justifie encore davantage sa forte consommation d'eau. Le remplacement partiel du métakaolin dans le système ternaire par du laitier réduit la consommation d'eau par rapport au ciment binaire avec le métakaolin. Cependant, la demande en eau des ciments ternaires reste supérieure à celle du ciment de référence (CEM I), sauf dans le cas d'une substitution de 25 %.

III.1.2 Temps de prise

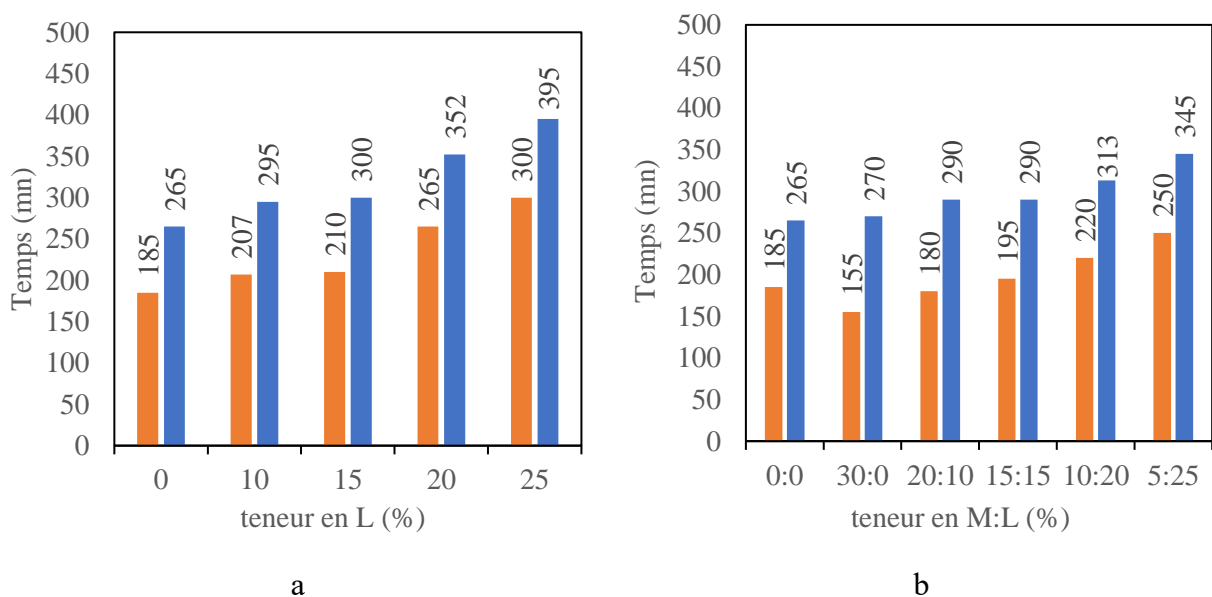


Figure 15 : Temps de début et fin de prise des ciments binaires (a) et ternaires (b)

Les résultats présentés dans la **Figure 15** montrent que l'ajout de minéraux affecte le temps de prise du ciment. Lorsque le laitier est ajouté (**Figure 15a**), le temps de prise est retardé par rapport au ciment de référence. Ce retard augmente avec le pourcentage de substitution du laitier. Par exemple, avec une substitution de 25 %, le retard est de 115 minutes, tandis qu'avec une substitution de 15 %, le retard est de 25 minutes. Ce retard est attribué à la perturbation et au ralentissement du processus d'hydratation induit par le laitier (Fatma Zohra Melais 2016; Moula 2023). En effet, le laitier, avec sa structure cristalline, a besoin de plus de temps pour réagir avec l'eau. De plus, le remplacement du ciment par du laitier dilue le C₃S et C₂S (les principaux composants du CEM I) responsables de la prise du ciment. Par conséquent l'hydratation est ralentie et le temps de début de prise se trouve prolongé.

La **Figure 15b** indique une prise précoce et un temps de prise plus long que le ciment de

référence avec 30% de métakaolin comme substitut du ciment (temps de prise : 115mn pour 30% de métakaolin contre 80mn pour le ciment de référence). Le métakaolin accélère le processus d'hydratation par son activité pouzzolanique rapide (Ramadji 2022; Mokhtar et Oukil 2016). La prise précoce est aussi due à la finesse du métakaolin. En effet ses fines particules constituent des sites de nucléations durant l'hydratation (Ramadji 2022). Certains facteurs tels que la formation plus lente des produits secondaires (C-S-H) pourraient prolonger le temps de prise final même si le temps de prise initial a été réduit.

La substitution du métakaolin par le laitier retarde la prise des ciments ternaires par rapport au ciment avec le métakaolin. Le retard est proportionnel au taux de laitier (un retard de 95mn est observé avec 25% de laitier). Néanmoins, le retard de prise est moindre par rapport au CEM I (65mn pour 25% de laitier). Dans les ciments ternaires, le métakaolin avec son effet accélérateur de prise permet d'atténuer l'effet retardateur de prise du laitier (avec 10 et 15 % de substitution le temps de début de prise est sensiblement égal au temps de début de prise du CEM I).

III.1.3 Affaissement au mini cône

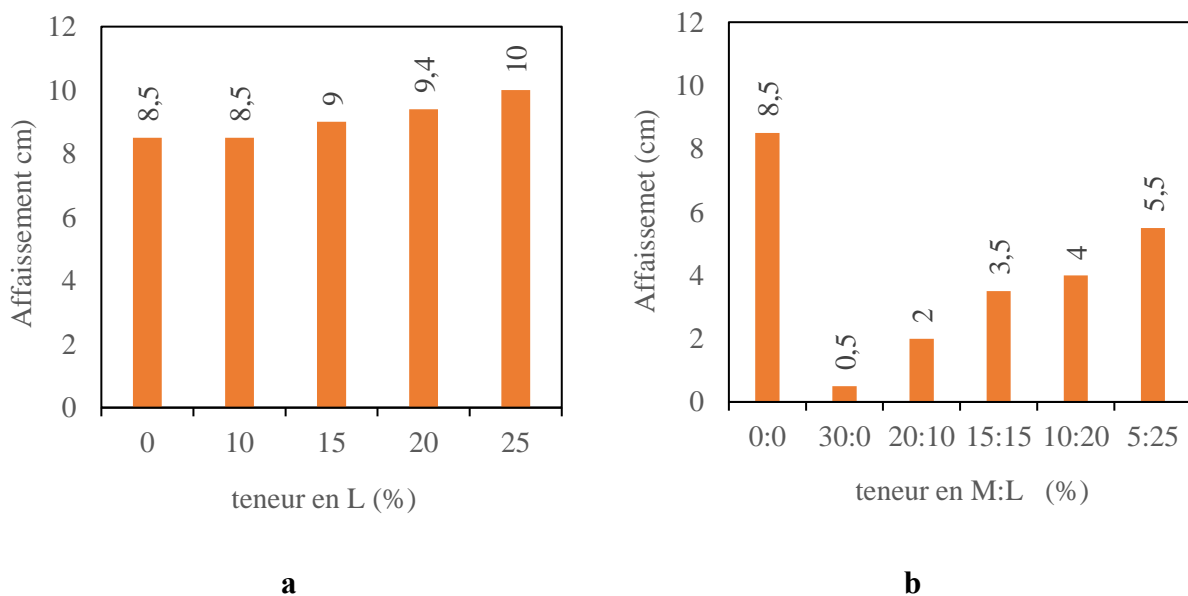


Figure 16 : Affaissement au mini cône des ciments binaires (a) et ciment ternaire (b)

Les résultats (**Figure 16**) montrent les mesures d'affaissement par mini-cône. Pour les ciments binaires (**Figure 16a**), il y a une légère augmentation de l'ouvrabilité. Pour une substitution de 25 %, l'augmentation est de 15 %. Ce test confirme que le laitier n'a pas d'influence significative sur la demande en eau des ciments binaires.

Dans la **Figure 16b**, le laitier augmente l'ouvrabilité : moins il y a de métakaolin, plus le mortier est ouvrable. Cependant, même avec une réduction de 25 % du métakaolin, l'ouvrabilité du ciment ternaire est toujours réduite par rapport au ciment de référence. Cette réduction est de 35 %.

III.2 Propriétés mécaniques

III.2.1 Résistance à la compression

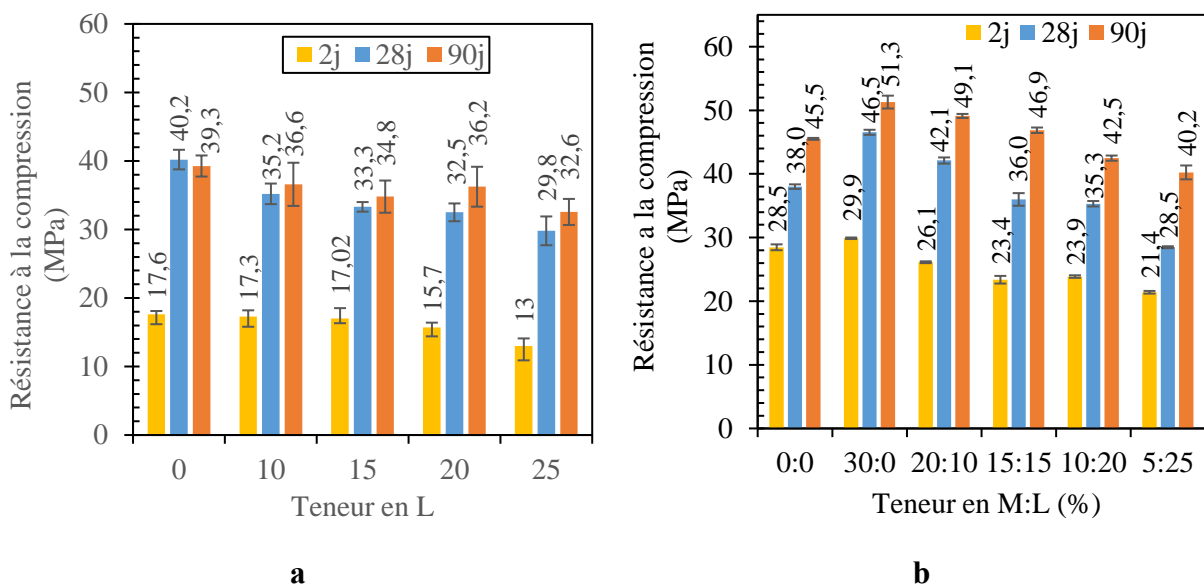


Figure 17 : Résistance à la compression des ciments binaire (a) et ternaire (b)

Figure 17 : Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente avec l'âge pour tous les ciments.

Pour les ciments binaires (a), la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier, indépendamment du temps de cure. En outre, la résistance à la compression diminue à 29,8 MPa lorsque la teneur en laitier augmente à 25 %, par rapport à la référence (40,2 MPa), ce qui correspond à une diminution de 27 % à 28 jours. D'autre part, la réduction est de 17 % à 90 jours, ce qui montre une légère augmentation de la résistance à la compression à 90 jours pour les ciments binaires. Des auteurs comme Melais (2016) a constaté une diminution de la résistance à la compression avec le laitier cristallisé. La régression de la résistance peut être attribuée à la perturbation et au ralentissement du processus d'hydratation causés par l'augmentation de la teneur en laitier cristallisées. Par ailleurs en remplaçant le ciment par du laitier cristallisé, le mélange ciment-laitier est appauvri en C_3S et C_2S qui sont

responsables de la formation de C-S-H, réduisant ainsi la résistance à la compression justifiée par le ralentissement de la prise. Il est important de noter que le laitier cristallisé est chimiquement stable et a un pouvoir hydraulique limité. L'augmentation de la résistance observée à 90 jours pour le ciment additionné de laitier, allant de 4 % à 8 % pour différentes teneurs en laitier, peut s'expliquer par la faible réactivité hydraulique lente qui devient apparente à long terme.

Figure 17b, l'ajout de 30% de métakaolin améliore la résistance à la compression par rapport au ciment témoin à tous les âges considérés. Au bout de 28 jours, l'augmentation est de 22%, contre 27 % observé dans les travaux de Ramadji (2022). Pour une substitution de 40 % (Cornac et al. 2006) a eu une amélioration de 43 % par rapport au ciment de référence. Ismael (2019) a également montré que l'ajout de 30 % de métakaolin conduit à de meilleures résistances. Le métakaolin est un matériau à forte réactivité pouzzolanique. La réaction entre la silice amorphe du métakaolin et la portlandite libérée par les C_3S et C_2S entraîne la formation de C-S-H supplémentaires, ce qui améliore la résistance à la compression. De plus, cette performance mécanique peut être attribuée à la finesse élevée du métakaolin. En effet les particules fines du métakaolin constitue des sites de nucléation pendant l'hydratation (Ramadji 2022) et accélère la prise, ce qui peut conduire à des résistances mécaniques plus élevées que le ciment sans ajout.

Le remplacement du métakaolin dans le système ternaire par du laitier réduit la résistance proportionnellement au taux de substitution de 2 à 90 jours. Tous les ciments ternaires présentent des résistances à la compression inférieure au ciment binaire contenant 30% de métakaolin. Cependant, le système ternaire avec 20 % de métakaolin et 10 % de laitier présente de meilleures résistances que le ciment de référence à 28 jours. En outre, le ciment de référence présente des performances légèrement supérieures à celles des systèmes ternaires (15 :15, 10 :20), à l'exception du système (5 :25), que le CEM I surpasse de 25 % à 28 jours. A 90 jours, le système 15 :15 présente une meilleure résistance que le ciment de référence, alors que ce dernier reste légèrement supérieur aux formules 10 :20 et 5 :25. La diminution de la résistance à la compression des ciments ternaire est liée à l'ajout du laitier qui est quasi inerte. Le laitier diminue le C-S-H du ciment durci tandis que le métakaolin les augmente au fil du temps. La meilleure performance mécanique présentée par certains ciments ternaires est due à l'activité pouzzolanique du métakaolin et de sa finesse. Elle est également liée à l'interaction métakaolin-laitier.

III.2.2 Indice d'activité mécanique

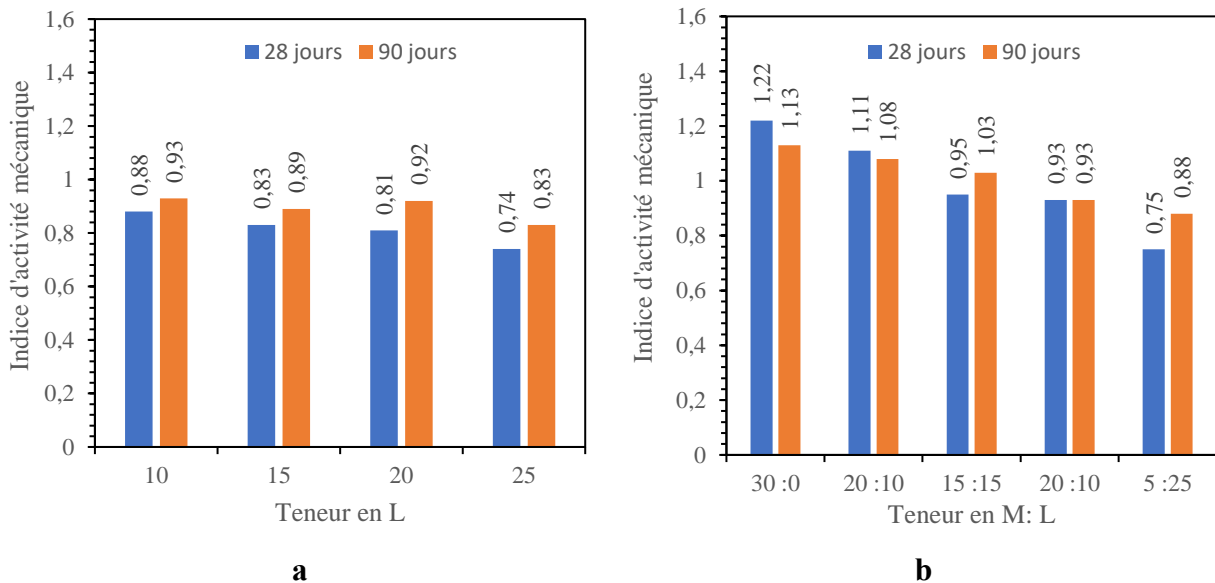


Figure 18 : Indice d'activité mécanique pour ciments binaires (a) et ternaire (b)

L'analyse de la **Figure 18a** montre que l'IAM diminue lorsque la quantité de laitier incorporée augmente, tant à 28 qu'à 90 jours. Cependant, l'IAM est plus élevée à 90 jours qu'à 28 jours, indiquant ainsi une augmentation à long terme de l'IAM en présence du laitier.

La **Figure 18b** indique aussi une diminution de l'IAM lorsque le laitier remplace partiellement le métakaolin tant à 28 qu'à 90 jours. Toutefois, toutes les formules ternaires testées restent utilisables en tant que ciment car leur IAM à 28 jours demeure supérieure ou égale à 75 %.

En se basant sur la résistance à la compression, le laitier est utilisable comme addition cimentaire à hauteur de 20 %. Ce pendant tous les ciments ternaires testés sont des formules viables. Pour obtenir les meilleures performances mécaniques et une quantité réduite de métakaolin, il est recommandé d'utiliser un ciment ternaire avec 15 % de métakaolin remplacé par du laitier.

III.3 Indicateur de durabilité

Tout comme la résistance mécanique, la durabilité est une propriété essentielle du ciment pour certaines applications. Les indicateurs de durabilité étudiés dans le cadre de notre travail sont : la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau par capillarité, l'attaque par l'acide sulfurique et la diffusion des ions chlorure.

III.1.1 Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente

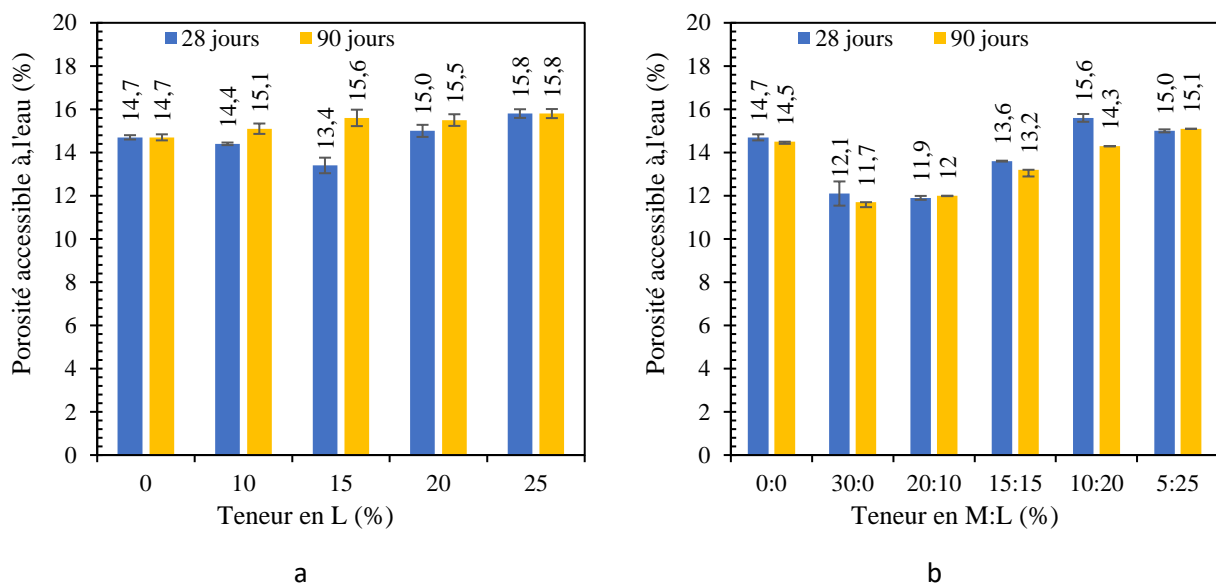


Figure 19 : Porosité accessible à l'eau des ciments binaires (a) et du ciment ternaires (b)

Pour les ciments binaires, on constate qu'à 28 jours comme à 90 jours, la porosité augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en laitier, à l'exception de 10 et 15% de laitier qui présente des valeurs plus faibles à 28 jours. L'augmentation est de l'ordre de 6,96 % pour une substitution de 25 %. Il convient de noter que les valeurs de porosité sont approximativement les mêmes à 28 et 90 jours. Les résultats de la consistance normale (**Figure 14**) et de l'affaissement (**Figure 16**) montrent que la demande en eau du laitier est légèrement inférieure à celle du CEM I. Cependant nous utilisons un même rapport eau/liant ($E/L = 0,5$) pour tous les ciments, par conséquent en substituant le CEM I par le laitier avec un faible demande en eau, le rapport E/L finale augmente et crée une porosité supplémentaire.

L'incorporation de 30 % de métakaolin dans le ciment réduit considérablement la porosité du ciment à 28 et 90 jours, en raison de l'activité pouzzolanique du métakaolin (Ramadji 2022; Cornac et al. 2006). En effet la réaction pouzzolanique permet la formation des C-S-H

supplémentaires qui densifient la matrice cimentaire tout en réduisant la porosité. La grande finesse du métakaolin joue un rôle aussi sur la réduction de la porosité.

Dans le système ternaire, la porosité accessible à l'eau augmente avec la diminution de la teneur en métakaolin à tous les âges. Malgré l'augmentation de la porosité, toutes les ciments ternaires ont une porosité inférieure à celle du CEM I, à l'exception du système 10% métakaolin + 20% laitier qui a une porosité supérieure de 6% au témoin à 28 jours et du système 5% métakaolin + 25% laitier qui a une porosité de 2%. Le maintien de la porosité à des valeurs inférieures ou sensiblement égales à celles du ciment sans ajout est dû à l'activité pouzzolanique du métakaolin et de l'interaction métakaolin-laitier.

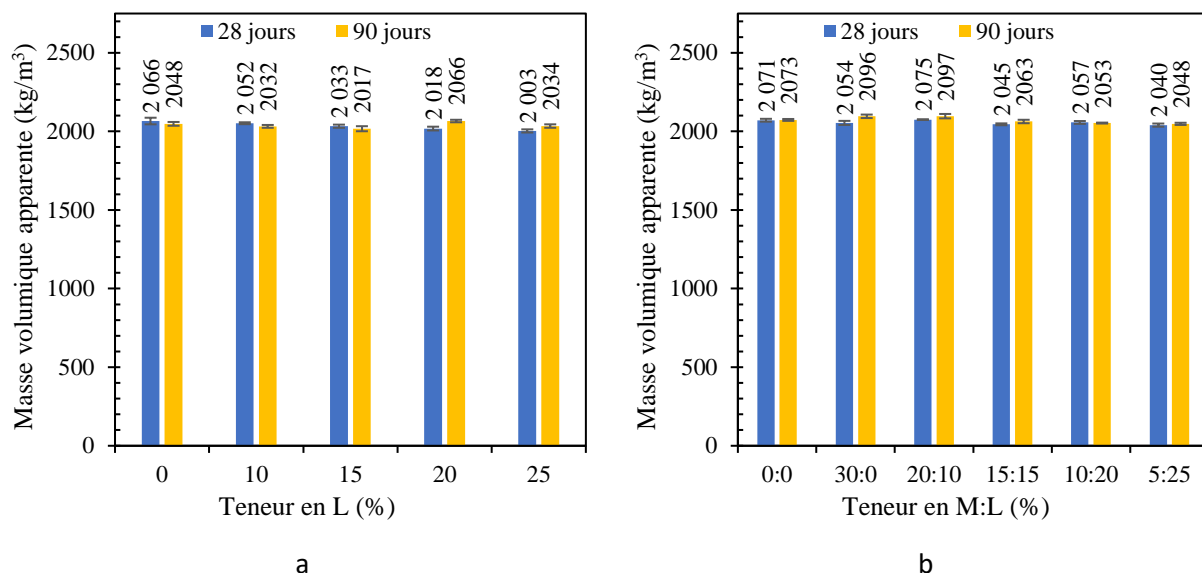


Figure 20 : Masse volumique apparente des ciments binaires (a) et ternaire(b)

La **Figure 20** montre les masses volumiques apparentes des différents ciments étudiés pour 28 et 90 jours de cure. Les résultats globaux montrent qu'il n'y a pas de différence appréciable de masse entre les différents ciments à 28 ou 90 jours. Les masses sont pratiquement identiques entre 28 et 90 jours. Ceci montre que le laitier et le métakaolin utilisés ici n'ont pas d'influence significative sur la densité du ciment.

III.1.2 Absorption d'eau par capillarité

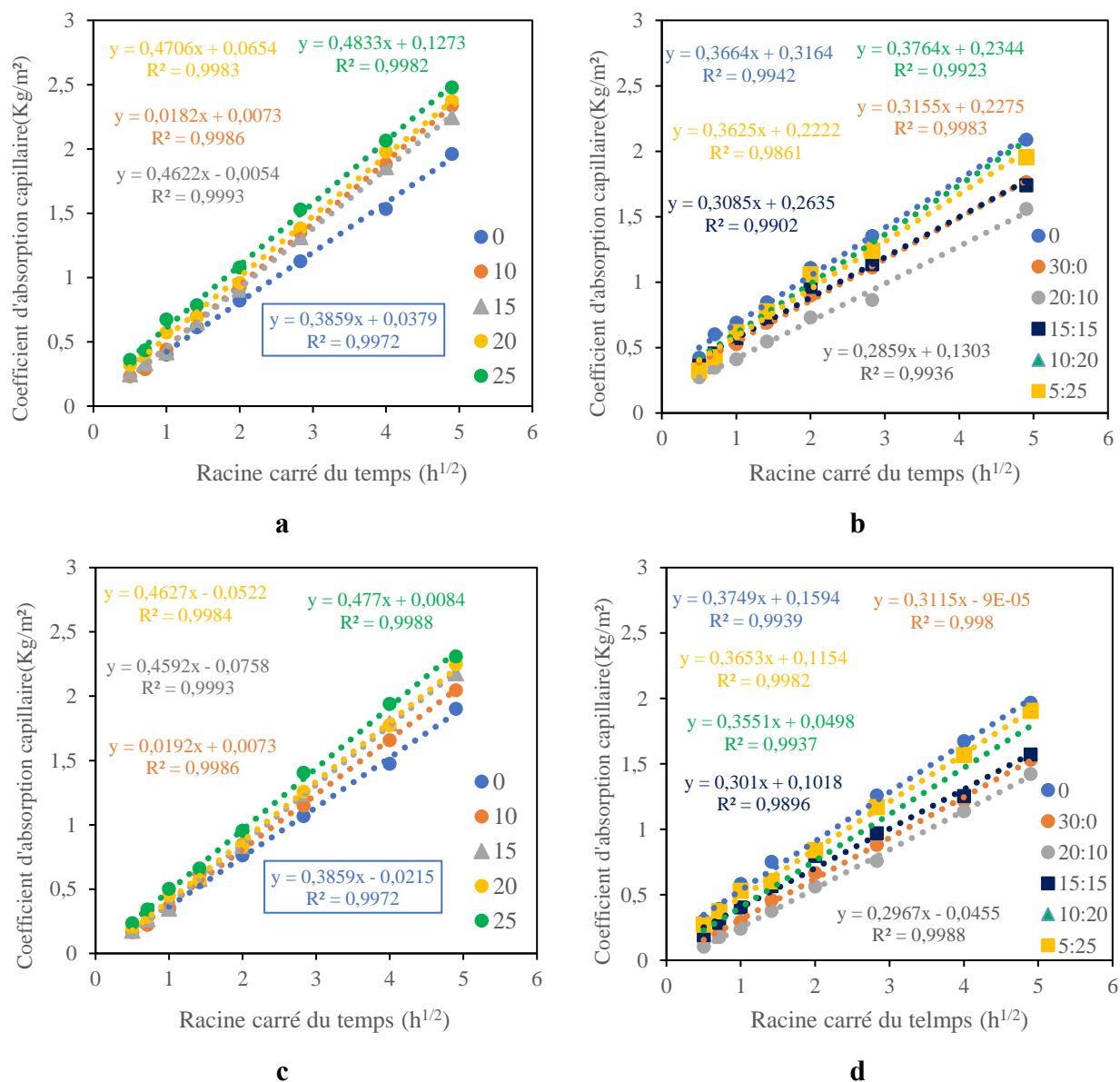


Figure 21: Absorption capillaire des ciments binaires (a et c) ternaires (b et d) pour 28 et 90 jours de cure

Tableau X: Absorption capillaire des ciments binaire et ternaires

Notation	Sorptivité (kg.m ⁻² .h ^{1/2})	Coefficient de corrélation R ²		Sorptivité (kg.m ⁻² .h ^{1/2})	Coefficient de corrélation R ²
	28jours			90jours	
0	0.3859	0.9972		0.3859	0.9972
10	0.0182	0.9986		0.0192	0.9986
15	0.4622	0.9993		0.4592	0.9993
20	0.4706	0.9983		0.4627	0.9984
25	0.4833	0.9982		0.477	0.9988
0 :0	0.3664	0.9942		0.3749	0.9939
30 :0	0.3155	0.9983		0.3115	0.998
20 :0	0.2859	0.9936		0.2967	0.9988
15 :15	0.3085	0.9902		0.301	0.9896
10 :20	0.3764	0.9923		0.3551	0.9937
5 :25	0.3625	0.9861		0.3653	0.9982

Pour le laitier, le coefficient d'absorption augmente en fonction du taux d'ajout et le temps pour 28 jours et 90jours de cure. Notons que l'absorption d'eau par capillarité est directement liée à la porosité. L'absorption d'eau par capillarité augmente lorsque la porosité est élevée donc cette augmentation peut être attribuée à la porosité plus élevée associée au laitier.

La substitution de 30 % du ciment par du métakaolin a réduit de manière significative le coefficient d'absorption d'eau par rapport au CEM I. Cette réduction est attribuée à la densification de la matrice cimentaire et à la réduction de la porosité causée par la réaction pouzzolanique du métakaolin. Les ciments ternaires présentent des coefficients d'absorption plus élevés que le ciment binaire contenant le métakaolin proportionnellement aux taux de substitution. Cependant ils présentent un coefficient d'absorption inférieur au CEM I imputable à l'influence du métakaolin.

III.1.3 Attaque à l'acide sulfurique

❖ **Perte en masse**

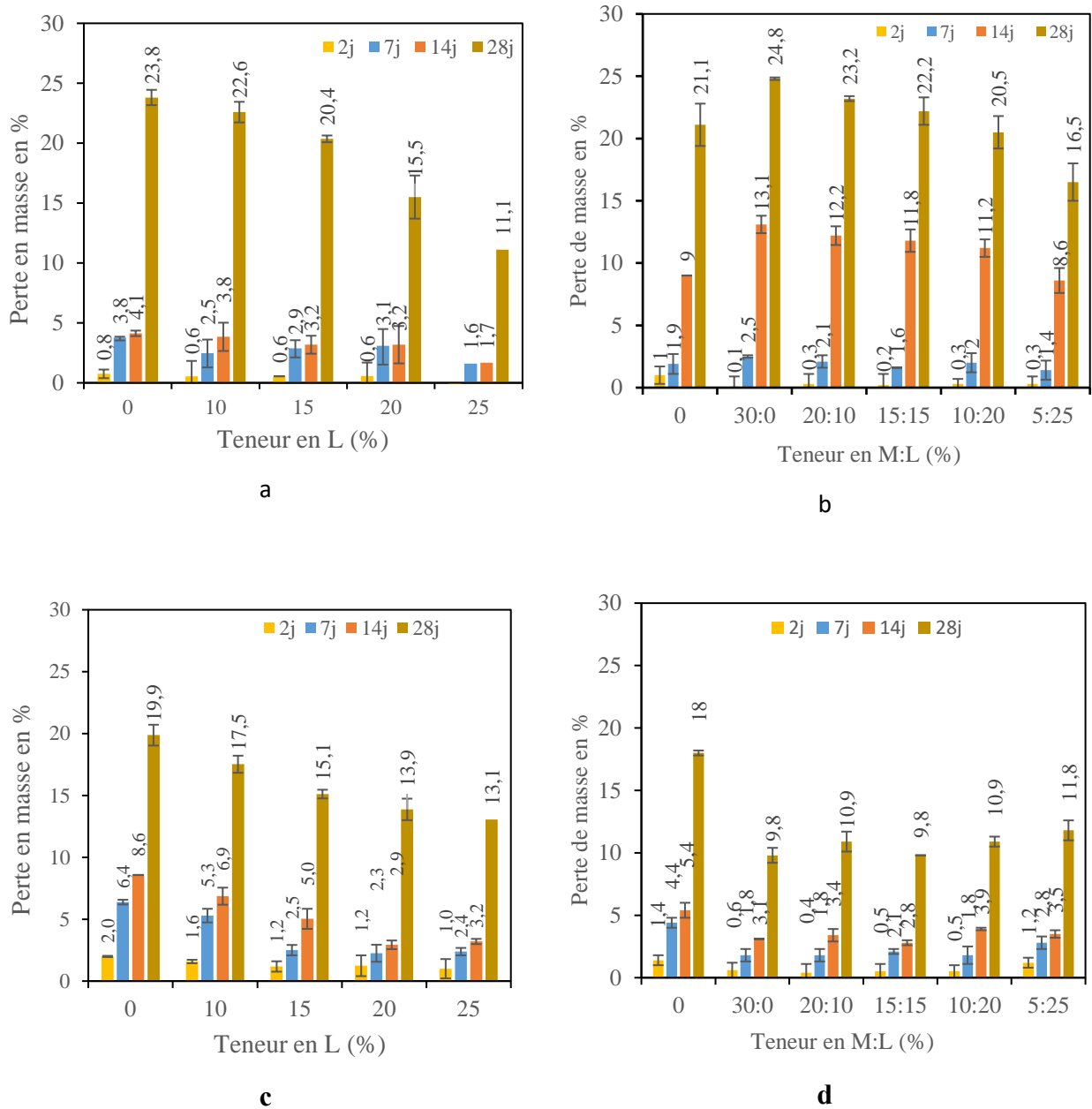


Figure 22: Perte de masse à l'attaque à l'acide sulfurique des mortiers de ciment binaire mûri pendant 28 jours (a) et 90 jours (c) et ternaire mûri pendant 28 jours (b) et 90 jours (d).

Pour une maturation de 90 jours, la perte en masse est inférieure à celle de 28 jours quel que soit le ciment étudié, cela est dû à l'apparition tardive de nouveau C-S-H qui densifie la matrice cimentaire.

Dans le cas du ciment binaire, nous notons une régression de la perte de masse avec une augmentation de la teneur en laitier à tout moment (2 ; 7 ; 14 ; 28 jours d'immersion dans la solution acide) pour un temps de cure de 28 et 90 jours. La première réaction qui se produit lorsque le mortier est en contact avec la solution acide est celle de l'acide sulfurique avec la portlandite qui est libérée lors de l'hydratation du ciment. La portlandite est le plus soluble des hydrates de ciment. L'acide sulfurique réagit avec la portlandite pour former du sulfate de calcium, qui se dépose sous forme de gypse et est facilement lessivé. Le gypse réagit à son tour avec les phases aluminiques pour former un produit expansif (ettringite) (Kannan et Ganesan 2014; Monteny et al. 2000) qui est la cause de la perte de masse du ciment. Plus la teneur en laitier est élevée, moins il y a de portlandite disponible pour réagir avec l'acide, ce qui justifie la perte de masse plus faible du mortier avec laitier.

A 28 jours de cure, on constate que le ciment avec 30% de métakaolin présente la plus grande perte de masse. (Monteny et al. 2000 ; Kannan et Ganesan 2014 ; Kamel 2021) explique cela par la forte présence d'alumine dans le métakaolin, qui peut réagir avec le sulfate de calcium formé par la réaction de l'acide sulfurique et de la portlandite pour former de l'ettringite expansive, ce qui peut provoquer la forte perte de masse avec le métakaolin. En effet, dans notre cas, à 28 jours, il y avait probablement une quantité significative de portlandite réagissant avec l'acide sulfurique, qui a réagi ensuite avec les phases d'aluminate du métakaolin. Avec le remplacement partiel du métakaolin par du laitier dans le système ternaire, on constate que la perte de masse diminue en fonction de la teneur en laitier, jusqu'à des valeurs inférieures à celles du ciment de référence. Ceci peut s'expliquer par le fait que la teneur en alumine diminue lorsque la teneur en laitier augmente.

A 90 jours de cure, on observe l'effet inverse : la substitution du ciment par 30% de métakaolin présente les pertes de masse les plus faibles. On peut donc dire qu'à long terme, l'activité pouzzolanique du métakaolin a consommé une très grande partie de la portlandite, réduisant le champ d'action de l'acide sulfurique et entraînant une réduction des pertes de masse. Globalement, on constate que le système ternaire offre une meilleure résistance à l'attaque par l'acide sulfurique que le ciment sans additions.

❖ Résistance à la compression après attaque acide (28 jours d'immersion dans l'acide)

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

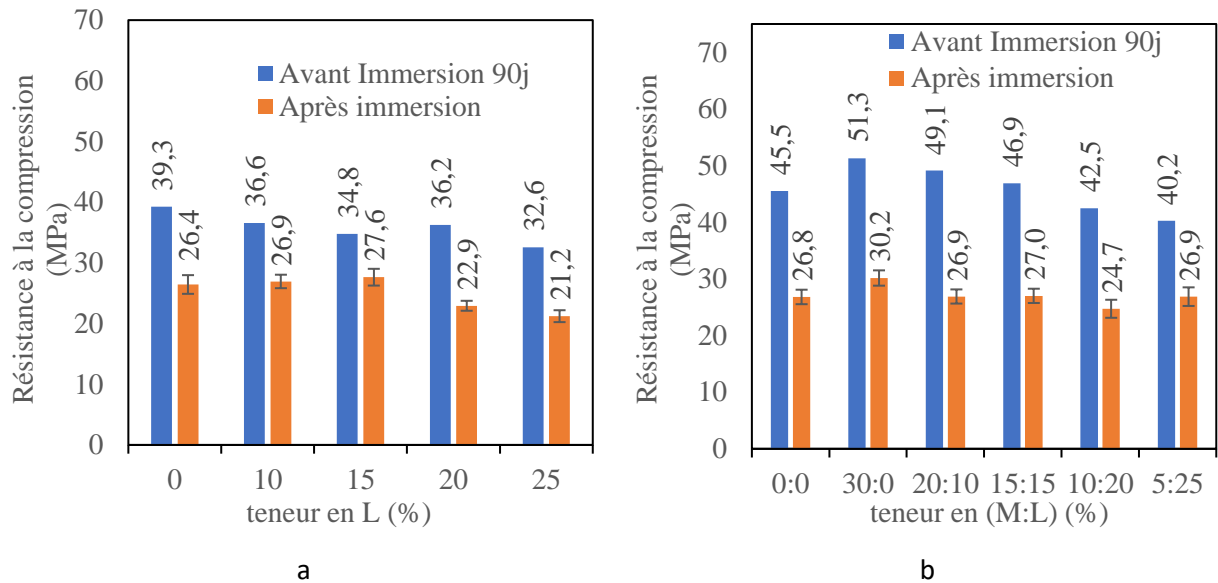


Figure 23 : résistance à la compression après attaque acide pour 28 jours et 90 jours de maturation

La **Figure 23** montre que soit le ciment étudié la résistance à la compression est fortement influencé par l'acide sulfurique. Il y'a une diminution conséquente de la résistance à la compression après attaque acide ce pendant au niveau de la **Figure 23a** les ciments binaires avec 10% et 15% de laitier présente des résistances à la compression après attaque acide légèrement supérieur au ciment témoin. Aussi au niveau des ciments ternaires (**Figure 23b**), nous remarquons que plus le laitier augmente plus la sensibilité à l'acide sulfurique est moindre. Ce qui indique que le laitier résiste mieux à l'attaque par acide sulfurique.

III.1.4 Diffusion des ions chlorures

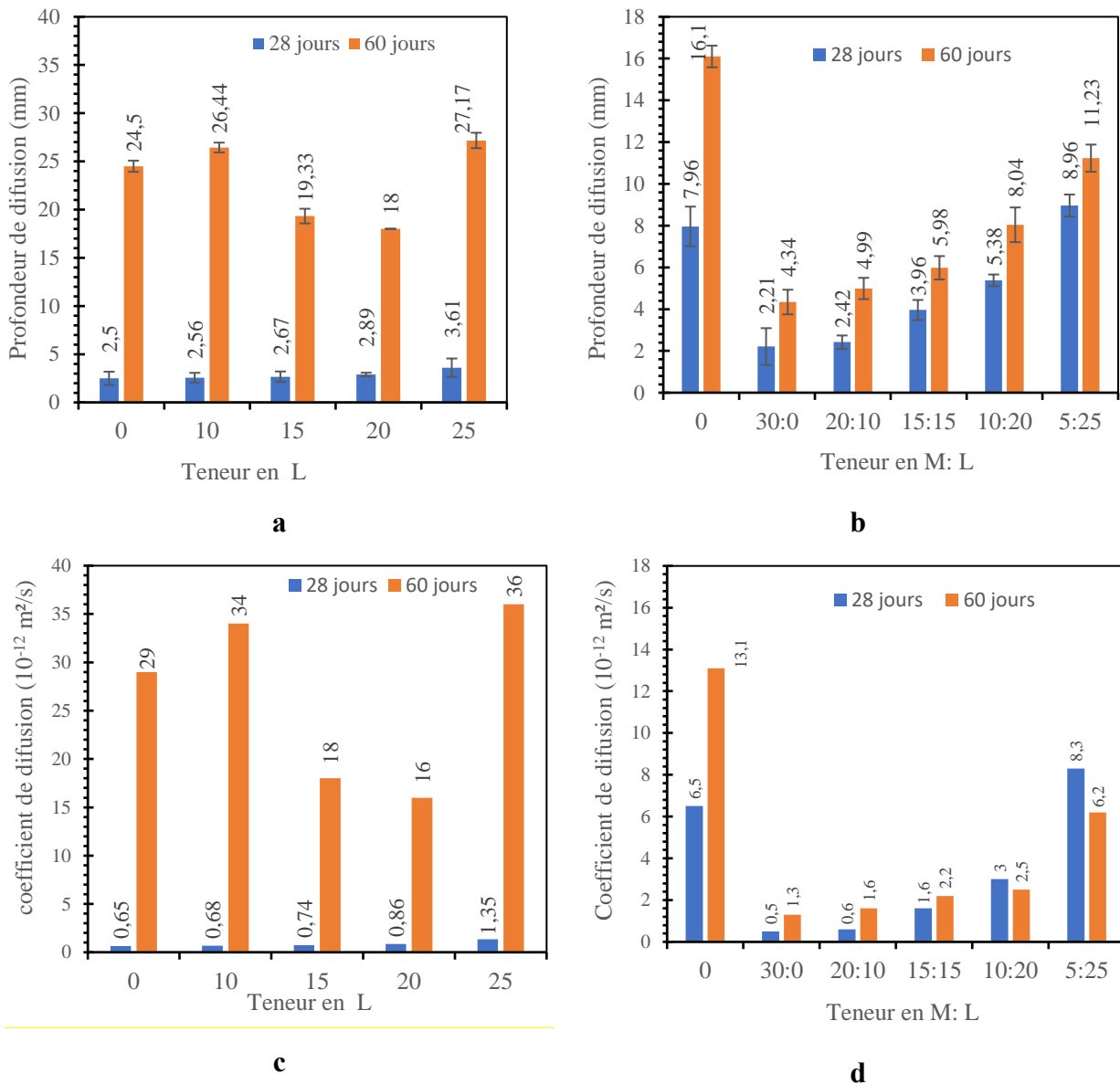


Figure 24: Profondeur et coefficient de diffusion des ions chlorure des mortiers de ciment binaire (a et c) et ternaire (b et d) pour 28 jours de maturation

Les résultats révèlent que la diffusion des ions dans le mortier est un processus lent, les profondeurs de pénétration augmentant progressivement avec le temps. Dans le cas du ciment binaire, la **Figure 24a** montre que la profondeur de pénétration augmente avec la teneur en laitier. En outre, la **Figure 24c** montre que le coefficient de diffusion est plus élevé à long terme et qu'il est encore plus important lorsque la proportion de laitier est plus élevée. Ceci peut être attribué à la porosité accrue créée par le laitier dans le ciment, permettant une pénétration plus facile des ions. La diffusion des fluides est régie par la porosité d'un matériau. Plus un matériau est poreux, plus les fluides y pénètrent facilement.

Inversement, avec les ciments ternaires, la profondeur de pénétration et le coefficient de diffusion sont tous deux réduits par rapport à la référence, en particulier dans le mortier contenant 30 % de métakaolin. Ces paramètres augmentent lorsque le métakaolin est remplacé par le laitier. La porosité plus faible résultant du métakaolin entrave le transport des fluides dans le système ternaire, tandis que l'inclusion du laitier rend le mortier plus poreux. Notons que (Ramadji 2022) a eu les mêmes tendance en substituant le métakaolin par la poussière de granite.

Outre l'influence du métakaolin et du laitier sur la diffusion, de nombreux autres paramètres sont à considérer. En effet, on constate que la figure a, montrant la profondeur de diffusion du ciment binaire au laitier, présente des valeurs extrêmement élevées quelle que soit la nature du liant utilisé. La référence à ce niveau donne une profondeur de diffusion de 24,5 mm, contre 16,1 mm pour la **Figure 24(b)**. Il est à noter que lors de nos essais, le ciment binaire a été exposé à la température ambiante (environ 36°C) alors que le ciment ternaire (**Figure 24b**) est exposé à des conditions normalisées (environ 20°). Ces résultats confirment ceux de (Perreault-Chabot 2010) qui a démontré que des températures plus élevées conduisent à des profondeurs de pénétration plus importantes.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats obtenus avec différents types de compositions de ciment, notamment des ciments binaires avec des quantités variables de laitier et de métakaolin (30%), et des ciments ternaires remplaçant le métakaolin dans le système binaire par du laitier. La caractérisation des ciments binaires au laitier a montré que l'incorporation de laitier à la place du ciment améliorerait légèrement l'ouvrabilité mais entraînait un retard de prise. Les essais mécaniques ont révélé que le laitier réduisait la résistance mécanique à court terme, mais qu'il pouvait y avoir une légère amélioration de la résistance à la compression à long terme. Le laitier a également amélioré la résistance du ciment à l'attaque de l'acide sulfurique, mais a légèrement augmenté la porosité, l'absorption d'eau et la diffusion des ions chlorure.

Le remplacement de 30 % du ciment par du métakaolin a considérablement amélioré les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du ciment, mais l'ouvrabilité a été réduite. La substitution du métakaolin par du laitier dans un système binaire n'a pas affecté de manière significative les propriétés à l'état frais, mais des retards de prise ont été observés par rapport

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

au ciment binaire contenant 30 % de métakaolin. Un taux de substitution élevé de 15 à 25 % a entraîné une baisse de la résistance au jeune, mais a été comparable ou meilleur que le ciment de référence à long terme. En termes de durabilité, tous les ciments ternaires ont eu des performances supérieures ou à peu près égales à celles des ciments de référence.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

L'objectif de cette étude était de valoriser le laitier de haut fourneau produit par les industries locales en tant qu'ajout au clinker (CEM I) ; d'évaluer les possibilités de l'utiliser comme substitut partiel du métakaolin dans un système ternaire, afin de réduire la consommation d'énergie et les émissions dans le processus de fabrication du ciment et du métakaolin. Ce travail visait également à réduire la consommation excessive de ressources naturelles afin de rendre le processus de fabrication du ciment plus respectueux de l'environnement, tout en produisant des ciments au coût optimisé. Dans la littérature, les études sur le métakaolin ont déjà mis en évidence son influence positive sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du ciment. Au Burkina Faso en particulier, plusieurs études ont montré que le taux optimal de substitution du ciment par le métakaolin est de 25 à 30%. Mais l'inconvénient majeur du métakaolin est son énergie de calcination. Bien que le laitier de haut fourneau soit un matériau largement utilisé dans l'industrie cimentaire, le laitier de haut fourneau produit au Burkina Faso n'a pas été suffisamment étudié. Par conséquent, l'étude se comportait sur :

- l'étude des propriétés physico-mécaniques et de la durabilité des ciments binaires (ciment + laitier)
- l'étude des propriétés physico-mécaniques et de la durabilité des ciments ternaires (ciment + métakaolin + laitier).

L'étude des ciments binaires a montré qu'à l'état frais, le laitier augmente légèrement l'ouvrabilité, mais retarde la prise des ciments binaires. Un retard de 115mn est observé pour 25% de laitier. D'un point de vue mécanique, les ciments contenant du laitier présentent des résistances plus faibles que le CEM I à tous les âges étudiés. La réduction est de 27% pour une substitution de 25% du CEM I par le laitier cristallisé pour 28 jours de maturation. En termes de durabilité, les ciments au laitier sont plus résistants à l'attaque de l'acide sulfurique, mais augmente la porosité ; l'absorption d'eau par capillarité et la diffusion des ions chlorure.

Le ciment binaire avec 30 % de métakaolin a été plus performant que tous les ciments ternaires et CEM I à tout égard, avec une augmentation de 22% de la résistance à la compression par rapport au CEM I pour 28 jours de maturation. Le remplacement du métakaolin par du laitier dans un système ternaire n'a pas affecté de manière significative les propriétés à l'état frais, mais des retards de prise ont été observés par rapport à un ciment binaire contenant 30 % de métakaolin. Un retard de 95mn a été observé pour 25% de substitution du métakaolin par le

laitier. Cependant, ce retard est de 65mn par rapport au CEM I. Certaines formules ternaires (20 :10 ; 15 :15) ont montré des temps de début de prise plus courts que le CEM I. Par ailleurs, la résistance à la compression est réduite de 39% à 28 jours contre 22% à 90 jours par rapport au ciment binaire contenant 30% de métakaolin pour le ciment ternaire avec 25% de laitier. Cette réduction est de 25% à 28 jours contre 12% à 90 jours par rapport au CEM I. En termes de durabilité, tous les ciments ternaires ont obtenu des résultats meilleurs ou à peu près identiques à ceux du CEM I

En somme le laitier peut être utilisé comme addition minérale au ciment. Le ciment ternaire (70%C+15%M+15%L) s'est avéré être la meilleure formule pour une performance optimale, mais dans l'ensemble, tous les ciments ternaires sont des options viables pour les formulations de ciment.

Dans une perspective plus large ; il sera intéressant :

- D'étudier les propriétés physiques des ciments élaborés comme le retrait, la chaleur d'hydratation, la stabilité volumique, et la conductivité thermique
- D'étudier les propriétés physiques ; mécaniques et durabilités des bétons à base de ces ciments ternaires
- Opter pour des formulations à plus forte substitution pour réduire le clinker et valoriser d'avantage les déchets industriels ou agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

- Adjoudj, Mhamed. 2015. « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. » Thesis, Université de Cergy Pontoise; Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie).
- AFPC-AFREM. « Taux d'absorption par suctions capillaires ».
- Alexandre, Jacques. 1988. *Le laitier de haut fourneau*.
- Amira, Mabrouk. 2015. « Valorisation des sous-produits locaux dans l'industrie du ciment portland ». Mémoire, Université Mohamed Khaider Biskra.
- Aoual-Benslafa, Fatiha Kazi, Abdelaziz Semcha, Enset Oran, et Oran El Ménaouer. 2011. « Influence des additions minérales sur la résistance mécanique des mortiers ».
- Arab, Bahia, Rachid Mehaddene, et Yacine Bouchnab. 2017. « Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances ». *Environnement, Ingénierie & Développement* N°75-décembre 2017 (décembre):7769. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3665>.
- Armengaud, Julie. 2016. « Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche. » Thesis, Toulouse: Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- ASTM C642. 2008. « Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete1,» ».
- ASTMC618-05. 2005. « Standard specification for coal fly and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete ». ASTM international.
- Benkaddour, Mokhtaria, Fatiha Kazi Aoual, et Abdelaziz Semcha. 2009. « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle », 12.
- Bich, Ch., J. Ambroise, et J. Péra. 2009. « Influence of Degree of Dehydroxylation on the Pozzolanic Activity of Metakaolin ». *Applied Clay Science* 44 (3-4): 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.01.014>.
- Bouikni, A, RN Swamy, et A Bali. 2009. « Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag ». *Construction and Building Materials* 23 (8): 2836-45.

- Cassagnabère, Franck, Mohamed Lachemi, Michel Mouret, et Gilles Escadeillas. 2011. « Caractérisation Performantielle d'un Liant Ternaire à Base de Ciment, Laitier et Métakaolin ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 38 (8): 837-48. <https://doi.org/10.1139/111-043>.
- Cassagnabère, Franck, Michel Mouret, Gilles Escadeillas, Philippe Broilliard, et Alexandre Bertrand. 2010. « Metakaolin, a Solution for the Precast Industry to Limit the Clinker Content in Concrete: Mechanical Aspects ». *Construction and Building Materials* 24 (7): 1109-18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.032>.
- Clerc, Valérie, et Agnès Deboulet. 2018. « Quel Nouvel Agenda urbain pour les quartiers précaires ? La fabrique des accords internationaux sur l'urbanisation pour la conférence Habitat III ». *Métropoles*, n° Hors-série 2018 (octobre). <https://doi.org/10.4000/metropoles.6189>.
- Codina, Maud. 2007. « Les bétons bas pH - Formulation, caractérisation et étude à long terme ». Thesis, INSA de Toulouse.
- Cornac, Sébastien, Claire Oms-Multon, Gilles Escadeillas, et Pascale de Caro. 2006. « nfluence d'éco-produits réducteurs de retrait sur les caractéristiques des mortiers. » In , 9.
- Cornec, Domitille Le. 2019. « Étude de la structure des laitiers vitrifiés de hauts-fourneaux et de leur réactivité à l'eau en milieu basique ». Thesis, Sorbonne Université.
- Coulon, Hervé, Laurent Château, et Guillaume Gay. 2013. « Laitiers de haut-fourneau ». *OFIR2*, 24.
- CTPL. 2012. « Les laitiers sidérurgiques, des produits industriels valorisés de longue date ». Dossier de presse.
- Dahmani, Salah. 2016. « Effet de l'association laitier-calcaire sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciments ». Mémoire, Algérie: Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- Deboucha, W, N Leklou, A Khelidj, A Pertue, et M N Oudjit. s. d.-a. « L'effet du laitier de haut fourneau sur la porosité du mortier ».
- Didier, Sophie, et Claire Simonneau. 2022. « L'Afrique urbaine en chantier », 5.

- Douaïssia, Zineb, Mouloud Merzoud, Mohamed Faouzi Habita, et Amar Benazzouk. 2020. « Effets du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé » 26.
- El-Diadamony, Hamdy, Ahmed A. Amer, Tarek M. Sokkary, et Samir El-Hoseny. 2018. « Hydration and Characteristics of Metakaolin Pozzolanic Cement Pastes ». *HBRC Journal* 14 (2): 150-58. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.05.005>.
- EN 196-1. 206apr. J.-C. « Détermination des resistance mécaniques » ». Assoc. Française Norm.
- EN 196-3,. 2009. « Détermination du temps de prise et stabilité » ». Assoc. Française Nor.
- EN 197-5. 2021. « Norme ciment : Partie 5 : Ciment Portland composé CEM II/C-M et Ciment composé CEM VI ». AFNOR. <https://www.infociments.fr/ciments/norme-ciment-nf-en-197-5-presentation-generale>.
- Guers, Cherifa, et Ferial Bounia. 2020. « Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés physiques et mécanique du mortier ». Mémoire, Université de Blida 1.
- Guettala, Salim, et Bouzidi Mezghiche. 2013. « Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons ». In , 7. Bordeaux, France.
- Hadj-sadok, Ahmed, Said Kenai, Luc Courard, et Anne Darimont. 2011. « Microstructure and Durability of Mortars Modified with Medium Active Blast Furnace Slag ». *Construction and Building Materials* 25 (2): 1018-25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.077>.
- Hadjsadok, Ahmed, Said Kenai, Luc Courard, Frédéric Michel, et Jamal Khatib. 2012. « Durability of Mortar and Concretes Containing Slag with Low Hydraulic Activity ». *Cement and Concrete Composites* 34 (5): 671-77. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.011>.
- Houze, Clément. 2013. « Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse ». Thesis, Paris , France: Université Paris est.

- Ilic, Biljana, Aleksandra Mitrovic, et Ljiljana Milicic. 2010. « Thermal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin ». *Hemijaska Industrija* 64 (4): 351-56. <https://doi.org/10.2298/HEMIND100322014I>.
- Infociments. 2022. « Les ciments “bas carbone” : de nouveaux mélanges ternaires | Infociments ». mars 2022. <https://www.infociments.fr/ciments/les-ciments-bas-carbone>.
- Ismael, Hassane Sabi. 2019. « Etude de deux ciments binaires : influence de la poussière de granite et du metakaolin sur les propriétés physicomécaniques des composites ». Mémoire, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- Jacquemot, François. 2015. « Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits en béton ». Thesis, Paris: CERIB.
- Kabre, Sidiki. 2017. « Caractérisation physico-mécanique d'un éco-ciment de type CEM II/A à base du Burkina Faso ». Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- Kabre, Sidiki, Nafissatou Savadogo, Abdou Lawane, et Adamah Messan. 2018. « Physical Mechanical Properties and Durability of Mortars Containing Tuff from Burkina Faso as Partial Substitution of CEM I ». *American Journal of Civil Engineering and Architecture* 6 (2): 46-53. <https://doi.org/10.12691/ajcea-6-2-1>.
- Kamel, Salhi. 2021. « Performance des mortiers et bétons à base des ciments contenant du métakaolin algérien ». Thesis, Algérie: Université Mohamed Khider – Biskra.
- Kannan, V, et K Ganesan. 2014. « Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin ». *Construction and Building Materials* 51:225-34.
- Institution of Civil Engineering= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese* 56 (2): 97-105.
- khalida, Ghomrani, et fatima Bentouhami. 2016. « Etude de la durabilité d'un ciment avec ajou ». Mémoire, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj Bou Arreridj.

- Khalifa, N.E.H., M. Bouasker, P. Mounanga, et N. Ben Kahla. 2012. « Etude du comportement mécanique de liants binaires et ternaires à base de ciment Portland, de laitier de haut fourneau et de filler calcaire ». *MATEC Web of Conferences* 2:01009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20120201009>.
- Kolani, Batian. 2012. « Comportement au jeune âge des structures en béton armé à base de liants composés aux laitiers ». Thesis.
- Krishnan, Sreejith, Swadesh Kumar Kanaujia, Santanu Mithia, et Shashank Bishnoi. 2018. « Hydration Kinetics and Mechanisms of Carbonates from Stone Wastes in Ternary Blends with Calcined Clay ». *Construction and Building Materials* 164 (mars):265-74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240>.
- Laoufi, L., Y Senhadji, A Benazzouk, T Langlet, M Mouli, I Laoufi, et A. S. Benosman. 2016. « Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack) », 11.
- Luping, Tang. 2003. *Chloride ingress in concrete exposed to marine environment-field data up to 10 years exposure*.
- Marion, AM, Nicolas Musikas, Maxime Prossnitz, et B Consultant. s. d. « Performances du laitier de haut-fourneau granulé moulu : durabilité, indice d'activité et coefficient k ».
- Mejdi, Mehdi. 2009. « Compréhension des mécanismes d'hydratation des ciments composés incorporant de la poudre de verre ou des cendres de boues d'épuration calcinées ». Thesis, 'université Paris-Est, université de Sherbrooke.
- Melais, F Z, S Melais, D Achoura, et R Jauberthie. 2015. « Valorisation des sous-produits de hauts fourneaux dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable (Valorisation of under products of blast furnaces in the manufacture of a new sandcrete range) ».
- Melais, Fatma Zohra. 2016. « Durabilite des betons de sable fibres dans les differents milieux agressifs « effets de la nature des fines d'ajouts et fibres ». Thesis, Université Badji Moktar- annaba.

- Mohamed, Menad. s. d. « Modélisation de la prévision de la résistance en compression des bétons à base de pouzzolanes ». Mémoire, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- Mohamed, Mezouar, et Chérif Rachid. 2013. « Etudes de la diffusion des chlorures au sein des betons locaux », décembre, 100.
- Mokhtar, Missoum, et Abdelwahab Oukil. 2016. « Comportement des mortiers confectionnes par le Métakaolin ». Thesis, Université Ibn Khaldoun. <http://dspace.univ-tiaret.dz:80/handle/123456789/11704>.
- Monteny, Joke, E Vincke, Anne Beeldens, Nele De Belie, Luc Taerwe, Dionys Van Gemert, et Willy Verstraete. 2000. « Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete ». *Cement and Concrete Research* 30 (4): 623-34.
- Mosser, Lucas. 2023. « Formulation de bétons décarbonés à base de clinker, métakaolin et d'addition calcaire pour une application aux produits préfabriqués », octobre, 221.
- Moula, Soufien. 2023. « Comportement à court et long termes des bétons à ultra-hautes performances (BUHP) à base de laitiers des hauts fourneaux ». Université d'Orléans; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. El Amar, Tunisie.
- Nigri, Ghania. 2018. « Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique ». Thesis, Université 08 mai 1945 de Guelma.
- Ntimugura, Fabrice, Seick Omar Sore, Latifou Bello, et Adamah Messan. 2017. « The Influence of Metakaolin from Saaba (Burkina Faso) over Physico-Mechanical and Durability Properties of Mortars ». *Open Journal of Civil Engineering* 07 (03): 389-408. <https://doi.org/10.4236/ojce.2017.73027>.
- Oualit, Mehena, Amar Irekti, et Arezki Sarri. 2022. « Influence des conditions de durcissement et le taux d'alcalins sur les performances mécaniques des matériaux alcali-activés à base du laitier de haut fourneau ». *Matériaux & Techniques* 110 (2): 202. <https://doi.org/10.1051/mattech/2022017>.
- Perlot, C, et Patrick Rougeau. 2007. « Intérêt des métakaolins dans les bétons ». *Monographie du Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton* 65.

- Perreault-Chabot, Joëlle. 2010. « Modélisation de la pénétration des chlorures dans les stationnements multiétagés ».
- Pinsonneault, PtTilippe. 1983. « Influence des fumées de silice sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons et des mortiers ». Thèse ». Thèse, Québec, Canada: Université de Sherbrooke.
- Pophillat, Laure. 2024. « Faut-il croire les ingénieurs affirmant pouvoir produire du “ciment vert” (sans CO₂) ? », mai. <https://www.batirama.com/article/72709-faut-il-croire-les-ingenieurs-affirmant-pouvoir-produire-du-ciment-vert-sans-co2.html>.
- Rabhi Mohamed, AMINE. 2023. « Influence du sable de dune sur le comportement des mortiers soumis aux attaques de l'acide sulfurique H₂SO₄ ». Mémoire, Université Aboubeker Belkaiq-Tlemcen.
- Ramadji, Christian. 2022. « Contribution au développement d'un éco-ciment hydraulique à base des pouzzolanes disponibles localement au Burkina Faso ». Thèse, dougou, Burkina faso: Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement.
- Ramadji, Christian, Adamah Messan, et Elodie Prud'Homme. 2020. « Influence of Granite Powder on Physico-Mechanical and Durability Properties of Mortar ». *Materials* 13 (23): 5406. <https://doi.org/10.3390/ma13235406>.
- Ramadji, Christian, Adamah Messan, Seick Omar Sore, Elodie Prud'homme, et Philbert Nshimiyimana. 2022. « Microstructural Analysis of the Reactivity Parameters of Calcined Clays ». *Sustainability* 14 (4): 2308. <https://doi.org/10.3390/su14042308>.
- Ripoll, Samuel. 2017. « La question urbaine au prisme des Nations unies: Retour sur la conférence « Habitat III » ». *Revue internationale des études du développement* 232 (4): 141. <https://doi.org/10.3917/ried.232.0141>.
- Sawadogo, Nafissatou. 2017. « Élaboration et caractérisation d'un écociment à base de poudre de mâchefer de charbon ». Thèse, France: Université Bretagne Loire , 2IE.
- Shi-Ping, Jiang, et J Grandet. 1989. « Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment Portland ». *Cement and concrete research* 19 (3): 487-96.

- Siddique, Rafat, et Juvas Klaus. 2009. « Influence of Metakaolin on the Properties of Mortar and Concrete: A Review ». *Applied Clay Science* 43 (3-4): 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>.
- Sofiane, AMRI, et Boughanem Akila. 2019. « Influence de l'ajout de pouzzolane naturelle (tuf) Sur la durabilité des pâtes de ciment ». Mémoire, Université A. Mira – Bejala.
- Tameghe, Ulrich Franck. 2022. « Elaboration et caractérisation d'un eco-ciment contenant le metakaolin/cendre de balle de riz et la poudre de verre ». Mémoire, Ouagadougou: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- Tattersall, Geoffrey Howarth, et Phillip FG Banfill. 1983. *The rheology of fresh concrete*.
- Tironi, Alejandra, Monica A. Trezza, Alberto N. Scian, et Edgardo F. Irassar. 2013. « Assessment of Pozzolanic Activity of Different Calcined Clays ». *Cement and Concrete Composites* 37 (mars):319-27. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>.
- Touil, B, F Ghomari, A Bezzar, A Khelidj, et Sophie Bonnet. 2017. « Effect of temperature on chloride diffusion in saturated concrete ». *Materials Journal* 114 (5).
- Touil, B, Pr F Ghomari, Dr A Bezzar, et Pr A Khelidj. s. d. « Etude des performances de durabilité des bétons locaux. »
- Zhao, Hui, Wei Sun, Xiaoming Wu, et Bo Gao. 2015. « The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures ». *Journal of Cleaner Production* 95:66-74.
- Zidol, Ablam. 2011. *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires*. Ottawa: Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada.

ELABORATION D'UN ECO-CIMENT PAR SUBSTITUTION PARTIELLE DU CEM I PAR DU METAKAOLIN ET DU LAITIER HAUT FOURNEAU

ANNEXES

Principaux types	Notation des 27 produits (Type de ciment courant)	Compositions (pourcentage en masse) ^{a)}											Constituants secondaires	
		Constituants principaux												
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire				
K	S	D ^{b)}	Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V	Calciqque W	T	L	LL					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-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	
CEM II	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 fumée 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

Figure 25 : Liste des 27 produits de la famille des ciments courants

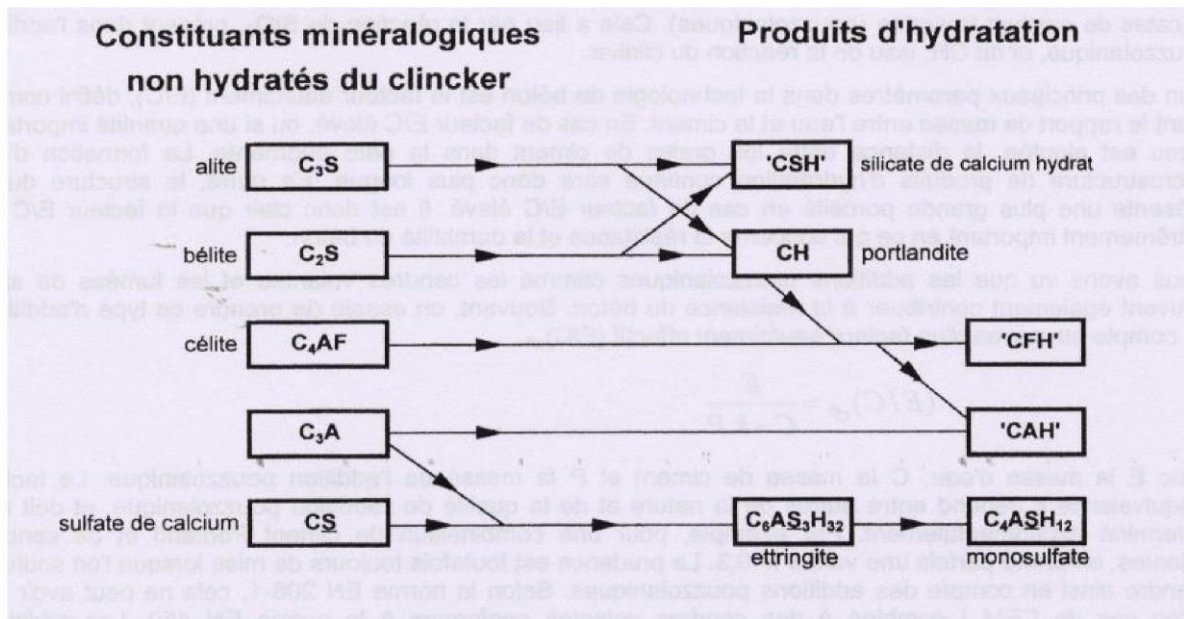


Figure 26 : Synthèse de l'hydratation du ciment

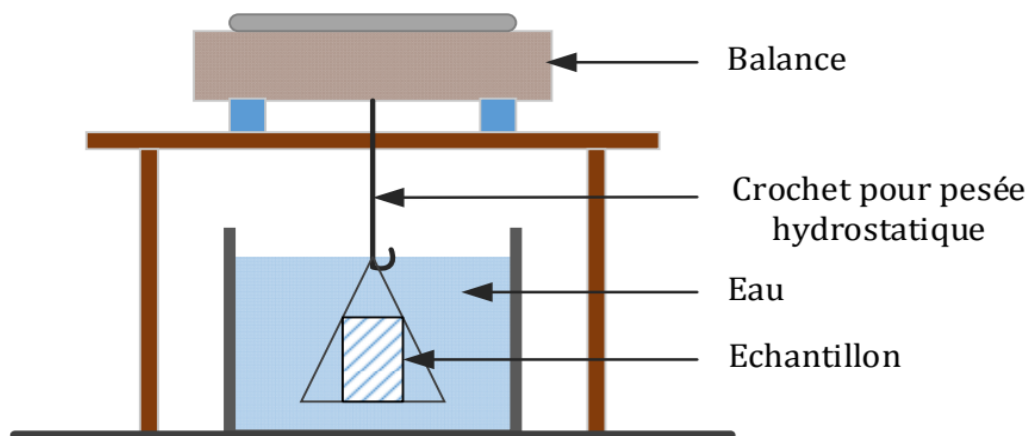


Figure 27 : Peser hydrostatique



Figure 28: Presse hydraulique



Figure 29 : Aspect physiques des échantillons avant et après attaque acide



Figure 30 : Profondeur de diffusion des ions chlorure des échantillons (ciment binaire) pendant 60 jours d'immersion