

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux de construction

Par

- **Djeghbellou issam**
- **Bensaci walid**

Intitulé

*Effet de l'accélération de l'hydratation des produit pouzzolanique sur la
fissuration au jeune âge et la durabilité des mortiers cimentaires : Analyse
Expérimental et modélisation*

Soutenu le : 29/06/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>		<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Lezher Loumachi</i>	<i>MAA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

REMERCEMENT

Au début nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la détermination et le pouvoir et la patience nécessaires pour finaliser ce mémoire

*-Et Nous adressons nos sincères remerciements aux nos encadrants Docteur **Belkadi Ahmed Abderraouf** et docteur **loumachi lazhar**, qui ont bien fourni des efforts pour nous avons donné toutes les information et tous les conseils et orientations précieuses.*

*-Un merci Spécial au docteur **hamza bensaci** qui aussi nous aidons par fourni des grands efforts avec nous dans ce travail et par toutes les conseils et l'orientations et l'encouragements et un autre merci pour tous les docteurs et les professeurs du département de génie civil de l'université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi – Bordj Bou Arreridj*

-Nous tenons à remercier également à nos familles et amis que dieu les protégés qui nous ont Prodigué encouragements

Résumé

Les ciments avec des taux de substitution élevés de produits pouzzolaniques ont le potentiel de diminuer l'émission du CO₂ dans le béton. Par contre, leur résistance au jeune âge est souvent inférieure à celle des pâtes cimentaires traditionnelles. Une des solutions de cet inconvénient est d'utiliser des adjuvants accélérateurs. Dans ce mémoire, l'effet du CaCl₂ sur l'accélération des produits pouzzolanique sont été étudié. Ainsi, les mesures des performances à l'état frais (étalement et densité humide), à l'état durci (performances mécaniques) et la durabilité (Retrait) ont été effectués. Dans ce contexte on a confectionné 6 mélanges de mortier témoin (MT), mortier contenant 1% de CaCl₂ (MTC), mortier avec 30% de laitier (MLN), mortier avec 30% de laitier et 1% de CaCl₂ (MLC), mortier avec 30% poudre de verre (MV) et mortier avec 30% de poudre verre et 1% de CaCl₂ (MVC).

Les résultats obtenus par ce travail montrent que le CaCl₂ a un effet significatif sur la résistance au jeune âge des mortiers à base de laitier. Cependant un effet négligeable de ce produit sur la poudre de verre.

Mot clé : Mortier, Laitier, Poudre de verre, CaCl₂, Retrait, Résistance à la compression

ABSTRACT

Cements with high substitution rates of pozzolanic products have the potential to decrease CO₂ emissions in concrete. On the other hand, their resistance at a young age is often lower than that of traditional cementitious pastes. One of the solutions to this drawback is to use accelerating adjuvants. In this thesis, the effect of CaCl₂ on the acceleration of pozzolanic products was studied. Thus, measurements of performance in the fresh state (spread and wet density), in the hardened state (mechanical performance) and durability (shrinkage) were carried out. In this context, 6 mixtures of control mortar (MT), mortar containing 1% CaCl₂ (MTC), mortar with 30% slag (MLN), mortar with 30% slag and 1% CaCl₂ (MLC), mortar with 30% glass powder (MV) and mortar with 30% glass powder and 1% CaCl₂ (MVC).

The results obtained by this work show that CaCl₂ has a significant effect on the early age resistance of slag-based mortars. However, a negligible effect of this product on the glass powder.

Key word: Mortar, Slag, Glass powder, CaCl₂, Shrinkage, Compressive strength

ملخص

الأسمنت ذات معدلات الاستبدال العالية للمنتجات البوزولانية لديها القدرة على تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الخرسانة. من ناحية أخرى ، غالبًا ما تكون مقاومتهم في سن مبكرة أقل من مقاومة المعاجين الأسمنتية التقليدية. أحد الحلول لهذا العيب هو استخدام المواد المساعدة للتسريع. في هذه الرسالة تم دراسة تأثير CaCl₂ على تسريع منتجات البوزولاني. وهكذا ، أجريت قياسات الأداء في الحالة الطازجة (الانتشار والكثافة الرطبة) ، في الحالة المتصلبة (الأداء الميكانيكي) والمتانة (الانكماش). في هذا السياق ، 6 مخاليط من ملاط التحكم (MT) ، ملاط يحتوي على 1% CaCl₂ (MTC) ، ملاط مع 30% خبث (MLN) ، ملاط مع 30% خبث و 1% CaCl₂ (MLC) ، ملاط مع مسحوق زجاجي 30% (MV) وهاون مع مسحوق زجاجي 30% و 1% CaCl₂ (MVC). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من هذا العمل أن CaCl₂ له تأثير معنوي على مقاومة العمر المبكر للملاط القائم على الخبث. ومع ذلك ، فإن تأثير هذا المنتج ضئيل على مسحوق الزجاج.

الكلمة الأساسية: الملاط ، الخبث ، مسحوق الزجاج ، CaCl₂ ، الانكماش ، قوة الضغط

Dédicace

Je dédie ce Modeste travail à :

A la mémoire de ma mere qui nous a quitté il y12 ans

A mon père

Ma famille.

Mes frere : Ameer ;omar

Et mes sœurs

Toute la famille : djeghbellou

Monsieur belkadi abde raouf

Mon collègue de travail walid bensaci

Et tout mes amis :walid ;mesoud :ramzi ;lakhdar

;abid ;bilele ;

Au étudiants de master génie civil 2022

Dédicace

Je dédie ce Modeste travail à :

A la mémoire de mon père et ma mere

Ma famille.

Mes frere : hamza ;yaakoub ;mohamed cherif

Et mes sœurs

Toute la famille : bensaci

Monsieur belkadi abde raouf

Mon collègue de travail djeghbellou issam

Et tout mes amis spécialement amar athamna

Au étudiants de master génie civil 2022

Table des matières

Introduction generale	01
CHAPITRE 1 :Etat de L'ART SUR Les additions pouzzolanique	
1-INTRODUCTION.....	04
1.2.Définition des fines pouzzolaniques.....	04
1.3 Différents types de pouzzolane.....	05
1.3.1. Laitier.....	06
1.3.2. Composition minéralogique du laitier granulé.....	06
1.4. Addition pouzzolanique dans le domaine de construction	07
1.5. Comportement des matériaux cimentaires à base différentes fines pouzzolaniques.....	07
1.5.1. Comportement au jeune âge.....	07
1.5.1.1 Effet des additions sur la consistance.....	07
1.5.1.2. Effet des additions sur la densité humide.....	08
1.5.1.3. Effet des additions sur les performances mécaniques.....	08
1.5.2. Comportement à long terme.....	09
1.6. Conclusion.....	11
CHAPITRE 2. Accélérateur de la réactivité des produits cimentaires et pouzzolaniques	
2.1. Introduction.....	13
2.2. Différents types d'accélérateurs chimiques.....	13
2.2.1. Chlorure de calcium	13
2.2.2. Activation alcaline.....	18
2.2.3. Na ₂ SO ₄	18
2.2.4. Formiate de calcium (CF).....	18
2.2.5. NaOH.....	19
2.3. Conclusion	20
CHAPITRE 3. Caractérisation des matériaux et méthodologie d'essai	
3.1. Introduction.....	23
3.2.Matériaux de construction de base.....	23
3.2.1Sablé.....	23
3.2.1.1Analyse granulométrique.....	23
3.2.1.2 Masse volumique absolue et apparente des granulats.....	24
3.2.1.3 Caractéristiques physico-chimiques.....	24
3.2.2Ciment.....	25
3.2.3Additions minérales.....	25
3.2.4Eau de gâchage.....	25
3.2.5 Chlorure de calcium	26
3.2Composition des différents mélanges.....	26
3.3 Essais de caractérisations.....	26
3.3.1 Préparation des échantillons.....	26
3.3.2 Essais à l'état fais.....	27
3.3.3 Résistances mécaniques	28
3.3.3.1 Résistance à la compression et à la flexion.....	28
3.3.3.2 Variations dimensionnelles et pondérale.....	28
3.3.4. Absorption d'eau.....	29
3.5. Conclusion.....	30

CHAPITRE 04 : Resulttas et discussion

4.1. Introduction.....	32
4.2. Propriété à l'état frais.....	32
4.2.1. Etalement.....	32
4.2.2 Masse volumique humide.....	33
4.3. Propriétés mécaniques.....	33
4.3.1. Résistance à la flexion.....	33
4.3.2. Résistance à la compression.....	35
4.4. Vitesse ultrason.....	36
4.5. Relation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason	37
4.6. Relation entre la densité et la vitesse ultrason.....	37
4.7. Masse volumique apparente.....	38
4.8. Absorption accessible à l'eau	38
4.9. Retrait total.....	39
4.10 Conclusion.....	40
Conclusion générale	48

Liste des figures

CHAPITRE 1 :Etat de L'ART SUR Les additions pouzzolanique

Figure 1.1 Photo de la Pouzzolane (site web).....	04
Figure1.2. Les différents types des produits pouzzolaniques.....	05
Figure1.3. Schéma d'un haut fourneau en fer (Thomas, 2013).....	06
Figure I.4. Résistance à la compression des différents mélanges à base de la pouzzolane.....	08
Figure 1.5. Résistance à la compression des différents mélanges à base de laitierrelative.....	09
Figure1.6. Variation de la résistance à la compression des mélanges en fonction de l'âge et le dosage de substitution.....	10
Figure 1.7. Résistance à la flexion des différents mélanges contenant laitier et filler calcaire.....	10

CHAPITRE 2. Accélérateur de la réactivité des produits cimentaires et pouzzolaniques

Figure 2.1. Résistance à la compression des différents mortiers étudiés.....	14
Figure 2.2. Résistance à la compression des différentes pâtes contenant laitier.....	15
Figure 2.3. Chaleur d'hydratation des différentes pâtes en du temps.....	16
Figure 2.4. Phases extraitessuperposées aux images XMT originales.....	16
Figure 2.5. Résistance à la compression en fonction de la teneur en CaCl_2	17.
Figure 2.6. Résistance à la compression des bétons en fonction du dosage de SHA et CaCl_2	17
Figure 2.7. Résistance à la compression de la pate à base du ciment et du laitier et cendre volante contenant ou non CF.....	19
Figure 2.8. Degré de la réaction du laitier dans le NaOH et la pâte de ciment.....	20

CHAPITRE 3. Caractérisation des matériaux et méthodologie d'essai

Figure 3. 1 Courbe granulométrique du sable d'Oeudsouf.....	24
Figure 3. 2 Méthode de malaxage et le mode de conservation.....	27.
Figure 3. 3 Le test de fluidité selon la norme ASTM C 1437–20 (C1437-20, 2020).....	27.
Figure 3. 4 Appareilles de l'essai de compression et de flexion.....	28
Figure 3. 5 Mesure de variation dimensionnelle.....	29

Chapitre 04 Resultat et discussion

Figure 4.1. Etalement des différents mélanges étudiés.....	32
Figure 4.2. Masse volumique humide des différents mélanges.....	33
Figure 4.3. Résistance à la flexion des différents mélanges.....	34
Figure 4.4. Résistance à la compression des différents mélanges.....	35
Figure 4.5. Résistance à la compression des différents mélanges.....	36
Figure 4.6. Relation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason.....	37
Figure 4.7. Relation entre la masse volumique et la vitesse ultrason.....	37
Figure 4.8. Relation entre la masse volumique et la vitesse ultrason.....	38
Figure 4.9. Absorption d'eau par immersion totale.....	39
Figure 4.10. Retrait total des différents mélanges.....	40

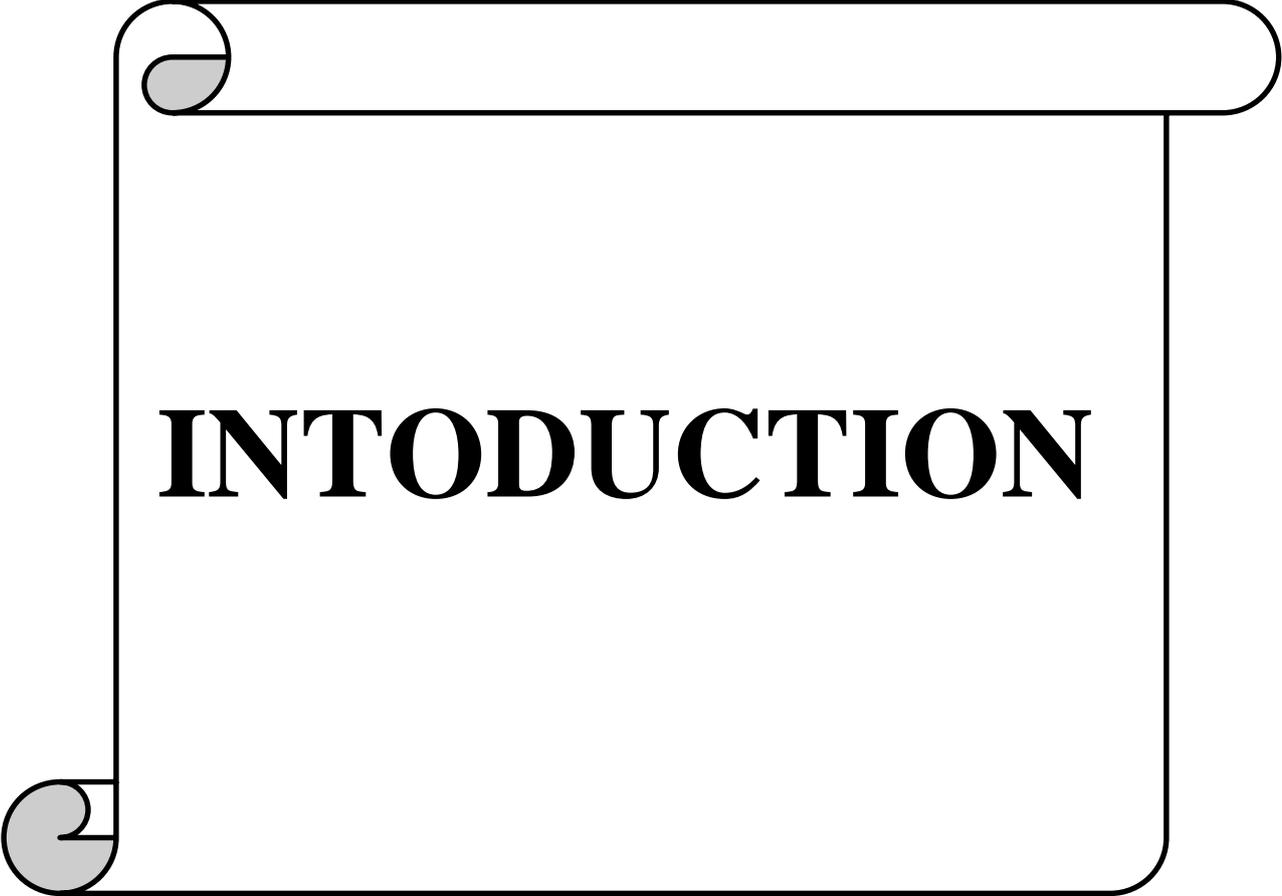
Liste de tableau

CHAPITRE 1 :Etat de L'ART SUR Les additions pouzzolanique

Tableau 1.1 Fourchettes des composants chimiques de la pouzzolane.....	05
---	----

CHAPITRE 3. Caractérisation des matériaux et méthodologie d'essai

Tableau 3.1 Valeurs des masses volumiques du sable.....	24
Tableau 3. 1 Valeurs de l'équivalent de sable.....	24
Tableau 3. 2 Caractéristiques chimiques et physique du ciment utilisé.....	25
Tableau 3. 3 Composition chimique et physique du fumé de silice.....	26
Tableau 3. 4 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.....	26

A graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow. The scroll is unrolled, showing the word "INTRODUCTION" in a bold, black, serif font. The scroll has a rounded top edge and a small, shaded, circular detail at the top left corner, suggesting a rolled-up end. The word "INTRODUCTION" is centered horizontally on the scroll.

INTRODUCTION

Introduction générale

En raison de l'impact environnemental élevé de la production de ciment, les conceptions actuelles des ciments visent à réduire leur empreinte carbone. Ceci est partiellement réalisé en utilisant des matériaux cimentaires supplémentaires comme un substituant du clinker. Le laitier de haut fourneau granulé broyé (LHF), c'est un sous-produit vitreux de la production de fonte brute, il est utilisé comme un ajout cimentaire depuis plus de 100 ans (Matthes et al., 2018). Le remplacement partiel du clinker par du (LHF) réduit les coûts et l'empreinte de CO₂ du matériau et améliore également sa performance physique et chimique (Moranville-Regourd, 1998). Les ciments mélangés de LHF présentent généralement une réactivité et des performances au jeune âge inférieures à celles des mélanges contenant des quantités plus élevées de clinker. Certains auteurs ont même rapporté que le LHF ne réagit pas pendant les premières 24h d'hydratation, alors que d'autres ; rapportent un degré de réaction du laitier entre 10 et 30 % après une journée (Adu-Amankwah et al., 2017). Par conséquent l'ajout de LHF influence également l'hydratation du clinker. Une façon prometteuse de compenser la réaction plus lente du LHF consiste à ajouter des sels accélérateurs tels que CaCl₂ (Van Rompaey, 2006). Le CaCl₂ est connu pour accélérer l'hydratation du ciment Portland depuis de nombreuses années. Même si le mécanisme d'action exact est encore en discussion, des études récentes montrent que l'effet du CaCl₂ peut bien être modélisé par une augmentation du nombre des hydrates. En outre, les ions Cl et Ca pour flocculer les colloïdes hydrophiles et une floculation plus forte de C-S-H conduisent à des pores plus gros dans le gel C-S-H, ce qui entraîne un contrôle de diffusion ultérieur de la réaction d'hydratation. De plus, la présence de Ca⁺² augmente la sursaturation de la solution interstitielle avec les phases minérales contenant du Ca, y compris C-S-H. Pour les ciments composés LHF, (Bellmann & Stark, 2009) ont rapporté que la résistance à 2 jours des ciments base de CaCl₂ pouvait être augmentée d'un facteur 3 fois lorsque l'ajout de 3% de CaCl₂. Il reste difficile de savoir si l'augmentation des performances à court terme provient uniquement d'une hydratation accélérée du ciment ou si l'ajout de CaCl₂ a également un impact significatif sur le taux d'hydratation du LHF.

Dans le cadre de cette étude, laitier et poudre de verre ont été utilisées en remplacement partiellement du ciment.

L'approche est essentiellement expérimentale et comporte deux axes principaux :

Le premier axe concerne l'étude de l'effet de l'introduction des fines recyclées sur les performances mécaniques des mortiers cimentaires.

Le deuxième axe concerne l'influence de la présence de CaCl_2 sur le comportement et à la durabilité des mortiers cimentaires contenant de laitier ou de verre.

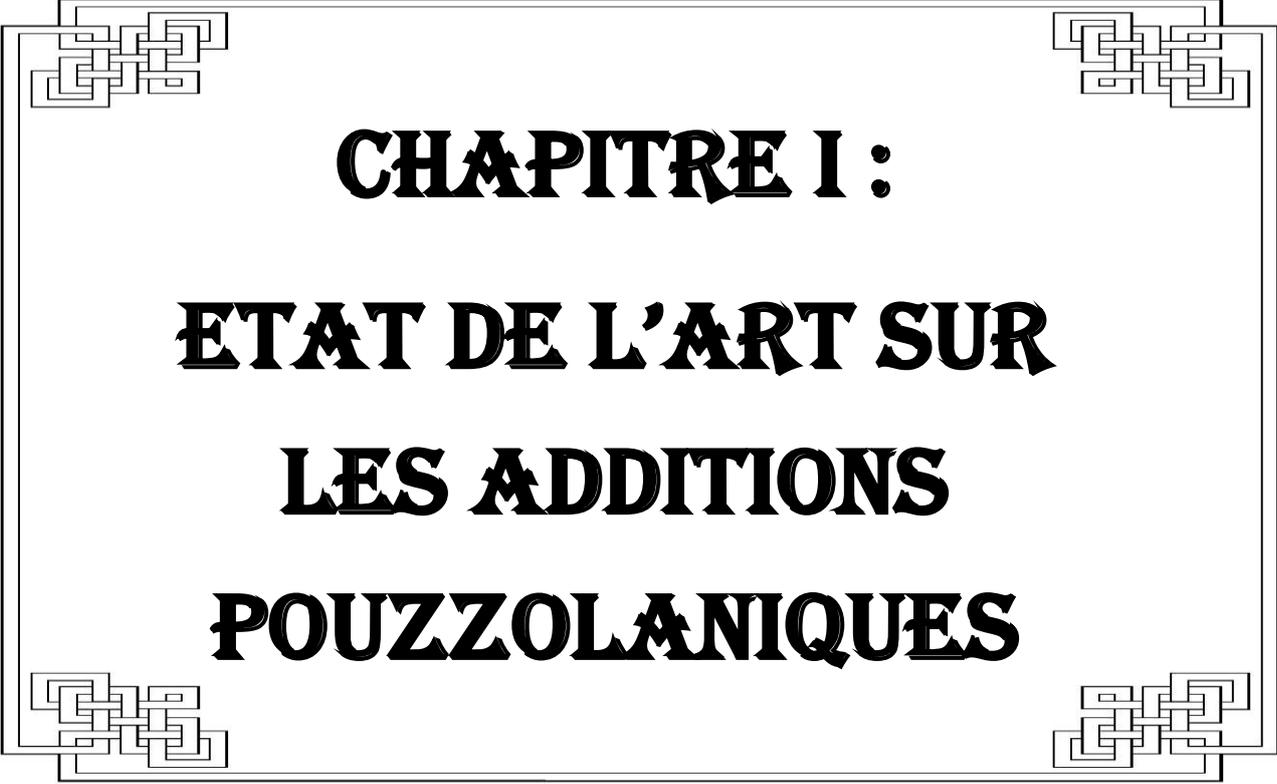
Ainsi, le mémoire de thèse se compose de deux grandes parties.

La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en deux chapitres :

- ✚ Le premier est consacré à des généralités sur les additions pouzzolaniques, suivi de leur comportement vis-à-vis de différents phénomènes (Résistance à la compression ...etc)
- ✚ Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur l'influence du CaCl_2 sur les mortiers cimentaires à base des ajouts pouzzolaniques à l'état frais, durcissant et durabilité.

La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit :

- ✚ Une description détaillée de tous les matériaux utilisés et regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le troisième chapitre
- ✚ Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fines recyclées et CaCl_2 sur le comportement et la durabilité des mortiers.



CHAPITRE I :
ETAT DE L'ART SUR
LES ADDITIONS
POUZZOLANIKES

1- INTRODUCTION

La nécessité générale de protéger l'environnement et de gérer correctement les ressources naturelles nécessite de nouvelles lois et des adaptations à de nouveaux concepts. Le recyclage des matériaux naturels et le recyclage des déchets est un moyen efficace pour faire face aux contraintes économiques et écologiques de ces dernières années. Depuis des décennies, l'industrie du béton a développé l'utilisation de pouzzolanes artificielles et naturelles dans le béton hydraulique pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Des études menées par certains chercheurs ont montré que l'utilisation des pouzzolanes naturelles, en tant qu'ajouts aux matériaux de construction à matrice cimentaire, peuvent augmenter la résistance à la compression du béton à long terme.

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur les ajouts pouzzolaniques et leur mécanisme dans la matrice cimentaires.

1.2. Définition des fines pouzzolaniques

Le nom de pouzzolane vient de *Pozzuoli*, près de Naples, en Italie, qui est riche en cendres du mont Vésuve.

Ceux-ci sont principalement composés de silice, d'Alumine et d'Oxyde de fer (Tokyay, 2016). Sous microscope électronique, la morphologie de leurs particules est illustrée dans la Figure 1.1. De plus, les pouzzolanes c'est un justifier qui réagit avec l'eau et forme des hydrates liés (C-S-H) en présence d'eau et de calcium actif.

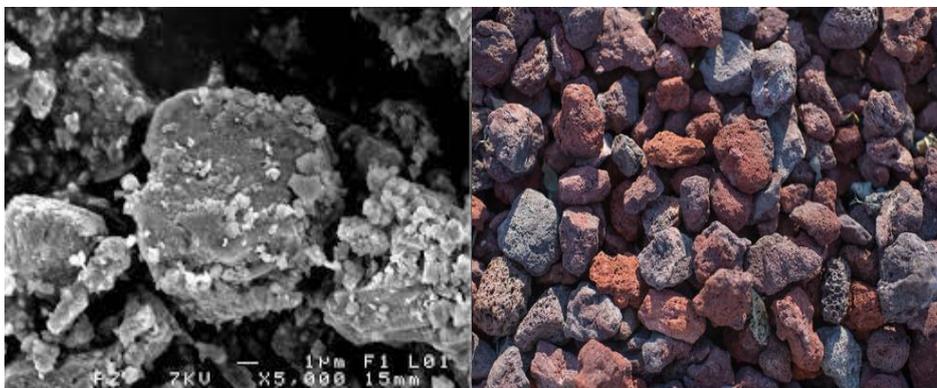


Figure 1.1 Photo de la Pouzzolane (site web).

Les compositions chimiques des matériaux pouzzolanique dépendent de la composition du magma éjecté. Le tableau 1.1 montre les fourchettes des composants chimiques de la pouzzolane.

Tableau 1.1 Fourchettes des composants chimiques de la pouzzolane (Tokyay, 2016).

Oxydes	Silice	Alumine	Oxyde ferrique	Chaux	Magnésie	Oxyde de sodium	Oxyde de potassium
Fourchette	50-75	10-20	3-9	2-9	1-6	1-3	1-4

1.3 Différents types de pouzzolane

La pouzzolane naturelle est une roche naturelle contenant principalement de silice-alumine, sa texture vitreuse et généralement d'origine volcanique. Cependant, il existe des pouzzolanes d'origine sédimentaire (terre de diatomées, radiolaires, oies) et des pouzzolanes artificielles (cendres volantes, argile calcinée, etc.).

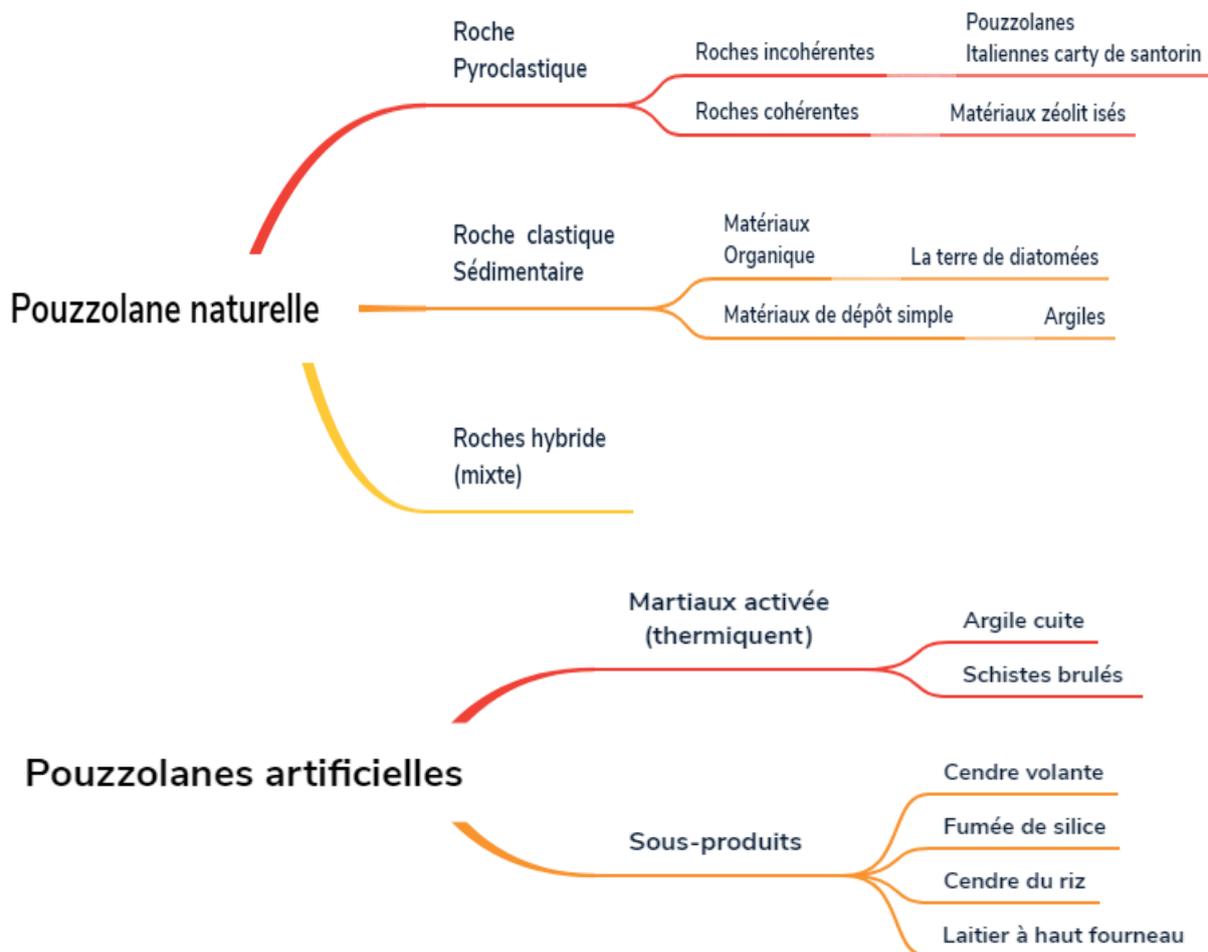


Figure 1.2. Les différents types des produits pouzzolaniques.

1.3.1. Laitier

Le terme laitier fait généralement référence au laitier de haut fourneau (BFS), qui est un cro-produit provenant de la production de fonte brute. En fait, d'une manière générale, le laitier est un sous-produit procédé pyrométallurgiques dans l'industrie des métaux et alliages (Figure 1.3). Le laitier de haut fourneau dans la production de fer à 1350-1550 °C sera sous forme liquide ; le calcaire réagit avec les matériaux riches en silice et en alumine associés aux minerais présents dans les cendres du coke. Après le refroidissement, Il se cristallise pour donner un matériau n'ayant pratiquement aucune propriété de cimentation.

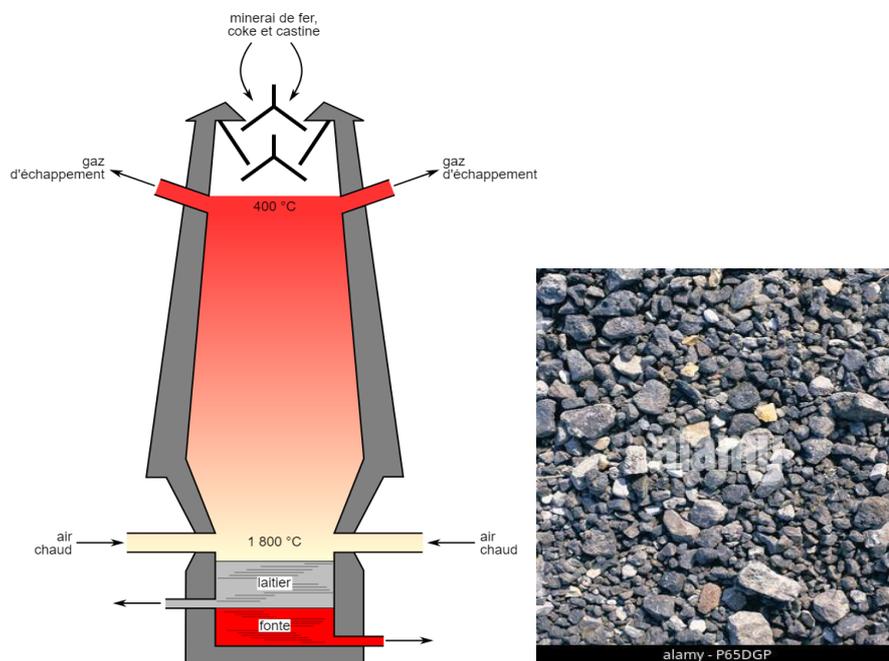


Figure.1.3. Schéma d'un haut fourneau en fer (Zhou et al., 2013).

1.3.2. Composition minéralogique du laitier granulé

La caractéristique importante à vérifier soigneusement lors de l'utilisation de laitier est son état vitreux, car ses propriétés hydrauliques sont attachées à cette caractéristique (figure II.15) (Shen et al., 2004). La granulation produit une proportion particulièrement élevée de verre (habituellement > 90 %) et, après broyage, on obtient un produit qui ressemble au sable ou au ciment Portland (Lee et al., 2011). Les laitiers bien trempés ont un jaune pâle, un beige ou un gris la couleur tandis que les scories froides ont une couleur beaucoup plus foncée, allant du gris foncé au brun foncé.

1.4. Addition pouzzolanique dans le domaine de construction

Les pouzzolanes naturelles ont une structure amorphe et sont principalement composées de silice. Finement broyé et au contact de l'eau en présence de chaux, il se comporte comme un excellent liant hydraulique avec des propriétés mécaniques supérieures à la chaux elle-même. En revanche, les propriétés hydrauliques telles que le ciment ne doivent pas être durcies car elles ne sont qu'au contact de l'eau. Cette réaction complexe avec la chaux en présence d'eau est appelée *réaction pouzzolanique* ou *pouzzolanique*. Ce comportement est présent dans plusieurs substances naturelles ou sous-produits industriels (microsilice, cendres volantes, etc.), ils sont donc classés comme matériaux pouzzolaniques. En raison de cette propriété, les pouzzolanes et les matériaux généraux à activité pouzzolanique sont utilisés dans l'industrie de la construction en plus du ciment Portland.

1.5. Comportement des matériaux cimentaires à base différentes fines pouzzolaniques

1.5.1. Comportement au jeune âge

Le comportement au jeune âge des matériaux à base de la matrice cimentaire est un phénomène complexe qui met en opposition une structure dure, mais avec des propriétés mécaniques faibles. Ceci est dû à un retrait chimique au jeune âge qui crée des fissures internes et à d'autres phénomènes chimiques correspondants à l'hydratation du ciment ...etc.

1.5.1.1 Effet des additions sur la consistance

Étude de consistance normalisée des pâtes visant à déterminer les quantités optimales de l'eau nécessaires pour faire une hydratation complète du ciment. (Douaïssia et al., 2021) ont montré que l'ajout du laitier et de la pouzzolane n'implique pas un changement significatif dans la quantité d'eau. De plus ils ont constaté que la pouzzolane provoque une augmentation de 2% du volume d'eau, le laitier granulaire réduit le volume d'eau de 4 %. Ceci est dû à la composition chimique et minérale des ajouts minéraux, car le laitier granulaire est plus riche en CaO que la pouzzolane naturelle. Il convient de noter que CaO affectera le

phénomène d'hydratation absorbant la quantité d'eau due à l'hydratation de la chaux.

1.5.1.2. Effet des additions sur la densité humide

Détermination de la masse volumique frais peut vérifier la compacité des mortiers frais. La densité du mortier à base du laitier granulé est légèrement inférieure aux mortiers contenant des pouzzolanes naturelles. Cependant, le comportement global des deux mortiers sont encore comparables. De plus une augmentation relative de la compacité pour les mortiers à base de 10% de pouzzolane.

1.5.1.3. Effet des additions sur les performances mécaniques

La résistance à la compression au jeune âge diminue en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane. Tandis que pour les dosages en pouzzolane allant de 10 % à 20 % la diminution passe de 17 % à 20 % à l'âge de 2 jours et de 13 % à 28 % à l'âge de 7 jours par rapport à celle du témoin respectivement.

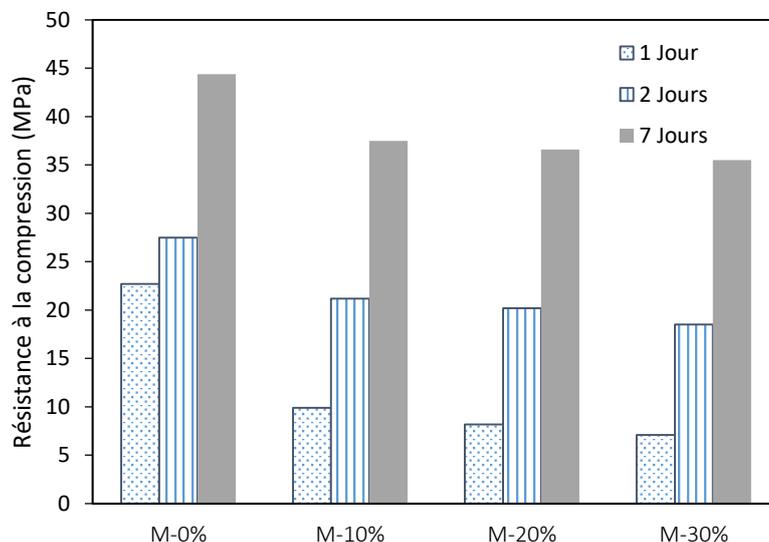


Figure 1.3. Résistance à la compression des différents mélanges à base de la pouzzolane (Douaissia et al., 2021).

Dans une autre étude de (Douaissia et al., 2021) qui ont montré que la présence de laitier dans les mortiers cimentaires provoque une diminution de la résistance à la compression. Cependant le mélange qui contient 10% de laitier subis une légère augmentation de la résistance par rapport au témoin. Cette amélioration

est probablement due au l'effet de remplissage des pores (effet physique). La figure 1.4 présente la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage de substitution.

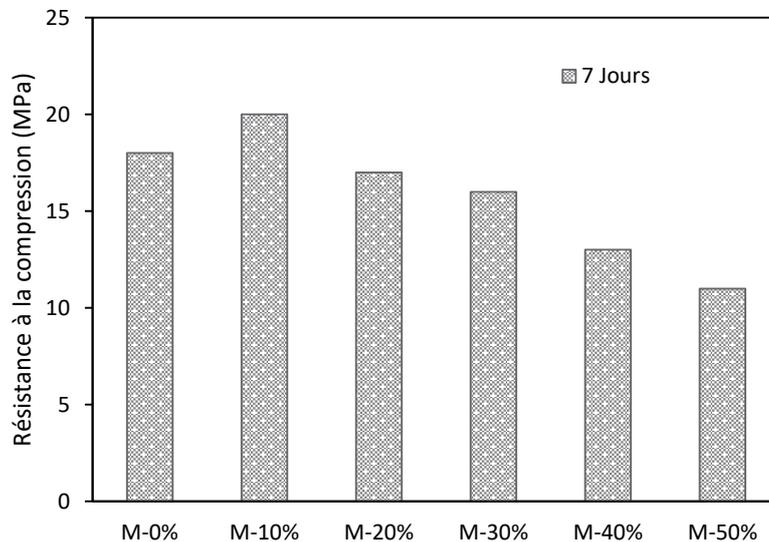


Figure 1.4. Résistance à la compression des différents mélanges à base de laitier (Douaïssia et al., 2021).

D'après ces résultats on constate que l'introduction des produits pouzzolaniques a eu un effet négatif sur les performances mécaniques des matériaux cimentaires au jeune âge.

1.5.2. Comportement à long terme

D'après la figure 1.5 on constate que l'introduction de la cendre volante avec 10 % dans le mortier provoque une augmentation considérable de la résistance à la compression notamment à 90 jours. Ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui commence à 28 jours, ce qui se traduit par un accroissement notable des résistances.

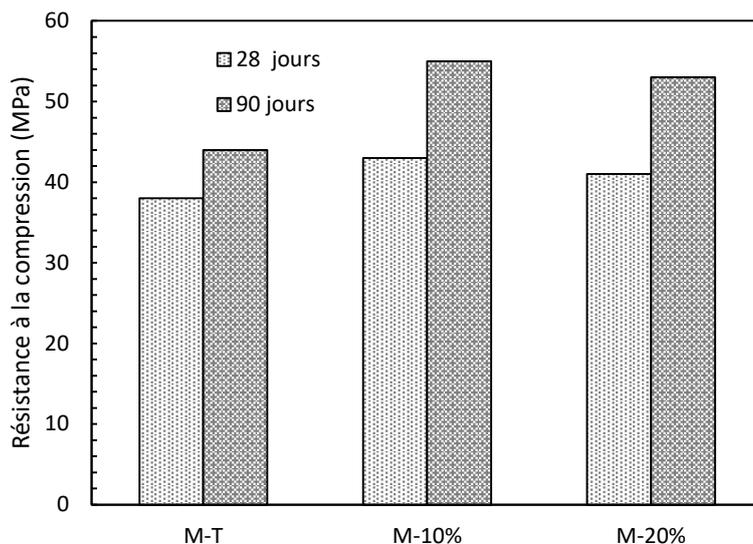


Figure.1.5. Variation de la résistance à la compression des mélanges en fonction de l'âge et le dosage de substitution (Chahinez, 2009).

Husson,1991 a montré que les additions minérales pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges.

(NOUI, 2018) ont étudié l'effet de laitier à haut fourneau et de filler calcaire dans le mortier cimentaire. Il a conclu que la présence de laitier avec filler provoque une augmentation de la résistance à la flexion à 3 ans d'âge (figure 1.6).

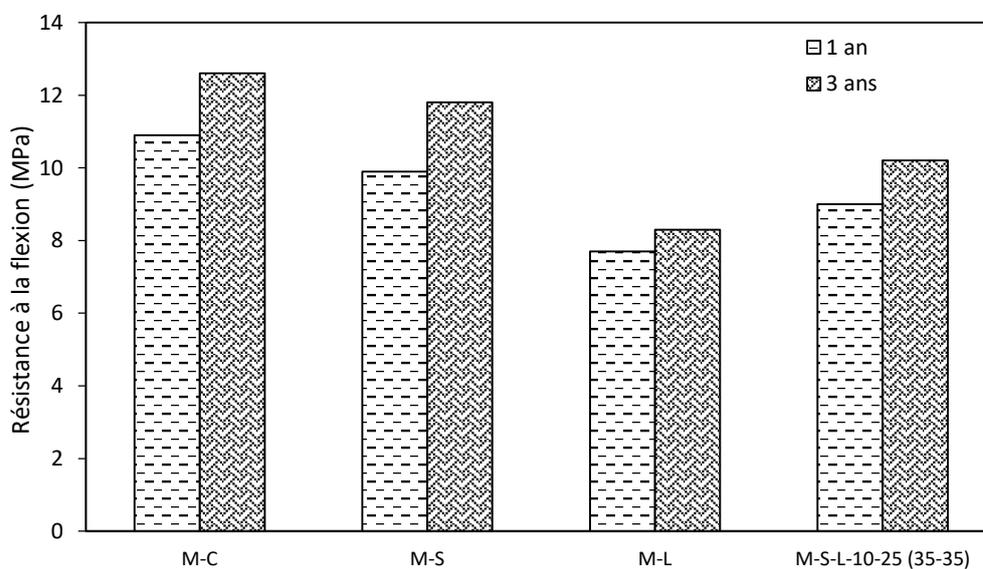
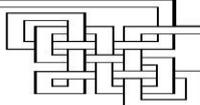
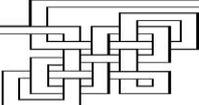


Figure 1.6. Résistance à la flexion des différents mélanges contenant laitier et filler calcaire.

1.6. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif définir les additions pouzzolaniques (laitier à haut fourneau et pouzzolane) et leur influence sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaire à court et à long terme. Les conclusions suivantes ont été tirées

1. L'ajout et l'augmentation successive de la quantité des additions pouzzolaniques n'impliquent pas une variation significative de la quantité de l'eau de gâchage pour l'obtention d'une pâte de ciment à consistance normalisée.
2. la présence de laitier dans les matériaux cimentaire provoque une diminution des performances mécaniques à jeune âge.
3. L'utilisation des additions pouzzolaniques révèle une augmentation des performances mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) de mortier à long terme. Ceci est dû à la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite.



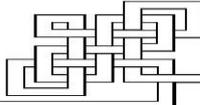
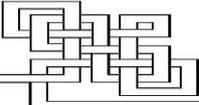
CHAPITRE II :

ACCÉLÉRATEUR DE LA

RÉACTIVITÉ DES PRODUITS

CIMENTAIRES ET

POUZZOLANIQUES



2.1. Introduction

Les additions pouzzolaniques sont largement utilisées pour remplacer partiellement le ciment portland dans la production de béton et de ciment. Les avantages de l'utilisation des pouzzolanes sont des coûts faibles et une meilleure durabilité, mais il nécessite un temps de prise plus lente et le développement de la résistance à jeune âge est plus lente. Différentes méthodes ont été développées pour résoudre ces inconvénients et améliorer la réactivité des pouzzolanes. Il existe trois voies qui ont été utilisées pour améliorer la réactivité pouzzolanique ; il comprend méthode mécanique, méthode thermique et méthode chimique. L'utilisation de la méthode chimique comme activateur de la réactivité pouzzolanique a fait l'objet d'une attention considérable ces dernières années. Dans ce chapitre l'effet de l'utilisation de différents activateurs chimiques sur l'activité pouzzolanique d'une pouzzolane et d'un laitier est résumé par en passant en revue les travaux déjà publiés. Il a été constaté que des activateurs chimiques appropriés peuvent être utilisés comme ajout au béton contenant des pouzzolanes qui plus tard peuvent augmenter la vitesse de réaction des pouzzolanes l'activité et la résistance à la compression de manière significative.

2.2. Différents types d'accélérateurs chimiques

2.2.1. Chlorure de calcium

Le chlorure de calcium (CaCl_2) est utilisé depuis de nombreuses années dans le béton, et est largement considéré comme l'un des accélérateurs les plus efficaces pour le ciment, en particulier par temps froid. C'est aussi le plus largement accélérateur étudié, avec des centaines d'articles publiés sur ses effets dans le béton. Le chlorure de calcium augmente le taux de formation de C-S-H, augmentant par conséquent la résistance au jeune âge. Le chlorure de calcium est le plus actif pendant le premier jour d'hydratation. Après le premier jour, la concentration de chlorure dans la solution interstitielle diminue, car le chlorure se combine avec les hydrates d'aluminate de calcium pour former le sel (Scrivener et al., 2016). L'utilisation de chlorure de calcium est connue non seulement pour modifier la quantité de C-S-H produite, mais aussi pour modifier sa morphologie. Des expériences d'absorption d'azote ont montré que CaCl_2 augmente la surface de C-S-H. Cependant, le mécanisme exact de l'accélération par CaCl_2 n'est pas encore bien compris. Lorsqu'il est utilisé comme accélérateur dans le béton non armé, le chlorure de calcium est généralement ajouté

en 0,1 à 0,7% en masse de ciment. Cependant, dans le béton armé, l'utilisation de CaCl_2 est limitée en raison des préoccupations concernant la corrosion de l'acier. L'ACI 318 (Wallace & Orakcal, 2002) spécifie une limite maximale de chlorure dans le béton de 0,06 % en poids de ciment pour réduire le risque de corrosion.

(Riding et al., 2010) ont fait une étude expérimentale sur l'amélioration de la résistance à 1 jour des systèmes cimentaires par une combinaison de chlorure de calcium (CaCl_2) et de diéthanol-isopropanolamine (DEIPA), en particulier dans les systèmes de ciment mélangé avec le laitier. Ils ont été constatés que les additifs augmentaient la résistance du mortier au jeune âge en améliorant l'hydratation du ciment (figure 2.1). DEIPA a également affecté la morphologie de la portlandite qui s'est formée sous forme de plaques minces. En parallèle, ils ont été constatés que le rapport calcium/silice du C-S-H augmentait avec l'utilisation de DEIPA, peut-être en raison de l'inclusion de portlandite microcristalline. Après 48 h, il a été constaté que CaCl_2 augmentait directement la vitesse de réaction du laitier granulé de haut fourneau et des cendres volantes.

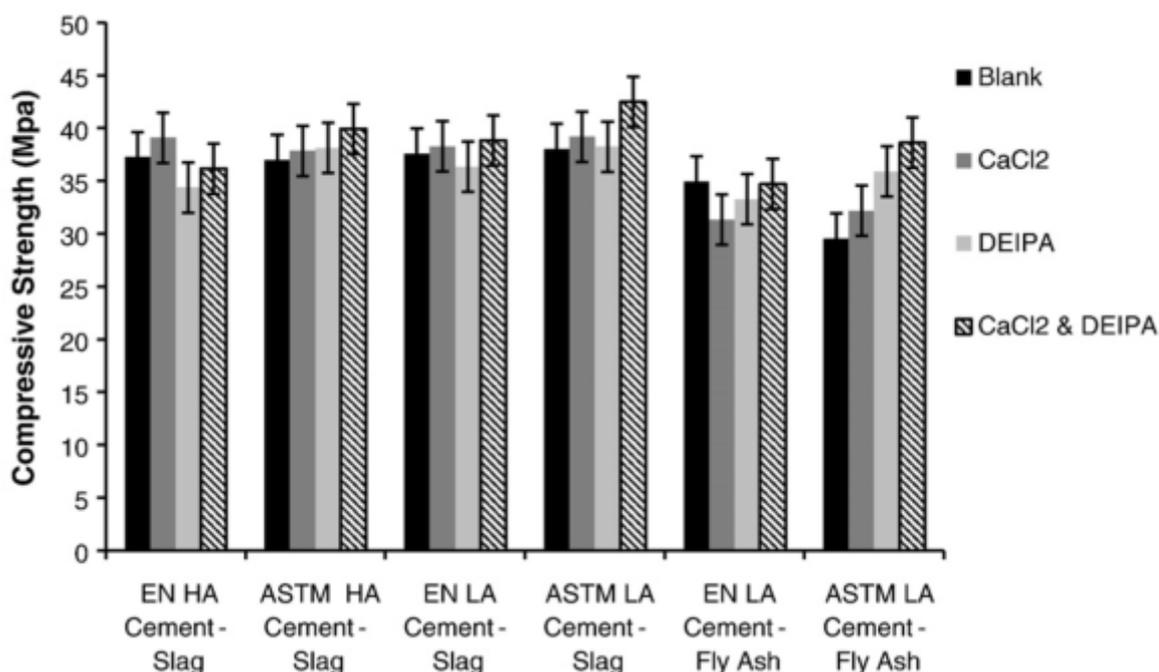


Figure 2.1. Résistance à la compression des différents mortiers étudiés.

(Steger et al., 2021) ont étudié l'effet des ajouts de CaCl_2 sur l'hydratation des ciments à base de 70% de laitier à haut fourneau en mesurant la résistance à la compression, la porosité, le dégagement de chaleur et la propagation des ultrasons des mortiers

pouzzolaniques. L'effet de CaCl_2 sur l'hydratation du laitier a été isolé par le remplacement du laitier par une charge de quartz inerte. Les résultats ont montré que les valeurs de la résistance à la compression à un, deux et sept jours étaient augmentées de 50 % par la présence de CaCl_2 (Figure 2.2). Les augmentations de la résistance à la compression correspondent à une réduction de l'espace poreux. De plus, ils ont conclu que l'hydratation du laitier a contribué au développement thermique, à la structuration et à la résistance à la compression des ciments mélangés à partir de 15 h.

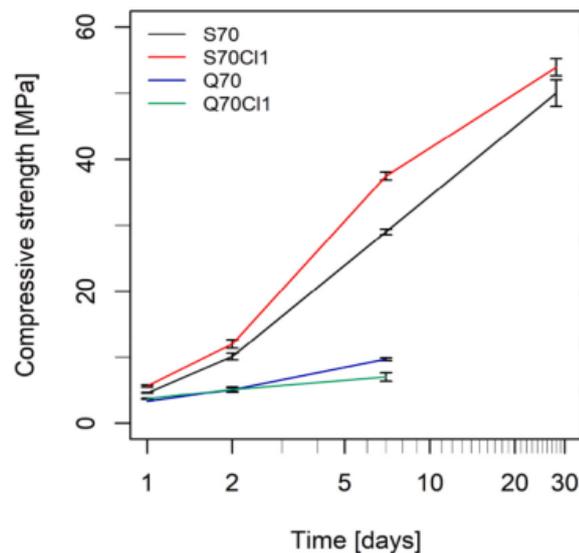


Figure 2.2. Résistance à la compression des différentes pâtes contenant laitier (Steger et al., 2021).

Ainsi l'ajout de CaCl_2 a conduit à un début plus précoce de la réaction du laitier, vers 10 h, et a augmenté le taux d'hydratation de cet ajout pendant les sept premiers jours (Figure 2.2). Le moment du début de la contribution de cette addition était également le moment où les précipitations AFm ont commencé. Dans les mélanges contenant du CaCl_2 , le Cl a été incorporé dans l'AFm.

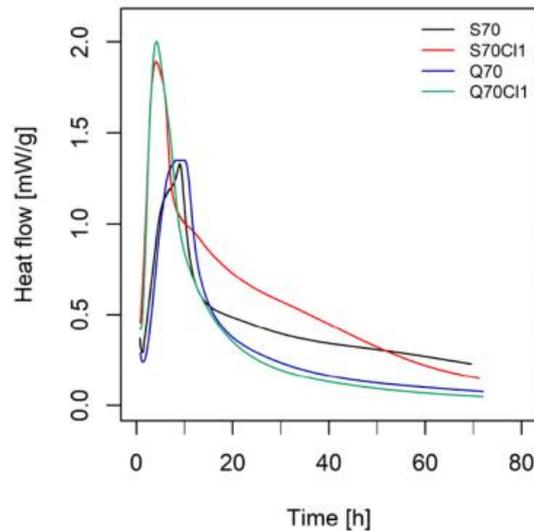


Figure 2.3. Chaleur d'hydratation des différentes pâtes en du temps (Steger et al., 2021).

(Poirier et al., 2022) ont étudié l'effet de CaCl_2 sur l'accélération du ciment contenant 70% de laitier par une analyse micro-tomographie à rayons X (XMT) in situ avec une taille de pixel de $0,325 \mu\text{m}$.

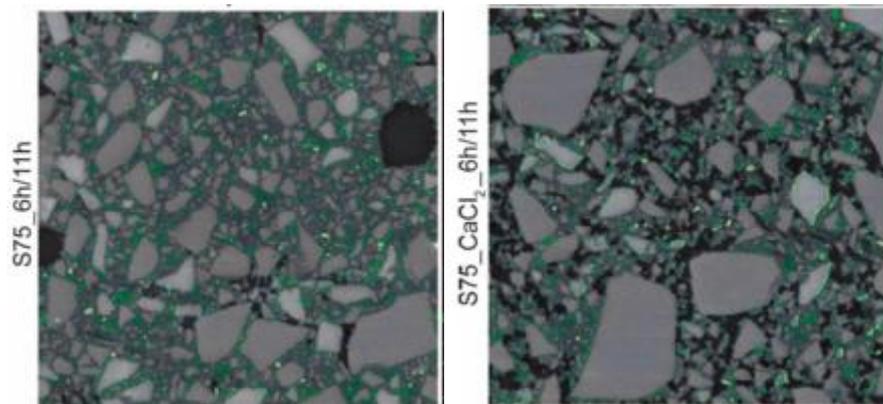


Figure 2.4. Phases extraites superposées aux images XMT originales (Poirier et al., 2022).

(Makaratat et al., 2011) ont montré l'effets de la teneur en liant (cendre de volante et le résidu du carbure de calcium broyé) et du dosage en CaCl_2 sur la résistance à la compression du béton. De plus, le module d'élasticité du béton CR-FA a été mesuré. Les résultats ont indiqué que l'ajout de 3% de CaCl_2 en poids de liant a donné un béton CR-FA qui présentait une maniabilité élevée et une résistance à la compression élevés aux premiers jours (Figure 2.5).

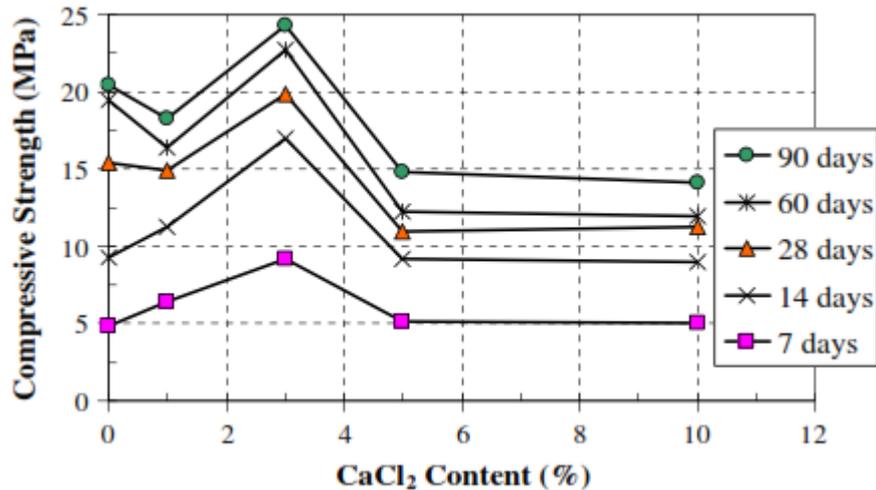


Figure 2.5. Résistance à la compression en fonction de la teneur en CaCl₂(Makarata et al., 2011).

(Tijani et al., 2021) Ont fait une étude sur l'influence de la cendre de cosse de sorgho (SHA) et du chlorure de calcium (CaCl₂) en tant que substitution fractionnée du ciment dans le béton. La cendre de cosse de sorgho (SHA) a été obtenue en brûlant la cosse de sorgho à une température régulée. La substitution du ciment par le SHA était de 0, 5, 10, 15, 20 et 25 %. Une quantité fixe de CaCl₂ à 1 % a été mélangée avec du ciment/SHA dans tous les échantillons de test à l'exception du mélange témoin. Le résultat des résistances à la compression à 28 jours montre que 5 % de SHA et 1 % de CaCl₂ ont eu la résistance maximale de 26,45 N/mm².

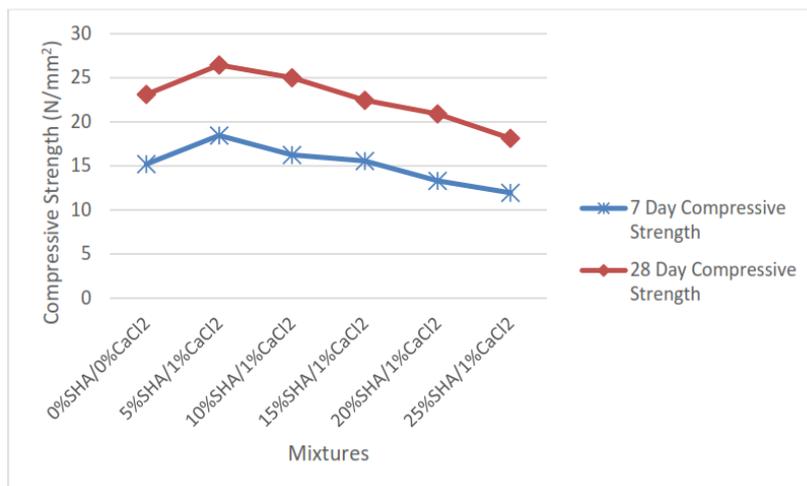


Figure 2.6. Résistance à la compression des bétons en fonction du dosage de SHA et CaCl₂ (Tijani et al., 2021).

2.2.2. Activation alcaline

(Palomo et al., 1999) ont montré que les activations alcalines sont des processus chimiques où les structures amorphes se transforment en structure rigide qui présente de bonnes propriétés mécaniques cimentaires à un âge précoce.

2.2.3. Na_2SO_4

Plusieurs chercheurs (Ebert, 2021) ont montré que Na_2SO_4 accélère l'hydratation de la pâte de ciment à base de cendre volante. Cette accélération est due à la formation de l'ettringite à l'âge précoce provoquant une augmentation de la résistance. Selon (Ebert, 2021) a expliqué cette accélération par la dissolution des phases verre-alumine-silicate des cendres. Ainsi, Na_2SO_4 réagit avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence d'eau et par conséquent, CaSO_4 précipite et NaOH apparaît. Ceci a pour effet une augmentation rapide du pH de la solution, ce qui facilite la dissolution des verres de cendres d'alumine-silicate, accélérant ainsi la réaction pouzzolanique.

2.2.4. Formiate de calcium (CF)

(Wang et al., 2022) ont étudié l'effet du formiate de calcium (CF) sur le développement de la résistance à la compression du ciment ternaire (contenant du FA et du laitier). Les résultats montrent que le CF peut être utilisé en toute sécurité pour augmenter la résistance du composite de ciment ternaire (Figure 2.7). De plus, l'influence des FC sur le processus d'hydratation et les caractéristiques microstructurales des mélanges PC et PC-FA/laitier a été étudiée à l'aide de la calorimétrie isotherme. Ces résultats montrent que l'ajout de CF peut améliorer la résistance des mélanges PC et PC-FA/laitier aux premiers âges de durcissement, ce qui est principalement due à une sorte de silicate d'aluminate de calcium hydraté appelé gismondine ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) et en plus à la formation d'ettringite (AFt). De plus, à des âges d'hydratation plus avancés, les FC peuvent favoriser la réaction de silicate des mélanges PC et PC-FA/laitier et accélérer la réaction pouzzolanique.

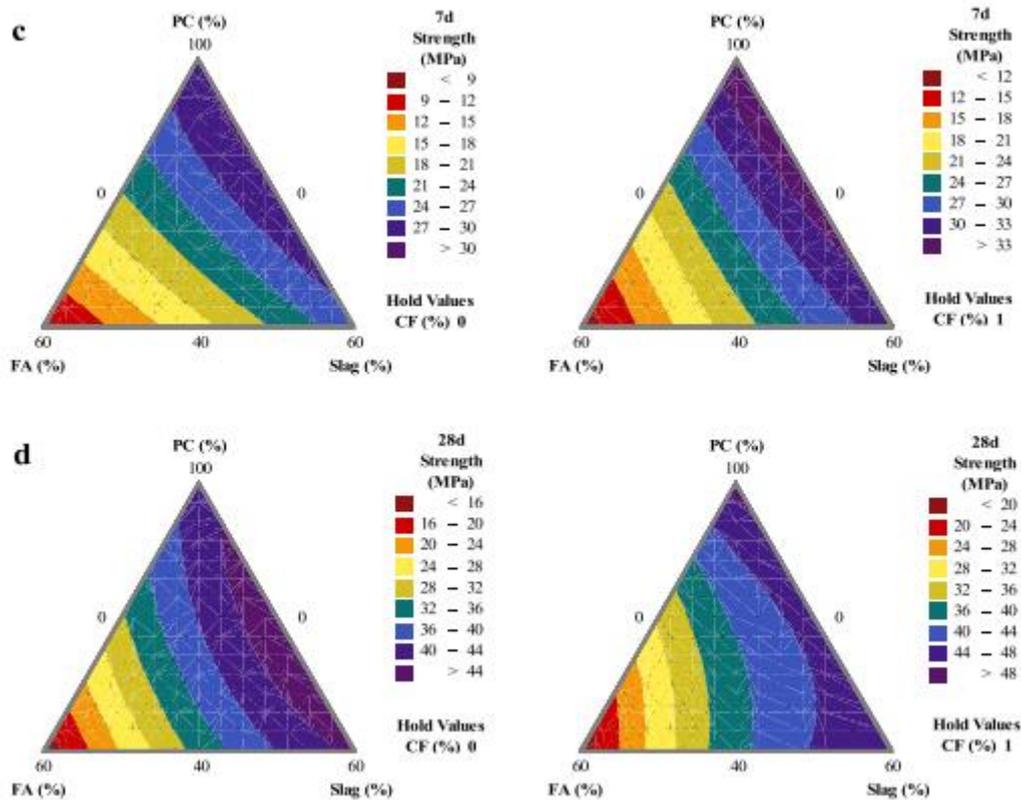


Figure 2.3. Résistance à la compression de la pâte à base de ciment et du laitier et cendre volante contenant ou non CF (Wang et al., 2022).

2.2.5. NaOH

Dans étude récente de (Briki et al., 2021) qui ont examiné la différence entre la réactivité du laitier dans une solution de NaOH ($w/s = 100$) et dans la pâte de ciment ($w/b = 0,4$). Ils ont trouvé que la réactivité du laitier est beaucoup plus élevée dans une solution de NaOH que dans la pâte de ciment. Lorsque la solution de NaOH est saturée de portlandite, la vitesse de réaction du laitier diminue pour se rapprocher de celle de la pâte de ciment. L'hypothèse de la réaction plus lente du laitier dans la pâte de ciment pourrait être due à la présence d'ions calcium libérés par les phases de clinker.

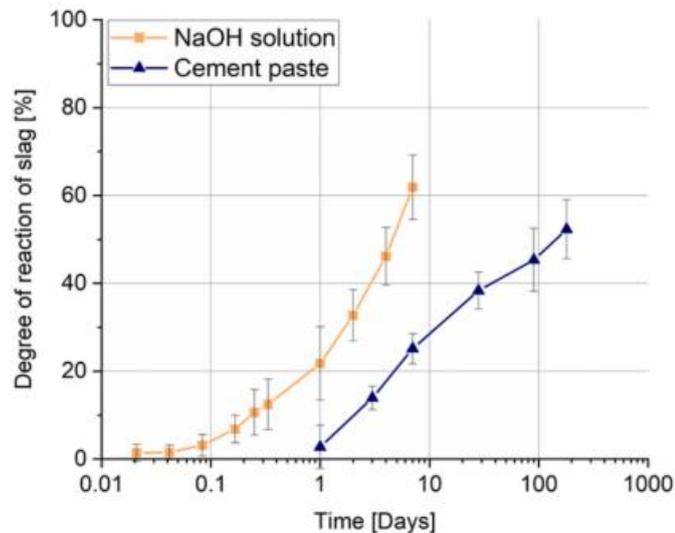


Figure 2.8. Degré de la réaction du laitier dans le NaOH et la pâte de ciment (Briki et al., 2021).

2.3. Conclusion

D'après plusieurs approches macroscopiques et microscopique des travaux de littérature, on a conclu que l'hydratation des additions pouzzolaniques notamment le laitier commence à contribuer au développement de la chaleur à partir de 15h dans des pâtes de ciment contenant cette addition. De plus, les avantages de l'utilisation des pouzzolanes sont des coûts faibles et une meilleure durabilité, mais il nécessite un temps de prise plus lente et le développement de la résistance à jeune âge est plus lente. L'ajout de 1 % en poids de CaCl_2 a conduit à un début plus précoce du développement de la chaleur. Cela a été observé dans les mélanges contenant du laitier, de sorte que ces observations sont probablement dues à l'effet accélérateur du CaCl_2 sur le ciment. Après 10 h d'hydratation, l'ajout de CaCl_2 a augmenté le dégagement de chaleur beaucoup plus fortement dans les mélanges contenant du laitier. Ces observations indiquent une intensité accrue de l'hydratation de cet ajout due à l'ajout de CaCl_2 . Cette accélération est due à la formation d'AFm. De plus, l'hydratation améliorée du laitier a entraîné des valeurs de résistance à la compression significativement plus élevées à un âge précoce. L'augmentation de la résistance à la compression correspond bien à une diminution plus rapide de la porosité. Après 28 jours, la résistance à la compression était similaire dans les deux systèmes - avec et

sans ajout de CaCl_2 . Dans les chapitres suivants on va étudier l'effet de CaCl_2 sur les mortiers à base de laitier et de verre au court terme et à long terme.



CHAPITRE III :
CARACTÉRISATION
DES MATÉRIAUX ET
MÉTHODOLOGIE

3.1. Introduction

Dans ce chapitre on va faire une description détaillée sur des matériaux de bases et des essais expérimentaux utilisés afin de réaliser le programme expérimental de notre travail de recherche.

On utilise une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement pour confectionner des mortiers à base de laitier et de verre. Les différents composants utilisés sont :

- CEM I/42.5
- Laitier à haut fourneaux
- Poudre de verre
- Sable d'oued Souf,
- Eau du robinet des réseaux urbains,
- Produit chimique CaCl_2 .

3.2. Matériaux de construction de base

3.2.1. Sable

La norme (NF P18-541) (Khouadjia et al., 2021) montre que le sable présente des caractéristiques, pouvant lui permettre d'être utilisé pour la confection des mortiers. De plus, le sable utilisé dans le domaine de bâtiments doit répondre à des exigences de qualité et à des caractéristiques spécifiques à chaque usage. Il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire. Le sable utilisé est de provenance du gisement d'Oued Souf, qui se situe à 620 Km au sud-est d'Alger, c'est un sable naturel (sable de dune), il est constitué principalement de petites particules de silice, propre dont les grains sont généralement de forme arrondie de dimension variant entre 0,08 et 3 mm.

3.2.1.1. Analyse granulométrique

Essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau (gravier ou sable) en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes et tracer la courbe granulométrique. La courbe granulométrie pour le sable utilisé est présentée dans la Figure 3.1.

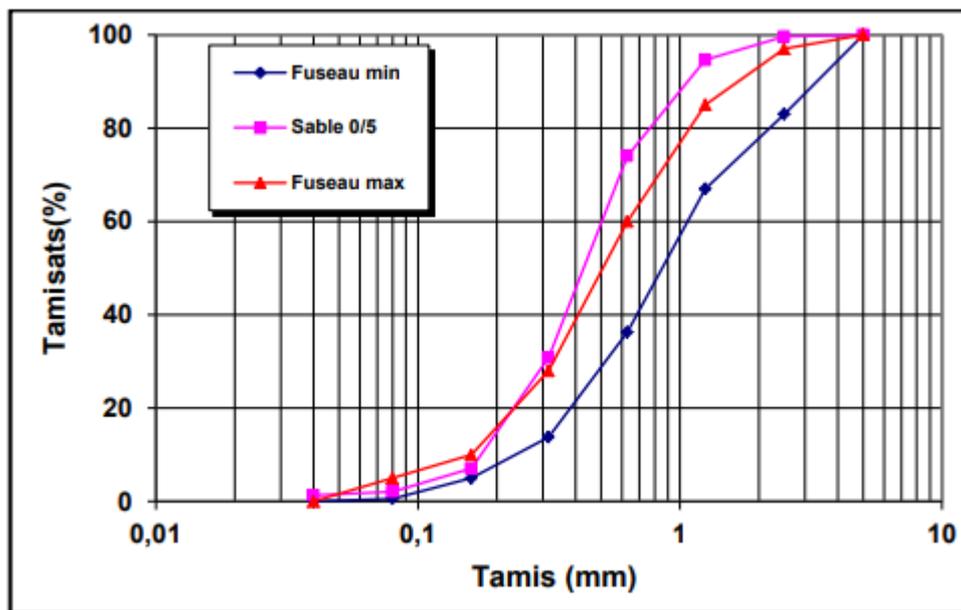


Figure 3. 6 Courbe granulométrique du sable d’Oeud souf.

3.2.1.2. Masse volumique absolue et apparente des granulats

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Différentes masses volumiques peuvent être définies pour les granulats : masses volumiques apparente et absolue (Mohamed & Djamil, 2018). La masse volumique absolue (γ_{ab}) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Le Tableau 3.2 montre les masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé.

Tableau 3. 1 Valeurs des masses volumiques du sable.

	Absolute (kg/m ³)	Apparente (kg/m ³)
Sable	2608	1617

3.2.1.3. Caractéristiques physico-chimiques

L'équivalent de sable est un essai pour caractériser la propreté d'un sable. Le principe de cet essai est consisté à séparer le sable des particules fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette. Le tableau 3.2 montre les résultats de l'équivalent de sable (933-8+A1, 2015).

Tableau 3. 5 Valeurs de l'équivalent de sable.

	ESV/ESP
--	---------

Sable	87; 85
-------	--------

3.2.2. Ciment

Le ciment utilisé est de type CEM I/ 42,5 provenant de Biskra. Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques fournis par la cimenterie. Les résultats de la composition chimique du clinker du ciment sont représentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3. 6Caractéristiques chimiques et physique du ciment utilisé.

Elément	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	Mgo	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
CEMI 42.5	61,60	20,40	/	1,73	5,53	/	/	3,54	2,29	3100	/	3600

3.2.3. Additions minérales

Les additions minérales que nous avons utilisées dans notre étude sont caractérisées par une finesse inférieure à 80µm. De plus, le laitier à haut fourneau utilisé comme ajout minéral actif, est un co-produit industriel qu'est formé en cours de fusion ou d'élaboration du métal par voie liquide de l'usine de l'acier d'El-Hadjar d'Annaba. Ainsi une poudre de verre issu du broyage de verre des vitres. Il a été fourni sous forme de pièces de dimension d'environ 5 cm, nettoyant de ses impuretés. Le déchet de verre a été introduit dans un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg et broyé jusqu'à l'obtention d'une poudre (Figure)

Les principales caractéristiques sont représentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3. 7Composition chimique et physique du laitier et du verre.

Elément	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	Mgo	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
Laitier	0.995	88.60	0	0,2	0.9649	0.398	/	/	/	2.7	1.4	4000
Verre	8.81	70.47	14.8	2.62	1.52	0.42	/	0.31	0.16	2.4	1.2	5000

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente les laboratoires : de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

3.2.5. Chlorure de calcium

CaCl₂ un produit chimique de laboratoire chimie de l'université de Bordj Bou Arreridj a été utilisé comme sel accélérateur. Les pourcentages en poids se réfèrent à cette forme CaCl hydratée. Les compositions et les analyses effectuées sur l'échantillon sont présentées dans le tableau 3.5. La quantité de 1 % en poids de CaCl₂ a été fixée suffisamment élevée pour avoir un effet observable, mais le pourcentage de Cl est inférieur à 0,65 % dans les pâtes de liant, ce qui correspond à la teneur maximale autorisée dans les bétons utilisant des ciments CEM III après la norme EN206/CN (Taleb et al., 2017).

3.3. Composition des différents mélanges

Notre étude expérimentale a consisté à ajouter une teneur de 30% par rapport au poids du ciment des additions (laitier et verre). Le rapport ciment/sable (C/S) utilisé était de 1/3 (en poids). Le rapport (E/C) utilisé pour la fabrication des mortiers témoins était de 0, 5. Les composants des mortiers ont été mélangés selon la norme EN 196-1. Afin de déterminer les paramètres mécaniques et physiques, les moules contenant les mortiers ont été recouverts d'un film plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Les échantillons ont été démoulés après 24 h et conservés dans l'eau à 20 ± 3°C jusqu'aux tests à 7, 28 et 60 jours. Les différentes compositions de nos mélanges sont données dans le tableau 3.6.

Tableau 3. 8.Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (kg/m ³)	MT	MTC	MLN	MLC	MVN	MVC
Ciment	450	450	315	315	315	315
LT	-	-	135	135	-	-
VR	-	-	-	-	135	135
Sable	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Eau	225	225	225	225	225	225
CaCl ₂	0	1%	0	1%	0	1%

3.4. Essais de caractérisations

3.4.1. Préparation des échantillons

Le schéma suivant montre les principales procédures utilisées pour confectionner différents mortiers.



Méthode de malaxage :

- Introduction du ciment + l'eau+CaCl₂ (30 secondes vitesse lente)
- Introduction du sable (30 secondes)
- 90 secondes pose

Mode de conservation 6 jours dans l'eau, ainsi à l'air.

Figure 3. 7 le test de fluidité selon la norme ASTM C 1437 -20 (C1473)

3.4.2. Essais à l'état fais

La fluidité des matériaux cimentaires est la caractéristique généralement utilisée sur les chantiers pour juger de leur comportement rhéologique et notamment leur consistance. À ce stade, le test de fluidité a été réalisé en utilisant le test de la table à secousses, selon la norme ASTM C 1437–20 (C1437-20, 2020) avec un moule tronconique qui répond aux exigences de la norme (diamètres de 70 et 100 mm, hauteur de 50mm). Trois essais ont été réalisés par composition.

Les masses volumiques humides des mélanges ont été déterminés en utilisant le moule 4 x 4 x 16 cm³. Ainsi, les masses volumiques apparentes sont les masses du volume apparent du produit durci des échantillons préparés de dimensions (4 x 4 x16 cm³).



Figure 3. 8 Le test de fluidité selon la norme ASTM C 1437–20 (C1437-20, 2020).

3.4.3. Résistances mécaniques

3.4.3.1. Résistance à la compression et à la flexion

L'évaluation de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion a été effectuée à 7 et 28 jours, selon la norme EN 196-1 (196-1, 2018) sur des échantillons de dimensions $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$.



Figure 3. 9 Appareils de l'essai de compression et de flexion.

3.4.3.2. Variations dimensionnelles et pondérale

Pour chaque mélange, les mesures de la perte en masse sont effectuées longitudinalement sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un refractomètre (précision $\pm 0,001 \text{ mm}$) voir la figure 3.6. Les éprouvettes sont conservées à l'air libre à une température de $22 \pm 2^\circ \text{ C}$ et une humidité relative de $55 \% \pm 5 \%$.

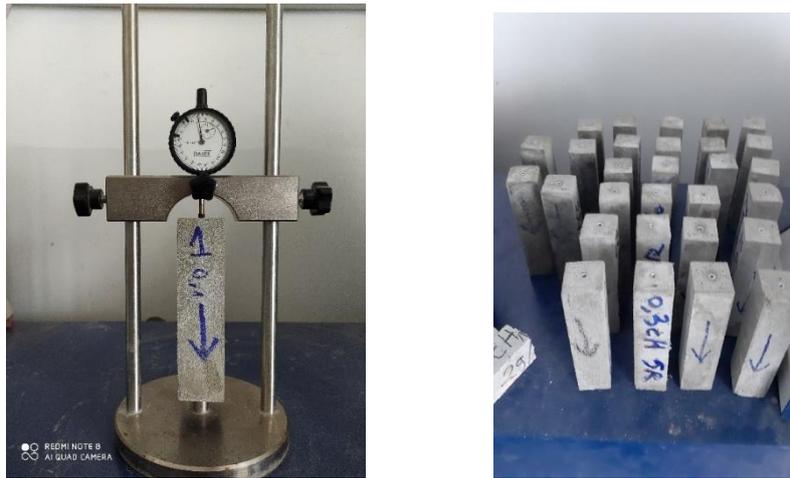


Figure 3.10 Mesure de variation dimensionnelle.

La formule de retrait s'interprète par la variation relative de longueur. Elle est généralement désignée par ε et calculée comme suite :

$$\varepsilon(t) = \frac{L(t) - L(t_0)}{L}$$

Où : L : la longueur de la tige étalon $l = 160$ mm.

L(t) : la longueur de l'éprouvette au temps t

L(t₀) : la longueur de l'éprouvette au temps t₀ choisie pour origine.

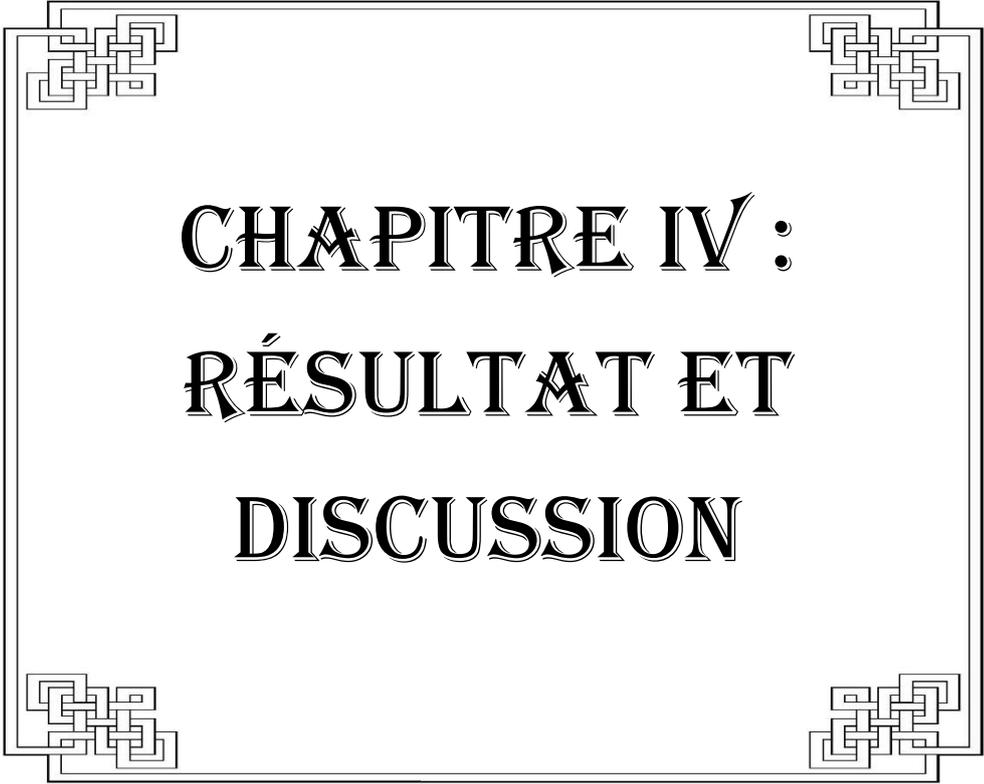
En général cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24 h après la confection des éprouvettes.

3.3.4. Absorption d'eau

L'absorption d'eau a ensuite été étudiée. C'est un paramètre important lors de l'évaluation et de la prévision de la durabilité des structures en mortier. L'objectif de ce test est donc de suivre la masse d'eau absorbée par les mortiers dans le temps pour mettre en évidence une éventuelle différence de porosité ouverte de nos mélanges. Ce test a été réalisé à 28 jours selon la procédure décrite dans la norme (EN 1015-18).

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les essais de caractéristique des matériaux de base des différents mélanges. Les constituants sont conformes aux normes et recommandations pour leur utilisation dans les mortiers hydrauliques. Ce qui nous facilite l'adoption d'une approche de formulation adéquate. Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges sous différentes sollicitation.



CHAPITRE IV :
RÉSULTAT ET
DISCUSSION

4.1. Introduction

Le travail suivant s'intéresse aux performances mécaniques et physico-chimiques des mortiers cimentaires à base de laitier ou de verre contenant ou non CaCl_2 .

4.2. Propriété à l'état frais

4.2.1. Etalement

Figure 4.1 illustre la variation du diamètre de l'étalement des différents mélanges étudiés.

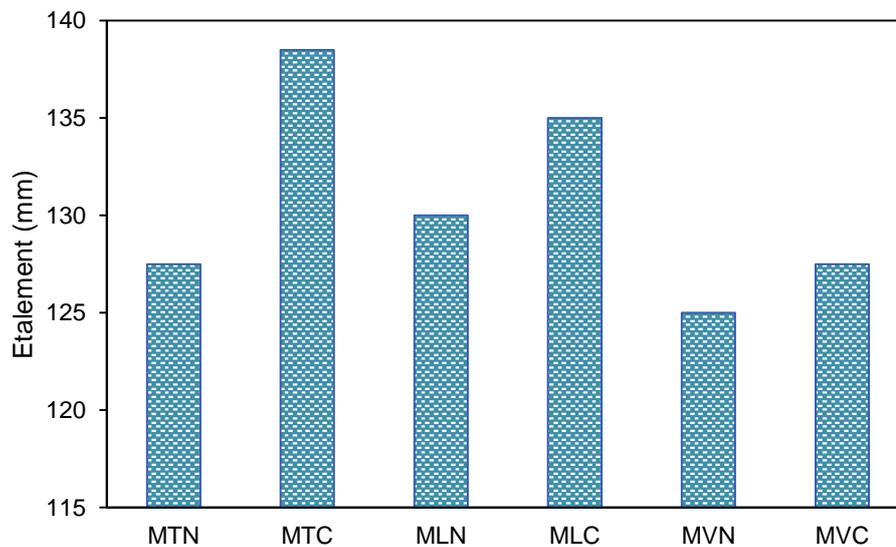


Figure 4.1. Etalement des différents mélanges étudiés.

En vue d'étudier l'effet de l'incorporation des ajouts cimentaires dans le mortier sur l'étalement, l'essai d'étalement a été réalisé (figure 4.1).

La figure 1 montre la variation du diamètre d'étalement des mortiers en fonction de types d'ajouts utilisés (laitier, poudre de verre), ainsi de la présence ou non de l'accélérateur CaCl_2 . On constate que la fluidité du mortier a été affectée par ces additions et le produit chimique. On remarque que l'addition de 30 % de laitier améliore l'étalement de 1.96 % par rapport au mortier de référence (MT). Par contre, une légère diminution a été constaté pour les mortiers avec la poudre de verre, cette diminution et de l'ordre de 2%. On constate aussi que l'addition du CaCl_2 a un effet positif sur tous les mélanges étudiés ; l'ajout de 1% de CaCl_2 dans les MTC, MLC et MVC donne une amélioration de l'ordre de 8.62%, 3.84% et 2.1% par rapport aux mélanges MTN, MLN et MVC respectivement. Ceci est

dû à l'effet de dispersion des particules du ciment, ainsi les ions de OH contenant dans le produit CaCl_2 .

4.2.2. Masse volumique humide

Figure 4.2 illustre la densité humide et le diamètre de l'étalement des différents mélanges.

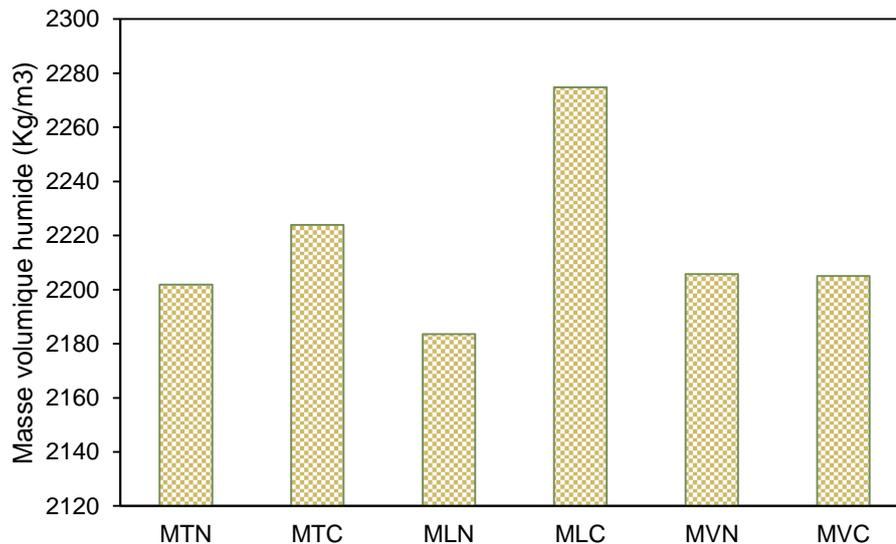


Figure 4.2. Masse volumique humide des différents mélanges.

D'après la figure 4.2 on constate que la densité des mortiers diminue légèrement en fonction de l'ajout cimentaire utilisé. Ceci est peut-être dû à la faible densité de laitier 2700kg/m^3 par rapport à la densité de ciment 3100kg/m^3 . Cependant l'introduction du CaCl_2 augmente la densité des mortiers notamment pour le mortier MLC. Ceci est dû à l'accélération importante de l'hydratation du laitier avec CaCl_2 .

4.3. Propriétés mécaniques

4.3.1. Résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion des mortiers cimentaires à base de laitier ou de verre contenant ou non CaCl_2 sont illustrés par la figure 4.3. Ces résultats sont la moyenne de quatre essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 160\text{mm}^3$.

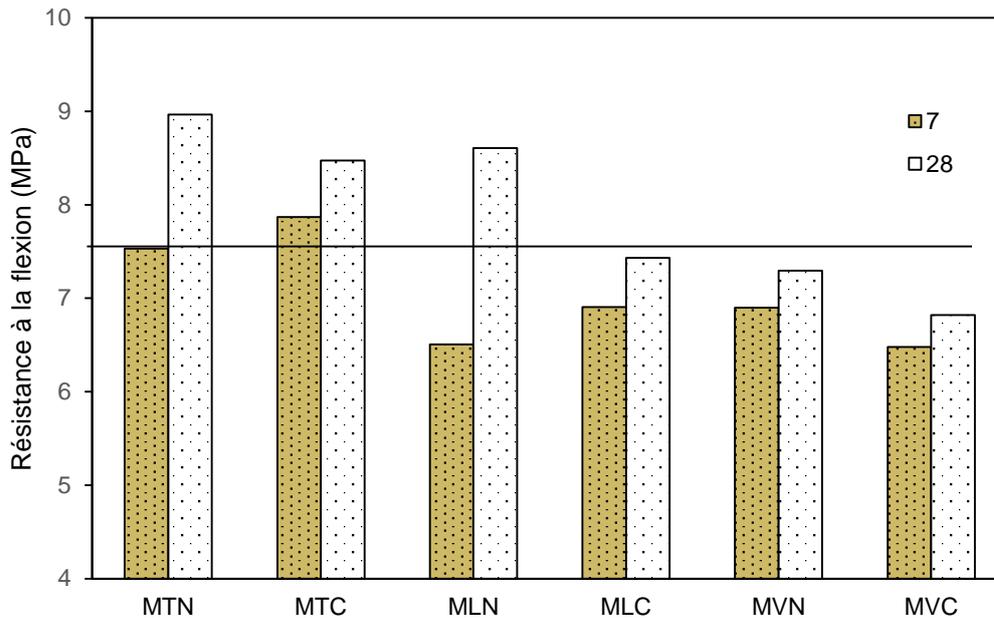


Figure 4.3. Résistance à la flexion des différents mélanges.

Les résultats de la résistance à la flexion à 7 et 28 jours des mortiers en fonction de types d'ajouts et l'accélérateur utilisés sont illustrés sur les figures 4.3. On observe une légère diminution de l'ordre de 13.67% et 8.36 % de la résistance à la flexion à jeune âge (7 jours) pour les ML et MV respectivement. D'autre part, l'utilisation d'un accélérateur CaCl_2 aide à améliorer la résistance à la flexion à 7 jours pour les mélanges à base de laitier. Dans le cas de la poudre de verre on remarque un effet négatif de CaCl_2 sur la résistance à la flexion. Par conséquent, on peut dire que le CaCl_2 réagi mieux avec le laitier pour former plus de C-S-H qu'avec la poudre de verre.

On constate aussi que la résistance à la flexion augmente à 28 jours pour tous les mélanges grâce aux réactions chimiques de ciment et la formation des C-S-H. La remarque la plus importante qu'on peut tirer d'après cette propriété c'est que le produit chimique CaCl_2 à un léger effet négatif sur la résistance à la flexion.

4.3.2. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers cimentaires à base de laitier ou de verre contenant ou non CaCl_2 sont illustrés par la figure 4.4 ces résultats sont la moyenne de six essais sur les fragments récupérés du test de la résistance à la flexion.

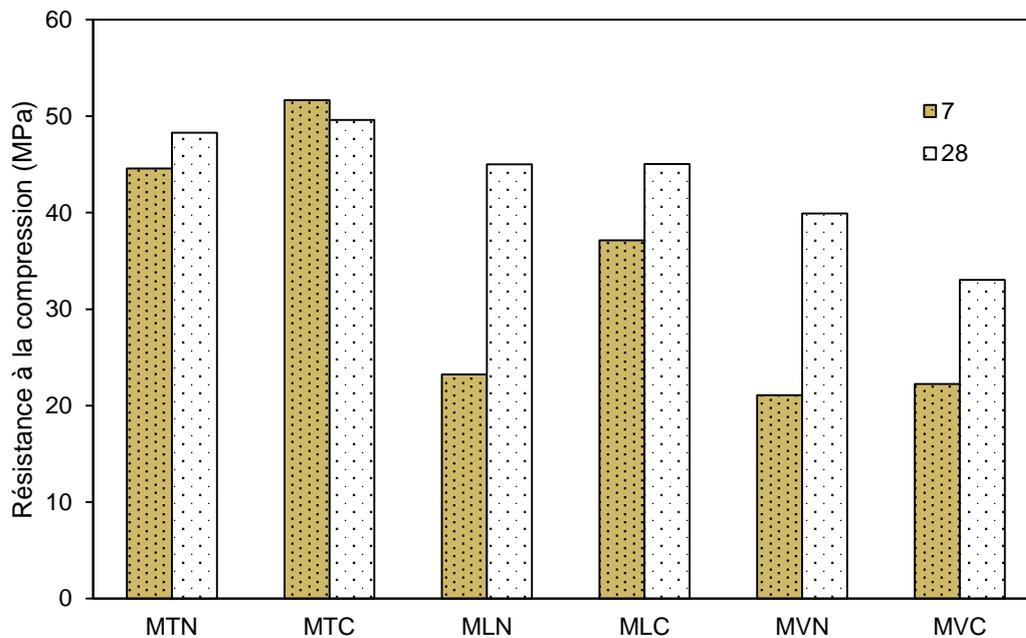


Figure 4.4. Résistance à la compression des différents mélanges.

D'après la figure 4.4 on constate que l'utilisation d'un ajout cimentaire tel que le laitier et la poudre de verre diminue la résistance à la compression à 7 jours du mortier de l'ordre de 48% et 53% respectivement par rapport au MT.

D'autre part, l'addition de 1% de CaCl_2 provoque une amélioration importante jusqu'à 60% de la résistance à la compression à 7 jours pour le mélange MLC par rapport au MLN. Dans le cas de la poudre de verre, les résultats montrent qu'il n'a pas un effet notable (une amélioration négligeable) de CaCl_2 sur la résistance à la compression à jeune âge. Pour les résultats de la résistance à 28 jours. On remarque qu'il y a une augmentation grâce à la réactions chimiques du ciment et la formation des C-S-H.

On conclut que la présence de CaCl_2 dans le laitier est bénéfique pour améliorer les performances mécaniques des mortiers cimentaire pouzzolanique.

4.4. Vitesse ultrason

Les résultats de vitesse ultrason des mortiers cimentaires à base de laitier ou de verre contenant ou non CaCl_2 sont illustrés par la figure 4.5. Ces résultats sont la moyenne de 3 essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 x 40 x 160 mm³.

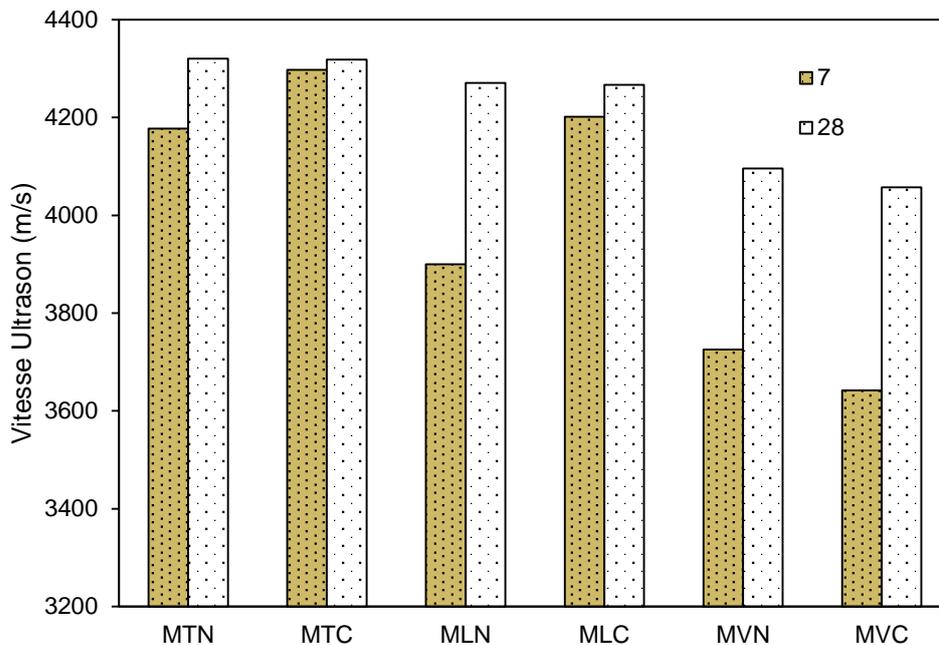


Figure 4.5. Résistance à la compression des différents mélanges.

La figure 4.5 permet de mettre en lumière l'influence des ajouts cimentaire et CaCl_2 sur la vitesse de l'ultrason à travers des éprouvettes 4x 4 x 16cm³. On constate que l'addition de CaCl_2 quel que soit le type d'ajouts incorporé (sans ou avec ajout) aide à augmenter la vitesse ultrasonique à jeune âge. L'utilisation de CaCl_2 augmente la vitesse de 6.02% pour le mortier de référence et 7.73% pour le mélange à base de laitier. Ceci et peut être dû à la présence de CaCl_2 qui provoque une accélération de formation des hydrates ce qui va combler les pores et les micros pores en améliorant la compacité. D'autre coté, une légère diminution dans le cas de mortier à base de poudre de verre. Ceci est due que le CaCl_2 n'a aucun effet sur la poudre de verre comme on a vue précédemment.

4.5. Relation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason

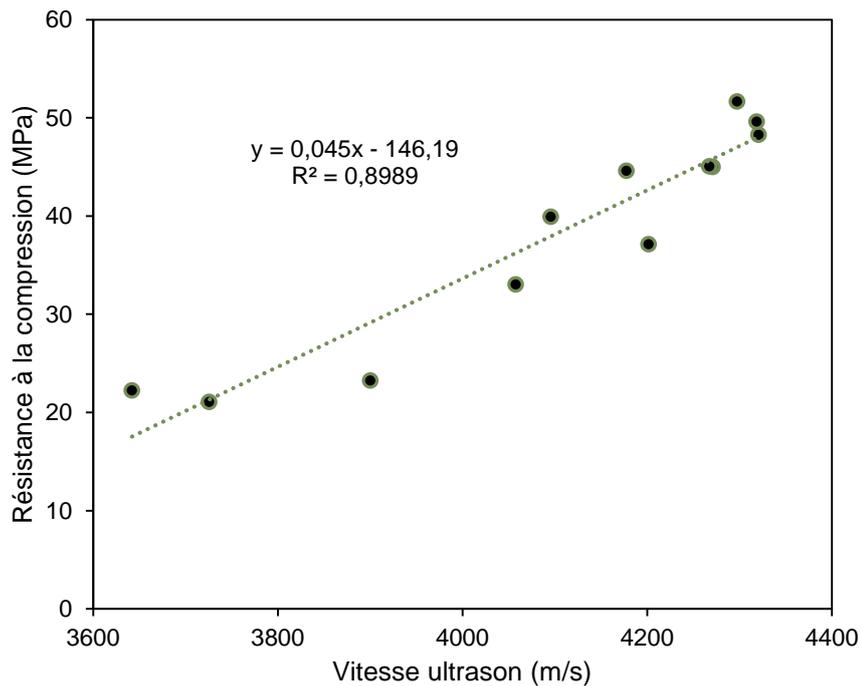


Figure 4.6. Relation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrason. D'après la figure 4.6 on constate une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique quand cette vitesse augmente la résistance à la compression. Le coefficient de corrélation $R^2=0.89$.

4.6. Relation entre la densité et la vitesse ultrason

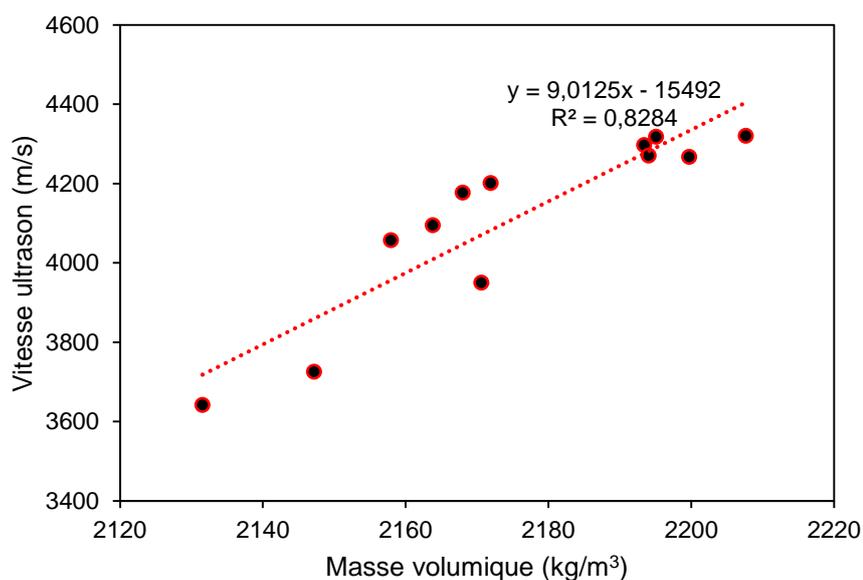


Figure 4.7. Relation entre la masse volumique et la vitesse ultrason.

La figure 4.7 illustre la corrélation entre la vitesse ultrasonique et la masse volumique. On remarque que la vitesse ultrasonique augmente proportionnellement avec l'augmentation de la masse volumique avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.828$.

4.7. Masse volumique apparente

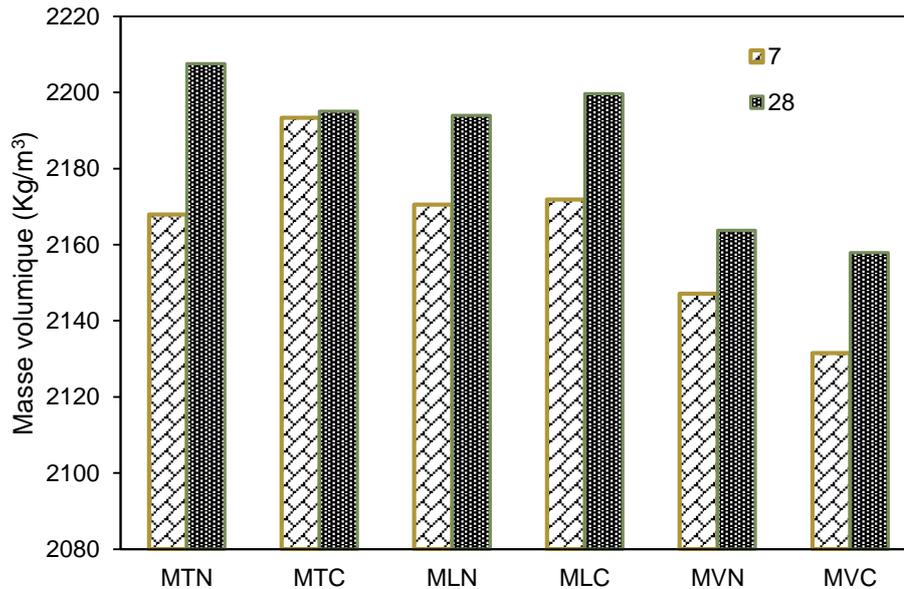


Figure 4.8. la masse volumique apparente

A partir de la figure 4.8 on remarque que la présence de laitier et de la poudre de verre diminue la compacité du mélange par conséquent la densité sèche a été diminuée par rapport au MTN. Ainsi la présence de CaCl_2 dans les mortiers cimentaires contenant ou non le laitier provoque une augmentation de la compacité conduisant une amélioration de la densité sèche des composites.

4.8. Absorption accessible à l'eau

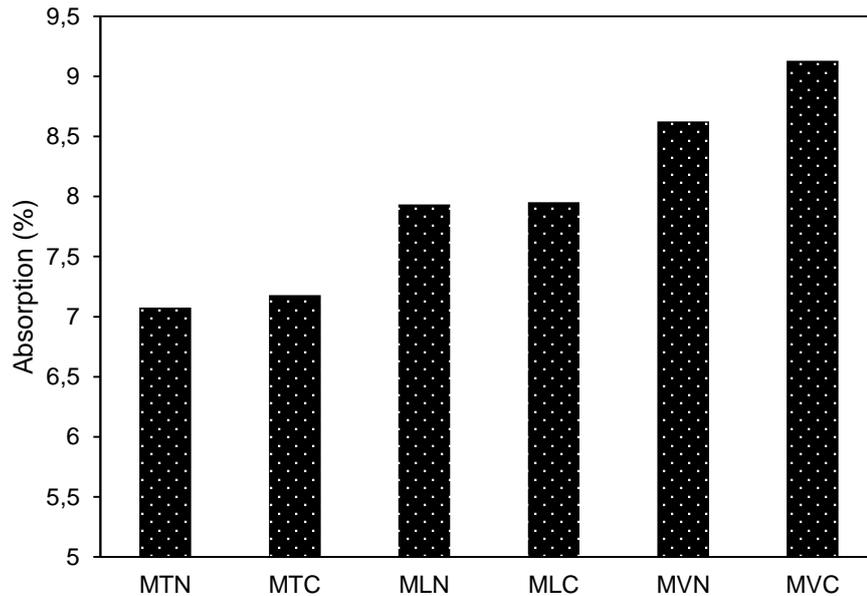


Figure 4.9. Absorption d'eau par immersion totale.

L'absorption d'eau par immersion totale fournit une estimation des pores totaux du matériaux qui peuvent être atteints par l'eau (Booya et al., 2018). La plus faible d'absorption a été observée à partir du mélange MTN et MTC. Cependant, l'ajout de laitier a légèrement augmenté la porosité du mortier et a conduit à un pourcentage d'absorption élevé. L'effet de CaCl_2 est négligeable sur l'absorption d'eau à 28 jours.

4.8. Retrait total

Le retrait est une autre propriété importante concernant la stabilité dimensionnelle des matériaux cimentaires et polymères. L'incompatibilité due au retrait de séchage provoque des contraintes internes, qui peuvent conduire à une défaillance à l'interface ou à l'intérieur du matériau. Les résultats de retrait des différents mélanges sont présentés dans la figure 4.10.

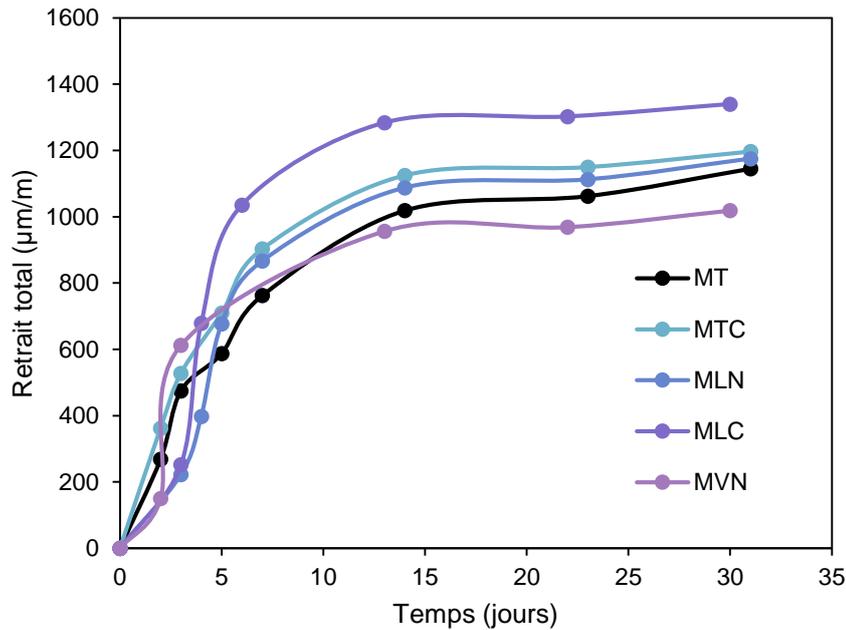


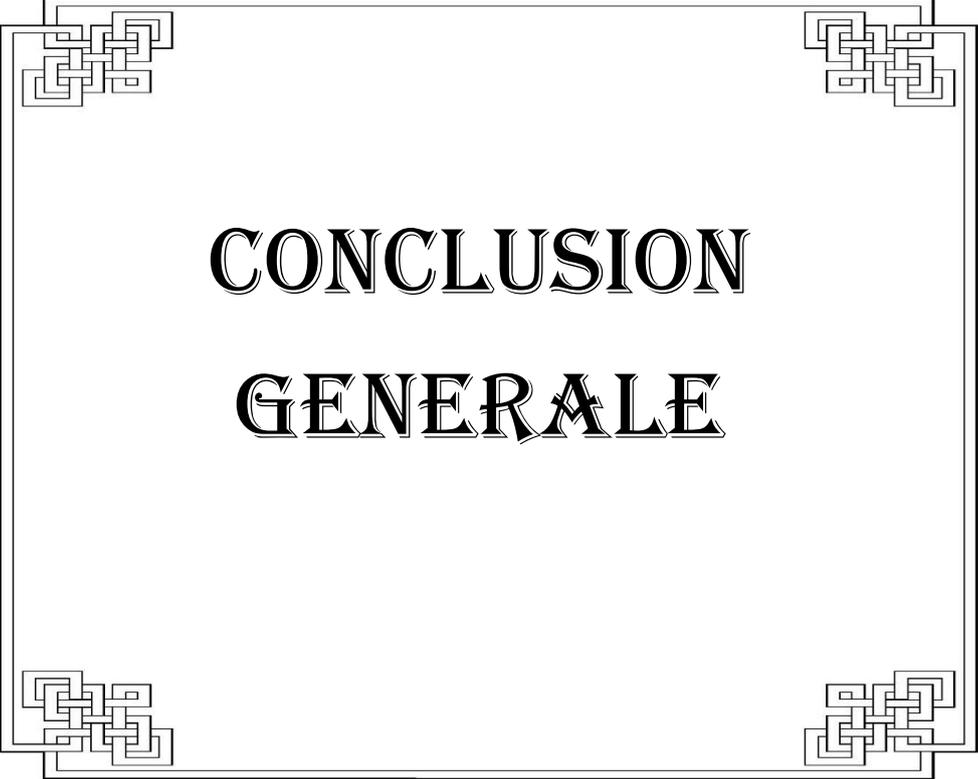
Figure 4.10.Retrait total des différents mélanges.

La figure 4.10 montre une importante déformation de retrait caractérisée par la perte d'humidité stockée dans les pores capillaires due à un très fort gradient d'humidité entre le matériau à tester et le milieu extérieur. Le retrait total est lié à la migration de l'humidité à l'intérieur du matériau, qui est en déséquilibre avec le milieu extérieur. Le départ de cette eau entraîne initialement peu ou pas de retrait car il s'agit d'eau libre contenue dans les macropores. En revanche, à mesure que le séchage se poursuit, l'eau évaporée se lie plus fortement aux autres composants de la matrice cimentaire, provoquant ainsi un retrait du matériau. D'après la figure 4.10, on note que les éprouvettes avec un CaCl_2 ont subi un retrait total légèrement plus élevé que ceux sans CaCl_2 . De plus la présence de la poudre de verre provoque une diminution du retrait. Donc l'augmentation du dosage en fines de verre diminue le retrait total des mortiers cimentaires.

4.1 0 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence le rôle important de laitier et de verre ainsi la présence de CaCl_2 sur le comportement mécanique et les propriétés de transfère des mortiers cimentaires. Le produit CaCl_2 améliore, es performances mécaniques et physiques notamment à court terme. Par ailleurs, le

comportement des mortiers avec laitiers est meilleur par rapport au comportement ceux avec poudre de verre.



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre étude était de tester la réactivité du laitier et de la poudre de verre dans les mortiers cimentaires contenant de CaCl_2

Pour cela, laitier et poudre de verre ont été utilisées en remplacement partiellement du ciment avec 30%. Ainsi on a ajouté 1% de CaCl_2 durant la confection de différents mélanges. L'approche est essentiellement expérimentale et comporte deux axes principaux :

Le premier axe concerne l'étude de l'effet de l'introduction des fines recyclées sur les performances mécaniques des mortiers cimentaires.

Le deuxième axe concerne l'influence de la présence de CaCl_2 sur le comportement et à la durabilité des mortiers cimentaires contenant de laitier ou de verre.

En se basant sur les résultats obtenus, on peut dire qu'il est possible d'utiliser CaCl_2 afin d'accélérer la réactivité du laitier. Ainsi aucun effet du CaCl_2 sur le la poudre de verre à court et à long terme. Cependant la présence de CaCl_2 augmente légèrement le retrait total.

De plus, l'introduction de 30% de laitier présente des performances comparables au mortier avec 100% de ciment.

On recommande de faire des essais de microstructure pour avoir les variations au niveau des hydrates dans le ciment composé plus CaCl_2 .

Références :

- ,1-196E. (2018). Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- +8-933A1, N. E. (2015). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable .
- Adu-Amankwah, S., Zajac, M., Stabler, C., Lothenbach, B., & Black, L. (2017). Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements. *Cement and Concrete Research*, 100, 96-109 .
- Bellmann, F., & Stark, J. (2009). Activation of blast furnace slag by a new method. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 644-650 .
- Booya, E., Ghaednia, H., Das, S., & Pande, H. (2018). Durability of cementitious materials reinforced with various Kraft pulp fibers. *Construction and Building Materials*, 191, 1191-1200 .
- Briki, Y., Zajac, M., Haha, M. B., & Scrivener, K. (2021). Factors affecting the reactivity of slag at early and late ages. *Cement and Concrete Research*, 150, 106604 .
- C1437-20, A. (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, . ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Chahinez, A. (2009). *Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité)*, Thèse de doctorat de l'université de Mentouri, Constantine .[
- Douaïssia, Z., Merzoud, M., Habita, M. F., & Benazzouk, A. (2021). 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. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 26(1), 78-91 .
- Ebert, B. A. R. (2021). Valorization of MSWI Fly Ash for Use in Cement-Based Materials .
- Khouadjia, M., Belkadi, A. A., Kessal, O., Dridi, M., & Chemali, R. (2021). ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT DES BÉTONS A BASE DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DU PORT DE DJEN DJEN-JIJEL. (Ed.),^(Eds.). 2nd International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE-2021).
- Lee, G., Ling, T.-C., Wong, Y.-L., & Poon, C.-S. (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2611-2618 .
- Makaratat, N., Jaturapitakkul, C., Namarak, C., & Sata, V. (2011). Effects of binder and CaCl₂ contents on the strength of calcium carbide residue-fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(3), 436-443 .
- Matthes, W., Vollpracht, A., Villagrán, Y., Kamali-Bernard, S., Hooton, D., Gruyaert, E., Soutsos, M., & De Belie, N. (2018). Ground granulated blast-furnace slag (*Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials* (pp. 1-53). Springer .
- Mohamed, G., & Djamila, B. (2018). Physical and mechanical properties of cement mortar made with brick waste. (Ed.),^(Eds.). MATEC Web of Conferences.
- Moranville-Regourd, M. (1998). Cements made from blastfurnace slag (*Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (pp. 637-678). Elsevier .
- NOUI, A. (2018). *Contribution à l'étude des caractéristiques physiques et mécaniques et de la durabilité des ciments ternaires*, Université de M'sila .[
- Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329 .
- Poirier, M., Blotvogel, S., Noiriél, C., Bonnin, A., Kaknics, J., Olbinado, M., Steger, L., Patapy, C., & Cyr, M. (2022). Synchrotron X-ray micro-tomography investigation of the early hydration of blended cements: A case study on CaCl₂-accelerated

CONCLUSION GENERALE

- slag-based blended cements. *Construction and Building Materials*, 321, 126412 .
- Riding, K., Silva, D. A., & Scrivener, K. (2010). Early age strength enhancement of blended cement systems by CaCl₂ and diethanol-isopropanolamine. *Cement and Concrete Research*, 40(6), 935-946 .
- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials* (Vol. 540). Crc Press Boca Raton, FL, USA .
- Shen, H., Forssberg, E., & Nordström, U. (2004). Physicochemical and mineralogical properties of stainless steel slags oriented to metal recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(3), 245-271 .
- Steger, L., Blotvogel, S., Frouin, L., Patapy, C., & Cyr, M. (2021). Experimental evidence for the acceleration of slag hydration in blended cements by the addition of CaCl₂. *Cement and Concrete Research*, 149, 106558 .
- Taleb, O., Ghomari, F., Boukli Hacene, M. A., Kadri, E.-H., & Soualhi, H. (2017). Formulation and rheology of eco-self-compacting concrete (Eco-SCC). *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(3), 272-296 .
- Tijani, M., Olawale, S., Abdullahi, L., Aliyu, M., & Ajagbe, W. (2021). Effect of sorghum husk ash and calcium chloride on compressive strength of grade 20 concrete. (Ed.), (Eds.). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Tokuy, M. (2016). *Cement and concrete mineral admixtures*. CRC Press .
- Van Rompaey, G. (2006). Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré .
- Wallace, J. W., & Orakcal, K. (2002). ACI 318-99 provisions for seismic design of structural walls. *Structural Journal*, 99(4), 499-508 .
- Wang, Y., Jia, J., Cao, Q., & Gao, X. (2022). Effect of calcium formate on the compressive strength, and hydration process of cement composite containing fly ash and slag. *Journal of Building Engineering*, 50, 104133 .
- Zhou, L., Wang, W., Liu, R., & Thomas, B. G. (2013). Computational modeling of temperature, flow, and crystallization of mold slag during double hot thermocouple technique experiments. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(5), 1264-1279 .