



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE 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

Mémoire

En vue de l'obtention du **diplôme de Master**

Filière : **Génie civil**

Spécialité : **Matériaux de construction en génie civil**

Par :

Amari Wafa

Berkati Lamis

Thème

***Incorporation des boues d'épuration et du
CaCl₂ dans la production de matériaux de
construction durables***

Devant le jury :

Mr.Khannouf Abdelaziz	M.A.A	Président	Univ-BBA
Mr.Maafi Nabil	M.A.A	Examineur	Univ-BBA
Mr.Goufi Abdelmalik	M.A.A	Examineur	Univ-BBA
Mr.Belkadi Ahmed Abderraouf	M.A.A	Encadreur	Univ-BBA
Mme.Samra Rahmani		Co-encadrente	Univ-BBA

Promotion 2023 / 2024

Remercîment

Avant toute chose, nous rendons grâce à Allah, le Tout Miséricordieux, qui nous a donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos très chers parents, que Dieu les protège, pour tout ce qu'ils ont fait afin de nous permettre d'atteindre ce stade.

Nos sincères remerciements vont à Dr BELKADI Ahmed Abderraouf pour avoir supervisé et guidé ce travail avec bienveillance.

Nous tenons également à exprimer notre vive reconnaissance à Dr RAHMANI Samra, ainsi qu'à l'ensemble du corps professoral du département de génie civil, et à tous ceux qui ont contribué à notre succès tout au long de notre parcours académique.

Dédicace 01

Je dédie ce travail avec amour et reconnaissance :

A mes parents, les êtres les plus chers au monde. A mon père Abderrahman, pour son soutien moral, matériel et financier indéfectible jusqu'à ce jour. A ma mère Bensaloua Abla, pour ses innombrables nuits de prières, sa sagesse et sa générosité à mon égard. Chère mère, ce travail est le fruit de tes efforts et de ton dévouement.

A mes soeurs et frères, merci pour votre présence et vos encouragements.

A ma chère amie Maroua, qui m'a accompagnée durant mon parcours universitaire.

A mes camarades de promotion, pour leur aide et leurs précieux conseils.

A mon fiancé, qui m'a inspirée et épaulée dans l'élaboration de ce mémoire.

A toute la famille Barkati.

Lamis

Dédicace 02

Grâce à Dieu Tout-Puissant, je dédie ce travail avec amour et reconnaissance
À ma très chère grand-mère, qui nous a quittés l'année passée. Ta foi et ton
amour m'ont toujours soutenu. Ta présence bienveillante et tes prières me
manquent chaque jour. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi. Tu resteras à
jamais dans mon cœur.

À mon très cher père, que j'aime plus que tout, qui m'a toujours encouragée et
qui croit en moi. Merci au meilleur papa du monde.

À ma très chère mère, qui me soutient dans le bonheur comme dans la douleur,
et qui me comprend mieux que quiconque.

À mes très chers frères, tout mon respect et mon affection en témoignage de leur
soutien, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

À mes chères amies Sara, Ilham et Imane, avec qui j'ai passé les plus beaux
jours de l'université.

À mes camarades de promotion, pour leur aide et leurs précieux conseils.

À tous mes enseignants qui ont participé à ma formation.

À tous ceux qui me connaissent et tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Wafa

Résumé

L'étude se concentre sur l'incorporation de la boue des stations d'épuration (BSE) comme substitut partiel du ciment dans le béton, afin de réduire les émissions de CO₂ associées à sa production. Pour accélérer le processus de prise et de durcissement, des accélérateurs tels que le chlorure de calcium (CaCl₂) sont ajoutés. Huit mélanges de mortier ont été préparés, variant les taux d'incorporation de BSE (10%, 15%, et 20%) avec et sans l'ajout de 1% de CaCl₂. Les propriétés à l'état frais (étalement) et durcis (résistance à la compression, vitesse ultrasonique, durabilité aux attaques chimiques) ont été évalués. Les résultats indiquent que la BSE présente une résistance similaire ou supérieure à celle d'un mortier conventionnel, tout en conservant une bonne maniabilité. L'ajout de CaCl₂ a un impact significatif sur la résistance au jeune âge des mortiers. En conclusion, cette étude démontre le potentiel de la BSE comme matériau alternatif dans la production de béton, offrant des avantages écologiques tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes, notamment avec l'utilisation judicieuse d'accélérateurs tels que le CaCl₂.

Mot clé : Mortier, Ajouts cimentaires, boue des stations d'épuration, CaCl₂, Résistance à la compression, Durabilité.

Abstract:

The study focuses on incorporating sewage sludge from wastewater treatment plants (SS) as a partial cement replacement in concrete, in order to reduce the CO₂ emissions associated with its production. To accelerate the setting and hardening process, accelerators such as calcium chloride (CaCl₂) are added. Eight mortar mixes were prepared; varying the SS incorporation rates (10%, 15%, and 20%) with and without the addition of 1% CaCl₂. The properties in the fresh (slump) and hardened (compressive resistance, ultrasonic speed, durability to chemical attacks) were evaluated. The results indicate that SS exhibits similar or superior strength compared to conventional mortar, while maintaining good workability. The addition of CaCl₂ has a significant impact on the early age strength of mortars. In conclusion, this study demonstrates the potential of SS as an alternative material in concrete production, offering environmental benefits while maintaining satisfactory mechanical performance, particularly with the judicious use of accelerators such as CaCl₂.

Keywords: Mortar, Cementitious Additions, Sewage Sludge, CaCl₂, Compressive Strength, Durability.

ملخص:

تركز الدراسة على إدماج الحمأة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي كبديل جزئي للإسمنت في الخرسانة، من أجل الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإنتاجها. ولتسريع عملية الشك والتصلب، يتم إضافة المسرعات مثل كلوريد الكالسيوم. تم إعداد ثمانية خلطة ملاط، بتغيير معدلات إدماج الحمأة (10% و15% و20%) مع أو بدون إضافة 1% من كلوريد الكالسيوم. تم تقييم الخصائص في الحالة الطازجة (الانتشار) والحالة الصلبة (مقاومة الضغط، وسرعة الموجات فوق الصوتية، ومتانة الهجمات الكيميائية). تشير النتائج إلى أن الحمأة لها قوة مماثلة أو أعلى من ملاط تقليدي، مع الحفاظ على قابلية تشغيل جيدة. إن إضافة كلوريد الكالسيوم لها تأثير كبير على مقاومة الملاط في سن مبكرة. وخلاصة القول، تُظهر هذه الدراسة إمكانات الحمأة كمادة بديلة في إنتاج الخرسانة، حيث توفر فوائد بيئية مع الحفاظ على أداء ميكانيكي مرض، لا سيما مع الاستخدام الرشيد للمسرعات مثل كلوريد الكالسيوم.

الكلمات الرئيسية: ملاط، إضافات إسمنتية، حمأة مياه الصرف الصحي، كلوريد الكالسيوم، مقاومة الضغط، المتانة

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Etat De L'art Sur Les Ajouts Cimentaires	
1. Introduction	4
2. Les ajouts cimentaires	4
3. Principaux ajouts cimentaires.....	4
3.1. Les laitiers de haut fourneau	4
3.2. Fumé de silice.....	5
3.3. Cendre volante.....	6
3.4. La boue des stations d'épurations	6
3.4.1. Définition	6
3.4.2. Traitement de la boue des stations d'épuration	7
3.4.3. Les caractéristiques de BSE	8
3.4.4. Effet du BSE sur la performance du mortier	10
4. Conclusion.....	13
Chapitre II : l'influence du chlorure de calcium sur les mortiers	
1. Introduction	16
5. Les accélérateurs chimiques	16
6. Différents types d'accélérateurs chimiques.....	16
6.1. Les accélérateurs alcalins (NA) et non alcalins (AS).....	16
6.2. Sulfate de sodium Na_2SO_4	17
6.3. Formiate de calcium (CF)	17
6.4. Hydroxyde de sodium (NaOH)	18
6.5. Chlorure de calcium (CaCl_2)	19
7. Effet de chlorure de calcium	19
7.1. Sur l'hydratation du ciment	20
7.2. Sur la morphologie des hydrates	20
7.3. Résistance à la compression	21
8. Conclusion.....	24
Chapitre III : Études expérimentales	
1. Introduction	26

2.	Matériaux de construction de base	26
2.1.	Sable	26
2.1.1.	Caractéristiques du sable	26
2.2.	Ciment	28
2.3.	Additions minérales	29
2.3.1.	Boue d'épuration	29
2.3.2.	Chlorure de calcium	30
2.3.3.	Eau de gâchage	31
3.	Composition des différents mélanges	31
4.	Essais de caractérisations	31
4.1.	Essais à l'état frais	31
4.1.1.	L'étalement.....	31
4.2.	Essais à l'état durci	32
4.2.1.	Densité.....	Erreur ! Signet non défini.
4.2.2.	Résistance à la compression	32
4.2.3.	La vitesse d'impulsion ultrasonique	32
4.2.4.	Attaque chimique	33
5.	Mode d'opération	34
8.1.	Matériels utilisés	34
8.2.	Préparation des échantillons	35
8.3.	Le malaxage	35
8.4.	Le moulage.....	36
8.5.	La cure.....	36
9.	Conclusion.....	37

Chapitre IV : Résultats et discussion

1.	Introduction	39
2.	Propriété à l'état frais	39
2.1.	Etalement.....	39
2.2.	La masse volumique humide.....	Erreur ! Signet non défini.
3.	Propriétés à l'état durcis	41
3.1.	La résistance à la compression	41
3.2.	Vitesse ultrason	43
3.3.	Attaque chimique : Perte en poids.....	45

4. Conclusion.....	47
Conclusion générale	50

Liste des figures

Figure 1: Poudre de laitier (site web)	5
Figure 2: Poudre de fumé de silice [19]	6
Figure 3: Poudre de cendre volante [21]	6
Figure 4: Station d'épuration (site web) [24]	7
Figure 5: Définition utilisation de la boue [25]	7
Figure 6: Comparaison de la composition chimique de la cendre de boue , des cendres volantes et du ciment.....	9
Figure 7 : Variation des valeurs FTS par rapport au pourcentage de cendre de boue[43].....	10
Figure 8: L'effet de pourcentage de cendre de boue sur le temps de prise[45]	11
Figure 9: L'effet de pourcentage de BSE sur Résistances à la compression à (a) 2 jours, (b) 7 jours, (c) 28 jours et (d) 90 jours	12
Figure 10 : Résistance à la compression du mélange de liants (ciment-cendre de boue) [50].	13
Figure 11: Résistance du béton à ultra hautes performances avec des accélérateurs alcalins (NA) et non alcalins (AS) [55]	17
Figure 12: Résistance à la compression et débit d'échantillons avec différents dosages de CF. [57]	18
Figure 13: Degré de la réaction dans le NaOH [58].....	19
Figure 14: Courbes d'évolution thermique du ciment Portland mélangé à 0,45 % (Ca-L) et 0,9 % (Ca-H) de CaCl ₂ [64].	20
Figure 15: Images microscopiques aux rayons X mous de pâtes C 3 S avec et sans 2 % de CaCl ₂ après 2 h d'hydratation [69].	21
Figure 16: Impact du CaCl ₂ sur les résistances mécaniques d'un CEM III/C. [70]	22
Figure 17: Résistance à la compression des différentes pâtes contenant laitières [73].....	23
Figure 18: Résistance à la compression des bétons en fonction du dosage de SHA et CaCl ₂ [74]	23
Figure 19: Sable de Oued Souf	26
Figure 20: Courbe granulométrique du sable d'Oued souf.	27
Figure 21: l'essai d'équivalent de sable (labo génie civil).....	28
Figure 22: Ciment I 42.5- Biskra	29
Figure 23: La poudre de BSE.....	30
Figure 24: la poudre de CaCl ₂ de laboratoire d'université.....	30
Figure 25: Mesure d'étalement	32
Figure 26:L'appareil de l'écrasement labo génie civil université de BBA.....	32
Figure 27: L'appareil Ultrason de labo génie civil de l'université de BBA	33
Figure 28: Les éprouvettes après 30 jrs de conservation dans la solution sulfurique	34
Figure 29: les pesés de notre matériaux (sable, l'eau, CaCl ₂ , ciment).....	35
Figure 30:Malaxeur automatique de labo Génie Civil de l'université BBA.....	36

Figure 31: Coulage des mélanges.....	36
Figure 32: Les échantillons des mélanges.....	37
Figure 33: Etalement des différents mélanges étudiés.....	40
Figure 34: Masse Volumique Humide des différents mélanges	Erreur ! Signet non défini.
Figure 35: Résistance à la compression des différents mélanges.....	41
Figure 36: Echantillons écrasés.....	43
Figure 37: la vitesse ultrason des différents mélanges.....	44
Figure 38: La perte en poids des différents mélanges après émerision a la solution H ₂ So ₄	45
Figure 39: La perte en poids des différents mélanges après émerision a la solution H ₂ So ₄ après 60 jours.....	46
Figure 40 La perte en poids des différents mélanges après émerision a la solution H ₂ So ₄ après 90 jours.....	47

Liste de tableau

Tableau 1: Valeurs des masses volumiques du sable.....	27
Tableau 2: Valeurs de l'équivalent de sable.....	28
Tableau 3: Caractéristiques chimiques et physique du ciment utilisé.....	29
Tableau 4: composition minéralogique de la poudre de BSE	30
Tableau 5: Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.	31

Liste des abréviations

BSE : la boue des stations d'épuration

CO₂ : dioxyde de carbone

CaCl₂ : chlorure de calcium

SS : sewage sludge

MCS : matériaux cimentaires supplémentaires

CP : ciment Portland

EC : économie circulaire

LHF : laitier de haut fourneau

FS : fumé de silice

Ca(OH)₂ : hydroxyde de calcium

CSH : calcium-silicate-hydrate

CV : cendres volantes

SPEU : stations d'épuration des eaux usées

CaO : oxyde de calcium

SiO₂ : la silice

MgO : oxyde de magnésium

Al₂O₃ : oxyde d'aluminium

Fe₂O₃ : oxyde de fer

SO₃ : trioxyde de soufre

FTS : table de flux

NA : Les accélérateurs alcalins

AS : non alcalins

NaSO₄ : sulfate de sodium

CaSO₄ : sulfate de calcium

NaOH : hydroxyde de sodium

CF : formiate de calcium

BFUP : béton à ultra haute performance

C₃S : silicate Tricalcique

SHA : la cendre de cosse de sorgho

UPV : la vitesse d'impulsion ultrasonique

H₂SO₄ : acide sulfurique

AFM : aluminat de calcium hydraté

Introduction Générale

Introduction Générale

La préservation de l'écosystème et la gestion durable des ressources naturelles sont devenues des préoccupations essentielles à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, l'utilisation de déchets comme matière première pour certains produits offre une solution prometteuse. Par exemple, les boues d'épuration, un sous-produit en constante augmentation, posent des défis en termes d'élimination sécuritaire [1]. Pour répondre à ces défis, l'intégration de ces matériaux cimentaires supplémentaires (MCS) dans le béton en remplacement du ciment traditionnel est explorée. Cette approche, en réduisant l'utilisation de ciment, favorise un processus de construction plus respectueux de l'environnement, tout en contribuant à la préservation de l'écosystème et à une gestion plus durable des ressources naturelles.

Le béton mélangé à base de MCS est souvent qualifié de béton vert, car il permet de réduire la production de ciment, entraînant ainsi des économies d'énergie [2]. Dans cette perspective, des recherches ont examiné l'utilisation de la boue des stations d'épuration (BSE) de taille micro fine mélangées au ciment Portland (CP) afin d'évaluer leur impact sur diverses propriétés du béton, telles que l'ouvrabilité, la résistance, l'attaque chimique et la durabilité [3]. Les résultats indiquent une augmentation significative de la résistance après 28 jours de durcissement sous contrainte de compression, attribuée à la teneur accrue en silice dans les boues [3]. Cette découverte a conduit les chercheurs à reconnaître le potentiel de ces boues en tant que substitut du ciment [4]. Il est important de noter que la composition des boues varie en fonction du type d'eaux usées et de la méthode de traitement [5]. En outre, les adjuvants, des substances ajoutées avant, pendant ou après le mélange, sont utilisés pour modifier les caractéristiques du béton et le rendre plus adaptable à différentes conditions [6].

Dans ce contexte, l'incorporation de sels accélérateurs tels que le chlorure de calcium (CaCl_2) dans les bétons est une pratique courante depuis 1885, principalement pendant les périodes froides, où il favorise le gain de résistance en augmentant le nombre d'hydrates [7]. En conditions normales, le CaCl_2 est utilisé pour accélérer le processus de prise et de durcissement, permettant ainsi d'obtenir une finition ou un démoulage plus rapide [8]. En plus de son effet sur le temps de prise, le CaCl_2 a un impact mineur sur les caractéristiques du béton frais ; son ajout a été observé pour légèrement améliorer la maniabilité [9]. Cependant, l'effet global dépend du dosage, du type de ciment utilisé et de la température du mélange.

Dans le cadre de cette étude, la boue d'épuration et le chlorure de calcium ont été utilisés en remplacement partiel du ciment. Cette approche repose essentiellement sur une méthodologie expérimentale, axée sur deux principaux volets :

- Le premier volet de cette étude se concentre sur l'évaluation de l'impact des géodéchets recyclés, en particulier la boue d'épuration, sur les performances mécaniques des mortiers cimentaires.
- Le deuxième volet, quant à lui, examine l'influence de la présence de chlorure de calcium sur le comportement et la durabilité de ces mortiers cimentaires.

La structure de ce mémoire se compose de quatre chapitres distincts.

- Chapitre I : État de l'art sur les ajouts cimentaires

Ce chapitre présente des généralités sur les ajouts cimentaires, ainsi que sur la boue d'épuration en particulier. Elle aborde également leur traitement, leur composition minéralogique et leur activité pouzzolanique.

- Chapitre II : l'influence du chlorure de calcium sur les mortiers

Ce chapitre consiste en une revue de la littérature des travaux antérieurs, mettant particulièrement l'accent sur l'influence du chlorure de calcium (CaCl_2) sur les mortiers cimentaires contenant des ajouts pouzzolaniques.

- Chapitre III : Études expérimentales

Ce deuxième chapitre propose une description détaillée de tous les matériaux utilisés dans l'étude, ainsi qu'une caractérisation classique des mélanges retenus.

- Chapitre IV : Résultats et discussion

Le troisième chapitre se concentre sur l'étude de l'influence de l'ajout de boue et de CaCl_2 en remplacement partiel du ciment sur le comportement et la durabilité des mortiers.

CHAPITRE I :
Etat De L'art Sur Les Ajouts
Cimentaires

1. Introduction

La mise en œuvre de stratégies d'économie circulaire (EC) peut contribuer à atténuer le réchauffement climatique et les impacts environnementaux causés par l'industrie de la construction, qui est responsable d'environ 36 % des émissions mondiales de carbone, atteignant 40 à 50 % dans les pays industrialisés [10].

Par conséquent, il est impératif d'utiliser des alternatives au ciment et aux granulats naturels, tels que les géo-déchets et les ajouts cimentaires, dans le secteur de la fabrication du béton, car ils peuvent réduire considérablement les émissions de CO₂ tout en améliorant les propriétés mécaniques et de durabilité [11].

Depuis un certain temps, le domaine de la construction a intégré dans ses processus la réutilisation de déchets et de sous-produits afin de créer de nouveaux mortiers qui se distinguent par leurs propriétés spécifiques ou améliorées par rapport aux mortiers traditionnels. Différentes options sont disponibles telles que les cendres volantes, laitier à haute fourneau, fumé de silice. De plus, la boue des stations d'épuration (BSE) pourrait être une bonne source régionale de matériaux de cimentation [12].

Ce chapitre fait une mise en point sur des définitions des ajouts cimentaires et leur mécanisme dans la matrice cimentaires, ensuite en a accentuée sur le traitement de la boue et leur impact sur les caractéristiques du mortier avec des études récente lesquels appuient notre méthodologie pour les formulations de nos mélanges.

2. Les ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont souvent des déchets industriels qui peuvent être valorisés comme addition ou substitution au ciment. Ce sont des matériaux présentant une granulométrie très fine, généralement incorporés au ciment afin de conférer au béton ses propriétés grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Ils permettent d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui apporter des propriétés spécifiques. [13]

3. Principaux ajouts cimentaires

3.1. Les laitiers de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau (LHF) est un sous-produit de la fabrication de la fonte, brusquement refroidi par aspersion d'eau. C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé [14]. Son apparence, variant du gris au blanc cassé, dépend de sa teneur en humidité, de sa composition chimique et d'autres facteurs [15]. Le LHF broyé présente un diamètre maximal

de particules inférieur à 100 μm et se présente sous forme de nodules. Sa composition chimique comprend environ 40 à 50% d'oxyde de calcium, 25 à 35% de silice, 12 à 30% d'alumine, ainsi que de faibles quantités de magnésie et d'autres oxydes, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [14].



Figure 1: Poudre de laitier (site web)

3.2. Fumé de silice

Le fumé de silice (FS) est un sous-produit des industries de fabrication du silicium et des alliages de Ferro-Silicium. Il est produit à des températures extrêmement élevées, environ 2000°C, lors de la réduction du quartz de haute pureté par du coke, du charbon ou des copeaux de bois dans une chaudière à arc électrique [16].

Considéré comme un MCS largement accepté, le FS possède des propriétés pouzzolaniques et un effet de remplissage physique. Sa silice (SiO_2) hautement réactive réagit avec portlandite (Ca(OH)_2) présent dans les composites cimentaires en présence d'eau pour former un gel de calcium-silicate-hydrate (CSH) conférant des propriétés liantes et de résistance au composite [17]. Le FS se présente sous forme de poudre blanche ou grise, composée de particules extrêmement fines et sphériques, dont près de 95% mesurent moins de 1 μm [18].



Figure 2: Poudre de fumé de silice [19]

3.3. Cendre volante

Les cendres volantes de charbon (CV) sont des sous-produits issus de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales électriques. Largement utilisées dans le béton, Elles sont principalement composées de silice, d'alumine, du fer et du calcium. Les autres constituants présents sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone ainsi que de petites quantités de composés cristallins. Leur densité relative spécifique varie généralement entre 1,9 et 2,8 Kg/m³ et leur couleur le plus souvent grise ou beige. [20]



Figure 3: Poudre de cendre volante [21]

3.4. La boue des stations d'épurations

3.4.1. Définition

La BSE est un sous-produit semi-solide ou liquide provenant du traitement des déchets industriels, urbains ou domestiques dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP). Elle résulte de la sédimentation primaire dans les bassins et de la clarificateurs secondaires [22].

Une faible quantité est également générée lors des étapes de précipitation chimique, de criblage, de broyage et de filtration [23] [22].



Figure 4: Station d'épuration (site web) [24]

Le domaine de la construction a offert une toute nouvelle filière de valorisation de ces boues à travers leur utilisation dans les briques, tuiles, céramiques, matériaux légers, béton cellulaire, stabilisation des sols [25].

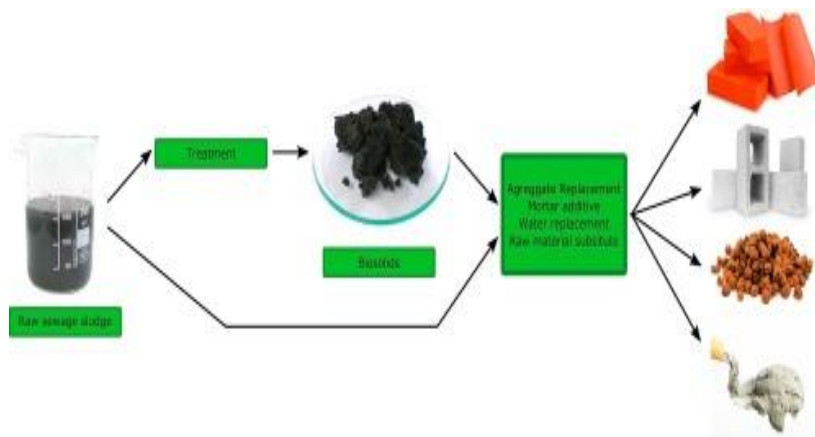


Figure 5: Différent utilisation de la boue [25]

3.4.2. Traitement de la boue des stations d'épuration

3.4.2.1. Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées municipales génère divers types et volumes de boues, dont la quantité varie selon la densité de population [23]. Cette production provient des procédés des unités primaires, secondaires et tertiaires.

- Le pré traitement de l'eau :

Le prétraitement vise à éliminer les éléments encombrants (dégrillage), les huiles (désuilage) et les sables (dessablage) [26] [27].

- Les traitements secondaires :

Les traitements secondaires consistent en des procédés mécaniques de décantation et filtration [28] [27].

- Traitements biologiques :

Les traitements biologiques où les micro-organismes dégradent la matière organique et une partie des nutriments [29] [27].

- Traitements physico-chimiques :

La floculation physico-chimique est également utilisée pour faire face aux variations de charge [27].

3.4.2.2. Traitement des boues

Avant d'être jetées dans la nature ou réutilisées, les BSE sont traitées pour les rendre moins humides et plus stables. Un traitement approprié et efficace permet leur valorisation dans divers secteurs. [30]

Le traitement des BSE comprend les étapes principales suivantes :

- L'épaississement :

Permet une première réduction de volume pour faciliter les étapes suivantes [31] [32] [27].

- La stabilisation :

La stabilisation chimique des BSE déshydratées est une opération unitaire du traitement des BSE faisant suite à l'étape de déshydratation. Elle s'opère donc sur des boues pâteuses. Le réactif utilisé est essentiellement la chaux [33].

- La déshydratation :

Dans la plupart des cas, cette étape du traitement consiste à transformer BSE de l'état liquide en un état pâteux ou solide pelletable [33].

3.4.3. Les caractéristiques de BSE

3.4.3.1. Composition minéralogique de BSE

L'étude chimique de la BSE a mis en évidence la présence de différentes quantités des principaux oxydes Fe_2O_3 , SiO_4 , CaO et Al_2O_3 . Environ 95% du clinker de ciment est composé de ces oxydes, ce qui contribue au durcissement de la suspension de ciment. [34]

Les résultats de l'analyse par diffraction des rayons x ont confirmé la composition chimique du BSE, confirmant notamment la présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de calcite (CaCO_2) et de Weddellite ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), ainsi que de faibles quantités de quartz [35].

Les boues sont composées de différentes substances selon le type d'eaux usées et le mode de traitement. L'étude de [36], apparait une comparaison de la composition en oxydes (rapport massique) de la cendre de boue avec celle des cendres volantes et du ciment révèle une similitude entre la composition en oxydes de la cendre de boue et celle des CV montré dans la **Figure 6**.

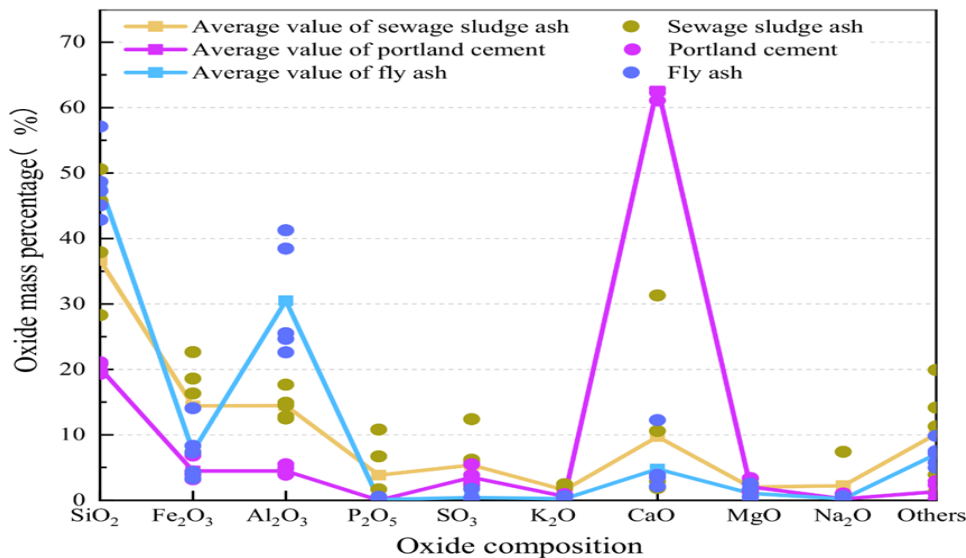


Figure 6: Comparaison de la composition chimique de la cendre de boue, des cendres volantes et du ciment [36]

3.4.3.2.L'activité pouzzolanique de BSE

L'interaction chimique entre la silice réactive ou l'alumine présente dans les particules de matériaux cimentaires secondaires et l'hydroxyde de calcium produit par l'hydratation du ciment en présence d'eau à température normale est appelée réaction pouzzolanique. En raison de son activité pouzzolanique, le BSE finement broyé peut servir de matériau pouzzolanique dans le mortier. Le BSE contient une quantité restreinte de SiO_2 et Al_2O_3 , les deux oxydes qui contribuent à l'activité pouzzolanique des matériaux cimentés. Le matériau pouzzolanique possède une activité spécifique qui repose sur sa capacité à réagir avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et à produire des produits d'hydratation [37]. Il est observé que le BSE peut réagir avec du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ afin de générer de nombreux produits d'hydratation, qui peuvent être définis comme des matériaux pouzzolaniques, ce qui suggère un potentiel d'utilisation en tant que MCS dans le mortier [38]. Il est possible d'améliorer l'activité pouzzolanique en broyant le BSE [39]. La

température de calcination a également un impact important sur l'activité pouzzolanique du BSE [39].

3.4.3.3. Gravité spécifique et densité de BSE

La densité spécifique des boues varie de 2,33 à 3,51 Kg/m³ [40], [41], avec une moyenne de 2,76, laquelle est inférieure à celle du ciment Portland (3,16) [41]. Cette densité augmente avec la température d'incinération et atteint son maximum aux environs de 1 000 °C. Le processus de broyage peut accroître la densité des boues dans une certaine mesure. Cependant, même après calcination et broyage, la densité des BSE reste inférieure à celle du ciment Portland [42].

3.4.4. Effet du BSE sur la performance du mortier

3.4.4.1. Maniabilité

L'effet de la cendre de boue sur la facilité de mise en œuvre des mortiers de ciment a été examiné dans l'étude menée par [43]. La **Figure 7**, présente les valeurs d'étalement obtenues par table de flux (FTS) en fonction du pourcentage de boue dans des mortiers contenant des volumes d'eau de 200 et 225 ml, correspondant à des rapports eau/ (ciment + boue) de 0,44 et 0,5. Au cours de cette expérience, une diminution du FTS a été observée avec l'augmentation du pourcentage de cendre de boue pour les deux volumes d'eau étudiés. Des aptitudes au mortier très faibles sont obtenues pour des pourcentages de remplacement élevés (30%). Ce phénomène est attribuable aux propriétés poreuses et à la morphologie irrégulière de la cendre de boue [43]. Cette morphologie irrégulière ne produit pas l'effet lubrifiant nécessaire [44].

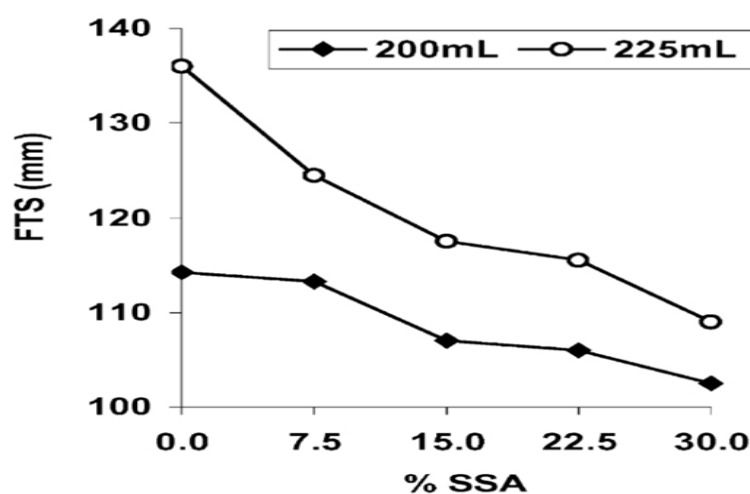


Figure 7 : Variation des valeurs FTS par rapport au pourcentage de cendre de boue [43]

3.4.4.2. Temps de prise

Dans leur étude, [45] ont examiné les temps de prise pour différents pourcentages de remplacement des cendres des boues d'épuration. Il est important de souligner que l'utilisation de cendres de boues d'épuration a entraîné une augmentation du temps de prise. Cette augmentation des besoins en eau est attribuable à la morphologie irrégulière des cendres et à la porosité des boues d'épuration, ce qui se traduit par une moindre maniabilité et, par conséquent, par un temps de prise plus long. Ce temps de prise prolongé est dû à l'activité pouzzolanique moins élevée des cendres de boues d'épuration par rapport au ciment.

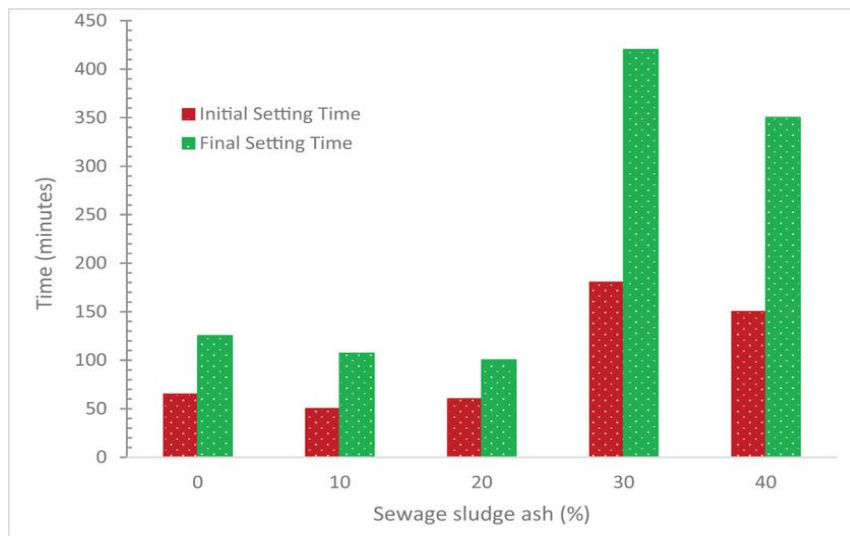


Figure 8: L'effet de pourcentage de cendre de boue sur le temps de prise [45]

3.4.4.3. Résistance à la compression

[46] a examiné les résistances à la compression des mortiers BSE-ciment à 2, 7, 28 et 90 jours. Les résultats indiquent que les résistances à la compression des mortiers de ciment contenant du BSE calciné à 700 °C et 800 °C étaient similaires à celles du mortier témoin aux premiers âges (2 et 7 jours). En général, les résistances à la compression diminuent avec la diminution de la température de calcination de la BSE et l'augmentation du niveau de remplacement de la BSE dans le ciment (**Figure 09**). Cette baisse pourrait être attribuée à la morphologie irrégulière des particules de la BSE, à l'absorption élevée d'eau à la surface des particules de la BSE et à la légère activité pouzzolanique de la BSE calciné à basse température. L'augmentation de la température de calcination a un double effet sur l'activité pouzzolanique de boue. D'une part, elle augmente la teneur en SiO₂ amorphe de la BSE, favorisant ainsi la formation de gel CSH dans le mortier, ce qui a un effet positif sur les

performances du mortier [47]. Cependant, le processus de broyage peut, dans une certaine mesure, améliorer l'activité pouzzolanique de la BSE [48].

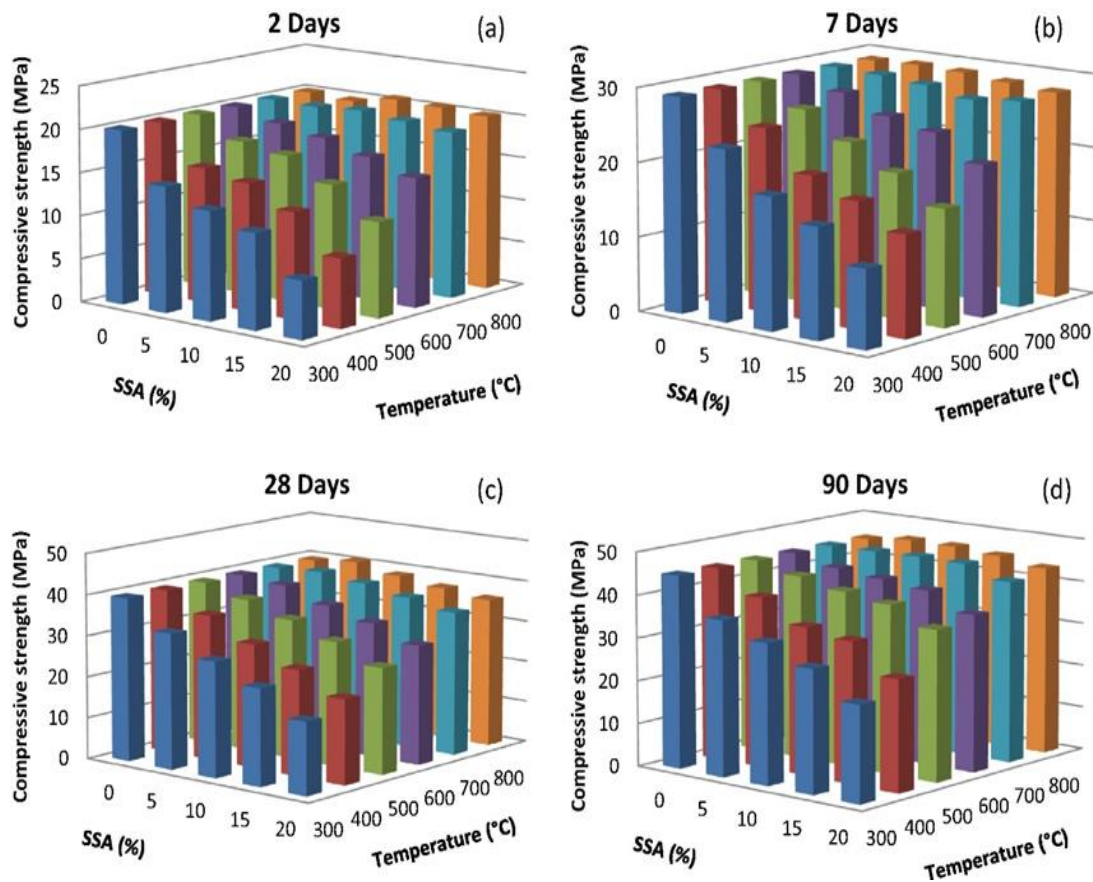


Figure 9: L'effet de pourcentage de BSE sur Résistances à la compression à (a) 2 jours, (b) 7 jours, (c) 28 jours et (d) 90 jours [46]

[49] ont étudiée les résistances à la compression du liant et du mortier. La pâte de liant fraîche était composée de ciment mélangé à de l'eau. Le rapport eau/ciment utilisé pour cela était de 0,5. Il a été observé que le ciment avec la BSE micro fin nécessitait plus d'eau pour la fluidité du liant. En raison de la présence de la BSE micro fin dans le ciment, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme un liant très visqueux qui améliore considérablement la résistance à la compression du liant (**Figure 10**).

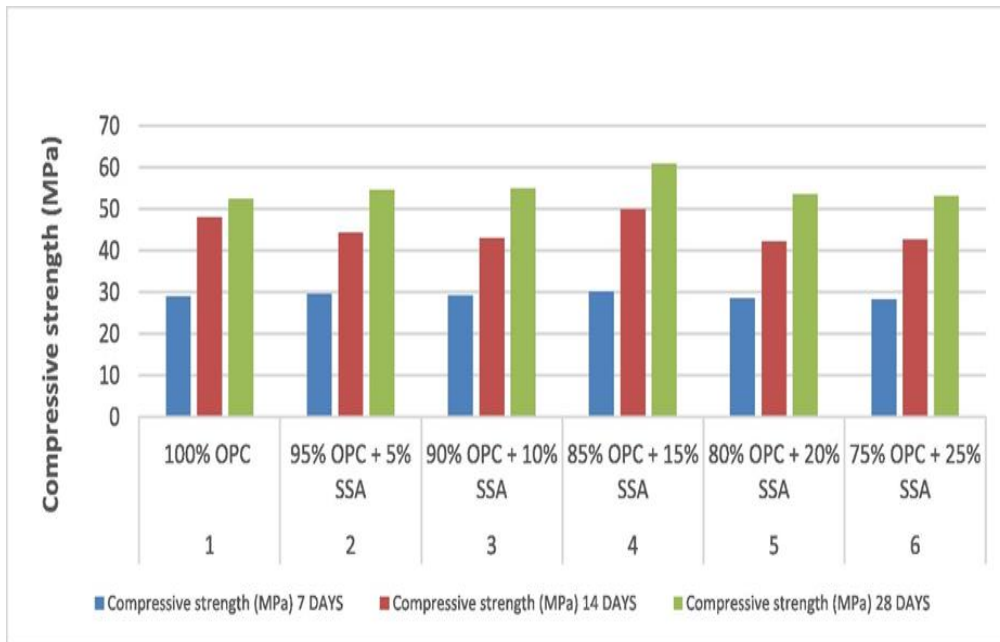


Figure 10 : Résistance à la compression du mélange de liants (ciment-cendre de boue) [50]

4. Conclusion

Parmi les voies explorées par l'industrie cimentaires pour réduire l'émission de CO_2 est l'utilisation des ajouts minéraux ou organique locaux, ce moyen est un alternatif pour se débarrasser des déchets, coopérer à un système industriel écologique et réduit le cout. Ce chapitre a pour l'objectif définir, les ajouts cimentaires et l'influence de la BSE sur les performances de béton. On a observé que :

- Le BSE avait une densité proche à celle du ciment, et il est éventuellement que les oxydes contenus dans le BSE aient un effet positif sur la capacité du béton à développer sa résistance.
- L'emploi de BSE a conduit à une prolongation du temps de prise.
- Une diminution d'étalement avec l'augmentation du pourcentage de BSE.
- La composition des BSE peut varier considérablement selon le type d'eaux usées et la méthode de traitement utilisée.
- L'incorporation des BSE augmente la résistance à la compression des mortiers.

CHAPITRE II :
L'influence Du CaCl_2 Sur Les Mortiers

1. Introduction

En raison de l'impact environnemental considérable lié à la production de ciment, les récents développements dans ce domaine visent à diminuer son empreinte carbone. Une approche largement adoptée consiste à incorporer des matériaux cimentaires supplémentaires en remplacement du clinker. Toutefois, les mélanges de ciments ainsi obtenus peuvent présenter une réactivité et des performances initiales moindres par rapport à ceux contenant une proportion plus élevée de clinker, ce qui engendre un besoin persistant de solutions économiques et efficaces. Une stratégie prometteuse pour pallier cette réactivité plus faible est d'intégrer des activateurs chimiques, tels que le CaCl₂. Ce chapitre fait le point sur l'impact de l'utilisation de divers activateurs chimiques avec des ajouts cimentaires et leurs avantages dans le béton.

5. Les accélérateurs chimiques

Les accélérateurs pour mortiers sont des additifs chimiques conçus pour réduire le temps de prise et augmenter le taux de durcissement du mortier. Ils permettent une mise en service plus rapide des structures en accélérant le développement de la résistance initiale. Couramment utilisés dans des conditions de basse température, ils améliorent également la maniabilité et les propriétés mécaniques à court terme du mortier.

6. Différents types d'accélérateurs chimiques

6.1. Les accélérateurs alcalins (NA) et non alcalins (AS)

Les alcalins, principalement composés de métaluminate de sodium, ont un double effet sur le béton. D'une part, ils favorisent la prise et le durcissement en générant rapidement des produits d'hydratation. D'autre part, leur hydrolyse entraîne une augmentation des pores du béton [50]. L'ajout de sulfate d'aluminium favorise la formation rapide de cristaux d'ettringite, accélérant ainsi le durcissement. Comparé aux alcalins, le sulfate d'aluminium présente également des avantages en termes de rétention de résistance ultérieure et d'impact environnemental [51, 52, 53]. Cependant, l'augmentation du dosage d'alcalins peut diminuer la résistance initiale, tandis qu'un dosage optimal de sulfate d'aluminium peut améliorer la résistance à la compression [50, 54]. Enfin, bien que les accélérateurs alcalins améliorent la résistance initiale, ils peuvent compromettre la résistance à long terme du béton [50].

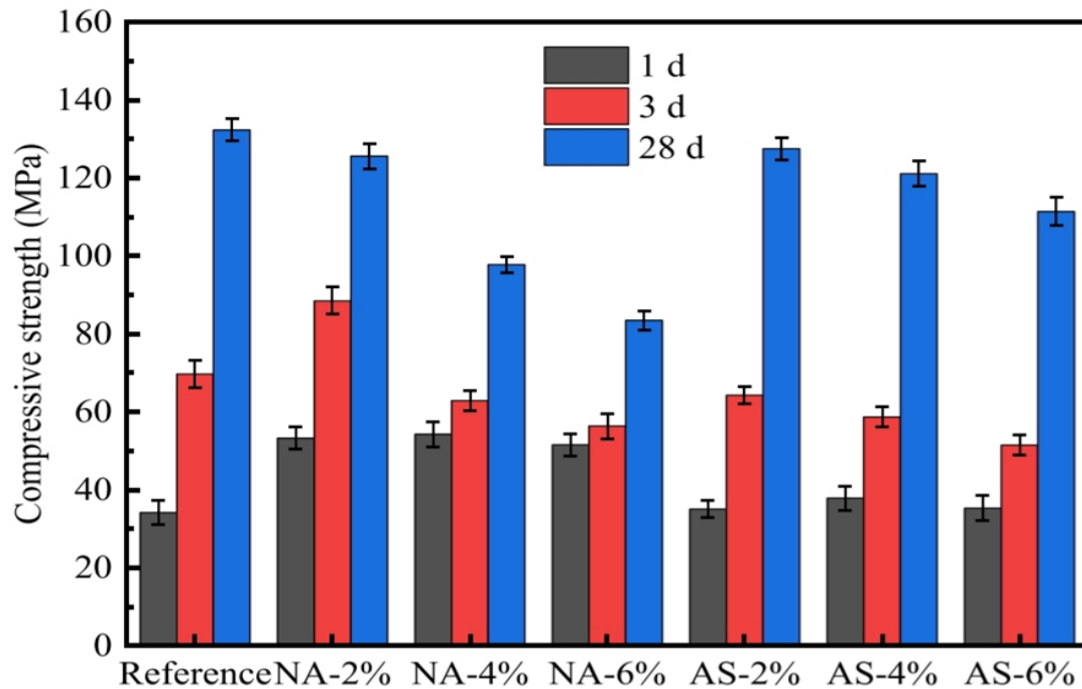


Figure 11: Résistance du béton à ultra hautes performances avec des accélérateurs alcalins (NA) et non alcalins (AS) [55]

6.2. Sulfate de sodium Na₂SO₄

Plusieurs chercheurs ont observé que le Na₂SO₄ accélère l'hydratation de la pâte de ciment [56]. Cette accélération est attribuée à la formation précoce d'ettringite, entraînant une augmentation de la résistance. Selon ces chercheurs, cette accélération s'explique par la dissolution des phases alumine-silicate des ajouts. Ainsi, le Na₂SO₄ réagit avec le Ca(OH)₂ en présence d'eau, ce qui provoque la précipitation de CaSO₄ et la formation de NaOH. Ceci entraîne une augmentation rapide du pH de la solution, facilitant ainsi la dissolution des verres de cendres d'alumine-silicate et accélérant la réaction pouzzolanique.

6.3. Formiate de calcium (CF)

L'impact du formiate de calcium (CF) sur la résistance à la compression du béton à ultra haute performance (BFUP) a été examiné par [57]. Les résultats montrent une diminution de la fluidité des mélanges fraîchement préparés et une augmentation de la résistance à la compression des échantillons durcis avec une augmentation du dosage de CF. Ainsi, le CF agit comme un accélérateur et un renforçateur de la résistance, exerçant une influence significative sur les propriétés mécaniques des mélanges de BFUP.

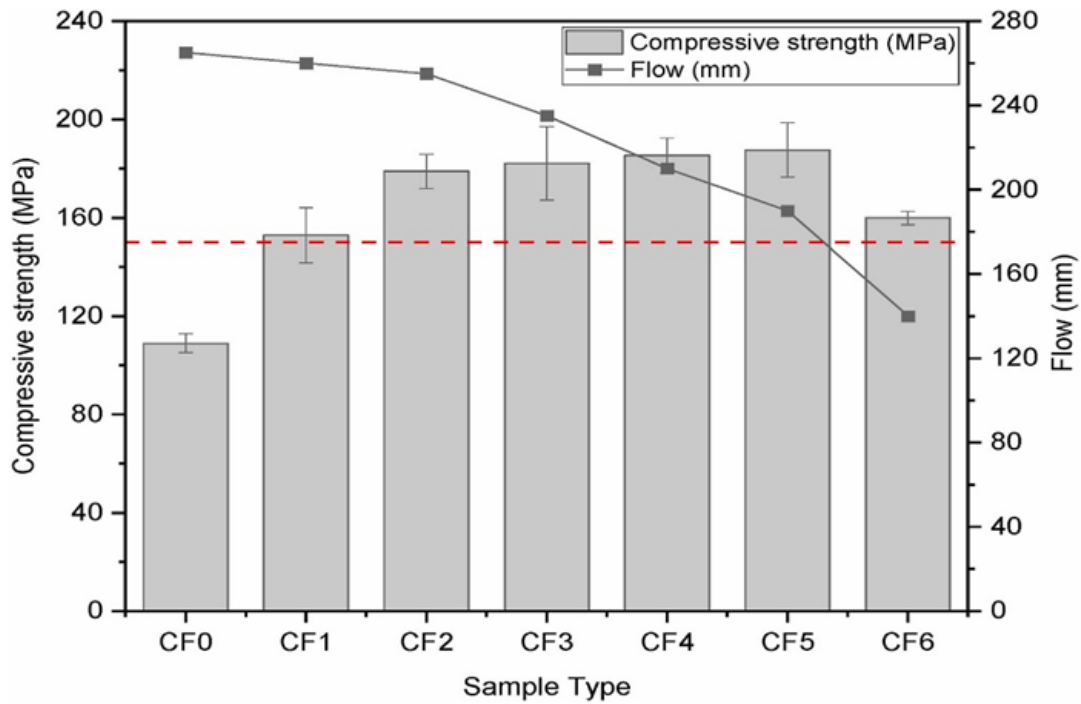


Figure 12: Résistance à la compression et débit d'échantillons avec différents dosages de CF. [57]

6.4. Hydroxyde de sodium (NaOH)

Dans une récente étude menée par [58], la réactivité comparative du laitier dans une solution de NaOH (avec un rapport eau/solution de 100) et dans la pâte de ciment (avec un rapport eau/liant de 0,4) a été étudiée. Les chercheurs ont observé que la réactivité du laitier est nettement plus élevée dans la 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 observée dans la pâte de ciment. Ils ont émis l'hypothèse que 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.

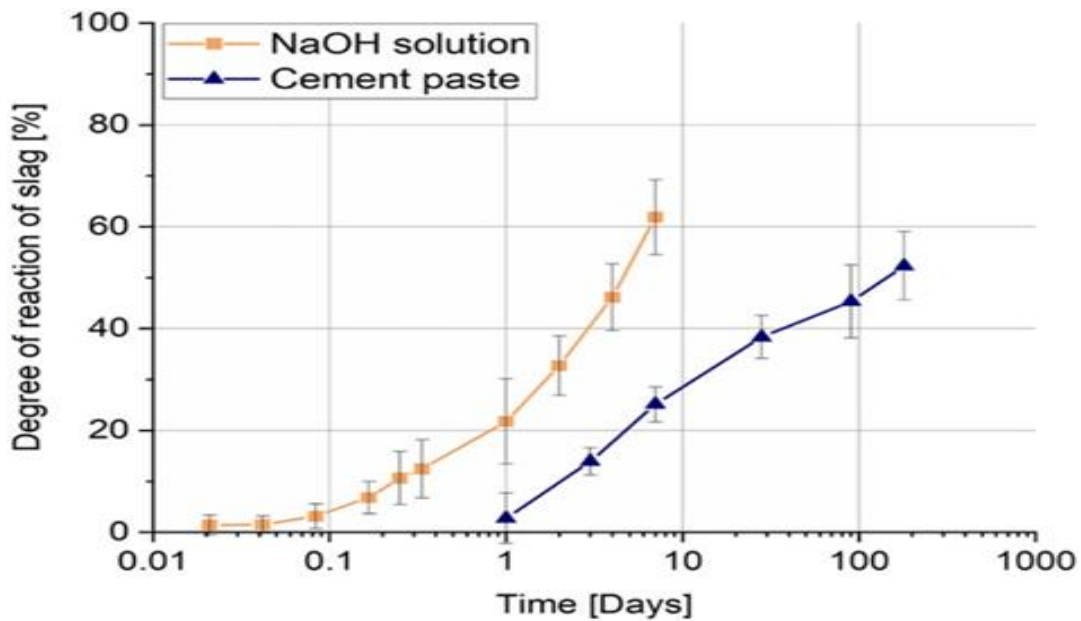


Figure 13: Degré de la réaction dans le NaOH [58]

6.5. Chlorure de calcium (CaCl_2)

Le CaCl_2 est un additif utilisé depuis longtemps dans la fabrication du ciment et est largement reconnu comme l'un des accélérateurs d'hydratation les plus efficaces, en particulier par temps froid. Il agit en accélérant les processus d'hydratation de tous les composants du ciment, favorisant notamment l'hydratation des silicates du clinker tout en ralentissant celle des aluminates et alumino-ferrites [59]. Cela se traduit par une réduction du temps de prise et une augmentation des taux de développement de la résistance et du processus d'hydratation [60], [61]. Cependant, l'utilisation des chlorures est aujourd'hui limitée en raison des risques de corrosion des armatures en acier.

7. Effet de chlorure de calcium

Son principal effet est d'accélérer le temps de prise et de durcissement, ce qui est particulièrement utile dans des conditions de température froide, permettant ainsi aux travaux de construction de se poursuivre avec moins d'interruptions [62]. En augmentant la vitesse de l'hydratation du ciment, le CaCl_2 contribue à atteindre plus rapidement la résistance initiale, ce qui peut être crucial pour le décoffrage précoce et la mise en charge des structures. De plus, il améliore la maniabilité du mortier frais en augmentant sa plasticité. Cependant, il est important de noter que l'utilisation excessive de CaCl_2 peut entraîner des problèmes de corrosion des armatures en acier et une réduction de la durabilité à long terme du béton. Par conséquent, son dosage doit être soigneusement contrôlé [63].

7.1. Sur l'hydratation du ciment

Selon l'étude [64], CaCl_2 améliore à la fois le pic d'hydratations principales et l'épaulement exothermique du CP, comme indiqué dans la **Figure 14**. Cette augmentation de l'hydratation du ciment est attribuée à une dissolution accélérée du C_3S dans la solution interstitielle. De plus, le CaCl_2 favorise la formation de gel C-S-H, facilitant ainsi la diffusion des ions et accélérant l'hydratation du C_3S [65]. En outre, il peut accélérer la réaction pouzzolanique des mélanges minéraux [66].

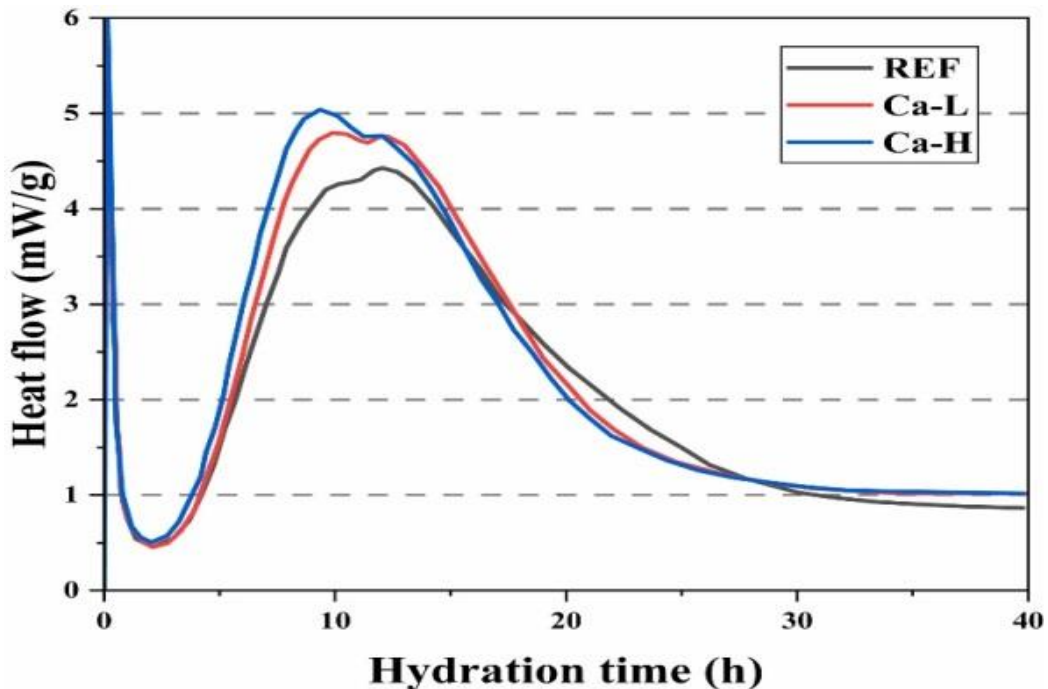


Figure 14: Courbes d'évolution thermique du ciment Portland mélangé à 0,45 % (Ca-L) et 0,9 % (Ca-H) de CaCl_2 [64].

7.2. Sur la morphologie des hydrates

La microstructure des pâtes C_3S contenant 2% de CaCl_2 a été examinée par microscopie à transmission de rayons X mous [67], comme illustré dans la **Figure 15**. En l'absence de chlorure de calcium, des produits d'hydratation présentant une morphologie de "gerbe de blé" ont été observés à la surface des particules de C_3S , comme rapporté par [68]. Ces produits d'hydratation sont généralement considérés comme une forme particulière de C-S-H. À 2% de CaCl_2 , une phase amorphe avec une densité plus faible a également été observée, s'intercalant entre les aiguilles cristallines formées de type C-S-H. La plupart des produits d'hydratation amorphes se forment dans la couche d'hydrates, tandis que certains remplissent l'espace entre les grains. Ces observations suggèrent que CaCl_2 favorise la formation de la phase interne de C-S-H, qui présente une densité moindre par rapport à l'échantillon témoin sans chlorure de calcium.

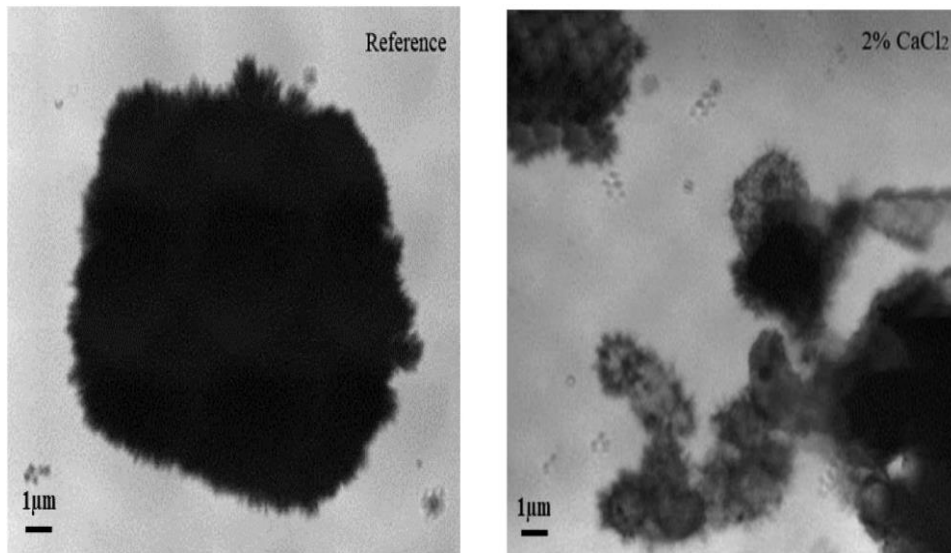


Figure 15: Images microscopiques aux rayons X mous de pâtes C_3S avec et sans 2 % de CaCl_2 après 2 h d'hydratation [69].

7.3. Résistance à la compression

La Figure 16, provenant des travaux de [70], met en évidence l'effet de l'ajout de CaCl_2 dans un ciment au laitier de type CEM III/C (>81% de laitier), à 10°C . Les mortiers contenant 8,5% de CaCl_2 présentent des résistances plus élevées à chaque intervalle, jusqu'à 90 jours de cure, par rapport à ceux sans ajout. Cependant, la progression de l'hydratation entraîne une diminution du pourcentage d'augmentation de résistance. Aux stades précoces, l'augmentation significative des résistances (avec CaCl_2) est attribuée à une augmentation du taux d'hydrates formés. La porosité et la morphologie, notamment celle des C-S-H ou C-A-S-H, sont des facteurs déterminants dans le développement des résistances mécaniques [71, 72]. Toutefois, certaines études sur les pâtes hydratées de C_3S ont conclu que la morphologie des gels de C-S-H "externes" a peu d'influence sur la résistance [71]. Ces observations renforcent également l'hypothèse d'une possible accélération de la réaction pouzzolanique.

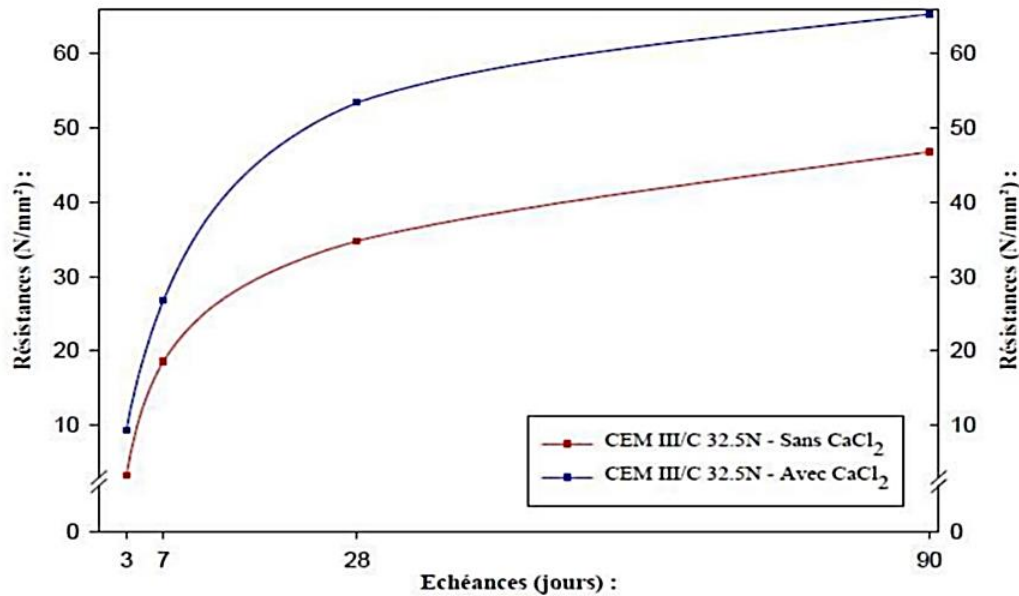


Figure 16: Impact du CaCl_2 sur les résistances mécaniques d'un CEM III/C. [70]

Dans l'étude [73], les résistances à la compression des mortiers contenant 70 % de laitier (S70) et 70 % de quartz (Q70), avec et sans ajout de 1 % en poids de CaCl_2 , sont présentées sur la **Figure 17**. 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 . Ces augmentations de la résistance à la compression correspondent à une réduction de l'espace poreux. De plus, les chercheurs 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 heures.

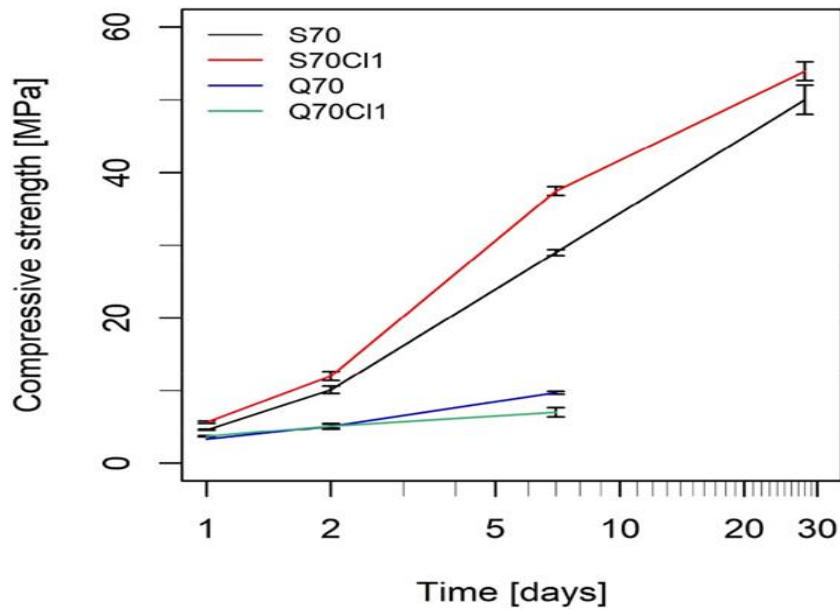


Figure 17: Résistance à la compression des différentes pâtes contenant laitères [73]

La Figure 18 présente une étude [74] sur l'effet de la cendre de cosse de sorgho (SHA) et CaCl₂ en tant que substituts partiels du ciment dans le béton. SHA a été obtenue en brûlant les cosses de sorgho à une température contrôlée. 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 ajoutée au ciment/SHA dans tous les échantillons de test, à l'exception du mélange témoin. Les résultats des résistances à la compression à 28 jours montrent que le mélange contenant 5 % de SHA et 1 % de CaCl₂ a atteint la résistance maximale de 26,45 N/mm².

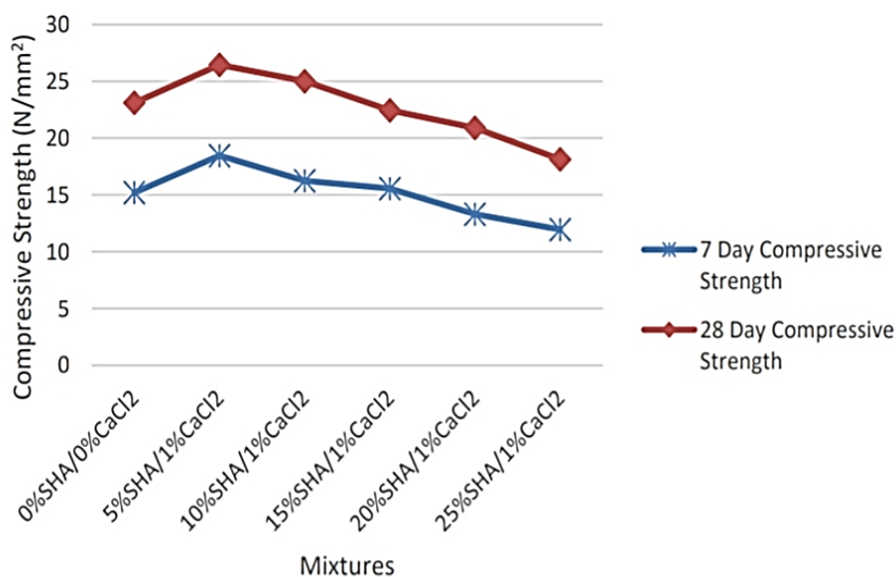


Figure 18: Résistance à la compression des bétons en fonction du dosage de SHA et CaCl₂ [74]

8. Conclusion

De nombreuses études ont été menées pour décrire et comprendre les mécanismes des accélérateurs chimiques. L'utilisation d'additifs minéraux a ajouté un niveau de complexité aux systèmes cimentaires et à leur étude. De plus, le CaCl_2 est couramment utilisé dans les mortiers pour améliorer plusieurs de leurs propriétés. Son incorporation accélère le durcissement et le gain de résistance initiale, ce qui est particulièrement bénéfique dans des conditions de construction par temps froid. De plus, il améliore la maniabilité du mélange, facilitant son application. En général, le CaCl_2 est un additif efficace pour optimiser les performances des mortiers, à condition que les précautions appropriées soient prises.

Chapitre III :
Études expérimentales

1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse approfondie des matériaux de base et des essais expérimentaux nécessaires à la mise en œuvre du programme de recherche. Nous utilisons une variété de composants couramment disponibles et largement utilisés localement pour créer des mortiers à base de la BSE et le CaCl_2 . Les composants utilisés comprennent :

- CEM I/42,5
- Sable d'Oued Souf
- La boue des stations d'épuration de la wilaya de Jijel
- L'eau de robinet des réseaux urbains
- Produit de chlorure de Calcium (CaCl_2)

2. Matériaux de construction de base

2.1. Sable

La norme NF P18-541 [75] ,montre que le sable a des qualités qui le rendent adapté à la fabrication de mortier. Pour être utilisé dans la construction, le sable doit répondre à des normes de qualité spécifiques. Cela nécessite des tests en laboratoire pour évaluer ses caractéristiques. Le sable utilisé dans cette étude provient d'Oued Souf, situé à 620 km au sud-est d'Alger. C'est un sable naturel, principalement composé de petites particules de silice, propre et de forme arrondie, avec des grains de taille comprise entre 0,08 et 3 mm.



Figure 19: Sable de Oued Souf

2.1.1. Caractéristiques du sable

2.1.1.1. L'analyse granulométrique (par tamisage)

Le processus implique l'utilisation d'une série de tamis pour diviser un matériau (tel que du gravier ou du sable) en différentes classes granulaires selon leur taille, puis de tracer la courbe

granulométrique correspondante. La **Figure 20** présente la courbe granulométrique spécifique au sable utilisé.

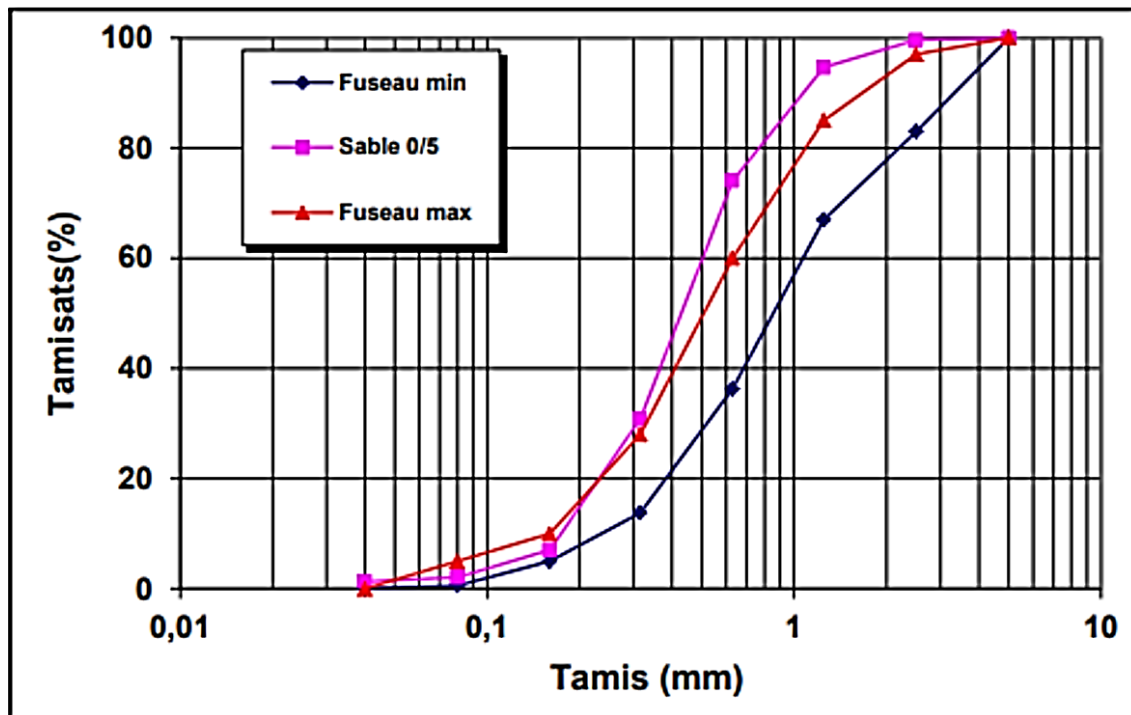


Figure 20: Courbe granulométrique du sable d'Oeud souf.

2.1.1.2.Masse volumique absolue et apparente des granulats

La masse volumique est une mesure physique qui exprime la masse d'un matériau par rapport à son volume. Différentes formes de masse volumique sont utilisées pour décrire les granulats : la masse volumique apparente et la masse volumique absolue.

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Le **Tableau 1** présente les valeurs des masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé.

Tableau 1: Valeurs des masses volumiques du sable

Valeur de masse	Absolue (kg/m ³)	Apparente (kg/m ³)
Sable	2608	1617

2.1.1.3. L'équivalent de sable

L'équivalent de sable est un test visant à évaluer la propreté d'un échantillon de sable. Le principe de cet essai consiste à séparer le sable des particules fines qui se regroupent et remontent par floculation vers la partie supérieure de l'éprouvette. Les résultats de l'équivalent de sable sont présentés dans le **Tableau 2** (NF EN 933-8+A1).[75]



Figure 21: l'essai d'équivalent de sable (labo génie civil)

Tableau 2: Valeurs de l'équivalent de sable.

Valeur de ES	ESV (%)	ESP (%)
Sable	87	85

2.2. Ciment

Le ciment utilisé est de type CEM I/42,5, provenant de Biskra. Les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment sont obtenues à partir de fiches techniques fournies par la cimenterie.



Figure 22: Ciment I 42.5- Biskra

Les résultats de la composition chimique du clinker du ciment sont présentés dans le **tableau 3**.

Tableau 3: Caractéristiques 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 Abs(kg/m3)	Densité App(kg/m3)	Finesse (cm ² /g)
CEM I 42.5	61.6	20.40	/	1.73	5.53	/	/	3.54	2.29	3100	2000	3600

2.3. Additions minérales

2.3.1. Boue d'épuration

Les additifs minéraux utilisés dans notre étude présentent une granulométrie inférieure à 80 microns. De plus, la boue utilisée comme un sous-produit, est un déchet qu'est formé par un traitement des eaux usées de station de Bordj Bou Arreridj, broyée jusqu'à l'obtention d'une poudre et calciné à une température de 700°C présenté dans la **Figure 23**. La surface septique de cette poudre est de 3000 cm²/g.



Figure 23: La poudre de BSE

Leur composition minéralogique a été déterminée par fluorescence X sur poudre. Les résultats obtenus, présentés en **Tableau 4**, mettent en évidence des pourcentages élevés en oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) :

Tableau 4: composition minéralogique de la poudre de BSE [27]

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
39,3	19,09	12,48	1,89	10,12	1,26	1,76

2.3.2. Chlorure de calcium

Le CaCl_2 , un produit chimique de laboratoire chimie de l'université de Bordj Bou Arreridj, a été employé en tant que sel accélérateur, été présenté dans la **Figure 24**



Figure 24: la poudre de CaCl_2 de laboratoire d'université

2.3.3. 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. Composition des différents mélanges

Notre étude expérimentale a impliqué l'ajout d'une proportion de 10%, 15 % et 20% par rapport au poids du ciment en additions BSE. Le rapport ciment/sable (C/S) utilisé était de 1/3 en poids. Pour les mortiers témoins, le rapport (E/C) employé dans leur fabrication était de 0,5. Les différentes compositions de nos mélanges sont détaillées dans le **Tableau 5**.

Tableau 5: Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (kg/m ³)	MT	M10B	M15B	M20B	MTC	M10CB	M15CB	M20CB
Ciment	450	373,248	352,512	331,776	450	373,248	352,512	331,776
Sable	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16	1244,16
Eau	207,36	207,36	207,36	207,36	207,36	207,36	207,36	207,36
CaCl₂	0	0	0	0	1%	1%	1%	1%
BSE	0	41,472	62,208	82,944	0	41,472	62,208	82,944

4. Essais de caractérisations

4.1. Essais à l'état frais

4.1.1. L'étalement

La fluidité des matériaux cimentaires est une caractéristique essentielle évaluée sur les chantiers pour appréhender leur comportement rhéologique, notamment leur consistance. À cette étape, le test de fluidité a été effectué en utilisant le test de la table à secousses, conformément à la norme NF EN 1015-3[75], avec un moule tronconique répondant aux spécifications de la norme (diamètres de 70 et 100 mm, hauteur de 50 mm).



Figure 25: Mesure d'étalement

4.2. Essais à l'état durci

4.2.1. Résistance à la compression

L'évaluation de la résistance à la compression a été réalisée à des intervalles de 7 et 28 jours, conformément à la norme EN 196-1[75], en utilisant des échantillons de dimensions $4 \times 4 \times 4$ cm³. L'appareil de l'écrasement est présenté dans la **Figure 26**.



Figure 26: L'appareil de l'écrasement labo génie civil université de BBA

4.2.2. La vitesse d'impulsion ultrasonique

Le test non destructif de la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) a été réalisé sur des prismes de mortier à des intervalles de 7 et 28 jours après le début du processus de durcissement, conformément aux procédures spécifiées dans la norme ASTM C 597[76]. Cette méthode implique la mesure du temps nécessaire à la transmission des ondes à travers le

matériau, suivi du calcul de la vitesse de l'onde en divisant la distance parcourue par le temps mesuré.



Figure 27: L'appareil Ultrason de labo génie civil de l'université de BBA

4.2.3. Attaque chimique

Conformément à la norme ASTM C1898-20[76], les éprouvettes ont été soumises à une série d'essais visant à évaluer la perte de poids à une attaque chimique. Après une période initiale de moulage de 24 heures, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant 28 jours avant d'être placés dans une chambre climatisée maintenue à une température de 25°C et à une humidité de 55 %, atteignant ainsi une masse constante. Par la suite, les échantillons ont été immergés dans une solution à 3,5 % d'acide sulfurique (H_2SO_4), exposant ainsi les échantillons à une agression chimique. Après une période de durcissement de 30, 60 et 90 jours, la perte de poids a été mesurée pour évaluer la durabilité des échantillons face à l'attaque chimique.



Figure 28: Les éprouvettes après 30 jrs de conservation dans la solution sulfurique

5. Mode d'opération

8.1. Matériels utilisés

Le matériel utilisé dans notre étude est :

- Malaxeur : Cet appareil normalisé de norme (EN 196-1)[75], sur lequel se basent pratiquement toutes les normes pour la préparation du mortier, est caractérisé par deux vitesses de rotation selon le mode de préparation choisi.
- Table à secousse manuelle : Une table circulaire avec gavage du centrage du moule tronconique, soutenue par une base en acier en forme de rectangulaire et d'une manivelle qui permet une hauteur de chute de 50 mm. Livrée complète avec un moule en bronze de \varnothing 100 mm et un pilon. L'appareil est utilisé pour la détermination de consistance des mortiers de ciment hydraulique et des pâtes de ciment.
- Une balance électronique : qui sert à évaluer des masses avec une précision de 0.1g, a été utilisée pour mesurer les ingrédients et la préparation des différents mortiers.
- Une étuve : est un appareil de chauffage qui permettant d'effectuer divers traitements thermiques à température réglée.
- Tamiseuse électrique : Appareil assurant l'agitation d'un groupe de tamis empilés, leur fonction est le tamisage.
- Moule de retrait : Objet creux destiné à recevoir une matière pâteuse afin de lui donner une forme et utilisés spécialement pour confectionner des éprouvettes de retrait du mortier.

8.2. Préparation des échantillons

L'étape de préparation des échantillons a été réalisée avec minutie afin d'assurer la cohérence et la fiabilité des résultats expérimentaux. Tout d'abord, les matériaux nécessaires, tels que le ciment, le sable, la BSE et le CaCl_2 , ont été soigneusement pesés.



Figure 29: Les pesés de notre matériaux (sable, l'eau, CaCl_2 , ciment)

8.3. Le malaxage

Ensuite, ces matériaux ont été mélangés dans un malaxeur automatique selon les ratios spécifiés, en respectant scrupuleusement les normes de la méthode de mélange EN 196-1[75] pour garantir une homogénéité optimale.



Figure 30: Malaxeur automatique de labo Génie Civil de l'université BBA

8.4. Le moulage

Les moules appropriés ont été préparés et nettoyés, puis les mélanges ont été coulés dans les moules avec précision. Pour assurer une hydratation adéquate et une maturité uniforme, les échantillons ont été couverts d'un film plastique et conservés dans un environnement contrôlé à une température constante de $20 \pm 3^\circ\text{C}$.



Figure 31: Coulage des mélanges

8.5. La cure

Après une période de 24 heures, les échantillons ont été démoulés avec précaution et placés dans de l'eau pour la cure jusqu'à leur utilisation dans les tests mécaniques et physiques ultérieurs à 7, 28 jours. Cette étape de préparation méticuleuse a été cruciale pour garantir la reproductibilité des résultats et la validité des conclusions de l'étude.

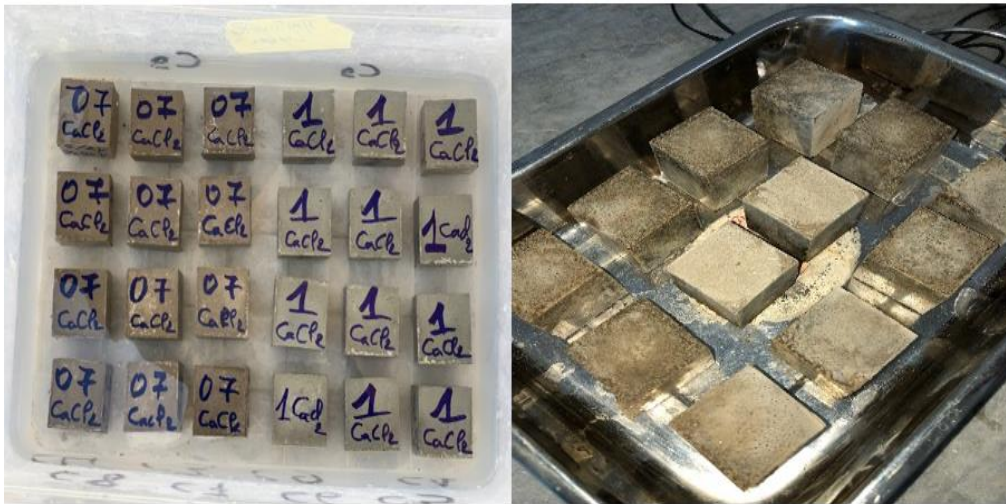


Figure 32: Les échantillons des mélanges

9. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons présenté les essais de caractérisation des matériaux de base utilisés dans les différents mélanges ainsi le mode d'opération. Les constituants ont été évalués selon les normes et recommandations pour leur utilisation dans les mortiers hydrauliques, ce qui facilite l'adoption d'une approche de formulation appropriée. Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les variations de performances observées dans les différents mélanges soumis à différentes sollicitations

Chapitre VI :
Résultats et Discussion

1. Introduction

L'objet de cette section de résultats et discussions est d'explorer les performances mécaniques et physico-chimiques des mortiers cimentaires élaborés à partir de boue d'épuration, avec ou sans l'ajout de CaCl_2 . La boue d'épuration, souvent considérée comme un matériau résiduel, offre un potentiel intéressant dans la construction durable en raison de ses propriétés liantes et de son recyclage potentiel. L'incorporation de CaCl_2 , un accélérateur de prise, peut influencer de manière significative les caractéristiques finales du mortier. Cette étude vise à évaluer l'impact de ces deux composants sur les propriétés à l'état frais et à l'état durcis, telles que l'étalement, la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique, ainsi que sur les propriétés physico-chimiques, telles que l'absorption d'eau et la résistance à l'attaque acide. L'analyse des résultats permettra de mieux comprendre les performances et les implications de ces formulations de mortiers, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles possibilités dans le domaine de la construction écologique et durable.

2. Propriété à l'état frais

2.1. Etalement

La **Figure 33** illustre comment le diamètre d'étalement des mortiers varie en fonction des différents taux de boue d'épuration (10%, 15% et 20%), ainsi que de la présence ou de l'absence de l'accélérateur CaCl_2 . On observe que la fluidité du mortier a été influencée par ces variations de pourcentages et par l'ajout du produit chimique.

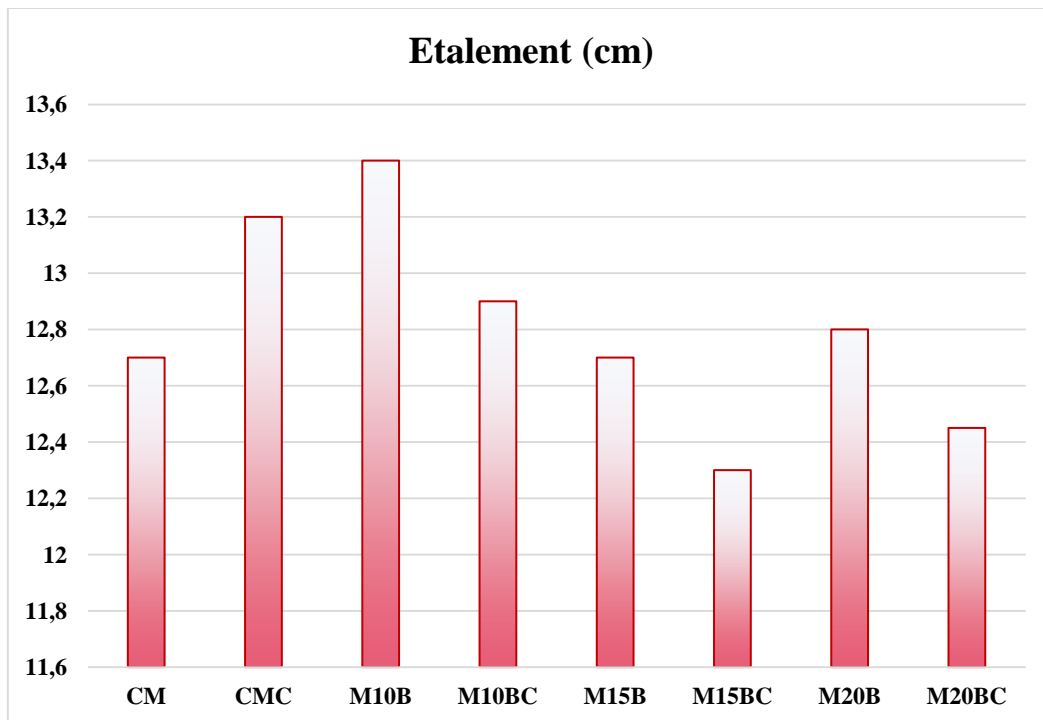


Figure 33: Etalement des différents mélanges étudiés.

Le mélange témoin (CM), affiche un étalement de 127,5 mm. En comparaison, le mélange M10B montre une augmentation d'environ 6 % de la valeur d'étalement, atteignant 134 mm, tandis que le M15B et le M20B présentent des valeurs d'étalement proches de celles du CM, soit respectivement 127,5 mm et 128 mm, on observe de tous ces résultats :

- L'incorporation de 10% de boue (M10B) semble améliorer la maniabilité par rapport au CM.
- Part à part les taux plus élevés (15% et 20%), l'effet sur la maniabilité n'est pas significatif ou légèrement positif.

Ces variations peuvent s'expliquer par le BSE à l'air d'être cristallin. Cela signifie que des objets de forme et de taille irrégulière sont aléatoires. Le frottement interne était accru en raison de la forme inégale des particules de boues d'épuration, ce qui rendait le mortier moins fluide [1]. Le dosage de la boue est plus important pour un effet positif.

L'incorporation de 1% de CaCl_2 optimise remarquablement la maniabilité du CM, portant sa valeur d'étalement à 132,1 mm. Néanmoins, on constate une réduction respective de 2,35%, 6,89% et 5,75% des valeurs d'étalement pour les mélanges M10BC, M15BC et M20BC, soit 129 mm, 123 mm et 124,5 mm, sensiblement au mélange de référence. Ces résultats illustrent que :

- L'ajout de 1% de CaCl_2 augmente la maniabilité du mélange témoin, ce qui est cohérent avec son rôle en tant qu'accélérateur de prise et améliorant de la fluidité.

- L'ajout de CaCl_2 aux mélanges contenant de la boue semble réduire la maniabilité par rapport aux mélanges sans CaCl_2 .

Cette diminution de l'ouvrabilité est attribuable à l'effet de dispersion des particules de ciment par les ions hydroxyde (OH^-) contenus dans le produit CaCl_2 .

3. Propriétés à l'état durcis

3.1. La résistance à la compression

La **Figure 35** illustre les résistances à la compression des mortiers à différents stades de durcissement, en tenant compte de l'incorporation de BSE, avec ou sans l'ajout de 1 % en poids de CaCl_2 . Ces résultats sont la moyenne de 3 essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$.

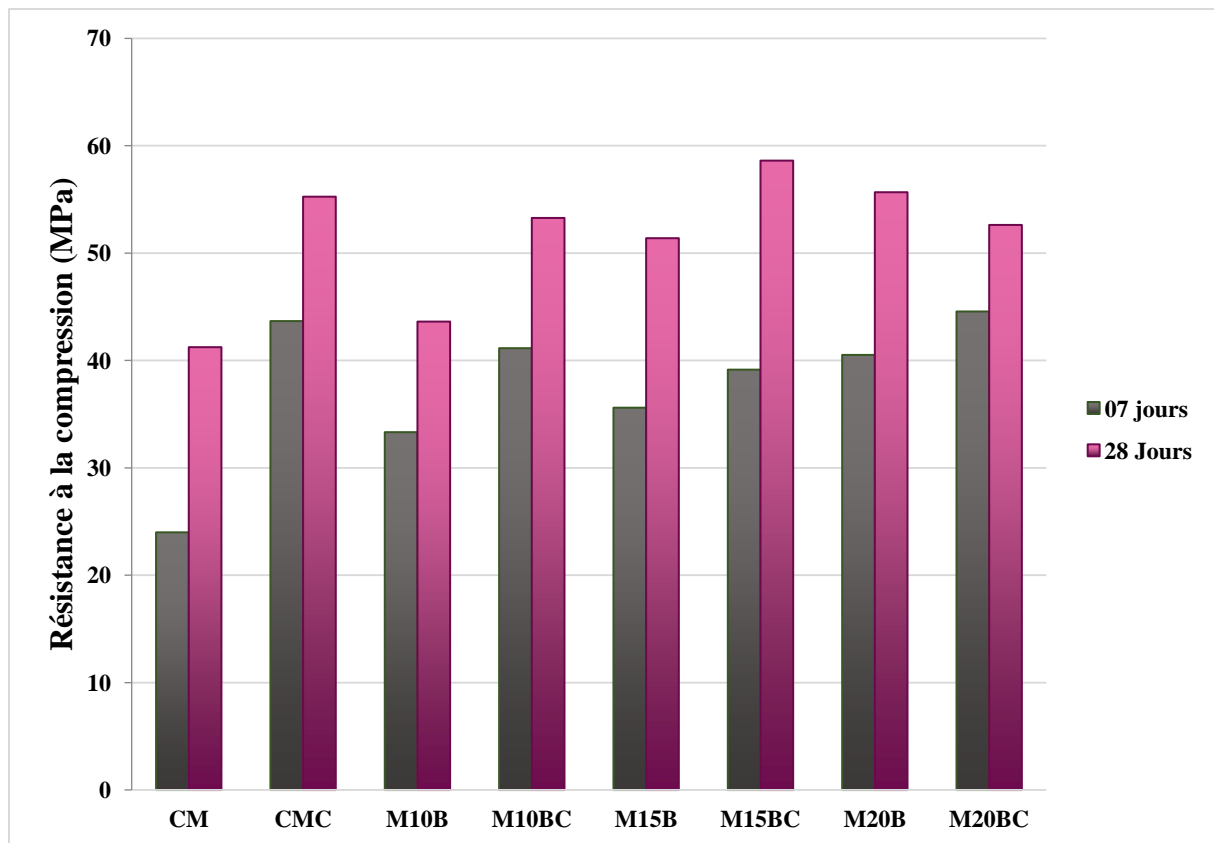


Figure 34: Résistance à la compression des différents mélanges.

D'après la **Figure 35** on ne constate que l'utilisation d'un ajout cimentaire tel que la BSE augmente la résistance à la compression à 7 et 28 jours du mortier par rapport au témoin.

Après 07 jours, le mélange CM affiche une résistance à la compression de 24,00 MPa. L'incorporation de BSE entraîne une augmentation significative de cette résistance. Ainsi, le mélange M10B atteint 33,33 MPa, représentant une progression de 39,04%. Cette tendance à

la hausse se poursuit avec le mélange M15B, qui, avec 15% de boue, atteint 35,61 MPa (+48,38%), et culmine à 40,52 MPa (+68,83%) pour le mélange M20B intégrant 20% de boue. De la même manière, après 28 jours de cure, le mélange CM affiche une résistance de 41,24 MPa. L'introduction de BSE conduit à une amélioration significative des performances mécaniques à ce stade. On constate que le mélange M10B atteint 43,63 MPa, représentant une augmentation modérée de 5,78% par rapport au mélange témoin CM. Cependant, les gains deviennent plus substantiels avec l'augmentation des pourcentages de boue, le mélange M15B à 15% affichant une résistance de 51,39 MPa (+24,56%), et le mélange M20B à 20% atteignant une résistance remarquable de 55,67 MPa (+34,93%). Cette progression remarquable est due à la réactivité pouzzolanique de ces BSE et le taux élevé de SiO_2 . (2)

A l'âge de 07 jours de durcissement et avec l'ajout de 1% de CaCl_2 , le mélange CMC atteint une résistance optimisée de 43,67 MPa. L'incorporation simultanée de CaCl_2 et de 10% de boue pour le mélange M10BC entraîne une légère baisse à 41,15 MPa (-5,76%). Cette diminution s'accroît à 39,15 MPa (-10,34%) pour le mélange M15BC. Cependant, le mélange M20BC dépasse légèrement le témoin CMC avec 44,57 MPa (+2,07%). Tandis qu'à des âges avancés de durcissement soit 28 jours, le témoin CMC présente une résistance optimale de 55,26 MPa. Cependant, l'incorporation simultanée de CaCl_2 et de 10% de boue dans le mélange M10BC entraîne une légère baisse à 53,28 MPa (-3,60%). En revanche, l'ajout de 15% de boue dans le mélange M15BC permet de dépasser la résistance du témoin CMC, atteignant 58,62 MPa (+6,08%). Cependant, le mélange M20BC contenant 20% de boue affiche une résistance de 52,63 MPa (-4,77%), restant légèrement inférieur au CMC. Cette variation est attribuable à la réaction chimique du ciment et l'augmentation de la quantité d'AFm et de C-S-H.

Dans l'ensemble, il semble que l'effet dispersant du CaCl_2 inhibe moins les réactions pouzzolaniques bénéfiques à 28 jours qu'à 7 jours.



Figure 35: Echantillons écrasés

3.2. Vitesse ultrason

Les résultats de vitesse ultrason des mortiers cimentaires à base de BES contenant ou non CaCl_2 sont illustrés par la **Figure 37**. Ces résultats sont la moyenne de 3 essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$.

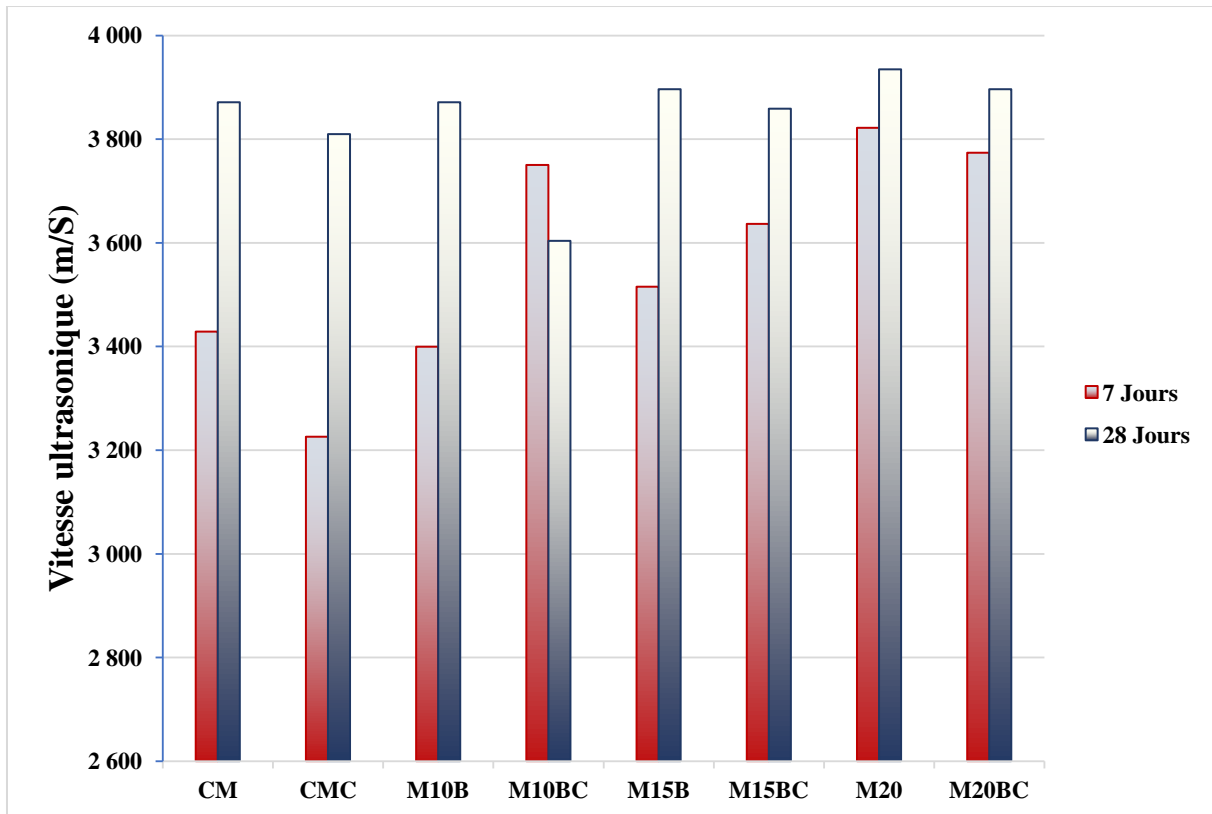


Figure 36: la vitesse ultrason des différents mélanges.

Le mélange témoin (CM) présente une vitesse de 3428,571 m/s à 7 jours. L'incorporation de 10% de boue dans le mélange M10B entraîne une légère diminution à 3399,433 m/s (-0,86%). Cependant, on observe une augmentation de la vitesse pour le mélange M15B, avec 15% de boue, à 3515,144 m/s (+2,49%), et une haute plus significative pour le mélange M20B, avec 20% de boue, à 3821,656 m/s (+10,28%). Cette augmentation des vitesses ultrasoniques à 7 jours est probablement due à la structure interne de la BSE et son homogénéité. À 28 jours, le mélange témoin CM atteint une vitesse de 3870,967 m/s à 28 jours la même pour le mélange M10B. Tandis que, les vitesses des mélanges contenant de la boue sont très proches : 3896,103 m/s pour le mélange M15B (+0,58%), et 3934,426 m/s pour le mélange M20B (+1,55%). Ainsi, les écarts par rapport au témoin CM sont largement augmentés par rapport à ceux observés à 7 jours. Cela est peut-être due à sa densité et sa masse compacte plus grande à 28 jours.

Le témoin CMC avec 1% de CaCl₂ affiche une vitesse optimisée de 3225,806 m/s à 7 jours. Cependant, l'ajout simultané de CaCl₂ et de boue entraîne des vitesses plus fortes pour tous les mélanges : 3750 m/s pour le mélange M10BC (+13,95%), 3636,363 m/s pour le mélange M15BC (+11,29%), et 3773,584 m/s pour le mélange M20BC (+14,52%). Le témoin CMC

présente 3809,523 m/s à 28 jours. M10BC avec 10% de boue affiche une vitesse inférieure de 3603,603 m/s (-5,71%), cependant, M15BC à 15% de boue à 3858,520 m/s (+1,24%) et M20BC à 20% de boue atteint 3896,103 m/s (+2,19%). Ceci est due que le CaCl₂ provoque une accélération de formation des hydrates ce qui va combler les pores et les micros pores en améliorant la compacité.

23.3. Attaque chimique : Perte en poids

Les résultats de la perte en poids des mortiers cimentaires à base de BES contenant ou non CaCl₂ vis-à-vis l'attaque chimique sont illustrés par la figure 39

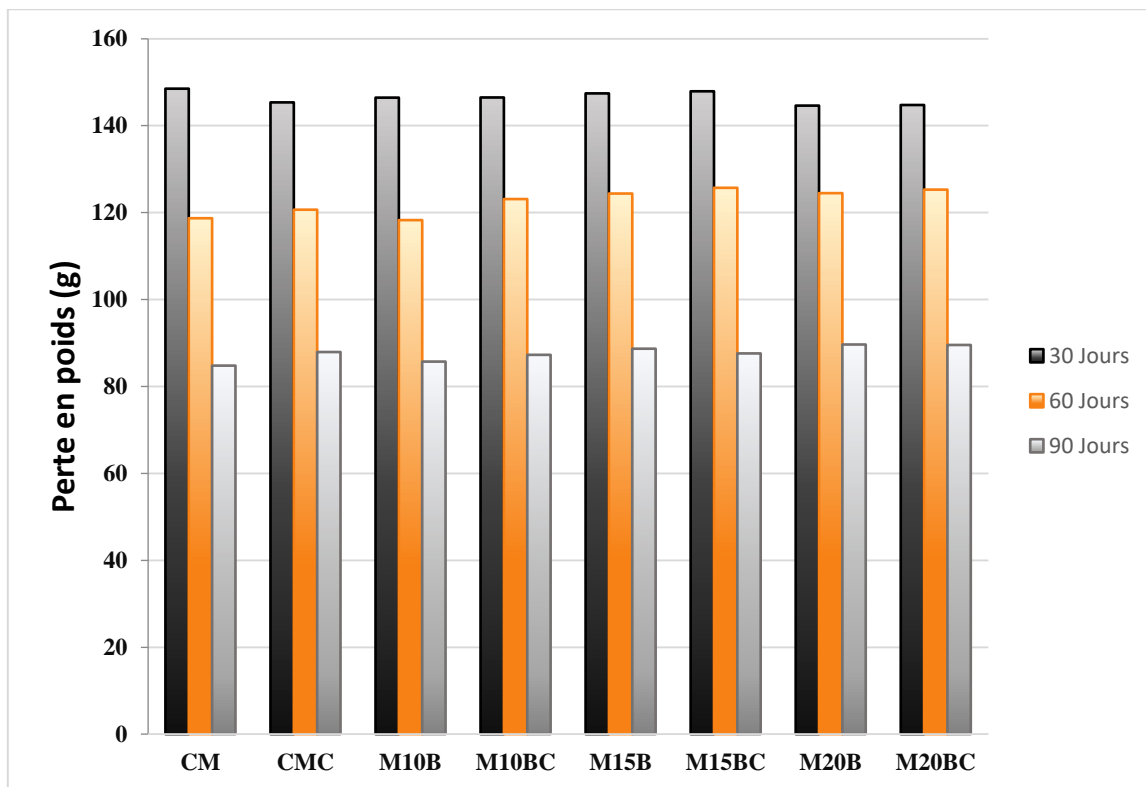


Figure 38 : La perte en poids des différents mélanges après émerision a la solution H₂So₄

La Figure 39 représente la perte en poids des défirrent mélanges au cours de temps.

Le mélange témoin (CM) présente une perte de masse de 29,805 g (20,08%) après 60 jours d'immersion dans la solution acide. Après 90 jours, la perte de masse augmente considérablement à 63,715 g (42,92%).

L'incorporation de 10 % de boue dans le mélange M10B entraîne une perte de masse de 28,175 g (19,24%) après 60 jours, ce qui représente une réduction de la perte de masse de 1,24 % par rapport au mélange témoin. Cependant, après 90 jours, la perte de masse du

mélange M10B augmente à 60,725 g (41,48%), ce qui est légèrement inférieur à celle du mélange CM, avec une réduction de 1,44 %.

Pour le mélange M15B, avec 15 % de boue, la perte de masse après 60 jours est de 23,04 g (15,63%), ce qui montre une diminution plus notable de 4,45 % par rapport au mélange CM. Après 90 jours, la perte de masse du mélange M15B atteint 58,735 g (39,85%), indiquant une réduction de 3,07 % par rapport au témoin.

Enfin, le mélange M20B, contenant 20 % boue, présente une perte de masse de 20,14 g (13,93%) après 60 jours, montrant une réduction significative de 6,15 % par rapport au CM. Après 90 jours, la perte de masse est de 54,96 g (38,02%), ce qui constitue une diminution de 4,9 % par rapport au mélange témoin.

On a observé clairement le glissement de la croûte superficielle d'éprouvettes comme montré dans la **Figure 40** et **41**. L'attaque d'acide provoque la surface exposée de mortier est dégradée, ce phénomène est due à la réaction de l'acide et la partie de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui contient dans le ciment et la boue.

- **60 jours d'immersion** : Tous les mélanges avec boue (M10B, M15B, M20B) présentent une perte de masse inférieure par rapport au mélange témoin (CM), avec une réduction plus marquée à mesure que le pourcentage de boue augmente.
- **90 jours d'immersion** : Bien que les pertes de masse augmentent pour tous les mélanges, ceux contenant de la boue continuent de montrer des pertes inférieures par rapport au mélange témoin, indiquant une meilleure résistance à l'acide.

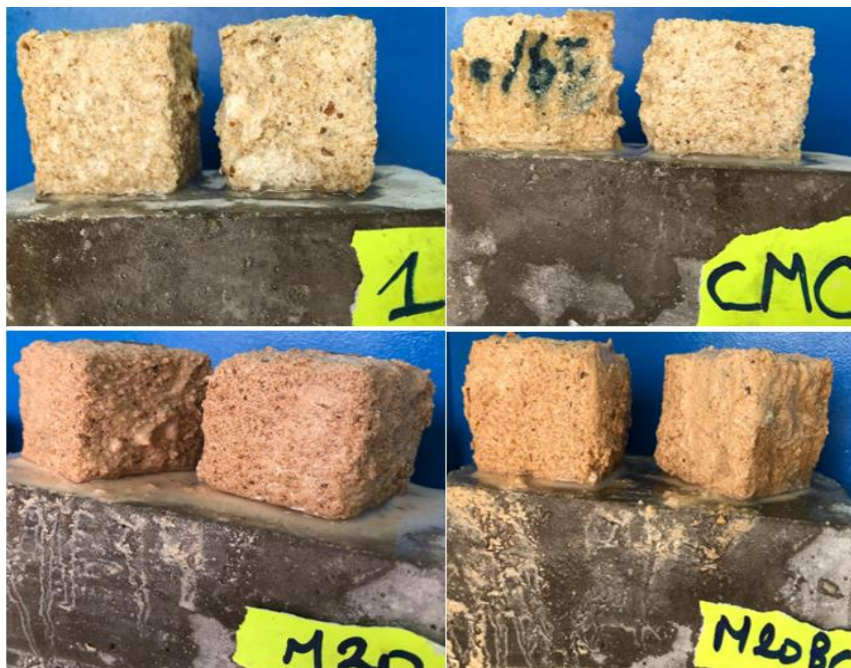


Figure 39 : La perte en poids des différents mélanges après immersion à la solution H_2SO_4 après 60 jours



Figure 40 : La perte en poids des différents mélanges après éersion a la solution H2So4 après 90 jours

4. Conclusion

L'incorporation de BSE dans la production de mortier peut avoir plusieurs avantages, notamment la réduction des déchets et la promotion de pratiques durables dans le domaine de la construction.

L'utilisation de BSE dans le mortier peut améliorer certaines propriétés du matériau, telles que la résistance à la compression et la durabilité. Cependant, il est essentiel de mener des études approfondies sur les effets de l'ajout de ce matériau sur les performances à long terme du mortier, ainsi que sur sa compatibilité avec d'autres composants. Concernant l'ajout de 1% de CaCl_2 , cela peut être une mesure pour accélérer le processus de durcissement du mortier, en particulier dans des conditions de température et d'humidité défavorables. Cependant, il est crucial de contrôler attentivement la quantité de chlorure de calcium ajoutée, car des concentrations excessives pourraient entraîner des problèmes de corrosion des armatures métallique

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire de génie civil, de l'université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj.

La protection de l'environnement fait partie des occupations majeures des recherches, malgré l'amélioration de la production de ciment, mais restent tout de même polluants. Il faut réduire la production du ciment par utilisations d'autres matériaux moins polluants, ou de substitué partiellement au ciment des produits issus du recyclage des éco-produits ou des géo-déchets pour l'élaboration des bétons et des mortiers à haute performances. L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante d'amélioration des propriétés du béton et mortier telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc.

L'objectif visé dans cette étude est de valoriser un sous-produit vient des eaux usées. Il entre dans le cadre de la valorisation. Il consiste à réaliser un mortier écologique et durable. En utilisant La boue des stations d'épuration (BSE) comme une poudre finement broyée à 80 um pour un taux de substitution de (10-15-20) % et pour faire la comparaison, nous avons préparé un échantillon de référence qui contient 0% d'ajout. Pour compenser la réactivité lente du produit, en ajoute 1% de chlorure de calcium (CaCl_2). Après une série d'essais de caractérisation, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- Il semble que l'ajout de 10% de boue ait une meilleure maniabilité par rapport au CM. L'impact sur la maniabilité n'est pas significatif ou légèrement positif pour des taux plus élevés (15% et 20%). La présence de 1% de CaCl_2 accroît la facilité de maniabilité du mélange témoin, ce qui est en accord avec son rôle en tant qu'accélérateur de prise et améliorant la fluidité.
- Avec l'ajout de boue, la résistance à la compression est considérablement améliorée à 7 et 28 jours, avec des bénéfices plus importants à mesure que le pourcentage de boue augmente. Les résultats de la combinaison de boue et de CaCl_2 sont mitigés. La combinaison de 15% de boue et de 1% de CaCl_2 donne le meilleur résultat possible.
- La vitesse ultrasonique des mélanges avec 20% de boue et CaCl_2 (M20) et (M20BC) a montré une amélioration, tandis que les mélanges avec des pourcentages de boue plus élevés ont montré une augmentation de vitesse.

- L'incorporation de BSE cal dans les mélanges de béton réduit la perte de masse due à l'immersion dans une solution acide, tant à 60 jours qu'à 90 jours. Cette amélioration de la résistance à la dégradation acide est plus prononcée avec des pourcentages plus élevés de vase calcinée, montrant son potentiel en tant que substitut du ciment pour améliorer la durabilité des bétons en environnements acides.

Tous les mélanges montrent une réduction de la perte en poids au fil du temps à cause de la conservation dans la solution d'acide. L'ajout de boue ne semble pas affecter de manière significative la tendance générale de la perte en poids par rapport au CM.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Motisariya, K., Agrawal, G., Baria, M., Srivastava, V., & Dave, D. N. (2023). Experimental analysis of strength and durability properties of cement binders and mortars with addition of microfine sewage sludge ash (SSA) particles. *Materials Today: Proceedings*, 85, 24–28. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.05.248>
- [2] P.P.M. Hoby The performance of multi blended cement concrete in marine environment *J. Int. J. Civil Eng. Technol. (IJCIET)*, 8 (7) (July 2017), pp. 219-231 .
- [3] “Blended Cement – Characteristics, Types and Uses,” <https://theconstructor.org/concrete/blended-cement-characteristics-types/25725/>.
- [4] C.J. Lynn, R.K. Dhir, G.S. Ghataora, R. West, Pp Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete *Constr. Build. Mater., J. Constr. Bulid. Mater.*, 98 (2015), pp. 767-779.
- [5] W. Piasta, *The effect of sewage sludge ash on properties of cement composite*, 2016.
- [6] A.M. Neville, *Properties of concrete*, 5th ed., Pearson Education Ltd., 2011.
- [7] M.R. Rixom and N. P. Mailvaganam, *Chemical admixtures*.
- [8] Effect of Calcium Chloride on the Compressive Strength of Concrete Produced from Three Brands of Nigerian Cement ,January 2015 DOI:10.11648/j.ajce.s.2015030203.11.
- [9] An extensive experimental study on the role of micro-size pozzolana in enhancing the gamma-ray shielding properties of high-density polyethylene Tashlykov O Milman I Aladailah M et al. *Radiation Physics and Chemistry*, (2023), 111079, 212.
- [10] K.Y.G. Kwok, J. Kim, A.M. Asce, W.K.O. Chong, M. Asce, S.T. Ariaratnam, F. Asce, *Structuring a Comprehensive Carbon-Emission Framework for the Whole Lifecycle of Building, Operation, and Construction*, 2016.
- [11] Mendes BC, Pedroti LG, Vieira CMF, et al. Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review. *J Build Eng.* 2021;35:102010. doi:10.1016/J.JOBE.2020.102010
- [12] Jawad Ahmad*, Muwaffaq Alqurashi and al, Durability and microstructure study on concrete made with sewage sludge ash: A review (Part II) 02, 2023; accepted April 24, 2023.
- [13] Manai K, Etude de l’effet d’ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées*, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [14] BELHOCINE AIDA , NAGOUDI NADJAT Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux Soutenu Publiquement le:06/2014 PAGE 16.

- [15] J. Dai , Q. Wang , C. Xie et al. L'effet de la finesse sur l'indice d'activité d'hydratation du laitier de haut fourneau granulé broyé , *Matériaux* , 12(18) (2019) , p. 2984.
- [16] N De Belie, M Soutsos, E Gruyaert, [LIVRE] *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials*, 2018.
- [17] Effect of silica-fume content on performance of CaCO₃ whisker and basalt fiber at matrix interface in cement-based composites , Khan, Mehran Cao, Mingli Hussain, Abasal Chu, S. H, *Construction and Building Materials*, Volume 300, 20 September 2021, 124046 .
- [18] R.J.R. Siddique, Conservation, Recycling, Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (11) (2011) 923–932.
- [19] Acepresse.fr, <https://www.acpresse.fr/fumee-de-silice-approche-environnementale-securitaire-et-sanitaire/>.
- [20] Maozhe Chen Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration , Formation doctorale : Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain École doctorale : École doctorale de Chimie de Lyon, Soutenue le 05 Juin 2012
- [21] Flexicon.fr, <https://www.flexicon.fr/Materiaux-geres/Cendres-volantes.html>
- [22] Vilakazi, S., Onyari, E., Nkwonta, O. I., & Bwapwa, J. K. (2023). Reuse of domestic sewage sludge to achieve a zero waste strategy & improve concrete strength & durability-A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 43(1), 122-127.
- [23] G. Vilardi, I. Bavasso, M. Scarsella, N. Verdone, L. Di Palma Fenton oxidation of primary municipal wastewater treatment plant sludge: process modelling and reactor scale-up *Process Safety and Environ. Protection*, 140 (2020), pp. 46-59.
- [24] site web : <https://www.liberte-algerie.com/l-algerie-profonde/des-stations-d-epuration-qui-tournent-a-minima-376332>.
- [25] C.J. Lynn, R.K. Dhir, G.S. Ghataora, R.P. West, Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 767–779.
- [26] BRAME V., (1986)- Les procédés physico-chimiques d' épuration des eaux usées Urbaines. Série documents techniques A.F.E.E France.
- [27] Zemouri, Bilel, et al. Contribution à la caractérisation physico-chimiques des boues résiduares de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Jijel. Diss. Université de Jijel, 2009.
- [28] DOCHENE PH. ; 1990 - les systèmes de traitement de boue des stations d' épuration des petites collectivités. Document technique F.N.D.A.E France Antony (F.R) : CEMAGREF, pp 7-11.

- [29] VEDRY B., (1975) - L'analyse écologique des boues activées. SGETEC.
- [30] DJEZZAR Faten , BRIKI Fatima Zohra, Valorisation des boues d'épuration dans le traitement des eaux huileuses au niveau de la région de HAOUA BERKAOUI, 2019-2020.
- [31] THOMAN NC., (1983) -Les possibilités d'utilisation des eaux usées en agriculture. Techniques et documentation .pp 10-16.
- [32] DEGUMENT., (1978)- Mémento technique de l'eau, 1236p-, 8 Ed, 178, relié .
- [33] BERLAND, Jean-Marc. Traitement des boues d'épuration. 2014. Les procédés physico-chimiques d'épuration des eaux usées Urbaines. Série documents techniques A.F.E.E France.
- [34] Telschow S, Frandsen F, Theisen K, Dam-Johansen K. Cement formation – A success story in a black box: High temperature phase formation of portland cement clinker. *Ind Eng Chem Res.* 2012;51:10983–11004.
- [35] Ahmad, Jawad, Alqurashi, Muwaffaq, Alanazi, Hani, Deifalla, Ahmed Farouk and Yosri, Ahmed M.. "Durability and microstructure study on concrete made with sewage sludge ash: A review (Part II)" *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 30, no. 1, 2023, pp. 20220202. <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0202>.
- [36] Chaofeng Liang ,Xinqian Le ,Weijiong Fang ,Jianming Zhao ,Liuji Fang ,and Shaodan Hou . The Utilization of Recycled Sewage Sludge Ash as a Supplementary Cementitious Material in Mortar: A Review . 2022, 14(8), 4432; <https://doi.org/10.3390/su14084432>
- [37] Quarcioni, Virginie ; Chotoli, FF; Coelho, ACV; Cincotto, MA Méthodes indirectes et directes de Chapelle pour la détermination de la consommation de chaux dans les matériaux pouzzolani. *Structure IBRACON. Maître. J.* 2015 , 8 , 1–7.
- [38] Ahmad, T. ; Ahmad, K. ; Alam, M. Enquête sur les solides calcinés du lavage à contre-courant des filtres comme matériau cimentaire supplémentaire pour le recyclage dans les pratiques de construction. *Constr. Construire. Maître.* 2018 , 175 , 664-671.
- [39] Donatello, S. ; Tong, D. ; Cheeseman, CR Production d'acide phosphorique de qualité technique à partir de cendres de boues d'épuration l'incinérateur (ISSA). *Gestion des déchets.* 2010 , 30 , 1634-1642.
- [40] Chen, Z.; Poon, C.S. Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. *Constr. Build. Mater.* 2017, 154, 791–803.
- [41] Tay, J.H.; Show, K.Y. Municipal wastewater sludge as cementitious and blended cement materials. *Cem. Concr. Compos.* 1994, 16, 39–48.

- [42] Zhang, Q. Study on Mechanical Properties and Heavy Metal Curing Capacity of Cement-Based Materials Mixed with Sludge. Master's Thesis, Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 2017.
- [43] Monzó, J. ; Payá, J. ; Borrachero, MV ; Girbés, I. Réutilisation des cendres de boues d'épuration (SSA) dans les mélanges de ciment : l'effet de la SSA sur la maniabilité des mortiers de ciment. *Gestion des déchets*. 2003 , 23 , 373-381
- [44] J. Monzó , J. Payá , E. Peris-Mora , Une étude préliminaire de l'influence granulométrique des cendres volantes sur la résistance du mortier Cem. *Concr. Rés.* , 24 (1994) , pages 791 à 793
- [45] Vouk D, Serdar M, Vučinić AA. Use of incinerated sewage sludge ash in cement mortars: Case study in Croatia. *Teh Vjesn.* 2017;24:43–51.
- [46] Sara Naamane , Zakia Rais, Mustapha Taleb The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement 1er juin 2016 , pages 783-789
- [47] Chaofeng Liang ,Xinqian Le ,Weijiong Fang ,Jianming Zhao ,Liuji Fang , andShaodan Hou. The Utilization of Recycled Sewage Sludge Ash as a Supplementary Cementitious Material in Mortar. 2022, 14(8), 4432; <https://doi.org/10.3390/su14084432>
- [48] Chen, Z. ; Poon, CS Études comparatives sur les effets des cendres de boues d'épuration et des cendres volantes sur l'hydratation du ciment et les propriétés des mortiers de ciment. *Constr. Construire. Maître.* 2017 , 154 , 791-803.
- [49] Kevalya Motisariya , Geetika Agrawal , Manan Baria , Vyakhya Srivastava , Dr. Niragi Dave. Experimental analysis of strength and durability properties of cement binders and mortars with addition of microfine sewage sludge ash (SSA) particles. 2023, Pages 24-28.
- [50] Han J, Wang K, Shi J, Wang Y. Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties. *Constr Build Mater* 2014;64:342e9.
- [51] Niu M, Li G, Zhang J, Cao L. Preparation of alkali-free liquid accelerator based on aluminum sulfate and its accelerating mechanism on the hydration of cement pastes. *Constr Build Mater* 2020;253:119246.
- [52] Renan PS, Sergio HPC, Ignacio S, Antonio DF, Jorge P. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Constr Build Mater* 2016;111:386e98.
- [53] Maltese C, Pistolesi C, Bravo A, Cella F, Cerulli T, Salvioni D. A case history: a case history: effect of moisture on the setting behaviour of a Portland cement reacting with an alkali-free accelerator. *Cem Concr Res* 2007;37(6):856e65.

- [54] Park HG, Sung SK, Park CG, Won JP. Influence of a C12A7 mineral-based accelerator on the strength and durability of shotcrete. *Cem Concr Res* 2008;38(3):379e85.
- [55] Biao Luo , Zhengdong Luo , Dehui Wang , Chengpeng Shen , Minmin Xia . Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete . 2021, Pages 3283-3295.
- [56] Ebert, B. A. R. (2021). Valorization of MSWI Fly Ash for Use in Cement-Based Materials.
- [57] Mandip Dahal , Yanchen Oinam , Prabhat Vashistha , Jae-Eun Ohb , Sukhoon Pyo b. Cementless ultra-high performance concrete (UHPC) using CaOactivated GGBFS and calcium formate as an accelerator. 2023 , 107000.
- [58] 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.
- [59] N. TENOUTASSE. The hydration mechanism of C₂A and C₃S in the presence of calcium chloride and calcium sulphate. Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, Vol. II, Supplementary Paper 11-118, pp. 372-378, 1968.
- [60] V.S. Ramachandran, Possible states of chloride in the hydration of tricalcium silicate in the presence of calcium chloride, *Materiaux Constr.* 4 (1) (1971) 3e12.
- [61] A.M. Rosenberg, Study of the mechanism through which calcium chloride accelerates the set of portland cement, *J. Proc.* 61 (10) (1964) 1261e1270.
- [62] Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete* (5th Edition). Pearson Education Limited.
- [63] Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- [64] H. Chen, P. Feng, S. Ye, Q. Li, P. Hou, X. Cheng, The influence of inorganic admixtures on early cement hydration from the point of view of thermodynamics, *Construct. Build. Mater.* 259 (2020), 119777.
- [65] J. Holm, Comparison of the Corrosion Potential of Calcium Chloride and a Calcium Nitrate Based on Non-chloride Accelerator, vol. 102, Special Publication, 1987, pp. 35–48.
- [66] Y. Wang, C. Shi, L. Lei, Y. Ma, J. Liu, X. Hu, Formulation of an alkali-free accelerator and its effects on hydration and mechanical properties of Portland cement, *Cement Concr. Compos.* 129 (2022), 104485.
- [67] M.C.G. Juenger, P.J.M. Monteiro, E.M. Gartner, G.P. Denbeaux, A soft X-ray microscope investigation into the effects of calcium chloride on tricalcium silicate.
- [68] E.M. Gartner, K.E. Kurtis, P.J.M. Monteiro, Proposed mechanism of CSH growth tested by soft X-ray microscopy, *Cement Concr. Res.* 30 (5) (2000) 817–822.

- [69] L. Steger, S. Blotevogel, L. Frouin, C. Patapy, M. Cyr, Experimental evidence for the acceleration of slag hydration in blended cements by the addition of CaCl₂, *Cement Concr. Res.* 149 (2021), 106558.
- [70] G. Van Rompaey, « Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré », 2006.
- [71] J. F. YOUNG, R. L. BERGER AND F. V. LAWRENCE JR. Studies on the hydration of tricalcium silicate pastes III. Influence of admixtures on hydration and strength development. *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 6, pp.689-700, 1973.
- [72] J. J. Beaudoin and C. MacINNIS. The effect of admixtures on the strength-porosity relationship of portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-11, 1971
- [73] Laurent Steger , Simon Blotevogel , Laurent Frouin , Cédric Patapy , , Martin Cyr. Experimental evidence for the acceleration of slag hydration in blended cements by the addition of CaCl₂. Novembre 2021 , 106558.
- [74] 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.
- [75] Le site institutionnel de l'AFNOR.
- [76] Le site ATSM international

