

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité: génie civil

**Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés physiques et
mécanique du mortier**

Par :

Cherifa Guers

Feriel Bounia

Devant le jury composé de:

Prof. Kenai Said

U.S.D.B.1.

Promoteur

Dr. Kouider djelloul Omar

U.D.J.K.M

Co-promoteur

Blida 2020

Résumé

La fabrication de ciment dégage beaucoup de gaz carbonique (CO₂) et consomme beaucoup d'énergie. Pour chaque tonne de ciment portland produite d'environ 1 à 1,25 tonne de gaz carbonique qui sont libérés dans l'atmosphère. L'utilisation des additions minérales comme laitiers, cendres volantes, pouzzolanes naturelles ou le calcaire en tant que substitution du ciment présentent une façon efficace pour l'industrie du ciment de diminuer ses émissions de CO₂, qui représentent 5% du total des émissions anthropiques dans le monde. Ce travail s'intéresse à évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un mortier contenant des additions minérales tel que le calcaire et pouzzolane naturelle.

Mots clés : Béton, Calcaire, pouzzolane naturelle, rhéologie, Résistance à la compression, durabilité.

ملخص

إنتاج الأسمنت يطلق الكثير من ثاني أكسيد الكربون ويستهلك الكثير من الطاقة. ومن أجل كل طن من أسمنت بورتلاند المنتج، يتم إطلاق ما بين 1 و1.25 طن من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. إن استخدام الإضافات المعدنية مثل فضلات الأفران أو الرماد المتطاير أو البوزولان الطبيعي أو الحجر الجيري كبديل للأسمنت يوفر طريقة فعالة لصناعة الأسمنت للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، التي تمثل 5٪ من إجمالي الانبعاثات في العالم. هذا العمل مهتم في تقييم الخصائص الريولوجية والميكانيكية للمونة تحتوي على إضافات معدنية مثل الحجر الجيري والبوزولان الطبيعي.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الحجر الجيري ، البوزولان الطبيعي ، الريولوجيا ، مقاومة الضغط ، الديمومة.

Abstract

The production of cement releases a lot of carbon dioxide (CO₂) and consumes a lot of energy. For every tonne of Portland cement produced, approximately 1 to 1.25 tonnes of carbon dioxide (CO₂) is released into the atmosphere. The use of mineral additions such as slag, fly ash, natural pouzzolanes or limestone as a substitute for cement provide an effective way for the cement industry to reduce its CO₂ emissions, which account for 5% of the world's total anthropogenic emissions. This work is interested in evaluating the rheological and mechanical properties of a mortar containing mineral additions such as natural limestone and pouzzolane.

Keywords: Concrete, Limestone, natural pozzolan, rheology, Compressive strength, durability.

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir accordé la santé, le bien-être, la patience et le courage de terminer ce mémoire.

À la fin de ce travail, nous adressons nos sincères remerciements, notre gratitude, notre appréciation et notre respect à Monsieur **Said KENAI**, professeur et directeur du laboratoire de Géo matériaux et Génie civil à l'Université de Blida 1, pour sa confiance en nous et son acceptation de notre encadrement malgré sa occupation, et nous le remercions également pour ses efforts avec nous, ses directives, ses conseils, et sa disponibilité permanente.

Nous sommes également très reconnaissants au **Dr Kouider Djelloul omar**, maître de conférences à l'université de Djillai Bounaama à Khemis Miliana, pour ses efforts avec nous, ses conseils continus, son soutien et ses encouragements envers nous.

Nos remerciements vont également aux jurés qui ont accepté de juger notre travail.

Nous remercions également le professeur **MENADI**, Madame **BENTLMCEN**, Monsieur **YAHIAOUi** et Monsieur **Si AHMED** pour les efforts dans la présentation des formations qui nous ont aidés à rédiger ce mémoire malgré les circonstances difficiles que nous avons rencontrées cette année en raison de l'épidémie mondiale (covid 19).

Nous remercions tous les équipages et techniciens qui ont travaillé au laboratoire Géo matériaux et Génie Civil de l'université Blida 1 pour leur aide et leur disponibilité tout au long de notre travail.

Nous remercions également sincèrement toute l'équipe travaillant au Laboratoire de contrôle de la qualité à la cimenterie de Meftah, en particulier le directeur **Hamid Darraji**, Monsieur **Fenniche** et Monsieur **Kobi** pour leurs efforts avec nous et leur assistance à chaque étape de nos expériences et de notre travail.

D'autre part je dresse mes plus vifs remerciements à tous les enseignants de la faculté de « GENIE CIVIL », à l'Université de Blida 1 en particulier pour les matériaux de construction.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui nous ont enrichis avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir.

Merci, gratitude et appréciation à nos parents et à notre famille pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de notre carrière universitaire et tout en travaillant sur le mémoire de fin d'études.

Nous remercions tous nos amis et collègues avec qui nous avons travaillé au laboratoire Géo matériaux et génie civil à université de Blida 1 pour le respect et l'esprit de coopération qui étaient entre nous.

Table des matières

Résumé.....	1
Remerciement	4
Table des matières	5
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTE DES ABREVIATIONS	10
INTRODUCTION GENERALE.....	12
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	13
1.1 Généralité.....	13
1.2 Les ajouts minéraux.....	13
1.3 Classification des ajouts.....	14
1.3.1 Fillers calcaires	16
1.3.2 Cendres volantes.....	16
1.3.3 Laitiers de hauts fourneaux	17
1.3.4 Fume de silice.....	17
1.3.5 La pouzzolane naturelle.....	18
1.3.6 Les sulfates de calcium.....	18
1.3.7 Metakaolin.....	19
1.4 Avantages et inconvénients de certains ajouts cimentaires.....	19
1.5 L'utilisation des ajouts en Algérie.....	21
1.6 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires.....	22
1.6.1 Effet de la densité de l'addition.....	22
1.6.2 Effet de la morphologie	23
1.6.3 Effet de la surface spécifique	24
1.7 Effet des additions minérales sur les mortiers a l'état frais.....	27
1.7.1 Teneur en air du béton frais.....	27
1.7.2 Densité.....	28
1.7.3 Rhéologie.....	29
1.7.3.1 Paramètres rhéologiques.....	29
1.8 Propriété des mortiers à la base des additions minérales à l'état durci.....	34
1.8.1 Les résistances mécaniques	34
a. Résistance à la compression	34
b. Résistance à la traction	37
1.8.3 Module d'élasticité	39
1.8.4 Retrait	39
1.9 Durabilité des mortiers et bétons à la base des additions minérales.....	40

1.9.1 Porosité.....	40
1.9.2 Perméabilité à l'eau.....	41
1.9.3 Diffusion des ions chlore.....	42
1.9.4 Résistance aux sulfates.....	43
1.10 Conclusion.....	45
CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS.....	46
2.1 Introduction.....	46
2.2 Caractérisation des matériaux utilisés.....	46
2.2.1 Sable normalisée.....	46
2.2.2 L'eau de gâchage.....	47
2.3 Caractéristiques chimiques et minéralogiques des ajouts.....	47
2.3.1 Préparation d'une pastille.....	49
2.3.2 La chaux libre.....	52
2.3.3 La perte au feu (PAF).....	54
2.4 Les quantités nécessaires pour chaque % ajout.....	56
2.5 Les essais sur mortier projeté.....	58
2.5.1 Préparation de mortier.....	58
2.5.2 Préparation des éprouvettes.....	59
2.5.3 Résistance à la flexion.....	60
2.5.4 Résistance à la compression.....	61
2.5.5 Le maniabilimètre du LCPC.....	62
2.5.6 Absorption capillaire.....	62
2.5.7 La porosité accessible à l'eau.....	63
2.6 Conclusion.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Variation du temps d'écoulement et de l'étalement en fonction du taux de substitution du ciment et du dosage en super plastifiant	22
Figure 1.2 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres Volantes 1 et 2 dans une formulation de béton.....	23
Figure 1.3 : Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale	24
Figure 1.4 : Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvants en fonction du dosage en additions minérales (CA (Calcite), CP (Calcite Précipitée), QZ (Quartz), SF(Fumée de Silice))	25
Figure 1. 5 : Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier	25
Figure 1.6 : Dosage du calcaire (L) et de clinker (C) dans les fractions de différentes tailles après leur broyage (finesse du mélange:3890 cm ² /g, dosage en calcaire 20%)	27
Figure 1.7 : Teneur en air occlus	27
Figure 1. 8 : Variation de la masse volumique en fonction de taux des additions	28
Figure 1.9 : Schéma glissement des couches.....	29
Figure 1.10 : Schéma de vitesse de cisaillement	30
Figure 1.11 : Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton	31
Figure 1.12 : Effets des taux de remplacement en SF sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	33
Figure 1.13 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP à base d'addition filler calcaire et d'un BOV correspondant	34
Figure 1.14 : Comparaison des évolutions des résistances en compression.....	34
Figure 1.15 : Evolution des écarts de résistances en compression des BAP entre 7 jours et les autres échéances en fonction du temps.....	37
Figure 1.16 : Influence du laitier sur la résistance en flexion.....	38
Figure 1.17 : Résistance en traction à 28 et 90 jours	38
Figure 1.18 : Variations de la variation du module d'élasticité du mortier en fonction de taux de substitution du ciment pour les additions minérale.....	39
Figure 1.19 : Effet de laitier et métakaolin sur le coefficient de diffusion des ions chlorures	43
Figure 1.20 : Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique...	44
Figure 1.21 : Expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion.....	45
Figure 2.1 : Analyse granulométrique tamisage	47
Figure 2.2 : Concassage des matières premières	48
Figure 2.3 : Les échantillons de matières premières.....	48
Figure 2.4 : Séchages de matières premières	49
Figure 2.5 : Peser de cellulose et de poussière (clinker, calcaire, gypse, pouzzolane).....	49
Figure 2.6 : Broyeur de (clinker, calcaire, gypse, pouzzolane).	50
Figure 2.7 : Prendre l'échantillon et broyer sur une feuille de papier propre et sec.	50
Figure 2.8 : Machine de préparation des pastilles	51

Figure 2.9 : Pastille.	51
Figure 2.10 : Appareille XRF.	51
Figure 2.11 : Solution de clinker avec d'éthylène glycol.	52
Figure 2.12 : Titrer avec une solution de HCl à 0.1 N jusqu'au virage du bleu au jaun verdâtre	53
Figure 2.13 : Tableau pour déterminer la valeur du chou libre en fonction de Hcl.	53
Figure 2.14 : Peser exactement 2 g d'échantillon de matière	54
Figure 2.15 : Creuset en platine.	55
Figure 2.16 : Dessiccateur.	55
Figure 2.17 : Mettre l'échantillon dans le four a moufle à 950°C.....	55
Figure 2.18 : Malaxeur.....	56
Figure 2.19 : Essai de LCPC.....	58
Figure 2.20 : Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.	59
Figure 2.21 : Appareil de la appareil de flexion	60
Figure 2.22 : Appareil de compression.....	62
Figure 2.23 : Organigramme récapitulatif des essais réalisés.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1:classification des ajouts selon leur réactivité	17
Tableau 1.2:les avantages et les inconvénients de certains ajouts cimentaires	22
Tableau 1.3:utilisation des ajouts dans les cemnteries algériennes	23
Tableau 2.1:composition granulométrique du sable normalisé	48
Tableau 2.2: la composition chimie d(clinker. calcaire.gypse .pouzzolane)	58
Tableau 2.3: les quantité nécessaires pour chaque % ajout	58

LISTE DES ABREVIATIONS

- Al_2O_3 Alumine
- BAP Béton auto plaçant
- BHP Béton à hautes performances
- C Ciment
- C_2S Silicate bicalcique (belite)
- C_3A Aluminate tricalcique
- C_3S Silicate tricalcique (alite)
- C_4AF Aluminate-ferrite tétracalcique
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Hydroxyde de calcium (la chaux)
- CaCO_3 Carbonate de calcium
- CaO Oxyde de calcium
- CaSO_4 Sulfate de calcium
- CEM Le Ciment Portland
- CO_2 Dioxyde de carbone
- C-S-H Silicate de calcium hydraté
- CV Cendres volantes
- dF Projection de la force de frottement tangentielle.
- dS Surface élémentaire d'une couche cisillée.
- E/C Rapport de l'Eau sur Ciment
- Fe_2O_3 Oxyde de fer
- FS fume de silice
- K_2O Oxyde de potassium
- La laitier de hauts fourneau

- LCPC Laboratoire central des ponts et chaussées
- MAP Mortier autoplaçant
- Mf Module de finesse
- MgO Oxyde de magnésium
- Mk Metakaolin
- Na₂O Oxyde de sodium
- NaOH La soude
- p Porosité
- PZN pouzzolane naturelle
- R_c Résistance à la compression
- R_t Résistance à la traction
- SiO₂ Dioxyde de calcium (silice)
- Xrf La spectrométrie de fluorescence des rayons X
- τ Contrainte de cisaillement [Pa]

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement le béton est l'un des matériaux le plus employé dans le domaine du bâtiment ou de génie civil à travers le monde. En effet sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, sa tenue au feu et son faible coût, contribue à accroître son utilisation. Toutefois, le matériau béton doit s'adapté de manière continue à de nouvelles exigences et nouveaux besoins. L'utilisation des ajouts cimentaires dans le béton ou le mortier comme le laitier, la PZN et le calcaire en tant que substitution du ciment peut de garantir deux principaux avantages, la première réside sur le fait que certains additions ont le même effet que le super plastifiant dans l'amélioration de la fluidité, et d'autre ils ont le même effet que les agents viscosant dans l'augmentation de la viscosité du mélange, ce qui réduit de manière significatif le coût globale du matériau. Le deuxième avantage réside dans le fait que l'utilisation de ces additions présentent une façon efficace pour l'industrie du ciment de diminuer ses émissions de CO₂, qui représentent 5% du total des émissions anthropiques dans le monde.

En effet, notre travail s'inscrit dans le contexte d'étudier l'effet d'ajout cimentaire (pouzzolane et calcaire) sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. Afin d'atteindre les objectifs cités, le mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à un revue bibliographie qui comprend des généralités sur les ajouts minéraux et ainsi leur effet sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers.

Le deuxième chapitre a été consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés et les formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental dans le cadre de cette étude. Ensuite, nous exposons aussi les différents essais caractérisant le mortier à l'état frais et durci.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Généralité

Dans le présent chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les propriétés de mortier à base des ajouts cimentaires. Dans un premier temps, on présente les différents types des ajouts cimentaires puis les caractéristiques des mortiers à l'état frais et leurs propriétés rhéologiques. Une revue bibliographique est ensuite présentée sur l'influence des additions minérales sur les propriétés des mortiers à l'état durci, ainsi que leurs propriétés physicochimiques et de durabilité.

1.2 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore au clinker afin de produire un ciment composé. Ils ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment [1].

Ou de la définition technique les ajouts cimentaires sont des produits résiduels d'autres industries destinés aux sites d'enfouissement. Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice sont parmi les matières les plus couramment utilisées comme ajouts cimentaires.

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolanique à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux ainsi que la fumée de silice. Ces produits deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et donnent naissance à de nouveaux hydrates qui confèrent aux bétons une plus grande résistance mécanique et une meilleure durabilité. Par leur activité de surface et leur distribution granulaire, ils jouent un rôle fondamental dans le comportement rhéologique du béton.

1.3 Classification des ajouts

Les ajouts minéraux se substituant au ciment peuvent être classés en fines actives telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle et en fines inertes telles que le calcaire. Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition « additions pour béton hydraulique » a savoir :

- Additions de type I selon la norme EN 206-1
 - ✓ Les additions calcaires (NF P 18-308).
 - ✓ Les additions siliceuses (NF P 18-509).
 - ✓ Les fillers (NF P 18-501).

- Additions de type II selon la norme EN 206-1 :
 - ✓ La fumée de silice (NF P 78-502).
 - ✓ Les cendres volantes de houille (NF P 18-505).
 - ✓ Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506) [2].

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolaniques, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau 1.1 ci-dessous.

Tableau 1.1 : Classification des ajouts selon leur réactivité [3]

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique.

1.3.1 Fillers calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire, composée majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 . Le calcaire a été introduit dans la fabrication des ciments à la suite des deux guerres mondiales pour augmenter la production et satisfaire la demande accrue de ce produit. Ainsi, son emploi a donné des résultats prometteurs de résistance et de durabilité. Par la suite, plusieurs études ont conclu que les fillers calcaires ont une action bénéfique sur la maniabilité des liants hydrauliques, ainsi que sur les propriétés mécaniques des bétons [2].

Le fillers calcaires avait principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité. Plusieurs travaux [4,5] montrent que le filler calcaire laisse entrevoir une autre efficacité provenant de réactions superficielles entre les grains de calcite et le ciment, d'où les auteurs ont constaté les constatations suivantes :

- ✓ Le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés [5] ;
- ✓ L'ion CO_3^{2-} peut se substituer aux ions SO_4^{2-} dans les sulfates hydratés [4,5] ;
- ✓ Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principal; le silicate tricalcique [5,6] ;
- ✓ Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolaniques [6,7].

1.3.2 Cendres volantes

Les cendres volantes, représentent l'ajout cimentaire le plus utilisé en béton, c'est un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé aux usines génératrices de puissance électriques. Les cendres volantes sont alors rassemblées des gaz d'échappement par les dépoussiéreurs électrostatiques ou les filtres à manches.

Les cendres volantes sont une poudre finement divisée ressemblant au ciment . Les constituants des cendres volantes sont principalement la silice, l'alumine, le fer et le calcium contenants en verre de silicate. La densité relative des cendres volantes s'étend généralement entre 1,9 et 2,8 et la couleur est généralement grise. Leur diamètre allant de $1\ \mu\text{m}$ à $100\ \mu\text{m}$ ($50\ \% < 20\ \mu\text{m}$). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais [8].

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille),
- les cendres sulfocalcique (cendre de lignite),
- Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines [9].

1.3.3 Laitiers de hauts fourneaux

Le laitier de haut fourneau, ou il préfère l'appeler laitier, est un sous-produit du processus de fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment, lorsqu'il est activé, c'est un matériau hydraulique. Il est nodulaire et sa composition chimique contient 40% à 50% d'oxyde de calcium, 25% à 35% de silice, 12% à 30% d'alumine et une petite quantité d'oxyde de magnésium et d'autres oxydes, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker, il est considéré comme un bon additif parmi les matériaux cimentaires supplémentaires, l'ajout des laitier au ciment portland en vue d'amélioration des propriétés physico-chimiques des ciments a été l'objet d'étude de plusieurs chercheurs [10] .

1.3.4 Fume de silice

La fumée de silice est également appelé micro-silice ou fumée de silice condensée, mais le terme le plus couramment utilisé est la fumée de silice. Les fumes de silice se sont des sous produits de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1 μm . Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95% [11].

La taille fine de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire du ciment en comblant les vides et en augmentant la compacité. De plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates [4]. D'un point de vue chimique, les fumées de silice sont essentiellement constituées de silice.

Les caractéristiques très particulières des fumées de silice en font des pouzzolane hautement réactive en raison de leur forte teneur en silice, de leur état amorphe et de leur finesse extrêmement élevée. L'effet bénéfique des fumées de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton est principalement dû à la vitesse de développement de la réaction pouzzolanique et aux effets physiques uniques des particules de fumées de silice qui est connu sous le nom d'effet filler [9].

1.3.5 La pouzzolane naturelle

Le terme pouzzolane provient de Pouzzoles, nom d'une ville italienne de la région de Naples. Il y désigne un matériau volcanique cendreux de composition trachytique, de couleur claire et friable, utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment. Cette application en tant que ciment naturel remonte aux constructions romaines de l'Antiquité. Sa couleur va du noir au rouge selon le degré d'oxydation de fer [12].

C'est un produit composé essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. La pouzzolane naturelle peut être d'origine volcanique [12].

La pouzzolane naturelle peut être :

- ✓ Verre volcanique : sont des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques ;
- ✓ Tufs volcaniques compacts : Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermiques se traduit par la formation des minéraux zéolitiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolane se distingue par une texture dure et compacte.

1.3.6 Les sulfates de calcium

Sont incorporés au ciment principalement sous forme de gypse. Ils doivent être ajoutés en faibles quantités aux constituants du ciment en vue de réguler la prise lors de son hydratation. Ils sont introduits à teneur de 5% sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),

de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci [13].

1.3.7 Metakaolin

Le metakaolin (MK) est l'un des matériaux cimentaires développés récemment pour le béton performant. Il est produit en calcinant l'argile épuré de kaolinite dans une température variant de (650 à 800 C°) pour chasser l'eau chimiquement liée dans les interstices du kaolin et détruire la structure cristalline, qui convertit effectivement le matériau en phase de MK, un aluminosilicate amorphe. La dimension particulière du MK est généralement moins de 2 μm , qui est sensiblement plus petit que des particules de ciment. Il est typiquement incorporé dans le béton pour remplacer 5 à 20 % de ciment. L'oxyde d'aluminium et le dioxyde de silicone sont les deux composants principaux du MK. Matériau obtenu présente une puzzolanité et peut être comme une addition très active [12].

1.4 Avantages et inconvénients de certains ajouts cimentaires

- **Avantages techniques**

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parcequ'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration [14].

- **Avantages économiques**

Typiquement, le ciment portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et à ce titre, demandent relativement moins d'énergie. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur

leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés [14].

- Avantages écologiques

Le remplacement du ciment portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie [14].

Les avantages et l'inconvénient des ajouts sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1.2 : Les avantages et les inconvénients de certains ajouts cimentaires [10]

Ajout cimentaire	Avantage	Inconvénient
Fumée de silice	<ul style="list-style-type: none"> • Accroissement des résistances mécaniques • Affinement de la structure poreuse • Diminution des coefficients de diffusion • Diminution du pH et des concentrations en alcalins de la solution interstitielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice • Accroissement de la demande en eau • Accroissement du retrait Endogène
Cendre volantes	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la demande en eau • Affinement de la structure poreuse • Réduction de la chaleur d'hydratation et de la température maximale atteinte • Résistance accrue à long terme • Diminution des coefficients de Diffusion 	<ul style="list-style-type: none"> • Variabilité de composition chimique des cendres volantes et une réactivité variable • Retard de prise • Affaiblissement des résistances mécaniques au jeune âge
Laitier de haut Fourneau	<ul style="list-style-type: none"> • Affinement de la structure poreuse • Réduction de la chaleur d'hydratation • Diminution de la perméabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Retard de prise • Augmentation du retrait Endogène

1.5 L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous les pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui qui utilise des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El - Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Béni - Saf. Le tableau 1.3 donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes [15].

Tableau1.3 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [15]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts utilisés
ERSE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El kebira	
	Hamma bouziane	
	H'ajar Essoud	Laitier
	Tbessa	
ERCC	Meftah	Tuf/calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour El ghozlane	Calcaire tuf
ECDE	Chelef	Calcaire
ERCO	Beni saf	Pouzzolane
	Zabana	
	Saida	

1.6 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires

Il existe plusieurs mécanismes de l'action des additions minérales qui induisent des modifications dans la rhéologie de la pâte du ciment ou du béton. Les avantages de ces additions sont généralement attribués à la morphologie de la surface texturale, la distribution granulaire et le potentiel zêta qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires [2].

1.6.1 Effet de la densité de l'addition

Lorsque le ciment portland est remplacé par une addition minérale de poids spécifique inférieure, il résulte un grand volume de pâte qui nécessite plus d'eau de gâchage pour recouvrir tous les grains. L'utilisation de la zéolite naturelle, ayant un poids spécifique de 2.2 g/cm^3 inférieur de celui du ciment (3.1 g/cm^3), diminue l'ouvrabilité du béton ce qui conduit à l'utilisation de superplastifiant pour maintenir une ouvrabilité constante [2]. Ce besoin en superplastifiant ne suit pas une progression linéaire avec le taux de substitution tels que l'incorporation de 30% de zéolite naturelle nécessite trois fois la quantité de superplastifiant d'un béton contenant 15% de cette addition [16]. Similaires observations ont été aussi révélées par Sahmaran [17] et Ahmadi et Shekarchi [18] où cette addition peut être utilisée comme agent de viscosité pour les coulis de ciment (Figure 1.1).

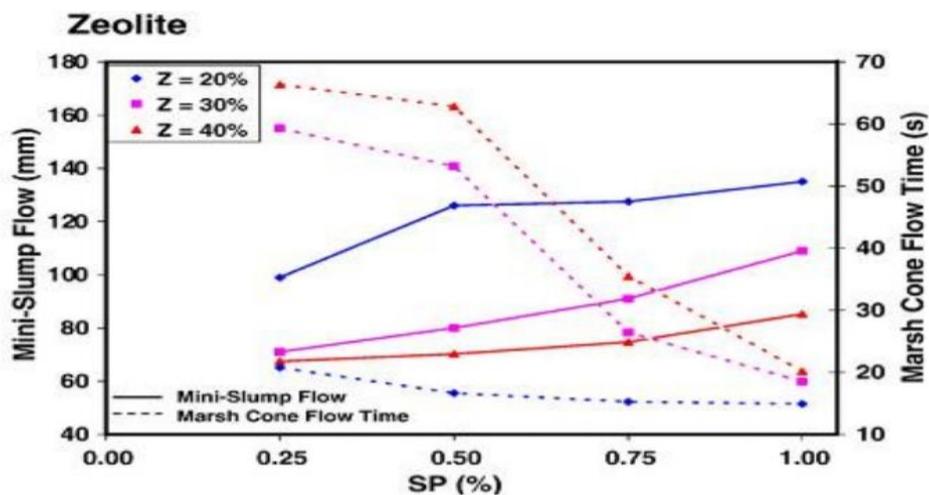


Figure 1.1 : Variation du temps d'écoulement et de l'étalement en fonction du taux de substitution du ciment et du dosage en super plastifiant [17].

1.6.2 Effet de la morphologie

La morphologie des particules des additions minérales a une influence considérable sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. D'après l'étude de Boudchicha [21], la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes et ces résultats présentés sur la Figure (1.2) Dans le même contexte Lange et al. [19] ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau de gâchage et augmentait la fluidité du mélange. Ce comportement a été expliqué par la forme sphérique des particules qui facilitent l'empilement granulaire et réduisent les frictions inter-particulaires [2].

Selon burak et al [20], la forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau dans le mélange, plus réduite. En outre les fumée de silice de granulométrie plus important il est plus propice au maintien de la maniabilité du béton [2]. Duval et kadri [22], montrent que les fumé silice avec le super plastifiant améliore l'ouvrabilité du béton et favorise la dispensions des grains du ciment.

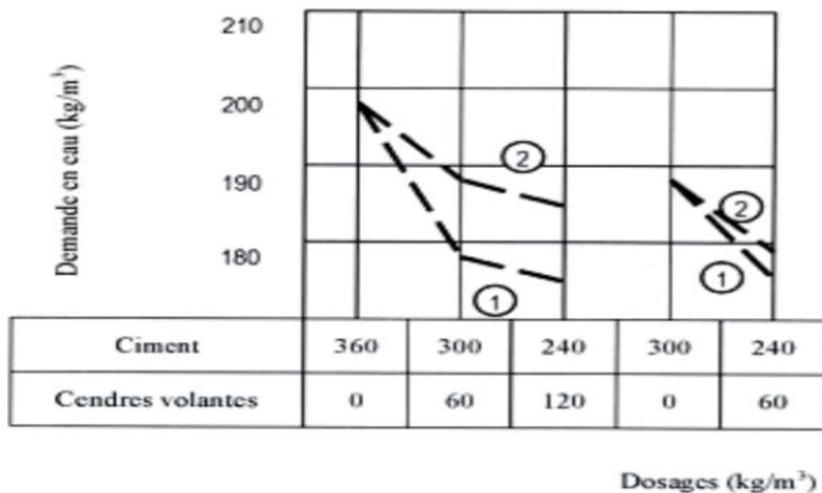


Figure 1.2 : Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres Volantes 1 et 2 dans une formulation de béton [21].

1.6.3 Effet de la surface spécifique

L'addition des ajouts minéraux au ciment Portland peut produire plusieurs modifications au sein du squelette solide du mélange. La petite taille des particules des ajouts comble les vides interstitiels et augmente la densité de la matière [2]. De ce fait l'eau attrapée dans les pores granulaires est libérée ce qui augmente la compacité de la pâte, améliore l'ouvrabilité et diminue la demande en eau [23, 24,25]. Beaucoup des études montrent que l'augmentation de la surface spécifique des fillers entraîne une altération des caractéristiques d'écoulement (à teneur en eau fixée) que ce soit à l'échelle de la pâte, du mortier [26, 2] ou du béton [27].

Esping et al. [29] ont remarqué qu'il y a une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité du béton avec l'augmentation de la surface spécifique du filler et ces résultats présentés sur la Figure (1.3) En revanche, El Hilali [28] montre que la finesse des fillers calcaires peut affecter considérablement sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pate de ciment. Le même auteur a conclu que la viscosité des pâtes autoplaçantes diminue légèrement avec l'augmentation de la finesse des additions calcaires, ce qui signifie une diminution du seuil de cisaillement des pâtes de ciments.

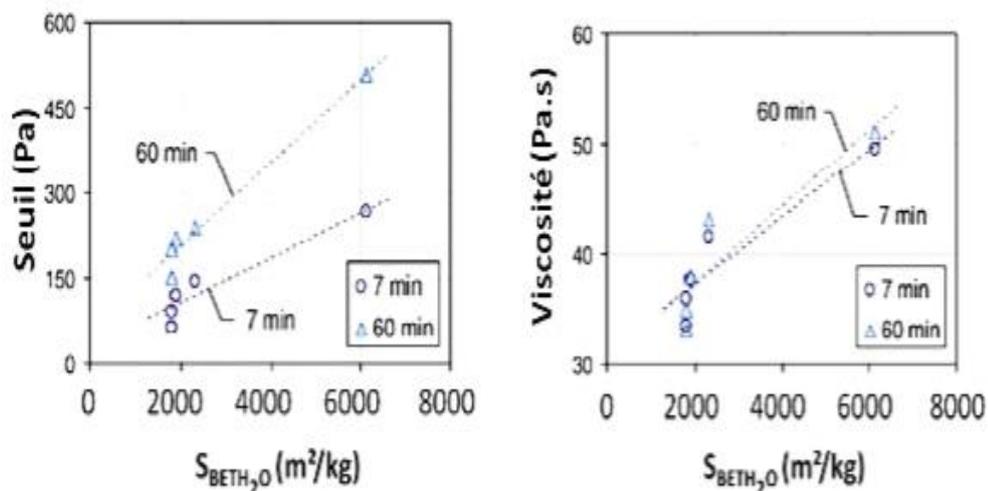


Figure1. 3: Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique du fillers calcaires [29].

Park et al. [1] ont observé une diminution de la viscosité plastique des pâtes contenant du laitier de hauts fourneaux de surface spécifique élevée (5962 cm²/g) par rapport à celle du ciment (3290 cm²/g). Cela a été expliqué par l'apparition de petites particules sphériques de laitier (taille moyenne 8,07 µm) entre de grosses particules de ciment (taille moyenne 18,07 µm). Plusieurs chercheurs [2,17], ont constaté que les paramètres rhéologiques, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique peuvent augmenter ou diminuer avec un additif de laitier, cela dépend de la relation entre la surface spécifique du ciment et du laitier.

En étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Bessa [2] trouvait que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers non adjuvants dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite (Figure 1.4).

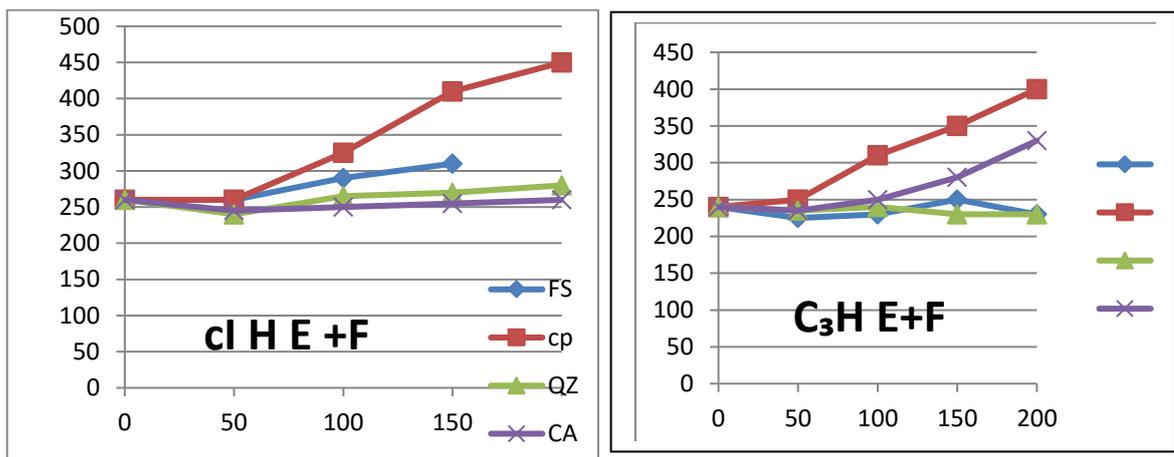


Figure 1.4 : Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvants en fonction du dosage en additions minérales (CA (Calcite), CP (Calcite Précipitée), QZ (Quartz), SF (Fumée de Silice)) [2].

1.6.4 Effet de la distribution granulaire

L'incorporation des ajouts minéraux entraîne une modification de la distribution granulaire, l'apparition de nouveaux sites de nucléation et une nouvelle activité des surfaces des grains ce qui amène à améliorer l'ouvrabilité du béton. La Figure (1.5)

montre que l'amélioration de la maniabilité des mortiers et /ou des bétons varie en fonction de la quantité de fumée de silice incorporée qui modifie la distribution granulaire du mélange [2].

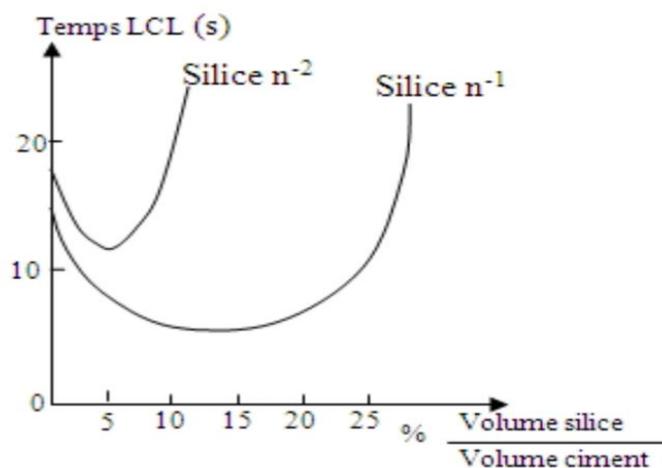


Figure 1.5: Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier [2].

Tsivilis et al. [30], ajoutent que la distribution des tailles des particules du ciment au calcaire dépend du dosage en calcaire et de la finesse des grains qui offre une ouvrabilité satisfaisante. Comparé au ciment portland, le clinker à une meilleure adhérence au calcaire et réduit la demande en eau. A chaque rapport E/C correspond un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire [23]. Les auteurs expliquent que les particules fines du filler calcaire améliorent l'arrangement total des particules dans la matrice, comblant les vides disponibles entre les particules du mortier et augmentent la compacité du mélange [23]. De ce fait la quantité d'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité.

Bonavetti et al. [31], montrent que l'augmentation du dosage en filler calcaire réduit la capacité de la pâte fraîche au ressuage. Cette réduction est due à la grande surface spécifique du mélange et à la fermeture des pores capillaires par les fillers qui bloquent le mouvement de l'eau dans la pâte. La figure 2.18 montre la distribution des tailles des particules en fonction du dosage en calcaire. Il est clair que le contenu en calcaire est de

24.8 % pour les fractions de taille inférieure à 4 μ m et celui du clinker est de 75.2 %, d'autre part les particules de taille supérieure à 56 μ m ne contiennent que 12% du calcaire [30].

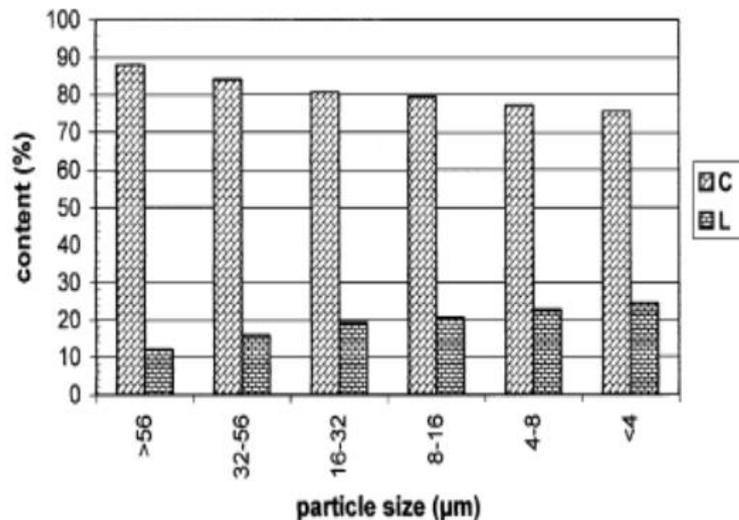


Figure1. 6 : Dosage du calcaire (L) et de clinker (C) dans les fractions de différentes tailles après leur broyage (finesse du mélange:3890 cm²/g, dosage en calcaire 20%) [30].

1.7 Effet des additions minérales sur les mortiers et les bétons a l'état frais

1.7.1 Teneur en air du béton frais

L'introduction de la pouzzolane dans béton modifie la valeur de la teneur en air occlus (Figure 1.7). Cette modification est probablement due à la différence de finesse entre le ciment et la pouzzolane [32].

D'autre étude montre que l'addition de cendre volante diminue le volume de l'air occlus avec un optimum de 10% de cendre volante [33]. Les particules de la cendre volant remplissent les vides entre les grains de ciment ayant pour résultat la microstructure imperméable du mortier. A cet effet, la cendre volante est l'un des facteurs important pour le développement des mortiers denses.

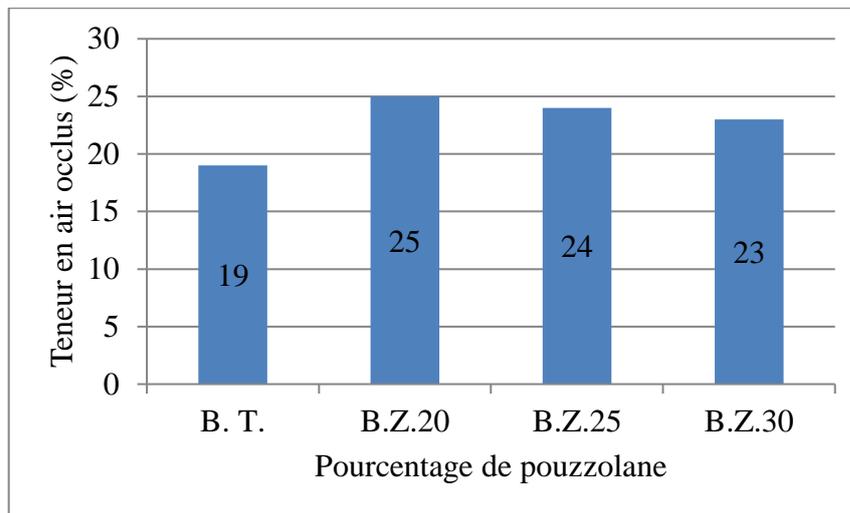


Figure 1.7: Teneur en air occlus [32].

1.7.2 Densité

Plusieurs chercheurs montre que la petite taille des particules du fillers calcaires combler les vides interstitiel et augmenter la densité [34,35].

Amouri et Houari [36], ont montrent que la masse volumique diminuer avec le taux de remplacement, sauf pour les mortiers avec cendre volantes, qui a un pourcentage optimale de 10% substitution (Figure 1.8). L'observation optimale du mortier à base de cendre volante reflète nécessairement meilleure compacité pour les mélanges. Cela peut être justifié par la contribution de ces particules à densifier la pâte qui conduite à un empilement plus compact des grains solides et modification de la microstructure en réduisant les pores de la matrice cimentaire [36].

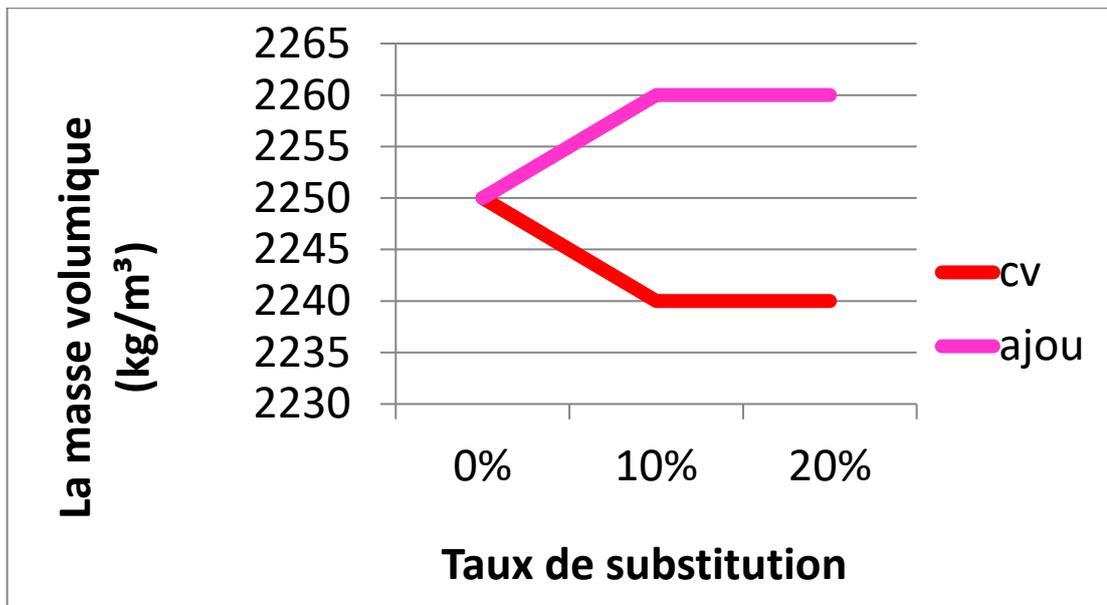


Figure1. 8: Variation de la masse volumique en fonction de taux des additions [36].

1.7.3 Rhéologie

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement d'une mixture. Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement, viscosité plastique) qui permettent de tracer des courbes d'écoulement caractéristiques des différents types de mélanges. L'étude des phénomènes physiques mis en jeu, dans l'étude des écoulements des mortiers et bétons revêt une importance particulière dans le domaine de la rhéologie [2].

1.7.3.1 Paramètres rhéologiques

a. Viscosité

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumise à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (Figure1.9), en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur

celle de la couche supérieure, est appelé viscosité μ [2]. Donc, la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise son comportement rhéologique.

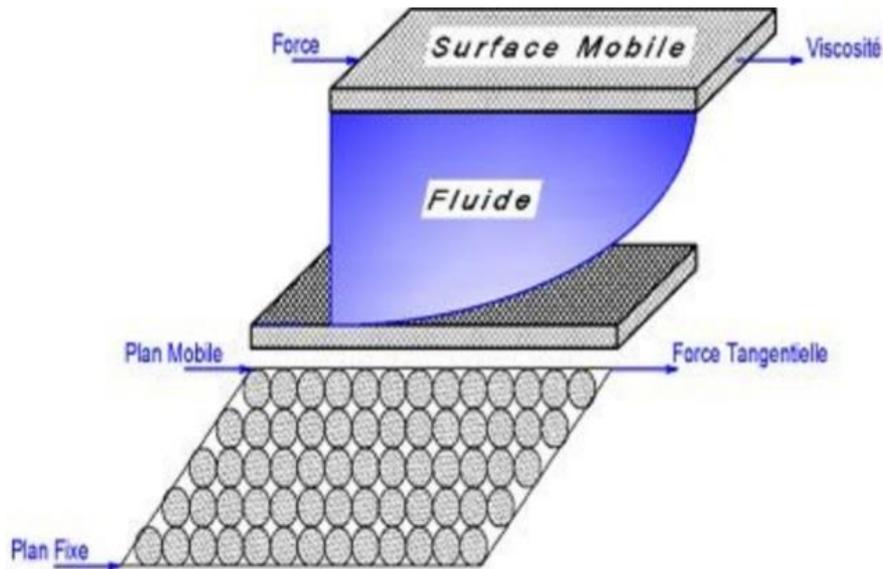


Figure1.9: Schéma glissement des couches [2].

b. Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ [2], qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche [37]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide [2] :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad 1.1$$

Où:

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisillée.

c. Vitesse de cisaillement

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles, emprisonné entre deux plans parallèles de surface S (séparés d'une distance dz). Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 (figure.1.10) [2].

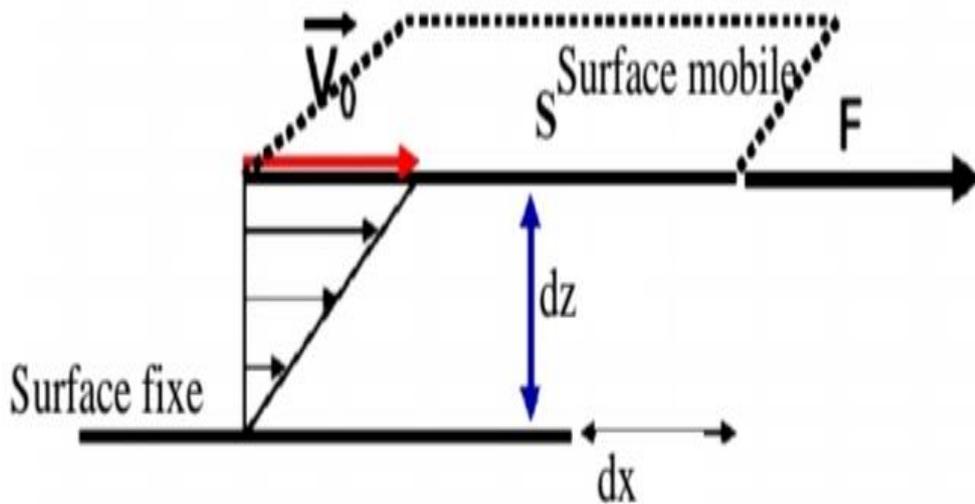


Figure1.10: Schéma de vitesse de cisaillement [2].

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole γ suivant la relation :

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad 1.2$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement.

Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [2].

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad 1.3$$

d. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (figure1.11) [2].

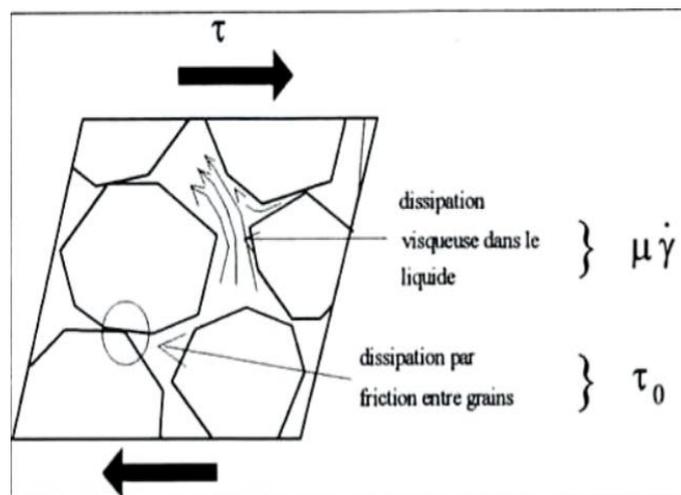


Figure1.11 : Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [2].

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide.

Zhang et Han [33], étudient l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et constatent que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée tandis que la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition. Lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice, cendres volantes ou calcaires est inférieur à 15%, la viscosité de la pâte est remarquablement réduite. Ceci n'a pas été noté pour les additions de laitier.

L'incorporation de fumée de silice rend parfois le béton collant, bien que les avis soient partagés sur cet aspect. Pour certains auteurs [38, 39, 40], elle augmente le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges. En revanche, Carlswald et *al.* [41], constatent que la fumée de silice ne modifie pas la viscosité par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence. Dans le même sens, Ferraris et *al.* [39], montrent que l'utilisation de la fumée de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou bien pour des bétons. Selon les résultats d'Aitcin et *al.* [42], la viscosité augmente rapidement en fonction du dosage en fumée de silice sans l'utilisation de superplastifiant. Park et *al.* [38] ont montré, en étudiant les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additions minérales en utilisant le rhéomètre, que dans les mélanges ciment-additions de fumée de silice, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition (figure 1.12).

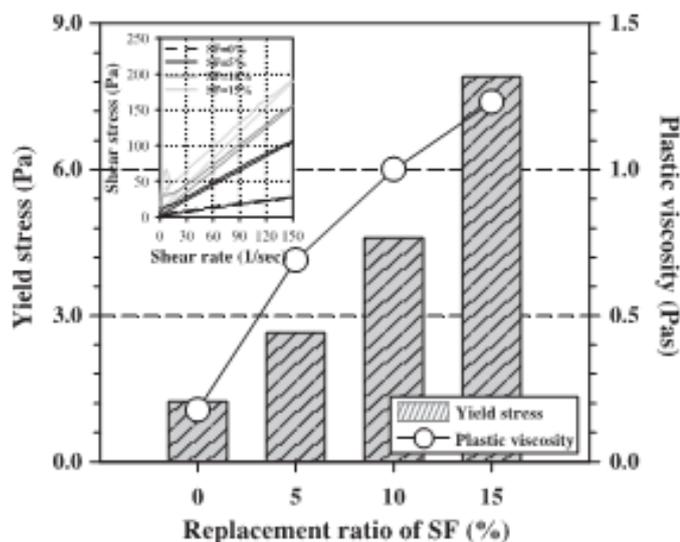


Figure 1.12 : Effets des taux de remplacement en SF sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [38].

Le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire [43,44]. Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à des dosages élevés dans la formulation des bétons (BAP et BHP). Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C [33,23].

1.8 Propriété des mortiers à la base des additions minérales à l'état durci

1.8.1 Les résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles pour un béton car elles généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elles sont directement reliées à la structure de la pâte de ciment hydraté.

a. Résistance à la compression

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [1]. Les particules fines d'un filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite (figure 1.13) [45].

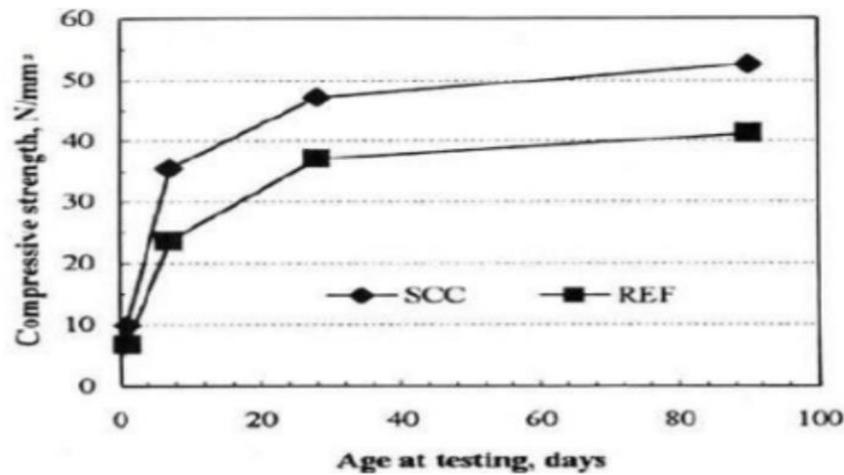


Figure 1.13: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP à base d'addition filler calcaire et d'un BOV correspondant [45].

Menendez et al. [46], ont étudié le développement de la résistance des liants ternaires contenant des fillers calcaires et du laitier. Ils ont trouvé que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire. Les fillers calcaires améliorent la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme. Ils ont montré que le mélange de ciment ternaire offre un avantage par rapport aux ciments binaires et aux ciments Portland sans ajouts. Ces auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment Portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire.

Belas belaribi [32], a constaté que une diminution de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation de taux de substitution de la pouzzolane naturelle. Le pourcentage de 20 % de pouzzolane donne à long terme des performances mécaniques pratiquement analogues à celles du béton témoin.

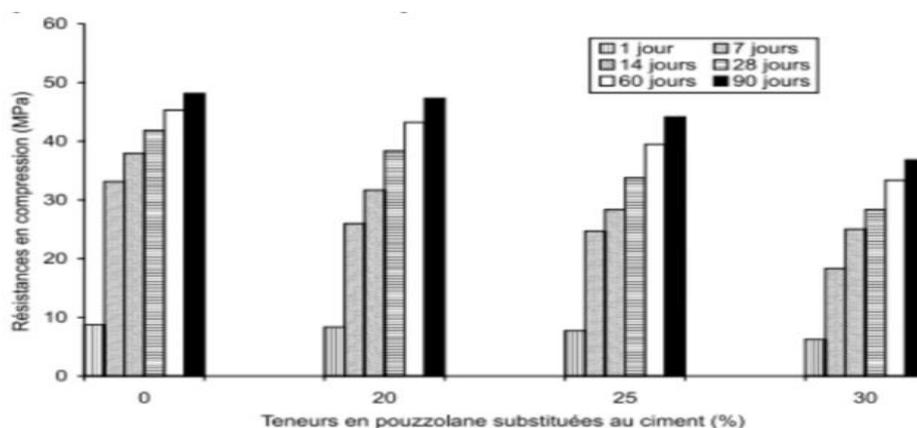


Figure 1.14: Comparaison des évolutions des résistances en compression [32].

La cendre volante a un effet positif sur la résistance à la compression des BAP [47]. Son effet le plus notable est d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolannique. D'après Felekoglu et al. [48], l'incorporation de cendres volantes (classes C et F) dans les BAP entraîne une réaction entre la phase vitreuse des cendres et la portlandite (CH) produite par l'hydratation du ciment, ce qui conduit à la formation de gel de CSH, et donc l'augmentation de la résistance en compression, surtout à long terme avec le développement de la réaction pouzzolannique des cendres volantes. Contrairement aux cendres volantes de classe C, celles de classe F réduisent le développement de la résistance au jeune âge du béton mais augmente sa durabilité [49].

Felekoglu et al. [50], ont étudié l'effet des différentes additions minérales (filler calcaire et cendre volante) sur la résistance à la compression des BAP. Ils ont trouvé que les BAP à base de cendres volantes montrent des résistances plus élevées que celles des BAP à base de fillers calcaires.

Obla et al. [51] ont étudié des BAP à base de cendres volantes très fines (avec une granulométrie moyenne de 3 micromètres, et 90% des matériaux plus petits que 7 μm). Selon ces auteurs, cette taille plus fine conduit à une réaction accrue et une grande augmentation de la résistance à la compression.

Patel et al. [52], Christensen et Ong [53] et Khatib [54] ont remarqué une amélioration significative de la résistance à la compression dans le cas de l'utilisation d'un volume élevé de cendres volantes.

D'après Khatib et al. [55], la résistance mécanique en compression de mortiers incorporant différents taux de métakaolins (0, 5, 11 et 15 %) est augmentée par rapport à un mortier avec seulement du ciment. Pour ces mortiers, le taux optimal de substitution est compris entre 10 et 20% [57]. Pour des taux supérieurs, les auteurs rapportent que les performances mécaniques diminuent vers des valeurs inférieures à celles des matériaux sans métakaolin.

La cinétique de réaction des bétons avec le métakaolin est de toute évidence différente de celle des bétons témoins. Les bétons témoins avec 100% de CEMI voient leurs résistances augmenter encore entre 7 et 90 jours. Au-delà de cette échéance les résistances semblent maintenues mais elles n'augmentent plus. En ce qui concerne les mélanges avec 25% de métakaolin, Rackel [56], a observé une augmentation plus importante des résistances par

rapport au témoin après 7 jours, et il a également noté qu'après 1 an les résistances n'ont toujours pas cessé d'augmenter.

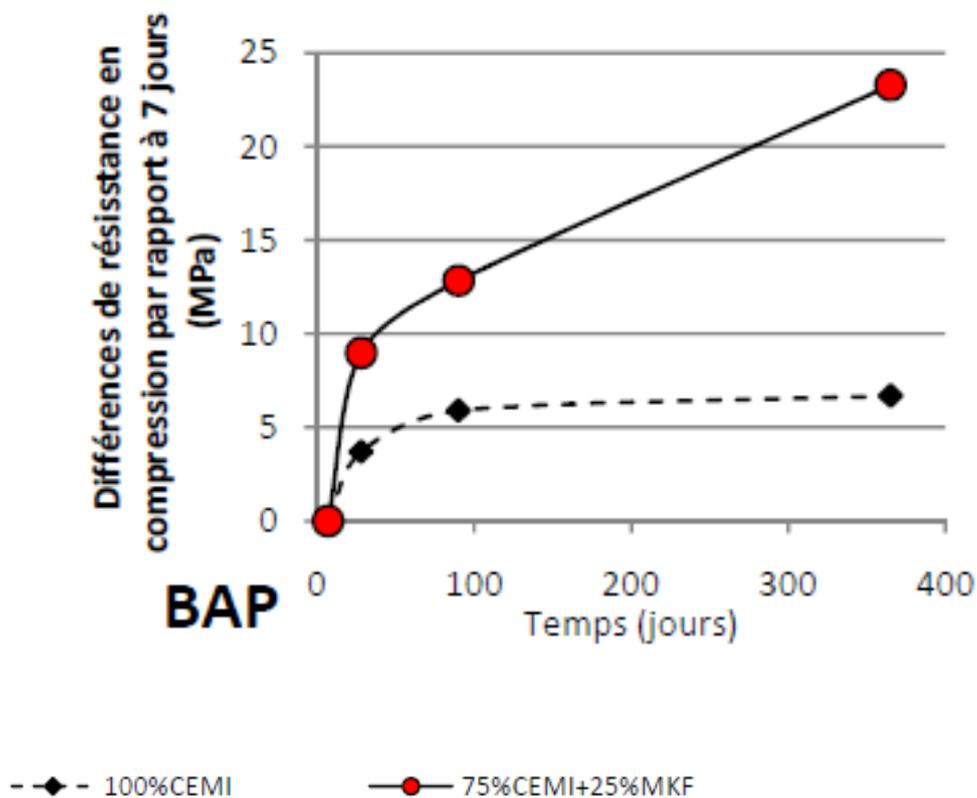


Figure 1.15: Evolution des écarts de résistances en compression des BAP entre 7 jours et les autres échéances en fonction du temps [56].

b. Résistance à la traction

La résistance à la traction est inversement proportionnelle au taux de substitution du ciment par des fillers calcaire [57,58]. Est une en moyenne de 8 à 15% moins que celle des bétons ordinaires.

Abib [59], a constaté que, l'évolution de la résistance à la traction d'un BAP (10% de fumée de silice, 2,5% du superplastifiant) est plus rapide que celle d'un béton ordinaire.

Boukendakdji [60], a constaté que la résistance à la traction diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier mais cette diminution est moins importante à 90.

Khatib et Hibbert [61], ont étudié la résistance à la flexion des bétons contenant des ciments au laitier sans ou avec 10% de métakaolin. A 90 jours, le béton avec 60% de laitier a développé une résistance à la flexion supérieure à celle du béton témoin. Cette supériorité était plus importante pour les bétons contenant en plus 10% de métakaolin (Figure 1.16).

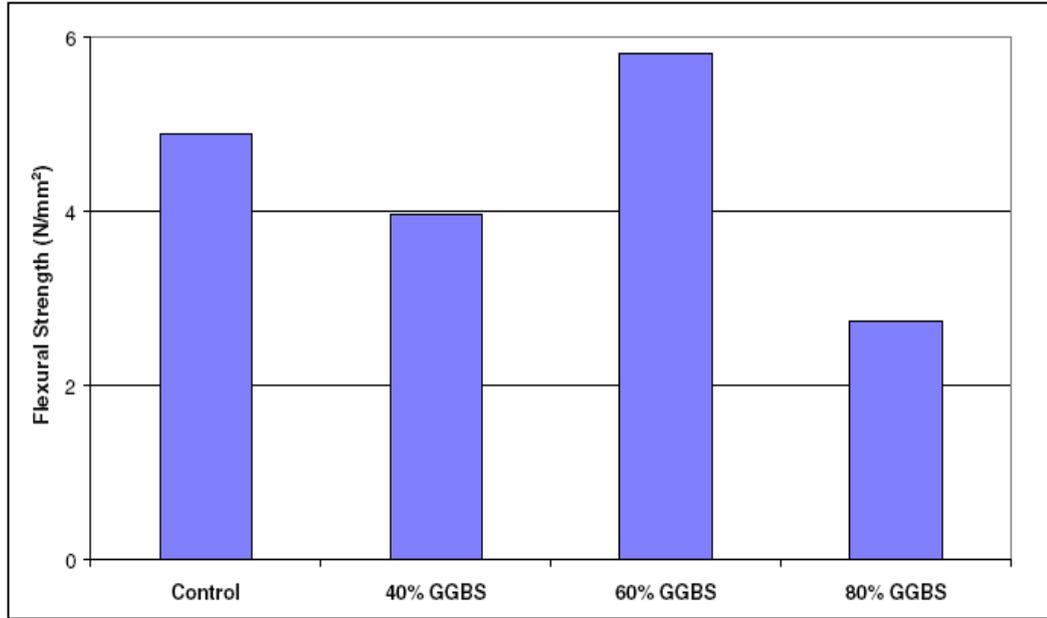


Figure 1.16 : Influence du laitier sur la résistance en flexion des bétons [61].

La résistance à la traction des BAP incorporant des fillers de calcaire est d'environ 15% plus faible que celle des BV. En plus, cette résistance ne suit pas le même chemin dans les deux types du béton, à 7 jours la différence entre les deux est faible, dans une moyenne de 3%, et à tendance de disparaître lorsque le dosage des fines de calcaire dans les BAP est élevé. A long terme, 28 et 90 jours d'âge, la différence est de l'ordre de 15% (Figure 1.17) [62].

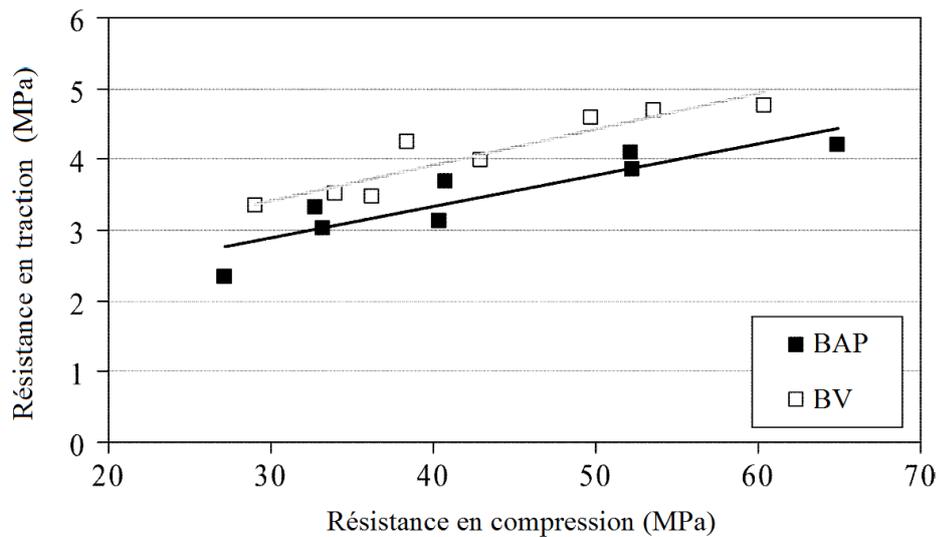


Figure 1.17: Résistance en traction à 28 et 90 jours [62].

1.8.3 Module d'élasticité

Douaïssia et Merzoud [63], ont montre que le module d'élasticité augment pour les taux de 20% à 30% de laitier et 10% pour la pouzzolane et 10% à 20 % pour la fumée silice, puis commencer à diminuer proportionnellement au delà de ces taux de substitution (figure 1.18).

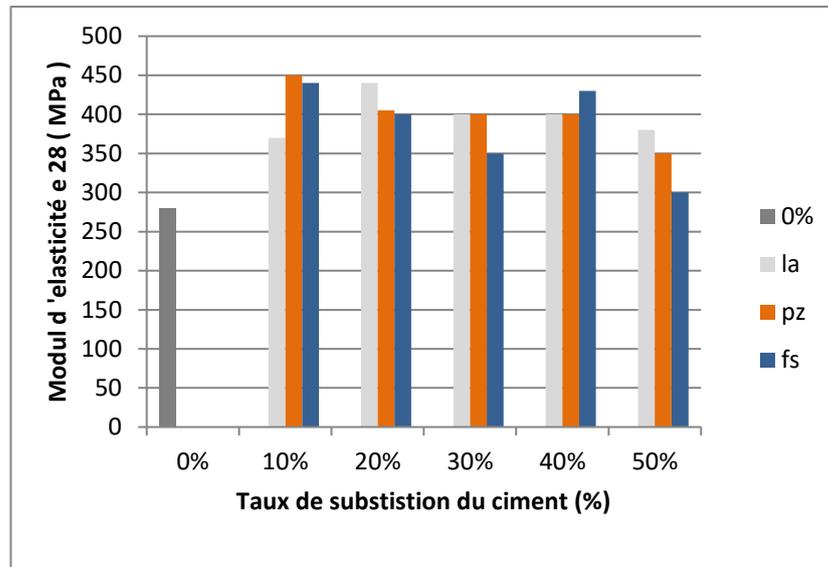


Figure1. 18 : Variations de la variation du module d'élasticité du mortier en fonction de taux de substitution du ciment pour les additions minérale [63].

1.8.4 Retrait

Le retrait est caractérisé par une déformation du béton (diminution du volume) sans aucun chargement extérieur. Il se décompose en quatre formes distinctes : le retrait thermique, le retrait endogène, le retrait de dessiccation et le retrait plastique.

La présence du filler calcaire augmentera le retrait au cours des 24 premières heures. Il augmente également avec la finesse du filler sauf dans le cas d'une granulométrie optimisée. Pour plus de 24 heures, aucune différence pour le retrait par séchage [64].

Les ajouts cimentaires ont un effet considérable sur le retrait endogène. Ayed et al. [65] ont montré qu'à 7 jour d'âge, la déformation endogène des BAP à base de fines calcaires (BAP FC) et BAP à base de 40% pouzzolane naturelle (BAP PN) présente un écart très important d'environ de 35% en faveur des BAP PN. À 28 jours, l'écart entre BAP FC et BAP PN est

presque nul. A long terme, 400 jours, le retrait endogène du BAP PN présente un retrait endogène plus grand de 32% par rapport au BAP FC.

Lee et al. [66], ont présenté des résultats expérimentaux sur le retrait endogène du béton avec le dosage de E/C allant de 0,27 à 0,42 et le pourcentage de laitier de haut fourneau dans la fourchette de 0% à 50% en masse de ciment. Le BAP fabriqué avec le laitier a montré plus grand retrait endogène que le béton ordinaire sans laitier. L'augmentation de retrait endogène varié en fonction du dosage de laitier pour le même E/C .

Güneyisi et al. [67], ont montré que la substitution du ciment par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin réduit le retrait de séchage de béton alors que l'utilisation de la fumée de silice avec le ciment augmente graduellement le retrait. En outre, plus le niveau de substitution du ciment par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin est grand plus la valeur de retrait est faible. L'effet négatif de la fumée de silice sur le retrait de séchage des bétons a été éliminé dans le cas d'utilisation des liants tertiaires et quaternaires.

1.9 Durabilité des mortiers et bétons à la base des additions minérales

Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont : l'eau, pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différentes façons, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment hydraté. La durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquides et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton sous l'action d'un gradient de pression c'est ce que l'on appelle communément la perméabilité du béton.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant.

1.9.1 Porosité

La porosité est définie comme étant le volume total des vides contenus dans le béton pour 1 m^3 de matériau. Cette porosité augmente avec l'augmentation du rapport E/C et est en général comprise entre 11 et 18%.

Moro et al. [68], montrent que la porosité de béton augmente de 10% jusqu'à 23 % avec l'augmentation de la teneur en calcaire pour les formulations avec 30% à 72% de filler calcaire par rapport au béton de référence (100% ciment). Par contre, d'autre étude [69] montre pour un béton contenant 45% de filler calcaire, la porosité accessible à l'eau diminuée à un ordre de 10%.

Jiang [70], a montré que la porosité totale des mortiers à base de ciments au laitier est plus élevée que celle des mortiers fabriqués avec un ciment sans ajout. Cependant, il a trouvé une répartition de la taille des pores plus étroite et plus fine dans les mortiers à base de ciments au laitier. Selon ce chercheur, l'hydratation du laitier au jeune âge est très lente comparée à celle du clinker, les hydrates formés sont principalement des sulfo-aluminates primaires qui se présentent en aiguilles dispersées, laissant des vides accessibles. A long terme, le laitier est activé par les $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provenant de l'hydratation du clinker et forme le gel de CSH qui se longe dans la structure formée par les aiguilles d'ettringite. Il en dérive une diminution du volume des pores capillaires, ainsi qu'une structure de pore plus fine que celle existante dans le ciment portland ordinaire.

Bouikni et al. [71], ont analysé la structure poreuse des bétons avec 50 et 65% de laitier. Ils ont constaté une augmentation de la porosité totale avec l'augmentation du taux de laitier. Cette augmentation est plus prononcée pour les bétons au laitier conservés à l'air libre aux conditions du laboratoire.

Le remplacement du ciment par 50% de cendre volantes avec un rapport E/C égale à 0,40 conduit à une porosité équivalente comparativement au béton contenant 100% de ciment CEM I [72].

1.9.2 Perméabilité à l'eau

La perméabilité de la pâte de ciment hydraté durci est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de sa porosité, mais dépend aussi de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et de la continuité des pores.

Guneyisi et Gesoglu [73], ont montré que l'utilisation de laitier a diminué la profondeur de pénétration de l'eau de 26 mm (béton de référence) à 14 mm. Il n'y avait pas de variation significative entre la profondeur de pénétration de l'eau des bétons contenant différents taux de remplacement du laitier. La profondeur de pénétration de l'eau est de 15 mm, 13 mm et 14 mm a été surveillée en utilisant respectivement 20%, 40% et 60% de laitier.

1.9.3 Diffusion des ions chlore.

Les ions chlorures constituent un facteur important de risque pour le béton armé : ils pénètrent, en effet, dans le béton et peuvent provoquer la corrosion des armatures. Ces chlorures, peuvent provenir de diverses sources (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles et des granulats contaminés ou d'adjuvants contenant des chlorures).

Plusieurs auteurs montrent que les pâtes aux laitier ou aux cendre volantes présentant un coefficient de diffusion plus faible que les pâtes sans ajouts minéraux, cela peut être dû à une modification structurelle des pâtes par la formation de C-S-H, CAH et CAFH résultant en une microstructure beaucoup mieux [74, 75, 76,77].

Hadj sadok [78], a montré qu'après 90 jours de cure humide, 30% de laitier réduit le temps de passage des chlorures, mais en comparaison avec le mortier de référence, on peut voir qu'il n'y a pas une grande différence dans les coefficients de diffusion. Toutefois, 50% de laitier conduit à une meilleure perméabilité aux ions chlore, avec un temps de passage important et un faible taux de diffusion. L'augmentation de la période de cure initiale, conduit à une diminution de la diffusion dans les mortiers au laitier.

Dans le même contexte, Yahiaoui et al. [79], ont étudié les propriétés de durabilité du BAP préparé par 15% et 25% de laitier substitué par ciment en poids. Les auteurs ont observé une tendance à la réduction de la pénétration de l'ion chlorure avec l'augmentation de laitier, et les échantillons exposés à l'air libre présentent la plus forte pénétration d'ions chlorure.

Duan et al. [80], ont rapporté que le coefficient de diffusion des ions chlorure le plus faible pour les mélanges de béton contenant du laitier et du métakaolin pour toutes les périodes de durcissement. De plus, pour un taux de remplacement de 10% de MK et 10% de laitier

dans le béton montre une résistance significative contre la pénétration des ions de chlorure (Figure 1.19).

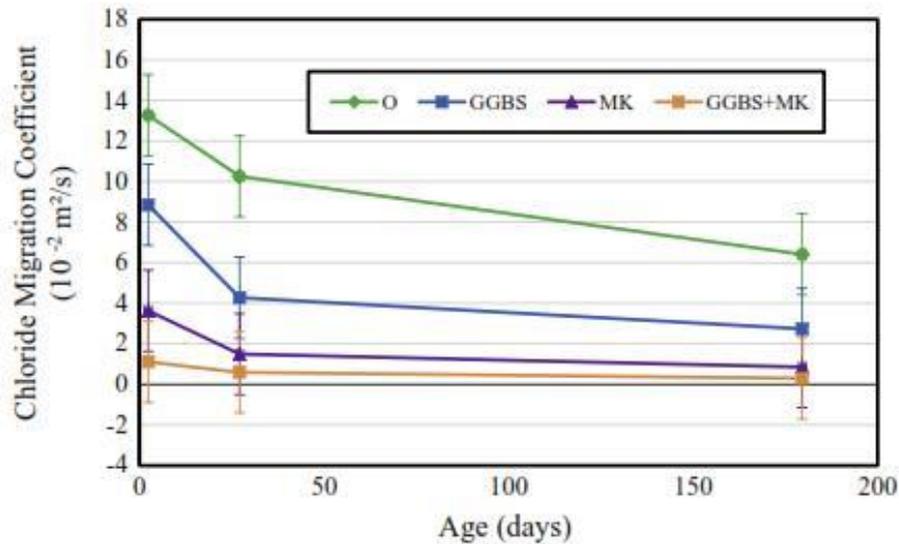


Figure 1.19: Effet de laitier et métakaolin sur le coefficient de diffusion des ions chlorures [80].

La présence de pouzzolane dans le béton diminué la diffusion des ions chlorure, cela est dû à la formation d'un gel de deuxième génération résultant de la réaction de la pouzzolane avec l'alumine et la silice et les produits d'hydratation de ciment. Ce gel contribue à réduire la perméabilité du béton, de la taille des pores et la teneur en portlandite [80].

1.9.4 Résistance aux sulfates

L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment) [81].

Rahmani et Ramzaniyanpour [82], ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque de l'acide sulfurique. D'après six mois d'immersion, les résultats montrent une

perte de masse de 62,6 % pour le béton à base de filler (C2), 56,6 % pour l'addition binaire (filler + fumée de silice) (C3), 30,1% pour le filler + pouzzolane naturelle (C4) et de 40,2 % pour l'addition binaire (filler + fines de pierre ponce) (C5). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire (filler + pouzzolane naturelle) (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique (Figure I.20).

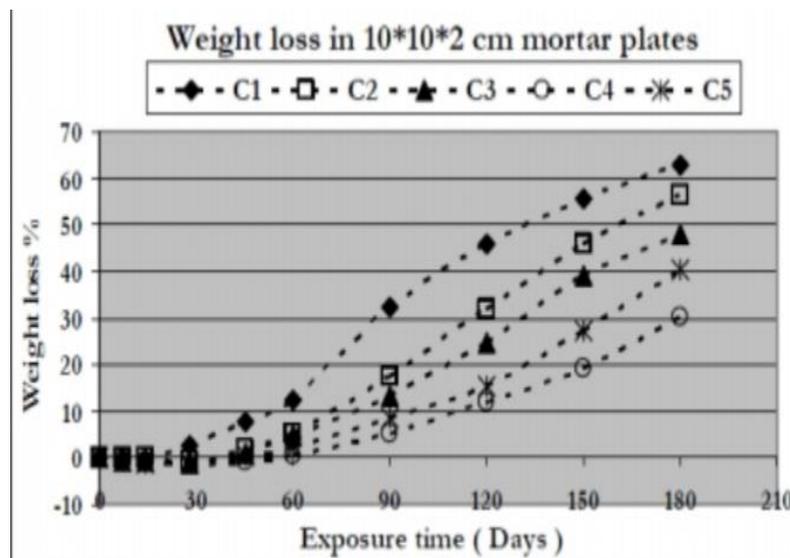


Figure 1.20: Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [82].

Ghrici et al. [83], ont constaté que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d'acide sulfurique que celle avec de l'addition pouzzolane naturelle et l'addition binaire pouzzolane naturelle + filler calcaire. Cependant dans la solution d'acide chlorhydrique le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse.

Selon Tamimi [84], la substitution de ciment par 50% de cendre volante est très bénéfique en termes de résistance des bétons à haute performance vis-à-vis de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. Avec 60 %, l'effet positif de cendre volante sera réduit et la perte de masse augmente.

Salhi [85], montre que laitier d'El hadjar améliore la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques des sulfates. Cette amélioration se traduit par une faible intensité d'ettringite. L'expansion des mortiers dans une solution contenant 5% de $MgSO_4$ indique que la

substitution de 30% de laitier dans les ciments à base de calcaire donne une meilleure résistance aux sulfates. Par contre dans celle de 5% de Na_2SO_4 , la meilleure résistance est obtenue avec l'incorporation de 40% du laitier [21].

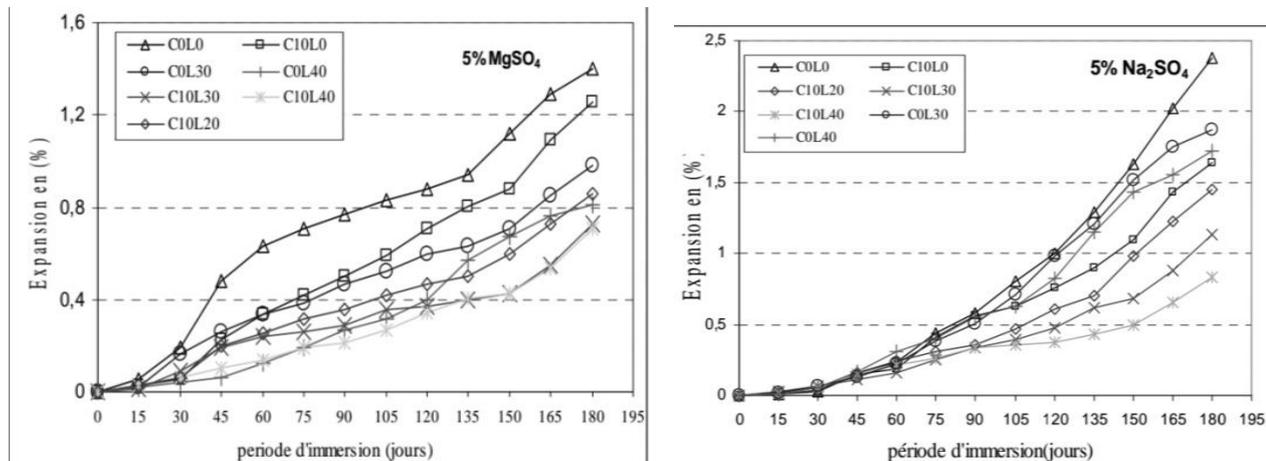


Figure 1.21 : Expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion [21].

1.10 Conclusion

D'après la recherche bibliographique la présence des ajouts minéraux dans les mortiers ou les bétons contribuent à l'amélioration des propriétés rhéologiques ou mécaniques ou de la durabilité.

- La viscosité varie sensiblement avec chaque ajout et dépend de ses propriétés. La viscosité des mortiers diminue avec la présence de cendre volante et fillier de calcaire et la fumée de silice.

- L'incorporation des additions minérales influence la résistance à la compression. Les fillers calcaires, les cendres volantes, le laitier et le métakaolin ont un effet positif sur la résistance à la compression par contre l'utilisation de pouzzolane diminue la résistance à la compression.

- L'utilisation des ajouts minéraux constate une amélioration significative de la durabilité. Le coefficient de diffusion des ions chlorures à la présence de laitier, les cendres volantes et métakaolin.

- Le laitier de haut fourneau et les fillers calcaires améliorent la durabilité des mortiers et des bétons vis-à-vis des attaques des sulfates.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes de mortier à base des ajouts à savoir le calcaire et pouzzolane naturelle faites au laboratoire de Géo matériaux et génie civil au niveau de l'Université de Blida 1 et au laboratoire de la cimenterie de Meftah.

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés

2.2.1 Sable normalisée

Le sable normalisé est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité; Il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1350 ± 5 g.

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 et ISO679 :2009[86].

Tableau 2.1 : Composition granulométrique du sable normalisé [86].

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0,08	99 ± 1
0,16	87 ± 5
0,50	67 ± 5
1,00	33 ± 5
1,60	7 ± 5
2,00	0

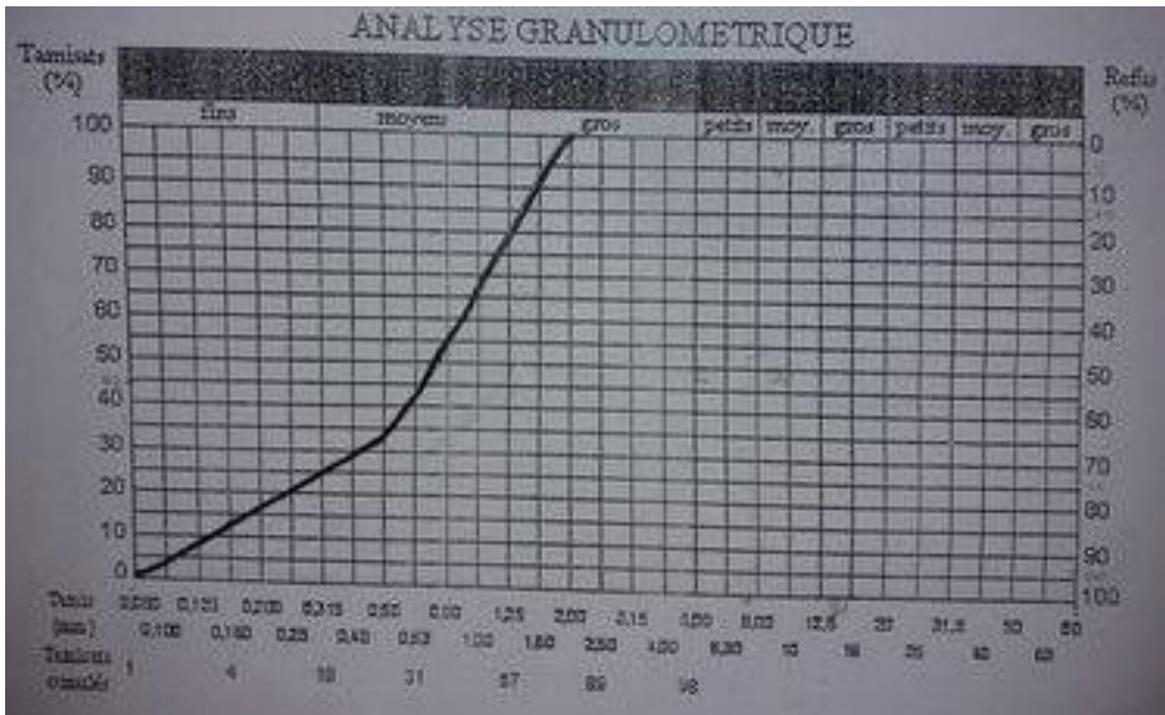


Figure 1 : Composition granulométrique du sable normalisé [86].

2.2.2 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé lors du malaxage du mortier c'est l'eau distillée.

2.3 Caractéristiques chimiques et minéralogiques des ajouts

Pour déterminer la composition chimique des ajouts cimentaires de notre étude, on a utilisé la méthode spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour *X-ray fluorescence*). C'est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X.

Avant d'utiliser le calcaire, la pouzzolane et le gypse dans l'analyse chimique, ils doivent être séché calcaire à 105 C° et le gypse à 45C°) et broyer.



Figure 2.2 : Concassage des matières premières clinker, calcaire, gypse.



Figure 2.3 : Les échantillons de matières premières.



Figure 2. 4 : Séchages de matières premières (étuve).

2.3.1 Préparation d'une pastille

Peser 10 g de poussière (clinker, calcaire, gypse, pouzzolane.. ect), et ajouter 0,6 g de cellulose et homogénéiser le mélange (pour bien compacter la pastille et avoir une couche superficielle lisse et bien homogène pour analyse. Le mélange est posée sure le disque et placé dans un broyeur a 700 tr/min pendant 60 s, après prendre l'échantillon broyé sur une feuille de papier propre et sec, le numéro du programme est choisi, et l'anneau en acier (37 mm de diamètre) est placée dans la machine "presse hydraulique». Verser avec précaution la matière dans l'anneau et uniformiser la surface de la matière, puis la porte de la presse est fermée et presser sur le bouton (Vert : bouton de démarrage). Prendre l'anneau avec précaution et la face inférieure est nettoyée avec un aspirateur. Sur la face inférieure, l'échantillon est identifié à l'aide d'un crayon, puis il est installé dans le XRF et analysé.



Figure 2.5 (A) :Peser de cellulose et de la poussière (clinker, calcaire, gypse, pouzzolane).



Figure 2.5 (B) : Peser de cellulose et de la poussière (clinker, calcaire, gypse, pouzzolane).



Figure 2.6 : Broyeur de (clinker, calcaire, gypse, pouzzolane).



Figure 2.7 : Prendre l'échantillon broyé sur une feuille de papier propre et sec.



Figure 2.8 : Machine de préparation des pastilles.



Figure 2.9 : Pastille.



Figure 2.10 : Appareil XRF.

2.3.2 La chaux libre

Peser 1g d'échantillon clinker finement broyé ou ciment dans un Ellen Meyer de 250 ml, préalablement lavé et sécher et ajouté 500 ml d'éthylène glycol et la solution est placée dans un bain marie température entre 65 à 70 C°. Agitation automatique est activée pendant 30 min, le papier filtre est placé sur le Buchner et la solution est filtrée de 70 mm de diamètre, le précipité est lavée 3 fois avec au total 30 ml d'éthylène glycol chauffé (65 à 70), 05 gouttes est ajoutées de vert de Bromocrésol coloration bleu est ajoutées au filtrat, puis titrer avec une solution de Hcl à 0,1 N jusqu'au virage du bleu au jaune verdâtre la valeur avec laquelle la couleur change est comparée aux résultats du tableau ci – dessous.

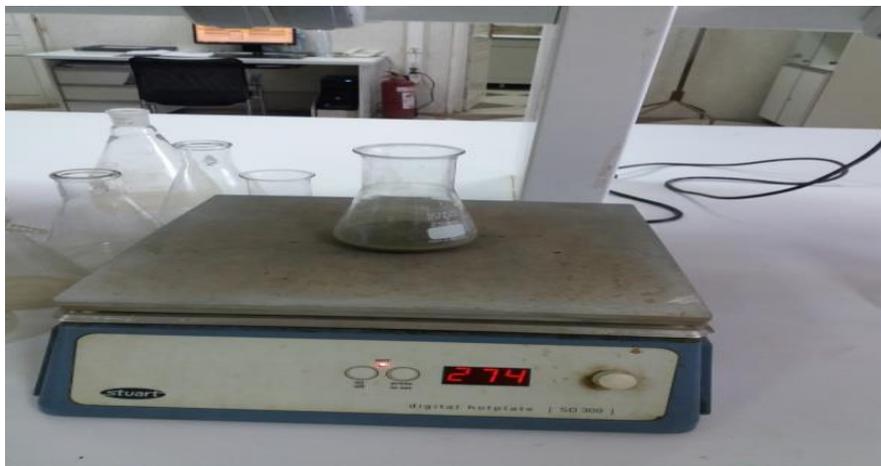


Figure 2.11 (A) : Solution de clinker avec d'éthylène glycol.

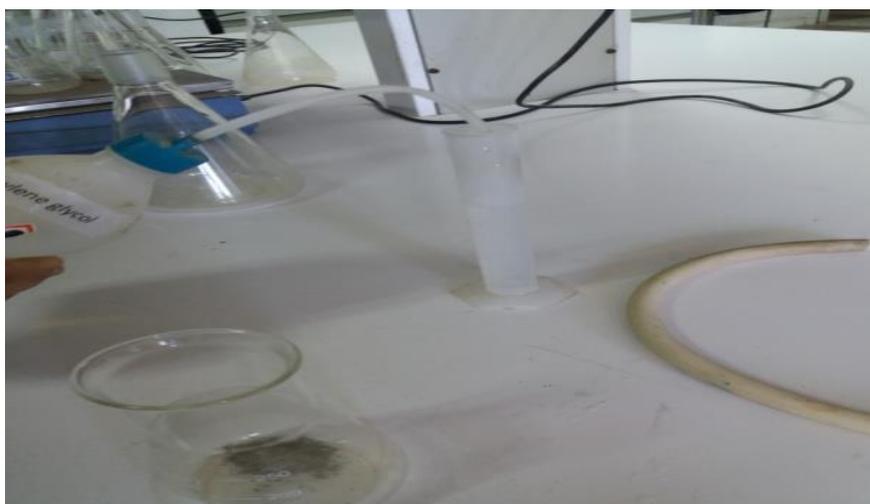


Figure 2.11 (B) : Solution de clinker avec d'éthylène glycol.



Figure 2.11(C) : Solution de clinker avec d'éthylène glycol.



Figure 2.12 : Titrer avec une solution de HCl à 0.1 N jusqu'au virage du bleu au jaune verdâtre.

SCHE

Date: 18/03/2020

Détermination de la chaux libre

mg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	
0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02
0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04	0.2	0.04
0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06	0.3	0.06
0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08	0.4	0.08
0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10	0.5	0.10
0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12	0.6	0.12
0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14	0.7	0.14
0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16	0.8	0.16
0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18	0.9	0.18
1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20	1	0.20
1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22	1.1	0.22
1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24	1.2	0.24
1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26	1.3	0.26
1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28	1.4	0.28
1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30	1.5	0.30
1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32	1.6	0.32
1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34	1.7	0.34
1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36	1.8	0.36
1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38	1.9	0.38
2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40	2	0.40

Figure 2.13: Tableau pour déterminer la valeur du chou libre en fonction de HCl.

2.3.3 La perte au feu (PAF)

La perte au feu est l'évaporation de CO₂, l'eau et de matières organiques à haute température (950°C), l'essai consiste à Peser exactement 2g d'échantillon de matière (clinker, gypse, calcaire, pouzzolaneect),Plaçant l'échantillon dans un creuset en platine propre puis dépose dans le four a moufle à 950°C Pendant 30 min pour le clinker et 60 min pour le calcaire et le gypse, l'échantillon est soigneusement retiré du four après, avoir placé les creusets dans un dessiccateur qui contient un gel de silice pendant 10 min, puis l'échantillon est pesé.

$$\text{PAF (\%)} = (m_3 - m_2) \times 100 / (m_2 - m_1)$$

2.1

m₁ : Masse creuset,

m₂ : Masse de creuset + produit,

m₃ : Masse de creuset + produit après calcination.

On trouve :

PAF de clinker = 1,18%

PAF de calcaire = 42,5%

PAF de gypse = 21,73%



Figure 2.14 : Peser exactement 2 g d'échantillon de matière (clinker, gypse, calcaire).

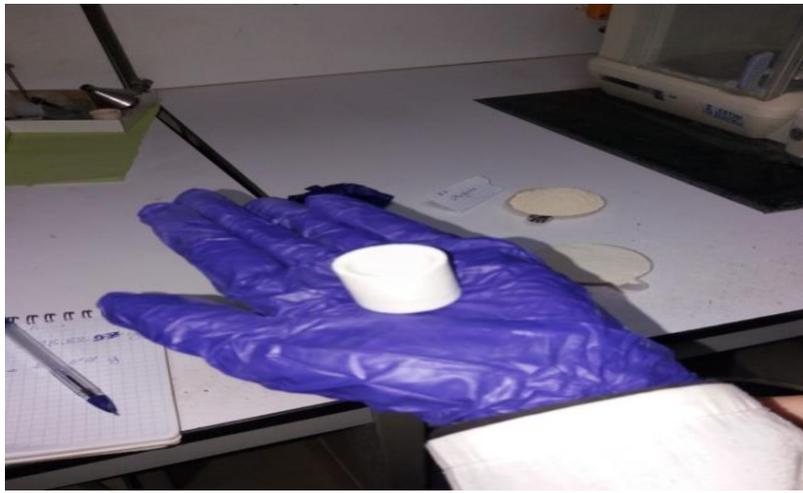


Figure 2.15 : Creuset en platine.



Figure 2.16 : Dessiccateur.



Figure 2.17 : Mettre l'échantillon dans le four a moufle à 950°C.

Le tableau suivant regroupe les l'analyse chimique des ajouts cimentaires.

Tableau 2. 2 : repéreront la composition chimie d (clinker, calcaire, gypse).

	Calcaire			K					Gypse		
	Essai 1	Essai 2	Moy	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Moy	Essai1	Essai2	Moyn
SiO ₂	1,14	1,16	1,15	21,22	21,6	21,67	21,59	21,52	6,19	5,75	5,97
Al ₂ O ₃	0,94	0,98	0,96	5,26	5,37	5,3	5,4	5,3325	1,37	1,09	1,23
Fe ₂ O ₃	0,36	0,38	0,37	3,6	3,58	3,59	3,61	3,595	0,55	0,55	0,55
CaO	53,79	53,73	53,76	66,37	66,69	66,62	66,61	66,5725	30,35	28,96	29,655
MgO	0,73	0,73	0,73	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	3,41	4,03	3,72
So ₃	0,11	0,1	0,105	0,49	0,37	0,37	0,45	0,42	34,43	35,57	35
K ₂ O	0,08	0,08	0,08	0,55	0,58	0,55	0,57	0,5625	0,11	0,1	0,105
Na ₂ O	0,13	0,12	0,125	0,38	0,38	0,39	0,39	0,385	0,57	0,59	0,58

2.4 Les quantités nécessaires pour chaque %ajout

Tableau 2.3(A) :les quantités nécessaires pour chaque % ajout

Construction	99.81											PAF KK	0.5		
	%	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	k ₂ O	Na ₂ O	cl-	LOI	LSF	SM	AM	Quantité
Clinker	94.85	21.52	5.33	3.60	66.57	0.92	0.42	0.56	0.39		1.18	96.65	2.41	1.48	1897
Gypse	5.15	5.97	1.23	0.55	29.65	3.72	35.00	0.10	0.58		21.73	160.05	3.35	2.24	103
Ajout	0.00	1.15	0.96	0.37	53.76	0.73	0.11	0.08	0.13		42.25	1174.40	0.86	2.59	0
Ciment compose	100.00	20.72	5.12		64.67	1.06	2.20	0.54	0.40		2.24	97.56	2.42	1.49	2000.00
Chaux liber KK (CaOL)=0.95															

2.5 Les essais sur mortier projeté

2.5.1 Préparation de mortier

Pour la préparer une pâte du mortier, le malaxeur fonctionne avec une petite vitesse et en introduisant soigneusement le ciment puis l'eau. Après 30 secondes de malaxage, le sable est alors introduit régulièrement durant les 30 secondes qui suivent, et on continue à malaxer pendant 30 autres secondes. Ensuite, le malaxeur est éteint pendant 1min 30s pour éliminer tout le mortier adhérent aux parois au fond à l'aide d'une spatule en caoutchouc. Enfin, le malaxage est reprend à grande vitesse pendant 1 minute.



Figure 2.18 : Malaxeur.

2.5.5 Le maniabilimètre du LCPC

Le maniabilimètre LCPC appelé aussi plessimètre LCPC permet de tester le mortier ou béton du point de vue de sa maniabilité dynamique.

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule [89]. Le mortier est introduit dans la partie la plus délimitée par la cloison est retirée, provoquant la mise en route de la vibration et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de vibration le mortier s'écoule le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée.



Figure 2. 19 : Essai de LCPC.

2.5.2 Préparation des éprouvettes

Le moule est solidement fixé et monté sur la table à choc, soigneusement remplir à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci. Puis la couche s'étale uniformément à l'aide d'une spatule adéquate. Ensuite l'appareil à choc est lancé pour 60 coups. Puis la seconde couche est introduite et nivelée avec la spatule et l'appareil à choc commence à fonctionner pour 60 autres coups. Ensuite le moule est soigneusement retiré de la table et on ôte la hausse, on enlève immédiatement l'excès de mortier avec une règle métallique plate en remuant lentement. La surface des éprouvettes est lissée en tenant la règle presque à plat. Les moules sont nommés pour l'identification. Les moules sont ensuite fixés immédiatement dans une armoire humide avec régulation de température, pendant 24 heures. Après 24 heures de cure les moules sont retirés et on procède au démoulage des éprouvettes. Enfin les éprouvettes sont immédiatement immergées dans un bain d'eau à régulation de température ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).

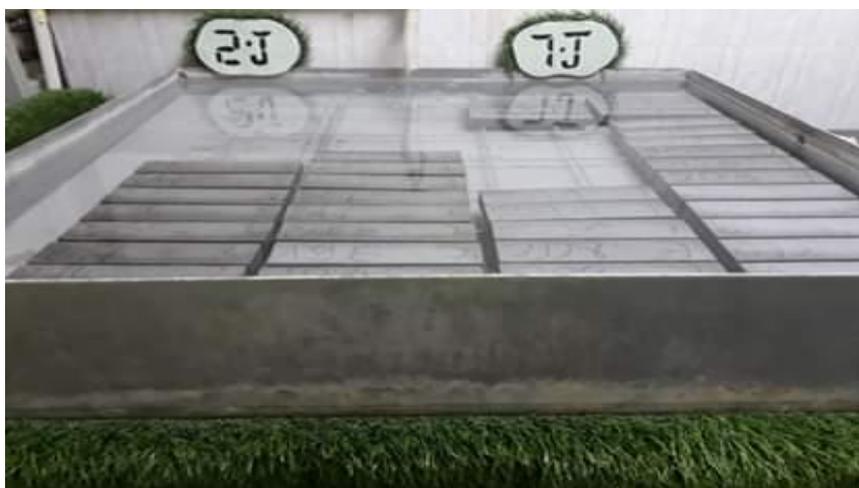


Figure 2. 20 (A) : Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.



Figure 2. 20 (B) : Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.

2.5.3 Résistance à la flexion

La mesure de la résistance à la traction par flexion (R_t) est effectuée sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 , Les essais sont effectués selon la norme NF EN 196-1 [71]. Les résultats obtenus sont la moyenne des valeurs de trois éprouvettes. La résistance de traction par flexion est calculée suivant la formule ci-dessous [87].

$$R_t = \frac{1.5 l}{b^3}$$

2.2

Avec : F : la force applique sur l'éprouvette (N)

l : la distance entre appuis 100(mm)

b : la largeur de l'éprouvette 40(mm^3)



Figure 2.21 : Appareil de la appareil de flexion.

2.5.4 Résistance à la compression

La résistance à la compression (R_c) est déterminée selon la norme EN 196-1 [89]. Les demis prismes obtenue à partie de l'essai de traction par flexion de l'éprouvette ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 est placé entre les deux plateaux de presse. Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être planes et perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette.

La résistance à la compression du mortier se calcule par la formule suivante :

$$R_c = \frac{P}{S}$$

2.3

R_c : Résistance à la compression en MPa.

P : Charge de rupture en MN.

S : Section de l'éprouvette en m^2 ($S=16 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$) .



Figures 2.22 : Appareil de compression.

2.5.5 Le maniabilimètre du LCPC

2.5.6 Absorption capillaire

L'absorption d'eau par immersion est donc le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse [89]. Les éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³ sont séchées dans une étuve ventilée à 80 ± 2°C, jusqu'à une masse constante. Ensuite cette éprouvette est couverte à la résine de type MedaPoxy colle au couche mince et un film de plastique sur une seule base d'éprouvette pour éviter la fuite d'eau. Puis les éprouvettes sont laissées dans un bac d'eau, de niveau égal à 5 mm. Après 1 min l'échantillon est soulevé et séché avec une serviette. Ensuite les éprouvettes sont pesées, cette étape répétée pour (5, 10, 20, 30 min, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24h, 2, 3, 4, 5, 6, 7, et 8j). À chaque fois les échantillons doivent être séchés et pesés. L'absorption capillaire c'est le rapport [m initiale – m finale] de l'augmentation de masse, elle est exprimée en g/cm².

Le coefficient d'absorption capillaire I est défini par l'équation suivante :

La courbe est tracée $I = f(\sqrt{t})$ en fonction de la racine carrée du temps, en suite on a calculé S qui est l'angle de la pente du courbe $I = f(\sqrt{t})$ [90].

$$I = \frac{Q}{A * \gamma}$$

I : coefficient d'absorption (cm),

Q : quantité d'eau absorbé en (g),

A : surface en contact avec l'eau (cm²),

γ : masse volumique d'eau =1g/cm

2.5.7 La porosité accessible à l'eau

La porosité est un paramètre de premier ordre qui caractérise les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton. Elle représente la part de vide contenu dans le matériau à l'état durci à l'âge de 28 jours. La méthode de caractérisation la plus simple et la plus utilisée est sans doute la mesure de la porosité accessible à l'eau. Cette méthode ne donne toutefois accès qu'à la porosité totale et à la masse volumique apparente du matériau [89].

Les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée à 80 ± 2 °C, ensuite ces éprouvettes sont placées dans une enceinte fermée (dessiccateur). La pompe à vide fonctionne dans le dessiccateur pour extraction d'air à l'intérieur pendant 3 heures. La machine continue de fonctionner avec l'eau continuant à descendre de la bouteille qui doit rester remplie d'eau pendant la durée de cette étape, qui est de 1 heure donc elle reste 3 heures sous vide et 1 heure saturée d'eau. Ensuite les éprouvettes sont laissées dans l'eau pendant 18 ± 2 heures donc la période d'essai est 24 heures. Enfin après 24 heures, on les ouvre et on prend les éprouvettes et on les pèse dans l'eau (M_{eau}) à l'aide d'une balance hydrostatique puis on les pèse à nouveau (M_{air}).

La porosité accessible à l'eau (%) est donnée par la relation suivante : [90]

$$\phi = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

2.6 Conclusion

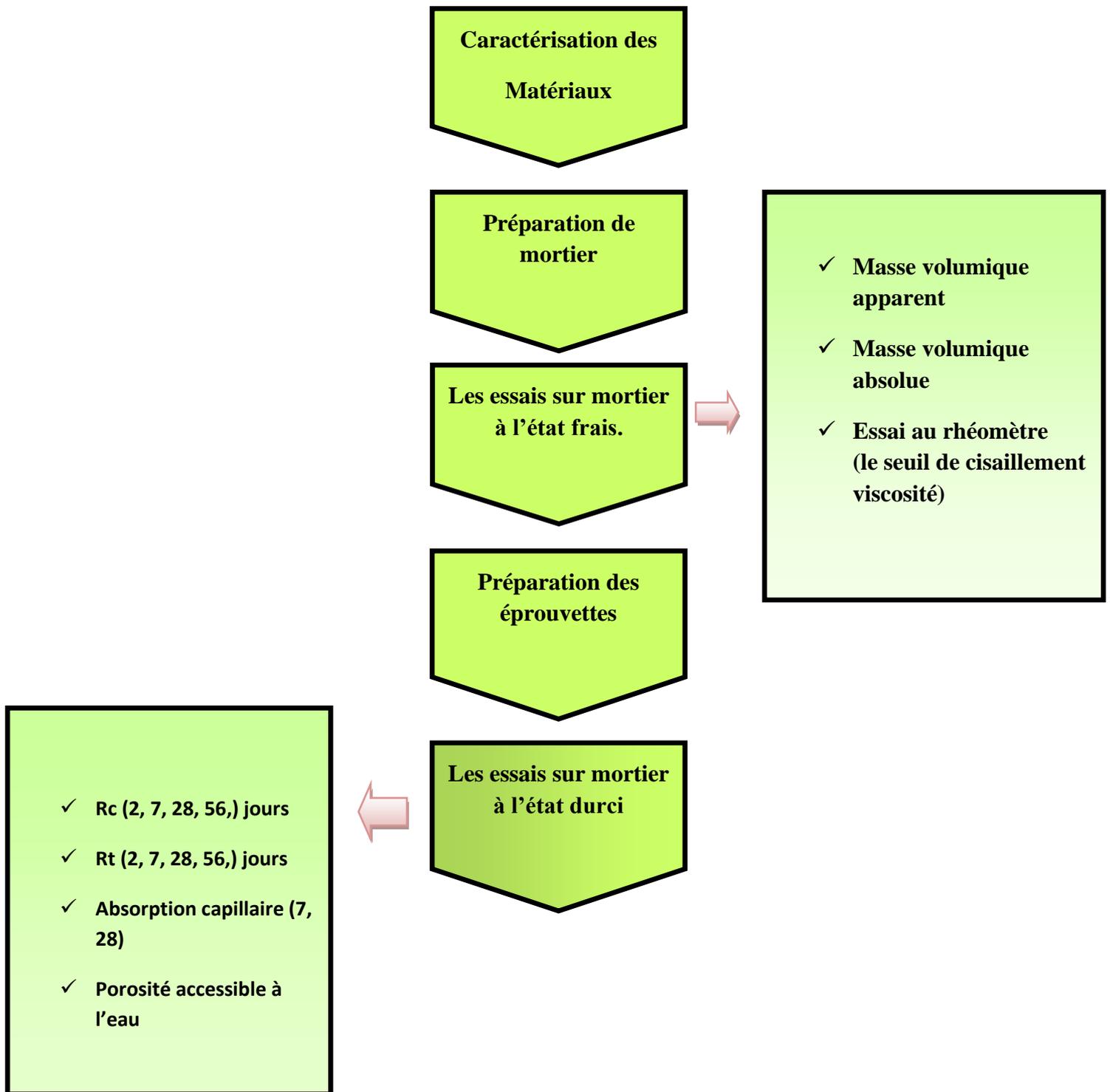


Figure 2.23: Organigramme récapitulatif des essais réalisés.

3. Conclusion général :

parmi les voies explorées par l'industrie cimentière pour réduire l'émission de CO₂ est l'utilisation des ajouts minéraux ou organiques locaux, ce moyen est un alternatif pour se débarrasser des déchets, coopérer à un système industriel écologique et réduire le coût.

l'utilisation d'additions minérales est très utilisée dans le mortier ou le béton pour sa contribution à l'amélioration des propriétés rhéologiques ou mécaniques ou de la durabilité

Dans le marché algérien, selon l'ajout utilisé on trouve quatre types de ciment de classe 42,5MPa, deux ciments binaires à base de calcaire ou pouzzolane et deux autres ternaires à base

d'un mélange, calcaire-pouzzolane ou calcaire-laitier. Cette variété de types donne une plus-value de choix aux ingénieurs de génie civil

Références

- [1] De Larrard F., Construire en béton l'essentiel sur les matériaux, thèse de doctorat, Presses de l'Ecole National Des Ponts et Chaussées, 199 p, 2002.
- [2] Adjoudj M., Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton, Thèse en cotutelle, université de Cergy-Pontoise France et université Hassiba Ben Bouali De Chlef Algérie, 2015.
- [3] Djobo Yankwa J N., Effet de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés des ciments géopolymères à base de scories volcanique, Mémoire de master de l'université de yaoundé I, 2013.
- [4] Husson S., Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers, Application aux mortiers, thèse de Doctorat, ENSM Saint-Etienne et INP Grenoble, 166p, 1991.
- [5] Chloup-Bondant M., Etude des mécanismes réactionnels dans l'hydratation des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire, Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy I, 156p, 1996.
- [6] Heikal M., El-Didamony H., Morsy MS., Limestone-filled pozzolanic cement Cement and concrete research, vol. 30, pp.1827-1834, 2000.
- [7] Zhu W., Gibbs JC. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, Cement and concrete research, vol. 35(8), pp. 1457-62, 2005.
- [8] Cours Université de SHERBROOKE : Les ajouts dans le ciment.
- [9] Zeroub H ., Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable ,mémoire ,université M'hamed bougera de Boumerdes ,2012.
- [10] Bechar S ., Etude et formulation d'un laitier de ciment pétrolier élaboré avec l'incorporation des additions naturelles; Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat ,Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [11] 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 sciences .
- [12] Redha E ., Prédiction du coefficient d'efficacité de la pouzzolane naturelle par les Réseaux De Neurones Artificiels ; Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2012.
- [13] Tchakoute K Hervé ., Elaboration et caractérisation de ciments Géo-polymères à base de scories volcaniques, Thèse de doctorat en Chimie Inorganique, 2013.
- [14] Kerbouche A., Mouli M., Laoufi L., Senhadji Y., Benosmane S., Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers, Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran, 2009.

- [15] <http://thesis.univ-biskra.dz/2295/3/Chapitre%2001.pdf>.
- [16] Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, and Shekarchi M, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 1023–1033, 2012.
- [17] Şahmaran M., Özkan N., Keskin S. B., Uzal B., Yaman I. Ö, and T. K. Erdem, Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts, *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 7, pp. 930–937, 2008.
- [18] Ahmadi B. and Shekarchi M., Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 2, pp. 134–141, 2010.
- [19] Lange F., Mortel N., Rudert V., Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, *Cement and concrete research*, vol. 27, pp. 1481-88, 1997.
- [20] Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B., The effect of fly ash and Limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars, *Cement and concrete research*, vol 36, pp.1719-26, 2006.
- [21] Khaled B., Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires, université M'hamed bougera ,2014.
- [22] Duval R. and Kadri E. H., Influence of Silica Fume on the Workability and the, *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 4, pp. 533–547, 1998.
- [23] Yahia A., Tanimura M., and Shimoyama Y., Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 532–539, 2005.
- [24] Bonavetti V., Donza H., Rahhal V., Irassar E., Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, *Cement and concrete research*, vol 30,2000,pp. 703-8.
- [25] Menéndez G., Bonavetti V., and Irassar E. F., Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 1, pp. 61–67, 2003.
- [26] Michel F., Pierard J., Courard L., and Pollet V., Influence of physico-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, *Self-Compacting Concr. SCC 2007*, vol. ., no. 1, p. 6, 2007.
- [27] Nehdi M., Mindess S., Optimization of high strength limestone filler cement mortars. *Cement and concrete research*, vol 26(6), pp.883-93, 1996.
- [28] El Hilali. A, Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): Influence of limestone and fine plant fibers. MSc thesis. France: University of Cergy Pontoise, p.183. 2009

- [29] Esping O., Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 7, pp. 938–944, 2008.
- [30] Tsvivilis S., Chaniotakis E., Kakali G., and Batis G., An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, no. 3–4, pp. 371–378, 2002.
- [31] Bonavetti V., Donza H., Rahhal V., Irassar E., Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, *Cement and concrete research*, vol 30 pp, 703-8., 2000.
- [32] Belas Belaribi N., Semcha M. et Laoufi L.; Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons.
- [33] Amouri C., Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires, 'Caractérisation, Performances, Durabilité,' These Dr., pp. 40–158, 2009.
- [34] Belaidi A. S. E., Azzouz L., Kadri E., and Kenai S., Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 251–257, 2012.
- [35] Boukhelkhal D., Boukendakdji O., Kenai S., Bachene S, Effect of mineral admixture type on stability and rheological properties of self-compacting concrete. 33emes Rencontres Universitaires de Genie Civil, Bayonne, France, May 2001
- [36] Xuequan Wu and Roy D. M, Slag cement utilization: Rheological properties and related characterization, *Cem. Concr. Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 521–528, 1984.
- [37] Arnaud P, Submitted squeezing, experiment showing binder migration in concentrated suspensions, 2017.
- [38] Park CK., Noh MH., Park TH., Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and concrete research*, vol. 35, pp. 842–49, 2005.
- [39] Ferraris CF., Obla KH., Hill R., Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and Rheological properties of cementitious materials containing mineral concrete, *Cement and concrete research*, vol 31, pp. 245-55, 2001.
- [40] Shi TY., Tanigawa Y., Mori H., Kurokawa Y., A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol 20(2), pp. 223–8, 1998.
- [41] Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, *Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC, Island, Proceedings PRO 33*, pp. 143–153, 2003.
- [42] Aîtcin PC., Les Superplastifiants : des Réducteurs d'eau pas comme les

autres, Recueil de conférences présentées à l'Université de Sherbrooke, 1990.

- [43] Cyr M., Mouret M., Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures : Consequences on self -Compacting Concrete design, Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, pp. 241-255, 2003.
- [44] Gallias JL., Kara-Ali R., Bigas JP., The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, Cement and concrete research, vol 30(10), pp.1543-9, 2000.
- [45] Belaribi O., Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane, l'université iergy -pontoise et de l'université de mostaganem ; Discipline, 2015.
- [46] Menendez G., and al., Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag Cement and Concrete Research – Vol 25, pp 61-67-2003.
- [47] packel san nicolas ; approche performatielle des betons avec métakaolins obtenus par calcination flash , 2011.
- [48] Felekoglu B., Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry self-compacting concrete case, Resources, Conservation and Recycling, Volume 51, Issue 4, p770-791, 2007.
- [49] David W. Fowler, Supervisor; John E. Breen; jevin J. Folliard; Maria C.G. Juenger; Harovel G. Wheat The Dissertation Committee for Eric Patrick Koehler certifies that this is the approved version of the following dissertation: Aggregates in Self-Consolidating Concrete.
- [50] Felekoglu B., yardimci M., baradan B., A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete, Proceeding of Third International Symposium on SCC: Reykjavik 446-455, 2003.
- [51] obla K.H., hill R.H., thomas M.D.A., shashiprakash, S.G., and perebatova, O. Properties of Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash, ACI Materials Journal, 100(5), 426- 433, 2003.
- [52] Patel, R., hossain N, K.M.A., shehata, M., bouzzoubaa, N., and lachemi, M. Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self- Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 101(4), 294-302, 2004.
- [53] Christensen B.J., and ong F.S., The Performance of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete, Proceedings of SCC, Chicago, IL: ACBM, 2005.
- [54] Khatib J.M., Performance of self-compacting concrete containing fly ash, Construction and Building Materials 22, 1963-1971, 2008.

- [55] Khatib J.M., sabir B.B., wild S., Some properties of metakaolin paste and mortar Concretenfor environment enhancement and Protection , Ed. Dhir R.K. and Dyer T.D., Spon press, London, 1996.
- [56] Rackel S.N., Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash, Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, mai 2001.
- [57] Turcry P., Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes. 2004.
- [58] Parra C., Valcuende M., Gomez F., Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete, Construction and Building Materials. vol. 25, N° 1, pp 201-207. 2011.
- [59] Abib Z., Formulation et Caractérisation des Bétons Autoplaçant, Mémoire de Magister, Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene Algérie, 2004.
- [60] Boukendakdji O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires, Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie. 2010.
- [61] Khatib JM., Hibbert JJ., Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, Construction and Building Materials, vol.19, pp 460-472. 2005.
- [62] Parra C., valcuende M., Gomez F., Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, Vol. 25, N° 1, pp. 201-207, 2011.
- [63] Douaïssia Z., and Merzoud M., Effect of mineral admixtures on the rheological and mechanical properties of mortars, MATEC Web Conf., vol. 149, pp. 1–7, 2018.
- [64] Boudchicha A ., "Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons" Thèse de doctorat de l'université de mentouri Constantine, 294 P , 2007.
- [65] Ayed K., Benaïssa A., Vidal T., Pons G., Abidlah A., , Etude du comportement diffère du BAP - l'influence de la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur le retrait du béton autoplaçant, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran Algeria, pp.283-288,2009.
- [66] Lee K.M., Lee S.H., Kim G.Y., , Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag , Cement and Concrete Research., vol. 36, p. 1279 – 1285, 2006.
- [67] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures, Construction and Building Materials., vol. 24, pp. 1878,2010.

- [68] Moro F.R., Ghomari F, Boukli Hacène M.A, Taleb O, Loukili A, Rosière E. La carbonatation des bétons aux fortes additions calcaires. La carbonatation des bétons aux fortes additions calcaires ,2011.
- [69] Boucetta T. A., Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances, Thèse de doctorat de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, 2014.
- [70] Jiang S.P., Grandet J., Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland, Cement and Concrete Research, vol. 19, pp. 487-495,1989.
- [71] Bouikni A., Swamy R.N., Bali A., Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag, Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 2836-2845 ,2009.
- [72] A. Younsi, P. Turcry, A. Aït-Mokhtar, and S. Staquet, Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying, Cem. Concr. Res., vol. 43, no. 1, pp. 25–33, 2013.
- [73] Gesoglu M., Güneyisi E., Özbay E., Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 1847–1854 2009.
- [74] Page C-L, Short N-R, El-Tarras A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes, Cem. Concr. Res. 395–406, 1981.
- [75] Thomas M-D-A., Bamforth P-B., Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag, Cem. Concr. 487–495,1999
- [76] Delagrave A. , Mécanismes de pénétration des ions chlore et de dégradation des systèmes cimentaires normaux et à haute performance, Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec ,1996.
- [77] Cherif R., Etude de l'effet de la composition de la solution interstitielle des matériaux cimentaires sur les interactions multi-espèces lors des transferts de chlorures Rachid Cherif To cite this version,2018.
- [78] Hadj sadok A., Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'El hadjar dans des milieux agressifs, Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie 2010.
- [79] Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B., Kadri E.H.,Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate, Advances in Concrete Construction, vol. 5(3), pp. 271-288, 2017.

- [80] Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C., Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2, pp. 52–59, 2013.
- [81] Khelifa M. R., Effet de l'attaque sulfate externe sur la durabilité des BAP, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, pp178. 2009.
- [82] Rahmani H., Ramzani pour A.A.; effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes University of Technology, 2009 Hafez Avenue, Tehran, Iran .
- [83] Ghrici M., Kenai S., Said M. -Mansour; Mechanical, properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolane and limestone blended cements; ,2007 .
- [84] Tamimi A. K., High St., High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions; Advanced Concrete Technology Group, , University of Paisley.
- [85] salhi M, khelafi H., ghrici M, benosman S; Influence des ajouts minéraux sur la durabilité des mortiers conservés dans l'eau de mer , Enset d'Oran, Université de Chlef.
- [86] Boubekeur T.; Boulekbache B., Effet du calcaire et du laitier sur les propriétés physico-mécanique et la durabilité des ciments portland , Université de Chlef.
- [87] EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1, détermination des résistances, Septembre 2016.
- [88] Athamania H., caractérisation de l'ouvrage des mortiers et de béton; mémoire du master, université du Guelma. 2013.
- [89] Derbale R., influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme du béton autoplacant thermiquement, thèse de doctorat université de Guelma, 2015.
- [90] Bouteldja I., rhéologie et performances des mortiers autoplacant à base des ciments binaires et ternaires , Université de Blida, Département de Génie Civil Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil, 2019 .

