

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Mr. HARMALI M'hand

Mlle. ADJAOUT Dehia

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Synthèse sur l'activation de la pouzzolane et son comportement physico-chimique.

le jury composé de :

- | | | | |
|----------------|--------|-----------|-----------|
| • Hami | Brahim | MCB | Président |
| • Kennouche | Salim | MCB | Examineur |
| • SaoudiNacira | MCB | Encadreur | |

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidés dans l'élaboration de ce travail, en particulier mon encadreur Madame Saoudi, pour sa disponibilité et sa méthode d'ouvrir son esprit aux étudiants, pour sa confiance d'accepter aisément mes idées.

Je tiens encore à remercier les membres jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et donné leurs remarques et critiques en à propos.

Je tiens aussi à remercier les dirigeants de la faculté des sciences et sciences appliquées pour leur aide et leur disponibilité.

Merci à vous tous

DÉDICACE

À mes parents qui ont causé mon existence
À mes petits frères aimés Larbi, Oualid et Amayass
À ma grand-mère Fatima et mes oncles
À mes tantes khokha , Karima et Nassima
À ma cousine Manal et tous mes cousins
À tous mes chères amies Lamia, Aicha, Hizia, Zahia, Nadira, Zahoo,

À toutes les promotions qui sont passées et celles qui viennent
À tous les étudiants de ma promotion 2019/2020 et à l'exception l'option : Matériaux en
Génie Civil
À monsieur **AmraneBelaid** qui nous a quitté si tôt et que le dieu le protège dans son vaste
paradis.

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer et atteindre à ce stade ...

Adjaout Dehia

À mes parents qui ont causé mon existence
À mes sœurs frères aimés
À toute ma famille
À tous mes amis et collègues
À toutes les promotions qui sont passées et celles qui viennent
À tous les étudiants de ma promotion 2019/2020 et à l'exception l'option : Matériaux en
Génie Civil
À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer et atteindre à ce stade ...

Harmali M'hand

Résumé :

Les pouzzolanes naturelles (PN) sont de plus en plus utilisées dans le secteur de construction en raison de leur uniformité de composition et de leur abondance locale dans certains pays. Dans notre recherche bibliographique on a étudié les différents types, formes et tailles des particules de pouzzolanes utilisés comme ajouts avec un module de silice (Ms) ou activé par l'Alumine (ARP) ou comme la base d'un mortier binaire activé par les alcalins (AABM) ajoutant à ceci des différents laitier de haut fourneau(GBFS) et nano-silice ($nSiO_2$) à la pénétration des chlorures et à la corrosion et exploration des déchets agro-industriels, les scories et les épis de maïs, cendre de schiste bitumineux (CSB) pour la production de béton géopolymère (GPC).

L'une des méthodes de détartrage prometteuses découvertes est le remplacement partiel du ciment par des pouzzolanes, en particulier des pouzzolanes d'origine agricole. Il est donc nécessaire d'étudier le comportement de ces pouzzolanes pour optimiser leur utilisation en remplacement partiel du ciment et dans les différentes compositions. Cela nous a conduit aux différents résultats.

Mots clés:

Ajouts-Béton géopolymère (GPC), Cendre de schiste bitumineux (CSB), Ciment, Construction, Laitier de haut fourneau(GBFS), Module de silice (Ms), Mortier binaire activé par les alcalins (AABM), Nano-silice ($nSiO_2$), Pouzzolane naturelle (PN).

Abstract:

Natural pozzolans (NP) are increasingly used in the construction industry due to their uniformity of composition and local abundance in some countries. In our bibliographic research we studied the different types, shapes and sizes of pozzolan particles used as additions with a silica modulus (Ms) or activated by alumina (ARP) or as the base of a binary mortar activated by alkalis (AABM) adding to this different blast furnace slag(GBFS) and nano-silica ($nSiO_2$) for chloride penetration and corrosion and exploration of agro-industrial waste, slag and corn cobs, oil shale ash (CSB) for the production of geopolymer concrete (GPC).

One of the promising descaling methods discovered is the partial replacement of cement with pozzolans, especially pozzolans of agricultural origin. It is therefore necessary to study the behavior of these pozzolans in order to optimize their use as a partial replacement for cement and in the various compositions. This led us to the deferential results

Key words :

Additions-Geopolymer concrete (GPC) -Shale ash (CSB) -Cement -Construction-Blast furnace slag (GBFS) -Silica module (Ms) - binary mortar activated by alkalis (AABM)-Nano-silica ($nSiO_2$) -Natural pozzolan (PN).

ملخص:

يتم استخدام البوزولان الطبيعي (PN) بشكل متزايد في صناعة البناء بسبب توحيد تكوينها ووفرة محلية في بعض البلدان . في بحثنا الجيولوجرافي، درسنا الأنواع والأشكال والأحجام المختلفة لجزيئات البوزولان المستخدمة كإضافات مع معاملا لسيليكا (Ms) أو المنشطة بواسطة الألومينا (ARP) أو كقاعدة لمونة ثنائية يتم تنشيطها بواسطة القلويات (AABM) إضافة إلى خبث الفرن العالي (GBFS) و نانوسيليكا ($nSiO_2$) لاختراق الكلوريد و التآكل واستكشاف النفايات الصناعية الزراعية وخبث الكيزان والذرة، رماد الصخر الزيتي (CSB) لإنتاج الخرسانة الجيوبوليمرية (GPC). إحدى طرق إزالة الترسبات الواعدة التي يتم اكتشافها هي الاستبدال الجزئي للأسمنت بالبوزولان، وخاصة البوزولان من أصل زراعي. لذلك من الضروري دراسة سلوك هذه البوزولان من أجل تحسين استخدامها كبديل جزئي للأسمنت وفي التركيبات المختلفة . هذا قادنا إلى النتائج المرعبة.

الكلمات المفتاحية:

خبث الفرن العالي (GBFS), رماد الصخر الزيتي (CSB), معاملا السيليكا (MS), نانو سيليكا ($nSiO_2$) الأسمنت, الإضافات , البوزولان الطبيعي (PN) , البناء, الخرسانة الجيوبوليمرية (GPC), الملاط الثنائي المنشط القلوي (AABM)

Table des matières

Introduction générale.....	1
Section I.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1. Histoire de la pouzzolane :.....	3
I.2. Définition de la pouzzolane	3
I.3. Origine et disponibilité de la pouzzolane :	3
I.3.1. La pouzzolane naturelle:	3
I.3.2. Les types des pouzzolanes :	4
I.3.2.a. Verre volcanique :.....	4
I.3.2.b. Tufs volcaniques compacts :.....	4
I.3.2.c. La pouzzolane artificielle :	5
I.3.2.d Cendres volantes:.....	5
I.3.2.e Argiles calcinés :	5
SECTION II	6
II.1. Matériaux utilisés :	7
II.2. Techniques et essais :	11
II.3. Les essais :.....	14
II.3.1. La caractérisation microstructurale :	14
II.3.2. La chaleur d'hydratation :	14
II.3.7. Module élasticité :	16
II.3.8. Mesure du retrait :.....	16
II.3.9. Porosité :.....	16
II.3.10. L'absorption :	17
II.3.11. Évaluation du changement de longueur :	17
II.3.12. Les temps de prise :	17
II.3.13. Test chimique :	17
II.4. Résultats :	19
II.4.1. Compression :.....	19
II.4.2. Cinétique d'hydratation :.....	20
II.4.3. Résultats du test d'affaissement :	22
II.4.4. Temps de prise :.....	23
II.4.5. Perte de masse :	23

II.4.6. Module d'élasticité :	24
II.4.7. Résistance à la traction :	24
II.4.8. Absorption	25
II.4.9. Perméabilité et migration des chlorures :	25
II.4.10. Diffraction de rayon DRX :	27
II.4.11. Retrait :	28
II.4.12. Composition chimique :	30
II.4.13. Analyse thermique :	30
II.4.14. Études SEM :	32
II.4.15. Carbonatation sous laboratoire et milieu naturel :	33
II.4.16. Réactivité pouzzolanique en suspension :	33
II.4.17. Développement de la structure des pores à long terme :	33
II.4.18. Effet de la formation de carboaluminates sur le volume solide d'hydrate :	34
II.5. Conclusion générale	35
Références bibliographiques :	37

Liste des figures

Figure 1 : pouzzolanes naturelles granule.[GuimerTarek(2007)].....	4
Figure 2 : Origine de la pouzzolane. [AbdélazizS.(2006)].....	5
Figure 3 : La granulométrie utilisée pour la réparation des mélanges du MGP, calcaire (à gauche), sable de silice (à droite).[Wang et al (2020)].....	9
Figure 4 : La distribution granulométrique cumulative des matériaux de liaison utilisés. LL est la limite inférieure, UL est une limite supérieure, FA sont des agrégats fine, CA sont des agrégats grossiers. [Oyebisi et al (2020)].....	9
Figure 5 : A).Caractérisation Micro-Structurale sz l'AABB par DRX et B).Diagramme ternaire CaO, SiO ₂ (EDS-SEM). [Salazar et al (2019)].....	20
Figure 6 : Taux de dégagement de chaleur des pates. [Yunyao Wang et al (2020)].....	22
Figure 7 : Chaleur d'hydratation des mortiers AANPS. [Najimi et al (2019)].....	22
Figure 8 : coefficient de migration du chlorure et profondeur de pénétration du chlorure des bétons AANPS Ilicate-30% ayant une combinaison de précurseurs et une concentration NaOH différentes. [Najimi et al (2019)].....	27
Figure 9 : coefficient de migration des chlorures et profondeur de pénétration du chlorure des bétons AANPS 2,5 M ayant différentes combinaison de précurseurs et d'activateurs. [Najimi et al (2019)].....	27
Figure 10 : Modèles DRX de pates à 28 jours.....	28
Figure 11 : Retrait de séchage ultime des bétons AANPS. [Najimi et al (2019)].....	30
Figure 12 : a) niveau de retrait du substrat AABM vs OPC et b) Absorption capillaire d'eau de l'AABM. [Salazar et al (2019)].....	30
Figure 13 : Retrait de séchage des béons dans AANPS dans le temps.[Najimi et al (2019)].	31
Figure 14 : Courbe DSC de la pate à 28 jours. [Wang et al (2020)].....	32
Figure 15 : A). Image SEM pour la pate OPC et B). Image SEM pour OPC + GSA%. [CM.Ikumapayo (2020)].....	33
Figure 16 : Réactivité pouzzolanique pour OPC et GSA à différentes températures. [CM Ikumapayi et al (2020)].....	34
Figure 17 : structure des pores du béton à 2 mois et 2 ans. [Wang et al (2020)].....	34

Liste des tableaux

Tableau 1: propriétés physico-chimique de nSiO ₂	8
Tableau 2: : composition d'oxyde d' OSA par rapport aux matériaux de base conventionnels obtenue par DRX.....	11
Tableau 3: composition d'oxyde d' OSA par rapport aux matériaux de base conventionnels obtenue par DRX.....	19
Tableau 4: : Taux de dégagement de chaleur (période dormante).[M. Kemal Ardoğa(2019)]	22

Liste d'abréviations

Les abréviations et symboles	Notations et abréviations
CSB	cendre de schiste bitumineux
GSA	cendre de coquille d'arachide
CCA	cendre d'épis de maïs
GGBFS	laitier haut fourneau broyé
SCM	matériaux cimentaires supplémentaires
PLC	Un ciment de calcaire Portland
GPC	compositegéopolymère
GPB	bétongéopolymère
OPC	ciment Portland Ordinaire
NP	pouzzolane naturelle
GBFS	laitier granulé de haut fourneau
RT	Le trass rhénan
UFA	cendres volantes ultrafines
PLR	Pozzolan Laziale Red
PLB	Pozzolan Laziale Black
PF	Pozzolan Flegrea
MK	métakaolin
NFA	cendres volantes normales
IAR	indices d'activité de résistance
SG	densité
WA	l'absorption d'eau
MC	la teneur en humidité
SSD	densité spécifique
AABM	mortier binaire activé par les alcalis
SS ou Na_2SiO_3	silicate de sodium
SH ou NaOH	hydroxyde de sodium
SiO_2	silice
Na_2O	oxyde de sodium
CSHP	cendres de carburant d'huile de palme
OSA	cendres de schiste huileuses
FA	cendres volantes
POFA	cendres volantes d'huile de palme
AANPS	Les bétons de pouzzolane naturel / laitier activés par les alcalis

XRD	Diffractions des rayons x
MEB ou SEM	Microscope électronique a balayage
AAB	béton activé par les alcalis
nSiO ₂	nano-silice
SDE	spectroscopie à dispersion d'énergie
ATG	analyse thermogravimétrique
AABM	mortier binaire activé par les alcalins
AABB	pate binaire activé par les alcalins
MIP	prosimètre par intrusion de mercure
CST	test de soude caustique
CaO	la chaux
Al ₂ O ₃	l'alumine
Fe ₂ O ₃	ferrite
MgO	magnésium
SO ₃	sulfate
AAC	béton activé par les alcalin
CSH	silicate de calcium hydraté
CH	portlandite
w _b	l'eau liée chimiquement

Introduction générale

La protection de l'environnement est une préoccupation majeure pour la recherche de nouveaux procédés de construction ou de nouveaux produits sans impact réel sur l'environnement. L'un des produits écologiques qui peut être utilisé dans le béton est la pouzzolane.

La pouzzolane est un matériau volcanique naturel qui existe en quantité énorme en Algérie. Si ce produit, qui est une matière première dans quelques produits et ne nécessite aucun traitement coûteux mais un simple broyage, pouvait remplacer une partie non négligeable du ciment lors de la confection des bétons, pour plus d'économie surtout pour un pays importateur de ciment comme l'Algérie.

L'objectif de cette étude est de rapporter une synthèse bibliographique sur l'activation et substitution de la pouzzolane et d'évaluer son rôle et son comportement sur les propriétés physico-chimiques. Pour cela, nous avons pris le soin de faire une étude comparative entre les différents résultats trouvés et publiés par des chercheurs. Ce manuscrit sert pour une campagne expérimentale que nous n'avons pas les conditions à effectuer.

Nous allons donc exposer ci-après le cheminement de la synthèse que nous avons menée afin de mettre en exergue les différents processus de l'activation, leurs réactions et leurs effets sur les comportements.

Ce travail est structuré en deux grandes parties comme illustré ci-après.

La première partie est consacrée à l'étude des définitions et généralités, la deuxième partie porte sur la bibliographie la plus récente, ou dans cette dernière nous avons apporté les analyses et des corrélations entre le comportement mécanique et la microstructure.

Section I

I.1. Histoire de la pouzzolane

Les Grecs et les romains avaient remarqué que les matériaux de dépôts volcaniques, lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier avec une bonne tenue à l'action de l'eau et une résistance mécanique très élevée. Le nom commun de pouzzolane vient de la ville portuaire de Pouzzoles près du Vésuve où historiquement on attribue la première exploitation « industrielle » des cendres volcaniques en tant que matériaux hydrauliques en présence de chaux. La découverte de ce type de matériau aux propriétés remarquables dans d'autres reliefs européens. Les pouzzolanes ont été pendant des siècles un matériau privilégié pour la construction notamment pour les édifices servant à l'alimentation en eau des villes. Cette période de « gloire » a cessé lors de l'invention du ciment portland au XIX^{ème} siècle, produit aux qualités incomparables en termes de temps de prise et de durcissement. Toutefois, les mélanges pouzzolane/ciment présentent de telles qualités techniques mais aussi économiques [Lea's, 2004] que les ciments pouzzolaniques sont de nos jours produits industriellement et que l'introduction de pouzzolane dans les ciments fait l'objet des normes [NF EN 197-1](#) et [ASTM-C-618](#). La capacité d'un matériau à faire prise en présence de chaux est depuis définie comme étant une propriété pouzzolanique [Pauline Sabatier 2011].

I.2. Définition de la pouzzolane

La pouzzolane se définit comme étant un matériau, silico-alumineux, non liant et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes [C. Vernet et al (1991)].

I.3. Origine et disponibilité de la pouzzolane

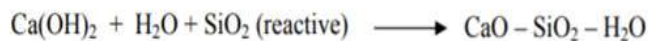
Elle se divise en deux grandes catégories,

I.3.1. La pouzzolane naturelle

Substances finement broyées ont une finesse à peu près identiques à celles du ciment, sont généralement constitués par des projections d'origine volcanique (pyroclastique) ou roches scoriacé et alvéolaire soit sédimentaires ou métamorphiques. Leur formation peut résulter de l'expansion rapide d'un magma en surface accompagnée d'un dégazage ou d'une interaction entre le magma et de l'eau (lac, glace ou eau de mer). Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes,

conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique.

[R. Dupain, R. Lanchant 1995]. Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer. [G. Dreux & J. Festa, 1998]. Il s'agit d'une roche volcanique effusive à composition, surtout, Feldspathique (donc siliceuse) à structure alvéolaire et trachytique résultant de l'accumulation des cendres volcaniques. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



(La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau.) [Kobayashi K., Uno Y.

1990,].



Figure 1 : pouzzolanes naturelles granule.[GuimerTarek(2007)].

I.3.2.Les types des pouzzolanes :

I.3.2.a.Verre volcanique

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au japon.

I.3.2.b. 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 zéolithiques de

composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte

I.3.2.c. La pouzzolane artificielle

Présentées sous la forme de sous-produits industriels (laitier de hauts fourneaux, cendres volantes, fumée de silice) [M Z Bessnouci et al (2011)].

I.3.2.d. Cendres volantes

Elles sont les pouzzolanes les plus importantes aujourd'hui, qui sont un résidu de combustion de la houille pulvérisée ou du lignite dans les centrales thermiques. Ces cendres, très fines d'où leurs noms peuvent être stockés pour faciliter leur transport. Les cendres volantes en houille : contenant une faible teneur en chaux et en sulfate, proches de cendre volcanique. Les cendres volantes en lignite contenant moins de silice et d'alumine et une plus forte teneur en chaux, ont de faibles propriétés hydrauliques.

I.3.2.e. Argiles calcinés

Sont utilisés pour remplacer les pouzzolanes naturelles, sont obtenus par cuisson d'argile à une température variante de 600°C à 900°C dépendant de la nature du matériau. Le produit obtenu est moulu à la finesse du ciment.



Figure 2 : Origine de la pouzzolane. [Abdélaziz S. (2006)]

SECTION II

TRAVAUX ETUDIÉS

Dans cette section on résume au mieux les résultats que nous jugeant importants dans le contexte de notre thème, vu la quantité de forme exponentiel des articles scientifiques, on présente uniquement quelques travaux plus récents.

II.1. Matériaux utilisés

EN 2019 Haddad et Lababneh ont utilisées descendre de schiste bitumineux (CSB) brûlé à 900°C et à 650°C pendant 2h pour le cendre de coquille d'arachide (GSA) C.M. Ikumapayi et al en 2020. Ainsi qu'un cendre d'épis de maïs (CCA) (obtenu avec déshydroxylation des épis de maïs à 600°C pendant 3h) et laitier haut fourneau broyé (GGBFS) ont utilisé par Oyebisi et al en 2020 comme matériaux cimentaires supplémentaires (SCM) pour la production de composite géopolymère (GPC). Un ciment de calcaire Portland (PLC) est utilisé comme un liant pour la production de béton (PLC) (composé de 89% de clinker, 7% de calcaire et 4% de gypse, selon la norme BS EN 197-1 2011 avec une surface spécifique de $437\text{m}^2/\text{kg}$) et comparé au béton géopolymère (GPB), Wang et al en 2020. Ainsi qu'un ciment Portland Ordinaire (OPC) et de type V ont été utilisés par C.M. Ikumapayi et al en 2020, Najimi et al (2019). Les SCM ont ensuite été tamisés avec $\varnothing 90\ \mu\text{m}$ pour obtenir une finesse avec CCP selon BS EN 196-6 à une porosité standard de 0,500 indiquent $420\text{m}^2/\text{kg}$, $625\ \text{m}^2/\text{kg}$ et $375\text{m}^2/\text{kg}$ et les taille moyenne des particules avec (DGM) est de $20,68\ \mu\text{m}$, $23,45\ \mu\text{m}$ et $18,79\ \mu\text{m}$ pour GGBFS, CCA et PLC, respectivement, Oyebisi et al (2020).

Ainsi que $500\ \text{m}^2/\text{kg}$, $50\ \mu\text{m}$ et une surface de $2,4502 \times 10^{-3}$ à $1,5046\ \text{m}^2$, pour CSB, GSA respectivement, Haddad et Lababneh (2019), C.M. Ikumapayi et al (2020). En tant que précurseur (aluminosilicate) Salazar et al (2020), ont utilisés un mélange de mortier binaire activé par les alcalis (AABM) composé de (70%) de pouzzolane naturelle colombienne (NP) et (30%) du laitier granulé de haut fourneau (GBFS), le même précurseur pour Najimi et al (2019) comprenaient du laitier de haut fourneau broyé (GGBFS) qui avait des indices d'activité de résistance (IAR) de 7 et 28 jours de 90 et 107%, respectivement bien au-dessus de l'exigence minimale des scories de grade 100 spécifiées dans ASTM C989 avec une surface spécifique de $542\text{m}^2/\text{kg}$, ainsi que la taille moyenne des particules est $12,6\ \mu\text{m}$ et celles des particules du NP et du GBFS, déterminées par granulométrie laser, étaient de $21\ \mu\text{m}$ et $26\ \mu\text{m}$, respectivement, Salazar et al (2020).

Firdous et Stephan en (2019), ont utilisées six (06) échantillons de pouzzolane naturelle, nommés : Le trass rhénan (RT) sous forme de poudre et le trass bavarois (sous forme de pierre (BT1) et de poudre (BT2)) en Allemagne. Pozzolan Laziale Red (PLR), Pozzolan Laziale

Black (PLB) et Pozzolan Flegrea (PF), tous sous forme de pierre, en Italie. Tous les échantillons ont été broyés à une finesse Blaine comparable $670 \pm 16 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Ainsi que trois (03) pouzzolanes riches en alumine utilisés par Wang et al (2020) qui sont les particules métakaolin (MK) appelés microbilles, étaient obtenus par un processus de classification à partir des cendres volantes en Chine, ce forme de plaque et sont observé dans les images SEM. Les particules de cendres volantes ultrafines (ultra-fine flyash (UFA)) sont sphériques et ultra-fin, les cendres volantes normales (normal flyash (NFA)) en grande quantité d'irrégularités et des particules grossières se trouve dans le NFA. Elles étaient appliqués comme (SCM) $33,48 \times 10^3$, $11,16 \times 10^3$, $461 \text{ m}^2/\text{kg}$ de surface spécifique de MK, UFA, NFA, respectivement.

Tandis que, trois (03) groupes des mélanges du ciment (nommés 3P, 11P et 22P avec 3, 11 et 22% (en masse) de la portion de clinker ont été remplacés par une pouzzolane naturelle, respectivement ont utilisés par K.M.Ardoğa en (2019). La pouzzolane naturelle (0P) utilisée était un tuf volcanique sa teneur en silice réactive était de 33,6% selon TS EN 196-2 et TS EN 197-1. Après deux jours, le mélange avec de l'eau a été déterminé à 34,4%. Ainsi qu'une pouzzolane naturelle de classe N- spécifié selon ASTM C618 avec (IAR) de 7 et 28 jours étaient à 84 et 91%, respectivement Najimi et al (2019) et 75,6% à 28 jours selon ASTM C 618 pour K.M.Ardoğa (2019). La taille moyenne des particules est $15,8 \mu\text{m}$ et $451 \text{ m}^2/\text{kg}$ de surface spécifique Najimi et al (2019) et tout les groupes de ciment comprenant le témoin (0P) ont été broyés à $395 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. Ainsi 5% de gypse (en masse de clinker + gypse) ont été ajoutés au ciment 0P et 3P pour contrôler le réglage et pour 11P et 22P, la quantité a été réduite à 4% en raison de la diminution de la teneur en clinker, K.M. Ardoğa et al (2019).

Une pouzzolane naturelle (NP) utilisés par Haddad et Lababneh (2019), avec la taille moyenne des particules de $30 \mu\text{m}$ et $442 \text{ m}^2/\text{kg}$ de finesse, pour Ibrahim et al (2020). Et $700 \text{ m}^2/\text{kg}$ pour Haddad et Lababneh (2019). les propriétés physico-chimiques de la nanosilice (nSiO_2), sont dans le tableau.1.

Tableau 1: propriétés physico-chimiques de nSiO_2 .

propriété	Contenuss olide %	Moy, granulométrie, nm	Masse volumique apparent (g/cm^3)	Surface spécifique m^2/g	Na_2O contenu en %	Viscosité, cps	Ph
Valeur	50	35	1,4	80	0,2	15	9,5

Wang et al (2020), ont utilisés un sable avec le module de finesse de $2,9 \text{ m}^2/\text{kg}$ et un gravier de 5 à 25 mm. Ainsi qu'un mélange d'agrégats de calcaire fin broyés et de sable de silice passant au tamis $\text{Ø}60$ pour préparer les divers mélanges de MGP; leur granulométrie sont

présentés dans la Fig.3. Le mélange a été préparé à 70 et 30% (en poids), d'agrégats de calcaire fin broyés et de sable de silice, respectivement, [Haddad et Lababneh \(2019\)](#).

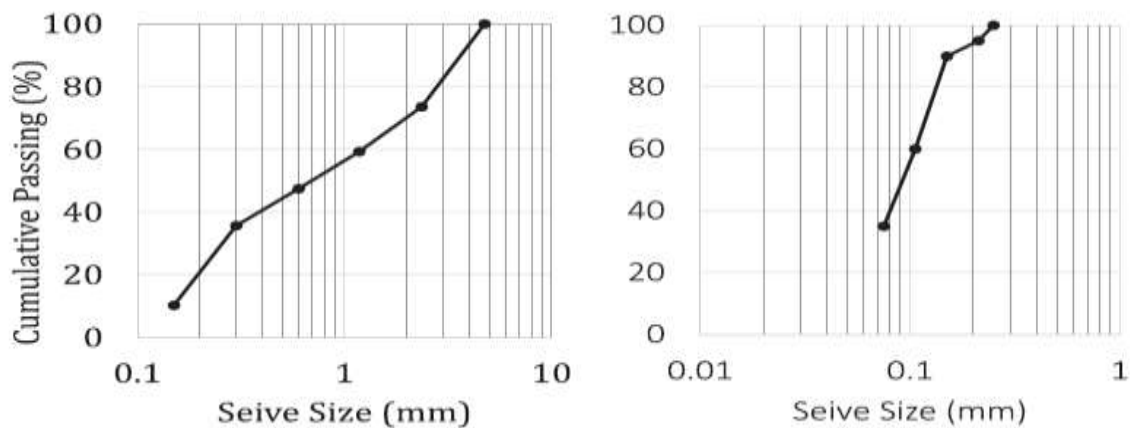


Figure 3 : La granulométrie utilisée pour la réparation des mélanges du MGP, calcaire (à gauche), sable de silice (à droite). [Wang et al \(2020\)](#).

D'où, les agrégats utilisés par [Oyebisi et al \(2020\)](#) étaient caractérisé conformément à la norme BS EN 12 620 [47]. La densité (SG), l'absorption d'eau (WA) et la teneur en humidité (MC) des agrégats ont été déterminés selon [BS EN 12 620](#). La figure 4 montre la PSD à la fois de FA et de CA utilisée; les agrégats satisfaisaient aux limites de la norme [BS EN 12 620](#).

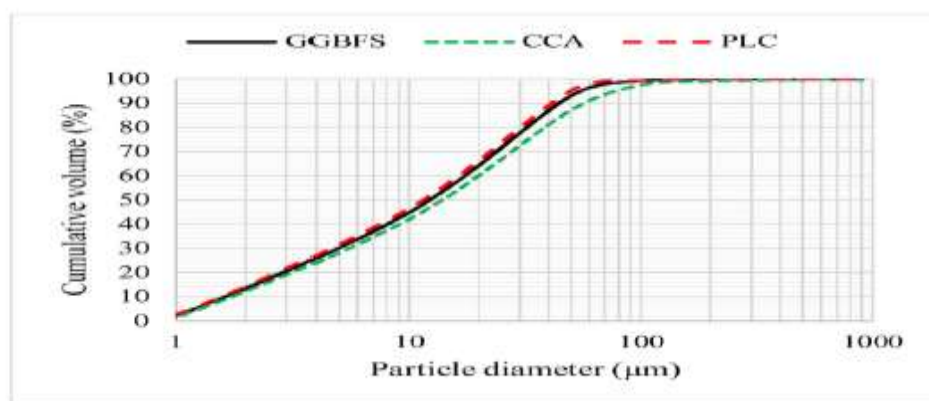


Figure 4 : La distribution granulométrique cumulative des matériaux de liaison utilisés. **LL** est la limite inférieure, **UL** est une limite supérieure, **FA** sont des agrégats fine, **CA** sont des agrégats grossiers. [Oyebisi et al \(2020\)](#).

Les agrégats fins et grossiers utilisés répondent aux exigences de la norme ASTM C33 [20] de taille 8 qui constitue 60% -4,75 mm, 35% -2,36 mm et 5% -1,18 mm d'agrégats. [Ibrahim et al \(2020\)](#), ainsi que l'agrégat fin était siliceux avec un module de finesse de $2,6\text{m}^2/\text{kg}$, une densité spécifique de SSD de 2,78 et une absorption de 0,81%. La surglace spécifique du SSD

et l'absorption d'agrégats grossiers étaient respectivement de 2,77 et 0,79%, [Najimi et al \(2019\)](#). En outre, un sable et gravier concassé d'une taille maximale de 19,05 mm ont été utilisés par [Robayo-Salazar\(2019\)](#) pour obtenir un mortier binaire activé par les alcalis (AABM) et produire des substrats à base du ciment Portland ordinaire d'OPC de type CEM I 42,5 R.

Des solutions et pastilles de silicate de sodium(SS) et d'hydroxyde de sodium(SH) ont été utilisées comme activateurs alcalins, [Najimi et al \(2019\)](#), [Salazar et al \(2019\)](#) et [Ibrahim et al\(2020\)](#), [Rami H. Haddad\(2019\)](#), ainsi que des pastilles NaOH d'une pureté de 99%

[Rafia Firdous,\(2019\)](#), [Oyebisi et al\(2020\)](#). Le (SS) était à l'état liquide composé de 44% de matières solides (silice et oxyde de sodium) et 56% d'eau en poids, avec un rapport ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) de 1,98, une densité de 1,53 et un pH de 12,9, [Najimi et al \(2019\)](#). La composition du silicate de sodium Na_2SiO_3 était H_2O : 62,5%, SiO_2 : 28,75% et Na_2O : 8,75%, avec un module de silice de l'activateur combiné de 1,351, [Ibrahim et al \(2020\)](#). Et celle obtenue sous le nom de marque Betol 52 T avec module silicate de 2,12 ($\text{SiO}_2 = 30,2\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 14,7\%$ en poids) et 45% en poids de matière sèche, [Firdous et Stephan \(2019\)](#). [Salazar et al \(2019\)](#) ont augmenté la teneur en silice en diminuant la teneur en H_2O dans la composition du silicate de sodium Na_2SiO_3 (H_2O : 45,2%, SiO_2 : 58,7% et Na_2O : 13,5%), pour atteindre un rapport molaire $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} = 1,1$, [[Robayo-Salazar et al \(2017\)](#)].

Tandis que [Rami H. Haddad\(2019\)](#) a augmenté Na_2O et la solution consistait en un mélange de Na_2O , SiO_2 , et de l'eau à des pourcentages massiques de 11, 29, 60%, respectivement. Autrement un gel SS a été utilisé par [Oyebisi et al\(2020\)](#) comme activateur. 354g, 400g et 443g de pastilles HS ont été mesurés et dissous dans 646g, 600g et 557g d'eau propre sur la base des procédures chimiques établies par [Rajamane et Jeyalakshmi \(2014\)](#)

Suivant que la préparation d'activateurs 12M, 14M et 16M, respectivement. Les solutions SH ont été préparées 24h plus tôt pour réduire la forte élévation de température due à la réaction entre les pastilles HS et l'eau et ajoutées au gel SS 2h avant la coulée pour de meilleures performances, en utilisant un rapport SS/HS de 2,5:1. Ainsi que, le gel SS comprend Na_2O , SiO_2 , et H_2O de 9,4%, 30,1% et 60,5% respectivement, avec $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Rapport pondéral de 3,20 et GS de $1,40\text{g}/\text{cm}^3$ à 20C° [Oyebisi et al \(2020\)](#). Dans la mesure où un superplastifiant liquide de polycarboxylate (PC 711) a été utilisé pour améliorer la maniabilité des mélanges de mortier GP frais. Le mélange a été utilisé à des teneurs différentes allant jusqu'à 6% (en poids) des matériaux de base, [Haddad et Lababneh \(2019\)](#), de même ceci est un (réducteur d'eau (PCE)) utilisé pour ajuster l'ouvrabilité du mélange de béton, [Wang et al\(2020\)](#). Les rapports silice/oxydes d'aluminium pour l'OSA, le PN et leur mélange à 3,7, 2,9 et 3,3,

respectivement, sont proches de ceux des matériaux supplémentaires conventionnels énumérés dans [Tableau 1, Haddad et Lababneh \(2019\)](#).

Tableau 2 : composition d'oxyde d'OSA par rapport aux matériaux de base conventionnels obtenue par DRX.

composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	$\frac{B_*}{C}$
Symbole	une	B	C	ré	E	F	g	H	3.7
OSA	46.66	20.02	5.46	2.4	3.07	1.04	0.93	4.39	2.9
PN	9.70	40.17	13.86	15.16	9.57	1.53	3.66	0.09	17.2
POFA[28]	5.80	64.17	3.73	6.33	4.87	8.25	0.18	0.72	2.4
GBFS[29]	42.85	33.78	13.97	1.44	5.24	0.4	0.10	0.49	4.8
FA [30]	2.65	70.79	14.65	5.90	0.26	2.35	0.13	0.17	1.5
MK[30]	0.11	58.39	38.20	1.7	0.24	0.18	0.27	N/A	2.4
étang FA[31]	5.53	52.133	22.09	8.47	1.77	1.61	0.42		

Le rapport massique du silicate de sodium à l'hydroxyde de sodium a été maintenu égal à 0,5, 1, 2 et 3. Les combinaisons de solutions et les concentrations ont été choisies après une étude détaillée de la littérature [[R. Firdous et al \(2018\)](#), [JNY Djobo et al \(2017\)](#)] pour couvrir de nombreux facteurs d'influence pour les propriétés du géopolymère avec un nombre réduit d'échantillons, [Firdous et Stephan \(2019\)](#).

II.2. Techniques et essais

Les bétons de pouzzolane naturel / laitier activés par les alcalis (AANPS) ont été conçus en faisant varier la combinaison de précurseurs d'aluminosilicate (proportions de pouzzolane / laitier naturelles de 70/30, 50/50 et 30/70), [Najimi et al \(2019\)](#). Les échantillons de pâte de géopolymère ont été préparés par [Firdous et Stephan \(2019\)](#) et mélangés par une durée de 3 minutes. La pâte a été coulée dans 20mm cubes moules, puis compactés pendant 2 min. Avec des particules fines ont été utilisées dans des mélanges MGP à un pourcentage constant de 70% de la masse totale du mélange. Les échantillons prismatiques de (40×40×160mm³) étaient coulés en utilisant différents mélanges MGP pour une détermination ultérieure de la résistance et de la porosité capillaire. Chacune tassée 12 fois pour éliminer l'air emprisonné conformément aux spécifications [EN196-1](#).

[Haddad et Lababneh \(2019\)](#), [Wang et al \(2020\)](#), ont préparés des bétons dans des moules en acier avec les dimensions de 100*100*100 mm, φ100*200 mm et 100*100*400 mm. Toutes les procédures ont été effectuées sous la température de 20 ± 2C°. Les éprouvettes de béton ont été démoulées à 24 h après le coulage. En revanche la production de béton et ciment qui est faite par [C.M. Ikumapayi et al\(2020\)](#), là où ils ont brûlés les coquilles d'arachides et

chauffer les cendres dans un four pendant 2h à 650C°, ensuite broyées et tamisé à 50µm. La conception du mélange de béton ordinaire de M15 était adopté le ciblage de 15N/mm². Des cubes de béton pour le test ont été produits à 150 mm³ avec un mélange de ciment (OPC), sable et granulats rapport de 1: 2: 4 [BS EN 14630-12] et rapport eau-ciment de 0,6. Les ingrédients du béton sont groupés en volume, soigneusement mélangés et compactés avant le moulage. D'autres compositions de mélange ont également été produites en remplaçant partiellement OPC par 8, 12 et 16% de GSA sans modifier le rapport ciment, sable, agrégat. Divers pâte de ciment de 50 mm³ remplacé partiellement par 8% et 16% de GSA, une composition témoin qui ne contient pas de GSA a également été produite. Les pâtes ont durci pendant 7 à 28 jours dans l'eau et caractérisés plus tard par XRD et MEB [Mark Bediako et al (2018)].

En dépit quelques quantités de mélange ont été examinées selon BS EN 206. Le pourcentage de remplacement du GGBFS par l'CCA est à 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100% pour la production de GPB et a été indiqué comme E₁, E₂, E₃, E₄, E₅ et E₆, tandis que le PCC (100%PLC) était indiqué par E₀. Themix a été conçu pour atteindre des résistances cibles de 30MPa et 40MPa pour le béton de grades M30 et M40, respectivement. Et pour la Préparation du mélange, coulée et durcissement, les constituants secs ont été préparés selon les procédures prescrites par BS 1881 125 et BSEN 12390-12392, Oyebisi et al (2020).

Ainsi que, K. Ardoğa et al (2019) ont divisés les ciments en sous-groupes de taille de ciment <10, 10–35, 35–50 et > 50 µm par tamisage, pour chaque groupe de ciment, 5 sous-groupes de ciment (4 tamisés et 1 non tamisé) ont été obtenus. En nommant les sous-groupes, la lettre «U» indique les ciments non tamisés. Les chiffres qui suivent la lettre «P» représentent les tailles de tamis sur lesquels le ciment est retenu et traversé, respectivement. Donc, 11P 10-35 a été tamisé à partir d'un ciment contenant 11% de pouzzolane naturelle et 4% gypse (groupe de ciment 11P), pour passer le tamis de 35 µm d'ouverture et est retenu sur le tamis à ouverture de 10 µm. En revanche, 0PU est le sous-groupe du ciment non tamisé qui ne contient pas de pouzzolane naturelle (seulement 5% de gypse). Les distributions granulométriques des sous-groupes de ciment ont été obtenues par la diffusion de la lumière à faible angle (diffraction laser). Les parties réelles des indices de réfraction ont été choisis comme 1,73 et 1,50, respectivement, pour le ciment portland et la pouzzolane.

De même cinq mélanges de béton activé par les alcalis (BAA) à base de NP ont été préparés par Ibrahim et al (2020), le PN a été partiellement remplacé de 0 à 7,5% par nSiO₂ (voir tab 4). Salazar et al (2019) ont réalisés une homogénéisation à sec des précurseurs (70% NP + 30% GBFS) Avant le processus de mélange. L'activateur alcalin représentait 52,5% de celui

de la teneur en liant, qui a été synthétisé en mélangeant la quantité requise de SS et de SH ayant un rapport pondéral de 2,5, avant 24 h de coulée, [Ibrahim et al \(2020\)](#).

Pour le dosage MGP les paramètres de mélange comprenaient du (SN/HN) à des rapports de 2 et 2,5 (en poids), une solution de HN à deux molarités de 10 et 12M et du SNHN au liant à des rapports compris entre (0,3 et 0,4) et de l'eau ajoutée avec le rapport eau-liant GP (W/GPB) constant à 0,45 avec la consistance normale, réalisée selon la méthode d'essai EN 1015-4, a été obtenue pour tous les mélanges à $35 \pm 5 \mu\text{m}$ avec un superplastifiant utilisé chaque fois que nécessaire à 3% de la masse du liant, [[ASTM](#)], [Haddad et Lababneh \(2019\)](#).

De même, une solution aqueuse des activateurs ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) a été utilisée pour atteindre un rapport molaire $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} = 1,1$, [Salazar et al \(2019\)](#). D'autre part, une combinaison d'activateurs alcalins (proportions de silicate de sodium /hydroxyde de sodium de 20/80, 25/75 et 30/70) et des concentrations d'hydroxyde de sodium (1, 1,75 et 2,5 M) a été réalisé pour obtenir des mélanges avec un rapport solution d'activateur sur précurseur d'aluminosilicate de 0,54, [Najimi et al \(2019\)](#). Les constituants secs ont été préparés par [Oyebisi et al \(2020\)](#) selon [BS 1881-125](#) et [BS EN 12390 12392](#) en préparant et en versant du béton frais dans un moule cubique de 150 mm³ pour l'essai de résistance à la compression à 90 jours, et 150 mm de hauteur, 600 mm de longueur pour un test de résistance à la flexion à 7, 28, 56 et 90 jours. L'échantillon frais a été compacté au hasard chacun en trois couches, polymérisé sous 25 °C et 65% HR.

En revanche, les mélanges ont été scellés à $22 \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de 100% jusqu'à l'âge du test. À 28 jours, les échantillons ont été lyophilisés par un procédé d'échange de solvants utilisant de l'isopropanol suivi d'un séchage des échantillons dans un dispositif de lyophilisation pendant 7 jours. Plus tard, les échantillons ont été broyés à la main dans un mortier et un pilon et ont été soumis à différentes analyses si nécessaire, les échantillons ont été stockés dans un dessiccateur avec de la chaux sodée pour réduire l'effet de la carbonatation, [Firdous et Stephan \(2019\)](#). Les surfaces des prismes coulés étaient finies et laissés au repos pendant 24h puis séchés à sec dans un four électrique pendant encore 24h à 60°C avant de laisser sécher à température ambiante jusqu'à l'âge de 7 et 28 jours, [Haddad et Lababneh \(2019\)](#).

D'autre part, Après le démoulage, les échantillons ont été durcis dans des conditions de laboratoire ($20 \pm 3^\circ\text{C}$ et $70 \pm 10\%$ de la température ambiante et de l'humidité relative, [Salazar et al \(2019\)](#). [Ibrahim et al \(2020\)](#) ont placés les échantillons dans des sacs en plastique et durcis dans laboratoire qui a été maintenu à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$. Jusqu'à ce que l'âge du test soit atteint.

II.3. Les essais

II.3.1. La caractérisation microstructurale :

La caractérisation microstructurale du liant (AABB) était basée sur les techniques complémentaires XRD et spectroscopie à dispersion d'énergie-microscopie électronique à balayage (SDE-MEB), [Salazar et al \(2019\)](#). Autrement une (XDR) a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre Empyrean PANalytical avec CuK une radiation ($k = 1,540598 \text{ \AA}$) et filtre Ni, fonctionnant à 40 kV et 40 mA en mode continu avec une résolution de 0,0131 et une vitesse de 0,0176/s pour la plage de 5 à 65 pendant 1h, [Haddad et Lababneh \(2019\)](#), [Wang et al \(2020\)](#). La distribution granulométrique a été mesurée à l'aide du Mastersizer 2000 de Malvern Et la composition chimique de toutes les (PN) a été déterminée en utilisant une analyse de fluorescence X en utilisant PW 2400, PHILIPS [Firdous et Stephan \(2019\)](#).

De même, mais avec XRD selon [TS EN 196-2](#), [K. Ardoğa et al \(2019\)](#).

II.3.2. La chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation a été mesurée sur des mortiers AANPS en utilisant des cylindres de 100 mm sur 100 mm enfermés dans des boîtes isolées, [Najimi et al \(2019\)](#). Ainsi que, celle des sous-groupes de ciment ont été mesurées à 23°C en utilisant un calorimètre à conduction isotherme et en utilisant la procédure in-situ dans [ASTM C 1702](#), [K. Ardoğa et al\(2019\)](#).

Tandis qu'une analyse calorimétrique à flux thermique utilisés par [Firdous et Stephan\(2019\)](#) par le dispositif MC-CAL 100P, C3 Prozess- und Analys en technik GmbH, Allemagne et (ATG) a été réalisée en utilisant l'instrument TG 209, Tarsus F3, Netzsch sous une atmosphère d'azote à un débit de 250 ml/min. Pour chaque test, 10 ± 1 mg d'échantillon ont été utilisés. L'échantillon a d'abord été maintenu à 25 ° C pendant 20 min, puis chauffé de 25°C à 850°C, et de même jusqu'à 1000°C L'instrument Netzsch STA 449C à une vitesse de chauffage de 10°C/min. Ce flux a été mesuré par un calorimètre isotherme I-Cal 8000, les pâtes ont été préparées par mélange rapide pendant 1 min suivi d'une injection immédiate d'environ 10 g de pâte dans le récipient pour mesurer la vitesse de dégagement de chaleur à 20°C en 7 jours, [Wang et al \(2020\)](#).

II.3.3. La résistance à la compression

Qui a été obtenue par une presse universelle LLOYD LR50K en testant des éprouvettes cubiques de 50 mm pour mortiers (AABM) ([ASTM C109](#)) et d'autre de 20 mm pour les pâtes (AABB), [Salazar et al \(2019\)](#). Ainsi que des éprouvettes du béton de taille similaire à (AABM) ont été surveillée pendant 180 jours par [Ibrahim et al \(2020\)](#). Cependant, [Najimi et al \(2019\)](#) a réalisé le test de compression sur des cylindres de 100 x 200 mm conformément a la norme [ASTM C39](#).

De même, pour [C.M.Arum et al \(2020\)](#) La préparation du cube de béton, la procédure d'essai et l'analyse étaient selon [ASTM C109-15](#) est déterminée à l'aide d'un INSTRON 5000R UTM suivant par [BS EN 12390 4](#) et [BS EN 12390 5](#) dans un régime de force constante sous une charge taux de 0,6MPa et 0,06MPa par seconde, Rc et Rf respectivement. Trois (3) échantillons ont été fabriqués et écrasés pour chaque ID de mélange, et la moyenne a été utilisée pour l'analyse, [Oyebisi et al \(2020\)](#).

Mais, les spécimens MGP ont d'abord été testés pour Rf et Rc en utilisant trois éprouvettes prismatiques sous une charge au troisième point, décrit par EN 1015-11, EN 1015-11 respectivement. Les forces ont été déterminées comme les lectures moyennes de 3 à 6 échantillons, qui ont montré des valeurs proches à un coefficient de variation de moins de 6%, ([Haddad et Lababneh \(2019\)](#)).

II.3.4. La résistance à la traction

Pour mesurer la résistance à la traction par flexion de l'AABM, des éprouvettes de 40 mm x 40 mm x 160 mm ont été préparés conformément à la norme [ASTM C348-14](#), [Salazar et al \(2019\)](#). Ainsi que des cylindres de 100 x 200 mm ont été utilisés dans l'étude de [Najimi et al \(2019\)](#) conformément à [selon ASTM C496](#).

De même qu'indice d'activité de force (ISC) avec Le SAI a été déterminé conformément à la norme [BS 3892 1](#) et le rapport E/L a été modifié pour tenir en compte des mêmes propriétés d'écoulement avec des cubes de mortier de ciment selon [EN.1015-3](#), nécessitant donc un eau de gâchage de 235ml d'eau distillée. Par conséquent, le SAI a été déterminée pour les résistances à la compression (CS) de 7 jours et 28 jours sur la moyenne de trois échantillons en utilisant la relation, comme illustré dans l'Eq. 1 [selon BS 3892 1](#).

$$\text{SAI; \%} = \frac{P}{C} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Où P est le CS moyen des cubes de mortier de ciment de référence pouzzolane (en MPa)

C est le CS moyen des cubes de mortier de référence (en MPa).

Les cubes de mortier de référence au ciment, à 7 jours et 28 jours, ont montré un CS de 40,64 MPa et 50,43 MPa, respectivement.

En suivant la formule, comme illustré dans l'Eq. 1, la pouzzolane test (CCA) a présenté un ISC de 0,85 et 0,91 à 7 jours et 28 jours, respectivement, montrant ainsi une activité pouzzolanique considérable parce que SAI est supérieur à 0,80, comme recommandé par [BS 3892 1](#). [Oyebisi et al \(2020\)](#).

II.3.5. L'affaissement

L'affaissement des mélanges de béton a été mesuré lors du dosage conformément à la norme ASTM C143, Najimi et al (2019).

II.3.6. La résistance a la rupture

La résistance à la rupture de l'AABM a été évaluée à 28 jours dans des cylindres d'un diamètre de 60 mm (rapport hauteur / diamètre = 2) en adaptant la procédure décrite dans la norme l'ASTM C496-17. Salazar et al (2019).

II.3.7. Module élasticité

La détermination du module d'élasticité sécant en compression (EN 12390-13) de l'AABM (28 jours) a été réalisée à l'aide de cylindres d'un diamètre de 60 mm (rapport hauteur / diamètre = 2), Salazar et al (2019). Le test a été réalisé sur des cylindres de 100 x 200 mm (ASTM C469), Najimi et al (2019).

II.3.8. Mesure du retrait

Le test de retrait au séchage a été effectué sur la base de la norme ASTM C157 utilisant des prismes de 75×75×285 mm, 40 mm x 40 mm x 160 mm par Najimi et al (2019), Salazar et al (2019), respectivement.

D'autre façon, les prismes préparés ont été durcis pendant 28 jours avant d'être transférés dans une chambre à humidité contrôlée ($50 \pm 5\%$ d'humidité relative), contrairement celles taille de 100×100×400 mm ont été démoulés à 24h suivi d'un durcissement à $20 \pm 2\text{ C}^\circ$ et à l'humidité avec relative humidité de $98 \pm 2\%$ pendant 2 jours supplémentaires. Après cela, les échantillons ont été déplacés dans une chambre avec $65 \pm 5\%$ HR et $20 \pm 2\text{ C}^\circ$ pour effectuer un test de retrait libre, Najimi et al (2019), Wang et al (2020), respectivement.

La densité fraîche et durcit du béton a été déterminée selon ASTM C138 et en utilisant des cylindres de 150 x 300 mm, Najimi et al (2019).

II.3.9. Porosité

Une porosimétrie par intrusion de mercure a été réalisée sur des mélanges sélectionnés pour évaluer leurs distributions de taille de pore. A cet effet, un certain nombre d'échantillons (dimension 1 cm) ont été soigneusement choisis pour chaque mélange sélectionné, séchés sous vide et testés. Najimi et al (2019). Ainsi que La structure des pores du béton à 2 mois et 2 ans a été déterminée en se basant sur la méthode de prosimètre par intrusion de mercure (MIP). L'instrument était un testeur de distribution de la taille des pores Auto Pore IV 9500. Les grains de mortier d'un diamètre de 4 à 6 mm ont été éclatés de la partie centrale des prismes en béton et ensuite immergés dans l'éthanol pendant 3 jours pour arrêter l'hydratation. Ensuite, les grains ont été séchés à 60 C° pendant 24h avant le test, Wong et al (2020).

II.3.10. L'absorption

Le coefficient de l'absorption capillaire de l'AABM a été déterminé à 28 jours de durcissement sur la base de la norme EN 1015-18, Salazar et al (2019). En outre l'absorption et les vides totaux des bétons développés ont été obtenus en utilisant la méthode décrite dans ASTM C642 et sur des disques de 100 x 50 mm. Najimi et al (2019).

Les prismes MGP (durcis pendant 28 jours) ont été testés pour le coefficient d'absorption d'eau dû à l'action capillaire selon la méthode d'essai EN 1015-18; les mesures de trois prismes de test ont été moyennées pour les valeurs de test, Haddad et Lababneh (2019).

II.3.11. Évaluation du changement de longueur

La procédure d'évaluation du changement de longueur a suivi les recommandations de la norme l'ASTM C490-17. Pour cet essai, les mesures ont été enregistrées une fois les poutres durcies et ont pu être démoulées (≈ 2 h pour l'AABM et 24 h pour le matériau de référence (substrat OPC)) et continué jusqu'à 28 jours de durcissement. Les échantillons ont été conservés dans des conditions de laboratoire (20 ± 3 ° C et $70 \pm 10\%$ d'humidité relative), Salazar et al (2019).

Tandis que, Wang et al (2020) ont été placés les prismes verticalement sur les plaques d'acier épaisses, la face supérieure recouvrant une plaque de verre de 70×70 mm. Le comparateur à cadran était fixé sur le prisme avec la tête de mesure fixant étroitement le verre pour mesurer le changement de longueur en temps réel. De cette manière, le libre retrait des bétons à différents âges a été déterminé.

II.3.12. Les temps de prise :

Les temps de prise des bétons étudiés ont été évalués selon ASTM C403, Najimi et al (2019).

II.3.13. Test chimique

Pour la résistance au chlorure, après durcissement les disques de béton de 100 mm de diamètre et 50 mm de hauteur ont été découpés dans la partie médiane du U Échantillons cylindriques de 100*200 mm² les disques ont d'abord été saturés avec de l'eau déionisée dans une chambre à vide puis soumis au potentiel de 60 V pendant 6 h. La charge passée à travers les disques a été utilisée pour évaluer la résistance aux chlorures et lors de durcissement des prismes 100*100*400 mm³ durcis pendant 2 mois ont été soumis à la carbonatation accélérée en laboratoire et carbonatation atmosphérique dans une pièce aérée, respectivement.

Le test de pénétration rapide du chlorure et l'expérience de carbonatation accéléré ont été réalisés selon GB / T 50082, Wang et al (2020).

Etant donné que les essais d'activité hydraulique avec test de soude caustique (CST) Cette méthode a été réalisée en suivant la procédure décrite dans [ASTM C 1073-18](#). La solution diluée au GGBFS le ratio était fixé à 0,5 et utilisé pour préparer 40mm*40mm*160mm³ Échantillons prismatiques. Après 6 h et 24 h, tous les échantillons ont été démoulés et testé pour FC.

ET pour un test de durabilité, la résistance chimique a été réalisée sur les échantillons de cubes préparés en utilisant les solutions d'acide sulfurique (H₂SO₄) à une concentration de 2% [[A.M. Neville \(2011\)](#)] selon [E.N. 16523-1](#) pour les attaques acides. Les spécimens de béton ont été testés pour la perte de poids et de résistance après 90 jr d'immersion en (H₂SO₄). Les compositions d'oxyde des matériaux de liaison, CCA, GGBFS et PLC, ont été analysées à l'aide du spectrophotomètre FRX machine, Philips PW-1800. Le comportement microstructural des matériaux de liaison, GGBFS, CCA et PLC, a été examiné à l'aide de la machine SEM, JEOL7000600, pour établir les caractéristiques qui ont influencé les IR de chaque liant. L'analyse SEM a été réalisée sur un plat (général) scan. Pour l'enquête, la tension accélérée était constante à 15 kV, tandis que les images ont été observées à 4000x grossissement dans un vide poussé, [Oyebisi et al \(2020\)](#).

L'Indice d'activité des scories a été réalisé selon [ASTM C 989](#) pour le GGBFS.

En effet, Les tests d'activité pouzzolanique comme le Test de Frattini (TF) a été analysé suivant [BS EN 195-5](#). La concentration maximale théorique (CMT) de [CaO] a été déterminée en utilisant la relation, comme illustré dans l'Eq2selon [BS EN 195-5](#). Comme représenté sur la [Tableau 4](#), le [CaO] a été comparé au CMT [CaO], et le résultat a été déterminé comme la différence entre les deux valeurs, exprimée en pourcentage de CMT éliminé. L'activité pouzzolanique du CCA, comme le montre [Tableau 3](#), éliminé la chaux avec 51%, indiquant ainsi que le CCA est actif sur le plan pouzzolanique.

$$CTM [CaO] = \frac{350}{OH-15} \dots\dots\dots(2)$$

Tableau 3 : composition d'oxyde d'OSA par rapport aux matériaux de base conventionnels obtenue par DRX.

Echantillon	[OH] mmol .l ⁻¹	[CaO]mmol .l ⁻¹	TMC[CaO]mmol.l ⁻¹	[CaO] réduction (%)
Contrôle	56.83	8.25	8.37	0.70
CCA	39.72	4.63	14.16	50.72

Ainsi qu'un Index de réactivité (IR) des liants ont été évalués en utilisant les principaux oxydes réactifs tels que CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO et SO₃ suite à l'établissement de leurs compositions d'oxydes, qui reflètent à la fois des réactivités pouzzolaniques

[T. Xie, P. Visintin (2018), Oyebisi et al (2019), M. Behim (2013)]. Le concept qui guide les IR est illustré dans l'Eq 4–8 comme réactivité, modules hydrauliques, à la chaux, à la silice et à l'alumine de chaque liant mélangé, indiquant RM, HM, LM, SM et AM, respectivement, Oyebisi et al (2020).

$$RM = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \quad \dots\dots (4)$$

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad \dots\dots (5)$$

$$LM = \frac{1.0CaO - 0.7SO_3}{2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3} \quad \dots\dots(6)$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad \dots\dots(7)$$

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad \dots\dots (8)$$

II.4. Résultats :

II.4.1. Compression :

Mohammed Ibrahim et al (2020) ont constaté que le développement de la résistance à la compression des bétons activé par les alcalin (AAC) modifié avec nSiO₂ était plutôt lent au début du durcissement. Au fil de temps une résistance maximale d'environ 60 MPa a été obtenue dans l'AAC qui a été modifié avec 5% et 7,5% de nSiO₂ après 90 jours.

D'autre part Najimi et al (2019) ont rapporté que l'augmentation de la part de laitier à 70% dans la combinaison de précurseur pouzzolane naturelle/laitier influent positivement sur la résistance des bétons de pouzzolane naturelle / laitier activés par les alcalis (AANPS). Ainsi que l'augmentation de la teneur en silicate de sodium conduit à une meilleure résistance à la compression. Dans le cas des bétons AANPS 1, 1,75 et 2,5, la résistance à la compression de 28 jours a augmenté de 51,9, 33,9 et 35,6%, et ce résultat est enregistré lors de l'augmentation de 20 à 25% de silicate de sodium, et de 28,9, 21,5 et 22,6% respectivement pour 25 à 30%. Ces améliorations observées peuvent être dues à l'amélioration de la microstructure de la pâte (plus homogène) et de la capacité de liaison du gel CSH grâce à la réduction de son rapport Ca / Si.

La proportion du précurseur, la molarité de l'hydroxyde de sodium influent sur la résistance à la compression différemment. L'augmentation de la molarité de l'hydroxyde de sodium de 1 à 1,75 et 1,75 à 2,5 M ont amélioré la résistance à la compression à 28 jours de 6,7 et 6,1% pour les bétons SLAG-50%; et 16,9 et 14,5% pour les bétons SLAG-70%, respectivement.

Des augmentations similaires de la concentration d'hydroxyde de sodium ont entraîné une réduction moyenne de 6,5 et 4,2% de la résistance à la compression à 28 jours des bétons AANPS SLAG-30%. En outre [Salazar et al \(2019\)](#) ont rapporté dans une étude comparative d'une pâte OPC et les pâtes binaires activées par les alcalis (AABB) qu'à un âge précoce (un à sept jours), les performances de la pâte OPC sont légèrement supérieures à celles de l'AABM. Après 28 jours de durcissement, ont observé le comportement inverse. Cependant l'AABM atteint une résistance à la compression de 93,1 MPa à 90 jours, ce qui est 89% supérieur à la valeur rapportée pour la pâte OPC (49,3 MPa). Cette évolution de la résistance a été expliquée par sa microstructure, qui est enrichie par la formation de (N, C) -ASH et / ou C- (A) -SH ([fig.5](#)) (compositions riches en calcium) produits de réaction au fil du temps [[Fernández-Jiménez \(2003\)](#), [I.Garcia-Lodeiro\(2011\)](#), [F. Puertas \(2011\)](#), [I.Garcia-Lodeiro \(2016\)](#)]. [M. Ardoğa \(2019\)](#) ont constaté que l'incorporation de 8% enGSA dans l'OPC a donné une résistance maximale à la compression, lorsque se pourcentage a été dépassé jusqu'à 16% une réduction continue est observé.

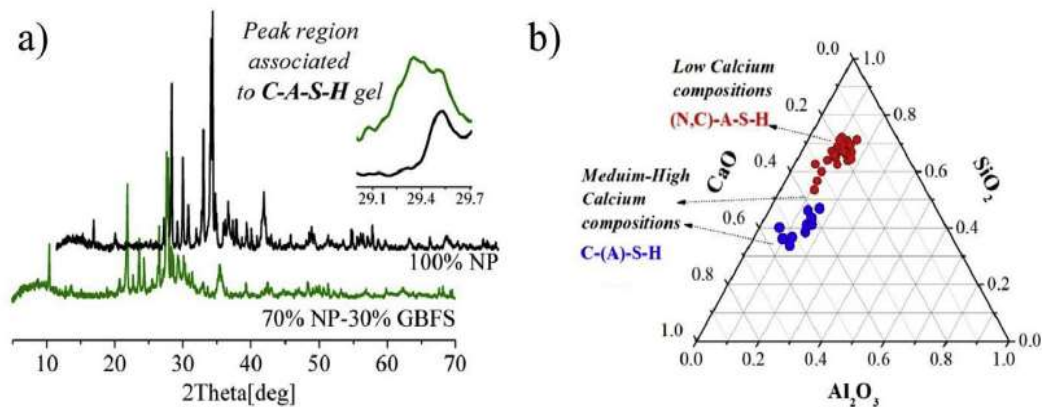


Figure 5 : A).Caractérisation Micro-Structurale sz l'AABB par DRX.
B).Diagramme ternaire CaO, SiO₂ (EDS-SEM). [Salazar et al \(2019\)](#).

II.4.2. Cinétique d'hydratation :

[Yunyao Wang et al \(2020\)](#) ont montré que l'addition de MK augmente l'intensité du pic principal de dégagement de chaleur et déplace la position du pic vers des âges plus anciens([Fig.6](#)). Des résultats cohérents sont également observés dans d'autres recherches [[K. Vance et al \(2013\)](#), [E. Kadri et al \(2011\)](#)]. En outre l'addition d'UFA augmente encore l'intensité du pic principal de dégagement de chaleur de la pâte contenant 5% en poids de MK, mais ce phénomène n'est pas observé pour le mélange avec 10% en poids de MK. Cela revient à la taille fine des particules de l'UFA, qui peut fournir des sites de nucléation dans une pâte

contenant 5% en poids de MK et favoriser l'hydratation du clinker à un âge précoce. De même [Najimi et al \(2019\)](#) ont constaté que lorsque le dosage du laitier a été augmenté, les mortiers AANPS ont généré plus de chaleur et atteint un pic de température dans un laps de temps plus court ([fig.6](#)). Cependant [Kemal Ardoğa \(2019\)](#) a rapporté que le taux de dégagement de chaleur est le plus élevé était les ciments OP, qui revient à la quantité de produits d'hydratation la plus faible au début des réactions (car il y a pas d'effet de nucléation) et les couches de pâte hydratée autour des particules de clinker ne sont pas assez épaisses pour inhiber les réactions. À mesure que la quantité de pouzzolane naturelle dans un ciment augmente, on peut s'attendre à ce que son taux de dégagement de chaleur diminue. De sa part [Najimi et al \(2019\)](#) ont rapporté que l'augmentation de la concentration d'hydroxyde de sodium accélère les réactions et augmente le pic de température. La réactivité plus élevée du laitier par rapport à la pouzzolane naturelle peut être liée à son oxyde de calcium élevé car les réactions chimiques s'accélèrent avec l'augmentation de la teneur en chaux du précurseur [[NK Lee, HK Lee \(2013\)](#), [CK Yip \(2004\)](#)]. De plus [Yunyao Wang et al \(2020\)](#) ont rapporté que lorsque NFA est incorporé avec MK, l'hydratation est généralement ralentie par rapport aux échantillons avec addition d'UFA ([Fig.6](#)). Par conséquent, l'effet dilué de l'addition de NFA contrebalance l'effet de nucléation, abaissant le taux d'hydratation du ciment à un âge précoce. De sa part [M. Kemal Ardoğa \(2019\)](#) a constaté que en période dormante, les taux minimum d'hydratation (colonne 5 [Tableau 4](#)) augmentent avec la diminution de la taille moyenne des particules des ciments. Ainsi la durée de la période de dormance augmente généralement avec l'ajout de pouzzolane (de 3P à 22P, colonne 3 en [Tableau 4](#)). Les sous-groupes de taille plus fine du ciment présentent des périodes dormantes plus courtes en raison de leur réactivité physico-chimique plus élevée.

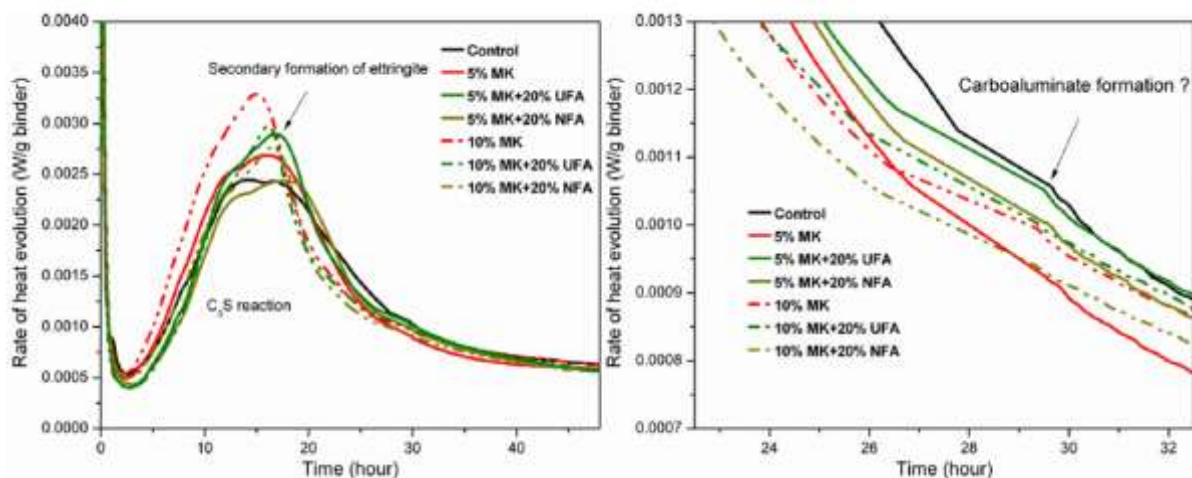


Figure 6 : Taux de dégagement de chaleur des pâtes. [Yunyao Wang et al \(2020\)](#).

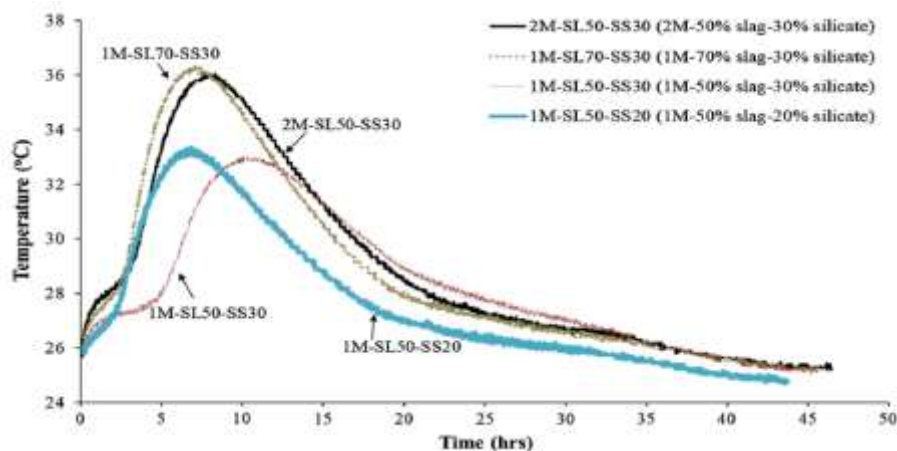


Figure 7 : Chaleur d'hydratation des mortiers AANPS. [Najimi et al \(2019\)](#).

Tableau 4 : Taux de dégagement de chaleur (période dormante). [M. Kemal Ardoğa\(2019\)](#)

Ciments	Heure correspondant au pic et (début de pré-adsorption (min))	Cure de dormance (heures (h))	Temps correspondant à la RHT minimum (min)	RHT minimum pendant période dormance (J / gH)
SPU	4,2	1,23	77,7	2,70
SP5-10	4,4	1,17	85,9	4,83
SP10-30	8,8	1,40	87,9	3,03
SP35-80	8,8	1,42	90,7	1,88
SP50-2000	6,2	1,83	83,8	1,38
SPU	4,8	1,21	70,0	1,73
SP5-10	6,3	1,31	30,7	3,78
SP10-30	8,7	1,18	87,8	1,30
SP35-80	8,0	1,76	122,2	0,89
SP50-2000	4,3	1,21	105,6	0,89
11P1	3,8	1,40	99,7	1,44
11P5-10	4,4	1,38	117,9	2,27
11P10-30	4,6	1,81	108,4	1,28
11P35-80	3,9	1,86	114,9	0,70
11P50-2000	8,1	2,18	144,4	0,88
22P1	4,7	2,02	108,8	1,67
22P5-10	8,8	2,00	123,7	2,86
22P10-30	9,2	2,10	108,3	1,37
22P35-80	8,8	1,82	111,0	1,36
22P50-2000	8,1	2,48	124,0	1,07

II.4.3. Résultats du test d'affaissement :

[Najimi et al \(2019\)](#) ont constaté que le débit des bétons AANPS diminue avec l'augmentation de la part de laitier du précurseur. Cette réduction était plus significative pour les bétons ayant une concentration en NaOH très faible. En moyenne, le taux d'affaissement des bétons AANPS ayant des concentrations (0,5, 1, 1,75 et 2,5 M) de NaOH réduit de 37,5, 17,3, 2,8 et 7,4% lorsque la part de laitier du précurseur est passée de 30 à 50%, respectivement. Pour les mêmes concentrations de NaOH, des augmentations supplémentaires du dosage des scories (c'est-à-dire de 50 à 70%) ont entraîné une réduction moyenne de 85,0, 53,4, 20,0 et 7,1% de l'ouvrabilité des bétons AANPS, respectivement. La réduction observée de la fluidité en augmentant la part de laitier du précurseur. L'augmentation de la fluidité par l'utilisation d'une teneur en pouzzolane naturelle plus élevée, peut être liée à la faible demande en eau de la pouzzolane naturelle utilisée (98%) et à sa granulométrie plus grossière par rapport à celles du

laitier utilisé. Les auteurs ont ajouté que même la portion de silicate de sodium de l'activateur influe sur l'affaissement des bétons AANPS. Lorsque le laitier constituait 30, 50 et 70% de précurseur, des augmentations de la teneur en silicate de sodium de 20 à 25% ont entraîné une réduction moyenne de 6,7, 8,1 et 16,5% de la fluidité des bétons AANPS, respectivement.

Pour les mêmes teneurs en laitier, l'affaissement réduit d'environ de 23,5, 30,1 et 55,4% lorsque la teneur en silicate de sodium a été augmentée de 25 à 30%, respectivement. Cependant, l'affaissement des bétons AANPS a augmenté proportionnellement avec la concentration d'hydroxyde de sodium à un niveau optimal, après, il a diminué avec l'augmentation de la molarité de la solution de NaOH.

II.4.4. Temps de prise :

Dans son étude sur les bétons AANPS, [Najimi et al \(2019\)](#) ont observé que le temps de prise se réduit inversement proportionnel à la portion de laitier. Dans le cas de mélanges avec des concentrations de NaOH de 1, 1,75 et 2,5 M, le temps de prise diminue d'environ de 55,7, 40,0 et 27,6% lorsque la portion de laitier du précurseur a été augmentée de 30 à 50%, respectivement. Pour les mêmes concentrations d'hydroxyde de sodium, des augmentations supplémentaires de la dose de laitier de 50 à 70% ont diminué le temps de prise d'environ 50,1, 38,2 et 29,5%, respectivement. Ces observations, confirme les résultats trouvés sur les pâtes et les mortiers AANPS [[M. Najimi \(2016\)](#)], [Najimi et al \(2019\)](#), ont expliqué l'influence sur le temps de prise par une réactivité initiale plus élevée du laitier par rapport à celle de la pouzzolane naturelle. En outre l'augmentation du silicate de sodium dans la plage étudiée de 20 à 30% de l'activateur alcalin total a retardé les temps de prise des bétons AANPS.

Cependant la réduction du temps de prise vis-à-vis de l'augmentation de la concentration de NaOH était significative pour les mélanges avec une teneur en laitier de 30% et elle est moins influente à mesure que la portion de laitier du précurseur augmentait. Le temps de prise des bétons SLAG-30% a diminué d'environ de 44,3 et 36,3%, car la concentration d'hydroxyde de sodium a augmenté respectivement de 1 à 1,75 et de 1,75 à 2,5 M. Des changements similaires dans la concentration de NaOH ont raccourci le temps de prise d'environ 23,5% et 23,2% pour les bétons SLAG-50%; et 5,6 et 12,6% pour les bétons SLAG-70%, respectivement.

II.4.5. Perte de masse :

[Najimi et al \(2019\)](#) ont constaté qu'en fonction des combinaisons de mélanges, les poids volumique des bétons AANPS se situaient dans les plages de 2377– 2437, 2370–2434 et 2246–2336 Kg/m³, respectivement. Le poids volumique des bétons AANPS augmentait

légèrement avec l'augmentation de la teneur en laitier, de la teneur en silicate de sodium et de la concentration en hydroxyde de sodium.

II.4.6. Module d'élasticité :

[Najimi et al \(2019\)](#) ont signalé qu'une teneur en laitier de 30 à 50% s'est avérée être la plage optimale de la portion de laitier du liant pour les bétons a des concentrations de NaOH [1 et 1,75 M]. Lorsque la molarité de la solution de NaOH a été augmentée à 2,5 M, cet optimum en liants est devenu 50 à 70% de laitier. Le module d'élasticité augmentait lorsque la portion de silicate de sodium de l'activateur était augmentée. Le module d'élasticité des bétons SILICATE-30% était supérieur à ceux de 25% et 20% de 13,3% et 27,6 pour les mélanges 1 M et de 8,0%- 22,5% pour la concentration 1,75 M, ainsi que 2,3% et 31,4% pour les mélanges 2,5 M, respectivement. Par contre l'augmentation de la concentration d'hydroxyde de sodium n'était pas bénéfique pour le module d'élasticité des bétons SLAG-30% [Najimi et al \(2019\)](#). Une augmentation de la concentration de NaOH de 1 à 2,5 M a entraîné une réduction moyenne de 11,6% du module d'élasticité des bétons SLAG-30%. D'autre part, pour les bétons fabriqués avec des liants à 50 et 70% de laitier les modules sont améliorés par des augmentations de la molarité de l'hydroxyde de sodium. En revanche [Salazar et al \(2019\)](#) ont rapporté un module d'élasticité de 8,66 GPa à 28 jours de durcissement, qui coïncide avec la plage (3,8 - 15 GPa) rapporté par [Kheradmand et al en 2017](#) pour des mortiers alcalins. Ces auteurs affirment qu'un ajustement de la teneur en activateur alcalin, c'est-à-dire une réduction de rapport (activateur / liant) en même temps qu'un incrément de rapport ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$) conduit un module d'élasticité plus élevé. Cependant, ces ajustements augmentent également le niveau de retrait et la susceptibilité à la fissuration des mortiers alcalins [[EN Kani \(2011\)](#), [Z. Zhang \(2012\)](#), [E. Vasconcelos \(2011\)](#)].

II.4.7. Résistance à la traction :

[Salazar \(2019\)](#) a rapporté des résistance à la traction par fendage (2,13 MPa) et une résistance a la traction par flexion (3.75MPa) de l'AABM a 28 jours de durcissement. Parcontre [Najimi et al\(2019\)](#) ont attient une résistance à la traction des bétons AANPS comprises entre 2,5 et 5,4 MPa, ce qui est similaire à la plage typique des bétons ordinaire. Il a signalé qu'une augmentation de la portion de silicate de sodium de l'activateur améliore la résistance à la traction. Les résistances à la traction sont améliorées de 29,1 et 17,4% lorsque la teneur en silicate de sodium a été augmentée respectivement de 20 à 25 et de 25 à 30%.

[Najimi et al \(2019\)](#) ont rapporté qu'une augmentation de la concentration d'hydroxyde de sodium a un effet positif sur la résistance à la traction des bétons ayant des portions de laitier 50 et 70%. Les résistances à la traction des bétons de SLAG-30%, 50% et 70% sont améliorés

d'environ de 1,9, 21,0 et 27,6% lorsque la concentration d'hydroxyde de sodium a été augmentée de 1 à 2,5 M. Pour des mélanges à faible concentration de NaOH (1 M) et à faible teneur en silicate de sodium (20 et 25%), l'augmentation de la portion de laitier du précurseur a amélioré la résistance à la traction. Des augmentations de la portion de laitier du précurseur de 30 à 50 et 50 à 70% ont réduit la résistance à la traction des bétons de concentration 1 M d'environ de 1,1 et 4,0%, et pour la concentration 2.5M l'amélioration était d'environ 17,5 et 0,9%.

II.4.8. Absorption

[Najimi et al \(2019\)](#) ont constaté qu'une portion égale de la combinaison pouzzolane/laitier 50/50(niveau optimal) conduita le plus faible volume des vides perméables dans les bétons AANPS. Ainsi l'augmentation de la portion de pouzzolane/laitier (30/70) conduit a des résultats meilleures que celle de pouzzolane naturelle / laitier (70/30) sauf pour les mélanges préparés avec des activateurs ayant une teneur en silicate de sodium de 20%. Cependant une augmentation du dosage de l'activateur (silicate de sodium) a augmenté le volume des vides des bétons SLAG-30%, contrairement aux bétons à 50 et 70%, ces résultats peuvent être liés à la formation du gel CSH par des augmentations de la portion de silicate de sodium de l'activateur. Par contre une légère réduction du volume des vides perméables est observée pour des augmentations de la concentration de la solution d'hydroxyde de sodium. On note un coefficient d'absorption capillaire de 0,5088 kg/m² trouvé par [Salazar et al \(2019\)](#) pour les mortiers de réparation.

II.4.9. Perméabilité et migration des chlorures :

[Mohammed Ibrahim et al \(2020\)](#) ont constaté que la perméabilité au chlorure de tous les bétons a légèrement diminué à mesure que la période de durcissement passait de 28 à 90 jours. La charge totale des échantillons AAC préparés avec 0, 1, 2,5, 5 et 7,5% nano-silice (nSiO₂) était de 551, 527, 456, 327 et 322 C, respectivement. Ces résultats indiquent qu'il y avait une réduction d'environ 4,55, 20,83, 68,50 et 71,12% de la perméabilité au chlorure dans ces échantillons par rapport aux spécimens synthétisés sans nSiO₂. Ainsi la profondeur moyenne de pénétration du chlorure était comprise entre 12,6 et 23,9 mm dans les échantillons AAC durcis pendant 28 jours, qui a été réduite a 90 jours à la gamme de 11,0 à 17,5 mm.

En outre [Najimi et al \(2019\)](#) ont signalés que l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle augmente la profondeur de pénétration des chlorures (voir fig. 8 et 9). Les profondeurs moyennes de pénétration des chlorures dans les bétons SLAG-30% étaient de 2,8 et 3,4 fois les profondeurs de pénétration des bétons 50% et 70%, respectivement.

Cependant une augmentation de silicate de sodium pour une même teneur d'une combinaison de précurseur pouzzolane naturelle/laitier conduit à une augmentation de migration des chlorure ainsi leurs profondeurs pénétrations dans les bétons. en revanche, les profondeurs de pénétration du chlorure dans les bétons SLAG-50% contenant 20, 25 et 30% de silicate de sodium étaient de 36,4, 58,8 et 73,3% inférieurs à ceux des bétons SLAG-30%. Pour des teneurs en silicate de sodium similaires, les profondeurs de pénétration du chlorure ont réduites à 7,8, 16,3 et 19,9% lorsque le dosage du laitier a été augmenté de 50 à 70%, (voir fig. 9). De même les profondeurs de pénétration du chlorure et les coefficients demigration du chlorure augmentaient lorsque la concentration de la solution d'hydroxyde de sodium étaitaugmentée; en particulier pour les bétons SLAG-30%, ce résultat confirme les propos d'une étude sur les mortiers AANPS [M. Najimi (2018)]. Le coefficient de migration des chlorures des bétons fabriqués avec du NaOH 2,5 M était de 49,6, 12,5 et 7,6% plus élevé que ceux ayant du NaOH 1 M pour des doses de laitier de 30, 50 et 70%, respectivement. De sa part Yunyao Wang et al (2020) ont constaté que l'ajout d'ARP peut réduire la charge passée de béton par sa capacité de réduire la concentration d'ions tels que Ca^{2+} , OH^- , Cl^- dans la solution, ce qui indique une meilleure résistance aux chlorures. En outre la structure des pores du béton peut affecter la charge passée, cette observation est indiquée dans l'étude de Najimi (2019) et Mohammed Ibrahim (2020).

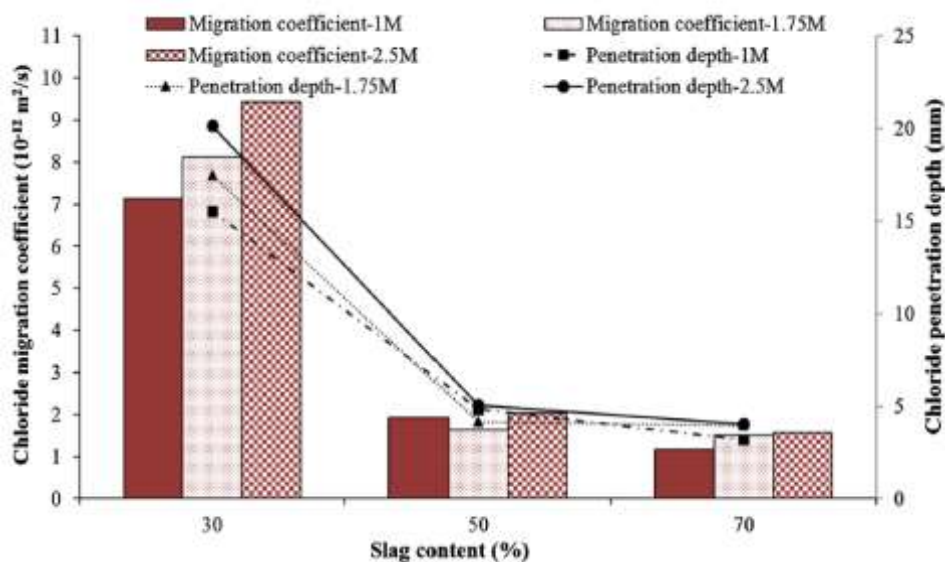


Figure 8 : coefficient de migration du chlorure et profondeur de pénétration du chlorure des bétons AANPS ilicate-30% ayant une combinaison de précurseurs et une concentration NaOH différentes. Najimi et al (2019).

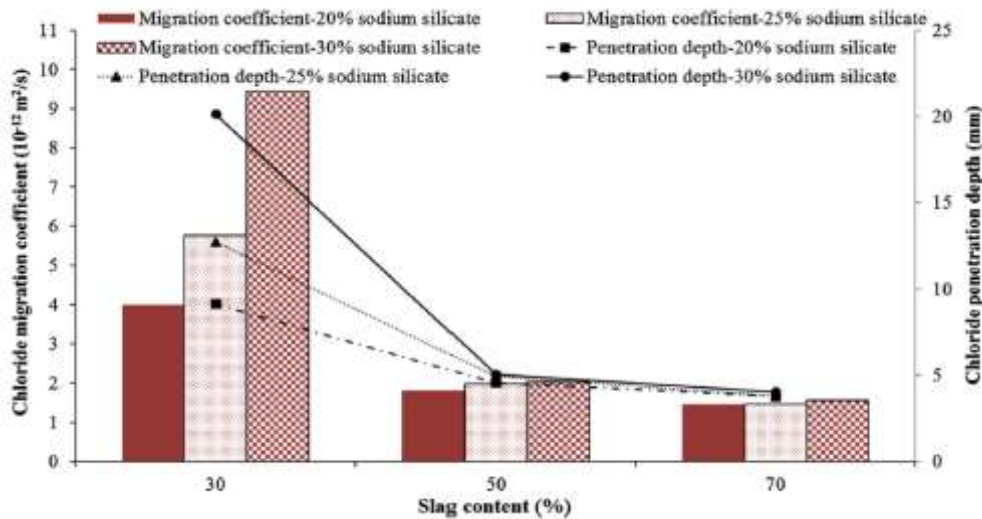


Figure 9 : coefficient de migration des chlorures et profondeur de pénétration du chlorure des bétons AANPS 2,5 M ayant différentes combinaison de précurseurs et d'activateurs. [Najimi et al \(2019\)](#).

II.4.10. Diffraction de rayon DRX :

[Yun Yao Wang et al \(2020\)](#) ont constaté que l'incorporation de 5% de MK présente un signal de diffraction un peu plus évident que celui de la pâte témoin, par contre lorsque 10% de MK est ajouté, il y a un changement négligeable concernant le pic de diffraction de Mc, mais un pic de diffraction évident attribué à Hc est généré, et cette tendance est plus évidente lorsque NFA ou UFA est incorporé ([Fig.10](#)). Les auteurs ont montré qu'après 1 an la pâte est sévèrement diluée par la poudre d'agrégat de béton, le pic de diffraction du produit d'hydratation est très petit, mais l'existence de carboaluminate de calcium peut encore être observée. la diffraction de Mc est évidemment plus forte que Hc pour les mélanges avec 10% en poids de MK ou 5% en poids de MK combinés à 20% en poids de FA, alors que les phénomènes contraires sont identifiés pour les mélanges de pâte avec le même montant d'ARP à 28 jours (voir dans [Fig.10](#)). Cela indique que Hc peut se convertir en Mc pendant le durcissement de longue durée [[HJ Kuzel, H. Pöllmann \(1991\)](#)], et cette transformation est liée à la dissolution continue de la calcite n'ayant pas réagi, comme abordé par d'autres chercheurs [[M. Zajac et al \(2014\)](#), [K. De Weerd et al \(2011\)](#)]. Par contre le diagramme de diffraction des rayons X obtenu dans l'étude de [CM Ikumapayi \(2020\)](#) sur les pâtes OPC, GSA8 et GSA16 à 7 jours et 28 jours, ont montrés que la silice est la plus dominante dans GSA 8 par rapport aux autres pâtes en termes d'intensités de pic intégrées. Aussi Les modèles XRD ont également révélé plus de pics et des intensités plus élevées de calcite (CaCO_3) dans GSA16 et OPC que celle observée pour GSA8. Sa présence en moindre proportion dans GSA8 après 7 jours et 28 jours de durcissement suggère plus de réaction d'hydratation dans GSA8. Cette position est

cohérente avec de plus grands pics intégrés de C UNE S UNE H observé pour GSA 8 par rapport à celui observé dans OPC et GSA 16. Il est à noter qu'une plus grande quantité de C UNE S UNE H dans un mélange de béton doit correspondre à un renforcement plus important [IG Richardson (2006)]. C'est parce que le GSA, contient plus de silice et moins de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (chaux) que le ciment Portland seul, donc hydratation du ciment mélangé GSA produit plus de C UNE S UNE H et moins de chaux que le ciment Portland seul. Cela a abouti à un béton de microstructure plus dense [K. De Weerd et al (2006)].

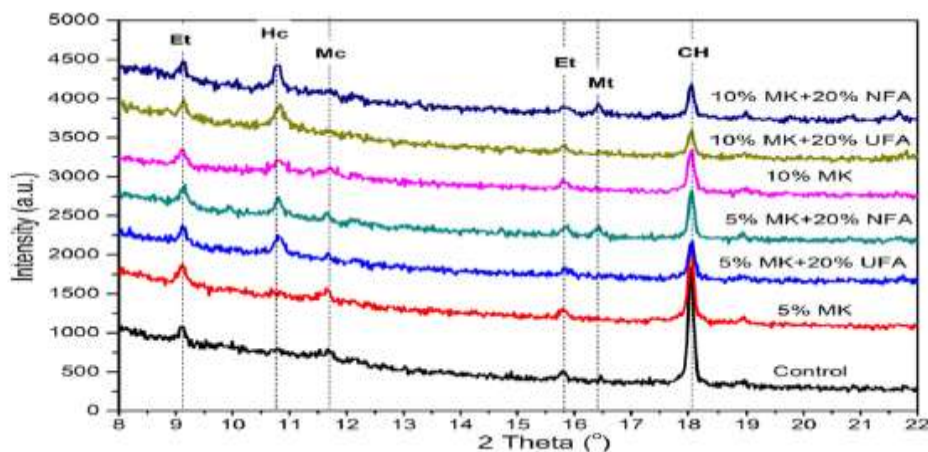


Figure 10 : Modèles DRX de pâtes à 28 jours.

II.4.11. Retrait :

Najimi et al (2019) ont montré que l'augmentation de la portion de laitier jusqu'à 50% et 70% dans les bétons AANPS a donné des résultats supérieurs aux bétons SLAG-30%, mais cette influence a diminué avec l'augmentation de la concentration de NaOH (Fig.11 et 13). Dans le cas de mélanges 1 M, les retraits ultimes des bétons SLAG-50% et SLAG-70% étaient en moyenne respectivement de 39,3 et 41,9% inférieurs à ceux des bétons SLAG-30%. Ces améliorations étaient de 35,2 et 31,8% pour 1,75 M; et 33,2 et 20,0% pour 2,5 M respectivement. Cependant l'augmentation de dosage de silicate de sodium de 20, 25 et 30%, améliore le retrait final d'environ 27,8, 38,6 et 31,3% en moyenne lorsque la portion de laitier du liant a été augmentée de 30 à 50%, respectivement, et les bétons SLAG-70% ont légèrement rétréci en moyenne de 2% de plus que les bétons SLAG-50% (Fig.11 et 13). En ce qui concerne la combinaison d'activateurs ces bétons rétrécissaient davantage lorsque la dose de silicate de sodium était augmentée. En moyenne, le retrait au séchage ultime des bétons 1 M a augmenté de 48,7 et 20,6% lorsque la teneur en silicate de sodium a été augmentée de 20 à 25 et de 25 à 30%, respectivement. Des augmentations similaires de la teneur en silicate de sodium ont augmenté le retrait au séchage final d'environ 39,2% et 28,1% pour les bétons

1,75 M; et 33,4 et 12,6% pour 2,5 M de bétons, respectivement (Fig.11 et 13). Ces observations sont similaires aux conclusions de Cincotto et al. (2003), Atis et coll. (2009), Aydin et Baradan(2014) et Deb et al. (2015). Alors que la concentration d'hydroxyde de sodium était moins efficace que les combinaisons de précurseurs et d'activateurs, son influence sur le retrait de séchage final était fortement dépendante de ces combinaisons (Fig.11 et 13). de sa part Yunyao Wang (2020) ont constaté que le retrait libre est réduit de 11,4% pour une addition de 5% en poids de MK et 15,6% pour 10% en poids d'addition de MK à l'âge de durcissement de 170 jours, ce qui concorde avec l'étude de Brooks et al. (2011). En plus, il devrait à noter que l'incorporation de MK augmente le retrait libre pendant les 14 premiers jours, des résultats similaires ont été rapportés dans un autre recherche [54]. Ainsi que parmi tous les échantillons, le béton avec 10% en poids de MK et 20% en poids d'UFA permet d'obtenir le retrait libre le plus bas de 357,15 $\mu\text{m} / \text{m}$, qui est inférieur de 31,1% à celui du témoin. Pour le système PLC, l'ajout d'AFP (sans alumine pouzzolane) améliore la stabilité du volume par la formation de Gels CSH pour densifier la microstructure et par conséquent limiter le retrait dans l'environnement de séchage. De plus Salazar et al (2019) ont rapporté un pourcentage de retrait à 28 jours de - 0,37% pour l'AABM et 0,08% pour le substrat OPC (Fig. 12). Ils ont noté que même avec ce niveau de retrait (élevé), le revêtement ne présentait pas de signes de fissuration de surface (fissures). Les auteurs ont signalé que l'incrément du rapport précurseur/ sable est un paramètre de contrôle du retrait. Le sable agit comme un renfort dans la matrice, c'est-à-dire qu'une augmentation de ce rapport fournirait une stabilité dimensionnelle élevée pour le matériau. Cependant, les performances mécaniques et le niveau d'adhérence au substrat peuvent également diminuer.

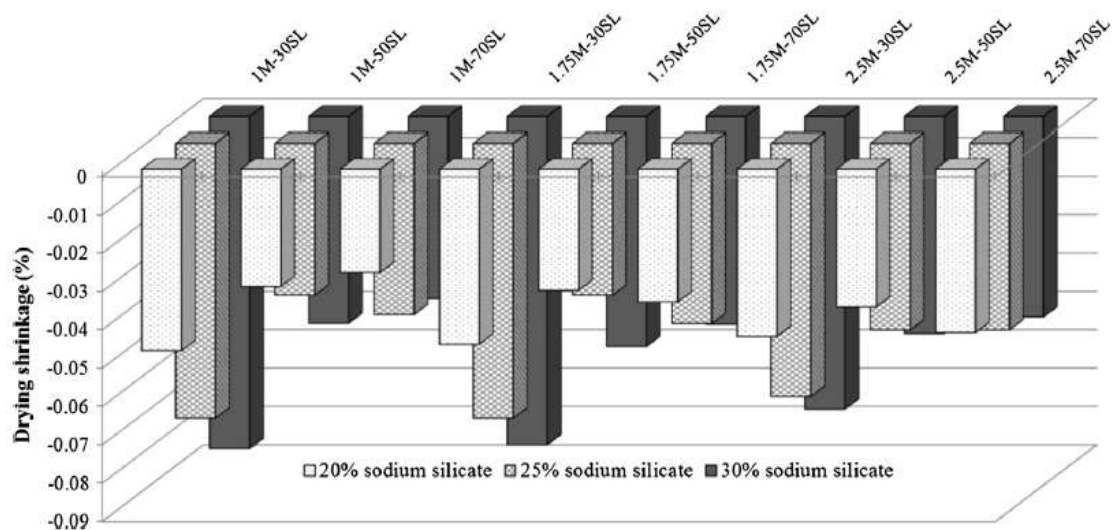


Figure 11 : Retrait de séchage ultime des bétons AANPS. Najimi et al (2019).

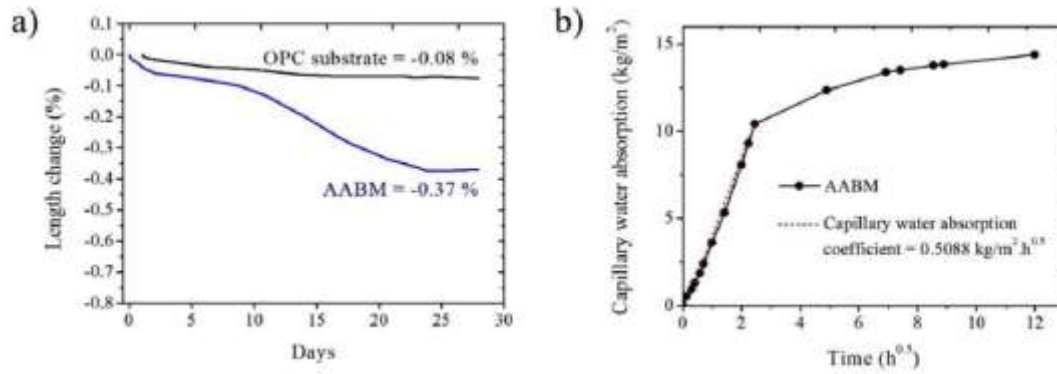


Figure 12: a) niveau de retrait du substrat AABM vs OPC et b) Absorption capillaire d'eau de l'AABM. Salazar et al (2019).

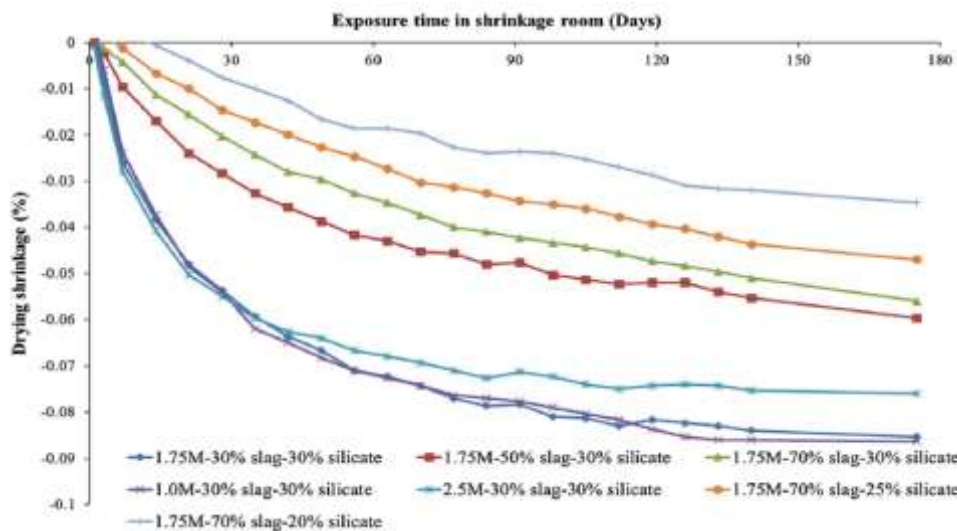


Figure 13 : Retrait de séchage des bétons dans AANPS dans le temps. Najimi et al (2019).

II.4.12. Composition chimique :

CM Ikumapayi (2020) a constaté que la silice est le principal constituant chimique du GSA qui serait responsable du déclenchement de la cimentation comportement présenté par les pouzzolanes. En revanche CM Kemal Ardoğa (2019) a signalé que la teneur en oxyde des sous-groupes de ciment change avec la teneur en pouzzolane et la taille moyenne des particules. Aussi l'augmentation de la pouzzolane, diminue la teneur en chaux et la teneur en silice augmente. Les auteurs ont ajoutés que la perte au feu (LOI) augmente avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane et la diminution de la taille moyenne des particules.

II.4.13. Analyse thermique :

L'analyse thermogravimétrique de calorimétrie différentielle à balayage (TGA-DSC) faite dans l'étude de Wang et al (2020) ont montré que l'incorporation de MK réduit considérablement V_{ch} due à une réaction pouzzolanique. En outre L'utilisation binaire de MK et UFA réduit encore le V_{ch} et une tendance similaire a été également observée pour l'utilisation binaire de MK et NFA. Cependant, UFA est identifié pour réduire plus de CH que NFA lorsqu'il est couplé avec MK. Cela indique qu'un degré plus élevé de réaction pouzzolanique dans le système UFA-MK par rapport au système NFA-MK peut être réalisé, ce qui sera en outre bénéfique pour les performances des bétons durcis. En ce qui concerne l'eau liée chimiquement (w_b), l'ajout de 5% en poids de MK réduit la teneur en eau liée chimiquement, contrairement à l'ajout de 10% en poids de MK qui entrain une légère augmentation. Comme la chaleur d'hydratation cumulative indique, l'ajout de% de MK en poids augmente considérablement la chaleur d'hydratation tandis que 5% de MK montre un effet très limité sur le la chaleur d'hydratation, qui est cohérente avec les différents w_b causé par l'ajout de MK dans une certaine mesure. Cela indique que l'incorporation 10% en poids de MK est plus importante pour favoriser l'hydratation du ciment et sa réaction pouzzolanique augmente également (w_b)remarquablement. Quant à l'addition de 5% en poids de MK, l'effet de nucléation est probablement très limité, entraînant ainsi une réduction de w_b en raison de l'effet de dilution. Le w_b de pâte MK est réduite avec l'ajout supplémentaire d'UFA ou de NFA, c'est principalement attribué à leur faible réactivité par rapport au clinker de ciment. Cependant, en raison de la nucléation améliorée et de la réactivité pouzzolanique plus élevée de l'UFA aux stades ultérieurs du durcissement, l'utilisation binaire de MK et UFA présente toujours plus w_b que celle du système MK-NFA à 28 jours. De plus, un phénomène intéressant observé dans (Fig.14)est-ce une amplitude de pic endothermique généralement croissante correspondant à la décomposition des carboaluminates à environ 150 C avec un remplacement croissant du mélange minéral est générée.

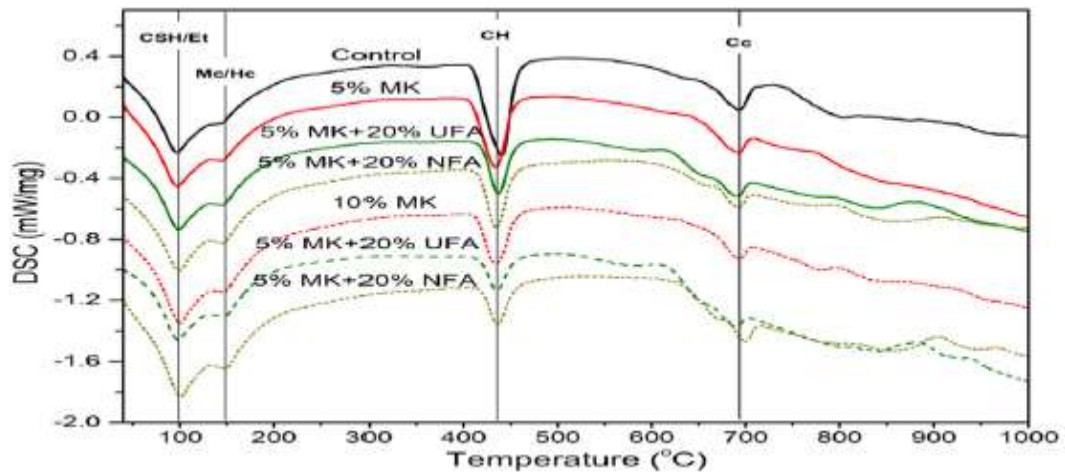


Figure 14 : Courbe DSC de la pate à 28 jours. [Wang et al \(2020\)](#).

II.4.14. Études SEM :

Les images SEM en mode électronique secondaire réalisé dans le travail de [CM Ikumapayi \(2020\)](#) ont rapporté que la structure de l'OPC a montré une morphologie de surface typique d'un béton correctement hydraté caractérisé par une structure continue d'agrégats avec un bon emboîtement des particules ([Fig.15b](#)). La structure de GSA 8 et le GSA 16 montrent une structure d'agrégat bien liée avec un bon verrouillage des particules ([Fig.15a](#)). Cela indique qu'avec l'utilisation de 8% de GSA comme remplacement du ciment dans le béton, des structures en béton correctement hydratées seront produites. Une tendance similaire a été obtenue pour les cendres de bambou à 8% de remplacement partiel par du ciment d' [Ikumapayi \(2016\)](#).

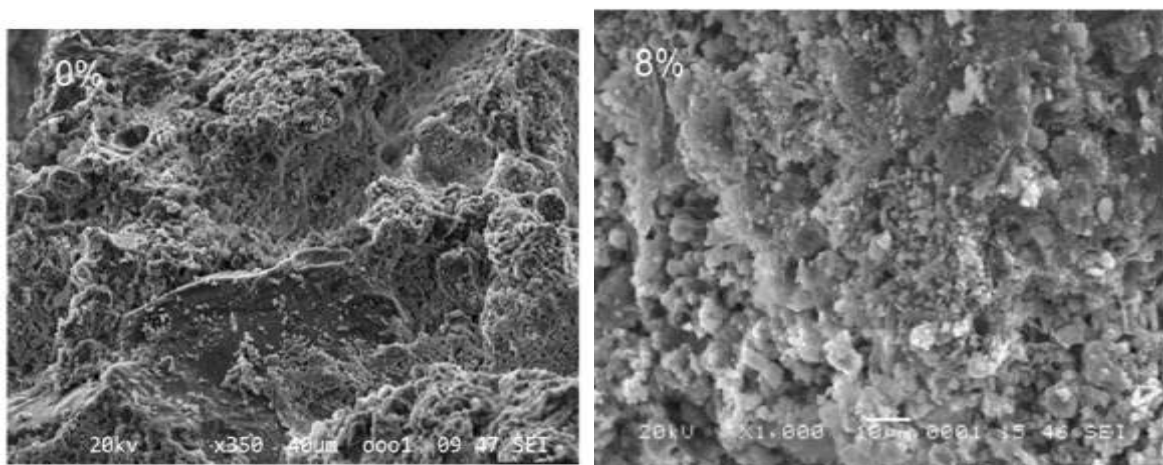


Figure 15 : A). Image SEM pour la pate OPC et B). Image SEM pour OPC + GSA%. [CM.Ikumapayo \(2020\)](#).

II.4.15. Carbonatation sous laboratoire et milieu naturel :

Wang et al (2020) ont constaté qu'une relation à peu près linéaire est trouvée entre les profondeurs de carbonatation atmosphérique pendant 2 ans et les profondeurs de carbonatation accélérée. En outre, il a identifié que l'ajout d'ARP s'accompagne toujours d'une augmentation des profondeurs de carbonatation quelle que soit la structure des pores manifestement raffinée, en accord avec de nombreux rapports DA Kulik et al (2011), G. Medjigbodo et al (2018). Cela peut être attribué à la grande quantité de CH consommée par l'ARP et donc à moins de CH disponible pour la carbonatation.

II.4.16. Réactivité pouzzolanique en suspension :

Les résultats de CM Ikumapayi et al (2020) sur la réaction C-H en fonction du temps de réactivité à 30° C et 75° C ont montrés que la quantité de C-H réagi dans la suspension GSA et OPC augmente avec le temps (Fig.16). Les auteurs ont observé que la quantité de C-H réagi dans GSA est plus que celui de l'OPC à deux températures (30° et 75° C). Cela pourrait être dû au fait que la réaction pouzzolanique dans le GSA dépend de C-H disponible pour l'hydratation. En outre, les résultats indiquent que la vitesse de réaction est proportionnelle à la température.

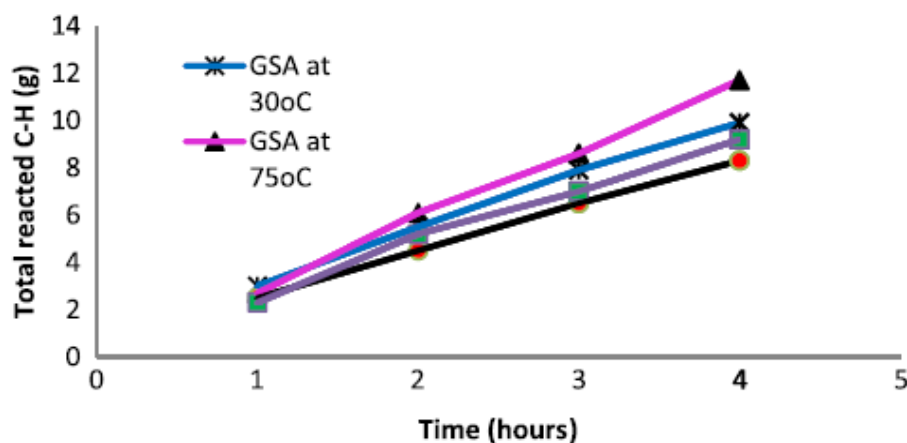


Figure 16 : Réactivité pouzzolanique pour OPC et GSA à différentes températures.

CM Ikumapayi et al (2020).

II.4.17. Développement de la structure des pores à long terme :

Wang et al (2020) ont constaté que l'utilisation de l'ARP augmente le volume des pores inférieurs à 10 nm et réduit le volume des pores supérieurs à 10 nm, ce qui entraîne une réduction évidente du diamètre moyen des pores et une augmentation de la surface totale des pores à 2 mois. Ainsi que l'utilisation binaire de MK et NFA / UFA atteint une porosité totale

inférieure, et un diamètre moyen de pore plus petit que l'utilisation de MK seul. Quant à la structure des pores après 2 ans de durcissement (Fig.17), le béton incorporant l'ARP présente une structure des pores plus raffinée que la référence, similaire à la tendance du développement de la structure des pores en 2 mois. En outre, le raffinement des pores dans REF et les échantillons de 5 M sont toujours observés à partir du plus petit diamètre moyen des pores et une surface totale de pores plus élevée à 2 ans.

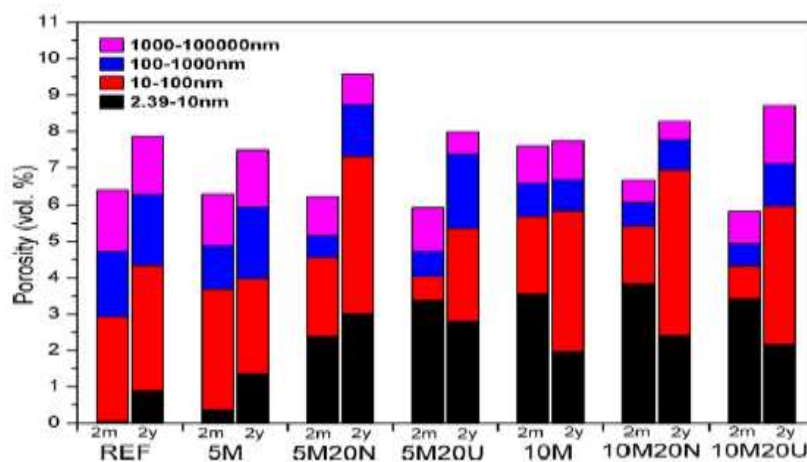


Figure 17 : structure des pores du béton à 2 mois et 2 ans. Wang et al (2020).

II.4.18. Effet de la formation de carboaluminates sur le volume solide d'hydrate :

Wang et al (2020) ont signalé que l'utilisation de l'ARP entraîne une augmentation évidente du volume de solides plus que l'AFP dans le système PLC, et cet effet est beaucoup plus remarquable si la formation de Hc est favorisée. L'inclusion de l'ARP conduit à la réaction de calcite pour former la carboaluminate qui possède une densité relativement inférieure à celle du CSH et du CH, cela conduit à une augmentation considérable du volume solide. Lorsqu'une quantité plus élevée d'ARP est ajoutée, Hc est favorisé, ce qui entraîne une amélioration plus remarquable du volume solide en raison de la très faible densité de Hc par rapport aux gels Mc, CH et CSH. Ces mécanismes assurent une très grande capacité d'ARP à valoriser les matériaux à base de PLC Y. Wang et al (2019).

II.5. Conclusion générale

Ce travail de synthèse bibliographique fournit des informations et une base de données relatives aux comportements physico chimique et mécanique des mortiers ou Bétons à base de pouzzolane activée ou substituée, de même sur la formulation de base, les portions des constituants et les précurseurs.

Mais des questions demeurent en suspens, et les perspectives de recherche pour tenter d'y répondre nombreuses. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

L'incorporation de la nano-silice jusqu'à 7.5% dans les bétons activé par les alcalis attribue à une amélioration remarquable vis-à-vis résistance à la compression, perméabilité des chlorures et profondeur de pénétration des chlorures.

La taille des particules de précurseur jouent un rôle important dans les performances physiques, chimiques et mécaniques des bétons activés par les alcalins a base de pouzzolane.

L'augmentation de la teneur en silicate de sodium jusqu'à 30% de l'activateurs proportionnel avec la teneur en laitier jusqu'a 70%, conduit généralement à des résultats positifs.

L'effet de la concentration de NaOH été oscillant et dépendant de la variation de précurseur.

L'augmentation de la teneur de SS, la portion de laitier augmentent indépendamment lamigration et la profondeur de pénétrations des chlorures. Cependant l'ajout d'ARP peut réduire la charge passée.

Contrairement a le silicate de sodium et le laitier, l'augmentation de la concentration de NaOH a un effet négatif sur le retrait des bêtons activé par les alcalin. l'ajout de 10% de MK en poids augmente considérablement la chaleur d'hydratation tandis que 5% de MK montre un effet très limité. Ce qui est cohérente avec les différents w_b causé par l'ajout de MK. Une portion égale de la combinaison pouzzolane/laitier 50/50(niveau optimal) conduit a le plus faible volume des vides perméables dans les bétons AANPS. La résistance à la traction augmente proportionnellement à la portion de silicate de sodium / la concentration de NaOH.

Le poids volumique des bétons AANPS augmentait légèrement avec l'augmentation de la teneur en laitier, de la teneur en silicate de sodium et de la concentration en hydroxyde de sodium. Le temps de prise se réduit inversement proportionnel a la portion de laitier et a la concentration de NaOH. Contrairement a la SS qui a retardé le temps de prise en fonction de son augmentation.

Références bibliographiques :

Guimer Tarek « contribution de l'addition minérale sur les caractéristiques physico-mécanique des liants et mortiers)) mémoire de magister(spécialité: : Génie Civil option matériaux de construction) UNIVERSITE MOHAMMED KHEIDER - BISKRA .2007.

Pauline SEGUI(Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie) mémoire de magister (spécialité: : Génie Civil) l'Université Toulouse III - Paul Sabatier **2011**.

C. Vernet et G. Cadoret, Compte- Rendus du Colloque, “Voies Nouvelles du Béton”, ‘Suivi en Continu de l’Evolution Chimique et Mécanique des Bétons à Hautes Performances pendant les Premiers Jours’, Cachan, France, p. 17, **1991**.

M Z Bessnouci ,E.N.Bibitriki, S.Khelladi et A Abene. (Approche théorique de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l’aide d’une modélisation des matériaux poreux),revue des énergies renouvelables Vol. 14 N°3 (**2011**) 427-440.

Abdélaziz S. (2006) Valorisation des sédiments de dragage. Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, Université de Reims Champagne-Ardenne.

British Standard E.N. 196-6, Methods of Testing Cement: Determination of Fineness, BSI, London, **2018**.

ASTM, C989, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, **2016**.

ASTM, C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, **2015**.

TS EN 196-2, Methods of testing cement – Part 2: Chemical analysis of cement,Turkish Stand. (**2002**) 27.

TS EN 197-1, Cement – Part 1: Composition, specifications and conformitycriteria for common cements, Turkish Stand. (**2011**) 39.

A. International, ASTM C 618: standard specification for coal fly ash and raw orcalcined natural pozzolan for use in concrete, Annu. B. ASTM Stand. 4 (**2017**)5,<https://doi.org/10.1520/C0618-17A>.

British Standard E.N. 12620, Aggregates from Natural Sources for Concrete, BSI, London, **2013**.

R.A. Robayo-Salazar, R. Mejia de Gutierrez, F. Puertas, Study of synergy between a natural volcanic pozzolan and a granulated blast furnace slag in the production of geopolymeric pastes and mortars, *Constr. Build. Mater.* 157 (2017) 151–160, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.092>.

N.P. Rajamane, R. Jeyalakshmi, Quantities of Sodium Hydroxide Solids and Water to Prepare Sodium Hydroxide Solution of Given Molarity for Geopolymer Concrete Mixes, Indian Concrete Institute Technical Paper, SRM University, India, 2014.

R. Firdous, D. Stephan, J.N.Y. Djobo, Natural pozzolan based geopolymers: a review on mechanical, microstructural and durability characteristics, *Constr. Build. Mater.* 190 (2018) 1251–1263.

J.N.Y. Djobo, A. Elimbi, H.K. Tchakouté, S. Kumar, Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (5) (2017) 4433–4446.

BS EN 14630-12 Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures Test Methods, Determination of Carbonation Depth in Hardened Concrete by the Phenolphthalein Method, (British Standard Institution, (2006). **Mark Bediako**, Case Stud. *Constr Mat.* 8 (2018) 1–7.

EN 196-1: determination of Strength, Part 1. European Committee for Standardization, Avenue Marnix 17 - B-1000, Brussels, Belgium, 1995.

ASTM (Concrete and Aggregates), ASTM Book of Standards. American Society for Testing Materials, Ann Arbor, MI, 2005.

ASTM (Concrete and Aggregates), ASTM Book of Standards. American Society for Testing Materials, Ann Arbor, MI, 2005.

British Standard 1881-125, Testing Concrete: Methods for Mixing and Sampling Fresh Concrete in the Laboratory, BSI, London, 2013.

British Standard E.N. 12390-12392, Testing Hardened Concrete: Making and Curing for Strength Tests, BSI, London, 2019.

TS EN 196-2, Methods of testing cement – Part 2: Chemical analysis of cement, Turkish Stand. (2002) 27.

A. International, ASTM C 1702: standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry, *Annu. B. ASTM Stand.* 4 (2017) 9, <https://doi.org/10.1520/C1702-17>.

International, ASTM C109-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), (2016).

ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, **2015**.

ASTM C109-15a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in or 50mm cube specimens). (ASTM International, West Conshohocken PA United States, **2013**).

British Standard E.N. 12390-12394, Testing Hardened Concrete: Compressive Strength of Test Specimens, BSI, London, **2019**.

British Standard EN 12390 -5, Testing Hardened Concrete: Flexural Strength of Test Specimens, BSI, London, **2019**.

ASTM (Concrete and Aggregates), ASTM Book of Standards. American Society for Testing Materials, Ann Arbor, MI, **2005**.

EN 196-1: determination of Strength, Part 1. European Committee for Standardization, Avenue Marnix 17 - B-1000, Brussels, Belgium, **1995**.

ASTM International, ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, (**2014**).

ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, **2017**.

British Standard E.N. 1015-3, Methods of Test for Mortar for Masonry: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table), BSI, London, **1999**.

British Standard BS 3892-1, Pulverized-Fuel Ash: Specification for Pulverized Fuel Ash for use with Portland Cement, BSI, London, **1997**.

ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, **2015**.

[**ASTM International, ASTM C496-17**, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (**2017**) .

UNE, EN 12390-13:2014, Testing Hardened Concrete - Part 13: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, (**2014**).

ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, **2014**.

ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM International, **2014**.

ASTM C138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, **2014**.

UNE, EN 1015-18:2003, Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 18:

Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar, (2003).

ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, **2013**.

ASTM International, ASTM C490-17, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, (2017).

EN 1015-18: Determination of Water Absorption Coefficient by Capillary Action of Hardened Mortar, Part-18. European Committee for Standardization, Avenue Marnix 17 - B-1000, Brussels, Belgium, **2002**.

ASTM C403, Standard, Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, ASTM International, **2016**.

American Society for Testing and Materials C1073-18, Standard Test Method for Hydraulic Activity of Slag Cement by Reaction with Alkali, ASTM International, West Conshohocken, PA, **2018**.

A.M. Neville, Properties of Concrete, fifth ed., Pearson Education Ltd., England, **2011**.

British Standard E.N. 16523-1, Determination of Material Resistance to Permeation by **Chemicals**, Under the Conditions of Continuous Contact, BSI, London, **2015**.

British Standard E.N. 196-5, Methods of Testing Cement: Pozzolanicity Test for Pozzolanic Cement, BSI, London, **2005**.

T. Xie, P. Visintin, A unified approach for mix design of concrete containing supplementary cementitious materials based on reactivity moduli, *J. Clean. Prod.* **203** (2018) 68–82.

S. Oyebisi, T. Igba, D. Oniyide, Performance evaluation of cashew nutshell ash as a binder in concrete production, *Case Stud. Constr. Mater.* **11** (2019) e00293.

M. Behim, M. Beddar, P. Clastres, Reactivity of granulated blast furnace slag, *Slovak J. Civ. Eng.* **21** (2) (2013) 7–14.

A. Fernández-Jiménez, F. Puertas, I. Sobrados, J. Sanz, Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: influence of the type of alkaline activator,

J. Am. Ceram. Soc. **86** (2003) 1389–1394,

<https://doi.org/10.1111/j.11512916.2003.tb03481.x>.

I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, D.E. MacPhee, Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, *Cement Concr. Res.* **41** (2011) 923–931,

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>.

F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, JS Dolado, A. Rico, J. Rodríguez, Un modèle pour le gel CASH formé dans des ciments de laitier activés par des alcalis, *J. Eur. Ceram. Soc.* 31 (2011) 2043 - 2056, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc>

I. Garcia-Lodeiro, S. Donatello, A. Fernández-Jiménez, Á. Palomo, Hydratation de ciment alcalin hybride contenant une très grande proportion de fl y ash: a descriptive model, *Materials* 9 (2016), <https://doi.org/10.3390/MA9070605>.

K. Vance, M. Aguayo, T. Oey, G. Sant, N. Neithalath, Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin, *Cem. Concr. Compos.* 39 (2013) 93–103.

E. Kadri, S. Kenai, K. Ezziane, R. Siddique, G. De Schutter, Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar, *Appl. Clay Sci.* 53 (4) (2011) 704–708.

NK Lee, HK Lee, Prise et propriétés mécaniques du béton de cendres volantes / scories activées par les alcalis fabriqués à température ambiante, *Constr. Construire. Mater.* 47 (2013) 1201-1209 .

CK Yip, The Role of Calcium in Geopolymerisation (Ph.D. Thesis), Université de Melbourne, Australie, 2004 .

M. Najimi, “Alkali-Activated, Natural Pozzolan/Slag Binder for Sustainable Concrete (Ph.D. Thesis), University of Nevada Las Vegas, 2016, p. pp.

M. Kheradmand, Z. Abdollahnejad, F. Pacheco-Torgal, Shrinkage performance of flyash alkali-activated cement based binder mortars, *KSCE J. Civ. Eng.* 00 (2017)1–11, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1714-3>.

E.N. Kani, A. Allahverdi, Investigating shrinkage changes of natural pozzolan based geopolymercement paste, *Iran, J. Mater. Sci. Eng.* 8 (2011) 50–60.

Z. Zhang, X. Yao, H. Wang, Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: III. Field experiment, *Appl. Clay Sci.* (2012) 57–60, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.05.008> 67–68.

E. Vasconcelos, S.Fernandes, JL Barroso Aguiar, F.Pacheco-Torgal, Concrete retro fitting utilisant des mortiers géopolymères de métakaolin et CFRP, *Constr. Construire. Mater.* 25 (2011) 3213 - 3221, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.006>.

M. Najimi, N. Ghafouri, M. Sharbaf, Alkali-activated natural pozzolan/slag mortars: a parametric study, *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 625–643. H.J. Kuzel, H. Pöllmann, Hydration of C3A in the presence of Ca(OH)₂, CaSO₄·2H₂O and CaCO₃, *Cem. Concr. Res.* 21 (1991) 885–895.

M. Zajac, A. Rossberg, G. Le Saout, B. Lothenbach, Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, *Cem. Concr. Compos.* 46 (2014) 99–108.

K. De Weerd, K.O. Kjellsen, E. Sellevold, H. Justnes, Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements, *Cem. Concr. Compos.* 33 (1) (2011) 30–38.

IG Richardson, *Cem. Du béton. Res.* 38 (2) (2006) 137-158 .

AM Neville, *Properties of Concrete-Concretes with Particular Properties*, cinquièmeéd., Pearson Education Limited Edinburgh Gate, Harlow Essex CM20 2JE, Angleterre, 1995 .

M.A. Cincotto, A.A. Melo, W.L. Repette, Effect of different activators type and dosages and relation with autogenous shrinkage of activated blast furnace slag cement, in: G. Grieve, G. Owens (Eds.), *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement*, 2003, p. 1878. Durban, South African.

C.D. Atis, C. Bilim, O. Celik, O. Karahan, Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, *Constr. Build. Mater.* 23 (1) (2009) 548–555.

S. Aydin, B. Baradan, Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, *Compos. Part B* 57 (2014) 166–172.

P.S. Deb, P. Nath, P.K. Sarker, Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature, *Procedia Eng.* 125 (2015) 594–600.

MAM Johari, JJ Brooks, S. Kabir, P. Rivard, Influence des matériaux cimentaires supplémentaires sur les propriétés techniques du béton à haute résistance, *Constr. Construire. Mater.* 25 (5) (2011) 2639-2648 .

CM Ikumapayi, *J. Appl.Sci. Environ. Manag.* 20 (4) (2016)

G. Medjigbodo, E. Rozière, K. Charrier, L. Izoret, A. Loukili, Hydratation, retrait et durabilité des liants ternaires contenant du ciment Portland, du remplissage de calcaire et du métakaolin, *Constr. Construire. Mater.* 183 (2018) 114–126 .

DA Kulik, Amélioration de la cohérence structurelle des modèles thermodynamiques en solution solide CSH, *Cem. Du béton. Res.* 41 (2011) 477–495

Y. Wang, Z. Shui, X. Gao, R. Yu, Y. Huang, S. Cheng, Comprendre les comportements de liaison au chlorure et de diffusion du béton marin à base de pouzzolanes enrichies en ciment-alumine de calcaire Portland, *Constr. Construire. Mater.* 198 (2019) 207-217 .

M.KemalArdoğa , Sinan T.Erdoğan, Mustafa Tokyay Effect of particle size on early heat evolution of interground natural pozzolan blended cements 0950-0618/_ **2019** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.055>.

Rami H. Haddad , Zainab K. Lababneh Geopolymer composites using natural pozzolan and oil-shale ash base materials: A parametric study 0950-0618/_ **2019** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117899>.

Mohammed Ibrahim, Muhammed Kalimur Rahman, Megat Azmi Megat Johari, Muhammad Nasir, EwebajoAdeoluwaOladapo Chloride diffusion and chloride-induced corrosion of steel embedded in natural pozzolan-based alkali activated concrete 0950-0618/_ **2020** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120669>.

C.M. Ikumapayi , C. Arum , K.K. Alaneme Reactivity and hydration behavior in groundnut shell ash based pozzolanic concrete 2214-7853/_ **2020** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.385>.

Rafael Robayo-Salazara, Carlos Jesús, Ruby Mejía de Gutiérrez, Pacheco-Torgal Alkali-activated binary mortar based on natural volcanic pozzolan for repair Applications 2352-7102/ © **2019** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100785>.

MeysamNajimi, Nader Ghafoori Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated Concrete 0950-0618/_ **2019** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.107>.

Rafia Firdous, Dietmar Stephan Effect of silica modulus on the geopolymerization activity of natural Pozzolans 0950-0618/_ **2019** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.161>.

Yunyao Wang, Zhonghe Shui, Leichong Wang, Xu Gao, Yun Huang, Qiulei Song, KaizhiLiu Alumina-rich pozzolan modification on Portland-limestone cement concrete: Hydration kinetics, formation of hydrates and long-term performance evolution 0950-0618/_ **2020** Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119712>.

Solomon Oyebisia, Anthony Edea, Festus Olutogeb, David Olukannia Assessment of activity moduli and acidic resistance of slag-based geopolymer concrete incorporating pozzolan 2214-5095/© **2020** The Authors. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00394>.