



LEMHaD

Laboratoire Eco-matériaux de
construction et d'habitat durables

**INFLUENCE DU TAUX DE CIMENT PORTLAND SUR
LES PROPRIETES D'USAGES DU BETON
GEOPOLYMERE SOUS UNE CURE A TEMPERATURE
AMBIANTE**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE GENIE-CIVIL
ROUTES ET OUVRAGES D'ART

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Yawo Daniel ADUFU (20120142)

**Directeur de mémoire : Dr. Adamah MESSAN, Maître de Conférences (CAMES)
Enseignant-Chercheur à l'institut 2iE**

**Maître de stage : Dr. Seick Omar SORE, Assistant de Génie Civil, UNB de Bobo-
Dioulasso**

Structure d'accueil du stage : Laboratoire LEMHaD de l'Institut 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM
Prénom NOM
Prénom NOM

Promotion [2018/2019]

DEDICACES

*A ma famille pour la confiance et le sacrifice à
mon égard.*

CITATION

Rien n'est statique

REMERCIEMENTS

Toute ma reconnaissance à :

- *Pr Adamah MESSAN*, mon tuteur académique, qui a rendu possible ce stage, pour ses remarques, suggestions et orientations dans la réalisation des essais et sa disponibilité. Ce travail est le fruit de vos directives et de vos soutiens.
- *Dr Seick Omar SORE* mon Maître de stage qui n'a cessé de croire en moi du début jusqu'à la fin et pour sa disponibilité ; pour ses conseils et réponses à mes préoccupations ; pour ses remarques pertinentes dans la rédaction de ce document.
- *Dr Abdou LAWANE GANA* (chef de département GCH-2iE) pour son assistance et son soutien dans l'exécution des travaux au Laboratoire
- *Madame Marie Thérèse GOMIS, Monsieur Arnaud OUEDRAOGO* et monsieur Salifou KABORE pour leurs conseils.
- *Mr Philbert NSHIMIYIMANA et Mr Christian Ramadji* pour leur disponibilité malgré leurs occupations à la réalisation de ce projet de recherche.
- Mes collègues amis et frères LEMHaD (Aristide, Simon-Pierre, Seid, Nasser, Stéphane).

RESUME

Le béton hydraulique reste encore aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour la construction dans le monde. Cependant, compte tenu de l'empreinte carbone du liant utilisé pour sa formulation (le ciment portland) combiné à ses mauvaises performances en termes de durabilité, il est impératif que les recherches actuelles s'orientent vers la synthèse de matériaux de construction répondant à ces exigences. Les géopolymères polluent 5 à 6 fois moins que le béton hydraulique [1] et montrent également des performances de durabilité meilleures que ce dernier. Néanmoins, leur mise en œuvre s'avère plus complexe. En plus de nécessiter des activateurs pour favoriser la réaction de géopolymérisation, les géopolymères nécessitent une cure thermique autour de 60°C pour amorcer cette réaction. Ce facteur constitue une barrière pour la vulgarisation des liants géopolymères en général et du béton géopolymère en particulier. Cette présente étude a pour but de synthétiser un béton géopolymère à température ambiante à base de matériaux locaux. Afin de favoriser la cure à température ambiante, le ciment portland a été ajouté au béton géopolymère à différents taux. Les aspects évalués par les essais de caractérisation sont les propriétés mécaniques et de durabilité.

Les résultats montrent que l'incorporation du ciment portland dans le béton géopolymère augmente notablement la résistance à la compression de ce dernier. Le remplacement de 5% de métakaolin par du ciment a engendré plus de 60% de gain en résistance à la compression. Le taux optimal de substitution de ciment est 20% donnant une résistance de 30,54 MPa à 28 jours. Néanmoins, l'incorporation du ciment portland a divers effets sur la durabilité du béton obtenu. Elle tend à diminuer la résistance à l'attaque acide du béton géopolymère mais confère à ce dernier de meilleures performances sur certains plans : l'absorption capillaire et la porosité accessible à l'eau sont réduites lorsque l'on augmente la quantité de ciment portland.

Mots Clés :

-
- 1 –Alumino-silicate**
 - 2 – Béton géopolymère**
 - 3 – Ciment portland**
 - 4 - Durabilité**
 - 5 – Métakaolin**

ABSTRACT

The most widely used construction material in the world today is still hydraulic concrete. However, due to the carbon footprint of the binder used for its formulation (portland cement) combined with its poor durability performance, it is crucial that current researches be directed towards the synthesis of building materials that meet these requirements. Geopolymers pollute 5 to 6 times less than hydraulic concrete [1] and also show better sustainability performance than OPC. However, their implementation is more complex. In addition to requiring activators to facilitate the geopolymerization reaction, geopolymers require a thermal cure at a temperature around 60°C to initiate this reaction. This factor is a barrier to the democratization of geopolymer binders in general and geopolymer concrete in particular. It is with the aim of synthesizing a geopolymer concrete at room temperature using local materials that this study was carried out. In order to promote cure at room temperature, portland cement was introduced at different rates. The aspects measured by the characterization tests are mechanical properties and durability.

The results show that the incorporation of portland cement into geopolymer concrete significantly increases the compressive strength of the concrete. The replacement of 5% metakaolin by cement resulted in a 60% gain in compressive strength. The optimal rate of cement substitution is 20% giving a strength of 30.54 MPa at 28 days. Nevertheless, the incorporation of portland cement has various effects on the durability of the concrete obtained. It tends to weaken the resistance to acid attack of geopolymer concrete but gives it better performance in terms of capillary absorption and water-accessible porosity, which are reduced when the amount of portland cement is increased.

Key words:

-
- 1 - Alumino-silicate**
 - 2 - Durability**
 - 3 - Geopolymer concrete**
 - 4 - Metakaolin**
 - 5 - Portland cement**

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACI: American Concrete Institute

OPC : Ordinary Portland Cement

LOI : Lost On Ignition

LEMHaD : Laboratoire d'Eco Matériaux et Habitats Durables

MPa : Méga Pascal

e/c : Rapport eau/liant

°C : Degré Celsius

2IE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement

SOMMAIRE

DEDICACES	i
CITATION.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	vi
SOMMAIRE.....	1
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
<i>I. Introduction.....</i>	5
<i>II. Synthèse bibliographique.....</i>	7
II.1. Historique des matériaux alcalins (géopolymères).....	7
II.2. Qu'est-ce qu'un géopolymère ?	8
II.3. Matériaux de bases de la formulation d'un béton géopolymère.....	8
II.3.1. La source d'aluminosilicate	8
II.3.2. La solution alcaline	9
II.3.3. Les granulats	11
II.3.4. Les adjuvants.....	11
II.4. Quelques propriétés du béton géopolymère	12
II.5. Avantages du béton géopolymère comparé au béton hydraulique.....	13
<i>III. Matériaux et méthodes expérimentales</i>	17
III.1. Matériaux.....	17
III.2. Méthodes.....	21
III.2.1. Formulation et détermination des caractéristiques physiques du béton.....	21
III.2.2. Détermination des caractéristiques mécaniques du béton	23
III.2.3. Essais de durabilité	26
<i>IV. Résultats et discussion.....</i>	29
IV.1. Propriétés Physique :	29
IV.2. Propriétés mécaniques du béton.....	30
IV.3. Essais de durabilité	35

V. Conclusion- Perspectives	39
VI. Annexes.....	43
Annexe I a: Résistances à la compression et à la traction des échantillons.....	44
Annexe I b: Résistances à la compression et à la traction des échantillons	45
Annexe II: Feuille d'analyse granulométrique du sable.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Activants courants des liants alcali-activés, en fonction des principaux précurseurs disponibles.....	10
Tableau II: Composition chimique du métakaolin.....	18
Tableau III: Tableau de formulation du béton géopolymère.....	22
Tableau IV: Affaissement au mini-cône d'Abram's	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Courbe granulométrique du sable.....	19
Figure 2: Courbe granulométrique du gravier.....	20
Figure 3: Performances du béton géopolymère en fonction du rapport e/c.	20
Figure 4: Dispositif de mesure de l'ouvrabilité du béton	23
Figure 6: Détermination du module élastique à partir de la vitesse des impulsions ultrasoniques.	26
Figure 7: Plage de variation du pH.....	27
Figure 8: Montage expérimental pour l'essai d'absorption capillaire.....	28
Figure 9: Evolution de la masse volumique au cours du temps	30
Figure 10: Résistance à la compression	31
Figure 11: Résistance à la traction	32
Figure 12: Evolution de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour la formulation avec 20% de substitution.....	33
Figure 13: Comparaison des prédictions des lois empiriques	34
Figure 14: Essais pundite	35
Figure 15: Résistance à l'attaque acide.....	36
Figure 16: Porosité accessible à l'eau	37
Figure 17: Remplissage des gros pores	38
Figure 18: Remplissage des petits pores	38
Photo 1: Echantillon de métakaolin	17
Photo 2: Echantillons de béton.....	21
Photo 3: Dispositif de l'essai de compression	24
Photo 4: Dispositif de l'essai de traction par fendage.....	25
Photo 5: Dispositif de l'essai pundite	25

I. INTRODUCTION

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus répandus au monde. Le principe du béton consiste à faire des mélanges de granulats (graviers et sable), de l'eau et d'un liant. Le liant le plus utilisé est le ciment portland ordinaire (OPC). Le béton hydraulique permet encore de nos jours de réaliser de grands projets urbains; le dernier en date au Burkina Faso est l'échangeur du nord de Ouagadougou avec plus de 24300 tonnes de ciments et 55000 m³ de béton consommés [2]. Il est relativement aisé de nos jours de produire des bétons de résistance à la compression de 20 à 40 MPa (béton ordinaire); ce qui est largement suffisant pour la réalisation d'ouvrages courants. Généralement il suffit d'ajuster le rapport eau/liant (e/c) tout en augmentant la quantité du ciment pour viser de meilleures performances mécaniques.

Au-delà de toutes ces performances remarquables et l'aisance de la mise en œuvre qu'il permet, le ciment portland a une empreinte carbone élevée. L'on estime à 7% la part des émissions de dioxyde de carbone dû à la production de ciment dans le monde [3]. L'augmentation de la population mondiale combinée à l'augmentation du niveau de vie dans les pays en développement engendre des besoins de construction sans cesse croissants et donc une utilisation de plus en plus croissante du ciment OPC. L'on estime que la production du ciment portland croît de 3% par an [3]. C'est donc évident que l'on assistera à plus de pollution liée à la production du ciment OPC dans les années à venir.

L'autre aspect sur lequel le béton hydraulique est remis en cause de nos jours est celui de la durabilité. En effet, même si les dimensionnements sont faits dans les règles de l'art, les dégradations au cours du temps en milieu agressif de ce matériau composite ont largement été documentées. Il a notamment été constaté que les bétons hydrauliques en milieu corrosif (zones côtières ou marines) commencent à se détériorer après 20 à 30 ans de service alors qu'ils ont été initialement conçus pour une durée de vie de 50 ans au moins [4].

Bien que l'utilisation de ciment Portland soit inévitable de nos jours, il est judicieux, voire impératif, que les recherches actuelles s'orientent vers le développement de matériaux de construction qui soient non seulement plus respectueux de l'environnement mais ayant également des caractéristiques de durabilité meilleures que celles du béton classique. Pour qu'un matériau soit respectueux de l'environnement, il est souhaitable que ses éléments constitutifs soient disponibles localement afin de réduire le plus possible la consommation d'énergie liée à son acheminement tout en créant une valeur ajoutée à la localité sur le plan économique.

Au Burkina Faso, la disponibilité abondante des ressources locales telles que la kaolinite, la cendre de balle de riz, crée l'occasion d'utiliser ces ressources pour la synthèse d'un béton géopolymère connu comme une des solutions alternatives au béton hydraulique. La production des géopolymères dégage 5 à 6 fois moins de CO₂ dans l'environnement que le ciment portland [1]. Les géopolymères sont plus résistants aux agressions chimiques permettant ainsi de garantir une durée de vie plus élevée des ouvrages [5]. Les géopolymères sont des liants alcalins produits par activation des minéraux fins contenant des aluminosilicates amorphes (réactifs) par des solutions alcalines [6]. Les récentes études ont montré que le durcissement du liant géopolymère se fait autour d'une température de cure d'environ 60°C [7]. Ce qui pourrait limiter son utilisation sur un chantier lorsqu'on n'utilise pas un système de préfabrication.

Ce présent projet de recherche a pour objectif la valorisation des matériaux locaux du Burkina Faso à travers la synthèse d'un béton géopolymère à température ambiante. L'atteinte de cet objectif global passe spécifiquement par:

- Nous mettrons en place d'un procédé de formulation d'un béton de géo-ciment ;
- Nous évaluerons des propriétés physicomécaniques du béton géopolymère,
- Nous étudierons la durabilité (absorption capillaire, porosité accessible à l'eau ; résistance à l'attaque acide des bétons géo-ciment).

Ce présent document est structuré en trois (03) parties :

La première partie est consacrée à une revue bibliographique sur les géopolymères où les différents et importants aspects de la géo polymérisation sont discutés. Dans la seconde partie, nous présentons les matériaux utilisés pour la synthèse et décrivons le protocole opératoire de la synthèse du géopolymère ainsi que les méthodes employées pour les caractériser et étudier leurs propriétés physico-mécaniques et leur durabilité. Les résultats de notre étude seront présentés dans la troisième partie. Une conclusion générale qui regroupe les principaux résultats sera donnée à la fin de ce mémoire ainsi que les perspectives envisageables.

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GÉOPOLYMERES

Dans cette partie, nous parlerons des géopolymères en général d'une part, puis des matériaux entrant dans leur formulation d'autre part. La synthèse portera d'abord sur un historique des matériaux alcalins et leurs caractéristiques générales. Puis, il sera présenté les différents constituants entrant dans leur formulation et leurs propriétés. Et enfin, nous présenterons quelques avantages et inconvénients du béton géopolymère comparé au béton hydraulique.

II.1. Historique des matériaux alcalins (géopolymères)

L'activation alcaline a été initialement découverte par Purdon (1940) à travers l'étude de l'effet de l'incorporation de l'hydroxyde de sodium (NaOH) sur une gamme de minéraux silico-alumineux dont le laitier de haut fourneau. En effet, en faisant le mélange d'un laitier (composé de 41% de CaO, 30% de SiO₂ et 20,5% Al₂O₃) avec du NaOH (5,5-7,5%), il a observé une prise du matériau avec une résistance en compression de 27 MPa à 1 jour et de 72 MPa après 5 ans. Le mécanisme de durcissement du laitier activé est régi par la dissolution de la silice et de l'alumine et par la précipitation de silicate de calcium hydraté (CSH) ou d'aluminates hydratés. Par la suite, Glukhovsky a développé un nouveau liant qu'il nomme « sol-ciment » par activation alcaline de roche broyée. Il a proposé un mécanisme général pour l'activation alcaline des matériaux contenant principalement de la silice et de l'alumine. Le modèle de Glukhovsky est décrit comme un processus à trois étapes : (1) destruction-coagulation, (2) coagulation-condensation et (3) condensation-cristallisation.

Ensuite, les multiples incendies catastrophiques survenus en France dans la période allant de 1970 à 1973, et dont la gravité est attribuée pour la plupart aux matériaux de décoration de type polyester utilisés, qui produisent des fumées toxiques asphyxiantes en brûlant, ont rendu impératif de produire sur le marché de nouveaux matériaux plastiques qui résistent au feu, des matériaux ininflammables et incombustibles. C'est dans ce contexte que Davidovits décide d'orienter ses travaux vers la conception de nouveaux matériaux. Dans cette quête, il remarque une similarité dans les conditions de synthèse de certains matériaux plastiques organiques d'une part, et de minéraux feldspathoïdes et zéolites résistants au feu d'autre part. Ces deux types de synthèse se déroulent en milieu alcalin concentré, à la pression atmosphérique et à une température inférieure à 150° C. Il a donc développé des matériaux silico-alumineux tridimensionnels amorphes à semi-cristallins, qu'il a appelé «géopolymères» (polymères

minéraux issus de la géochimie ou de la géo synthèse). On considère que les liants alcali-activés concernent une classe large de précurseurs formés d'une poudre de silicate (avec plus ou moins de calcium) réagissant grâce à un activant composé d'une source d'alcalin utilisé sous forme solide ou liquide. Les liants alcali-activés sont moins calciques que le ciment portland traditionnel ou les liants alumineux et sulfo-alumineux. Les géopolymères représentent une sous-catégorie des liants alcali-activés, pour laquelle le précurseur est essentiellement un aluminosilicate contenant très peu de calcium.

II.2. Qu'est-ce qu'un géopolymère ?

Le terme « géopolymère », d'abord inventé par le scientifique français Joseph Davidovits, désigne une classe de polymères inorganiques constitués par l'enchaînement de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 liés par les atomes d'oxygène comme unités structurales de base [8]. Ces matériaux ont des structures polymérisées et durcissent à basse température. Le terme «Géo» parce que ces matériaux sont stables à hautes températures, non inflammables et inorganiques. La composition chimique des géopolymères est similaire à celle des zéolites naturelles à une différence près : contrairement aux zéolites dont la microstructure est cristalline, celle des géopolymères est amorphe. Le processus de polymérisation se fait en milieu hautement alcalin entre les minéraux silico-alumineux et engendre une structure tridimensionnelle constituée des liaisons $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}$. Contrairement au ciment portland ordinaire et aux ciments pouzzolanes, les géopolymères ne nécessitent pas la formation d'hydrates de silicates de calcium (C-S-H) pour le développement et la résistance de la matrice ; ils utilisent la polycondensation du silicium et de l'aluminium en milieu alcalin pour atteindre leur performance mécaniques.

La fabrication du géopolymère nécessite donc des matériaux (précurseurs) riches en silice et en alumine sous une forme amorphe plus réactive.

En général, on prépare les géopolymères par réaction entre une solution alcaline (par exemple l'hydroxyde de sodium ou l'hydroxyde de potassium combiné ou non à un silicate de sodium ou à un silicate de potassium) et une source d'aluminosilicate telle que le métakaolin, les cendres volantes, les scories volcaniques, le laitier de haut fourneau, la cendre de balle de riz. Les géopolymères regroupent les liants et les bétons géopolymères. Nos travaux de recherche se focalisent uniquement sur les bétons géopolymères.

II.3. Matériaux de bases de la formulation d'un béton géopolymère

II.3.1. La source d'aluminosilicate

La formulation des bétons géopolymères est plus complexe que le béton classique. Cette complexité vient de la grande variété de la matière de base utilisée : la composition chimique

de la matière de base dépend du site d'extraction. En plus de leurs différences de compositions chimiques, ils se distinguent du ciment portland par leur structure atomique ; les précurseurs étant des verres (matériaux fondus puis refroidis rapidement) ou des matériaux amorphes (pas de passage par un stade fondu), alors que les ciments portland sont composés de minéraux cristallisés solubles dans l'eau.

Différentes matières premières ont été utilisées dans la recherche pour la fabrication de bétons géopolymères. Cependant, il convient de noter que les principaux composants des matières premières pour la préparation des géopolymères alumino-silicatés devraient contenir du silicium (Si) et de l'aluminium (Al) sous forme amorphe. Ils sont appelés précurseurs. Ces précurseurs sont des aluminosilicates comme les métakaolins, les cendres volantes silico-alumineuses (classe F), des cendres de balle de riz, des poudres de verres, etc. Un échantillon de cendre de balles de riz contient en moyenne 90 % de silice et d'autres composés en plus faibles quantités telles que le K_2O et le CaO . En raison de son déficit en alumine, il est quasiment impossible que la cendre de balle de riz soit à elle seule un précurseur de géopolymère. Elle est généralement complétée par une source d'aluminosilicates ayant une teneur importante en alumine, avant d'être activée par la solution alcaline. La composition minéralogique de la source d'aluminosilicate doit répondre à un certain nombre de critères qui sont entre autre le rapport SiO_2/Al_2O_3 [9].

II.3.2. La solution alcaline

Les activateurs alcalins sont responsables de deux processus simultanés; la dissolution de la matière première alumino-silicatée en entités monomériques à base de silicium et d'aluminium et la polymérisation de ces entités. Il existe de nombreuses variétés de solutions activatrices. Les activateurs incluent principalement des hydroxydes, des silicates, des carbonates ou des sulfates alcalins qui peuvent fournir des cations dits « métaux alcalins » (1^{ère} colonne du tableau périodique : Li, Na, K, Rb, Cs, Fr), et ainsi augmenter le pH de la solution et accélérer la dissolution du précurseur solide. La nécessité d'utiliser des activateurs vient du fait que les précurseurs utilisés sont au mieux hydrauliques latents (laitiers, CV classe C), au pire pratiquement inerte en présence d'eau à pH neutre. Les cations les plus fréquents sont le sodium et le potassium, les autres n'étant généralement pas utilisés pour des raisons de coût ou de dangerosité (caractère radioactif du Fr par exemple). Les activateurs donnant les meilleures réactivités sur les précurseurs sont les silicates alcalins. Les hydroxydes alcalins donnent aussi des résultats satisfaisants mais les silicates alcalins sont particulièrement plus efficaces (en général plus que les hydroxydes) car ils contiennent déjà de la silice en solution, ce qui permet

d'amorcer plus facilement la formation de produits de réaction. Il existe aussi les activants à base de phosphate (milieu acide) et les systèmes activés uniquement par de la chaux (liants pouzzolane – chaux). Le

Tableau I [10] inspiré des travaux de Provis et al. [11] donne la compatibilité entre le précurseur et l'activant.

Tableau I: Activants courants des liants alcali-activés, en fonction des principaux précurseurs disponibles.

Précurseur \ Activant	Laitier de hauts fourneaux	Métakaolin	Cendres volantes silicoalumineuses (classe F)
Hydroxydes alcalins <input type="checkbox"/> Corrosif <input type="checkbox"/> Coût intermédiaire <input type="checkbox"/> Dommageable environnement	Acceptable <input type="checkbox"/> Cinétique rapide (mais moins efficaces que les silicates)	Acceptable <input type="checkbox"/> Cinétique lente	Acceptable <input type="checkbox"/> Cinétique très lente
Silicates alcalins <input type="checkbox"/> Corrosif <input type="checkbox"/> Coût élevé <input type="checkbox"/> Dommageable à l'environnement	Souhaitable <input type="checkbox"/> Cinétique très rapide <input type="checkbox"/> Grande efficacité	Souhaitable <input type="checkbox"/> Cinétique rapide à très rapide	Souhaitable <input type="checkbox"/> Cinétique souvent lente, améliorée par la température
Carbonates alcalins <input type="checkbox"/> Non corrosif <input type="checkbox"/> Coût faible/intermédiaire <input type="checkbox"/> Peu dommageable à l'environnement	Souhaitable <input type="checkbox"/> Lent si utilisé seul, sauf à forte concentration	Inefficace si utilisé seul	Inefficace si utilisé seul
Sulfates alcalins <input type="checkbox"/> Non corrosif <input type="checkbox"/> Coût faible <input type="checkbox"/> Peu dommageable à l'environnement	Acceptable <input type="checkbox"/> Très lent si utilisé seul <input type="checkbox"/> Mieux avec une source d'alcalins (incluant clinker)	Inefficace si utilisé seul <input type="checkbox"/> Nécessite une source de pH (clinker par exemple)	Inefficace si utilisé seul <input type="checkbox"/> Nécessite une source de pH (clinker par exemple)

■ **Souhaitable** : activant à privilégier, pour ses performances techniques, économiques et/ou environnementales

■ **Acceptable** : activant permettant de fabriquer un liant alcali-activé présentant des performances acceptables, sans être le meilleur disponible

■ **Inefficace** : activant ne permettant pas d'obtenir facilement un matériau consolidé, sauf s'il est utilisé en combinaison avec un autre activant (ciment/clinker portland par exemple).

Il est important d'avoir des rapports molaires bien précis des composants du liant alcali-activé pour atteindre de meilleures performances du béton géopolymère. Ainsi, le rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ permet par exemple de contrôler le temps de prise du liant alcali activé. Le rapport molaire $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ est souvent fixé autour de 1, afin que les Na^+ compensent les charges libres des atomes d'aluminium dans le réseau. Un ratio trop faible entraîne souvent une réactivité plus faible (par manque d'alcalins), alors qu'un ratio très élevé produit un surplus d'alcalins libres menant à l'apparition d'efflorescences (carbonates alcalins). Le rapport molaire $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ est un indicateur de la concentration en alcalins du mélange. Il doit être pris au plus bas possible afin que l'on obtienne des solutions de pH élevé. Certains chercheurs [12] ont montré que la concentration molaire de la solution d'hydroxyde de sodium avait un rôle majeur sur le développement des performances du béton géopolymère. Ils ont notamment démontré que la résistance à la compression du béton géopolymère augmente avec la concentration de la solution activatrice. Les concentrations généralement utilisées dans les recherches sont 8M, 10M, 12M, 14M et 16M. Même si les concentrations de 14M et 16M donnent des résultats légèrement supérieurs à celui de 12M, cette dernière est plus recommandée pour les raisons de coût et de dangerosité que peuvent constituer les concentrations supérieures [13].

II.3.3. Les granulats

Les granulats intervenant dans la formulation des bétons géopolymères sont les mêmes pour la formulation des bétons hydrauliques. Le gravier et le sable sont les granulats utilisés pour la formulation de bétons géopolymères. Tout comme pour le béton hydraulique, la proportion massique des granulats dans le béton géopolymère est de l'ordre de 60 à 80%. Les travaux de Pouhet R. et al. [14] ont montré que la variation de ce taux n'a pas d'effet significatif sur les performances mécaniques du béton géopolymère à base de métakaolin. Il a néanmoins observé que l'ouvrabilité du béton était assez réduite lorsque le taux des granulats atteint 83% peu importe la quantité d'eau utilisée. Ils ont obtenu de meilleures performances mécaniques pour un taux massique de granulats égal à 71%. D'autres chercheurs [15] ont également obtenu de bonnes performances mécaniques avec un taux massique d'agrégat d'environ 71%.

II.3.4. Les adjuvants

L'utilisation des adjuvants dans les bétons se fait généralement en faible quantité ne dépassant pas 5% de la masse du ciment. Les adjuvants ont pour rôle d'améliorer les propriétés du

matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci. Les principales familles d'adjuvant sont les suivantes :

- Plastifiants et superplastifiants : Les plastifiants et superplastifiants ont pour rôle essentiel d'améliorer la plasticité du béton et par conséquent de faciliter sa mise en place. Certains plastifiants permettent de réduire la quantité d'eau de gâchage ce qui entraîne une amélioration des performances du béton.
- Agents accélérateurs / retardateurs de prise : Les retardateurs de prise sont utilisés pour ralentir la vitesse de prise du matériau. Ils sont pratiques pour des transports de bétons frais sur de longues distances. Les accélérateurs de prise ont un effet inverse de celui des retardateurs. Ils sont utilisés par temps froid ou en usine de préfabrication où il est parfois nécessaire d'accélérer la prise du béton pour procéder à un démoulage plus rapide.
- Agents entraîneurs d'air : Le rôle d'un entraîneur d'air est de créer un volume d'air occlus supplémentaire, jusqu'à une fraction de l'ordre de 5%, avec pour objectif de rendre le matériau résistant à l'action du gel. Lors du gel, l'eau se transforme en glace, son volume augmente et la pression ainsi provoquée peut être suffisante pour entraîner la rupture du béton. Les bulles d'air entraînées forment autant de réservoirs qui reprennent l'excès d'eau introduit en force, et contribuent ainsi à diminuer les pressions qui s'exercent et par la suite, à prévenir l'endommagement du béton.

II.4. Quelques propriétés du béton géopolymère

De nombreuses études portant sur les liants géopolymères et les bétons géopolymères révèlent que ces derniers peuvent atteindre des caractéristiques mécaniques notamment la résistance à la compression supérieures ou similaires à celles du béton hydraulique en ciment portland[14], [16].

Ainsi, des recherches ont montré que tout comme pour le béton hydraulique, il existe une relation empirique entre la résistance à la traction et la résistance à la compression de celui-ci. Il a été montré que la résistance à la traction par fendage peut être estimée à partir de la résistance à la compression du béton. Pour cela, de nombreuses relations empiriques ont été proposées par différents chercheurs [17]. Ces relations empiriques peuvent être résumées par l'équation ci-dessous :

$$f_{ts} = Af_{ck}^B \quad (\text{Équation 1})$$

A et B sont des coefficients, f_{ck} est la résistance caractéristique en compression du béton à une date de maturation, f_{ts} est la résistance à la traction par fendage correspondante à f_{ck} .

D'autres études ont révélé que le développement des résistances mécaniques se fait plus rapidement pour les liants géopolymères que pour les bétons classiques [18]. Les travaux de A. Metha ont montré que le gain de résistance en compression que l'on pouvait obtenir entre 7 et 28 jours était seulement de 0,89% pour le béton géopolymère contrairement au béton hydraulique où le gain est de l'ordre de 20 à 30% [19]. Le béton géopolymère pourrait donc permettre de gagner énormément de temps sur les chantiers. Au vue de tous ces avantages qu'offre le béton géopolymère, l'on pourrait se demander pourquoi ce nouveau matériau ne fait pas l'objet de plus d'attention aux yeux des entreprises ?

Les réponses à cette question sont nombreuses : On pourra noter entre autre la complexité de la formulation de ces bétons, la nécessité de l'activation de la source d'aluminosilicates (ou le précurseur), la nécessité de procéder à une cure thermique [10]. Ce dernier défi est la barrière qui limite la vulgarisation du béton géopolymère. La cure thermique est un procédé qui peut être facilement adopté lorsqu'il s'agira de béton préfabriqué car la température de cure tourne autour de 60° pour enclencher le processus de polymérisation [12]. Par contre pour des fabrications in-situ (cas le plus répandu au Burkina Faso), il sera difficile de faire une cure thermique sur les chantiers.

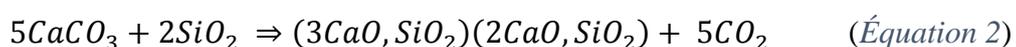
C'est donc pour répondre à cette problématique que l'incorporation du ciment portland dans le béton géopolymère a été proposée. Le ciment portland est un liant hydraulique dont la réaction d'hydratation est exothermique. La chaleur d'hydratation du ciment pourrait être utilisée pour amorcer et accélérer le processus de polymérisation du béton géopolymère. M. Askarian et al. [20] ont montré que l'incorporation du ciment portland pouvait permettre d'améliorer considérablement les performances mécaniques du béton géopolymère. Le gain sur la résistance à la compression lié à l'incorporation du ciment portland avait atteint 82,5%.

L'attrait du béton géopolymère ne se limite pas seulement à ses bonnes caractéristiques mécaniques. Il présente d'autres avantages comparé au béton hydraulique.

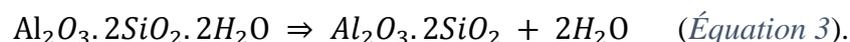
II.5. Avantages du béton géopolymère comparé au béton hydraulique

- Les émissions de dioxyde de carbone :

Le processus de fabrication du ciment portland fait de ce dernier une source d'émission de CO₂ assez considérable. Le caractère polluant du ciment portland résulte de son processus de fabrication. En effet, le ciment OPC résulte de la calcination du carbonate de calcium et de matériaux riches en aluminosilicates selon la réaction suivante :



La production d'une tonne de ciment génère directement 0.55 tonnes de CO₂ provenant de la réaction chimique (voir équation 1) et requiert la combustion d'hydrocarbure générant 0.40 tonnes de CO₂ additionnel. L'on dira donc pour simplifier que la production d'une tonne de ciment génère une tonne de dioxyde de carbone [21]. Selon les estimations dans le monde, près de 3 milliards de tonnes de ciment sont produites par an[22]. Le CO₂ étant le gaz produit et émis en quantité importante dans l'atmosphère et en grande partie responsable de la destruction de la couche d'ozone, conséquence directe du réchauffement climatique, il convient d'orienter les recherches actuelles sur les matériaux de construction moins polluants. Depuis quelques temps, les géopolymères retiennent l'attention de la communauté scientifique comme étant le candidat idéal au remplacement du ciment portland. La synthèse des géopolymères engendrent 5 à 6 fois moins de CO₂ que le béton hydraulique correspondant à une réduction de CO₂ de 80 à 90% de moins que le béton hydraulique[3]. Ceci est dû au fait que les précurseurs utilisés pour la synthèse des géopolymères sont moins polluants. Contrairement à la production du clinker, la production de métakaolin n'engendre que de faibles émissions de CO₂ dans l'atmosphère (175 ± 25 kg pour 1 t de MK) essentiellement dues à l'extraction et au processus de calcination) selon une étude menée par Cassagnabère et al.[23]. L'équation de la calcination du kaolinite s'écrit comme suit :



C'est une réaction de déshydratation par la perte des groupements hydroxyles liés physiquement aux feuillets d'argile. Lorsque l'on utilise par exemple les cendres volcaniques ou les laïtiers de hauts fourneaux par exemple, le besoin de procéder à une calcination n'existe plus, entraînant encore une réduction des émissions de CO₂.

➤ Résistance aux attaques chimiques :

La dégradation du béton hydraulique en milieu acide a été documentée. Les recherches ont montré que cette dégradation se produit lorsque les produits d'hydratation du ciment réagissent en milieu sulfaté. Les produits d'hydratation les plus susceptibles aux attaques dus aux sulfates sont l'hydroxyde de calcium et les sulfates d'alumine. Ces deux produits d'hydratation du ciment OPC réagissent avec les sulfates pour donner des sulfates d'alumine (étringite) et le gypse. L'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ et l'étringite se décomposent lorsque le pH est inférieur à 12 et 11 respectivement. La dégradation quand à ce qui concerne la résistance à la compression du béton intervient lorsque le calcium et les ions hydroxydes sont dissouts hors de la matrice causant l'augmentation de la porosité et de la perméabilité du béton. Les études de durabilité ont montré que le béton géopolymère résiste mieux aux attaques chimiques et

présentent également un meilleur comportement à des températures élevées. [24]

Les géopolymères sont très résistants aux attaques acides notamment l'acide sulfurique. Il est par exemple observé que le béton hydraulique perd 15,4% de sa masse lorsqu'il est immergé en solution d'acide sulfurique concentrée à 3% pendant 9 mois entraînant une perte de sa résistance à la compression de 26,6%. Dans ces mêmes conditions, les bétons géopolymères ont enregistré une perte en masse et en résistance à la compression de 13% et 11% respectivement [24].

➤ Résistance au feu :

La résistance au feu est l'un des paramètres majeurs auxquels les matériaux de construction doivent satisfaire afin de garantir la sécurité des personnes et des biens pendant toute la période de service des ouvrages. Les bétons géopolymères ont généralement un meilleur comportement au feu comparativement au béton hydraulique. Les produits d'hydratation du ciment portland notamment l'hydroxyde de calcium se décomposent en oxyde de calcium et de l'eau à une température de 400°C environ causant la baisse de ses performances mécaniques. D'un autre côté, il a été montré qu'au-delà de cette température, le béton géopolymère peut gagner en résistance dû à la réaction supplémentaire de ses constituants. Luhar et al. [25] ont par ailleurs observé que la résistance à la compression du béton géopolymère exposé à une température de 800°C était supérieure à sa résistance lorsqu'il est exposé à une température de 600°C. G. Mathew et Al. ont également observé qu'entre 600 et 800°C, le béton géopolymère n'enregistre pas de réduction de sa résistance à la compression [26].

➤ Disponibilité de la matière première

Il a été montré plus haut que tout matériau contenant majoritairement du silicium et de l'aluminium sous une forme amorphe est une source potentielle pour la fabrication des géopolymères contrairement au ciment portland qui nécessite du clinker pour son élaboration. Le Burkina Faso ne dispose pas de minerais de calcaire de bonne qualité nécessaire pour la fabrication du clinker. Par conséquent, ce dernier est importé depuis les pays voisins à savoir le Togo. L'industrie du béton fera face à d'autres challenges pour répondre à la demande sans cesse croissante du ciment portland dû au fait que les réserves de calcaire ne seront pas éternelles.

D'un autre côté, l'abondance de matières locales riches en silice et en alumine telles que le métakaolin, les cendres de balles de riz utilisables pour la synthèse des géopolymères supprime cette nécessité de faire de longs trajets pour se les procurer. Ceci pourrait avoir un fort impact économique et environnemental sur les populations dans la mesure où l'utilisation de ces

matériaux locaux pourra engendrer des retombées économiques directes et indirectes pour les localités concernées.

III. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Dans cette partie, nous présenterons de manière synthétique les matériaux, les équipements utilisés et les procédures expérimentales. Nous commencerons par présenter les matériaux qui ont été utilisés : la nature du ciment, le métakaolin, le gravier, le sable et les adjuvants, en nous attachant à leurs propriétés physiques, chimiques et minéralogiques. Ensuite, nous décrirons les méthodes de caractérisation du béton à l'état frais et à l'état durci.

III.1. Matériaux

❖ La source d'aluminosilicate

La source d'aluminosilicate utilisée pour le béton géopolymère est du métakaolin (Photo 1). C'est le même kaolin utilisé dans les travaux de recherche de Sore et al.[27]. La composition chimique du métakaolin (*tableau II*) montre que la silice (57.9%) et l'alumine (38.3%) sont les oxydes majoritaires, avec un rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ égal à 2,57. Le métakaolin obtenu est recueilli dans des sacs en plastique et conservé à température ambiante à l'abri de tout contaminant.



Photo 1: Echantillon de métakaolin

Tableau II: Composition chimique du métakaolin

Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₃	LOI
Métakaolin de Saaba	57,85	38,3	0,05	2,3	0,23	0,11	0,09	0,01	0,09	0,02	1,01

❖ La solution activatrice : hydroxyde de sodium

Dans notre cas, la solution activatrice utilisée pour la formulation du béton géopolymère est une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) de concentration 12M. Notre choix s'est porté sur cet hydroxyde alcalin pour son avantage économique. En effet, les investigations ont révélé que les silicates alcalins sont plus chers que l'hydroxyde de sodium. C'est donc dans le souci de produire un béton à coût accessible pour la population que notre choix s'est tout naturellement porté sur celui-ci.

Nous disposons de cristaux de NaOH pure. La préparation de la solution alcaline consiste en la dissolution de ces cristaux de NaOH pure dans l'eau distillée. La dissolution de la soude dans l'eau est une réaction exothermique. Nous laissons donc refroidir à température ambiante la solution ainsi obtenue pendant 24h au moins avant utilisation.

La relation entre la masse de cristaux de NaOH, la concentration et le volume de solution est :

$$C = \frac{m}{M \cdot V} \quad (\text{Équation 4}) :$$

- m est la masse de cristaux de NaOH,
- M est la masse molaire du NaOH (40g/mol)
- V est le volume de solution que l'on désire obtenir.

On a donc $m = M \cdot C \cdot V$. De cette relation, l'on déduit que la masse de cristaux de NaOH pure nécessaire pour la préparation de 10l de solution est $m = 40 \cdot 12 \cdot 10$. D'où $m = 4800\text{g}$ soit 4,8kg soit une concentration massique de soude de 0,48kg/l.

Ainsi, il faudra ajouter 4,8kg de cristaux de NaOH pure à 10l d'eau pour obtenir une solution de soude de concentration 12M.

Il n'y a plus d'ajout d'eau supplémentaire lors de la formulation du béton géopolymère de sorte à ne pas diluer la solution activatrice. La seule source d'eau dans le béton est celle contenue dans la solution activatrice.

❖ Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment de classe CPA45 CEM I – 42,5 R de la société CIMFASO. Ce type de ciment à fort taux de clinker garantit à 28 jours une résistance minimale en compression

de 42,5 MPa sur mortier normalisé (EN 196-1, AFNOR 2006) et tout en ayant des résistances élevées aux jeunes âges (notation R). Les temps de décoffrage peuvent être raccourcis sur les chantiers, et les cadences de production peuvent être augmentées en préfabrication. Le ciment de type CEM I est essentiellement composé de clinker à un taux de 95 % en masse au minimum.

❖ Le sable

Le sable qui a été utilisé pour les différentes formulations est un sable local, de granulométrie 0/5. Après tamisage, il est lavé et séché puis conservé dans un récipient en plastique à l'abri de tout contaminant. Sa courbe granulométrique est montrée sur la Figure 1.

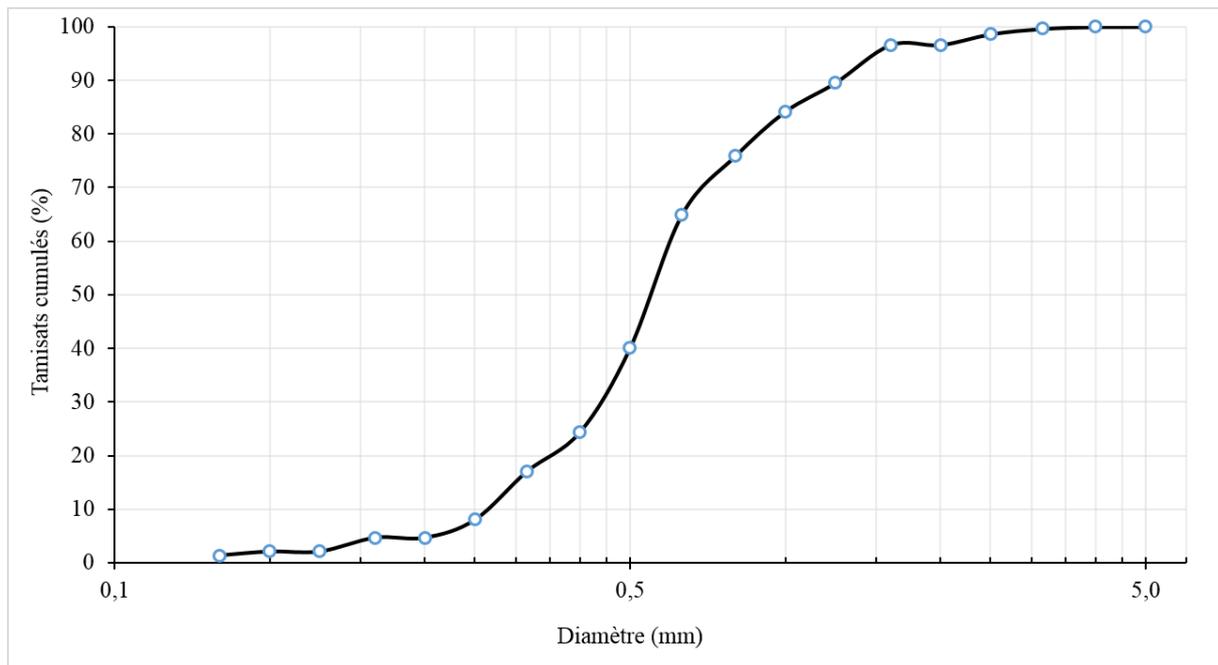


Figure 1: Courbe granulométrique du sable.

❖ Le gravier

Le gravier utilisé a été tamisé afin d'obtenir des granulats de diamètre 05/10 (Figure 2), puis lavé afin de réduire les impuretés.

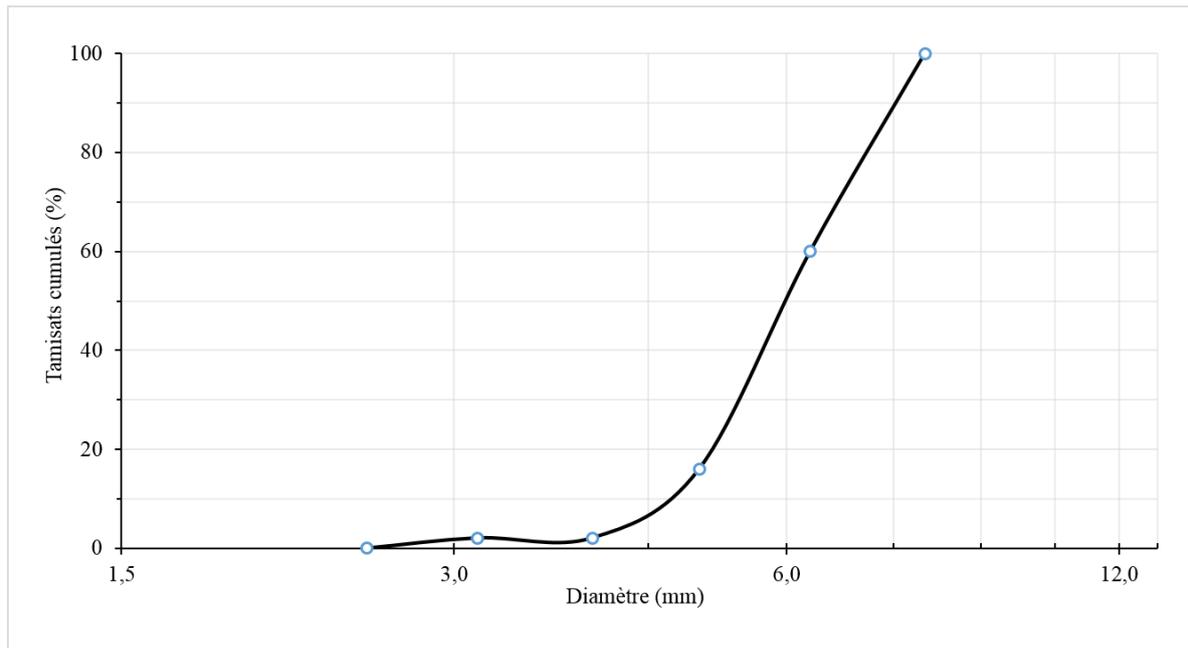


Figure 2: Courbe granulométrique du gravier

❖ Le superplastifiant

Le précurseur métakaolin exige beaucoup d'eau pour être maniable. La demande en eau du métakaolin est plus élevée que celle du ciment portland à cause de la surface spécifique des grains de métakaolin plus élevée. Or il est prouvé que plus le rapport eau/liant augmentait moins le béton est performant [12] comme l'indique la Figure 3 inspirée de Cyr [10]. C'est donc dans le souci de réduire la quantité d'eau nécessaire pour une bonne mise en place qu'une quantité de superplastifiant a été utilisée. Ici, le superplastifiant utilisé est du DYNAMON NRG 1045. C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau à base de polymères acryliques modifiés, de densité 1,08. Le choix s'est porté sur ce superplastifiant compte tenu de son pH proche de la neutralité (6.5+/- 1) contrairement à d'autres superplastifiants qui ont un pH plus acide et dont l'ajout pourrait faire baisser de façon plus significative le pH du mélange.

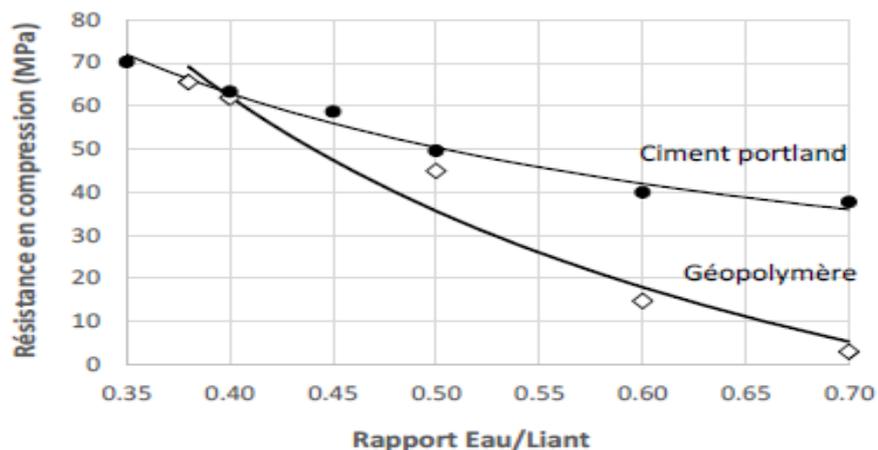


Figure 3: Performances du béton géopolymère en fonction du rapport e/c.

III.2. Méthodes

III.2.1. Formulation et détermination des caractéristiques physiques du béton

❖ Formulation du béton

La composition du squelette granulaire du béton géopolymère a été déterminée sur la base des travaux de Pouhet [14] et Cao [15]. Nous avons six (6) formulations correspondantes à différents taux de substitution du métakaolin par le ciment portland comme indiqué dans le *Tableau III*.



Photo 2: Echantillons de béton

Ce taux de substitution massique varie de 0 à 25% d'où la dénomination $\text{GPC}_{(100-i)}\text{OPC}_i$ où « *i* » correspond au taux de substitution du métakaolin par le ciment portland. Les granulats sont d'abord mélangés avec le métakaolin et le ciment. Après homogénéisation du mélange, nous y ajoutons graduellement la solution d'hydroxyde de sodium pendant que le malaxage se poursuit dans un malaxeur électrique à mortier. Le temps de malaxage ne dépasse pas cinq minutes.

Tableau III: Formulation du béton géopolymère

Matériaux (kg/m ³)	Formulations					
	GPC ₁₀₀ OPC ₀	GPC ₉₅ OPC ₅	GPC ₉₀ OPC ₁₀	GPC ₈₅ OPC ₁₅	GPC ₈₀ OPC ₂₀	GPC ₇₅ OPC ₂₅
Métakaolin	350,00	332,50	315,00	297,50	280,00	262,50
Ciment	0,00	17,50	35,00	52,50	70,00	87,50
Superplastifiant	23,82	23,82	23,82	23,82	23,82	23,82
Cristaux NaOH (kg/m ³)	126,40	126,40	126,40	126,40	126,40	126,40
Eau (kg/m ³)	229,10	229,10	229,10	229,10	229,10	229,10
Sable (kg/m ³)	723,08	723,08	723,08	723,08	723,08	723,08
Granite (kg/m ³)	958,00	958,00	958,00	958,00	958,00	958,00
Rapport e/c (eau/liant)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Rapport superplast/liant	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

❖ Confection des éprouvettes

Les essais de résistance et de durabilité sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques dont les moules ont des caractéristiques définies par la norme NF EN 12390-1. Pour notre formulation, nous avons utilisé des moules cylindriques de 50mm×100mm (Photo 2) et 40mm×60mm respectivement pour les essais mécaniques et de durabilité. La mise en place dans les moules a lieu par vibration sur une table à choc en deux couches de 60 coups chacune.

❖ Détermination de l'ouvrabilité et de la masse volumique du béton

L'ouvrabilité du béton a été déterminée par la mesure de l'affaissement au mini-cône d'Abram's (Figure 4) conformément aux prescriptions de la norme française NF P 18-423.

La masse du béton est mesurée et rapportée au volume du récipient contenant ce dernier. La masse volumique (ρ), le volume et la masse du béton sont reliés par la relation suivante:

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}} \quad (\text{Équation 5}).$$

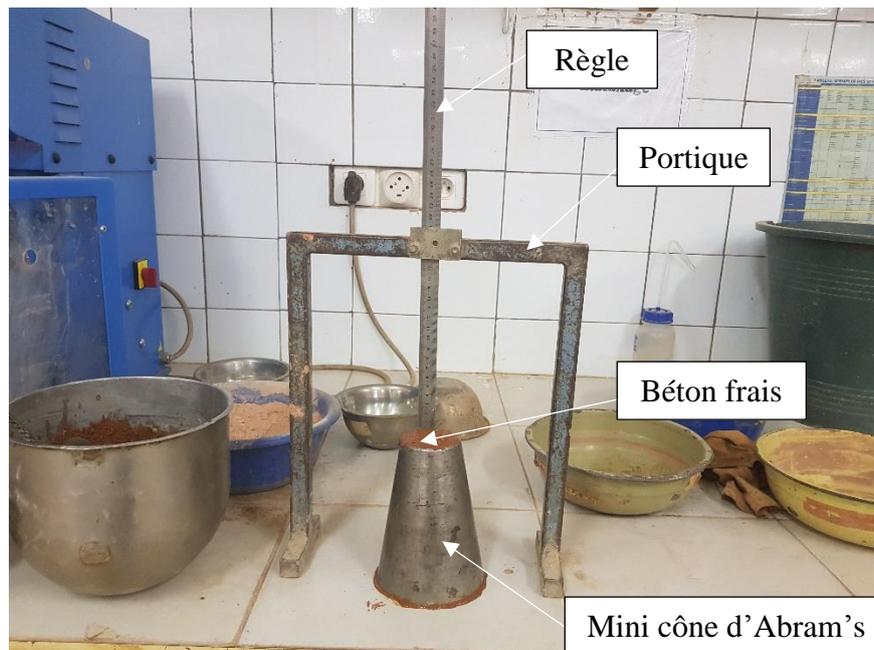


Figure 4: Dispositif de mesure de l'ouvrabilité du béton

III.2.2. Détermination des caractéristiques mécaniques du béton

❖ Essai de compression

Le dispositif de cet essai est montré sur la Photo 3. L'essai de compression a pour but de connaître la résistance à la compression du béton. Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0,5 MPa/s avec une tolérance de 0,2 MPa/s. La charge de rupture P est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette ; la résistance, F_c , est exprimée en Mpa à 0,5Mpa près et a pour expression :

$$F_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Équation 6}).$$

Dans la relation ci-dessus F_c est exprimé en MPa, P est exprimé en newton (N) et S en mm^2 . La résistance à la compression d'un béton est exprimée par sa résistance caractéristique f_{ck} . Elle est définie comme la valeur de la résistance en dessous de laquelle on peut s'attendre à rencontrer 5% (ou 10%) au plus de l'ensemble des résultats d'essais de résistance possibles du béton spécifié.

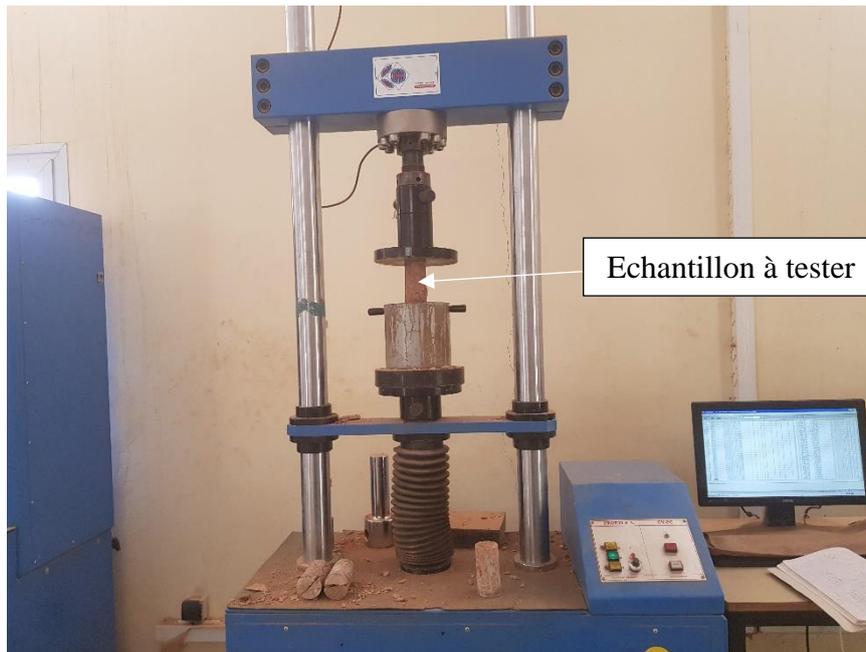


Photo 3: Dispositif de l'essai de compression

❖ Essai de traction par fendage

Le but de cet essai est de connaître la résistance à la traction du béton de l'éprouvette. Dans cet essai on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse. La vitesse de chargement est telle que l'accroissement de la contrainte de traction de 0.05 MPa/s avec une tolérance de $\pm 20\%$. Si h est la hauteur de l'éprouvette, d son diamètre et P la charge appliquée, la contrainte de rupture vaut :

$$F_{st} = \frac{2P}{\pi Dh}. \quad (\text{Équation 7})$$

Dans cette relation, F_{st} est exprimé en MPa ; P est exprimée en newtons (N) ; d et h sont exprimés en millimètres (mm).



Photo 4: Dispositif de l'essai de traction par fendage

❖ Essai pundite

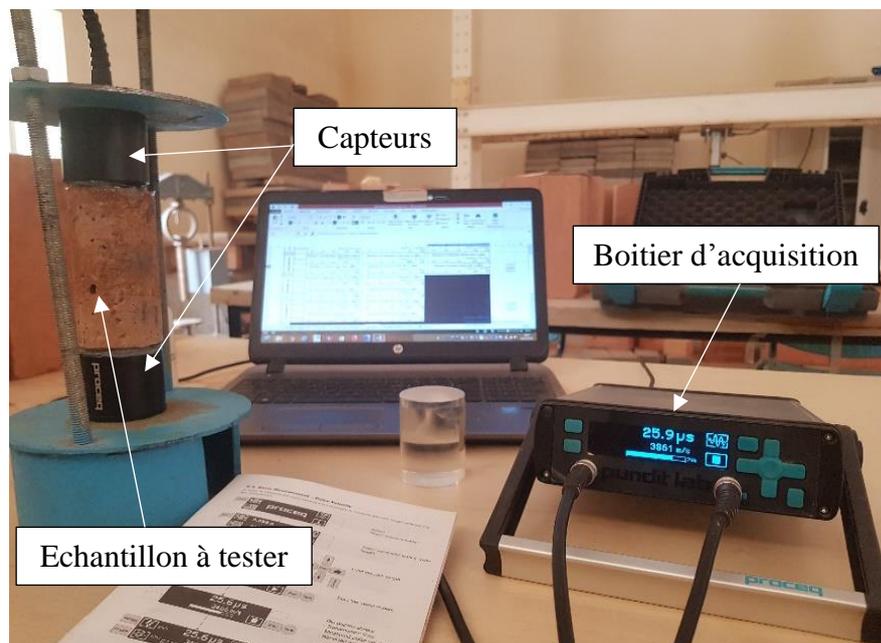


Photo 5: Dispositif de l'essai pundite

L'objectif de l'essai est d'apprécier la qualité du béton, sans procéder à un prélèvement d'éprouvette. Le dispositif de cet essai est présenté sur la Photo 5. Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton à l'aide d'un testeur de vitesse ultrasonique à impulsion. La surface de l'éprouvette doit être relativement plane. Une fois l'appareil mis en marche, le temps de propagation en microsecondes est affiché. Le module d'élasticité

dynamique (E_d), la masse volumique le coefficient de poisson et la vitesse du son (V) sont reliés par la relation :

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}. \quad (\text{Équation 8})$$

Le constructeur recommande la valeur du coefficient de poisson (ν) de 0.15 et 0.30 respectivement pour des bétons de grande résistance à la compression et les bétons de faible résistance à la compression. A partir de la mesure de la vitesse des impulsions ultrasoniques, il est possible de déterminer graphiquement le module élastique et dynamique du béton (Figure 5).

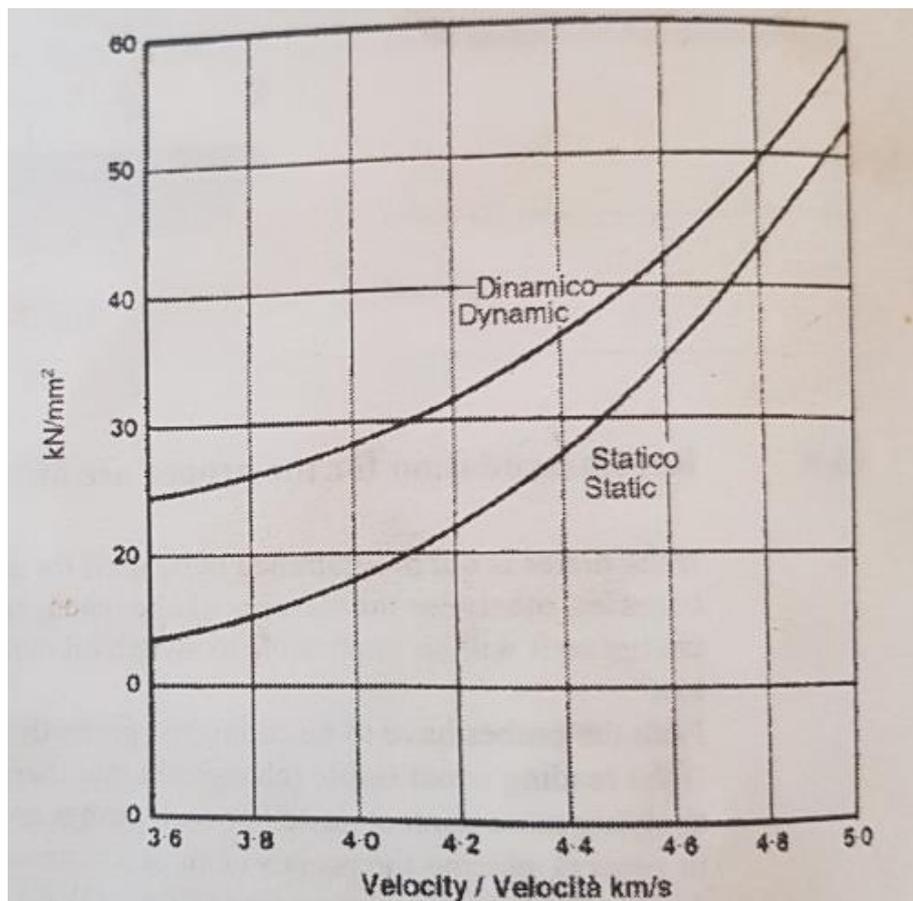


Figure 5: Détermination du module élastique à partir de la vitesse des impulsions ultrasoniques.

III.2.3. Essais de durabilité

La durabilité du béton a un impact majeur sur la durée de vie des composants d'une structure en béton armé. Un béton durable assure la protection contre la corrosion des armatures de renforcement. Il permet également de limiter les dégradations du béton en cas d'attaque chimique. Nous évaluerons dans cette partie la durabilité des diverses formulations.

❖ Attaque acide

L'essai de résistance à l'attaque acide a consisté à la mesure de la perte de masse des éprouvettes de béton immergées dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) dont la concentration volumique est de 3%. Le choix s'est porté sur cet acide car il fait partie des acides majoritairement trouvés dans les pluies acides. Les éprouvettes de béton sont conservées à température ambiante pendant 28 jours après leur confection puis elles sont immergées dans la solution d'acide. La perte de masse est mesurée à 2-7 et 14 jours après l'immersion dans les solutions. La perte de masse entraîne une augmentation du pH de la solution. Nous procédons donc régulièrement à un ajustement du P^H en ajoutant de petites quantités d'acide sulfurique de sorte à maintenir le P^H à 0.7 environ comme indiqué sur la Figure 6.

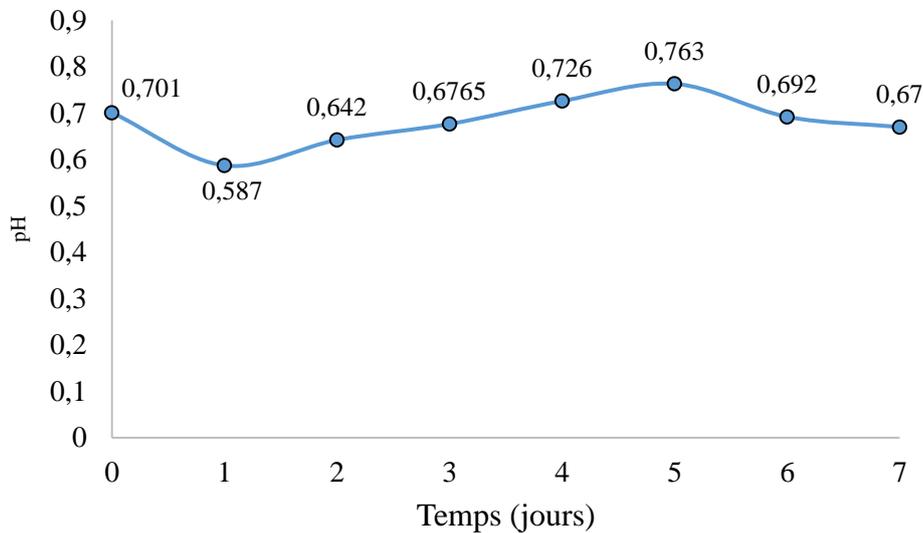


Figure 6: Plage de variation du pH

❖ Absorption capillaire

L'absorption capillaire mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de béton, mis en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Une remontée capillaire se caractérise par une migration permanente d'eau dans le béton. Cette caractéristique reflète la quantité d'eau pouvant être absorbée par le béton lorsqu'une seule face est en contact avec de l'eau.

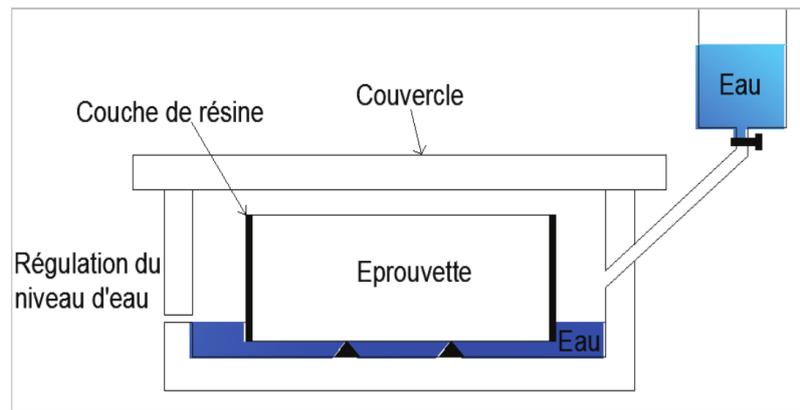


Figure 7: Montage expérimental pour l'essai d'absorption capillaire

A l'issue de l'essai, le coefficient d'absorption est déterminé et est défini par la relation suivante :

$$C_a = \frac{M_x - M_0}{S}. \quad (\text{Équation 9})$$

C_a : coefficient d'absorption en kg/m^2 ; M_x : Masse de l'éprouvette après absorption jusqu'à masse constante en kg ; M_0 : Masse de l'éprouvette après séchage jusqu'à masse constante en kg et S la surface en m^2 . La sorptivité exprimée en $(kg \cdot m^{-2} \cdot h^{1/2})$ est le coefficient directeur de la droite exprimant l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de la racine carré du temps.

❖ Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est une représentation du volume poreux et constitue un paramètre de premier ordre qui commande les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. Cet essai est conduit sur trois échantillons dans une ambiance régulée ($20^\circ C$). Le principe est de déterminer par pesée la masse d'un corps d'épreuve sec, sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique. Les éprouvettes conservées dans l'eau à $20^\circ C$ sont d'abord saturées. Par la suite, M_{air} est déterminée par simple pesée et M_{eau} est mesurée par pesée hydrostatique. Et puis, les éprouvettes sont placées dans l'étuve à $105^\circ C$ jusqu'à obtenir une masse constante M_{sec} . Le calcul de la porosité accessible à l'eau exprimée en pourcentage volumétrique est donné par la formule :

$$P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100. \quad (\text{Équation 10})$$

P_{eau} : porosité accessible à l'eau en %;

M_{air} : masse à l'air de l'éprouvette saturée en kg ;

M_{sec} : masse de l'éprouvette séchée jusqu'à masse constante à $105^\circ C \pm 5^\circ C$. en kg ;

M_{eau} : masse déjaugée de l'éprouvette saturée en kg.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Propriétés Physique :

- L'aspect du béton :

Au démoulage, le béton géopolymère a une couleur rouge-brique donnée par le métakaolin (Photo 2). Cette couleur a tendance à devenir plus sombre au fur et à mesure que le taux de substitution de ciment portland augmente. Il est également observé l'apparition d'une fine couche blanchâtre sur certains bétons quelques temps après le démoulage. Ce phénomène est dû à la carbonatation de la solution alcaline en contact de l'air [28].

Le béton géopolymère présente une ouvrabilité acceptable comme le montre le *Tableau IV*. Ces résultats indiquent que la mise en place du béton géopolymère obtenu peut se faire sans difficulté sur les chantiers.

Tableau IV: Affaissement au mini-cône d'Abram's

	Formulation					
	GPC ₁₀₀ OPC ₀	GPC ₉₅ OPC ₅	GPC ₉₀ OPC ₁₀	GPC ₈₅ OPC ₁₅	GPC ₈₀ OPC ₂₀	GPC ₇₅ OPC ₂₅
Affaissement(mm)	10,00	16,67	28,00	37,00	13,50	15,33

- L'évolution de la masse volumique :

Les résultats de l'évolution de la masse volumique du béton géopolymère sont résumés dans la Figure 8. L'on remarque que la masse volumique du béton géopolymère varie peu avec l'âge. La légère baisse de la masse volumique du béton serait probablement due à la perte d'une partie de l'eau contenue dans le béton géopolymère. Cette baisse cadre avec les résultats de Pouhet qui avait trouvé que plus de 90% de l'eau initialement contenue dans les pâtes géopolymères s'évaporerait aisément à des températures inférieures à 100°C [29]. Nos résultats sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés par Joshi et al. qui avaient trouvé une masse volumique comprise entre 2.275 à 2.350 g/cm³ [12].

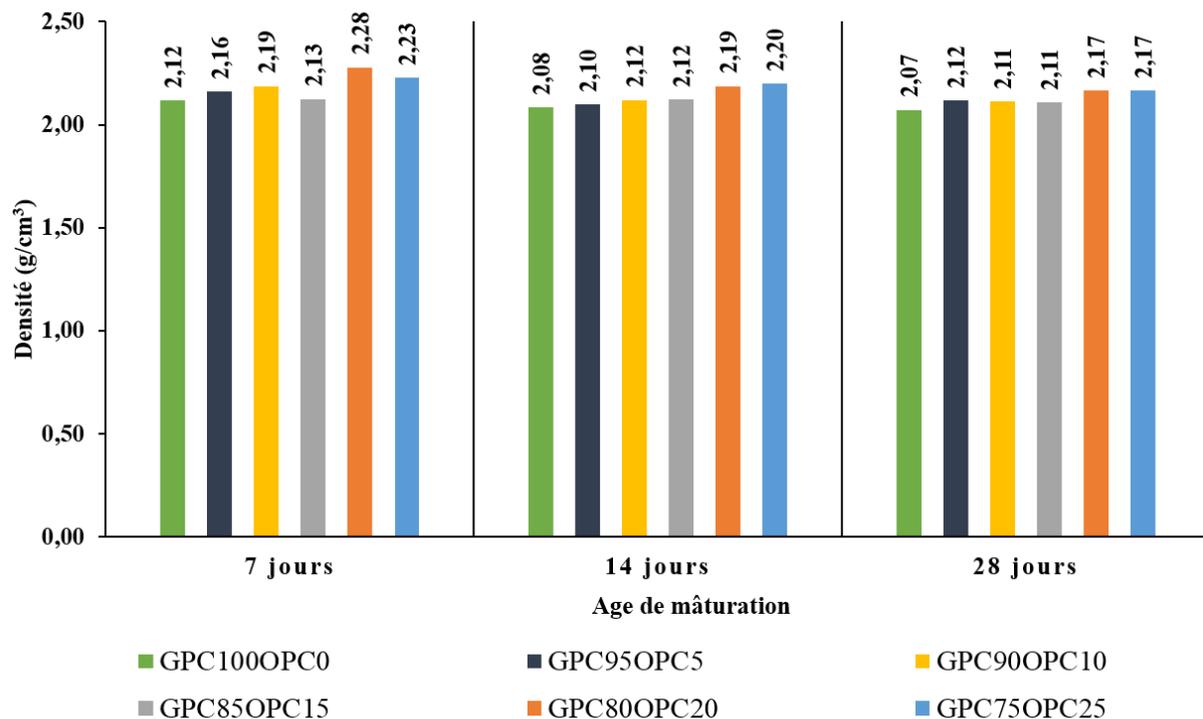


Figure 8: Evolution de la masse volumique au cours du temps

IV.2. Propriétés mécaniques du béton

- Résistance à la compression

Les résultats de l'essai de compression sont résumés dans la Figure 9. A jeune âge (7 jours), il est impossible de déterminer le taux de substitution optimal. Ce comportement serait dû aux conditions de stockage des échantillons. Ces derniers sont conservés à température ambiante et donc soumis aux fluctuations thermiques. Notons que les différentes formulations ont été faites à des périodes différentes.

En l'absence de ciment, le béton géopolymère atteint 97% de sa résistance caractéristique (F_{c28}) à 14 jours d'âge. La résistance à la compression à 28 jours n'est que de 10 MPa environ sans substitution de ciment. La cinétique de la résistance à la compression du géopolymère sans inclusion de ciment portland correspond aux résultats trouvés dans la littérature. Meta et al[19] ont trouvé que la résistance du géopolymère évoluait seulement de 0.89% entre 7 et 28 jours. La même cinétique est observée pour un taux de substitution de 5%. L'on remarque que le gain en résistance entre 14 et 28 jours n'est que 4% et la résistance obtenue à 28 jours n'est que de 16 MPa. Le remplacement de 5% de métakaolin par le ciment portland a néanmoins permis une amélioration de la résistance à la compression à 28 jours du béton géopolymère de plus de 60%.

Lorsque le taux de substitution atteint 10%, la croissance de la résistance à la compression évolue comme dans le cas du béton hydraulique puisque le gain en résistance entre 14 et 28 jours est de l'ordre de 23 à 32%. Remarquons qu'à 10% de substitution, la résistance en compression atteint 26 MPa ce qui est largement suffisant pour les applications sur les chantiers au Burkina Faso car les ouvrages courants y sont généralement dimensionnés avec un béton de résistance caractéristique de 25 MPa.

La résistance du béton a atteint la valeur maximale de 30.5 MPa avant de chuter à près de 24 MPa pour des taux de substitution de 20 et 25% respectivement. Metha et al. [12] ont observé le même phénomène mais de façon moins prononcée que dans notre cas.

En effet, lorsque l'on atteint le taux optimal de substitution, la chaleur supplémentaire provenant de l'hydratation du ciment portland provoque un départ d'eau modifiant ainsi la structure de la matrice du béton. Cette chute serait aussi due à la réduction du silicium et de l'aluminium dans le mélange vu que le ciment portland contient peu ces éléments. Ainsi, au-delà de 20%, la composition en calcium augmente au dépend du silicium et de l'aluminium qui deviennent moins disponibles pour la formation des produits de la polymérisation notamment les NASH.

L'incorporation du ciment portland dans le béton géopolymère sous une cure à température ambiante a permis d'améliorer considérablement sa résistance à la compression comme l'ont observé Askarian et al [17].

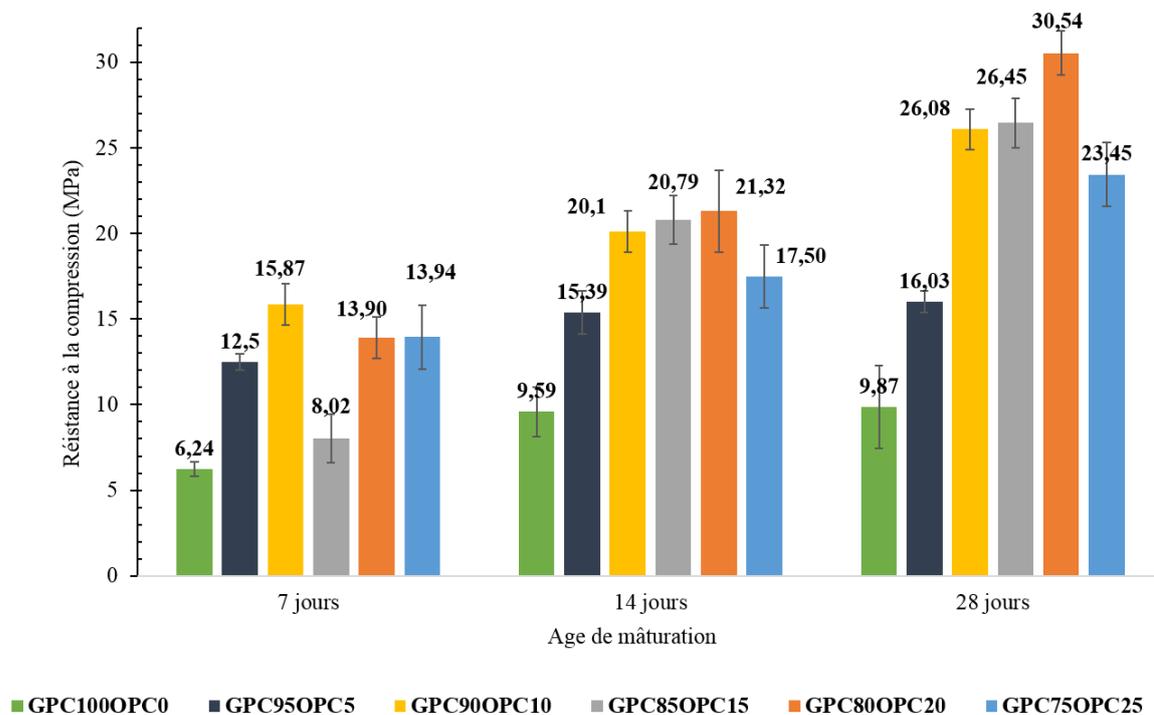


Figure 9: Résistance à la compression

- Résistance à la traction

La cinétique de la résistance à la traction est pratiquement la même que celle observée dans le cas de la résistance à la compression. La résistance à la traction du béton géopolymère varie très peu en fonction du taux de substitution de ciment OPC. Tout comme le béton classique, la résistance à la traction du béton géopolymère est très faible. Ces résultats se rapprochent de ceux trouvés par Ramujee et al [17] où la résistance à la traction à 28 jours d'un béton de même classe de résistance est 2.33 MPa en moyenne.

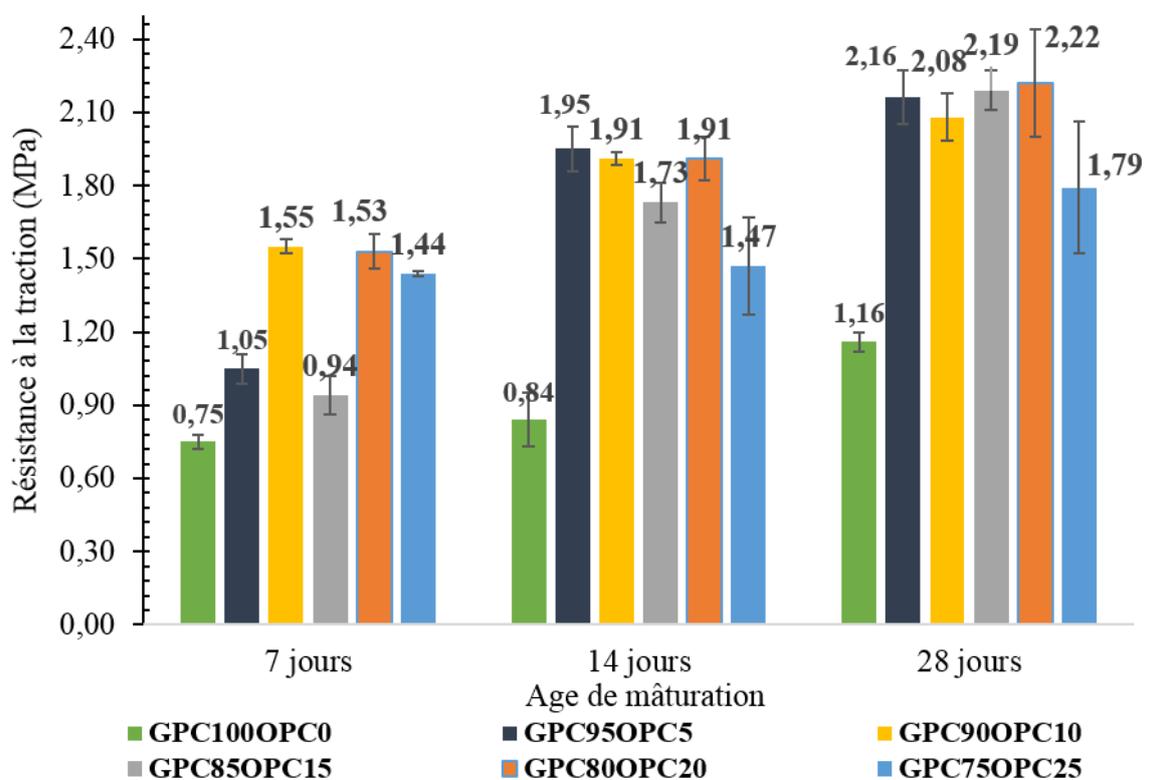


Figure 10: Résistance à la traction

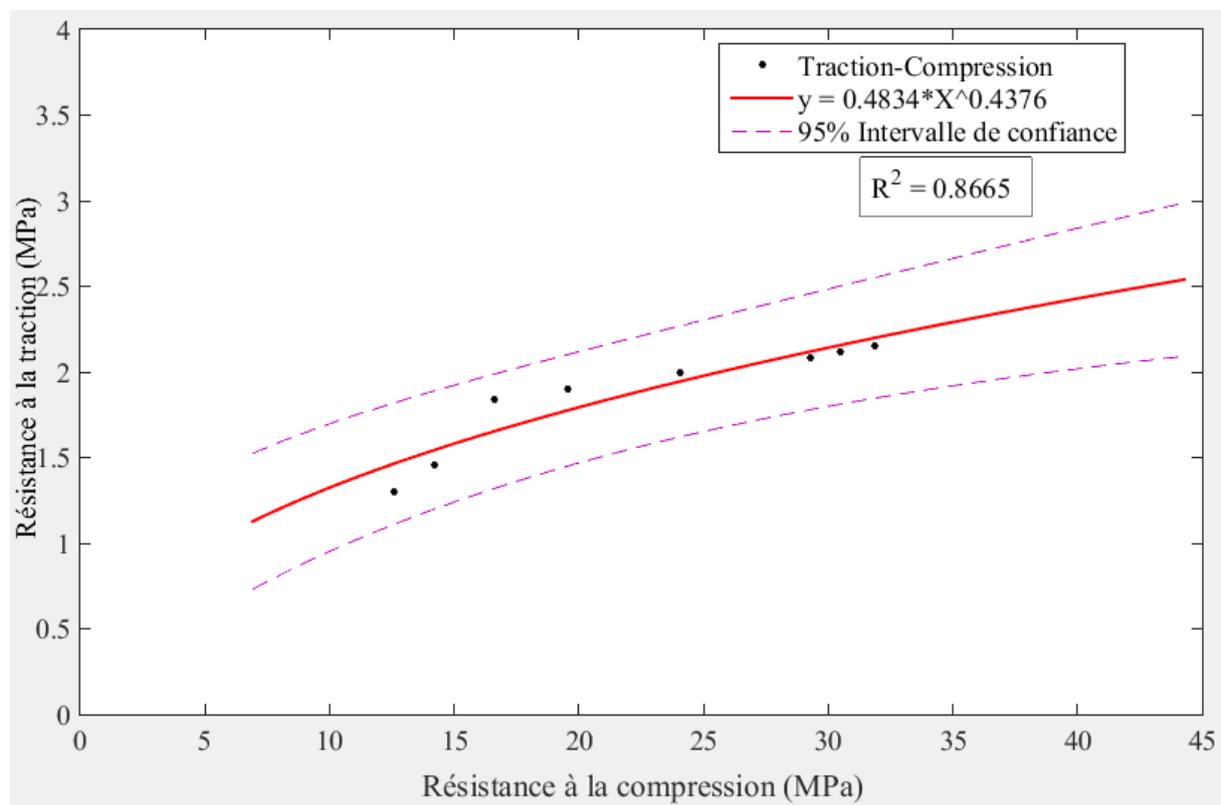


Figure 11: Evolution de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour la formulation avec 20% de substitution

- Proposition d'une loi empirique liant la résistance à la traction et la résistance à la compression.

Dans notre cas, la relation empirique entre la résistance à la traction et la résistance à la compression peut être traduite par l'équation sur la Figure 11 avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.8665$. Dans la Figure 12 nous avons comparé cette loi avec certaines lois trouvées dans la littérature. Ramujee et al. [17] proposent par exemple la relation ci-dessous :

$$f_{st} = 0.08 * f_{cs}^{0.92} \quad (\text{Équation 11}).$$

On remarque que les prédictions de l'ACI (American concrete institute) sont les plus proches de la loi empirique trouvée par Matlab que celles de Ramujee et Singh [30]. L'ACI a établi des relations entre les performances mécaniques (résistance à la traction, résistance à la compression, module élastique) des bétons hydrauliques. Par conséquent l'on peut déduire que le comportement mécanique du béton géopolymère est similaire à celui du béton hydraulique. Singh et al sont parvenus à la même conclusion. Il convient néanmoins de souligner que la résistance à la traction du géopolymère est légèrement supérieure à ce qui est prévue par l'ACI pour le béton hydraulique. Ceci serait dû à la force de cohésion du liant géopolymère. En effet,

les recherches ont démontré que la force de cohésion du liant géopolymère est supérieure à celle du béton hydraulique. K. Pandurangan et al [13] ont par ailleurs trouvé dans leurs travaux que l'adhésion (due principalement à la cohésion chimique) du béton géopolymère à l'acier est meilleure que celle du béton hydraulique.

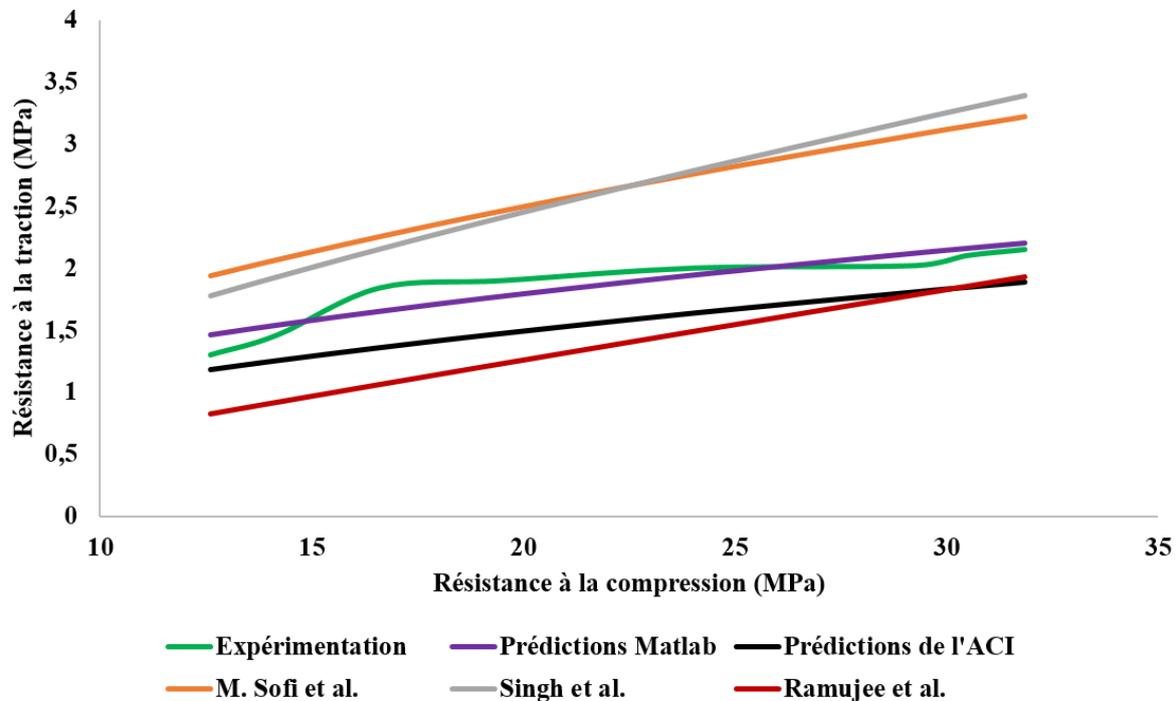


Figure 12: Comparaison des prédictions des lois empiriques

- Essai pundite.

Ses résultats montrent que la vitesse d'impulsion ultrasonique varie avec le taux de substitution de ciment. La comparaison des vitesses des impulsions ultrasoniques nous renseignent indirectement sur la structure de la matrice des bétons. En effet, le son se propage moins bien dans le vide que dans la matière. Une faible vitesse sous-entend une présence de plus de vide. L'on pourra remarquer que la vitesse maximale est obtenue sur la formulation ayant donné la meilleure résistance à la compression. Les résultats obtenus pour la vitesse d'impulsion ultrasonique sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus sur un béton géopolymère (3.42 km/s) réalisé par Kumar et al. [31].

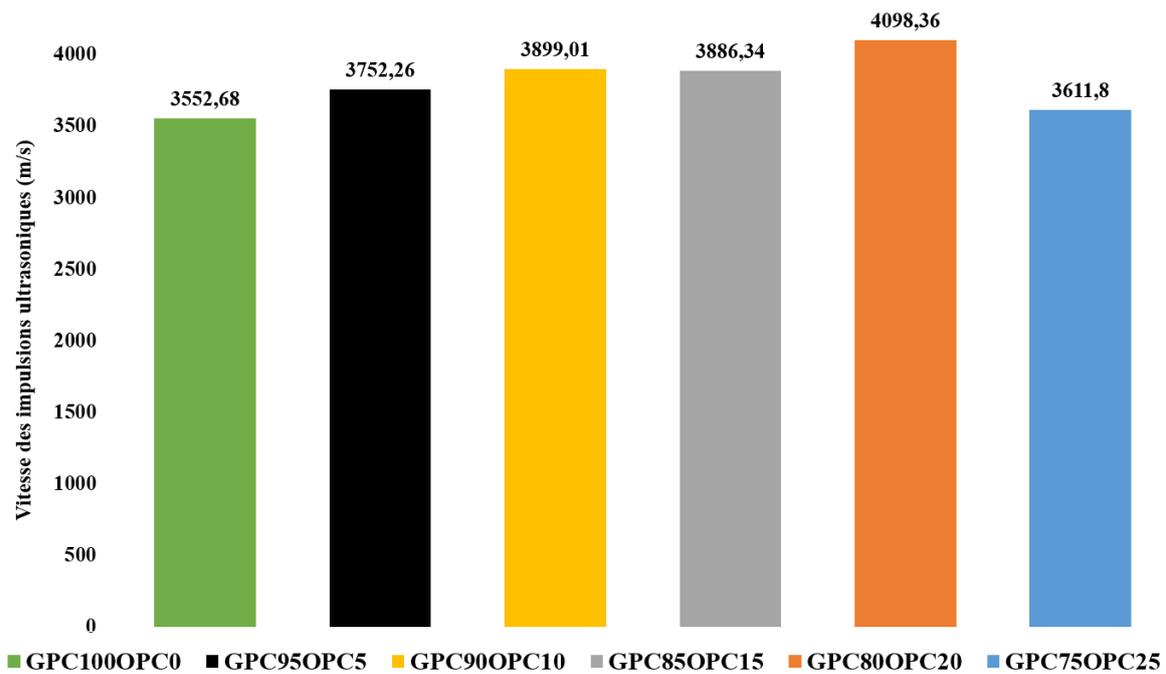


Figure 13: Essais pundite

IV.3. Essais de durabilité

- Essais d'attaque acide

Les résultats de cet essai sont présentés sur la Figure 14. La perte en masse des échantillons due à l'action de l'acide sulfurique évolue avec le temps d'immersion. Néanmoins, elle évolue moins vite à partir du 7^e jour quelle que soit la formulation.

L'on remarque également que les pertes évoluent dans le même sens que l'augmentation du taux de substitution du ciment portland exceptée la formulation avec 15% de substitution: plus il y a du CaO, plus la marge rongée est importante. Ce résultat cadre avec l'observation selon laquelle les produits d'hydratation du ciment sont plus vulnérables dans l'acide sulfurique que les produits de la géo polymérisation. L'on constate néanmoins que l'effet de l'acide sur le GPC₈₀OPC₂₀ a subi moins de perte en masse que le GPC₇₅OPC₂₅ bien que ces deux formulations comportent des taux relativement proches de ciment portland. Ceci serait dû à la densification de la matrice du GPC₈₀OPC₂₀ comparativement au GPC₇₅OPC₂₅ qui a d'ailleurs enregistré une vitesse plus faible des pulsations ultrasoniques dans l'essai pundite.

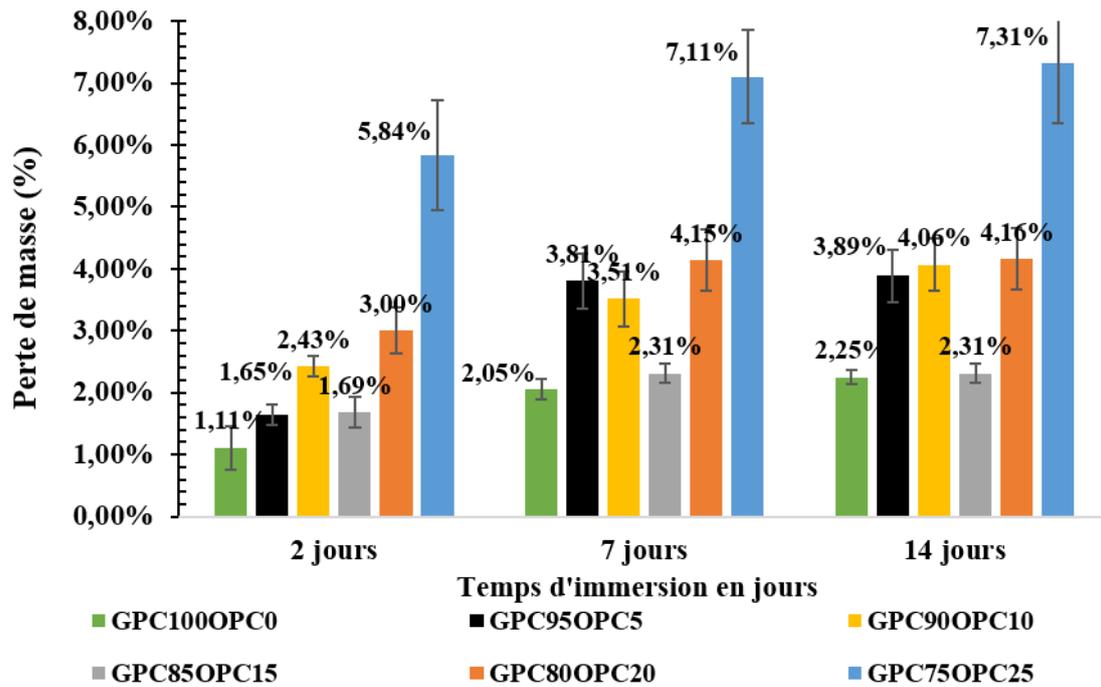


Figure 14: Résistance à l'attaque acide

- Porosité accessible à l'eau

Entre 0 et 20% de substitution de ciment, l'augmentation du taux de ciment a pour effet la diminution de la porosité du béton. Au-delà de 20% de substitution, la porosité du béton géopolymère se stabilise. L'on observe néanmoins une légère augmentation de celui-ci à 25% de substitution.

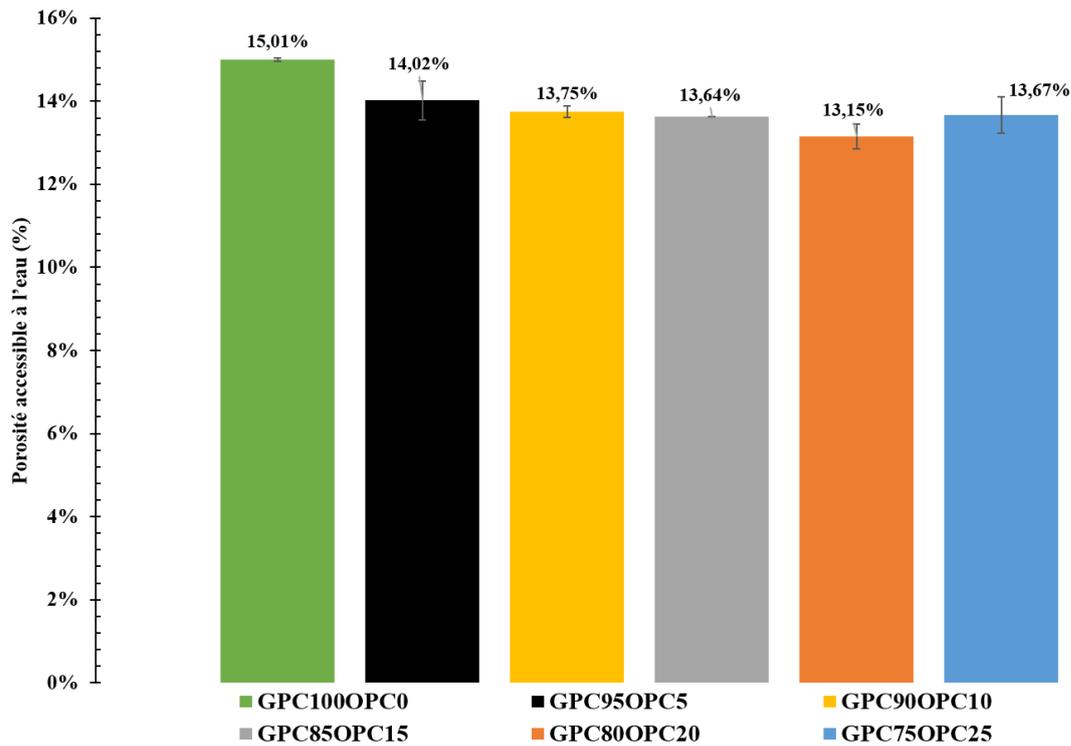


Figure 15: Porosité accessible à l'eau

- Absorption capillaire :

Les Figure 16 et Figure 17 montrent l'évolution dans le temps du coefficient d'absorption capillaire pour les différents taux de substitution. Ces résultats montrent que le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment portland. Le comportement vis-à-vis de l'absorption d'eau d'un béton en immersion totale diffère de son comportement lorsqu'il est partiellement immergé (mesure du coefficient d'absorption d'eau). Le coefficient d'absorption d'eau lui, dépend des caractéristiques des chemins de percolation du matériau poreux, essentiellement de la taille des pores, leur connectivité et leur forme. Les hydrates produits par le ciment segmentent la porosité capillaire et augmentent la discontinuité des chemins de percolation. Ainsi, plus il y a de ciment portland plus la porosité capillaire est affectée et plus le coefficient d'absorption d'eau diminue. La sorptivité traduit directement la vitesse d'absorption du matériau. Le GPC₁₀₀OPC₀ présente la sorptivité la plus élevée (plus de $4,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{1/2}$) ceci explique la saturation de celui-ci après seulement 12 heures d'immersion.

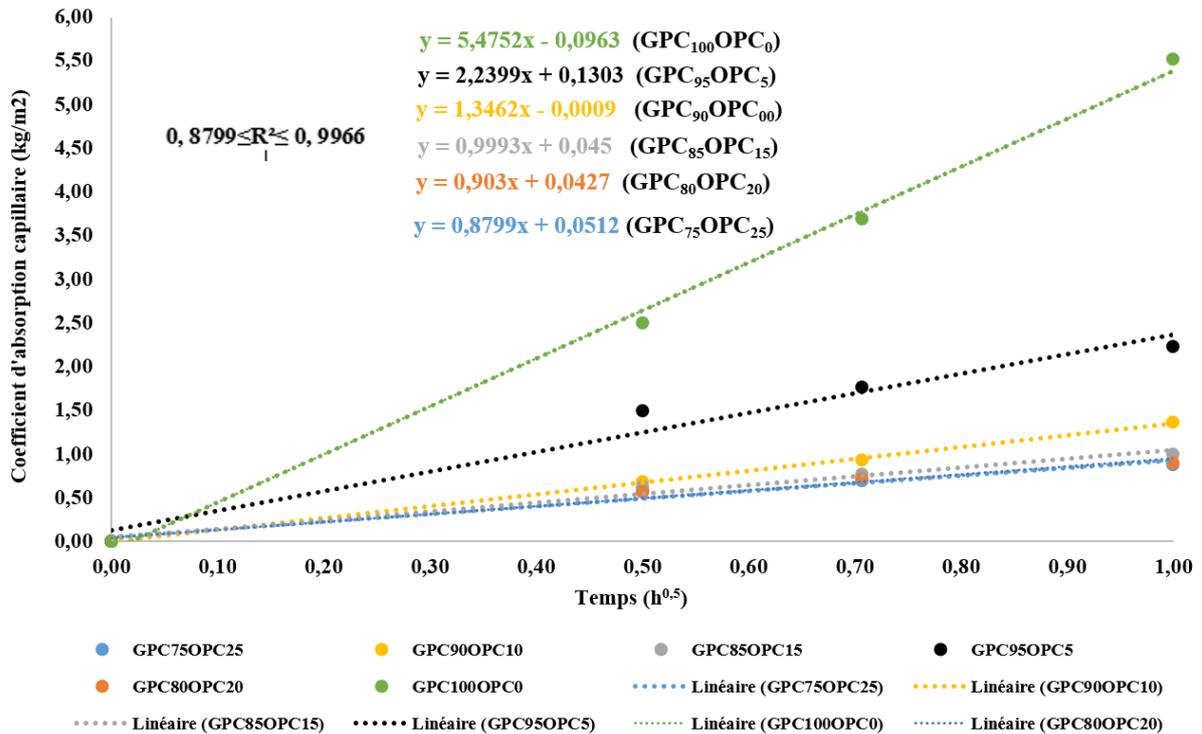


Figure 16: Remplissage des gros pores

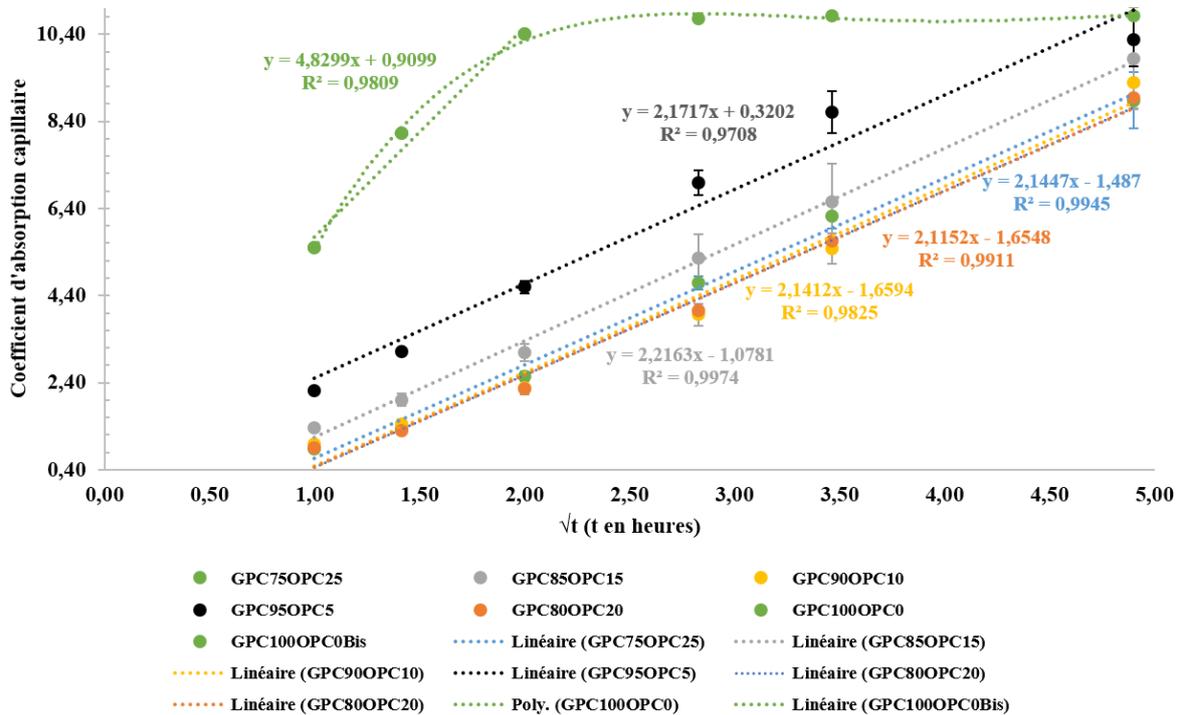


Figure 17: Remplissage des petits pores

V. CONCLUSION- PERSPECTIVES

Cette recherche avait pour objectif la synthèse d'un béton géopolymère à température ambiante à base de matériaux disponibles localement. Pour ce faire, les matériaux utilisés ont d'abord été caractérisés avant leur utilisation pour les différentes formulations. La source aluminosilicate est un métakaolin provenant de la calcination à 700°C de l'argile de la carrière de Saaba. La méthode de formulation ainsi que le squelette granulaire ont été obtenus à partir des travaux de Pouhet.

Les résultats ont montré que sur le plan physique, les bétons formulés ont une bonne ouvrabilité caractérisée par un affaissement au cône d'Abrams compris entre 15 et 40mm garantissant ainsi une facilité de mise en place. Les essais sur les propriétés mécaniques ont montré que de façon générale, les valeurs des résistances en compression et en traction sont plus importantes lorsque le métakaolin est remplacé en parti par le ciment portland. En effet à 28 jours, le gain en résistance à la compression par rapport au béton sans substitution est compris entre 60 et 200% pour des taux de substitution de ciment allant de 5 à 25%. Il est également observé qu'à des taux de substitutions dépassant 10%, la croissance du béton géopolymère évolue comme celle du béton hydraulique. La résistance à la traction des différents échantillons indiquent que celle-ci évolue très peu avec l'âge et le taux de substitution du ciment portland. La résistance à la traction du béton géopolymère est tout aussi faible que celle du béton hydraulique.

Du point de vue de la durabilité, les essais d'absorption capillaire et de porosité ont montré une amélioration des performances lorsque le ciment portland est incorporé au béton. Néanmoins, les résultats de l'essai d'attaque acide indiquent que l'incorporation du ciment portland dans le béton expose ce dernier à plus de dégradation. Alors que la perte de masse à 14 jours est seulement de 2,25% pour le GPC₁₀₀OPC₀, le GPC₇₅OPC₂₅ enregistre une perte de masse de 7,31% dans les mêmes conditions.

Les résultats actuels montrent que les bétons géopolymères réalisés avec le métakaolin de Saaba présentent des caractéristiques mécaniques pouvant permettre leur application sur les chantiers. Néanmoins avant d'atteindre cette étape il convient que d'autres études complémentaires soient menées. Il s'agira entre autre d'étudier la faisabilité de ces bétons sur d'autres carrières, étudier leur comportement au feu et face à d'autres agents chimiques tel que la diffusion des ions chlorures. La soude n'étant pas disponible localement, il convient d'orienter les recherches futures sur d'autres activants alcalins disponibles localement comme ceux utilisés dans la confection des savons traditionnels par exemple. L'on pourra également chercher à améliorer les performances mécaniques de ce béton en jouant sur des paramètres tels que la finesse du

métakaolin et/ou en ajoutant une autre source d'alumino-silicate localement disponible telle que la cendre de balles de riz. Ce matériau étant très riche en silicium, il pourrait permettre d'avoir de meilleures résistances mécaniques du béton géopolymère.

Bibliographie

- [1] J. Davidovits, « Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly(sialate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. », p. 8.
- [3] « D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M. Sumajouw, B.V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *Mater. J.* 101 (2004) 467–472. » .
- [4] P. Abhilash, C. Sashidhar, et I. V. R. Reddy, « Strength properties of Fly ash and GGBS based Geo-polymer Concrete », *International Journal of ChemTech Research*, p. 8, 2016.
- [5] « A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, A. Fernández-Jiménez, A review on alkaline activation: new analytical perspectives, *Materiales de Construcción* 64 (315) (2014), <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>. » .
- [6] « J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *J. Therm. Anal.* 37 (1991) 1633–1656. » .
- [7] A. Nazari *et al.*, « Thermal shock reactions of Ordinary Portland cement and geopolymer concrete: Microstructural and mechanical investigation », *Construction and Building Materials*, vol. 196, p. 492-498, janv. 2019.
- [8] « Davidovits, J. “Geopolymers and geopolymeric materials” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 35(2)(1989) 429–441 » .
- [9] « Duxson P., Mallicoat S.W., Lukey G.C., Kriven W.M. , Van Deventer J.S.J. “The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers” *Colloids and Surfaces.* 292(2007) 8–20. » .
- [10] C. Martin, « PEUT-ON FORMULER UN GÉOPOLYMER OU UN LIANT ALCALI-ACTIVE COMME UN CIMENT PORTLAND ? », p. 11.
- [11] « Bernal S.A., Provis J.L., Myers R.J., San Nicolas R. et Van Deventer J.S. (2015), Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders, *Materials and Structures* 48:517-529 BSI Standards Publication, PAS 8820:2016 - Construction materials - Alkali-activated cementitious material and concrete – Specification. » .
- [12] S. V. Joshi et M. S. Kadu, « Role of Alkaline Activator in Development of Eco-friendly Fly Ash Based Geo Polymer Concrete », *International Journal of Environmental Science and Development*, p. 417-421, 2012.
- [13] K. Pandurangan, M. Thennavan, et A. Muthadhi, « Studies on Effect of Source of Flyash on the Bond Strength of Geopolymer Concrete », *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n° 5, p. 12725-12733, 2018.
- [14] R. Pouhet et M. Cyr, « Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 120, p. 150-160, sept. 2016.
- [15] Y.-F. Cao, Z. Tao, Z. Pan, et R. Wuhner, « Effect of calcium aluminate cement on geopolymer concrete cured at ambient temperature », *Construction and Building Materials*, vol. 191, p. 242-252, déc. 2018.
- [16] H. Y. Zhang, V. Kodur, B. Wu, J. Yan, et Z. S. Yuan, « Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 163, p. 277-285, févr. 2018.
- [17] K. Ramujee et M. PothaRaju, « Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites », *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, n° 2, p. 2937-2945, 2017.
- [18] « A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, C. Lopez-Hambrados, Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete, *ACI Mater. J.* 103 (2) (2006) 106–112. » .

- [19] A. Mehta et R. Siddique, « Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash », *Construction and Building Materials*, vol. 150, p. 792-807, sept. 2017.
- [20] M. Askarian, Z. Tao, G. Adam, et B. Samali, « Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 186, p. 330-337, oct. 2018.
- [21] « Joseph Davidovits, geopolymer chemistry and application, P534/612 ». .
- [22] « Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., Gartner, E. M. “Sustainable development and climate change initiatives” .Cement and Concrete Research. 38(2)(2008) 115–127 ». .
- [23] « Cassagnabère, F., Mouret, M., Ecadeillas, G., Broilliard, P., et Bertrand, A. 2009a. Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: mechanical aspects. *Construction and Building Material*. [Accepted.] ». .
- [24] M. Albitar, M. S. Mohamed Ali, P. Visintin, et M. Drechsler, « Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 136, p. 374-385, avr. 2017.
- [25] S. Luhar, S. Chaudhary, et I. Luhar, « Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete », *Journal of Building Engineering*, vol. 19, p. 420-428, sept. 2018.
- [26] G. Mathew et B. Joseph, « Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures », *Journal of Building Engineering*, vol. 15, p. 311-317, janv. 2018.
- [27] S. O. Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, et F. Tsobnang, « Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash », *Construction and Building Materials*, vol. 124, p. 301-311, oct. 2016.
- [28] K. Behfarnia et M. Rostami, « An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete », *Journal of Cleaner Production*, vol. 157, p. 1-9, juill. 2017.
- [29] R. Pouhet et M. Cyr, « Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 120, p. 150-160, sept. 2016.
- [30] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, et S. K. Bhattacharyya, « Geopolymer concrete: A review of some recent developments », *Construction and Building Materials*, vol. 85, p. 78-90, juin 2015.
- [31] P. Kumar, C. Pankar, D. Manish, et A. . Santhi, « Study of mechanical and microstructural properties of geopolymer concrete with GGBS and Metakaolin », *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n° 14, p. 28127-28135, 2018.
- [2] « <http://news.aouaga.com/h/120879>, consulté le 28 Mai 2019. »

VI. ANNEXES

Sommaire des annexes

Annexe I a: Résistances à la compression et à la traction des échantillons.....	44
Annexe I b: Résistances à la compression et à la traction des échantillons	45
Annexe II: Feuille d'analyse granulométrique du sable.....	46

Annexe I a: Résistances à la compression et à la traction des échantillons

GPC-M75-OPC25	Résistance à la compression à 7 jours d'âge $F_{c,7}$ (Mpa)					Résistance à la compression à 14 jours d'âge $F_{c,14}$ (Mpa)					Résistance à la compression à 28 jours d'âge $F_{c,28}$ (Mpa)				
	Echantillons					Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	15,08	11,81	14,94	13,94	1,85	15,67	15,76	21,08	17,50	3,10	19,26	25,18	25,93	23,46	3,65
GPC-M80-OPC20	Résistance à la traction à 7 jours d'âge $F_{t,7}$ (Mpa)					Résistance à la traction à 14 jours d'âge $F_{t,14}$ (Mpa)					Résistance à la traction à 28 jours d'âge $F_{t,28}$ (Mpa)				
	Echantillons					Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	1,45	1,43	1,44	1,44	0,01	1,54	1,25	1,63	1,47	0,20	1,70	1,58	2,10	1,79	0,27
GPC-M85-OPC15	Résistance à la compression à 7 jours d'âge $F_{c,7}$ (Mpa)					Résistance à la compression à 14 jours d'âge $F_{c,14}$ (Mpa)					Résistance à la compression à 28 jours d'âge $F_{c,28}$ (Mpa)				
	Echantillons					Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	6,46	8,32	9,27	8,02	1,43	20,99	20,40	20,97	20,79	0,34	24,49	27,50	27,36	26,45	1,70
GPC-M85-OPC15	Résistance à la traction à 7 jours d'âge $F_{t,7}$ (Mpa)					Résistance à la traction à 14 jours d'âge $F_{t,14}$ (Mpa)					Résistance à la traction à 28 jours d'âge $F_{t,28}$ (Mpa)				
	Echantillons					Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	1,03	0,90	0,90	0,94	0,08	2,03	1,61	1,55	1,73	0,26	2,02	1,85	2,7	2,19	0,45

Annexe I b: Résistances à la compression et à la traction des échantillons

GPC-M90-OPC10	Résistance à la compression à 7 jours d'âge $F_{c,7}$ (Mpa)						Résistance à la compression à 14 jours d'âge $F_{c,14}$ (Mpa)					Résistance à la compression à 28 jours d'âge $F_{c,28}$ (Mpa)				
	Echantillons						Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type		1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	15,14	17,26	15,22	15,87	1,20	19,99	19,37	20,94	20,10	0,79	27,37	24,78		26,08	1,83	
GPC-M95-OPC5	Résistance à la traction à 7 jours d'âge $F_{t,7}$ (Mpa)						Résistance à la traction à 14 jours d'âge $F_{t,14}$ (Mpa)					Résistance à la traction à 28 jours d'âge $F_{t,28}$ (Mpa)				
	Echantillons						Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type		1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	1,56	1,57	1,52	1,55	0,03	1,73		2,09	1,91	0,25	1,96	2,2		2,08	0,17	
GPC-M100-OPC0	Résistance à la compression à 7 jours d'âge $F_{c,7}$ (Mpa)						Résistance à la compression à 14 jours d'âge $F_{c,14}$ (Mpa)					Résistance à la compression à 28 jours d'âge $F_{c,28}$ (Mpa)				
	Echantillons						Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type		1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	6,58	6,39	5,75	6,24	0,43	9,96	10,82	8,00	9,59	1,45	11,59	8,15		9,87	2,43	
GPC-M100-OPC0	Résistance à la traction à 7 jours d'âge $F_{t,7}$ (Mpa)						Résistance à la traction à 14 jours d'âge $F_{t,14}$ (Mpa)					Résistance à la traction à 28 jours d'âge $F_{t,28}$ (Mpa)				
	Echantillons						Echantillons					Echantillons				
	1	2	3	Moyenne	Ecart-type		1	2	3	Moyenne	Ecart-type	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
	0,72	0,74	0,78	0,75	0,03	0,76	0,92		0,84	0,11	1,18	1,13		1,16	0,04	

Annexe II: Feuille d'analyse granulométrique du sable

ANALYSE GRANULOMETRIQUE COMPLETE					
Norme opératoire		NFP 18-560			
Poids initial sec (g):		1500	Poids final sec (g)		1468,01
Modules AFNOR	Φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	Passants cumulés
50	80,0				
49	63,0				
48	50,0				
47	40,0				
46	31,5				
45	25,0				
44	20,0				
43	16,0				
42	12,5				
41	10,0				
40	8,0				
39	6,3				
38	5,0		0,000	0,000	100
37	4,0	0,280	0,280	0,019	99,981
36	3,2	5,120	5,400	0,368	99,632
35	2,5	14,750	20,150	1,372	98,628
34	2,0	29,380	49,530	3,372	96,628
33	1,6		49,530	3,372	96,628
32	1,250	104,120	153,650	10,461	89,539
31	1,000	78,530	232,180	15,808	84,192
30	0,800	121,820	354,000	24,102	75,898
29	0,630	161,110	515,110	35,071	64,929
28	0,500	364,810	879,920	59,909	40,091
27	0,400	230,040	1109,960	75,572	24,428
26	0,315	108,940	1218,900	82,989	17,011
25	0,250	131,780	1350,680	91,961	8,039
24	0,200	49,340	1400,020	95,321	4,679
23	0,160		1400,020	95,321	4,679
22	0,125	37,840	1437,860	97,897	2,103
21	0,100		1437,860	97,897	2,103
20	0,080	10,640	1448,500	98,621	1,379
Fond	0,063	20,250	1468,750	100	0
Paramètres caractéristiques	Module de finesse	2,25			
	D10	0,27			
	D30	0,45			
	D60	0,6			
	Cu	2,22			
	Cc	1,25			