



ETUDE DE FAISABILITE DE BETON DE GEOPOLYMERE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX DU BURKINA FASO SOUS CURE THERMIQUE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE : ROUTES ET OUVRAGE D'ART

Présenté et soutenu publiquement le 02 juillet 2019 par

Romaric Protais ASSONGOUG

Matricule : 2016 00 59

Directeur de mémoire : Pr. Adamah MESSAN (enseignant à 2iE)

Encadrant 2iE : Dr. Seick Omar SORE (enseignant à 2iE)

Structure (s) d'accueil du stage : Laboratoire Eco-Matériaux et l'Habitat Durable (LEMHaD)/2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Igor OUEDRAOGO

Membres et correcteurs : M. Issa MADOUGOU

M.Christian RAMADJI

Juillet 2019

Promotion [2018/2019]





CITATIONS

*« Il y'a dans le cœur de l'homme beaucoup de projets,
Mais c'est le dessein de l'Éternel qui s'accomplit. »*

Proverbes 19 : 21

« Vanitas vanitatum et omnia vanitas » ecc 1 :2





DEDICACE

*À mes parents :
Papa Victor GOMOU et
Maman Marie Noelle
DASSO.*





REMERCIEMENT

Le travail de recherche ici présenté a été effectué au Laboratoire Eco-Matériaux et de l'Habitat Durables2ie (LEMHaD-2iE). En plus d'avoir aiguisé mon intérêt pour la recherche, ce travail, fut instructif, passionnant tout en étant complexe et plein de challenges. De ce fait, je tiens par ces quelques mots à remercier toutes les personnes qui par leur soutien quel qu'il soit, ont contribué à sa réalisation.

Mon merci va tout d'abord, à **l'Éternel tout puissant** pour la santé, la force et les grâces dont il me comble au quotidien.

J'adresse ensuite, mes remerciements à mes encadreurs **Pr. Adamah MESSAN** et le **Dr. Seick Omar SORE** pour m'avoir accueilli au LEMHaD, suivi, encadré et encouragé tout au long de mes travaux, surtout pour le partage de leurs connaissances et compétences dans le domaine des matériaux.

Merci au responsable de la structure d'accueil notamment le laboratoire LEMHaD dirigé par le Pr. MESSAN Laboratoire durant lequel nous avons effectué notre stage. Merci aux doctorants qui s'y trouvent actuellement et pour ce climat d'ambiance qui régnait entre nous.

J'exprime ma profonde gratitude à mes parents **papa Victor GIMOU** et Maman **Marie Noelle Dassi**, mes sœurs et frères : **Radegonde ; Marie ; Nathalie ; Ludivine ; Joelle ; Paul Antoine ; Edgard ; Hurgue** et **Timothé**, pour leur amour et soutien constant.

Enfin, Je dis merci à toute la promotion route et ouvrage d'art 2016,



RESUME

Dans le souci de résoudre les problèmes de pollution environnementale due au dioxyde de carbone produit en quantité énorme par les ciments portland, quelques solutions ont été apportées par les chercheurs pour y remédier. Notamment la fabrication d'un liant nommé liant géopolymère, dont les matières premières pour sa synthèse sont disponibles en quantité énorme au Burkina Faso. Et aussi, ce liant est plus respectueux de l'environnement que le ciment et réagit plus vite que certains liants comme la chaux. Le principal objectif de notre étude, est d'évaluer la faisabilité des bétons de géopolymère à base de matériaux (kaolin) disponibles localement au Burkina Faso. A cet effet, l'argile de Saaba a été identifiée comme source aluminosilicate pour la synthèse de ces bétons géopolymère. Cette source aluminosilicate qui n'est rien d'autre ici que du métakaolin (MK), obtenu par calcination du kaolin, a été activée par une solution d'hydroxyde de sodium NaOH à différentes concentrations d'un pas de 2 mol notamment 8, 10 et 12 mol/l avec des différents rapport molaires eau/liant.

Notre étude nous a permis de dire que le béton géopolymère ayant de bonnes performances est celui élaboré avec une solution de 12 mol/l avec un rapport E/L = 0,48 qui nous a donné une résistance en compression d'au moins 21 MPa. Alors que d'autres bétons géopolymères élaborés avec des concentrations de 10 et 8 mol/l avec ce même rapport de 0,48 ont donné des résultats de compression et traction plus faibles. Il ressort donc que nos bétons géopolymères sont plus favorables s'ils sont formulés à des concentrations de 12mol/l pour des rapports E/L = 0.48. Ce résultat nous montre aussi que les propriétés physiques ainsi que la résistance mécanique des bétons géopolymères sont sensiblement égales à celles du ciment ordinaire.

Mots clés : Aluminosilicate, solution alcaline ; béton géopolymère ; propriétés d'usage ; Eco – matériaux et.

ABSTRACT

In order to solve the problems of environmental pollution due to carbon dioxide produced in huge quantities by Portland cements, some solutions have been brought by the researchers to remedy it. In particular the manufacture of a binder named geopolymer binder, whose raw materials for its synthesis are available in huge quantities in Burkina Faso. And also, this binder is more environmentally sustainable than cement and reacts faster than some binders such as lime. The main objective of our study is to evaluate the feasibility of geopolymer concretes made from locally available materials (kaolin) in Burkina Faso. For this purpose, Saaba clay has been identified as an aluminosilicate source for the synthesis of these geopolymer concretes. This aluminosilicate source, which is nothing else but metakaolin (MK) obtained by calcining kaolin, has been activated by a solution of sodium hydroxide NaOH at different concentrations, with a pitch of 2 mol, in particular 8, 10 and 12 mol with different water / binder molar ratios.

Our study allowed us to say that the geopolymer concrete having good performances is the one elaborated with a solution of 12M having a ratio $w/b = 0,48$ which gave us a compressive strength of at least 21 MPa then of Other geopolymer concretes developed with concentrations of 10 and 8 mol / l with the same ratio of 0.48 gave lower compression and tensile results. It is therefore clear that our geopolymer concretes are more favorable if they are formulated at concentrations of 12mol / l for $W/B= 0.48$. This result shows us that the physical properties as well as the mechanical strength of geopolymer concretes are substantially equal to those of ordinary cement.

Key words: Aluminosilicate, alkaline solution, geopolymer concrete; usage properties; Eco - materials and.



Liste des abréviations

2iE	<i>Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement</i>
LEMHaD	<i>Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LNBT	<i>Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics</i>
MK	<i>Métakaolin</i>
NaOH	<i>Hydroxyde de sodium</i>
KOH	<i>Hydroxyde de potassium</i>
NF	<i>Norme Française</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CEBTP	<i>Centre expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics.</i>
E/L	<i>Eau/Liant</i>
M	<i>mol</i>
W/B	<i>Water/Binder</i>





SOMMAIRE

CITATIONS.....	i
DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENT	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
Liste des abréviations	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Annexes.....	xi
Introduction Générale.....	1
Contexte et problématique	1
Objectifs de l'étude	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUES	3
Introduction	3
1.1 Généralités sur les géopolymères	3
1.2 Historique des géopolymères.....	3
1.3 Fabrication d'un liant géopolymère :.....	3
1.4 Matériaux de bases de géopolymère.....	4
1.4.1 Poudre d'aluminosilicate ou précurseurs	4
1.4.2 Les solutions activatrices	6
1.4.3 Adjuvants utilisés pour la synthèse des géopolymères.	7
1.5 Formulation de béton géopolymère.....	8
1.6 Quelques propriétés physiques des bétons géopolymères.....	10
1.7 Influence de la température et temps de cure	11
1.8 Comparaison entre Béton géopolymère et Béton ordinaire.....	11
1.9 Conclusion partielle.....	12
CHAPITRE 2 : MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES	13
2.1 Introduction	13
2.2 MATERIAUX	13
2.2.1 Métakaolin.....	13
2.2.2 Les granulats	14
2.2.3 La solution alcaline NaOH.....	15
2.3 Formulation du béton géopolymère.....	16



2.3.1	Méthode expérimentale	16
2.4	Conclusion partielle	24
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION		25
Introduction		25
3.1	Propriétés physiques	25
3.1.1	Densités apparentes.....	25
3.2	Propriété mécanique	29
3.2.1	Résistance à la compression.....	29
3.2.2	Résistance à la traction par fendage	33
3.3	Conclusion partielle.....	36
Conclusion générale		37
BIBLIOGRAPHIE		I
ANNEXES		III



Liste des figures

Figure 1 : Micrographie d'un géopolymère à base de métakaolin montrant la structure poreuse du liant [47]	12
Figure 2:Dimensions nominales des cylindres	16
Figure 3:Présentation de 3 échantillons de BG	18
Figure 4:Mesure de l'affaissement au mini cône	19
Figure 5:Compression sur un échantillon.....	20
Figure 6:Traction par fendage d'un échantillon.....	21
Figure 7:Courbe de porosité accessible à l'eau.....	23
Figure 8:Représentation graphique de la densité apparente $E/L = 0,48$	26
Figure 9:Représentation graphique de la densité apparente $E/L = 0,50$	27
Figure 10:Représentation graphique de la densité apparente $E/L = 0,55$	28
Figure 11:Représentation graphique de l'essai de compression pour un rapport $E/L = 0,48$..	29
Figure 12:Représentation graphique de l'essai de compression pour un rapport $E/L = 0,50$..	30
Figure 13:Courbe de résistance à la compression 12M.....	32
Figure 14:Représentation graphique de l'essai de traction pour un rapport $E/L = 0,48$	34
Figure 15:Représentation graphique de l'essai de traction pour un rapport $E/L = 0,50$	35
Figure 16:Représentation graphique de l'essai de traction pour un rapport $E/L = 0,55$	35





Liste des tableaux

Tableau 1 : Deux activants présentant les avantages et inconvénients.	6
Tableau 2:activant courants des liants, en fonctions des principaux précurseurs disponible (Provis et Van Deventer, 2014) Formulation du béton géopolymère et quelques propriétés de bétons géopolymères	8
Tableau 3:Tableau de formulation de cyr Martin et Pouhet Raphael(2016).....	9
Tableau 4:formulation au m3 pour nos bétons géopolymère 12M_0,48	10
Tableau 5:Propriétés physiques du MK	14
Tableau 6: Propriété chimique et minéralogique du MK.....	14
Tableau 7:Propriétés physiques du gravier	15
Tableau 8:Propriétés physiques du sable	15
Tableau 9:Représentation graphique de l'essai de compression pour un rapport E/L = 0,55..	31
Tableau 10: Courbe de résistance à la compression 12M	Erreur ! Signet non défini.





Annexes

Annexe 1:Formulation 12M_E/L = 0,50.....	III
Annexe 2:Formulation 12M_E/L = 0,55.....	III
Annexe 3:Formulation 10M_E/L = 0,48.....	IV
Annexe 4:Formulation 10M_E/L = 0,50.....	IV
Annexe 5:Formulation 10M_E/L = 0,55.....	IV
Annexe 6:Formulation 8M_E/L = 0,48.....	V
Annexe 7:Formulation 8M_E/L = 0,50.....	V
Annexe 8:Formulation 8M_E/L = 0,55.....	VI
Annexe 9:Densité 12M_E/L = 0,35.....	VII
Annexe 10:Compression 12M_E/L = 0,35.....	VII
Annexe 11:Densité 12M_E/L = 0,40.....	VIII
Annexe 12:Compression 12M_E/L = 0,40.....	VIII
Annexe 13:Densité 12M_E/L = 0,45.....	IX
Annexe 14:Compression 12M_E/L = 0,45.....	IX
Annexe 15: Quelques images.....	X





Introduction Générale

Contexte et problématique

Le béton, est le matériau de construction le plus répandu sur la planète terre <http://fr.m.wikipedia.org>. Le principal liant utilisé pour sa réalisation est le ciment. La production du ciment est très énergivore. Son empreinte carbone est très élevée.[1] L'on peut estimer que la production d'une tonne de ciment libère environ 800kg de CO₂ dans l'atmosphère [2]. Il contribue à hauteur de 7% de dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère. Or de nos jours, le réchauffement climatique est une réalité qui touche la planète entière. Il convient donc de trouver des alternatives du ciment ordinaire et construire avec des matériaux à faibles empreintes carbone. D'où les recherches de nouvelles alternatives du ciment portland. De nombreuses études ont été réalisées pour pallier à ce problème de pollution atmosphérique. Aussi, dans le même but, nous voulons exploiter de nombreuses carrières argileuses se trouvant au Burkina Faso. Les études faites par le célèbre français Davidovits [3] en 1970 ont montré que le liant géopolymère pourrait être utilisé pour la synthèse des bétons. C'est dans ce cadre que nous avons élaboré un type de bétons, dit béton de géopolymères constitués essentiellement d'une poudre d'aluminosilicate (MK) plus une solution alcaline (NaOH) à différentes concentrations de 8, 10 et 12 mol/l. Et donc, notre premier objectif est de valoriser d'abord les matériaux locaux du Burkina Faso tels que le kaolin à travers la synthèse d'un matériau plus respectueux de l'environnement que le ciment classique[4] présentant des performances mécaniques semblables à celle du ciment [4] [5].

Objectifs de l'étude

La mise en œuvre des bétons en géopolymère bien que fréquente en Europe ; [6] demeure beaucoup plus difficile en Afrique sub-saharienne, notamment au Burkina Faso bien que disposant d'énorme ressource de matière première pouvant contribuer à son élaboration. Notre étude a donc pour objectif principal la valorisation de ces matériaux locaux du Burkina Faso, cette étude permettra de rendre cette carrière argileuse utilisable et polluer moins que le ciment ordinaire. Pour donc atteindre cet objectif global, nous allons nous appesantir sur :



- + Les procédés de formulation d'un béton géopolymère ;
- + Optimiser la durée et la température de cure des échantillons de béton de géopolymère à basse température ($\leq 60^{\circ}\text{C}$),
- + Evaluer les propriétés physico – mécaniques (densité) résistance à la compression, résistance à la traction, résistance à la flexion,) et thermiques des bétons géopolymère par rapport au béton de ciment Portland,

Etudier la durabilité (porosité accessible à l'eau) des bétons géopolymères par rapport au béton de ciment Portland.



CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction

La compréhension des termes de références (TDR) de notre étude, la maîtrise des différents essais à réaliser, ainsi que la capacité à pouvoir analyser et interpréter les résultats de notre étude ont nécessité une recherche bibliographique. Cela nous a amenés à consulter plusieurs documents à savoir, les articles scientifiques, les thèses, les mémoires, et les rapports d'essais, etc...

Ces recherches nous ont permis d'établir un recueil de données et informations existantes, d'éviter des répétitions, mais de contribuer plutôt à l'avancement des recherches sur notre thématique.

1.1 Généralités sur les géopolymères

1.2 Historique des géopolymères

1.3 Fabrication d'un liant géopolymère :

La fabrication d'un liant géopolymère passe principalement par le mélange de la poudre d'aluminosilicates et de la solution activatrice. Plusieurs études ont été faites afin de déterminer les proportions idéales conduisant aux meilleures propriétés. Exemple, les travaux de Xu et Van Deventer[14] basés sur les rapports massiques ont montré qu'un rapport entre l'eau et la matière solide (aluminosilicates et cristaux alcalins) compris entre 0,3 à 0,4 devrait être utilisé afin de garantir une meilleure dissolution des aluminosilicates. Ils montrèrent également qu'un rapport massique plus élevé que 0,4 entraînait une chute des résistances mécaniques des échantillons avec une grande porosité. Nous retenons sur cette partie que lors de nos travaux de recherche nous avons constaté que plus le rapport était grand plus cela entraînait une bonne maniabilité du béton.

Cependant, la définition d'une formulation représentative des géopolymères reste tout de même une tâche délicate en raison d'une multitude de facteurs d'influence [7] tels que : la nature des sources d'aluminosilicates, la concentration et le type de solution alcaline utilisée pour l'activation des aluminosilicates, le taux d'amorphisation des poudres, la température de cure,



etc. Les propriétés des liants géopolymères dépendent en effet majoritairement de leur formulation, mais également de ces paramètres d'influences.

En résumé, pour fabriquer un liant géopolymère, nous avons besoin généralement de deux matières premières : il s'agit principalement d'une poudre aluminosilicate et d'une solution activatrice. On peut aussi y ajouter de la silice en complément et même un adjuvant.

1.4 Matériaux de bases de géopolymère.

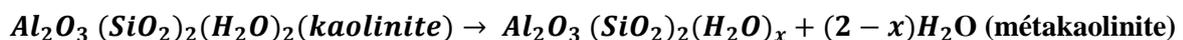
1.4.1 Poudre d'aluminosilicate ou précurseurs

Lorsque, une poudre contient de fortes teneurs en silice et en alumine, et possède une phase amorphe, celle-ci peut être considérée comme précurseur de géopolymère[7]. Cependant leur choix peut dépendre de plusieurs facteurs parmi lesquels la disponibilité, le coût et le type d'application. Il existe une large gamme de produits pouvant être activés dont les argiles calcinées et non calcinées[15], les sous-produits industriels ou agricoles[16] ; les pouzzolanes artificielles[17]. Description de quelques source aluminosilicate ou précurseurs :

1.4.1.1 Métakaolin (MK) :

Le métakaolin est obtenu par calcination du kaolin (argile kaolinitique). De nombreux avantages sont mis en avant dans la littérature scientifique sur les géopolymères à base de métakaolin (notamment en terme de performance mécanique, de résistance à l'acide, ou à la température), l'utilisation du métakaolin reste essentiellement utilisé dans les études sur les géopolymères pour la formulation de mortier[5],[18], de béton [5], [19], et dans la stabilisation des briques en terres[20].

La réaction de calcination s'effectue selon l'équation ci-dessous :



Le MK réagit avec le $C_a(OH)_2$, et produit des sulfates de calcium hydratés CHS à température ambiante. Il contient également des alumines qui réagissent avec les composés en CH pour produire des éléments à bases d'alumines comme les C_2ASH_8 et C_3AH_6 [21]; [22]

1.4.1.2 *Les cendres volantes (CV) :*

Les cendres volantes sont des sous-produits qui proviennent des centrales thermiques au charbon. Les centrales au charbon sont connues pour générer d'importantes quantités de CO₂, un des principaux gaz à effet de serre[19]. Selon le type de charbon (anthracite, bitumineux, lignite), le type de brûleur et les conditions d'opération, la combustion se produira également. Elles sont généralement utilisées pour la finesse de leurs particules qui sont inférieures à 45 µm[20], ce qui leur procure une bonne réactivité en présence d'une solution alcaline. Il existe trois classes de cendres volantes[20] :

- Les cendres volantes de classe C, qui proviennent du lignite et sont riches en CaO) ;
- Les cendres volantes de classe F, qui sont pauvres en CaO et proviennent de la combustion de la houille. Elles sont les plus utilisées pour l'élaboration des géopolymères compte tenu de leur faible teneur en calcium.
- Les cendres volantes de classe N, qui sont des aluminosilicates naturels ou synthétiques dont la somme des oxydes de silicium, aluminium et de fer est supérieur à 70 % et le taux de SO₃ est inférieur à 4 %.

1.4.1.3 *Laitier de haut-fourneaux (LHF)*

Le précurseur LHF ont une teneur élevée en phase amorphe, il semble que les LAA soient plus sensibles à la nature du laitier que les ciments portland avec du laitier. Ils sont très riches en calcium. Leur teneur en calcium peut atteindre 40 à 45% ce qui leur confère une résistance à la compression très élevée pouvant atteindre 25 MPa à 1 jour d'âge[7].

1.4.1.4 *Cendres de balle de riz*

Elles proviennent de la calcination de la balle de riz émanant du décorticage des rizeries. Au cours de la calcination, la plupart des composants disparaissent lentement et il ne restera majoritairement que les silicates amorphes. Les caractéristiques des cendres sont dépendantes de la composition de la balle de riz, de la température et du temps de calcination. La température de calcination pour obtenir une cendre pouzzolanique réactive ne devrait pas excéder 600 °C au risque de provoquer la formation de silice cristallisée moins réactive. Un échantillon de cendre contient en moyenne 90 % de silice et d'autres composés en plus faibles quantités telles que le K₂O 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.

1.4.2 Les solutions activatrices

La solution activatrice est un élément primordial dans le processus de géopolymérisation. En fonction de sa quantité et de sa concentration, elle fournira le mélange nécessaire pour initier la réaction et déterminer la structure finale du matériau durci.

Pour qu'il ait géopolymérisation, la présence d'activateurs fortement alcalins est indispensable. Ces activateurs alcalins permettent d'accélérer la dissolution de la source d'aluminosilicate favorisant la formation d'hydrates stables à faible solubilité et la formation d'une structure compacte avec ces hydrates. Les propriétés physiques et chimiques des activateurs jouent un rôle important dans le comportement du matériau activé.

Les activateurs couramment utilisés sont des hydroxydes ou des sels alcalins, dont les plus utilisés, et économiquement avantageux sont le NaOH, le Na₂CO₃, Na₂O·nSiO₂ et le Na₂SO₄. Certains composants du potassium (KOH ; K₂O·nSiO₂, ...) ont été utilisés dans certaines études de laboratoire[19].

Pour notre étude, nous avons utilisé la solution alcaline de NaOH à différentes mol de 8, 10 et 12 mol/l

Tableau 1 : Deux activateurs présentant les avantages et inconvénients.

Carbonates alcalins	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Avantage : non corrosifs, moins dangereux à utiliser que l'hydroxyde et silicate alcalin. ✓ Semblent inefficaces pour activer les précurseurs aluminosilicates car ils ne sont pas en mesure de fournir le pH nécessaire à la destruction du réseau vitreux amorphe des CV ou du MK
Sulfates alcalins	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Partiellement efficaces pour les laitiers, mais pratiquement inefficaces pour les précurseurs aluminosilicates à cause de leur faible pH. Ils doivent donc être utilisés en combinaison avec un autre activateur ou avec un additif permettant d'augmenter le pH (clinker par exemple)

1.4.3 Adjuvants utilisés pour la synthèse des géopolymères.

L'utilisation des adjuvants pour la synthèse du béton de géopolymère s'est fait en faible quantité ne dépassant pas 5% de la masse du liant. On les trouve dans le commerce sous forme de composés organiques aqueux formulés spécialement pour les applications béton. Les adjuvants ont pour rôle d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci [23]. Les principales familles d'adjuvant sont les suivantes :

Plastifiants et superplastifiants :

Les plastifiants et superplastifiants provoquent une défloculation des grains de MK. Ils sont utilisés pour fluidifier un mélange ou pour réduire la quantité d'eau utilisée (jusqu'à 30% au moins dans le cas d'une bonne compatibilité entre l'adjuvant et le liant). Nous avons utilisé pour le cas de notre étude du **superplastifiant haut réducteur d'eau DYNAMON NRG 1045**.

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.

Agent entraîneur d'air

Le béton, une fois malaxé et mis en place, contient un certain volume d'air résiduel dont la fraction volumique est généralement de 1 à 2%. 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.

Couplage entre précurseurs et activant

Nous allons l'illustrer par un tableau, ce tableau donne les avantages et inconvénients des différents activateurs utilisés avec tel ou tel précurseur.

Tableau 2: activant courants des liants, en fonctions des principaux précurseurs disponible (Provis et Van Deventer, 2014) Formulation du béton géopolymère et quelques propriétés de bétons géopolymères

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

1.5 Formulation de béton géopolymère

Nous avons basé nos formulations sur les travaux de recherche de Pouhet Raphaëlle, Cyr Martin dans l'ouvrage[24] « **Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes**»[6].

Plusieurs formulations ont été faites par lui et sont résumées dans le tableau ci-dessous

Tableau 3:Tableau de formulation de cyr Martin et Pouhet Raphael(2016)

Sample ID	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Metakaolin (kg/m3)	222,5	210,1	196,9	289	272	254,2	350	328,7	306,4
Waterglass3,3 solution (kg/m3)	183,9	173,7	162,8	238,9	225	210,1	289,4	271,8	253,3
NaOH (kg/m3)	18,7	17,7	16,6	24,2	22,9	21,3	29,4	27,6	25,8
Added water (kg/m3)	2,6	22,3	43,4	3,2	29	56,2	3,9	35	67,6
Fines aggregates (kg/m3)	875	867	858,6	796,3	786,8	776,9	723,5	713,2	702,4
Coarse aggregates (kg/m3)	1161,4	1150,9	1139,7	1055,3	1042,7	1029,6	957,9	944,3	929,9
Solid binder* (Wt%)	12,40%	11,80%	11,20%	16,50%	15,70%	14,90%	20,40%	19,50%	18,40%
Total water** (Wt%)	5,00%	5,60%	6,20%	6,60%	7,40%	8,30%	8,20%	9,20%	10,20%
Aggregates (Wt%)	83%	83%	83%	77%	77%	77%	71%	71%	71%
Fines aggregates (Wt%)	36%	36%	36%	33%	33%	33%	31%	31%	31%
Coarse aggregates (Wt%)	47%	47%	47%	44%	44%	44%	40%	40%	40%
Total agr Wt	2036,4	2017,9	1998,3	1851,6	1829,5	1806,5	1681,4	1657,5	1632,3
Classe de consistence	S1					S3		S5	

S1, S3 et S5 représentent les niveaux de consistance.

De ces formulations, il a été constaté que l'échantillon **C7** présentait la meilleure performance et une bonne résistance à la compression d'environ **65.4 MPa**[6].

C'est ainsi que nous avons décidé d'utiliser les mêmes pourcentages des composants du béton en remplaçant le silicate de sodium (waterglass) par de la soude.

Alors, les quantités au kilogramme par mètre cube (Kg/m^3) de matériaux ainsi utilisés pour notre formulation se présentent comme suit :

Tableau 4: formulation au m³ pour nos bétons géopolymère 12M_0,48

Désignations	Unités	Quantité
Coarse aggregates	Kg/m^3	958,00
Fines aggregates	Kg/m^3	723,08
Metakaolin	Kg/m^3	350,00
NaOH pure	Kg/m^3	126,40
NaOH solution (sol alc)	Kg/m^3	355,50
Superplastifiant	Kg/m^3	23,82
Rapport e/c (eau/liant)		0,48
Rapport superplast/liant		0,05

Afin d'obtenir de meilleure performance mécanique en compression avec des MK activé par le silicate de sodium il est important de fixer un certain nombre de rapport de différents oxydes présents (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , H_2O). Nous avons donc dans nos recherches fais varier le rapport eau/liant pour différentes solutions alcalines concentrées à : 8 ; 10 et 12 Mol/l.

1.6 Quelques propriétés physiques des bétons géopolymères

Affaissement au mini Cône d’Abrams Il s’agit de constater l’affaissement d’un cône de béton sous son propre poids. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Plus cet affaissement est grand, plus le béton est réputé fluide[25]. L’équipement est décrit par la norme [26] et se compose de 4 éléments d’une moule tronconique sans fond de 15 cm de haut, de 10 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 5 cm de diamètre en sa partie supérieure ; une plaque d’appui ; une tige de piquage ; un portique de mesure.

1.7 Influence de la température et temps de cure

Elle affecte significativement les résistances mécaniques. Les matériaux géopolymères peuvent développer des résistances mécaniques élevées (30 à 45 MPa) dans une période de traitement thermique relativement court allant de 6 heures à 7 jours pour un intervalle de température de 60 °C à 95 °C.

Cependant, une température trop élevée et un temps de cure relativement prolongé peuvent fragiliser la structure et diminuer les performances mécaniques du géopolymère. En outre, une température très élevée accélère la cinétique de réaction en favorisant la cristallisation de zéolithes au détriment du gel géopolymère.

1.8 Comparaison entre Béton géopolymère et Béton ordinaire

Il en ressort des études que le géopolymère ayant subi un traitement chimique atteint sa résistance plus vite qu’à l’air ambiant.

Les géopolymères ayant subi un traitement thermique présentent pratiquement les mêmes valeurs de résistance à la traction que celui du béton ordinaire à base du ciment portland et ils présentent des comportements mécaniques similaires.

Sur le plan physique nous remarquons que le béton géopolymère a un aspect plus poreux que le béton avec du ciment portland. Cela se fait savoir déjà à partir des liants utilisés pour chaque formulation. Certains auteurs[20] ont aussi montré que les liants géopolymères présentent une porosité importante avec une moyenne de l’ordre de 40 %. Les observations au microscope du

liant géopolymère (**Figure 1**) témoignent de cette importante porosité avec la présence de nombreux pores.

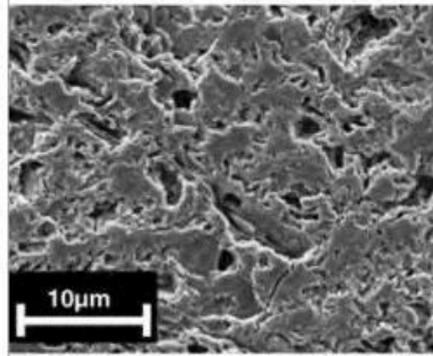


Figure 1 : Micrographie d'un géopolymère à base de métakaolin montrant la structure poreuse du liant [47]

1.9 Conclusion partielle

L'objectif de cette synthèse bibliographique était de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les bétons géopolymères. L'étude bibliographique que nous avons menée a permis de présenter les différents matériaux entrants dans leur composition notamment, les granulats le méta kaolin et l'une des solutions alcalines. Les principales méthodes de formulations des bétons géopolymères sont basées sur les différents rapports E/L. Ceci dans le but d'optimiser les performances et la résistance à la compression.

CHAPITRE 2 : MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre porte sur les matériaux, matériels et méthodes que nous avons utilisés durant notre étude. Il s'agira dans un premier temps de présenter les caractéristiques mécaniques de chaque matériau intervenant dans la formulation du béton à savoir : le granulats (sable et gravier), le métakaolin et la solution alcaline. Nous ferons ensuite une description des différents rapports massiques et molaires intervenants dans la formulation et terminerons par la présentation du dispositif expérimentale de formulation et de la méthode d'analyse utilisée.

2.2 MATERIAUX

2.2.1 Métakaolin

Pour améliorer nos différents mélanges, notre étude s'est penchée sur l'utilisation d'un géopolymère notamment le métakoalin (MK) activé par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Le métakaolin est obtenue par la calcination de kaolin à une température suffisante de 700°C des passant au tamis de 125 μm . Le kaolin utilisé dans notre étude est celui de la carrière de Saaba, car les études du Dr Sore et al[20] ont montré que les liants géopolymères à base de cette carrière présentaient de meilleures performances physiques et mécaniques[20].

2.2.1.1 Propriété physique

Le métakaolin présente une masse volumique apparente autour de 0,588 g/cm^3 et une masse volumique spécifique de 15,375 kN/m^3 [étude faite par Cette dernière a été déterminée suivant la norme. La surface spécifique du métakaolin, plus importante que celle du ciment, a été mesurée par la technique BET et elle s'élève à 14,8 m^2/g .

Tableau 5: Propriétés physiques du MK

Propriété	Ref [27]	Ref [28]	Ref [29]
Poids spécifique	2,62	2,5	2,5
Taille moyenne des particules		1,0	12
Fineness (m^2/g)	12,680	12,000	15,000–30,000

2.2.1.2 Propriété minéralogie

La composition chimique du métakaolin montre que la silice (57.9%) et l'alumine (38.3%) sont les oxydes majoritaires, avec un rapport molaire SiO_2/Al_2O_3 égal à 2,57.

Tableau 6: Propriété chimique et minéralogique du MK

Oxide [%]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
MK - Saaba	57.85	38.30	0.05	2.30	0.23	0.11	0.09	0.01	0.09	0.02	1.01

2.2.2 Les granulats

Les granulats utilisés pour la formulation du béton sont généralement d'origine naturelle et proviennent essentiellement de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques (quartz et quartzites), ou de roches éruptives (basaltes, les granites, porphyres). Indépendamment de leur nature, les granulats peuvent être alluvionnaires (granulats roulés) ou de carrières (granulats concassés). Dans les bétons, les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus grand nombre de vides dans le béton.

2.2.2.1 Gravier

Le gravier utilisé a été tamisé afin d'obtenir les proportions des granulats de diamètre 4/8, puis lavé afin de réduire les impuretés. Leur poids spécifique est donné dans le tableau ci-dessous :



Tableau 7: Propriétés physiques du gravier

Propriété	Valeur
Poids spécifique (kN/m^3)	26,9
Poids apparent (kN/m^3)	14,7

2.2.2.2 Sable

Le sable qui a été utilisé pour les différentes formulations est un sable local, de granulométrie 0/5 et ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau 8: Propriétés physiques du sable

Propriété	Valeur
Poids spécifique (kN/m^3)	27,22
Poids apparent (kN/m^3)	16,8
Module de finesse(%)	2,10
Coefficient de Hazen Cu	3,20
Coefficient de courbure Cc	0,80

2.2.3 La solution alcaline NaOH

Pour nos travaux de recherches, et pour différentes formulations, nous avons utilisé la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à différente concentration de 8 ; 10 et 12 Mol/l. Ces **solutions aqueuses sont plus ou moins visqueuses.**

2.3 Formulation du béton géopolymère

Comme nous l'avons dit plus haut, nos formulations sont basées sur les travaux de Cyr Martin et Pouhet Raphaëlle dans : « **Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes** ».

2.3.1 Méthode expérimentale

Nous avons utilisé pour notre formulation du béton la méthode de Féret. Alors, nous avons réalisé les essais mécaniques sur des moules cylindriques de 5 x 10 cm. Chaque essai s'est fait sur 3 échantillons distincts. Un total de neuf (09) éprouvettes cylindriques.

2.3.1.1 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[30].

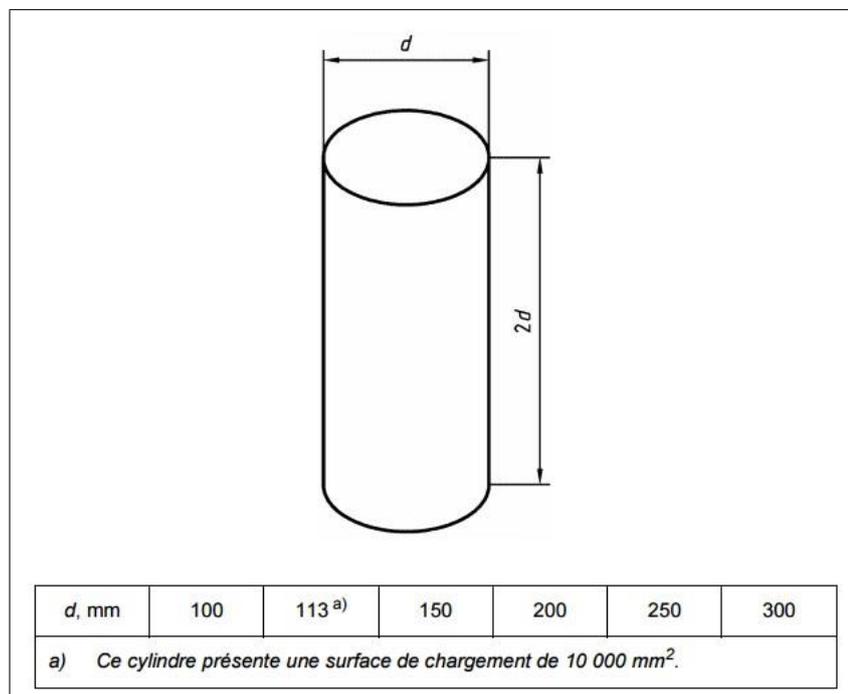


Figure 2: Dimensions nominales des cylindres

Leurs dimensions sont indiquées sur la figure ci-dessus et doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Pour notre formulation, nous avons utilisé un D_{max} égale à 8mm et des moules cylindriques de

50mm×100mm. La mise en place dans les moules à lieu par piquage, en fonction des résultats de l'essai d'affaissement et conformément à norme. Les moules ayant été munis d'un dispositif s'opposant à l'évaporation, les éprouvettes sont conservées sans être déplacées pendant 24 h±1h dans un local maintenu à 20°C ±2°C. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées à la même température, dans de l'eau.

2.3.1.2 Préparation aux essais

Le kaolin prélevé sur notre site est d'abord broyé au moulin afin de le rendre le plus fin possible, ensuite tamisé au tamis de 125µm il est et enfin soumis à une température de 700°C à l'aide d'un four. Le choix de ce tamis s'explique par l'indisponibilité du tamis de 80µm (tamis de préférence pour les ciments). L'ensemble obtenu est retenu dans un bac. La solution d'hydroxyde de sodium utilisée est obtenue en diluant des cristaux de sodium dans de l'eau afin d'obtenir les différentes concentrations souhaitées. Les différentes solutions obtenues sont conservées dans des bidons d'huile de 50l

Performances exigées du béton : Elles sont définies par l'affaissement au mini cône d'Abrams et par f_{c28} , la résistance moyenne exigée à 28 jours.

Liant : notre liant est composé du métakaolin + la solution alcaline de NaOH

Nous avons effectué des formulations avec plusieurs rapports e/c afin d'optimiser les performances mécaniques souhaitable. Le tableau de formulation du rapport E/L = 0,48 est présenté ci-contre. Le reste des tableaux de formulation en annexe.

Désignations	Unités	Quantité
Coarse aggregates	Kg/m ³	958,00
Fines aggregates	Kg/m ³	723,08
Metakaolin	Kg/m ³	350,00
NaOH pure	Kg/m ³	126,40
NaOH solution (sol alc)	Kg/m ³	355,50
Superplastifiant	Kg/m ³	23,82
Rapport e/c (eau/liant)		0,48
Rapport superplast/liant		0,05

Lorsque nous avons formulé, nous avons ensuite mesuré la consistance au mini cône d'abrams après coulage et démoulage dans les différentes moules cylindriques, nous laissons les

différents échantillons durcis pendant 24H. Ensuite nous les démoulons enfin nous plaçons dans une étuve pour une cure thermique pendant 24H à une température d'environ 60 à 70° C, nous les enlevons de l'étuve et pesons les densités sèche.



Figure 3:Présentation de 3 échantillons de BG

2.3.1.3 Caractérisation à l'état frais

Affaissement au mini Cône d'Abrams Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous son propre poids. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Plus cet affaissement est grand, plus le béton est réputé fluide. L'équipement est décrit par la norme et se compose de 4 éléments (figure 7) : une moule tronconique sans fond de 15 cm de haut, de 10 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 5 cm de diamètre en sa partie supérieure ; une plaque d'appui ; une tige de piquage ; un portique de mesure.





Figure 4: Mesure de l'affaissement au mini cône

2.3.1.4 Caractérisation mécanique

2.3.1.4.1 Essai de compression

La presses Multi-essais Electromécaniques pour les essais par compression/ Traction et Flexion du LEMHaD-2iE est le type de machine conçu par la société PROETI sous le de modèle 300 KN pour couvrir une multitude d'essais. La machine Multi essais du LEMHaD-2iE est composée des éléments suivants :

- ✓ Cadre d'essais
- ✓ Système de mesure et de contrôle
- ✓ Des outils adaptés à chaque essai à réaliser

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 :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S}$$

Dans la relation ci-dessus F_c est directement obtenue en MPa si P est exprimée 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. Pour les résistances supérieures à 60MPa, la rupture peut être brutale et en général l'éprouvette rompt brutalement.



Figure 5: Compression sur un échantillon

2.3.1.4.2 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. [31] 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 $\pm 20\%$ [31]. Si h est la hauteur de l'éprouvette, d son diamètre et P la charge appliquée, la contrainte de rupture vaut :

$$F_t = 0,637 \times \frac{P}{dh}$$

Dans la relation ci-dessus F_t est directement obtenue en MPa si P est exprimée en newtons (N) et d et h en mètres (mm).



Figure 6: Traction par fendage d'un échantillon

2.3.1.4.3 Caractérisation de durabilité

2.3.1.4.3.1 Essai de porosité accessible à l'eau

L'absorption de l'eau par un matériau est sa capacité à conserver de l'eau quand il est immergé à une température de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ et à la pression atmosphérique. A cette condition, l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels du matériau. Elle évolue en fonction du temps d'immersion du matériau plus ou moins rapidement avant de se stabiliser. Si la porosité du matériau est importante, l'absorption de l'eau est grande.

L'essai de porosité accessible à l'eau a consisté à mesurer la porosité des éprouvettes de béton afin de déterminer le pourcentage de vides pouvant être occupé par l'eau. L'essai est réalisé suivant la **norme ASTM_ C 642 - 06**. 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°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°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 :

$$P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

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 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ en kg; M_{eau} : masse déjaugée de l'éprouvette saturée en kg.

But de l'essai

Le but de l'essai de porosité accessible à l'eau (P_{eau}) (NF EN 18-459 Essai pour béton durci Essai de porosité et de masse volumique) est de mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du béton.

Mode opératoire

- Saturation dans l'eau pendant 72 h ;
- Pesée hydrostatique : M_{eau} est la masse en grammes pesée sous l'eau ;
- Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau, M_{air} ;
- Séchage à $T = 105^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas de plus de 0,05%);
- Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche M_{sec} ;
- Calcul de la porosité accessible à l'eau par la formule ci-dessous

Les résultats des essais de porosité sont résumés dans le tableau suivant :

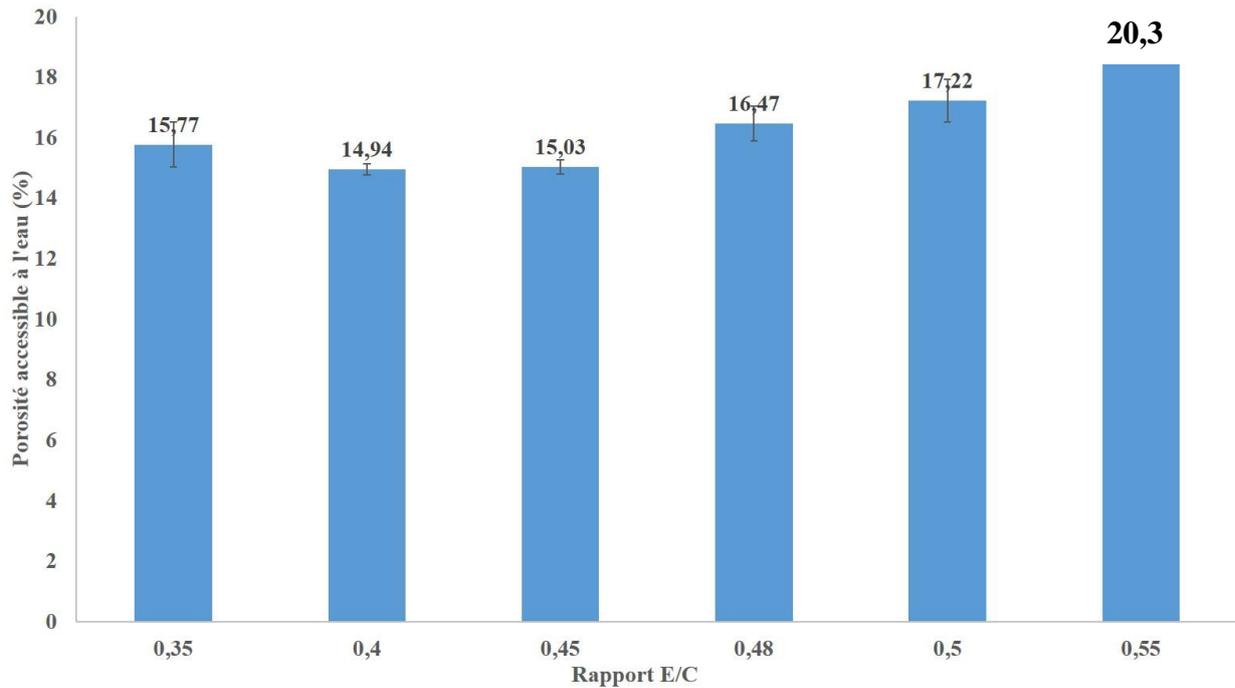


Figure 7: Courbe de porosité accessible à l'eau

Le graphe ci-dessous nous montre l'évolution de la porosité accessible à l'eau en fonction du rapport E/L. Les résultats indiquent que le béton géopolymère est un béton poreux. Lorsque le rapport E/L = 0,35 nous observons une valeur de porosité égale à 15,77% qui plus élevée à 14,94% lorsque le rapport E/L vaut 0,40. Nous pouvons donc faire l'hypothèse selon laquelle cette valeur de porosité grande pourrait être due à la mise en place du béton géopolymère puisque lors de la formulation, nous avons observé un béton très ferme.

Les valeurs de résultats des autres rapports nous montrent que la porosité augmente en fonction du rapport E/L c'est-à-dire que, plus le rapport E/L est élevé, plus la porosité est grande et donc nous avons un béton poreux. En outre la résistance moyenne la plus élevée est lorsque nous avons une porosité optimum égale à 16,47%.

Lorsque le rapport e/c augmente et passe à 0,50 et 0,55, les valeurs de la porosité passent de 17,22 à 20,13% ce qui entraîne un béton plus poreux et donc moins résistant.

Lorsque le béton est totalement immergé, la pénétration de l'eau dépend essentiellement de la valeur de la porosité totale du matériau plutôt que de la connectivité des pores. Nous pouvons au vu de certaines études et dans la littérature supposer que la porosité totale des bétons géopolymères est donc inférieure à celle du béton au ciment portland.



2.4 Conclusion partielle

Nous avons présenté dans le chapitre 2 l'ensemble des matériaux pour la formulation des bétons géopolymères ainsi que les caractéristiques mécaniques et de durabilités enfin les résultats et interprétations issue de l'essai de durabilité. Dans le chapitre qui suivra, nous vous présenterons les résultats issus des différents essais mécaniques.





CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Dans ce chapitre l'objectif principal est d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus lors des différents essais que nous avons décrits dans le **chapitre 2**. En l'occurrence, les résultats des essais à l'état frais des bétons seront analysés, suivi des caractéristiques mécaniques. et nous de discuterons ces résultats.

3.1 Propriétés physiques

3.1.1 Densités apparentes

Les densités apparentes des différentes formulations sont données dans les tableaux ci-dessous, pour différent rapport E/C et pour différente solution alcaline de concentration 12M, 10M et 8M les autres tableaux pour les rapports $e/c = 0,35$; $0,40$; et $0,45$ pour 12M sont en annexes.



ETUDE DE FAISABILITE DE BETON DE GEOPOLYMERE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX DU BURKINA FASO SOUS CURE THERMIQUE.

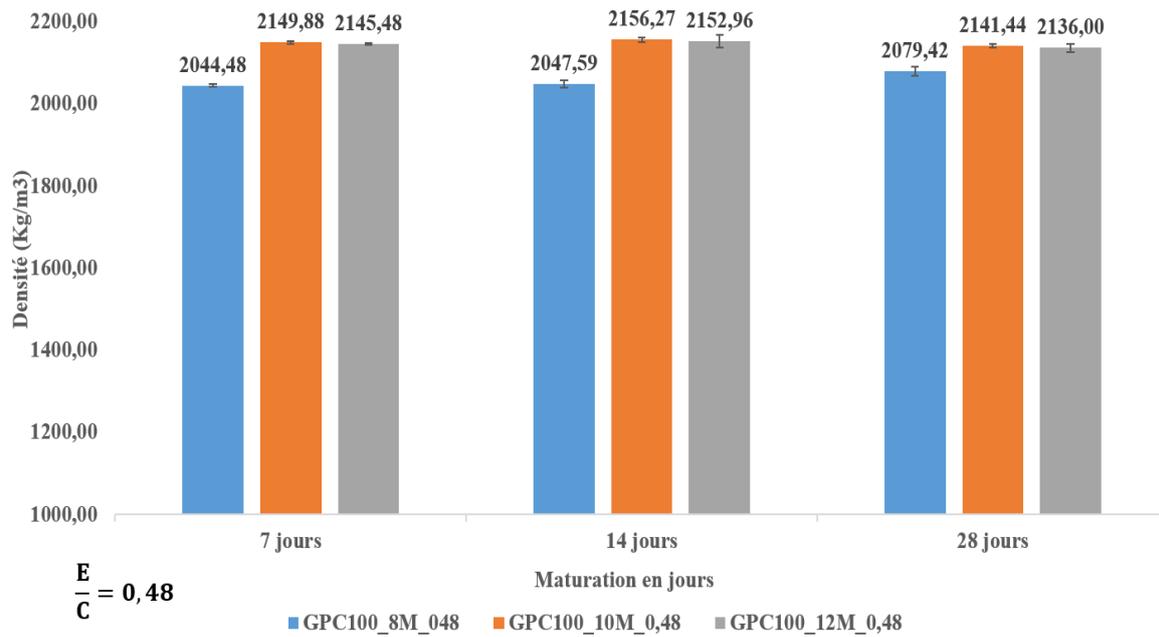


Figure 8: Représentation graphique de la densité apparente E/L = 0,48

Lorsque nous observons ces résultats, nous constatons qu'ils aboutissent à des matériaux plus ou moins denses. La différence observée entre les différentes densités pour une même solution alcaline sont très légères. La densité du béton géopolymère reste pratiquement constant avec l'âge sa valeur tourne en moyen autour de 2130,00 Kg/m³ presque semblable à celle du béton courant qui est 2300 Kg/m³. Ceci peut s'expliquer par l'aspect poreux de notre béton géopolymère. La densité augmente lorsque le rapport E/C augmente jusqu'à une certaine valeur puis elle diminue encore. La densité augmente également lorsque lorsqu'on passe d'une faible concentration (8M) à une concentration plus élevée (10 et 12M). Les valeurs de l'affaissement (consistance) du béton géopolymère augmente lorsque le rapport E/C augmente.



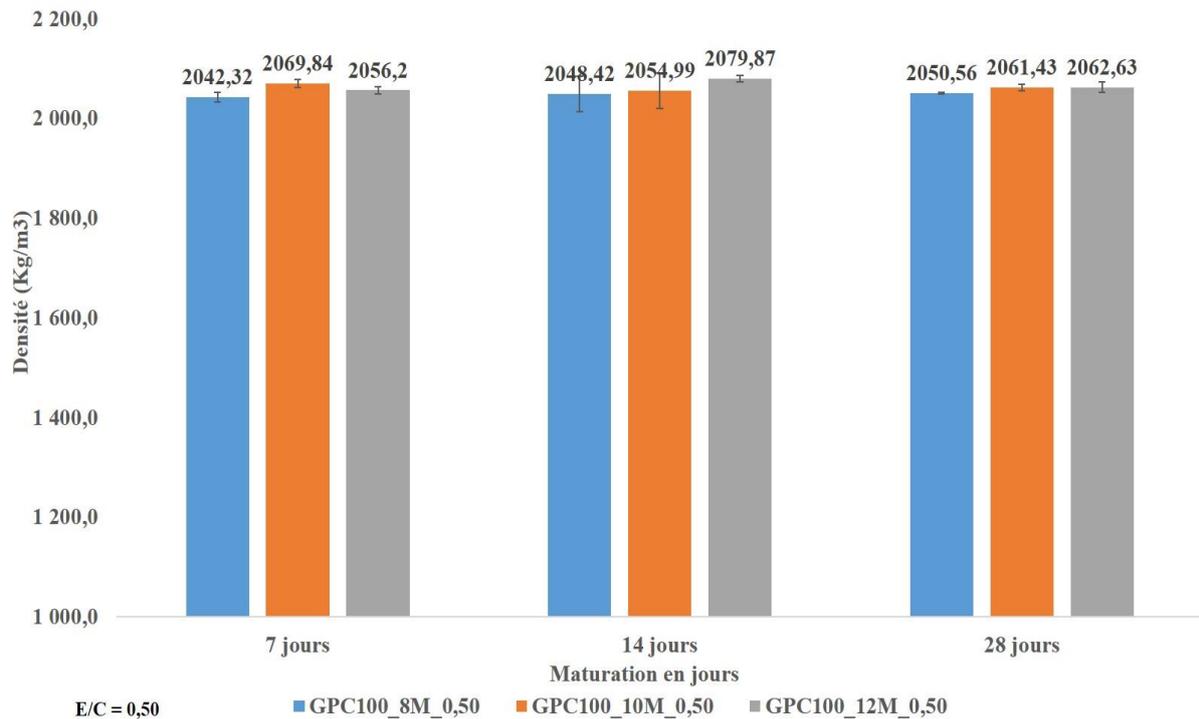


Figure 9: Représentation graphique de la densité apparente $E/L = 0,50$

L'observation de ces résultats, nous font comprendre que la densité diminue lorsque le rapport E/C augmente pour différentes solutions alcaline 12 mol, 10 mol et 8 mol. La différence observée entre les différentes densités pour une même solution alcaline et pour le même rapport $e/c = 0,50$ sont très légères. La densité du béton géopolymère reste pratiquement constant avec l'âge.

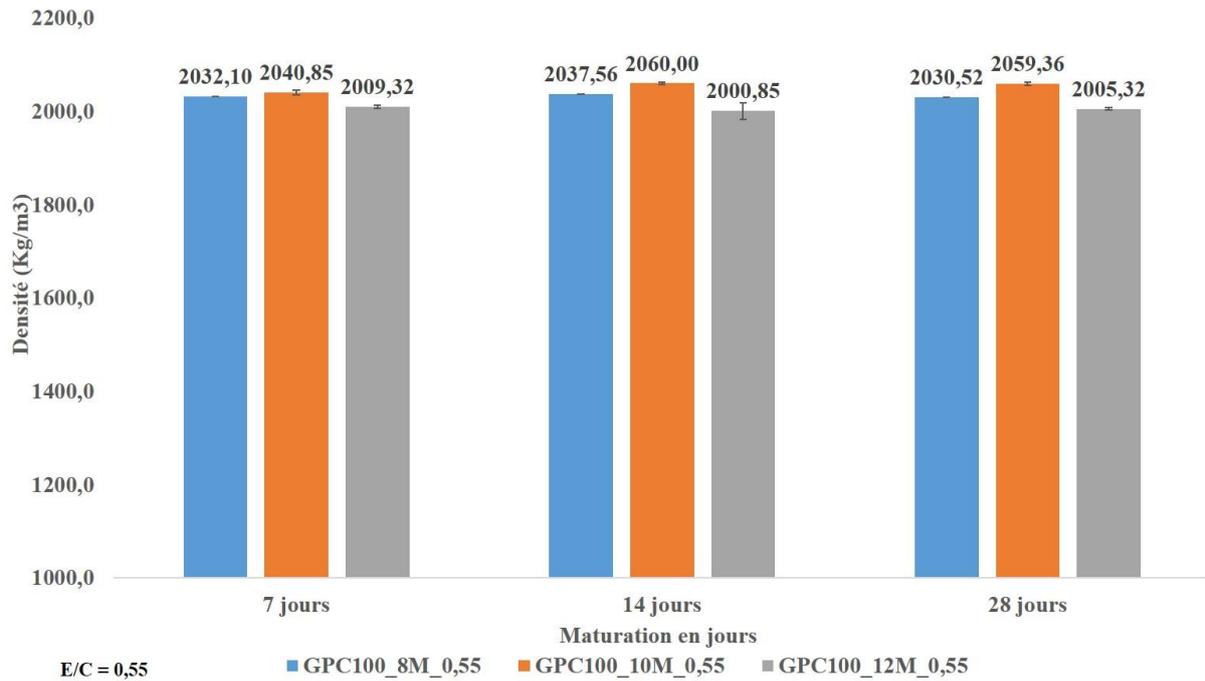


Figure 10: Représentation graphique de la densité apparente $E/L = 0,55$

L'observation de ces résultats, nous font comprendre que la densité diminue lorsque le rapport E/C augmente pour différentes solutions alcaline 12 mol, 10 mol et 8 mol. La différence observée entre les différentes densités pour une même solution alcaline et pour le même rapport $e/c = 0,55$ sont très légères. La densité du béton géopolymère reste pratiquement constant avec l'âge. Nous observons également que les solutions 10 et 8 mol ont des valeurs de densités plus élevée lorsque le rapport e/c vaut 0,55.

3.2 Propriété mécanique

3.2.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée pour savoir le potentiel des bétons géopolymères. La résistance à la compression de nos bétons à l'âge de 7 jours, 14 jours et 28 jours pour différente solution alcaline et différent rapport E/L est présentée dans le tableau ci-dessous.

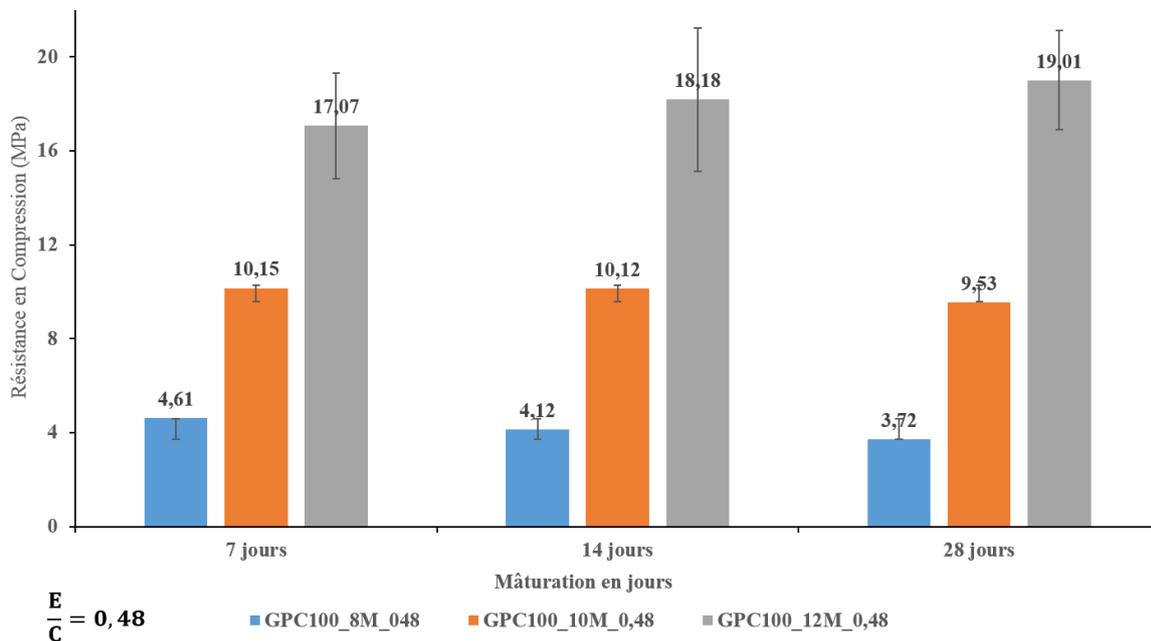


Figure 11: Représentation graphique de l'essai de compression pour un rapport E/L = 0,48

Les résultats de compression observés sur la figure ci-dessus nous montre qu'ils varient très peu avec l'âge pour différentes solutions alcalines. Nous remarquons aussi que à 7, 14 et 28 jours d'âge, la résistance à la compression augmente presque du double lorsque nous passons d'un taux e concentration de 8M à 10M et de 10M à 12M. Une autre remarque est que : Pour un rapport E/L = 0.48 des formulations de 8 ; 10 et 12M nous constatons que la résistance à la compression croît ceci peut s'expliquer par le taux de concentration de la solution alcaline le NaOH. Plus la solution alcaline est concentrée plus la valeur de la résistance est croissante. Mais nous faisons une hypothèse selon laquelle nous pouvons avoir une valeur limite.

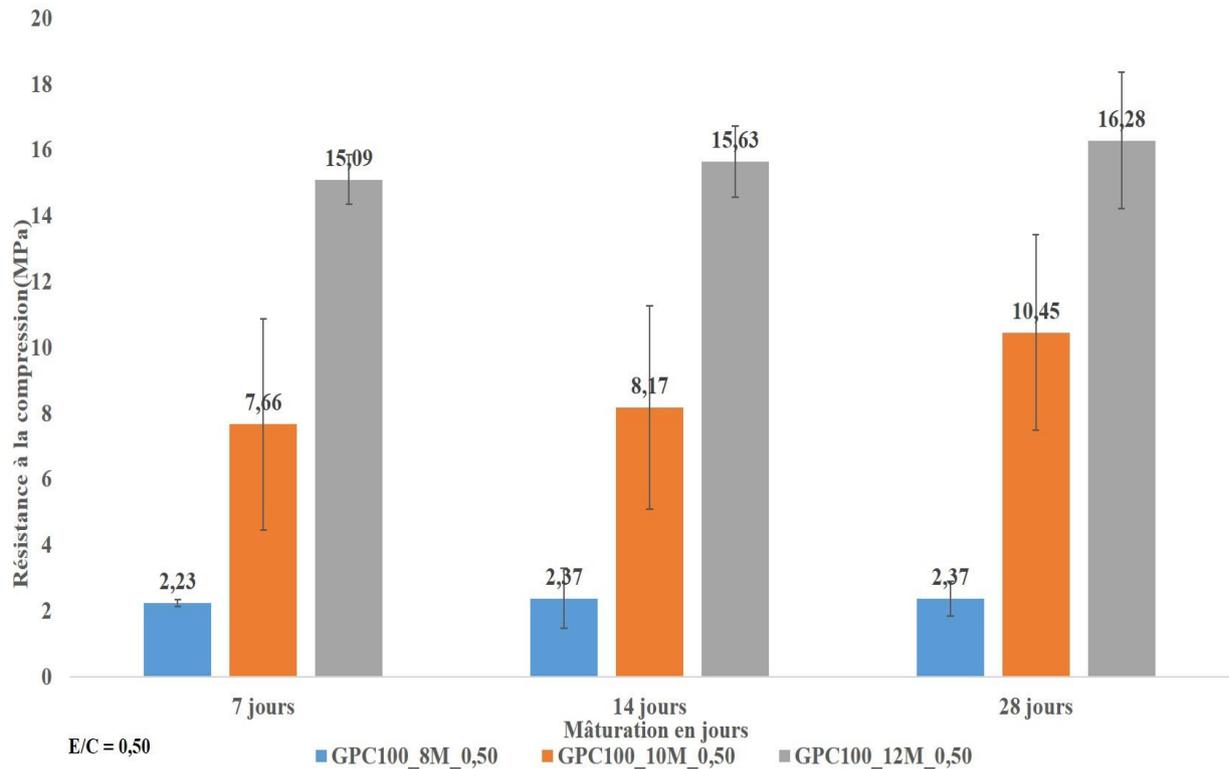


Figure 12: Représentation graphique de l'essai de compression pour un rapport E/L = 0,50

Les résultats de compression observés sur la figure ci-dessus nous montre qu'ils varient très peu avec l'âge pour différentes solutions alcalines. Nous remarquons aussi que à 7, 14 et 28 jours d'âge, la résistance à la compression augmente à plus du double lorsque nous passons d'un taux de concentration de 8M à 10M et de 10M à 12M. Une autre remarque est que : Pour un rapport E/L = 0,50 des formulations de 8 ; 10 et 12M nous constatons que la résistance à la compression croît ceci peut s'expliquer par le taux de concentration de la solution alcaline le NaOH. Plus la solution alcaline est concentrée plus la valeur de la résistance est croissante. Mais nous faisons une hypothèse selon laquelle nous pouvons avoir une valeur limite.



ETUDE DE FAISABILITE DE BETON DE GEOPOLYMERE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX DU BURKINA FASO SOUS CURE THERMIQUE.

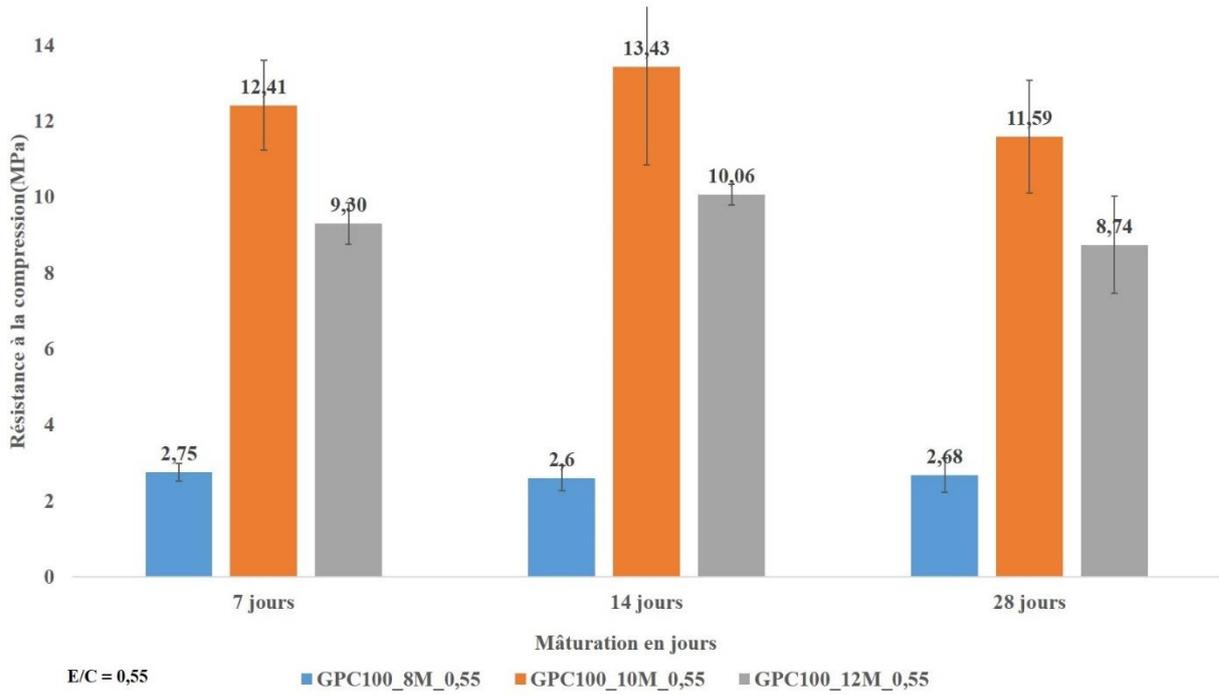


Tableau 9: Représentation graphique de l'essai de compression pour un rapport E/L = 0,55

Lorsque le rapport E/L = 0,55, pour des formulations de 8 mol, nous constatons que la résistance à la compression varie très peu, nous constatons également une croissance exponentielle pour une concentration de 10M. Mais pour ce qui est de la solution de 12M nous remarquons que la résistance en compression décroît.

Nous pouvons faire l'hypothèse selon laquelle lorsque le rapport E/L= 0,55 pour 12 M la solution alcaline de NaOH est trop concentrée ce qui fait qu'il y a plus de solution alcaline que de MK ce qui rend notre béton d'avantage poreux d'ailleurs les résultats de porosité le confirme.



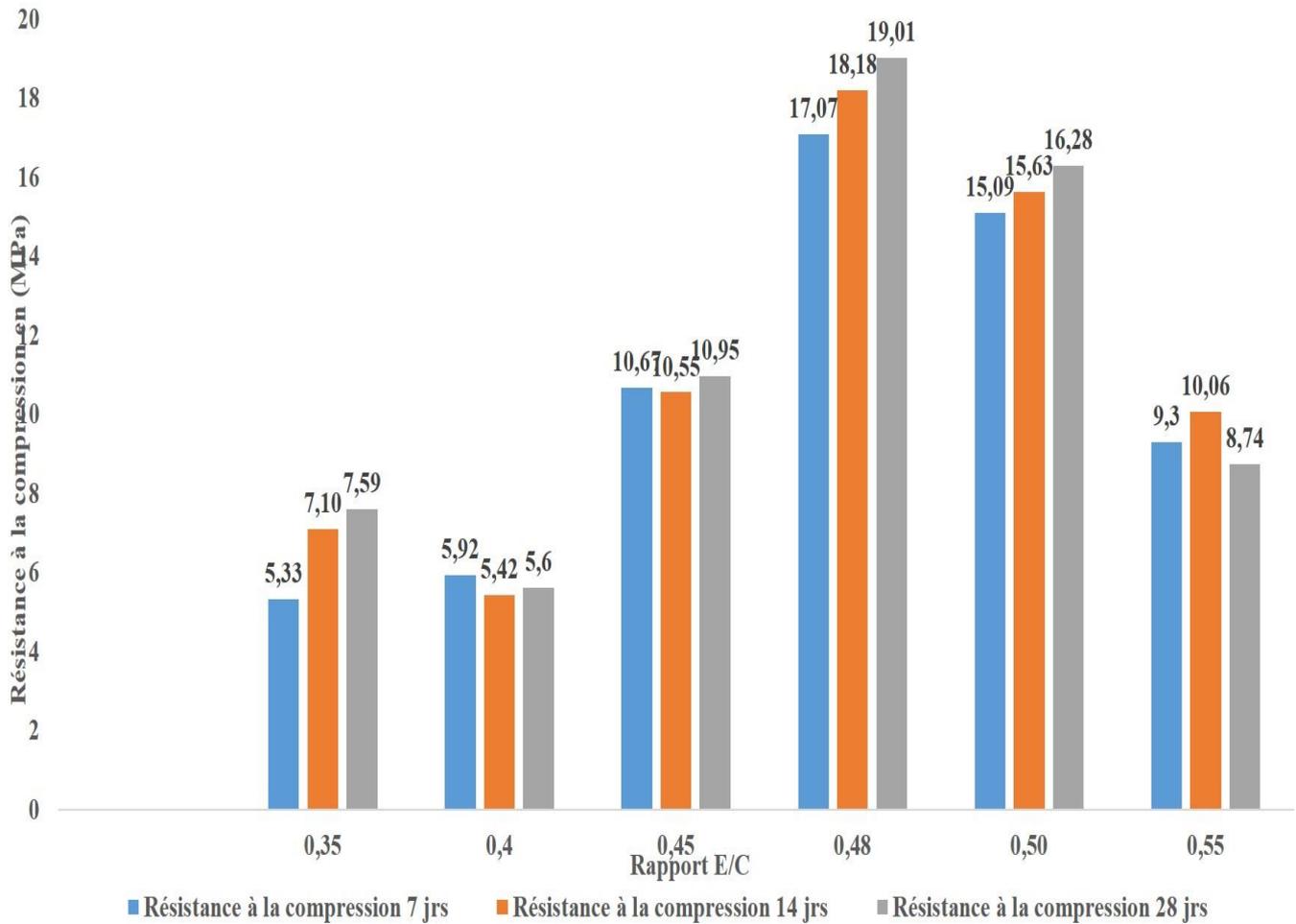


Figure 13: Courbe de résistance à la compression 12M



Lorsque nous observons le graphe nous constatons une évolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/L et qui commence à chuter à une certaine valeur limite.

- Lorsque le rapport $E/L = 0,35$ nous avons une valeur de la compression qui est égale à environ 5 MPa.
- L'augmentation de ce rapport de 0.05 Kg de la solution alcaline n'entraîne pas une grande variation de la résistance à la compression. Mais lorsque ce rapport passe à 0,45 nous constatons une grande évolution de la résistance d'environ plus de 50% de la résistance lorsque le rapport vaut 0,35.
- Nous constatons un pique lorsque le rapport $E/L = 0.48$ cela donne une résistance en compression en moyenne de 20 MPa. Nous pouvons dire qu'à ce niveau il y a équilibre entre les précurseurs de MK et l'activant qui est le NaOH.
- Et lorsque ce rapport passe à 0,50 jusqu'à 0,55 nous constatons une diminution de la résistance à la compression ceci peut s'expliquer de la façon suivante : lorsque le rapport E/L augmente, cela entraîne une augmentation de la solution alcaline. Ici donc il peut s'avérer qu'il ait trop de solution alcaline que de MK cette hypothèse reste à vérifier.

3.2.2 Résistance à la traction par fendage

Les résultats d'essai de traction par fendage sont présentés dans le tableau ci-dessous pour différents rapport E/L.

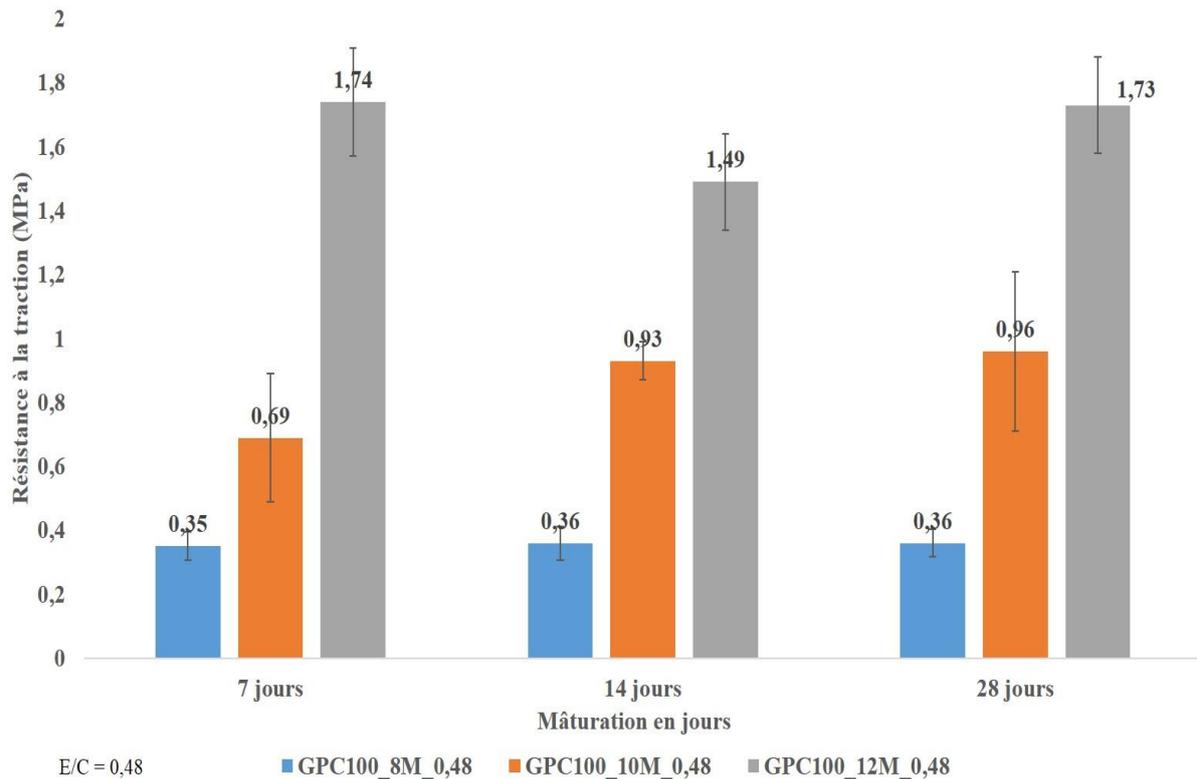


Figure 14: Représentation graphique de l'essai de traction pour un rapport E/L = 0,48

La résistance à la traction du béton géopolymère varie très peu et est fonction du taux de concentration de la solution alcaline. Tout comme le béton classique, sa résistance à la traction est très faible. Comme le témoigne le tableau et la figure ci-dessus on observe un accroissement de cette résistance en fonction du taux de concentration. Pour une concentration de 8 et 10Mol la résistance à la traction croît progressivement. Mais lorsque le taux vaut 12M cette résistance est plus faible à 14 jours qu'à 7 jours. Les résultats sont faibles par rapport à ceux trouvés par dans l'article de Kolli.Ramujee, M.PothaRaju où la résistance à la traction à 28 jours d'un béton de même classe de résistance est 2,33 MPa en moyenne. Cependant, nous pensons qu'il est possible d'améliorer cette résistance par réduction de la granulométrie des matériaux (MK). Ceci pourrait réduire la taille des pores.

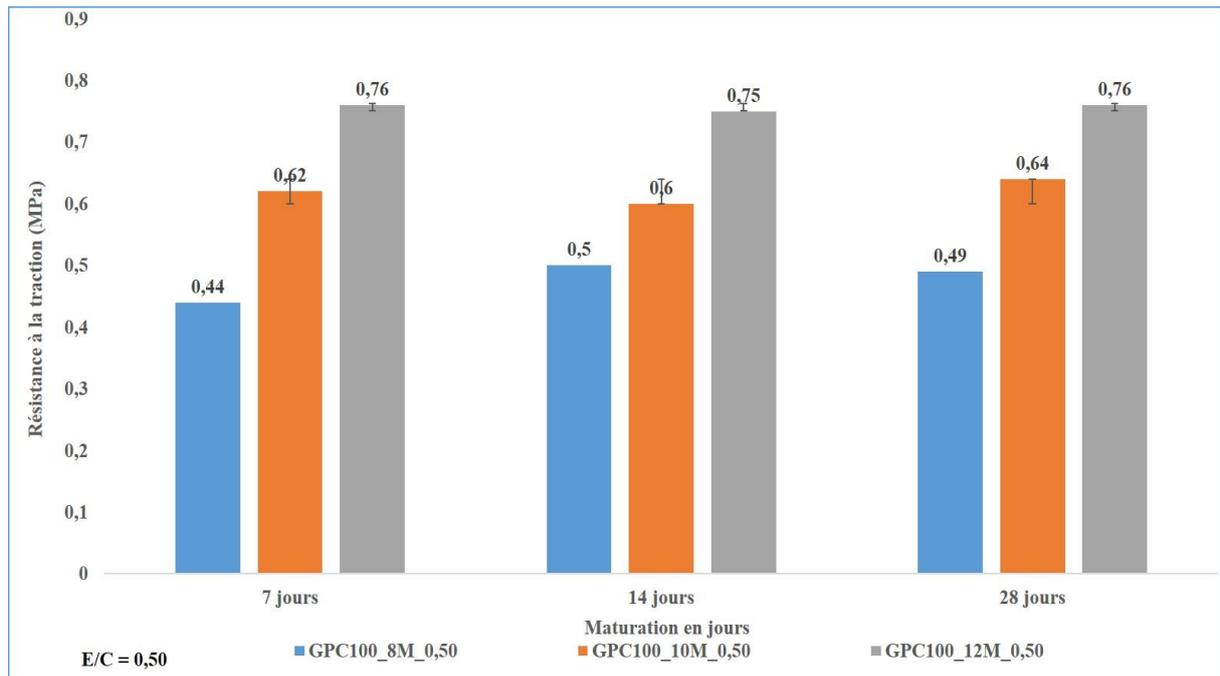


Figure 15: Représentation graphique de l'essai de traction pour un rapport E/L = 0,50

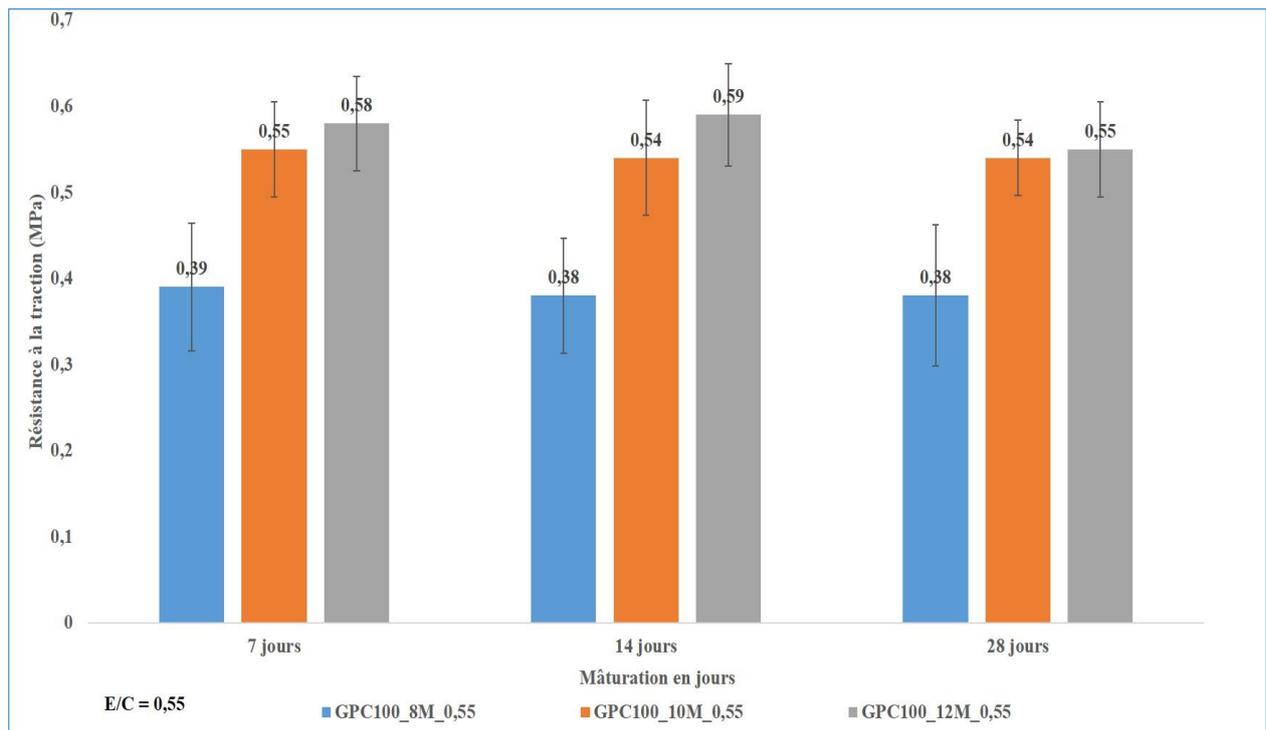


Figure 16: Représentation graphique de l'essai de traction pour un rapport E/L = 0,55



3.3 Conclusion partielle

Nous avons dans cette partie fait des analyses et des interprétations des différents résultats issus des essais, nous pouvons dire qu'au vu des résultats, le béton géopolymère présente un bon comportement mécanique puisqu'il atteint une résistance en compression de 20MPa en moyenne et présente aussi de bonnes propriétés.



Conclusion générale

Ce présent mémoire est le résultat d'un travail, patient et méthodique mené au sein du laboratoire Eco – Matériaux et de l'Habitat Durable (LEMHaD) de 2iE. Nous rappelons que le béton géopolymère est un béton essentiellement composé d'une source d'aluminosilicate et une solution Alcaline. Ainsi sa résistance en compression avec une solution concentrée à 12M pendant 24H de cure est égale à 20MPa en moyenne alors qu'avec une solution moins concentrée de (8 et 10M) nous avons une résistance relativement plus faible. Pour un même rapport eau/liant. Quant à la résistance à la flexion, les résultats évoluent presque pareils et est toujours fonction du taux de concentration il nous donne en moyenne 1,74 MPa, et 0,69 MPa et pour des solutions de 12M, 10M et 8M respectivement avec un même rapport eau/liant égale à 0,48. Au vu de ces résultats, nous pouvons dire que le taux de concentration de la solution alcaline améliore remarquablement les caractéristiques mécaniques du béton géopolymère pour un rapport eau/liant donné jusqu'à atteindre une valeur limite.

Par ailleurs, les résultats que nous avons eu après ces travaux de recherches sont satisfaisants aux attentes car ils sont plus ou moins égaux aux normes prévues et aux résultats obtenus par d'autres études vues dans certains articles où ils ont obtenu une résistance à la compression en moyenne de 65MPa et en traction en moyenne de 2,3MPa. Cela peut s'expliquer éventuellement par le fait qu'ils ont utilisé leurs matériaux locaux et nous avons utilisé nos matériaux locaux qui n'ont pas les mêmes caractéristiques minéralogiques.

Nous avons eu la faisabilité du béton géopolymère, et les résultats procurés. Nous recommandons donc que les futurs chercheurs dans ce domaine orientent leurs études sur l'ajout des cendres de balle de riz et voir le comportement mécanique ainsi que ses propriétés.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, et B. V. Rangan, « On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete », *ACI Mater. J.*, p. 6, 2004.
- [2] R. M. Andrew, « Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2017 », p. 27, 2018.
- [3] J. Davidovits, « Geopolymers: Inorganic polymeric new materials ». 1991.
- [4] A. Ayyappan, S. Palanikumar, D. Dinesh Kumar, M. Vinoth, « « Influence of Geopolymers in the Stabilization of Clay Soil ». sept-2017.
- [5] R. POUHET, « « Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers » ». Juin 2015.
- [6] R. Pouhet et M. Cyr, « Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes », *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, p. 150-160, sept. 2016.
- [7] C. Martin, « PEUT-ON FORMULER UN GÉOPOLYMERE OU UN LIANT ALCALI-ACTIVE COMME UN CIMENT PORTLAND ? », p. 11.
- [8] A. Purdon, « The action of alkalis on blast-furnace slag ». *J. Soc.*, 1940.
- [9] V. Glukhovskiy, « Soil silicates (Gruntosilikaty) ». USSR Kiev Budivelnik Publ, 1959.
- [10] S. Rios, « « Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads » ». 2016.
- [11] KAJAL SWAIN, « « STABILIZATION OF SOIL USING GEOPOLYMER AND BIOPOLYMER » ». 2015.
- [12] Wasteils et Al, « Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée ». *Technol.* 11, 2015.
- [13] H. Djwantoro, B. Rangan, « Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Geopolyme ». Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Geopolyme, 2006.
- [14] H. Xu, J.S. Van Deventer, « Geopolymerisation of multiple minerals ». *Miner. Eng.*, 1131–1139-2002.
- [15] H.K. Tchakouté, C.H. Rüscher, S. Kong, E. Kamseu, C. Leonelli, « Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study, *Constr. Build. Mater.* 114 (2016) 276–289. doi:10.1016/j.conbuildmat, 184-2016.
- [16] J.S.J. van Deventer, J.L. Provis, P. Duxson, G.C. Lukey, « Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products ». *J. Hazard. Mater.* 139 (2007) 506–513. doi:10.1016/j.jhazmat, 044-2006.
- [17] B.B. Kenne Dikko, A. Elimbi, M. Cyr, J. Dika Manga, H. Tchakoute Kouamo, « Effect of the rate of calcination of kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymers ». *J. Asian Ceram. Soc.* 3 (2015) 130–138. doi:10.1016/j.jascer, 03-déc-2014.
- [18] [26] H. T. HUYNH, « « Géopolymères de nouvelle génération » ». nov-2013.
- [19] [27] Ana Balaguer Pascual, « « ÉLABORATION DE NOUVEAUX LIANTS MINÉRAUX POUR LA FORMULATION DE BÉTONS ÉCOLOGIQUES ET DURABLES » ». août-2014.
- [20] 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 », *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, p. 301-311, oct. 2016.
- [21] Miguel N. A. Saad, Walton Pacelli De Andrade et Vladimir A. Paulon, « Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay ». *Concrete International*, 4(07):59–65, 1982.

- [22] M.H. Zhang et V.M. Malhotra, « Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. » *Cement and Concrete Research*, 25-déc-1713.
- [23] François de Larrard, « Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées ». 2002.
- [24] K. Ramujee et M. PothaRaju, « Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites », *Mater. Today Proc.*, vol. 4, n° 2, p. 2937-2945, 2017.
- [25] NF P 18-423, « Bétons : mise en place par piquage. AFNOR ». 1981.
- [26] NF P18-459, « Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique. AFNOR », 2010.
- [27] Poon, L Lam, S.C Kou, Y.-L Wong et Ron Wong, « Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 31 ». 1306, 2001. ISSN 00088846-1301.
- [28] Nabil M. Al-Akhras, « Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36(9):1727–1734 ». ISSN 00088846-2006.
- [29] Ahmed Taфраoui, Gilles Escadeillas, Soltane Lebaili et Thierry Vidal, « Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, 23(2):669–674 ». ISSN 09500618-2009.
- [30] NF EN 12390-1, « Essai pour béton durci. Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules ». 2001.
- [31] NF EN 12390-6, « Essai pour béton durci Partie 6 : Résistance en traction par fendage d'éprouvettes ». AFNOR, 2001.

ANNEXES

Annexe 1: Formulation 12M_E/L = 0,50

Date: 05/04/2019	Cure Thermique 12M
	Qtité en kg/m ³
Metakaolin (kg/m ³)	350,00
Superplastifiant	23,82
NaOH pure (kg/m ³)	135,11
NaOH solution(sol. alc) (kg/m ³)	380,00
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00
Rapport e/c (eau/liant)	0,50
Rapport superplast/liant	0,05
Affaissement au mini cône : 3,2 cm	

Annexe 2: Formulation 12M_E/L = 0,55

Date: 03/04/2019	Cure Thermique 12M
	Qtité en kg/m ³
Metakaolin (kg/m ³)	350,00
Superplastifiant	23,82
NaOH pure (kg/m ³)	151,34
NaOH solution(sol. alc) (kg/m ³)	425,64
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00
Rapport e/c (eau/liant)	0,55
Rapport superplast/liant	0,05
Affaissement au mini cône : 6,1 cm	

Annexe 3: Formulation 10M_E/L = 0,48

Date: 13/04/2019		Cure Thermique 10M
Formulation GPC ₁₀₀	Qtité en kg/m ³	
Metakaolin (kg/m ³)	350,00	
Superplastifiant	23,82	
NaOH cristaux (kg/m ³)	94,81	
NaOH solution (kg/m ³)	310,50	
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08	
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00	
Rapport e/c (eau/liant)	0,48	
Rapport superplast/liant	0,05	
Affaissement au mini cône : 0,2 cm		

Annexe 4: Formulation 10M_E/L = 0,50

Date: 18/032019		Cure Thermique 10M
Formulation GPC ₁₀₀	Qtité en kg/m ³	
Metakaolin (kg/m ³)	350,00	
Superplastifiant	23,82	
NaOH cristaux (kg/m ³)	99,28	
NaOH solution (kg/m ³)	325,15	
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08	
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00	
Rapport e/c (eau/liant)	0,50	
Rapport superplast/liant	0,05	
Affaissement au mini cône : 1,2 cm		

Annexe 5: Formulation 10M_E/L = 0,55

Date: 09/04/2019		Cure Thermique 10M
Formulation GPC ₁₀₀	Qtité en kg/m ³	
Metakaolin (kg/m ³)	350,00	
Superplastifiant	23,82	
NaOH cristaux (kg/m ³)	112,82	
NaOH solution (kg/m ³)	369,50	
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08	
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00	
Rapport e/c (eau/liant)	0,55	
Rapport superplast/liant	0,05	
Affaissement au mini cône : 4 cm		

Annexe 6: Formulation 8M_E/L = 0,48

Date: 16/04/2019	Cure Thermique 8M
Formulation GPC ₁₀₀	Qtité en kg/m ³
Metakaolin (kg/m ³)	350,00
Superplastifiant	23,82
NaOH cristaux (kg/m ³)	69,21
NaOH solution (kg/m ³)	272,50
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00
Rapport e/c (eau/liant)	0,48
Rapport superplast/liant	0,056
Affaissement au mini cône : 0 cm	

Annexe 7: Formulation 8M_E/L = 0,50

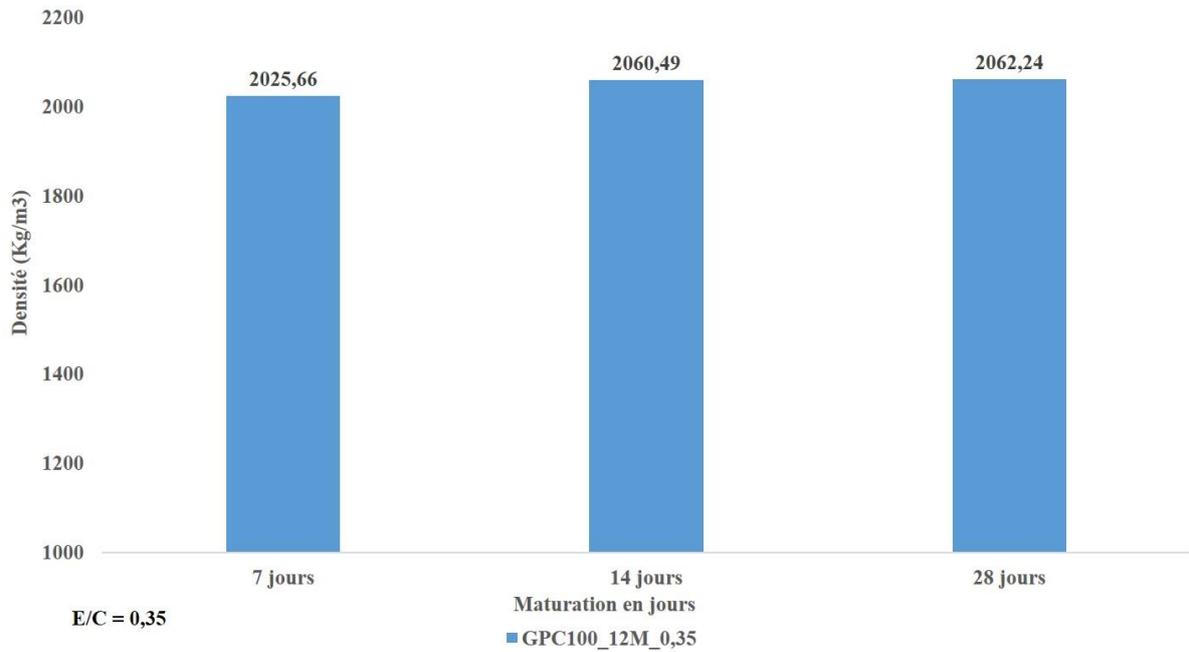
Date: 19/03/2019	Cure Thermique 8M
Formulation GPC ₁₀₀	Qtité en kg/m ³
Metakaolin (kg/m ³)	350,00
Superplastifiant	23,82
NaOH cristaux (kg/m ³)	75,19
NaOH solution (kg/m ³)	296,07
Fines aggregates (kg/m ³)	723,08
Coarse aggregates (kg/m ³)	958,00
Rapport e/c (eau/liant)	0,50
Rapport superplast/liant	0,056
Affaissement au mini cône : 0,8 cm	

Annexe 8: Formulation 8M_E/L = 0,55

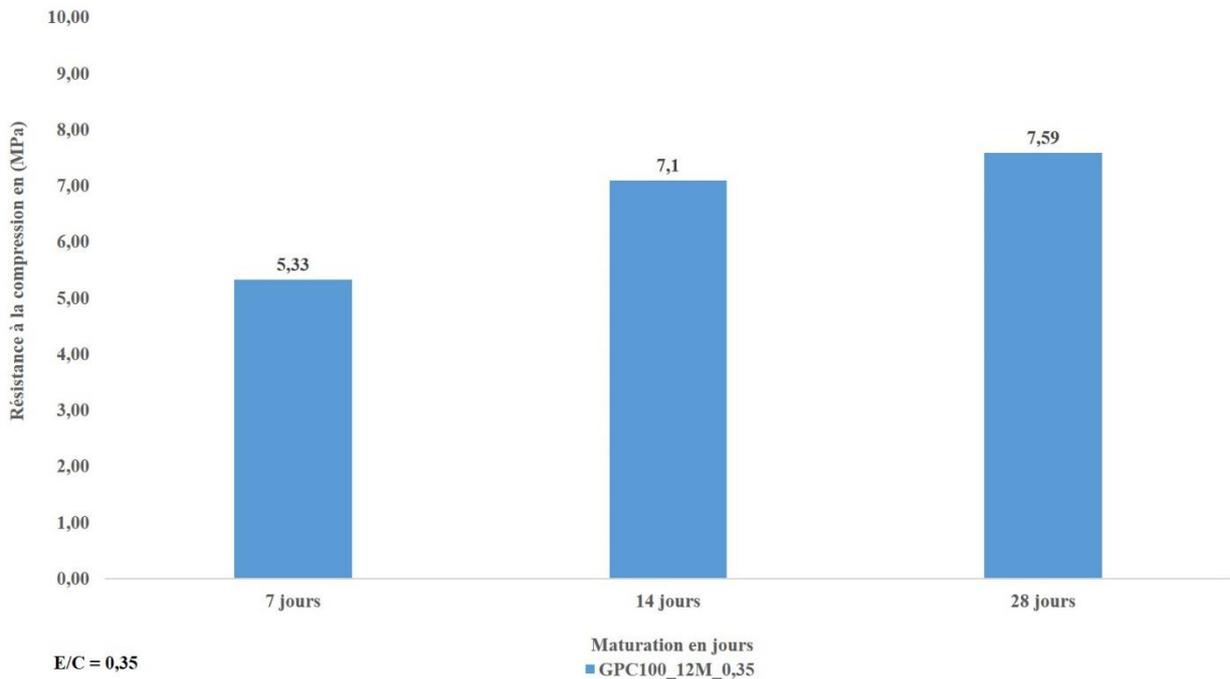
Date: 19/03/2019	Cure Thermique 8M
Formulation GPC₁₀₀	Qtité en kg/m³
Metakaolin (kg/m3)	350,00
Superplastifiant	23,82
NaOH cristaux (kg/m3)	81,52
NaOH solution (kg/m3)	321,00
Fines aggregates (kg/m3)	723,08
Coarse aggregates (kg/m3)	958,00
Rapport e/c (eau/liant)	0,55
Rapport superplast/liant	0,056
Affaissement au mini cône : cm	



ETUDE DE FAISABILITE DE BETON DE GEOPOLYMERE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX DU BURKINA FASO SOUS CURE THERMIQUE.



Annexe 9: Densité 12M_E/L = 0,35

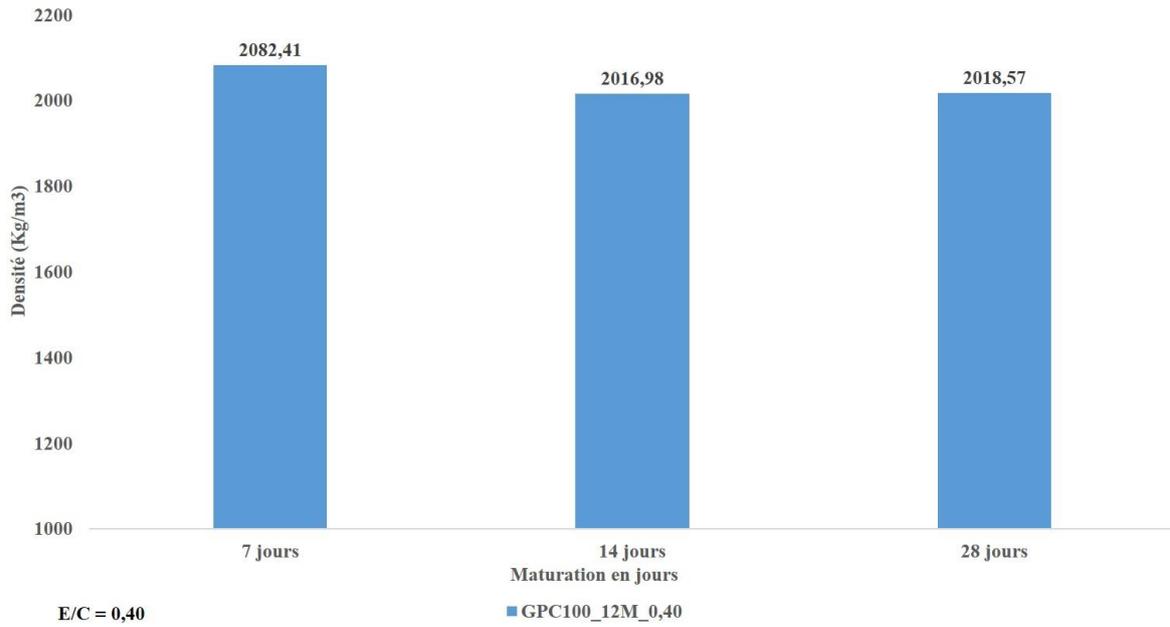


Annexe 10: Compression 12M_E/L = 0,35

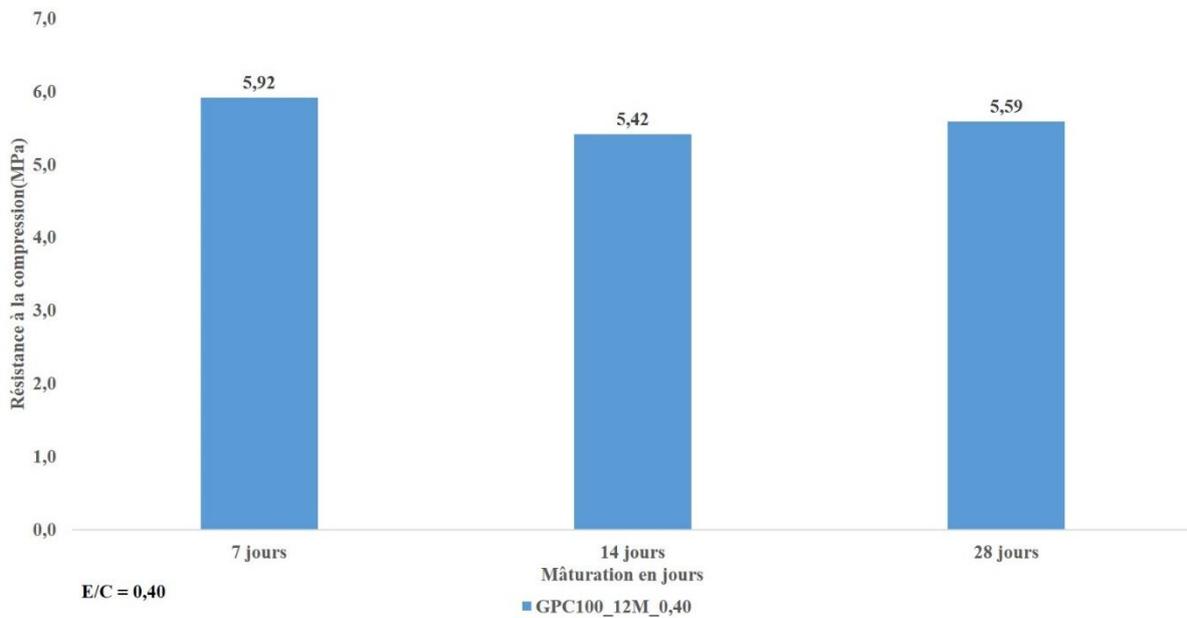




ETUDE DE FAISABILITE DE BETON DE GEOPOLYMERE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX DU BURKINA FASO SOUS CURE THERMIQUE.



Annexe 11: Densité 12M_E/L = 0,40

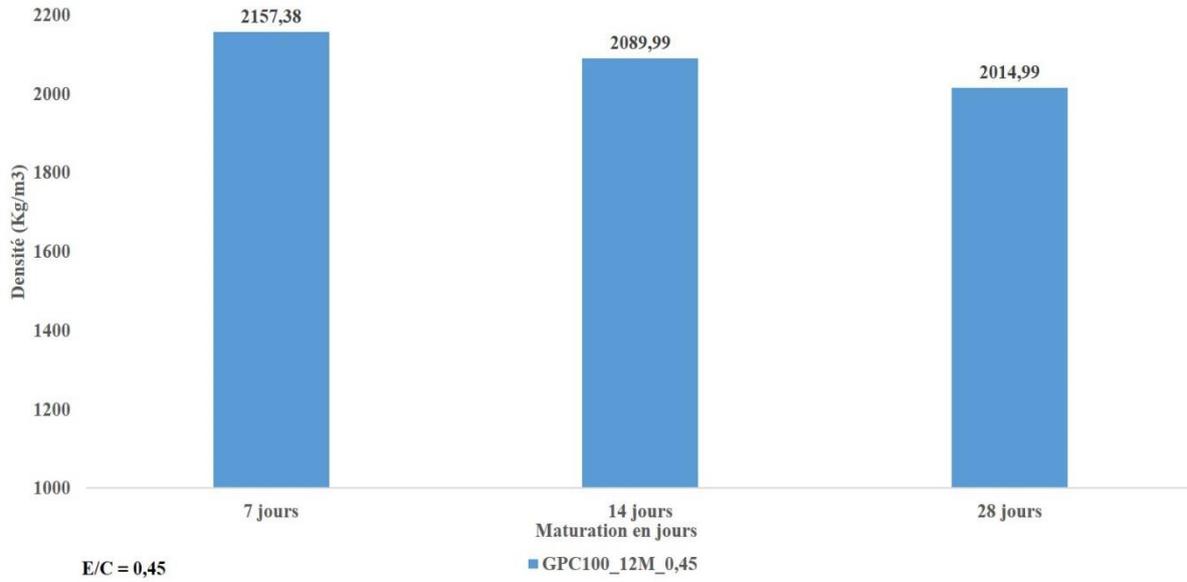


Annexe 12: Compression 12M_E/L = 0,40

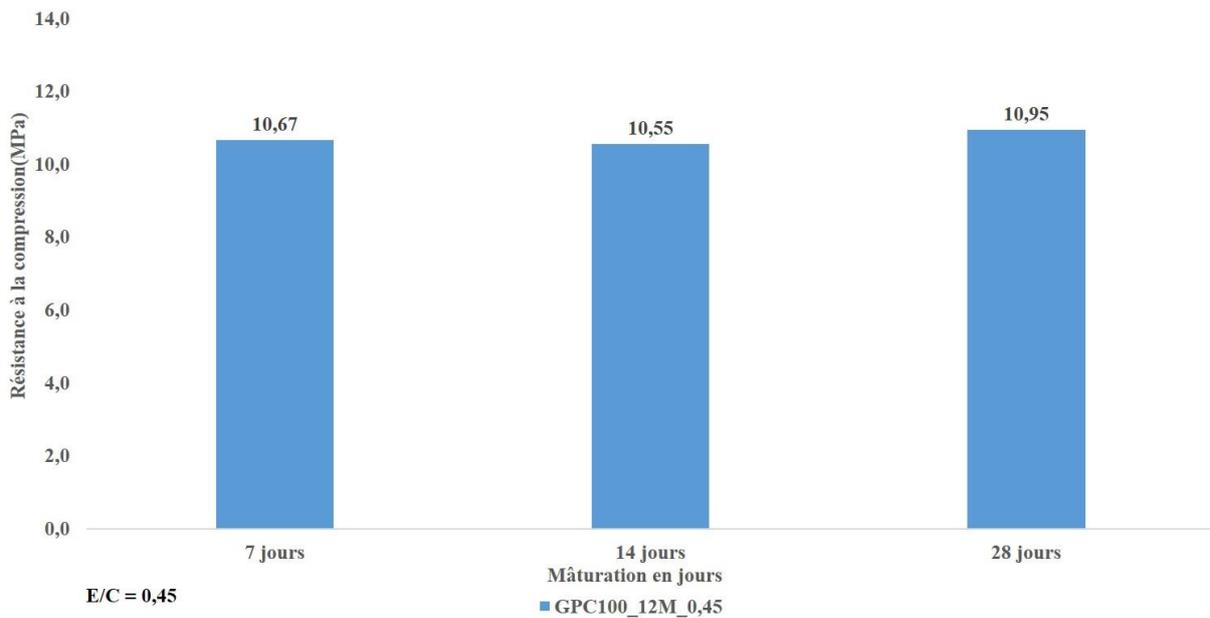




ETUDE DE FAISABILITE DE BETON DE GEOPOLYMERE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX DU BURKINA FASO SOUS CURE THERMIQUE.



Annexe 13: Densité 12M_E/L = 0,45



Annexe 14: Compression 12M_E/L = 0,45





Annexe 15: Quelques images