

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil.

Par

➤ **Talbi Abir**

Intitulé

*Effet des conditions climatiques sur le comportement des mortiers
géopolymères à base de matériaux locaux.*

Soutenu le : 20/06/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr :Noui amar</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr : Abdelatif Benouadah</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr : Kessal Oussama</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr :Belkadi ahmed abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

On remercie en tout premier lieu, notre **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Dr. Benouadah Abdelatif** et **Dr. Kessal Oussama**, je les remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnelle, pour leur gentillesse, pour leur patience, leur rigueur et ses disponibilités durant ma préparation de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements au **Dr. Benammar Abdelhafid** pour son aide bibliographique et son soutien moral et ses encouragements.

Je remercie également notre chef de département le **Dr. Noui Ammar** et le **Dr. Achour Yacine**, et n'oublie pas tous mes professeurs qui m'ont appris tout au long de ma carrière universitaire.

Enfin, J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A mon très cher père, vous êtes ma vie, ma réussite et tout mon respect, mon soutien et mon héros vous êtes toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, que dieu vous protège et vous accorde le paradis.

A ma très chère mère, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mes deux sœurs et mon frère que dieu les protège et leurs offres la chance et le bonheur.

A mon fiancé, qui n'est pas cessé de me conseiller et de m'aider à préparer cette mémoire, que Dieu le bénisse et le garde.

A mes sœurs qui ma mère n'est pas donnée leurs naissances, les plus belles compagnes de ma vie.

A tous mes proches, les voisins et les amis que j'ai connus jusqu'à maintenant. Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les collègues de groupe de matériaux et tout le personnel pour leur aide et tous les étudiants de génie civil.

Résumé

Résumé :

La fabrication du béton nécessite d'énormes quantités de matières premières et d'énergie, ce qui entraîne la production d'une grande quantité d'émissions gazeuses, notamment de dioxyde de carbone (CO₂), et cela nous oblige à réfléchir à trouver des alternatives au béton ordinaire. D'autre part, les industries produisent d'énormes déchets qui posent des problèmes d'élimination. En fait, pour la production du béton géopolymère, nous utilisons des liants alternatifs et peuvent être considérés comme une alternative appropriée au béton conventionnel. Les déchets de caoutchouc sont des déchets importants qui peuvent remplacer les granulats naturels dans le béton. Cette étude expérimentale vise à valoriser les déchets caoutchouteux sous forme de granulats dans les mélanges de mortier géopolymère. Les particules de caoutchouc ont été ajoutées aux mélanges en les remplaçant partiellement par un volume de sable à différents pourcentages (10, 20 et 30%).

D'autre part, on a étudié l'effet du traitement du GC et la méthode de durcissement sur la résistance à la compression du mortier géopolymère. Les mélanges de géopolymères ont été préparés avec de 10M l'hydroxyde de sodium (NaOH) ; ces échantillons sont destinés à être placés soit à l'air libre à 22°C, soit dans une chambre humide (une humidité relative, H ± 90%). Les propriétés des mortiers géopolymères à l'état frais et durci telles que l'ouvrabilité, la densité et la résistance à la compression ont été étudiées.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'étalement, la densité et la résistance à la compression diminuaient avec l'augmentation du GC%. Contrairement au GC non traité, la méthode de prétraitement du GC avec NaOH améliore les propriétés de la résistance en compression de géopolymère. Le traitement chimique par le NaOH a également amélioré l'adhérence entre le GC et les composants de la suspension de géopolymère, entraînant par la suite la formation d'une structure dense et matricielle. Concernant la méthode de mûrissement, les résultats expérimentaux ont montré que les échantillons conservés à la chambre humide (H=90%) avaient une résistance à la compression élevée que ceux conservés à l'air libre à 22°C. En général, l'absorption d'eau était plus élevée pour le mortier géopolymère à base du GC par rapport au mortier géopolymère témoin (sans CG), tandis que l'absorption d'eau est plus faible lorsque le GC était traité.

Mots clés : Formulation, mortier géopolymère, déchets de caoutchouc, valorisation, conditions climatiques, résistance à la compression, traitement par NaOH

ملخص:

يتطلب تصنيع الخرسانة كميات هائلة من المواد الخام والطاقة، مما يؤدي إلى إنتاج كمية كبيرة من الانبعاثات الغازية وخاصة ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وهذا ما يتطلب منا التفكير في إيجاد بدائل للخرسانة العادية. من ناحية أخرى، تنتج الصناعات النفايات الضخمة مما يطرح مشاكل التخلص منها. لإنتاج الخرسانة الجيوبوليمر نستخدم مواد رابطة بديلة ويمكن اعتبارها بديلاً مناسباً للخرسانة التقليدية. تعتبر نفايات المطاط من النفايات المهمة التي يمكن أن تحل محل الرمل الطبيعي في الخرسانة. تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تقييم النفايات المطاطية على شكل مجاميع في خلائط ملاط جيوبوليمر. تمت إضافة جزيئات المطاط إلى الخلائط كبديل جزئي للحجم الكلي للرمل بنسب مختلفة (10 ، 20 و 30%).

من ناحية أخرى تم دراسة تأثير معالجة (حببيات المطاط) وطريقة التصلب على مقاومة ضغط الملاط الجيوبوليمر. تم تحضير خلائط الجيوبوليمر باستخدام 10 مولار من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ثم تم وضعها إما في الهواء الطلق عند 22 درجة مئوية أو في غرفة ذات رطوبة عالية (H=90%). تمت دراسة خصائص الملاط الجيوبوليمر في الحالة الطازجة والمتصلبة مثل قابلية التشغيل والكثافة وقوة الانضغاط.

أظهرت النتائج التجريبية أن السيولة والكثافة وقوة الانضغاط انخفضت بزيادة نسبة حببيات المطاط. على عكس حببيات المطاط الغير المعالجة، فإن طريقة المعالجة المسبقة ل (حببيات المطاط) ب NaOH حسنت من خصائص ملاط الجيوبوليمر. وكذلك حسنت المعالجة الكيميائية بهيدروكسيد الصوديوم من تحسين الالتصاق بين (حببيات المطاط) ومكونات ملاط جيوبوليمر ، مما أدى إلى تكوين بنية كثيفة ومصفوفة. اما فيما يخص طريقة التصلب، فقد أظهرت النتائج التجريبية ان العينات المحفوظة في الجو الرطب (H=90%) كانت مقاومتها لقوة الضغط أكبر من التي حفظت في الهواء الطلق عند 22°. بشكل عام، كان امتصاص الماء أكثر بالنسبة للملاط الجيوبوليمر مع (حببيات المطاط) مقارنة مع الميلاط الجيوبوليمر المرجعي (بدون حببيات المطاط) بينما لوحظ انخفاض امتصاص الماء عند معالجة حببيات المطاط.

الكلمات المفتاحية: ملاط جيوبوليمر ، نفايات المطاط ، تثمين، الشروط المناخية ،مقاومة ، معالجة هيدروكسيد الصوديوم.

Abstract:

Concrete industry has been leading to severe energy consumption, which leads to the production of a large number of emissions gaseous, in particular the dioxide carbon (CO₂), and these forces us to think about finding alternatives to ordinary concrete. On the other hand, huge waste is produced by industries which pose disposal problems. In fact, geopolymer concrete uses alternative binders and can be considered a suitable alternative to conventional concrete. Rubber waste is a significant waste that can replace natural aggregates in concrete. This experimental study aims to valorize rubbery waste in the form of aggregates in mixtures geopolymer mortar. The rubber particles were added to the mixtures, partially replacing them with a volume of sand at different percentages (10, 20 and 30%).

On the other hand, the effect of the CR treatment and the hardening method on the compressive strength of the geopolymer mortar was studied. The Geopolymer mixes were prepared using 10 M sodium hydroxide (NaOH); these samples are intended to be placed either in the open air at 22°C, or in a humid chamber (relative humidity, H±90%). The properties of geopolymer mortars in fresh and hardened state such as workability, density and compressive strength were studied.

Experimental results showed that the lovability, density and compressive strength decreased with increasing of CR%. Unlike untreated of CR, the method of pretreating of CR with NaOH improves the compressive strength properties of geopolymer. NaOH chemical treatment also improved the adhesion between CR and geopolymer slurry components, subsequently resulting in the formation of a dense, matrix-like structure. Concerning the ripening method, the experimental results showed that the samples kept in the humid chamber (H=90%) had a higher compressive strength than those kept in the open air at 22°C. In general, geopolymer mortar with CR absorbed more water than the reference GPC (without CR) while lower water absorption was observed when pretreated CR was utilised.

Keywords: Formulation, geopolymer mortar, rubber waste, recovery, weather conditions, resistance, NaOH treatment

Table des matières

Table des matières

Liste des figures.....	10
Chapitre I.....	10
Chapitre II.....	10
Chapitre III.....	10
Chapitre VI.....	11
Liste des tableaux.....	12
Chapitre I.....	12
Chapitre II.....	12
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	4
1- Introduction :.....	5
2- Définition et historique de géopolymère :.....	5
3- Les matériaux de bases de géopolymère :.....	9
3.1- Source de sous-produits (aluminosilicate ou précurseurs) :.....	9
3.1.1- Les cendres volantes :.....	11
3.1.2- La fumée de silice :.....	12
3.1.4- Le laitier de haut fourneau :.....	14
3.1.5- La cendre de balle de riz :.....	15
3.1.6- La boue rouge :.....	15
3.1.7- La poudre de verre :.....	16
3.1.8- Le CKD.....	16
3.2- Les activateurs utilisés lors de formulation des bétons géopolymères :.....	17
4- Conclusion :.....	17
Chapitre II.....	19
1- Introduction :.....	20
1- Définition et historique de caoutchouc :.....	20
2- Mode de fabrication :.....	21
3- Production de granulat en caoutchouc :.....	21
4- Techniques de valorisation des déchets pneumatiques :.....	22
5- Les domaines de valorisation des déchets pneumatiques :.....	23

5.1-	La valorisation sous forme de matières premières :	24
6-1.1-	Poudrettes :	24
6-1.2-	Granulés :	24
7-	Le caoutchouc en domaine génie civil :	25
7-1-	Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers :	25
7-2-	Effet des granulats en caoutchouc sur les propriétés de béton :	25
7-2.1-	A l'état frais :	25
7.2.2-	A l'état durci :	28
8-	Conclusion :	30
	Chapitre III	31
1-	Introduction :	32
2-	Matériaux :	32
1.1-	Le laitier :	32
1.2-	La solution alcaline :	32
1.3-	Propriétés physiques du sable utilisé :	34
1.3.1-	Analyse granulométrique (DUPONT and TOURENQ 1997):	34
1.3.2-	Les masses volumiques :	36
A-	La masse volumique absolue (NA.255/1990) :	36
B-	La masse volumique apparente (NA.255-5/1990) :	37
C-	Absorption et porosité (NF P18 555, 1990) :	38
D-	Propriétés du sable (NF P 18-598, 1991) :	39
1.4-	Le granulat en caoutchouc :	39
1.4.1-	Méthode de traitement du granulat en caoutchouc :	41
3-	Formulation et fabrication du mortier géopolymère :	42
2.1-	Formulation des mortiers géopolymères :	42
2.2-	Fabrication et mise en place des mortiers géopolymères :	43
2.3-	Mode de conservation	44
4-	Les essais réalisés :	45
3.1-	Essai sur le mortier géopolymère à l'état frais :	45
3.1.1-	L'étalement NF 12350-5 :	45
3.1.2-	La masse volumique à l'état frais :	45
3.2-	Essai sur le mortier géopolymère à l'état durci :	45
3.2.1-	La masse volumique apparente :	45

3.2.2-	L'absorption par immersion totale :	46
3.2.3-	La résistance à la compression :	46
5-	Conclusion :	47
Chapitre IV	48
1-	Introduction :	49
2-	Comportement du mortier géopolymère à l'état frais :	49
2-	L'étalement :	49
2.2-	La masse volumique à l'état frais et à l'état frais durci :	51
3-	Résistance à la compression :	53
3.1-	Effet des méthodes des cures (mode de conservation) sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères sans caoutchouc :	53
3.2-	Effet de l'incorporation du granulat en caoutchouc sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères :	54
3.3-	Effet du traitement du granulat en caoutchouc par NaOH sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères :	57
4-	L'absorption par immersion totale :	58
5-	Conclusion :	60
Conclusion générale	61
Références bibliographiques.....	63

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1- 1: L'émission de CO ₂ résultat des usines de production. (Costello, Abbas et al. 2009).....	6
Figure 1- 2: Pourcentage d'émission de CO ₂ dans le monde pour les différents secteurs (A) et par pays (B).(Union 2014).....	7
Figure 1- 3: Production de béton géopolymère à l'époque Romaine Antique.....	8
Figure 1- 4: Processus de géo-polymérisation (Chandrakanth and Koniki 2020).....	10
Figure 1- 5: Surface spécifique et granulométrie de différents précurseurs. (Sobolev and Gutiérrez 2005).....	10
Figure 1- 6: Transformation de cendres volantes dans le béton géopolymère.(Adams 2017)	12
Figure 1- 7: Production artificielle de cendres de fumée de silice.(Naik 2008).....	13
Figure 1- 8: Sources de laitier de haut fourneau.(Spanlang, Wukovits et al. 2016).....	14

Chapitre II

Figure 2- 1: déchets pneumatiques.	22
Figure 2- 2: Formes de déchets pneumatiques. a) déchet de pneu à l'état brut, b) particules de caoutchouc seul, c) textile + caoutchouc + fibres d'acier d) fibres d'acier e) fibres d'acier + caoutchouc, e, f) fibres d'acier + caoutchouc.	24
Figure 2- 3: Effet du caoutchouc sur la densité.	25
Figure 2- 4: Variation de l'affaissement du béton en fonction de contenu en caoutchouc.(Güneyisi 2004).	26
Figure 2- 5: Variation de la maniabilité du béton en fonction de la teneur en caoutchouc d'après (Jingfu 2008).	27
Figure 2- 6: Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression.(Bensaci Hamza 2014)	29
Figure 2- 7 : Surface de fracture de l'éprouvette ; dans le cas du caoutchouc à l'état brut (gauche), et dans le cas du traitement du caoutchouc dans la solution de NaOH (droite), d'après (Segre 2000).	30

Chapitre III

Figure 3- 1 : Silicate de sodium (Na ₂ SiO ₃) sous forme liquide.....	33
Figure 3- 2: Agitateur magnétique chauffant.	33
Figure 3- 3: Vue macroscopique du sable roulé.....	34
Figure 3- 4: Opération de quartage.....	34
Figure 3- 5: Granularité du sable étudié (fraction supérieure à 80 µm).....	36
Figure 3- 6: Méthode de mesurer la masse volumique absolue.	37
Figure 3- 7: Méthode de mesurer la masse volumique apparente.	38
Figure 3- 8: Granulat caoutchouc utilisé.	40
Figure 3- 9: analyse granulométrique du granulat en caoutchouc utilisé.	41
Figure 3- 10: méthode de traitement de granulat en caoutchouc par NaOH.	41

Figure 3- 11: Mortier géopolymère	42
Figure 3- 12: Méthode de formulation des mortiers géopolymères.	43
Figure 3- 13: Le premier mode de conservation.	44
Figure 3- 14: Le deuxième mode de conservation	44
Figure 3- 15 : table à choc pour l'essai d'étalement.....	45
Figure 3- 16: Presse utilisée pour des essais mécaniques.....	46

Chapitre VI

Figure 4- 1: Effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc sur l'étalement des mélanges géopolymères.....	50
Figure 4- 2: Effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc sur la masse volumique à l'état frais des mélanges géopolymères.	51
Figure 4- 3: Effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc sur la masse volumique à l'état durci des mélanges géopolymères conservés à l'air libre.	52
Figure 4- 4: Effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc sur la masse volumique à l'état durci des mélanges géopolymères conservés à la chambre humide (H=90%).....	52
Figure 4- 5: Machine de compression utilisée et mode de rupture.....	53
Figure 4- 6: Effet de mode de conservation sur la résistance en compression des mortiers géopolymères témoins.	54
Figure 4- 7 : Effet de l'incorporation de GC sur la résistance en compression du mortier géopolymère préservé à l'air libre 22°C.....	55
Figure 4- 8: Effet de l'incorporation de GC sur la résistance en compression du mortier géopolymère conservé à la chambre humide (H=90%).....	55
Figure 4- 9: Rupture interfaciale entre les particules de caoutchouc et le liant.	56
Figure 4- 10 : Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression du mortier géopolymère préservé à l'air libre 22°C.....	57
Figure 4- 11: Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression mortier géopolymère conservé à la chambre humide (H=90%).....	58
Figure 4- 12 : Effet de la teneur en caoutchouc sur le taux d'absorption totale.....	59

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1- 1 : Volumes de béton et émissions cibles de CO ₂ . (Castel 2016).....	8
--	---

Chapitre II

Tableau 2- 1: Situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés. (Abraham, Cherian et al. 2011)	22
Tableau 2- 2: Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie. (Bensaci Hamza 2014)	23
Tableau 2- 3: Chutes de résistance en compression obtenues par (Topçu 1995).....	28

Chapitre III

Tableau 3- 1: Analyse chimique élémentaire (% massique) du laitier par fluorescence X. [96]	32
Tableau 3- 2: les propriétés physiques du laitier	32
Tableau 3- 3: les compositions chimiques de silicate de sodium	33
Tableau 3- 4: Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.	35
Tableau 3- 5: La masse volumique absolue et apparente du sable utilisé.	38
Tableau 3- 6: Coefficient d'absorption d'eau et la porosité du sable utilisé.	39
Tableau 3- 7: Résultats d'analyse granulométrique du granulat en caoutchouc utilisé.	40
Tableau 3- 8: Formulation des mélanges étudiés en (kg/m ³) avec E/L = 0.6 et P/S = 0.4.	42

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, la recherche scientifique dans le domaine des nouveaux matériaux de construction se dirige vers le développement des nouveaux matériaux économiques et écologiques, avec l'utilisation de la matière première locale et les sous-produits industriels, dont l'objectif est la réduction des matériaux polluants. Les matériaux cimentaires sont largement utilisés dans la société moderne. Les demandes de ciment sont variées en raison de la flexibilité de mise en œuvre, sur site ou en préfabrication, le tout à température ambiante. Grâce à ces propriétés, le ciment Portland est devenu l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde.

Les géopolymères sont souvent considérés comme une alternative possible au ciment Portland. Ce sont des liants décrits comme des ciments aluminosilicates alcalins. Ils sont généralement produits à partir d'argiles et/ou de déchets industriels comme les cendres volantes qui sont activées par une solution alcaline d'hydroxyde de métal contenant généralement des quantités variables de silicium dissous. Les géopolymères ont une vaste gamme d'applications en raison de leurs propriétés telles que leur résistance au feu et aux températures élevées et aux attaques acides.

Le fait de pouvoir utiliser des déchets industriels comme liants permet une réduction significative des émissions de CO₂ par rapport à une tonne de ciment Portland. Bien entendu la production de la solution (activateur) produit encore beaucoup de CO₂. Toutefois, par tonne de ciment géopolymère, une réduction par 10 du CO₂ produit est possible ce qui présente un avantage pour l'environnement. Le CO₂ est un des principaux responsables du réchauffement climatique, phénomène qu'il est urgent d'enrayer.

L'incorporation des différents déchets industriels dans les bétons et mortiers constitue, en effet, un défi technologique majeur. Plusieurs matériaux ont été employés comme granulats dans les bétons tels que : les fibres de verre, les fibres métalliques, les déchets plastiques, les déchets de caoutchouc, etc. Ces déchets sont ajoutés généralement au béton par substitution partielle des granulats naturels.

Sur le plan économique, l'utilisation des granulats en caoutchouc dans le béton réduit le coût du produit final et également crée des sources supplémentaires pour répondre aux besoins croissants de ces matériaux dans les routes et bâtiments. Sur le plan environnemental, le recyclage des déchets de caoutchouc peut contribuer à la protection de l'environnement et

Introduction générale

les ressources naturelles. Sur le plan technique, l'incorporation des particules en caoutchouc apporte au béton une capacité plus grande à se déformer avant la rupture et empêche même le développement des fissures. Devant cette problématique, le premier objectif de cette étude expérimentale se dirige vers le développement d'une procédure de fabrication de mortier géopolymère à partir des matériaux locaux largement disponible en Algérie. L'étude consiste aussi à la contribution à la recherche de nouvelles applications permettant d'absorber les quantités des déchets de caoutchouc. Il vise à analyser les potentialités d'utiliser le caoutchouc sous forme de granulats, dans les mélanges de mortier géopolymère. Le caoutchouc a été ajouté aux mélanges en remplacement partiel du volume total des graviers : 10, 20 et 30%.

Ce travail est élaboré dans le cadre du mémoire de fin d'étude au sein du centre universitaire de Bordj Bou Arréridj (EL BACHIR EL IBRAHIMI). Notre mémoire est composé en quatre chapitres, après une introduction générale qui définit la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés, le premier chapitre comporte une revue de la documentation qui porte sur les travaux antérieurs concernant les matériaux géopolymères et leurs compositions chimiques. Les principales connaissances acquises sur l'effet de l'utilisation du caoutchouc sur les propriétés du béton, ont fait l'objet du deuxième chapitre. Dans le chapitre suivant, nous définissons nos objectifs et précisons notre démarche expérimentale. Nous présentons également le détail des méthodes expérimentales et les études préliminaires permettant de justifier le choix des matériaux et des protocoles d'essais. Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats de caractérisation du mortier géopolymère en présence de granulats en caoutchouc.

En dernier lieu, une conclusion générale est donnée résumant le travail expérimental de cette mémoire et proposant des perspectives à étudier dans l'avenir.

Chapitre I

*Recherche bibliographique sur les
matériaux géopolymères*

1- Introduction :

Les matériaux à base de géopolymère sont attractifs, car ils peuvent obtenir d'excellentes propriétés mécaniques par rapport au béton ordinaire. À titre exemple, les bétons géopolymères sont caractérisés par une résistance élevée au jeune âge, une résistance au gel-dégel, un faible taux de diffusion des chlorures avec une résistance à l'abrasion, aussi la stabilité thermique et une résistance au feu. Les calciums sont plus résistants aux acides même si les granulats naturels sont remplacés par des granulats artificiels durables fabriqués à partir de déchets industriels. En revanche, les émissions de CO₂ dans l'industrie du béton sont principalement liées à l'utilisation de ciment Portland ordinaire comme liant (Palomo 1999), ces émissions contribuent aux réchauffements climatiques et la pollution de l'environnement.

2- Définition et historique de géopolymère :

Les géopolymères sont des matériaux provenant à la famille des matériaux activés par les alcalis, contrairement aux matériaux cimentaires qui nécessitent des alcalis pour leurs durcissements. Le terme « géopolymère » a été mis en place dans les années 1970 par le professeur français Joseph Davidovits (Davidovits 1976). Il fabrique des matériaux polymères inorganiques en utilisant une solution alcaline et une source d'aluminosilicate. (Davidovits 1999)

Selon Davidovits, la polymérisation peut s'effectuer à des températures ambiantes 20°C ou élevées 120°C.(Davidovits and Orlinski 1988) Cette géosynthèse produit des matériaux ayant des propriétés pour une partie similaire aux plastiques (modulables, plus ou moins extradables), mais sans utilisation solvant dangereux, naturellement incombustible, très résistant au feu et ne dégageant pas des gaz fumés toxiques. Comme des roches, ils résistent aux agressions chimiques, à l'érosion du temps et permettent une production non polluante. Comme les polymères organiques, ils peuvent être renforcés, par exemple par des fibres de carbone. Les matières premières utilisées sont principalement des minéraux d'origine géologique, d'où le nom géopolymère. Les géopolymères ont présenté des bonnes résistances mécaniques, une meilleure résistance au feu et une durable acceptable vis-à-vis des milieux acides. On peut les utilisés par exemple, la construction, comme un élément pour l'isolation thermique. Récemment, les bétons géopolymères sont utilisés dans la fabrication des éléments en **3D** (béton imprimé).

En revanche, la production de ciment Portland dans le monde augmente environ 9 % par ans (figure 1-1). Ce taux d'augmentation représente un grand danger pour l'environnement en raison du volume important de CO₂ rejeté dans l'atmosphère lors de la production de ciment (Madheswaran, Gnanasundar et al. 2013).



Figure 1- 1: L'émission de CO₂ résultat des usines de production. (Costello, Abbas et al. 2009)

De plus, les émissions annuelles de gaz à l'effet de serre résultant de la production de ciment sont d'environ 1,5 milliard de tonnes, soit une moyenne de 6 % des émissions totales, provenant de plusieurs secteurs à travers le monde (Figure 1-2)(Dhakal 2009, Madheswaran, Gnanasundar et al. 2013, Shin, Goh et al. 2019).

Le réchauffement climatique dû à l'effet de serre ne fait scientifiquement plus aucun doute. Il est prévu pour la fin du siècle une augmentation moyenne de la température entre 1,4 et 5,8 8C (Lee 2007). Les causes du réchauffement climatique ne peuvent plus être discutées (Jouzel and Debroise 2004, Kerr 2006). L'alarme est ancienne et date peut-être de 1988 (Patz, Epstein et al. 1996, Jouzel and Debroise 2004, Besancenot 2007). L'origine anthropogénique du réchauffement climatique est un fait scientifique attesté par de nombreuses projections (Patz, Epstein et al. 1996, Martens 1998), et le fait que le réchauffement climatique devienne progressivement un enjeu politique n'enlève rien à sa réalité (Hansen, Sato et al. 2006, Lee

2007). Cette problématique a ainsi été priorisée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Un site a été ouvert par Nature Report sur le sujet (Hulme 2007).

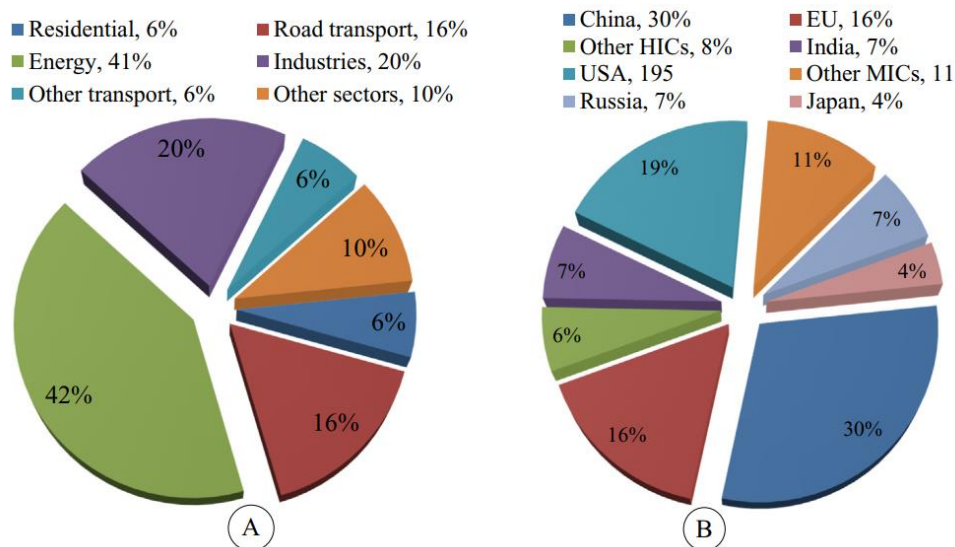


Figure 1- 2: Pourcentage d'émission de CO₂ dans le monde pour les différents secteurs (A) et par pays (B).(Union 2014)

Il est en tous cas fort probable que le changement climatique est la plus grande menace sanitaire mondiale du XXI Siècle, avant la pandémie de SARS-CoV-2 (Costello, Abbas et al. 2009). Il se manifeste par l'augmentation de la température moyenne externe entre 1,4 et 5,8 °C. Il est dû aussi à l'élévation du rayonnement ultraviolet (Swynghedauw and Weméau 2021). Cette surélévation de la température a favorisé un allongement des périodes chaudes avec une modification du régime des précipitations, pluies diluviennes ou sécheresses persistantes. En ce qui concerne le secteur de génie civil, le volume de CO₂ émis lors de la fabrication des différents éléments en béton est résumé dans le tableau 1-1 (Castel 2016). Cela nécessite une adaptation de la population par des mesures préventives de type comportemental et médical, qui nécessitent des prévisions détaillées pour les travaux de construction à venir.

En revanche, le développement économique nécessite une application très efficace des ressources renouvelables et non renouvelables (Shalini, Gurunarayanan et al. 2016). En effet, le développement durable d'un matériau innovant économique et respecte l'environnement pour remplacer le béton ordinaire est devenu plus important afin de permettre le monde

continu de faire face à une grave détérioration de l'environnement (Han, Yu et al. 2014, Shalini, Gurunarayanan et al. 2016).

Tableau 1- 1 : Volumes de béton et émissions cibles de CO₂. (Castel 2016)

Résistance (MPa)	Elément de structure	Quantité (m ³)	Facteur d'émission (t CO ₂ ^e /m ³)	Émission t CO ₂ ^e
15	Béton de propreté	589	0.20	119
32	Semelles	486	0.24	119
32	Dalles	1948	0.27	533
40	Poteau et murs	235	0.27	63
40	Murs préfabriqués	1076	0.33	351-1185

De plus, pour protéger notre environnement contre le réchauffement climatique et l'augmentation des concentrations en CO₂, le béton géopolymère est un alternatif adéquat au béton ordinaire. Ce matériau a été utilisé dans le passé au cours de l'ancien Empire romain (Figure 1-3). Les Romains étaient connus pour leurs structures monumentales historiques, en particulier leur utilisation pionnière du calcaire avant l'avènement du ciment (Davidovits 2015).

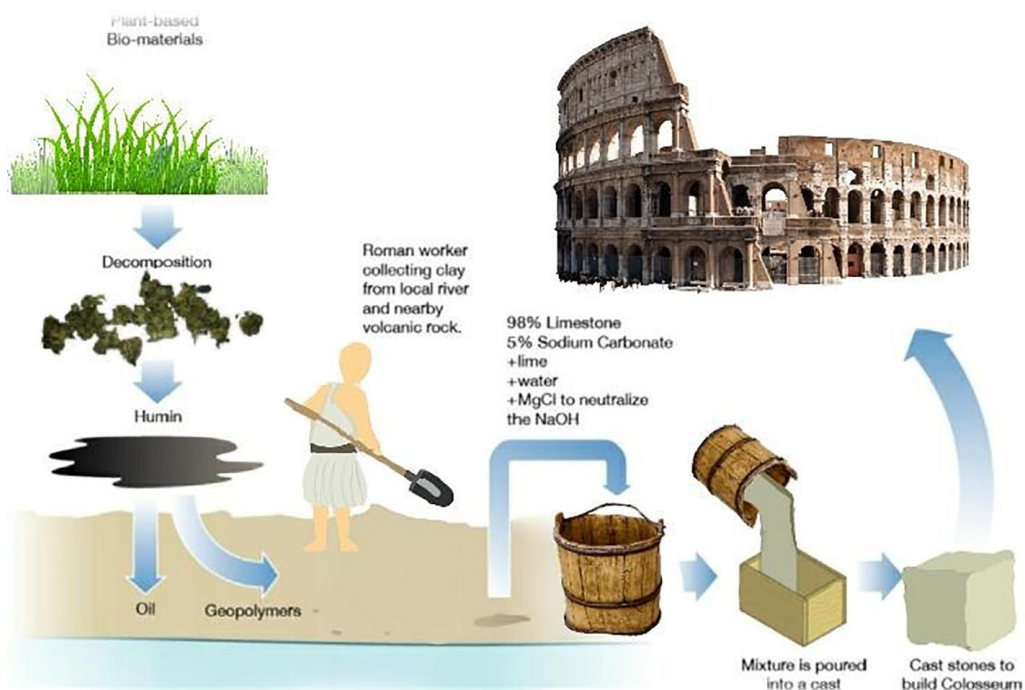


Figure 1- 3: Production de béton géopolymère à l'époque Romaine Antique.

Les géopolymères sont principalement produits en brûlant des matériaux de bassin versant, une technique développée par David Easton en 2011, pour produire une maçonnerie durable avec moins de ciment en utilisant des matériaux recyclés (cendres de carburant d'huile de palme, boue rouge, fumée de silice, cendres de riz et cendres volantes).

Les géopolymères sont principalement produits par brûlant des matériaux et en les versant dans un bassin, une technique développée par *David Easton en 2011*, pour produire un élément de maçonnerie durable avec moins de ciment. Il a utilisé des matériaux recyclés (cendres de carburant d'huile de palme, boue rouge, fumée de silice, riz cendres de cosse et cendres volantes). Ces matériaux sont connus pour améliorer la durabilité des structures qui basent sur des éléments de maçonnerie en béton.

3- Les matériaux de bases de géopolymère :

Généralement, le ciment Portland n'est pas nécessaire dans le processus de production de bétons géopolymères. Les deux principaux constituants du béton géopolymère sont :

- ❖ Des solutions alcalines telles que le silicate de sodium (Na_2SiO_3), l'hydroxyde de sodium (NaOH), le silicate de potassium (K_2SiO_3) et l'hydroxyde de potassium (KOH) ;
- ❖ Des sources d'aluminosilicate de sous-produits tels que comme la boue rouge, cendre de balle de riz, laitiers de haut-fourneau broyés, cendres volantes, fumée de silice, et granulats fins et grossiers.

3.1- Source de sous-produits (aluminosilicate ou précurseurs) :

Quand Davidovits a, pour la première fois, parlé de « géopolymère », le processus concerné était celui de l'activation du métakaolin par un hydroxyde alcalin et/ou silicate alcalin [5], [7], [36]. Ce processus a été étendu ensuite pour couvrir des matériaux produits à partir d'autres aluminosilicates comme les cendres volantes.

Le géopolymère au métakaolin demeure en effet, jusqu'à aujourd'hui, un système modèle, permettant de comprendre les mécanismes de formation de ces matériaux, et de les transposer ensuite vers des aluminosilicates plus complexes.

Les précurseurs d'aluminosilicate sont des composants critiques pour la fabrication des matériaux géopolymères.

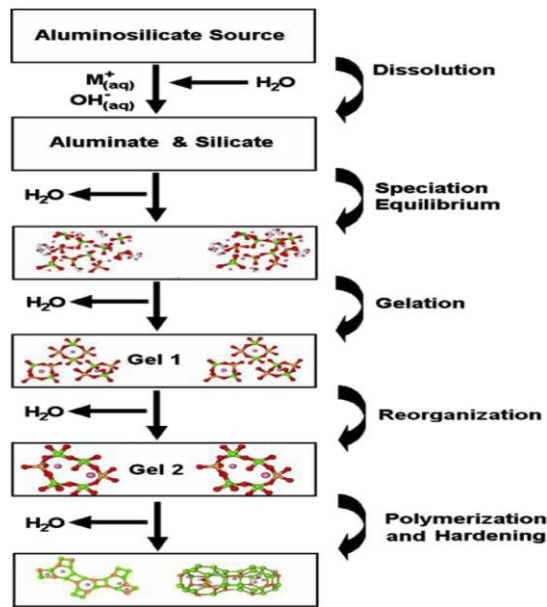


Figure 1- 4: Processus de géo-polymérisation (Chandranth and Koniki 2020).

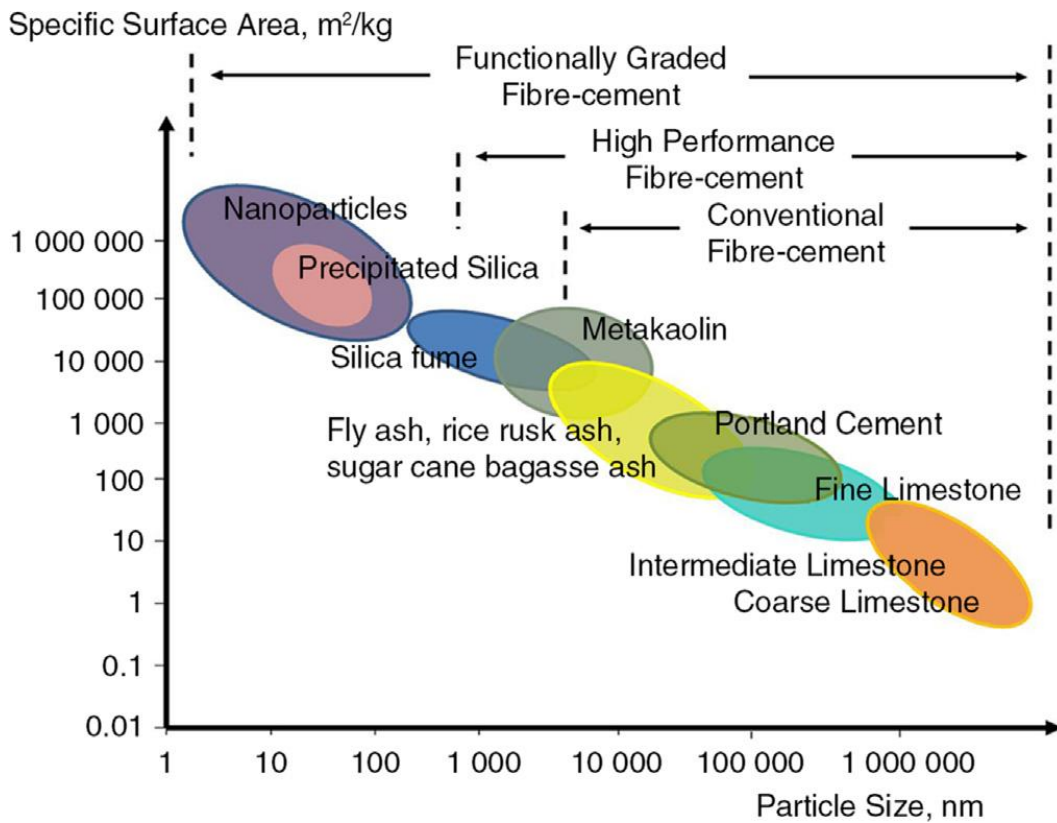


Figure 1- 5: Surface spécifique et granulométrie de différents précurseurs. (Sobolev and Gutiérrez 2005)

Les aluminosilicates ne réagissent pas avec l'eau ou les créent trop lentement. Cependant, quand ces matériaux ont une forte teneur en forme cristalline amorphe et lorsqu'ils sont placés dans un milieu alcalin, ils vont s'hydrolyser et se condenser formant de nouveaux polymères inorganiques qui peuvent développer une capacité de changement. Aussi, la composition chimique des précurseurs joue un rôle important dans la géo-polymérisation. Les précurseurs utilisés dans les géopolymères sont généralement constitués d'une grande quantité de silicate et d'aluminate qui se dissout en présence d'un milieu alcalin ou acide pour former un gel qui durcit. Ainsi, la taille des particules des précurseurs est également importante, car cela affecterait la vitesse de dissolution des précurseurs (c'est-à-dire le silicate et l'aluminate).

Dans le ciment, ces matériaux exploitent l'alcalinité naturelle du système et réserve de portlandite pour réaliser ces réactions. Sans ciment Portland, les aluminosilicates peuvent être activés en ajoutant des bases fortes. La majorité de ces précurseurs sont des déchets générés par diverses méthodes. Une brève discussion sur certains des principaux précurseurs utilisés dans la production de bétons géopolymères est la suivante :

3.1.1-Les cendres volantes :

Les géopolymères peuvent être produits en utilisant des cendres volantes à faible teneur en calcium qui sont obtenues en tant que déchets du charbon dans les centrales thermiques pour la production de l'électriques (Adam 2009, Talakokula and Bhalla 2016). À la suite de cette combustion, les gouttelettes d'aluminosilicates fondues refroidissent rapidement et forment des phases amorphes ou, si le refroidissement n'est pas rapide, semi-cristallines, et notamment de la mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$) (Davidovits 1999, Liu, Alengaram et al. 2016). La cendre volante est habituellement appliquée comme substitution partielle du ciment Portland dans la production de béton ordinaire (Mohammed, Johari et al. 2014, Liu, Alengaram et al. 2016). En effet, la valorisation de ces cendres dans le domaine du béton et de la restauration des mines est due à leurs réactions pouzzolanique qui se traduisent par l'amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité (Anuradha, Thirumala et al. 2014, Zeyad, Johari et al. 2016, Tayeh, Ibrahim et al. 2020).

Ce matériau peut également avoir un effet positif sur l'environnement en raison de la conservation des espaces de décharge, la réduction de la consommation d'eau et d'énergie et de la minimisation des émissions de gaz à effet de serre. (Talakokula and Bhalla 2016) Dans

ce cas, la cendre volante peut réduire la production du ciment Portland qui émet environ 1 tonne de dioxyde de carbone pour chaque tonne de ciment fabriquée ; en revanche, pour chaque tonne de cendre volante utilisée, les émissions de CO₂ sont réduites d'une tonne. (Zhuang, Chen et al. 2016) Par exemple, la quantité utilisée de cendre volante dans la fabrication du béton pendant une année permet d'éliminer 25 % du CO₂ émis par les véhicules dans le monde (Poudenx 2008).

La production des cendres volantes est devenue importante en raison de son rôle efficace dans l'utilisation économique et vers des technologies écologiques (protection de l'environnement) (figure 1-6).

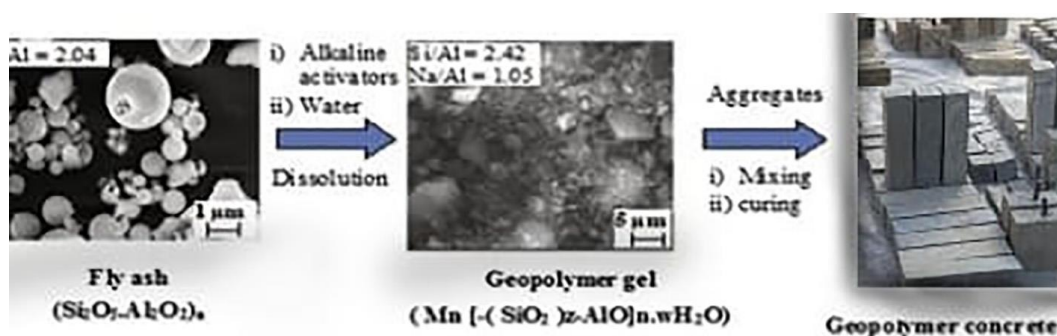


Figure 1- 6: Transformation de cendres volantes dans le béton géopolymère.(Adams 2017)

Ce matériau peut être également utilisé dans le traitement du sol (Ukwattage, Ranjith et al. 2013), l'élimination des déchets (comme absorbant à faible coût) (Yao, Wang et al. 2010). Récemment, la cendre volante est adaptée comme matériau alternatif pour la production des bétons géopolymères, un nouveau liant similaire au ciment hydraté en termes de réactivité avec les activateurs. (Martire, Mirabella et al. 2018)

3.1.2- La fumée de silice :

Similaire aux cendres volantes, la fumée de silice a également été largement utilisée comme remplacement partiel du ciment Portland dans le béton (Anuradha, Thirumala et al. 2014, Saraya 2014). La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un rapport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C (voir la figure 1-7).

Amran et al. (Amran, Alyousef et al. 2020) ont montré que la silice dans la pouzzolane très réactive avec la portlandite à long terme de l'hydratation de ciment portland, cela contribue à son amélioration de la résistance (Singh, Ishwarya et al. 2015). Il a également été rapporté que la réaction de fumée de silice entraîne la génération d'un liant qui remplit les pores dans les matériaux en béton et par conséquent améliorer leurs propriétés physiques, de résistance et de durabilité (Tawfik, AlSaffar et al. 2021). De plus, le géopolymère à base de fumée de silice est adapté pour les applications nécessitant des valeurs de résistance à la compression plus élevées. Par conséquent, le béton géopolymère à base de fumée de silice peut être utilisé comme un choix favorable pour la production de béton à haute résistance au béton à ultra haute performance avec moindres impacts environnementaux (Bajpai, Choudhary et al. 2020). Enfin, l'utilisation de ce produit industriel dans le béton géopolymère est une étape noble vers la création d'un écomatériau pour la production du béton sans ciment.

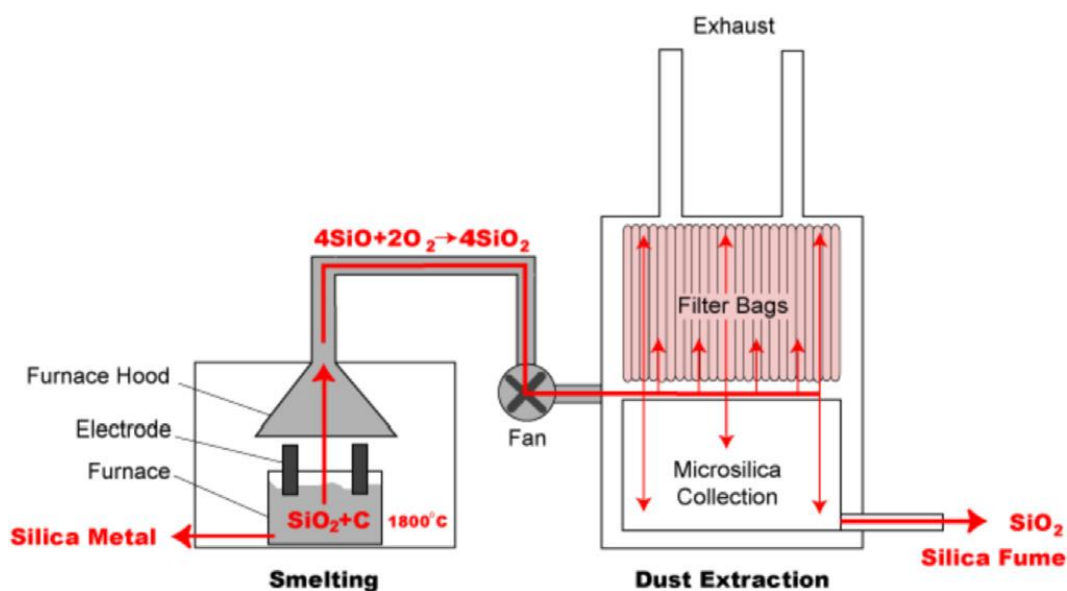


Figure 1- 7: Production artificielle de cendres de fumée de silice.(Naik 2008)

Le métakaolin :

Le métakaolin est l'un des matériaux le plus largement utilisé dans la fabrication du béton géopolymère grâce à sa composition chimique riche en aluminosilicate. Ce matériau est le produit de la calcination de la kaolinite, une argile naturelle, à une température autour de 700°C (Davidovits 1999). Cependant, le cycle thermique de la calcination devrait assurer la transformation optimale de kaolinite en phase amorphe et très réactive en milieux basiques.(Mehsas, Siline et al. 2021) La procédure de fabrication classique en usine du

métakaolin passe par un broyage du kaolin, une calcination en four rotatif pendant quelques heures, avant une dernière étape de broyage du produit calciné.

3.1.4-Le laitier de haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit du traitement du minerai de fer pour l'obtention de la fonte (Castel and Foster 2015). Ce matériau peut être obtenu à des températures de 1500°C (figure 1-8)(Spanlang, Wukovits et al. 2016).

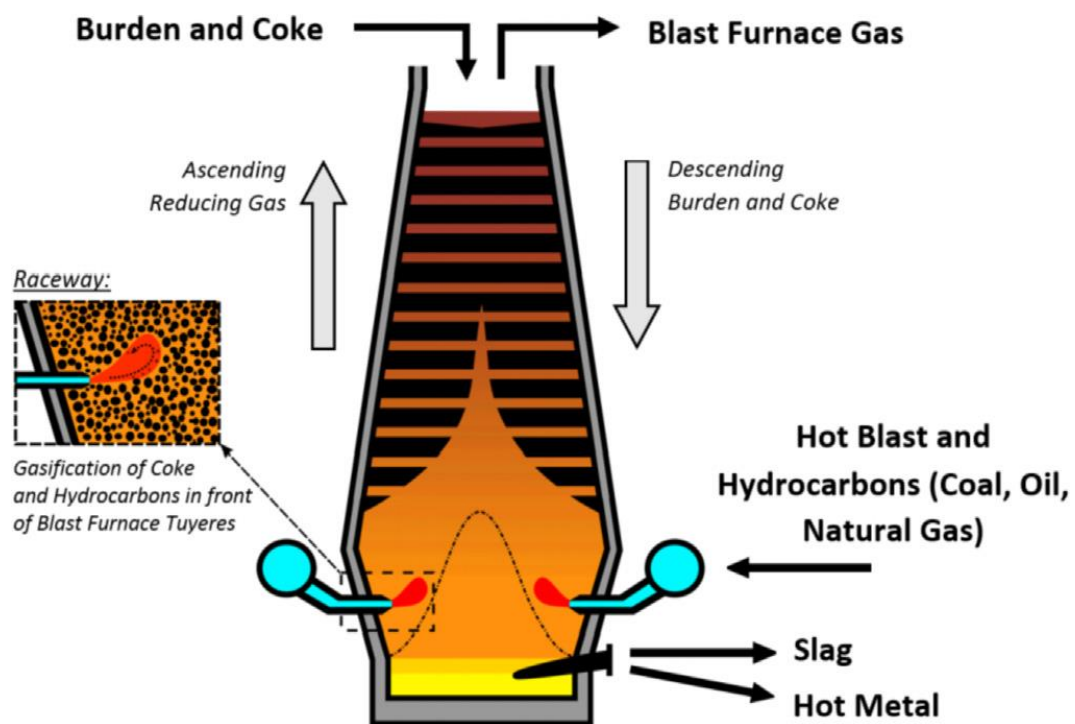


Figure 1- 8: Sources de laitier de haut fourneau.(Spanlang, Wukovits et al. 2016)

Le laitier de haut fourneau a une teneur d'environ 40% d'oxyde de calcium (CaO) et 30-40% de dioxyde de silicium (SiO₂), ce qui est proche de la composition chimique du ciment portland.(Sahithi and Priyanka 2015) À l'issue d'un refroidissement rapide, le matériau aluminosilicate formé, très riche en calcium, présente des phases peu cristallisées sous une forme de verre dépolymérisé. Le laitier de haut fourneau est le précurseur de référence pour l'activation alcaline dans des systèmes riches en calcium. Cependant, ce matériau est en forte demande pour l'utilisation dans les ciments recomposés, où le taux de substitution du ciment Portland peut atteindre jusqu'à 95%. De plus, dans la production de béton géopolymère, l'aluminium et le silicium présents dans le laitier sont activés par un mélange de solutions de

silicate de sodium et d'hydroxyde de sodium pour produire la pâte de géopolymère qui lie les agrégats (Islam, Alengaram et al. 2014). En effet, l'accroissement d'ajout de poudre de laitier peut augmenter la vitesse d'hydratation des bétons géopolymères et d'améliorer leurs résistances et la durabilité vis-à-vis les milieux acides (Sangeetha 2015).

3.1.5-La cendre de balle de riz :

La balle de riz est un sous-produit dérivé de la transformation du riz. Elle est constituée de l'ensemble des bractées ou glumelles qui renferment le grain. Après avoir protégé la graine pendant sa croissance, la balle peut être utilisée comme matériau de construction (isolation), engrais ou carburant. La teneur en silice cristalline de balle de riz a posé plusieurs menaces pour la santé et la sécurité en raison de la possibilité d'inspirer ce minéral (Sanjayan, Nazari et al. 2015). Récemment, Rahim et al. (Faried, Mostafa et al. 2021) ont déclaré que " ce déchet représente environ 25 % en poids de balle lorsqu'il est brûlé dans des chaudières". La cendre de balle de riz est une super-pouzzolane brillante qui peut être appliquée pour moissonner des mélanges de béton exceptionnel (Saravanan and Sivaraja 2017). Ce matériau peut être utilisé comme substituons de ciment portland dans la production de béton (Faried, Mostafa et al. 2021, Tayeh, Alyousef et al. 2021). En raison de la présence d'alumine et de silice dans les cendres de balle de riz, ils peuvent également être utilisés comme précurseurs dans la production de géopolymères.

3.1.6-La boue rouge :

La boue rouge est une branche du procédé de Bayer utilisée pour recycler la bauxite vers l'alumine avec une capacité de 55 à 65 % de la bauxite recyclée (He, Jie et al. 2013). Ces résidus vont être lavés plusieurs fois en passant dans des clarificateurs où circule un courant d'eau qui passe à contre-courant. En revanche, La production d'une tonne d'alumine génère deux tonnes de boue rouge toxique, stockées faute de pouvoir être traitées (Si, Ma et al. 2013). Leurs compositions chimiques sont principalement 30 à 60 % d'oxydes de fer, ce qui explique sa couleur rouge, ce matériau est caractérisé par une alcalinité élevée avec des valeurs de pH allant de 10 à 13 (Ye, Yang et al. 2016). Actuellement, environ 2 à 3 Mt de boue rouge sont appliquées chaque année dans la fabrication du ciment Portland. Comme mentionné précédemment, les composants solides de ce matériau sont généralement composés

d'oxydes de fer, d'alumine et de métaux lourds toxiques (Paramguru, Rath et al. 2004). De plus, ce matériau pourrait être radioactif si la bauxite d'origine contient des matières premières radioactives (Kumar and Kumar 2013). Avec l'alcalinité élevée des boues rouges, leur élimination économique est un problème environnemental majeur (Tayeh, AlSaffar et al. 2019). Cependant, l'utilisation de ce matériau dans les bétons géopolymères ouvre une voie durable et économique pour gérer ces déchets dangereux.

3.1.7-La poudre de verre :

Un autre matériau qui peut être utilisé comme précurseur dans la production de géopolymères est la poudre de verre. La poudre de verre est traitée à partir de déchets de verre, ce qui en fait une utilisation dans les géopolymères et un moyen efficace et actif de gérer les déchets (Tayeh 2018, Tayeh, Haido et al. 2021). Azevedo et al. ont utilisé la poudre de verre activée obtenue comme déchet du polissage du verre dans la production de tuiles durables. D'autres études ont également montré que la poudre de verre pouvait être utilisée avec d'autres précurseurs dans la production de géopolymères (Hamada, Tayeh et al. 2020, Hamada, Thomas et al. 2020).

3.1.8-Le CKD

Le processus de production du ciment nécessite de l'énergie thermique pour la production de clinker. En revanche, environ 2,8 tonnes de matières premières en moyenne. Chaque tonne de ciment libère 0,9 à 1,1 tonne de dioxyde de carbone (CO₂), un gaz à effet de serre important dans l'atmosphère, ce qui a un effet négatif sur le climat de la terre (Dhakal 2009). D'autre part, d'importantes quantités de poussières de four à ciment (CKD) sont générées lors de la production de clinker à haute température. Le CKD est un sous-produit à grains fins, solide et hautement alcalin. Une cimenterie de taille moyenne peut produire jusqu'à 30 000 tonnes de CKD par année. Une grande partie du CKD générée est éliminée sur place, sans réutilisation ni valorisation supplémentaire, ce qui pose des problèmes environnementaux importants (Konsta-Gdoutos and Shah 2003). L'élimination des CKD entraîne la consommation de terres, la contamination des eaux de surface et souterraines. De plus, les CKD affectent la santé humaine en causant de graves risques pour la santé (Fadhil, Jasim et al. 2013).

Le recyclage des déchets dans le domaine de la construction devient de plus en plus important pour la construction durable, car il pourrait entraîner plusieurs avantages économiques et environnementaux. Selon cette nouvelle vision, le recyclage des déchets et des sous-produits pour remplacer partiellement le ciment est fortement encouragé pour limiter l'impact environnemental de l'industrie du ciment et transformer ces déchets en produits utiles pour la construction durable. L'utilisation de CKD en tant qu'addition au ciment Portland a été évaluée par un certain nombre de chercheurs.

3.2-Les activateurs utilisés lors de formulation des bétons géopolymères :

Afin de formuler un béton géopolymère, la présence d'un système de liquide alcalin est obligatoire pour que la réaction de géopolymérisation se produise des hydrates stables à faible solubilité et la formation d'une structure compacte avec ces hydrates. La solution d'activateur est constituée généralement par deux substances essentielles, à savoir le silicate de sodium/potassium avec l'hydroxyde de sodium

Le système liquide d'alcalin utilisé dans la formulation du mortier géopolymère est une solution d'activateur alcalin tels que Na_2CO_3 , NaOH , Na_2SO_4 et $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SnSi}_2$. Ces activateurs alcalins peuvent être appliqués à l'état solide ou liquide. Cependant, le rapport liant-alcali joue un rôle important dans le renforcement de la résistance du béton géopolymère à température ambiante et au four (Sanni and Khadiranaikar 2013, Chandrakanth and Koniki 2020). La solution alcaline joue un rôle essentiel dans la géopolymérisation, un mélange d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH) et de silicate de sodium (Na_2SiO_3) ou de silicate de potassium (K_2SiO_3) est la solution alcaline la plus couramment utilisée dans géopolymérisation. Contrairement à d'autres hydroxydes alcalins, la solution de NaOH est l'activateur d'hydroxyde le plus populaire pour la géopolymérisation car c'est le moins cher et le plus facilement disponible (Nguyen 2017).

4- Conclusion :

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives au matériau géopolymère. Dans ce chapitre, les différents matériaux, aussi bien les réactifs que les produits, ont été caractérisés au plan physico-chimique. À partir de ce chapitre, on a pu savoir plus évidemment le mortier géopolymère, les sources des

aluminosilicates (précurseurs) et les types d'activateur utilisé dans la formulation des mortiers géopolymères.

Chapitre II

*Généralité sur les déchets de
caoutchouc*

1- Introduction :

Les déchets de caoutchouc ont été utilisés avec succès dans plusieurs applications dans le domaine de génie civil sous forme de granulats, soient dans les bétons ou mortiers, en géotechnique pour les remblais légers et également dans les mélanges d'asphaltes. Les études rapportées dans la littérature ont montré que le recyclage des caoutchoucs dans le domaine de génie civil, permet non seulement de réduire le coût, mais également d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton et du sol en bénéficiant de leur déformabilité, étanchéité et de leur capacité d'absorption de chocs.

Dans ce présent chapitre, on a parlé du caoutchouc comme matériau nocif dans l'environnement ainsi que son utilisation dans le domaine de génie civil. On a parlé de sa provenance ainsi que de sa fabrication, on a aussi donné des statistiques de la consommation mondiale de caoutchouc. Finalement, on a détaillé quelque caractéristique de caoutchouc incorporé dans le domaine de construction.

1- Définition et historique de caoutchouc :

Le terme « caoutchouc » vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à l'état naturel se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'hévéa basilien, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre. Soit de façon synthétique à partir de monomères issus d'hydrocarbures fossiles. Il fait partie de la famille des élastomères.

La véritable histoire du caoutchouc commence bien avant la fin du XV siècle, quant à la suite des grandes découvertes, les Européens commencent à observer, en Amérique centrale et en Amérique du Sud, l'usage séculaire que font les populations autochtones d'une matière alors inconnue en Europe. Provenant du latex de différentes plantes - dont l'hévéa et le guayule -, les amérindiens confectionnent des objets courants, fabriqués par moulage sur argile : balles, bottes, toiles enduites, torches, bouteilles, qu'ils rendent étanches en les passant à la fumée. Ils en consomment aussi comme médicament et l'associent aux mythes de création, de la course du monde : La balle en caoutchouc mouvement, avec son rebondissement incessant, mime la course du soleil. La matière caoutchouc devient ainsi sacrée. Les conquistadors, plus intéressés par l'eldorado ramènent quelques échantillons en

Europe, mais ils sont relégués dans les cabinets de curiosité, faute d'applications, car le latex est collant quand il est exposé au soleil, fond par température élevée et devient cassant par température froide, enfin il brunit et durcit à l'air.

2- Mode de fabrication :

Le caoutchouc naturel provient de la coagulation du latex de plusieurs plantes, essentiellement de l'hévéa, *Hevea Brasiliensis*, famille des Euphorbiacées, originaire d'Amazonie. La collecte se fait par incision de l'écorce des troncs de manière que le latex, issu des canaux laticifères, s'écoule dans des godets positionnés juste au-dessous. En Amazonie, c'est le travail des seringueros. Le latex récolté est transféré dans des containers, filtré et peut alors être stabilisé à l'ammoniaque (précipitation des flocons) puis pressé pour diminuer sa teneur en eau ou alors coagulé de façon plus ou moins contrôlée et séché par la fumée d'un feu (les goudrons empêchent la putréfaction) afin d'obtenir des balles de caoutchouc.

La culture de l'hévéa (appelée hévéaculture), quoiqu'originale d'Amérique du Sud, s'est développée dans le Sud-est asiatique et à une moindre échelle, en Afrique équatoriale (Nigeria, Côte d'Ivoire, Cameroun).

3- Production de granulat en caoutchouc :

Pour produire du caoutchouc naturel solide, il existe plusieurs types de procédés basés soit sur la coagulation, soit sur l'évaporation. Ces différents procédés permettent d'obtenir du caoutchouc naturel en feuilles, en blocs ou autres formes solides, de différentes qualités, et qui peuvent servir à la fabrication de différents objets de caoutchouc dont les pneus, les courroies de transmission, les heurtoirs, les bases d'adhésifs, etc. Il existe plus de 200 additifs utilisés dans les matériaux de caoutchouc pour en modifier la texture, l'élasticité, la durabilité, etc. Les principaux sont des accélérateurs de vulcanisation et des stabilisants (antioxydants ou autres). On dénombre aussi des plastifiants, des agents d'expansion, des coagulants, des lubrifiants, des pigments, des fragrances, etc. En revanche, la production mondiale de caoutchouc est supérieure à 21 millions de tonnes (voir le tableau 2-1).

En ce concernant la gestion de ces déchets, cette matière n'est tout simplement pas recyclable. Personne n'a toujours trouvé de façons de le réutiliser en préservant toutes ses qualités. Cependant, il peut servir à fabriquer des produits moins élastiques avec une moindre exigence de pureté comme des revêtements de sol souple et du bitume modifié plus flexible à

froid et plus solide chaud que le bitume normal. Le caoutchouc usagé est aussi utilisé comme combustible dans les cimenteries et certaines centrales thermiques. (Abraham, Cherian et al. 2011)

Tableau 2- 1: Situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés. (Abraham, Cherian et al. 2011)

Type de traitement	USA (%)	U.K (%)	Allemagne (%)	France (%)	Italie (%)	Belgique (%)	Pays-Bas (%)	Japon (%)	Suède (%)
Décharge	58	23	9	45	40	10	-	12	5
Retraitement	19	31	18	20	22	20	60	24	12
Energie	11	27	45	15	23	30	28	39	64
Export	5	3	16	4	2	25	-	6	7
Recyclage	7	16	12	16	12	15	12	19	12

4- Techniques de valorisation des déchets pneumatiques :

Un pneumatique est constitué de caoutchouc (naturel et artificiel), d'adjuvants chimiques et de câbles textiles et métalliques. Il faut distinguer les pneus usagés non récupérables considérés comme des déchets et des pneus usagés réutilisables (figure 2-1). Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour le recyclage des pneus usagés : le rechapage, la transformation en granulats et la combustion.



Figure 2- 1: déchets pneumatiques.

En effet, une grande partie de ces déchets, notamment les pneus en fin de vie, s'accumulent, représentant ainsi une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques importants. Afin de mieux protéger l'environnement et compte tenu de l'évolution de la législation en vigueur, il est nécessaire de trouver une solution pour la gestion de ce type de déchets, notamment dans le domaine des matériaux de construction. Chaque année, plus de

deux millions de pneus arrivent en fin de vie et sont mis au rebut. Les pneus industriels et de transport peuvent être retournés par d'autres moyens sans les laisser dans la nature. Ces déchets doivent être valorisés si le recyclage a un impact moindre sur l'environnement que d'autres modes d'élimination. (De Brito and Saikia 2012)

L'environnement est un enjeu très important et sa préservation est une responsabilité partagée. Le problème des pneus usés n'est pas seulement mondial, mais aussi maghrébin et africain. Dans l'espace méditerranéen, l'Algérie a pris conscience de ce problème et a conduit des stratégies locales ou de coopération internationale contre la pollution. Au niveau réglementaire, plusieurs textes et lois ont été promulgués pour définir, gérer et éliminer les déchets. (Trouzine, Asroun et al. 2011)

Tableau 2- 2: Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie. (Bensaci Hamza 2014)

Types de pneus	Quantités		
	Pneus/an	Tonne/an	Pneu/personne/an
Véhicules légers	1107410	7966.97	-
Poids lourds	332104	17951.53	-
Total	1439514	25918.50	0.0413

Comme ils n'ont aucune propriété dangereuse, les composants du pneu eux-mêmes ne sont pas nocifs. Cependant, ils peuvent présenter des risques pour la santé publique et l'environnement s'ils ne sont pas correctement manipulés et éliminés. Les pneus ne sont pas biodégradables, car le temps de décomposition est illimité. Les pneus usagés sont des déchets encombrants difficiles à compacter, à collecter et à éliminer. S'ils ne sont pas bien gérés, ils dégradent le paysage et peuvent obstruer les canaux de circulation, les ruisseaux et les égouts pluviaux, ce qui peut entraîner des modifications du débit d'eau, qui à leur tour peuvent être des facteurs d'érosion sédimentation et inondation.

5- Les domaines de valorisation des déchets pneumatiques :

Le parcours des pneus usagés est organisé comme suit ; une fois les pneus usés retirés, ils sont stockés dans des garages puis collectés par des collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner des pneus pouvant être réutilisés ou rechapés. Les pneus usés non réutilisables sont stockés entiers, broyés ou broyés pour les livrer aux évaporateurs.

5.1- La valorisation sous forme de matières premières :

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc (voir la figure 2-2). Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.

6-1.1- Poudrettes :

Ce sont des particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2 mm. Son coût d'acquisition dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de matière étrangère. Les miettes sont utilisées comme charges dans des mélanges destinés à la fabrication de pièces qui ne sont pas soumises à de fortes contraintes mécaniques ou dynamiques. Comme exemple d'application, nous avons la fabrication de pneus et de roues pleines, la modification des revêtements routiers (réduction du bruit).

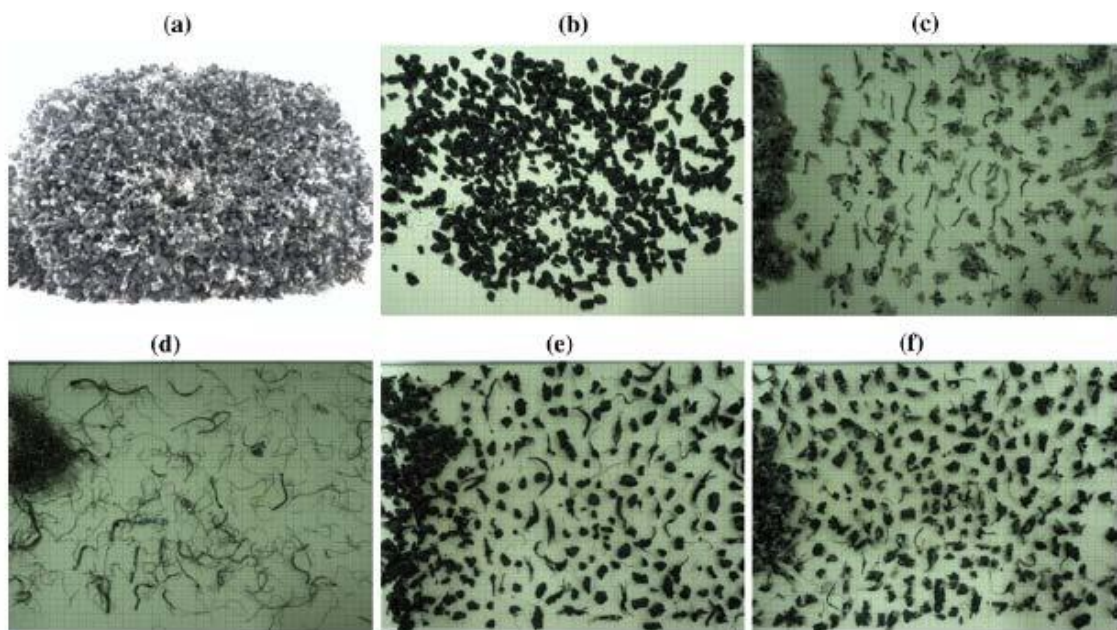


Figure 2- 2: Formes de déchets pneumatiques. a) déchet de pneu à l'état brut, b) particules de caoutchouc seul, c) textile + caoutchouc + fibres d'acier d) fibres d'acier e) fibres d'acier + caoutchouc, e, f) fibres d'acier + caoutchouc.

6-1.2- Granulés :

Ce sont des particules de caoutchouc plus grosses que des miettes. Les granulés peuvent être agglomérés avec des résines, colorées ou non, et, par moulage, permettent une fabrication aisée de feuilles ou de plaques. Comme exemple d'application, nous avons des aires de jeux, des trottoirs antiglisse, des revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, réduction du

bruit, etc.). D'autres types de recyclage sont possibles, par conversion chimique, comme la régénération (par une combinaison de produits chimiques, mécaniques et actions thermiques) ou Pyrolyse - Thermolyse les produits issus de cette décomposition deviennent des fiouls lourds et légers, du charbon, etc. Cependant, le développement industriel de ce type de valorisation est freiné par les coûts de mise en œuvre. (Bensaci Hamza 2014)

7- Le caoutchouc en domaine génie civil :

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique : ductilité, faible conductivité thermique. On peut utiliser ces déchets comme :

- Le tapis de pneus anti-vibration.
- La construction de récifs artificiels.
- Mur antibruit.
- Le pneu sol.

7-1- Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers :

La possibilité de recycler les déchets pneumatiques en béton à faible agrégat a fait l'objet de nombreuses études expérimentales dont le but était que l'incorporation de déchets pneumatiques dans le béton affecte ses propriétés physico-mécaniques aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

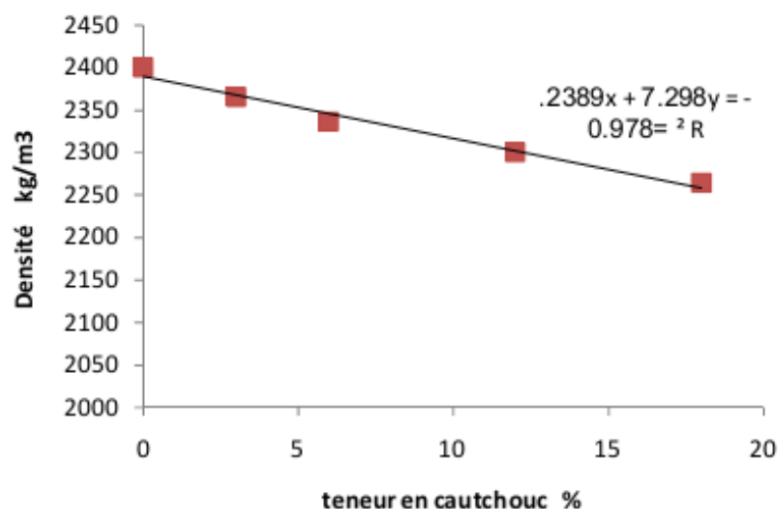


Figure 2- 3: Effet du caoutchouc sur la densité.

7-2- Effet des granulats en caoutchouc sur les propriétés de béton :

7-2.1- A l'état frais :

L'effet de l'ajout de particules de caoutchouc dans une matrice cimentaire sur la consistance du béton a été analysé par plusieurs chercheurs, en effet il a été rapporté dans la littérature que la présence de granulats de caoutchouc dans une matrice cimentaire rend le béton plus léger. Cela est dû à la faible densité du caoutchouc par rapport aux granulats naturels (Bayomy 1999) (Skripkiūnas 2007) (Siddique 2004); ont indiqué que des niveaux plus élevés d'air emprisonné sont responsables de cette réduction.

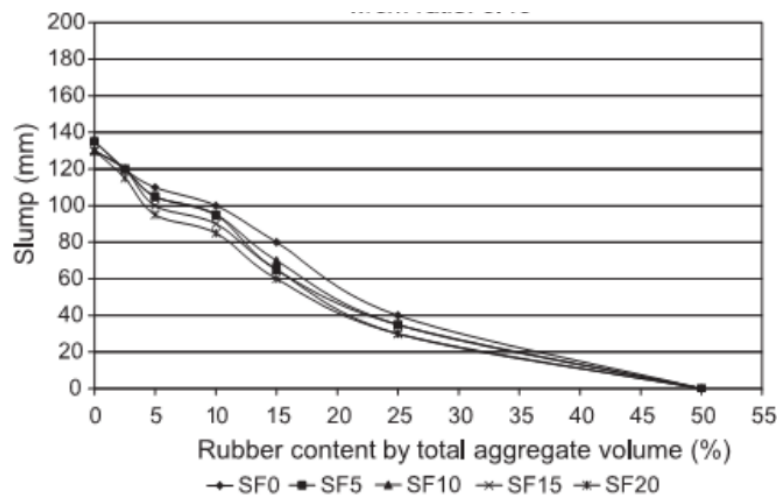


Figure 2- 4: Variation de l'affaissement du béton en fonction de contenu en caoutchouc.(Güneyisi 2004).

D'autres chercheurs sont arrivés à la même conclusion Selon (Siddique 2004), la cause de l'augmentation de l'air emprisonné réside dans la nature des particules de caoutchouc et leur tendance à emprisonner l'air sur leurs surfaces rugueuses. L'air emprisonné est proportionnel à la quantité de caoutchouc dans le composé, ce qui contribue à la diminution de la densité.(Bayomy 1999) (Siddique 2004) .

L'ouvrabilité du béton peut être définie comme la facilité avec laquelle le béton est mélangé, transporté et mis en place. (Bayomy 1999) ont étudié la maniabilité des bétons caoutchouteux, les auteurs ont signalé une tendance à réduire les tassements avec un taux croissant de remplacement des granulats par des particules de caoutchouc. Ils ont également montré que les composés fabriqués à base de fines particules de caoutchouc ont une meilleure aptitude au traitement par rapport à ceux fabriqués avec des particules plus grossières.

(Batayneh 2008) ont constaté que l'affaissement du béton variait de 75,33 mm pour le mélange de référence à 4,7 mm lorsque tous les granulats fins étaient remplacés par les particules de caoutchouc. Malgré la diminution de l'affaissement, les auteurs ont observé

visuellement que lors du malaxage et de la préparation des échantillons, le béton était plus maniable en présence de caoutchouc, la même observation a été faite par (Eldin NN & Senouci 1994) ; (Khaloo 2008) a souligné que la méthode traditionnelle de mesure de la consistance (essai d'affaissement), n'est pas représentative de l'état réel d'ouvrabilité du béton avec caoutchouc.

(Raghavan 1988) ont étudié l'effet de l'ajout de caoutchouc aux échantillons de mortier, ont introduit le test de Vébé pour mesurer la consistance des mélanges, et leurs résultats montrent que les mélanges avec des copeaux de caoutchouc ont une maniabilité comparable ou meilleure que les mélanges sans caoutchouc (Jingfu 2008), qui ont incorporé du caoutchouc dans un enrobé BCR par remplacement partiel des granulats fins, ont indiqué que la présence de caoutchouc affecte légèrement le temps de compactage. Ces auteurs rapportent une tendance à diminuer l'aptitude au traitement.

Cependant, compte tenu de la variabilité des résultats rapportés dans la littérature, qui semblent parfois contradictoires, il semble que l'ouvrabilité du béton en présence de caoutchouc dépende, d'une part, de la forme et de l'origine des particules de caoutchouc utilisées, et de d'autre part, les méthodes utilisées expérimentalement ont suivi pour tester cette propriété d'autre part pour la noter.

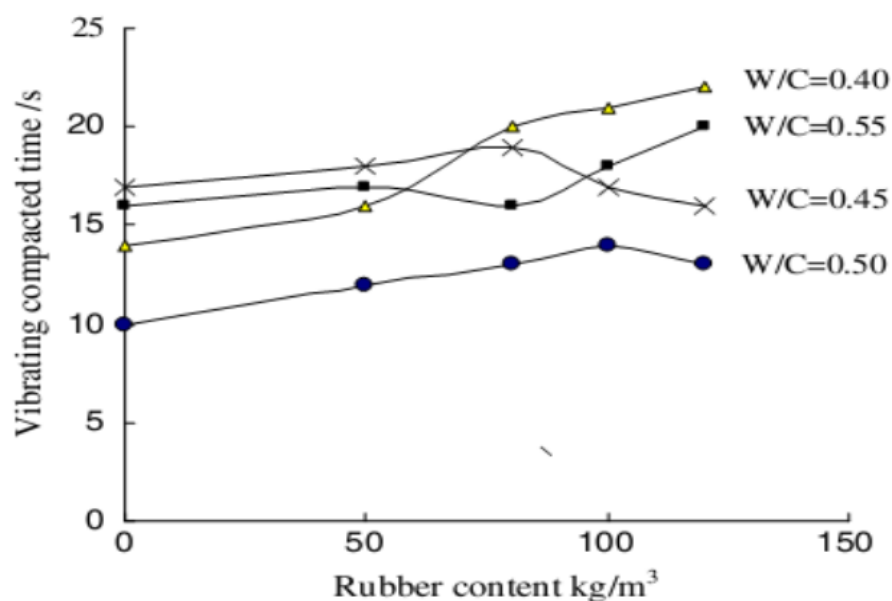


Figure 2- 5: Variation de la maniabilité du béton en fonction de la teneur en caoutchouc d'après (Jingfu 2008).

7.2.2-A l'état durci :

La résistance à la compression est une caractéristique fondamentale dans le processus de caractérisation des matériaux cimentaires. Les résultats de plusieurs études montrent que la résistance à la compression du béton est influencée par la taille et le taux d'échange des particules de caoutchouc. (Eldin NN & Senouci 1994) ont déclaré que le béton fabriqué à partir de granulats de caoutchouc a une résistance inférieure à celle du béton conventionnel lorsqu'il est remplacé par du caoutchouc et de 65 % lorsque le sable est remplacé par du caoutchouc. De son côté (Topçu 1995) a étudié le comportement du béton avec le caoutchouc, étudié l'influence de la taille et du taux d'échange, utilisé le caoutchouc sous deux formes, granulé (0/1 mm) et particulaire (1/4 mm). Les pertes maximales de résistance à la compression déterminée par (Topçu 1995) , qui correspondent à un taux de remplacement de 45 %, sont répertoriées dans le Tableau 2-3. Les résultats montrent que les mélanges à la mie fine sont moins sensibles par rapport à ceux fabriqués à partir de particules plus grossières.

Tableau 2- 3: Chutes de résistance en compression obtenues par (Topçu 1995)

Caoutchouc	Sur cylindre (%)			Sur cube (%)	
	7 jours	28jours	6 mois	28 jours	6 mois
Fin	40	37	78	56	71
grossier	59	57	77	81	75

La résistance à la compression développée en présence de grosses particules de caoutchouc est généralement inférieure à celle du béton avec des particules plus fines (Bayomy 1999) ; (Topçu 1995) .D'autres chercheurs (Ali 2000); (Fattuhi 1996) ; (Emiroglu 2007) ont trouvé le contraire.

D'après (Ganjian 2009) , la chute résistance est due aux facteurs suivants :

- Réduction de la quantité de matières solides supportant la charge.
- La souplesse et l'état de surface des particules de caoutchouc réduit l'adhérence entre les frontières de caoutchouc et la pâte de ciment.
- La non-uniformité de distribution des particules de caoutchouc dans le béton conduit à la rupture dans les zones de concentration de caoutchouc.

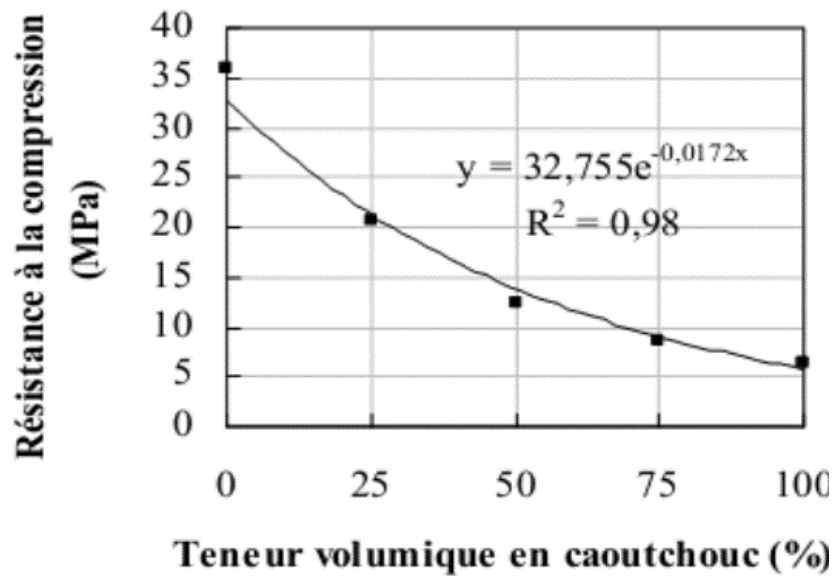


Figure 2- 6: Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression.(Bensaci Hamza 2014)

(Bayomy 1999) ont proposé des fonctions mathématiques pour estimer le facteur de réduction de résistance (FRR) des mélanges de béton ordinaire à base de granulats de caoutchouc, ils ont proposé plusieurs formalismes selon le type de résistance recherché (compression, traction et flexion). L'âge du béton et aussi la taille des granulats (fins ou grossiers).

(Segre 2000) ont souligné dans leur étude que la diminution des propriétés mécaniques du béton avec le caoutchouc est due à la mauvaise adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment, qui suit l'état de l'interface entre les particules, le caoutchouc et ciment. Pâte au microscope électronique à balayage (Bensaci Hamza) (Segre 2000) ont comparé des mélanges contenant du caoutchouc à l'état naturel 10% (sous-agrégats) avec ceux contenant le même pourcentage de caoutchouc traité avec une solution de NaOH (Fig 2-7). Les micrographies obtenues par les auteurs montrent que l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment est meilleure avec du caoutchouc traité.

Le temps de rupture, défini comme la durée de la détérioration du béton, est brutal et explosif pour le béton normal et porte des charges supplémentaires dépassant la charge maximale, également connue sous le nom de charge de rupture (Raghavan 1988); (Khaloo 2008) .

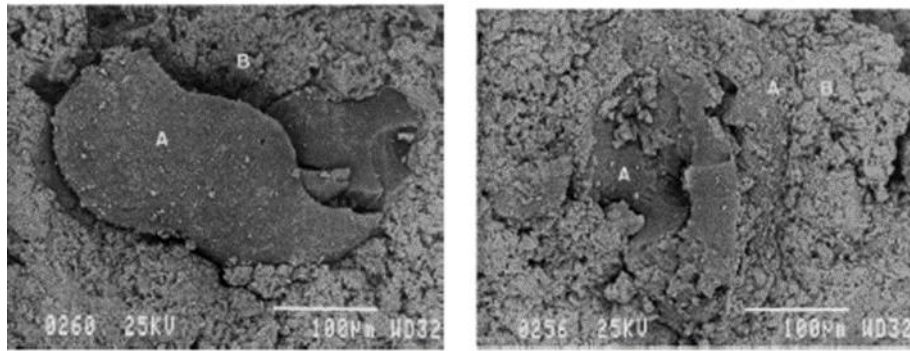


Figure 2- 7 : Surface de fracture de l'éprouvette ; dans le cas du caoutchouc à l'état brut (gauche), et dans le cas du traitement du caoutchouc dans la solution de NaOH (droite), d'après (Segre 2000).

L'application continue de la charge de compression crée de multiples fissures ainsi que l'expansion de celles existantes. Au cours de ce processus, l'échantillon est capable d'absorber une grande énergie plastique et de supporter de grandes déformations sans se décomposer complètement. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les efforts rompent le lien entre la pâte de ciment et les agrégats de caoutchouc (Nehdi 2001).

8- Conclusion :

La gestion des déchets caoutchouteux est un problème majeur pour tous les pays en raison de son impact direct sur l'environnement. L'utilisation du caoutchouc dans le domaine du bâtiment et des travaux publics comme matériau de construction présente des avantages importants d'un point de vue économique et environnemental.

Dans ce chapitre, nous avons compilé un résumé bibliographique des découvertes actuelles les plus importantes sur l'influence du caoutchouc sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci.

Chapitre III

Matériaux et méthodes

1- Introduction :

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les éco-matériaux. L'objectif de cette étude expérimentale est d'optimiser et de caractériser un mortier géopolymère en incorporant de granulats en caoutchouc.

Dans ce chapitre, les matériaux employés dans cette étude expérimentale seront présentés en détail en présentant leurs propriétés chimiques et physiques. Les compositions des mélanges seront ensuite détaillées après avoir expliqué la méthode de formulation utilisée. Les procédures de fabrication et de séquence de malaxage mises en place seront également définies. Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur le mortier. Les premiers concernent l'étude des propriétés à l'état frais, en particulier celle du mortier géopolymère, afin d'estimer leur fluidité (essai d'étalement). Ensuite, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés (résistance à la compression).

2- Matériaux :

1.1- Le laitier :

Dans cette étude expérimentale, nous avons utilisé le laitier comme une source d'aluminosilicate, ce matériau local est provient de l'usine d'EL-HADJAR/ ANNABA. Les compositions chimiques et les propriétés physiques sont données dans les tableaux 3-1 et 3-2 respectivement.

Tableau 3- 1: Analyse chimique élémentaire (% massique) du laitier par fluorescence X. [96]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Laitier	35.34	7.52	6.75	38.50	3.28	0.43	0.59	0.2	1.03

Tableau 3- 2: les propriétés physiques du laitier

Caractéristiques physiques	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
Laitier	1.70	2.90	4155

1.2- La solution alcaline :

Au cours de cette étude, nous avons utilisé une solution alcaline composée de silicate de sodium (Na₂SiO₃) sous forme liquide (voir Fig 3-1) de type Sild 2.0/45 produit par un

laboratoire local SARL GHARBI, les compositions chimiques sont données dans le tableau 3-3 plus l'hydroxyde de sodium (NaOH) sous forme solide avec une concentration de **10M** et une pureté de 99%.



Figure 3- 1 : Silicate de sodium (Na_2SiO_3) sous forme liquide.

Tableau 3- 3: les compositions chimiques de silicate de sodium

% massique	Na_2O	SiO_2	HO_2
Silicate de sodium	14.34	29.80	55.77



Figure 3- 2: Agitateur magnétique chauffant.

La solution de NaOH de 10M est préparée au niveau du laboratoire de chimie à l'aide d'un agitateur magnétique chauffant (Fig.3-2) et on l'a conservé dans une température ambiante pour qu'elle soit froide. Ensuite, la solution d'activateur est préparée **24 H** avant le malaxage

final des constituons, en mélangeant la solution de NaOH avec le Na_2SiO_3 durant 5 à 7 minutes et la conserver à des températures ambiantes.

1.3- Propriétés physiques du sable utilisé :

Un sable roulé alluvionnaire utilisable est de classe (0/5) provenant de la carrière de la zone d'oued Souf (Fig.3-3).



Figure 3- 3: Vue macroscopique du sable roulé.

1.3.1-Analyse granulométrique (DUPONT and TOURENQ 1997):

Avant de commencer les essais, il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit nécessaire à l'essai peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

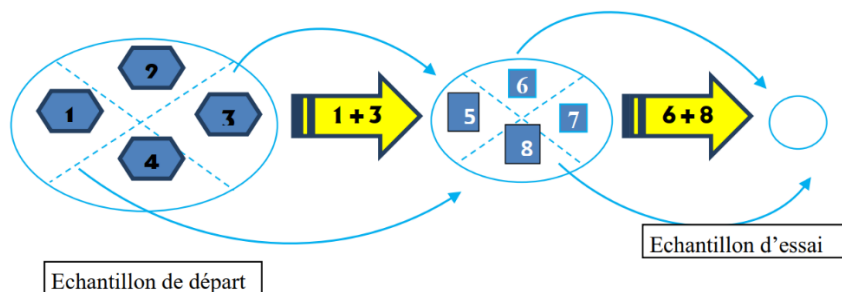


Figure 3- 4: Opération de quartage.

L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, et par la suite on va diviser en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant

deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué (voir Fig.3-4).

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis. Emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis. La représentation numérique de l'analyse granulométrique est donnée par le tableau 3-4 et la courbe granulométrique du sable est tracée sur la figure 3-5, en portant les ouvertures des tamis en abscisse et les pourcentages de passant en ordonnée. La courbe est tracée de manière continue et semi logarithmique.

Tableau 3- 4: Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5.00	0	0	100
4.00	8	0,8	99.2
3.15	11,1	1,11	98.89
2.50	17	1,7	98.3
1.25	63	6,3	93.7
0.630	223	22,3	77.7
0.315	635	63,5	36.5
0.160	952	95,2	4.8
0.080	953	95,3	4.7
Fond	1000	100	0

Dans ce cas, la continuité de la courbe granulométrique est vérifiée, puisque la différence de pourcentage entre deux tamis successifs de la série précédente est inférieure à 40%.

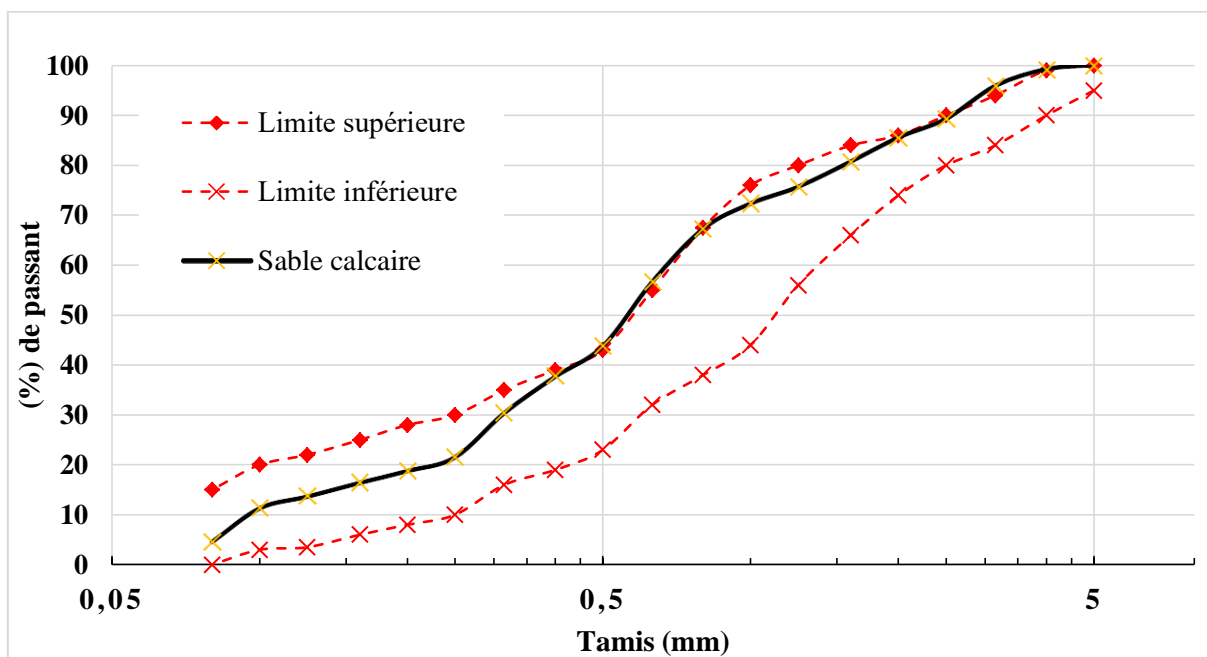


Figure 3- 5: Granularité du sable étudié (fraction supérieure à 80 µm)

La courbe correspond : Un sable roulé à majorité de grains de 0,16 à 4 mm de diamètre qui atteste d’après la norme **NF P18-101** à un sable moyen. On ce qui concerne le module de finesse trouvé est de l’ordre de **2.313**, c'est-à-dire notre sable est un **sable préférentiel**

1.3.2- Les masses volumiques :

Cet essai a pour but de déterminer la masse contenue dans un volume donné d’une fraction granulaire permettant d’obtenir ainsi une composition optimale du mortier. Les masses volumiques apparentes et absolues ont été mesurées conformément aux normes algériennes en vigueur :

A- *La masse volumique absolue* (NA.255/1990) :

La masse volumique absolue est la masse de l’unité de volume absolu du granulat, c’est-à-dire celle du volume constitué par la matière sans tenir compte du volume de toute forme de vides (Méthode de l’éprouvette graduée (voir la figure 3-6)). Son expression ρ_s est donnée par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}, \text{ en } kg/m^3, g/cm^3 \dots \dots \dots (II - 1)$$

Où M est la masse sèche de l'échantillon (g), V_1 est le volume d'eau (cm^3) et V_2 est le volume de mélange (eau + sable) en (cm^3). La valeur moyenne de la masse volumique absolue de trois mesures est reportée dans le tableau 3-5.



Figure 3- 6: Méthode de mesurer la masse volumique absolue.

B- La masse volumique apparente (NA.255-5/1990) :

C'est la masse de l'unité de volume apparent d'un corps, cette fois en tient compte du volume des vides qui pouvant exister dans ou entre les grains.

Dans le cadre de cette étude, la mise en place de l'échantillon du sable peut s'effectuer soit par écoulement au cône suivi ou non d'une vibration. Le volume est mesuré par écoulement sans compactage. Le sable est versé dans un récipient normalisé, de volume **1L** jusqu'à ce qu'il déborde en formant un dôme puis il est arasé à la règle (le volume du granulat est donc 1L), (voir la figure 3-7). Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III-5 et l'expression ρ_{ap} est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V}, \quad \text{en } kg/m^3, g/cm^3 \dots \dots \dots (II - 2)$$

Où M est la masse apparente de l'échantillon (g) et V le volume de l'échantillon (cm^3).



Figure 3- 7: Méthode de mesurer la masse volumique apparente.

Tableau 3- 5: La masse volumique absolue et apparente du sable utilisé.

Masse volumique	Sable			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
Masse volumique absolue kg/m^3	2558	2562	2560	2560
Masse volumique apparente kg/m^3	1409	1413	1411	1411

C- Absorption et porosité (NF P18 555, 1990) :

Les essais de détermination du coefficient d’absorption d’eau et de la teneur en eau sur des échantillons représentatifs des différentes fractions granulaires ont été réalisés selon les normes (NF P18 555, 1990). L’expression du coefficient d’absorption d’eau **Ab**, qui définit le rapport de l’augmentation de masse de l’échantillon M_a , provoquée au bout de 24 heures par une imbibition partielle en eau, à la masse de matériau sec M_s , est donnée par la relation suivante :

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100, \text{ en } \% \dots \dots \dots (II - 3)$$

L’essai de détermination de la porosité a été réalisé selon la norme (NF P18 555, 1990). L’expression de la porosité n , qui définit le rapport du volume des vides accessibles à l’eau au volume réel de l’échantillon est donnée par la relation suivante :

$$n = \frac{M_w - M_s}{M_w - M_w'} \cdot 100, \text{ en } \% \dots \dots \dots (II - 5)$$

Où M_s est la masse de l'échantillon sec, M_w est la masse dans l'aire de l'échantillon saturé en eau et M_w' est la masse dans l'eau de l'échantillon saturé en eau. Les valeurs obtenues pour les différentes fractions granulaires sont représentées dans le tableau 3-6.

D- Propriétés du sable (NF P 18-598, 1991) :

Nous avons réalisé, l'essai d'équivalent de sable selon la norme P18 598 (NF P 18-598, 1991), sur la fraction inférieure à 2 mm (0/2) des sables, permet d'apprécier la propriété globale du matériau, et l'essai au bleu méthylène selon la norme P18 595 (NF P 18-595, 1990) pour identifier la nature des fines en présence, cet essai dont le principe est de déterminer la capacité d'adsorption des fines actives par fixation du bleu de méthylène, et de mettre ainsi en évidence l'activité des surfaces des fines. Il doit être pratiqué si la valeur de E_s est inférieure à la valeur spécifiée par la norme P18 598 (NF P 18-598, 1991).

$$E_s = \frac{H_2}{H_1} \cdot 100, \text{ en } \% \dots \dots \dots (II - 6)$$

Où H_1 est la hauteur de la partie sableuse sédimentée et H_2 est la hauteur totale du floculant et de la partie sableuse sédimentée mesurée au piston. Les valeurs obtenues pour les différentes fractions granulaires sont représentées dans le tableau ci-après.

Tableau 3- 6: Coefficient d'absorption d'eau et la porosité du sable utilisé.

	Coefficient d'absorption (%)	Porosité (%)	Equivalent de sable
Sable utilisé	9.32	39,2	70

1.4- Le granulat en caoutchouc :

Dans l'objectif de la protection de l'environnement et la lutte contre les émissions nocives du CO_2 (l'effet de serre), on a adopté une nouvelle stratégie en faisant le recyclage des déchets pneumatiques en les exploitant dans le domaine du génie civil soient les constructions ou les routes. Ces déchets recyclés sous forme de sable de classe 0/5 (voir la figure 3-8) sont destinés à être remplacés par un sable de caractère naturel dans le but de préserver nos ressources naturelles.

L'analyse granulométrique et les propriétés physiques du granulat en caoutchouc utilisé sont données dans les tableaux 3-7 et 3-8 respectivement :



Figure 3- 8: Granulat caoutchouc utilisé.

Tableau 3-7 :

Tableau 3- 7: Résultats d'analyse granulométrique du granulat en caoutchouc utilisé.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5.00	0	0	100
4.00	25	2,5	97.5
3.15	64	6,4	93.6
2.50	84	8,4	91 .6
1.25	501	50,1	49.9
0.630	599	59,9	40 .1
0.315	787	78,7	21 .3
0.160	910	91	9
0.080	973	97,3	2.7
Fond	1000	100	0

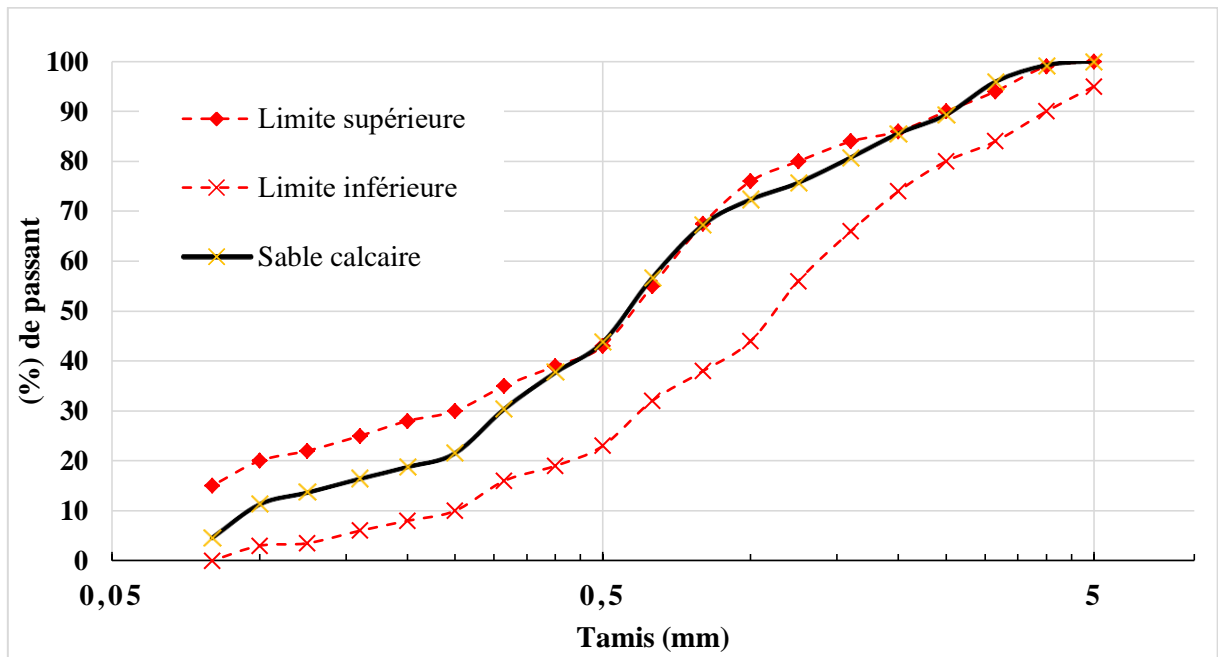


Figure 3- 9: analyse granulométrique du granulat en caoutchouc utilisé.

1.4.1- Méthode de traitement du granulat en caoutchouc :

Les particules de caoutchouc ont été lavées avec de l'eau pour retirer les impuretés adhérentes. Par la suite, elles ont été séchées à l'air pendant 48 h à température ambiante. Après le séchage, les particules de caoutchouc ont été immergées dans une solution de NaOH, à une concentration de 5% et une température de 25° C, pendant une période de 24 heures. Elles ont ensuite été lavées plusieurs fois pour éliminer les traces de NaOH restants sur leurs surfaces. Finalement, les granulats ont été séchés à une température ambiante 25° C pendant 48 heures.

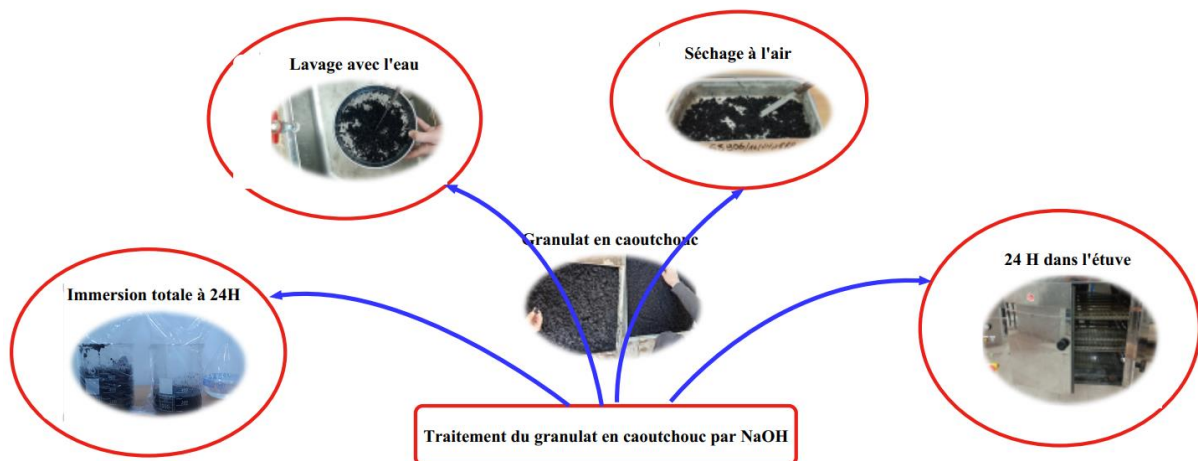


Figure 3- 10: méthode de traitement de granulat en caoutchouc par NaOH.

3- Formulation et fabrication du mortier géopolymère :

2.1- Formulation des mortiers géopolymères :

Afin d’aboutir aux performances mécaniques souhaitables, nous avons effectué des formulations préliminaires avec plusieurs rapports Act /Pré (Activateur/Précurseur) pour avoir la formulation optimale du mortier géopolymère à base des matériaux locaux. Nos mortiers géopolymères sont synthétisés à partir de laitier gâché avec une solution de silicate de sodium et NaOH (voir la figure 3-10). Le tableau de formulation du rapport **E/L = 0.6** est présenté ci-contre.

Tableau 3- 8: Formulation des mélanges étudiés en (kg/m³) avec E/L = 0.6 et P/S = 0.4.

Mélange	Laitier	Sable	GC	Activateur		Act/Pré	Pré/Sable
				NaOH	Na ₂ SiO ₃		
MGT	581.96	1454.91	0	87.29	261.88	0.6	0.4
MG-10%	581.96	1309,42	50,92	87.29	261.88	0.6	0.4
MG-20%	581.96	1163,93	101,84	87.29	261.88	0.6	0.4
MG-30%	581.96	1018,43	152,76	87.29	261.88	0.6	0.4

*GC : Granulat de caoutchouc ; *Act/Pré : Activateur/Précurseur ; Pré/Sable : Précurseur/Sable.

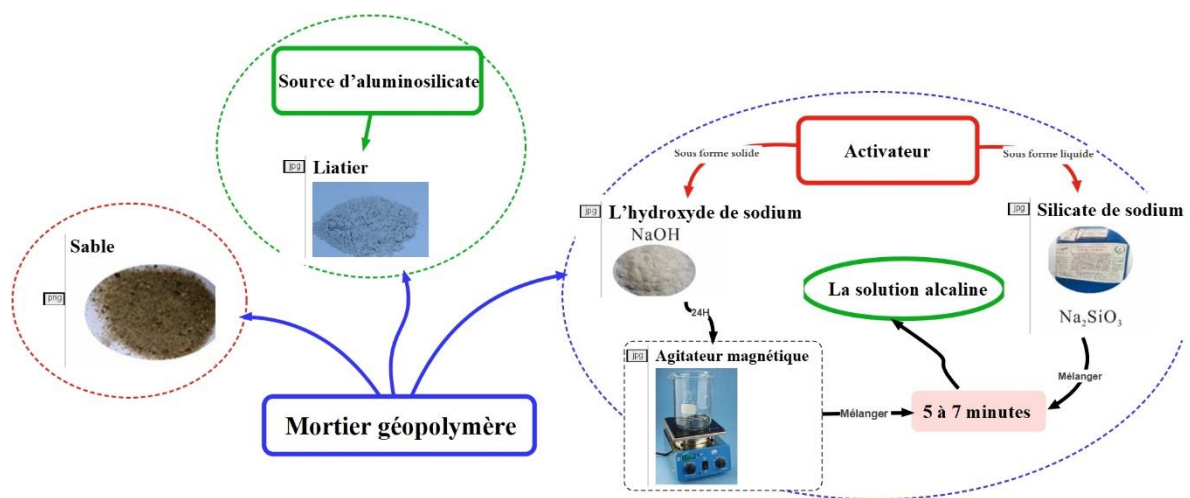


Figure 3- 11: Mortier géopolymère

2.2-Fabrication et mise en place des mortiers géopolymères :

Avant la réalisation d'une gâchée, les quantités des matériaux nécessaires sont homogénéisées et prélevées. Toutes les formulations des mortiers géopolymères étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire résumé ci-dessous :

- La première étape nécessite la préparation de l'activateur (la solution alcaline) comme il est précisé dans le paragraphe 1.2 ;
- La deuxième étape est effectuée en malaxant le laitier et le sable anhydre environ 2 à 3 minutes ;
- La troisième étape est caractérisée par l'ajout de la solution activateur au mélange réalisé dans l'étape précédente en les malaxant encore plus durant 5 minutes ;
- L'étape finale ; les mortiers géopolymères obtenus sont versés dans des moules cubiques de $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$, et mis sur une table vibrante pour valoriser l'évacuation des bulles d'air ensuite on les sollicite dans les différents modes de cures.

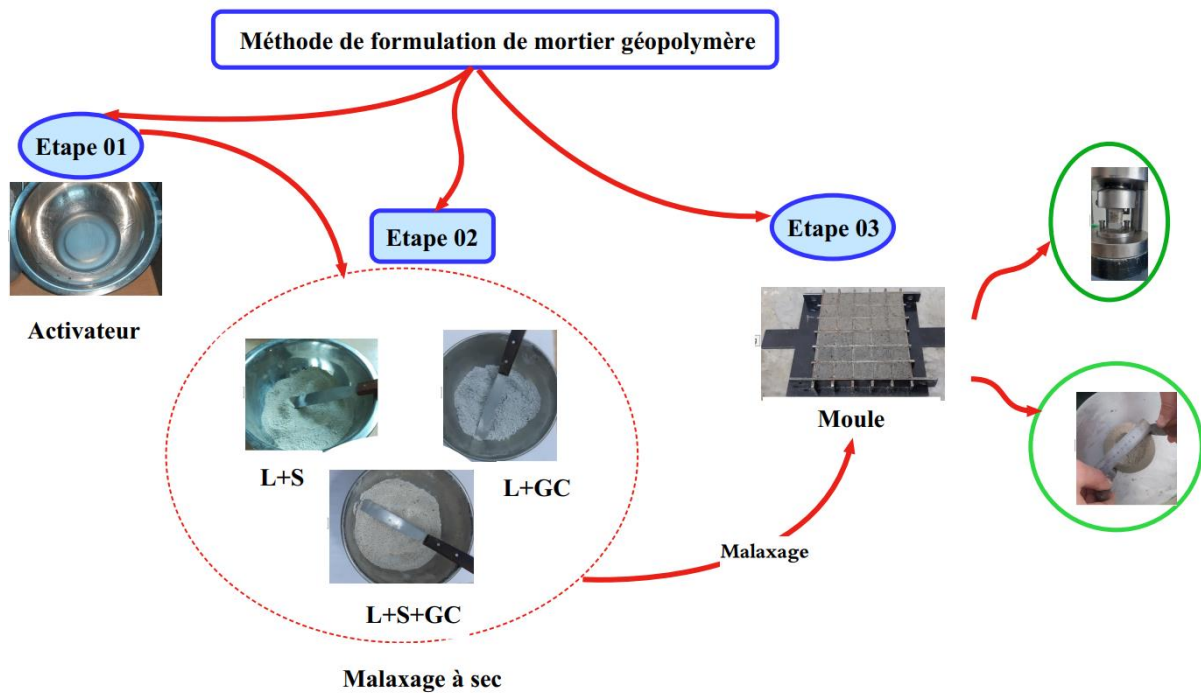


Figure 3- 12: Méthode de formulation des mortiers géopolymères.

2.3- Mode de conservation

Après la séquence de malaxage ; les échantillons sont sollicités aux deux modes divers de conservations.

- **Le premier mode** ; les moules sont conservées dans une chambre d'un air libre avec une température ambiante 22C° jusqu'à l'échéances de la résistance à la compression.

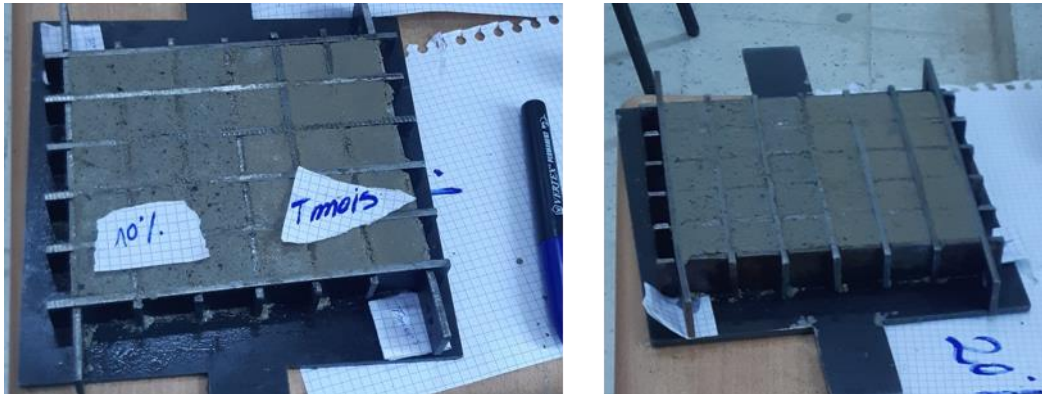


Figure 3- 13: Le premier mode de conservation.

- **Le deuxième mode** ; à ce stade là on conserve les moules dans une étuve pendant **24H** à une température de 60C° ; ensuite on démoule les éprouvettes en les préservant à l'air libre jusqu'à la date de l'écrasement.



Figure 3- 14: Le deuxième mode de conservation

4- Les essais réalisés :

3.1- Essai sur le mortier géopolymère à l'état frais :

3.1.1- L'étalement NF 12350-5 :

Pour évaluer la maniabilité et la consistance de nos mortiers géopolymères ; on a utilisé l'essai d'étalement conformément à la norme NF 12350-5, le test de la consistance a été effectué immédiatement après le malaxage final des constituants.



Figure 3- 15 : table à choc pour l'essai d'étalement.

La table à choc est constituée d'un plateau circulaire rigide de 250 mm de diamètre en fer forgé (figure 3-15). La fluidité est calculée en fonction de la variation du diamètre du cône supérieur et du diamètre final du mortier.

3.1.2- La masse volumique à l'état frais :

Pour effectuer cette mesure, on utilise un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement de mortier et sa surface libre est ensuite arasée. On pèse alors le récipient plein. Le rapport entre la masse du béton (masse du récipient plein à laquelle on soustrait la masse du récipient vide) sur le volume du récipient correspond à la masse volumique du béton frais exprimée en kg/m^3 .

3.2- Essai sur le mortier géopolymère à l'état durci :

3.2.1- La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente : est le rapport de la masse d'un échantillon à son volume apparent (en kg/m^3).

3.2.2- L'absorption par immersion totale :

L'absorption mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette de béton à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche.

$$c = \frac{M_s - M_a}{M_a} \times 100 \dots \dots \dots (II - 7)$$

Où M_s est la masse de l'échantillon sec et M_a est la masse dans l'eau de l'échantillon saturé en eau.

3.2.3- La résistance à la compression :

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes $2.5 \times 2.5 \times 2.5 cm^3$ (NF EN 12390-3, 2003). La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de capacité maximale de 1500 KN conforme à la norme (NF EN P 18-412, 1981). La mise en charge doit être d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (figure 3-16).



Figure 3- 16: Presse utilisée pour des essais mécaniques.

5- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les matériaux utilisés dans notre travail, notamment la sources d'aluminosilicates (laitier) l'activateur, des essais des caractérisations usuels, pratiqués selon les normes AFNOR (EN). Ensuite, les propriétés des constituants nécessaires à la formulation des mélanges géopolymères et le mode de fabrication des éprouvettes de mortier géopolymère.

On a présenté alors, les différents essais réalisés, la préparation des échantillons pour ces essais, le mode de conservation, le matériel et les paramètres de réglage utilisés. En revanche le présent chapitre s'intéresse aussi à l'effet de l'incorporation de granulat caoutchouc sur le comportement du mortier géopolymère soient à l'état frais (l'ouvrabilité) ou à l'état durci (la résistance en compression).

Chapitre IV

Résultats et discussions

1- Introduction :

Lors de la confection du mortier géopolymère, il est nécessaire d'effectuer des essais confirmant l'ouvrabilité de mortier quand il est frais. La résistance mécanique sera élevée quand la prise est achevée. Pour cela, le premier objet de ce présent chapitre est consacré pour évaluer le comportement rhéologique et mécanique du mortier géopolymère étudié. De plus, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. En effet, le souci d'économie et la protection de ces ressources naturelles et surtout pour minimiser la quantité de granulat naturel utilisé dans la fabrication du béton.

Le deuxième objet de ce chapitre est d'étudier la possibilité d'utiliser les déchets de granulat en caoutchouc issus du broyage des pneus comme un sable dans le mélange géopolymère. Pour atteindre à notre objectif majeur, on a commencé par l'utilisation et valorisation du granulat de caoutchouc en l'incorporant à la formulation du mortier géopolymère comme un sable substitue et d'analyser les comportements des nouveaux mortiers obtenus à l'état frais (l'étalement) ainsi qu'à l'état durci (la résistance à la compression) en les comparant à ceux d'un mortier géopolymère à base d'un sable naturel (témoin).

2- Comportement du mortier géopolymère à l'état frais :

2- L'étalement :

Afin de mesurer l'ouvrabilité du mortier géopolymère, des essais d'étalements (table à secousses) ont été réalisés sur les différents mélanges conformément à la norme ASTM C1437 (ASTM 2002). Les résultats des essais d'étalements pour les différents mélanges sont illustrés dans la figure 4-1.

D'après la figure 4-1, on peut voir que l'étalement a diminué avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, et la tendance de baisse est similaire pour tous les mélanges à base de granulat en caoutchouc (GC) soient traité ou non traité, ce qui implique une mauvaise ouvrabilité. D'après la même figure, il est bien clair que l'ajout de 10 %, 20% et 30 % de GC criés une diminution remarquable pour l'ouvrabilité des mélanges géopolymères par rapport au mortier témoin. Cette diminution est de l'ordre de 40%, 49% 74% pour les mortiers ave

GC non traité et 9%, 22% 42% pour les mélanges à base de GC traité respectivement. De nombreux travaux de recherche ont montré que l'incorporation de granulat en caoutchouc dans le mortier géopolymère diminue la maniabilité des mélanges. (Onuaguluchi and Panesar 2014, Hossain, Shahjalal et al. 2019)

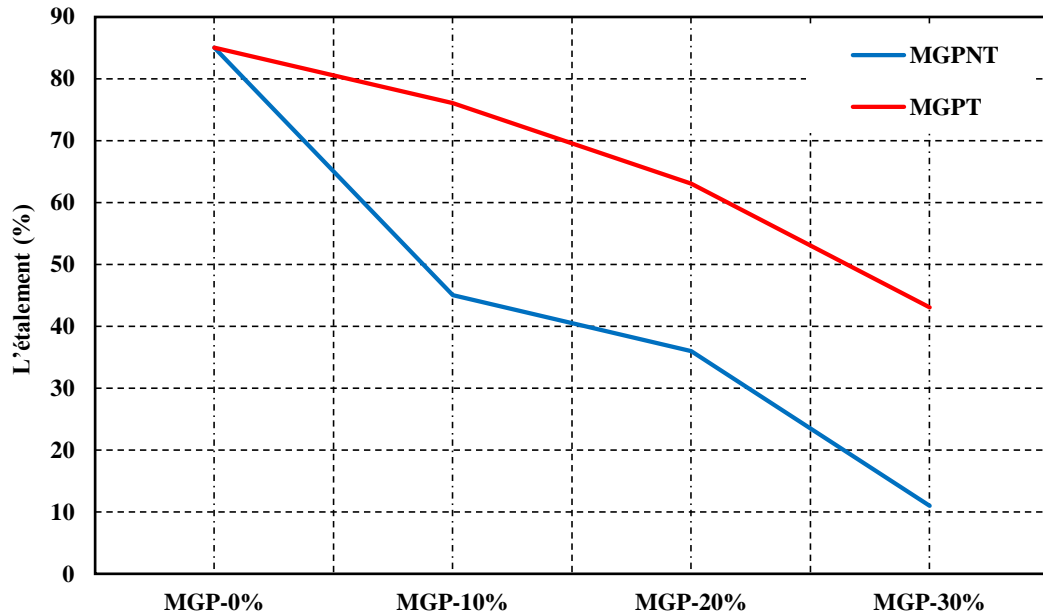


Figure 4- 1: Effet de l'incorporation de granulat en caoutchouc sur l'étalement des mélanges géopolymères.

On peut constater que le prétraitement de GC par le NaOH a joué un rôle très important dans l'amélioration de la fluidité des mélanges géopolymères par rapport aux mortiers à base des GC non traités. En effet, cette amélioration est d'environ 30% pour les différents mélanges, quelle que soit la teneur en granulat de caoutchouc (10 %, 20% et 30 %). La diminution de l'ouvrabilité due à l'incorporation de GC peut être expliquée par la surface rugueuse des particules de GC, qui permet d'augmenter le frottement entre le GC et les autres composants du mortier géopolymère.

Azmi et al. (Azmi, Al Bakri et al. 2016) et Parveen et al. (Parveen and Sharma 2013) ont rapporté que la maniabilité est diminuée avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le béton. De plus, les résultats de cette étude sont similaires avec les conclusions d'autres recherches (Abdelmonem, El-Feky et al. 2019, Aslani, Deghani et al. 2020).

En général, l'ouvrabilité de nos mélanges géopolymères sont situées dans la plage acceptable pour son utilisation dans le domaine de construction. En revanche, le prétraitement

adopté pour le GC a modifié la surface du GC (Segre and Joekes 2000) , et réduit la demande en eau et amélioré sa liaison adhésive (c'est-à-dire la liaison entre le GC et les autres constituants du mortier géopolymère), engendrant une fluidité et donc un affaissement plus élevé.

2.2- La masse volumique à l'état frais et à l'état frais durci :

La mesure de la masse volumique à l'état frais permet de déduire le rendement de la formulation de mortier géopolymère étudiée en comparant le volume expérimental au volume théorique. Les masses volumiques à l'état frais et durci des différents mélanges géopolymères sont représentées dans les figures 4-2, 4-3 et 4-4 respectivement.

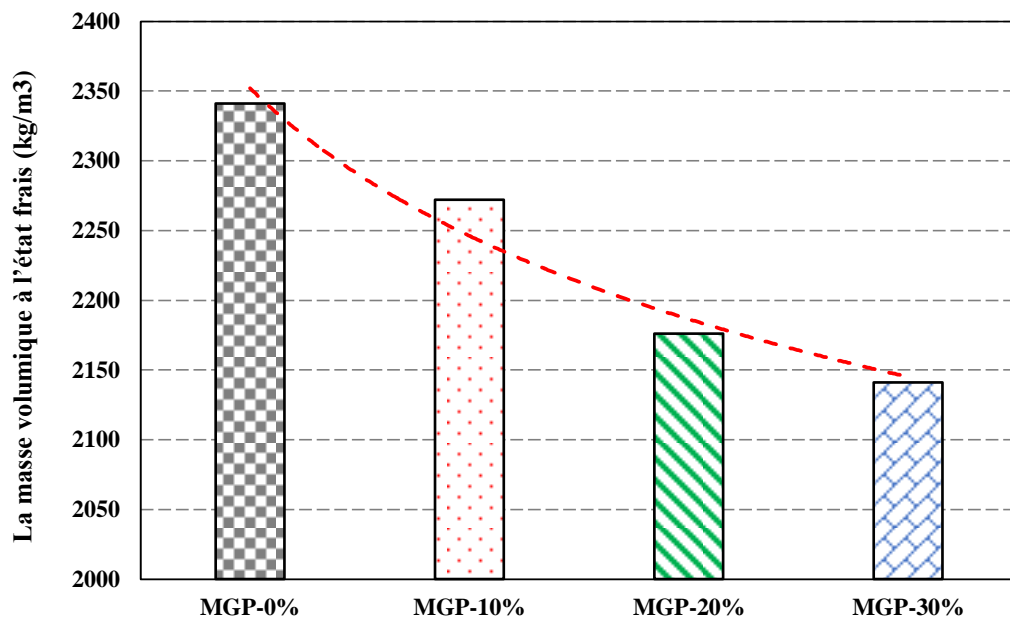


Figure 4- 2: Effet de l'incorporation de granulat en caoutchouc sur masse volumique à l'état frais des mélanges géopolymères.

A partir les figures 4-2, 4-3 et 4-4, on constate que les densités des mortiers géopolymères à basse de granulat de caoutchouc sont inférieures à celles des mortiers témoins, cela est expliqué par la faible densité du GC.

Cette diminution a été confirmée par des plusieurs travaux.(Ismail and Hassan 2017) En outre, les densités des mortiers géopolymères à l'état durci sont inférieures par rapport aux densités à l'état frais, car la matrice de mortier géopolymère à l'état durci devient plus

compacte. En effet, l'incorporation de GC a également entraînée une augmentation des vides (entre les particules de caoutchouc et le mortier) dans le mélange géopolymère et par conséquent une faible densité.

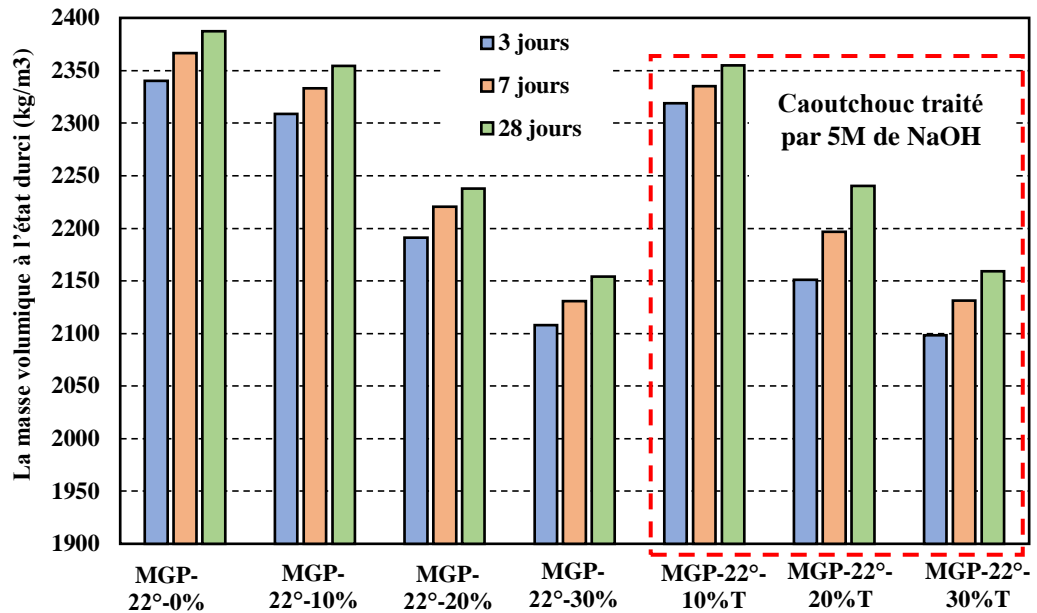


Figure 4- 3: Effet de l'incorporation de granulat en caoutchouc sur la masse volumique à l'état durci des mélanges géopolymères conservés à l'air libre.

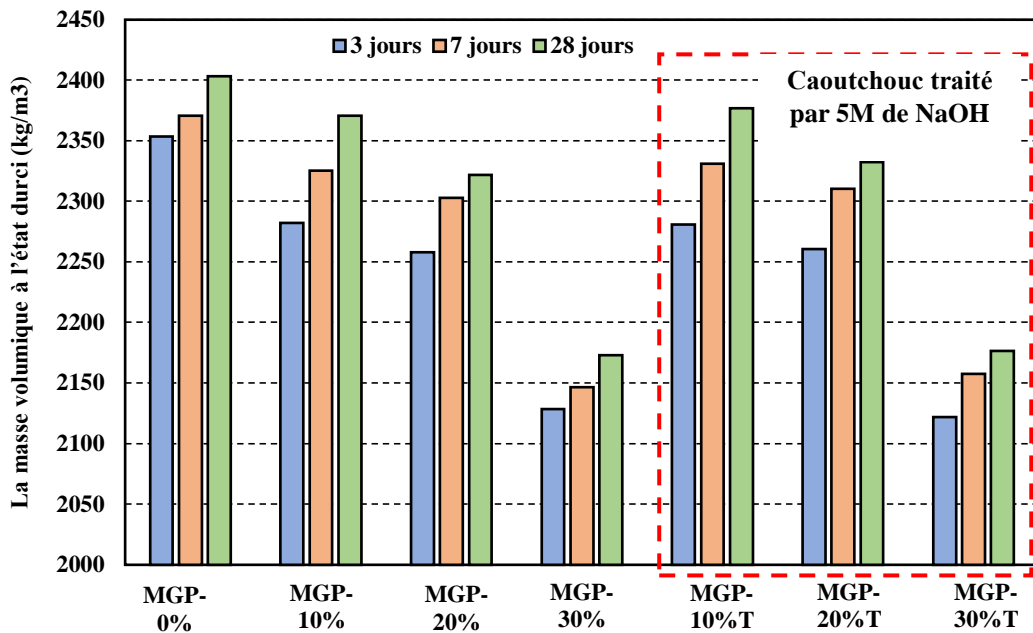


Figure 4- 4: Effet de l'incorporation de granulat en caoutchouc sur la masse volumique à l'état durci des mélanges géopolymères conservés à la chambre humide (H=90%).

Ceci est également montré par des recherches (Ezeldin and Balaguru 1992, Fedroff, Ahmad et al. 1996) , qui ont constaté que l'ajout de GC au mortier permet d'augmenter la teneur en air, car les particules de GC ayant une surface dentelée, abaissant la densité du mortier. Des études précédentes (Singhal 2017, Azarsa and Gupta 2020) ont montré que le béton géopolymère et le béton ordinaire ont des comportements similaires à cet égard.

Concernant l'effet du prétraitement de CR par la solution de NaOH sur les densités des mortiers géopolymères était marginal et non significatif, comme on peut l'observer à partir des résultats illustrés dans les figures 4-3 et 4-4.

3- Résistance à la compression :

3.1- Effet des méthodes des cures (mode de conservation) sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères sans caoutchouc :

Des essais d'écrasement des éprouvettes cubiques $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ont été effectués afin de déterminer la résistance moyenne de trois éprouvettes à différents âges de durcissement (figure 4-5), les résultats de la résistance à la compression des différents mélanges sont représentés dans la figure 4-6.

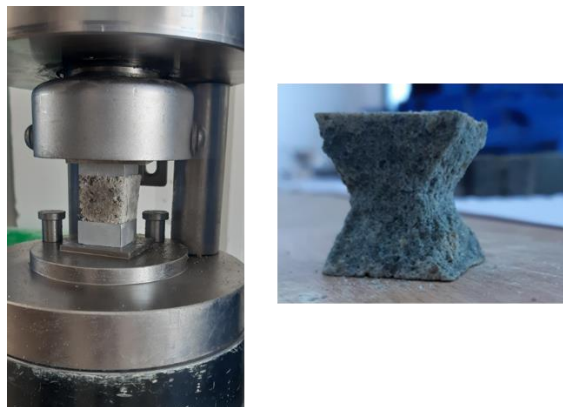


Figure 4- 5: Machine de compression utilisée et mode de rupture.

Selon les résultats d'écrasement des éprouvettes cubiques à différents âges de durcissement (figure 4-5), on constate que les mortiers géopolymères possèdent des performances très intéressantes vu les résistances à la compression très élevées.

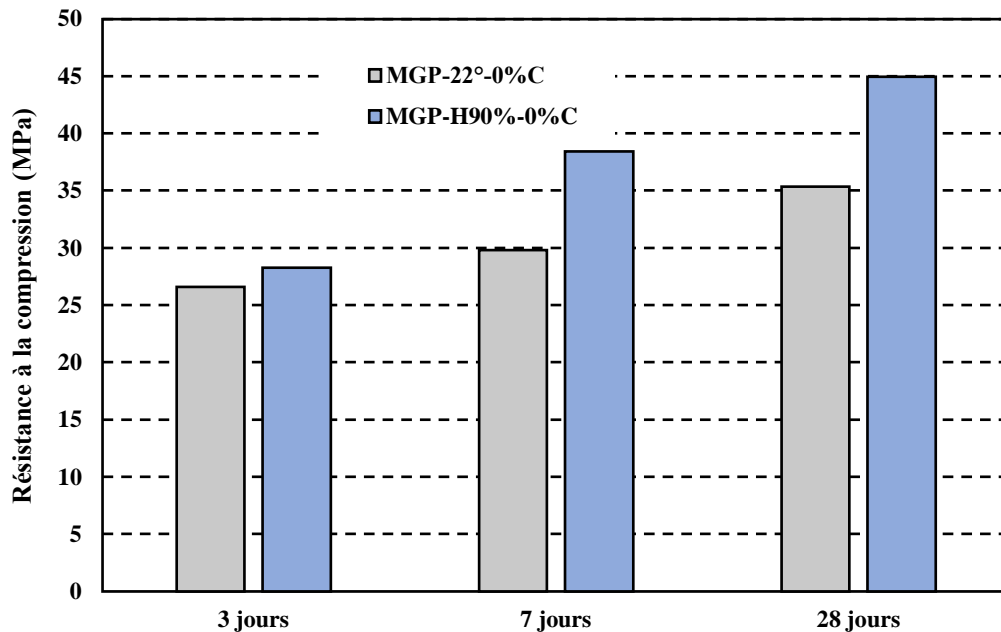


Figure 4- 6: Effet de mode de conservation sur la résistance en compression des mortiers géopolymères témoins.

Contrairement au béton ordinaire, le mortier géopolymère atteint des résistances élevées durant les premiers jours de durcissement (3 jours).

Concernant l'effet des conditions de cure sur l'évolution de la résistance à la compression du mortier géopolymère, on observe une croissance monotone de la résistance à la compression, en fonction de l'âge du mortier quelle que soit le mode de cure utilisé. La comparaison des résultats, pour n'importe quel type de conservation, montre qu'à un âge donné, la résistance du mortier conservé à la chambre humide (H=90%) est toujours plus élevée que celle du mortier préservé à l'air libre 22°C ; cela est confirmé par nombreux travaux de recherche (Ismail and Hassan 2017, Shin, Goh et al. 2019).

3.2- Effet de l'incorporation du granulat en caoutchouc sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères :

Les figures 4-7 et 4-8 illustrent les résultats obtenus de résistances en compression, à 3, 7 et 28 jours, en fonction de la teneur en caoutchouc. D'après l'histogramme, on remarque une réduction systématique de la résistance avec l'augmentation du taux d'incorporation du granulat en caoutchouc. De plus, lorsque la teneur en caoutchouc varie de 0 à 30%, la résistance chute de 35,36 à 17,75 MPa ; soit une chute de l'ordre de 50,28%, par rapport au mélange géopolymère témoin.

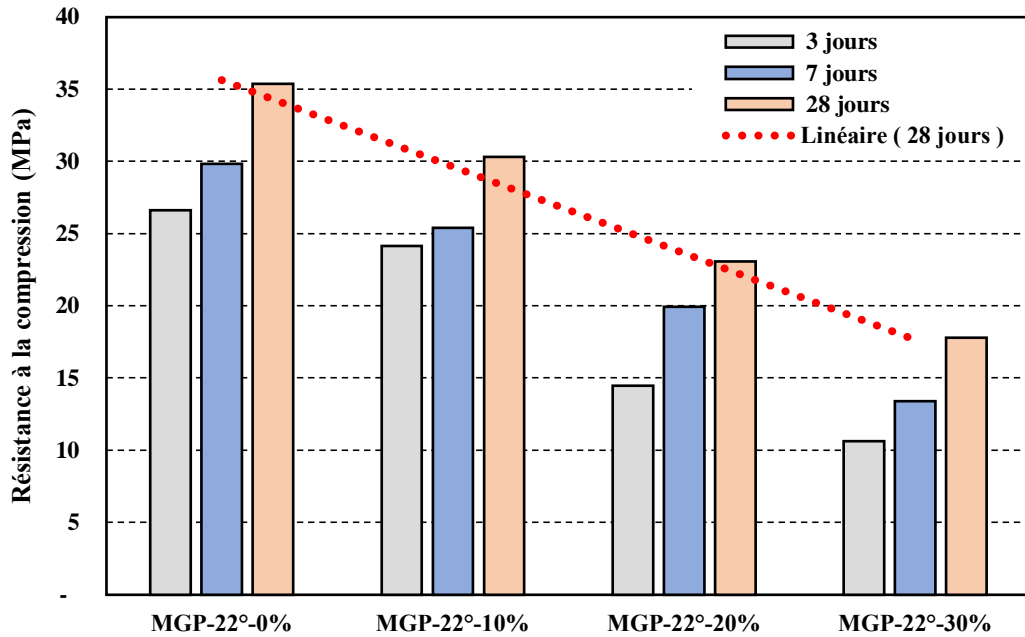


Figure 4- 7 : Effet de l'incorporation de GC sur la résistance en compression du mortier géopolymère préservé à l'air libre 22°C.

La chute de résistance mesurée confirme les résultats rapportés dans la littérature réalisée sur des matériaux cimentaires à base de granulats d'origine caoutchouteux.(Yahya, Abdullah et al. 2018, Pham, Elchalakani et al. 2019)

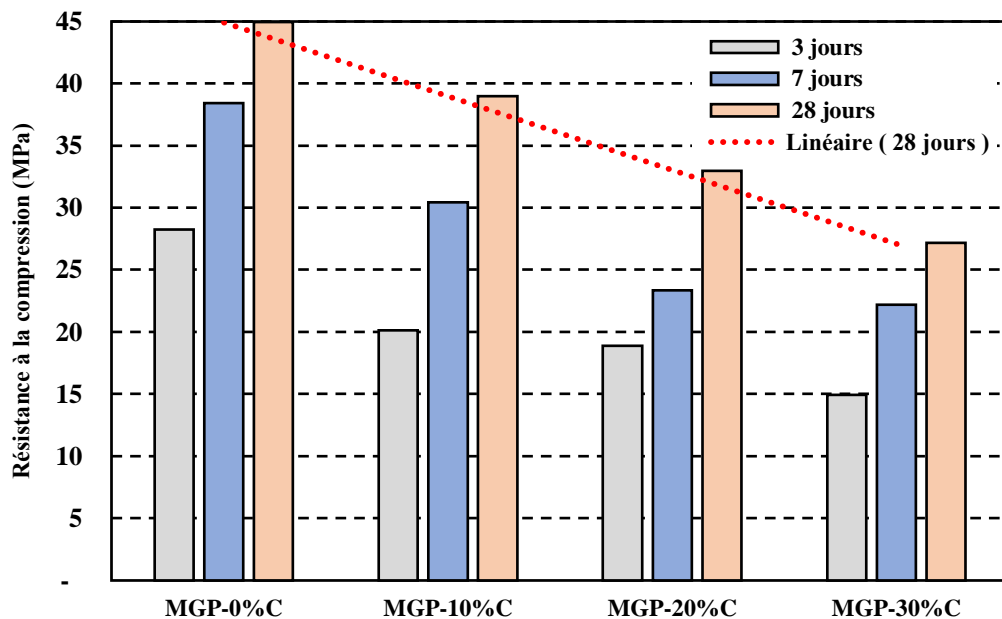


Figure 4- 8: Effet de l'incorporation de GC sur la résistance en compression du mortier géopolymère conservé à la chambre humide (H=90%).

D'après HO anh (cuong Ho 2010), le résonnement couramment avancé et le plus utilisé par les chercheurs pour expliquer la chute de résistance en compression est la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels. Alors que Eldin NN & Senouci (Eldin and Senouci 1993), ont attribué la chute de résistance à une réduction de la matière de charge solide et à des concentrations de contraintes dans la pâte de ciment autour des particules de caoutchouc.

En effet, la chute de résistance peut être également justifiée par une faible adhérence entre les particules de caoutchouc et les autres composants du mortier géopolymère.

Cet argument a été évoqué dans plusieurs travaux qui traitaient du comportement des bétons contenant des granulats en caoutchouc (Segre and Joeke 2000).

La photographie de la figure 4-9 montre comment la mauvaise adhérence conduit à la création de zones de faible résistance. La rupture commence par la dislocation des particules de caoutchouc à partir de la matrice cimentaire, ce qui conduit à des concentrations des contraintes dans les zones voisines.

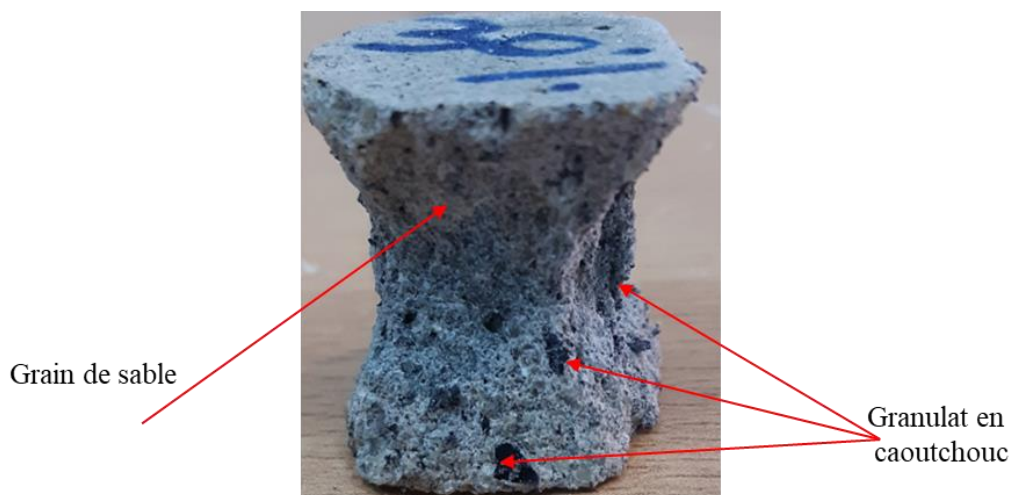


Figure 4- 9: Rupture interfaciale entre les particules de caoutchouc et le liant.

La diminution de la résistance à la compression due à l'ajout de GC peut être attribuée à :

- La faible résistance de GC par rapport au sable naturel ;
- La teneur de vide plus élevée lorsque le GC est ajouté dans le mélange géopolymère,

comme indiqué par des études précédentes (Yahya, Abdullah et al. 2018, Pham, Elchalakani

et al. 2019), car les particules de CR étaient de nature molle, ce qui entraînait une mauvaise liaison et un risque accru de propagation des fissures.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que l'incorporation du GC dans le mortier géopolymère a augmenté les besoins en eau tandis que la surface rugueuse du GC a entraîné une résistance réduite, car aucun traitement n'a été adopté pour modifier ses propriétés de surface. Cette observation a également été rapportée dans les études précédentes de Luhar et al. (Luhar, Chaudhary et al. 2019) et Park et al. (Mashhadban, Kutanaei et al. 2016).

3.3- Effet du traitement du granulat en caoutchouc par NaOH sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères :

L'effet du traitement chimique du caoutchouc par le NaOH sur la résistance en compression des mortiers géopolymères, est illustré dans les figures 4-10 et 4-11, respectivement. On peut remarquer que la modification de la rugosité de la surface améliore de façon significative la résistance en compression.

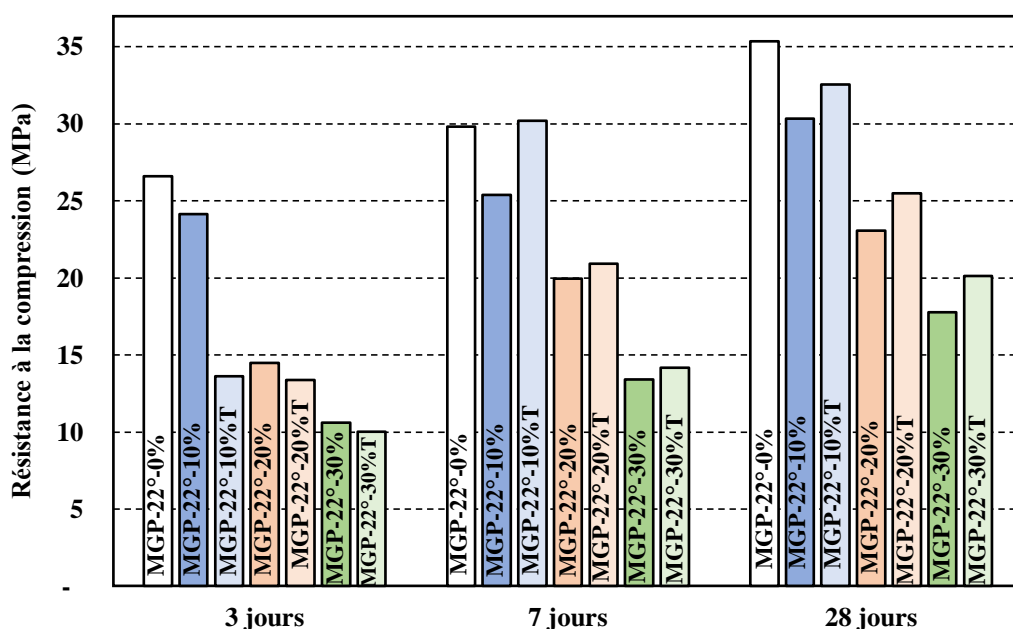


Figure 4- 10 : Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression du mortier géopolymère préservé à l'air libre 22°C.

À titre d'exemple, la résistance à 28 jours d'un mélange contenant 30% de caoutchouc traité a été améliorée de 30% par rapport au mélange contenant le même volume de caoutchouc non traité.

De plus, le traitement par NaOH a amélioré l'adhérence entre le GC et les autres constituons, conduisant ainsi à la formation d'une matrice géopolymère plus dense. Cependant, après le traitement chimique par NaOH, la rugosité du caoutchouc a augmenté et la porosité à l'interface du caoutchouc et d'autres constituons a diminué, améliorant les propriétés mécaniques du mortier géopolymère (Aly, El-Feky et al. 2019).

Les résultats obtenus confirment bien que l'adhérence insuffisante entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment est un facteur qui contribue à la réduction de la résistance.

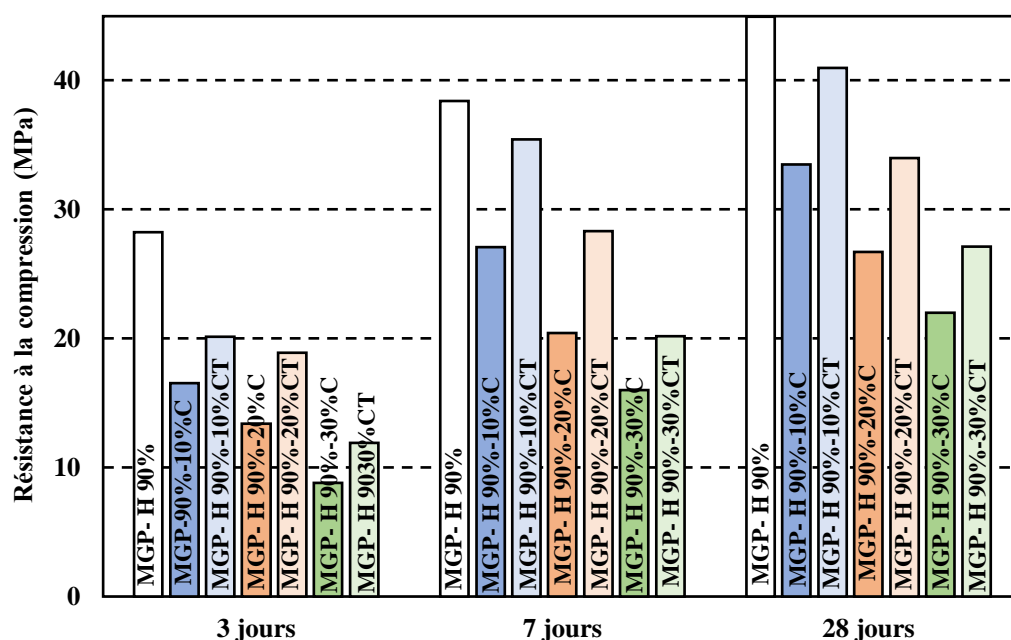


Figure 4- 11: Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression mortier géopolymère conservé à la chambre humide (H=90%).

Ces observations sont en accord avec celles faites par Chou et al. (Chou, Lu et al. 2007), qui ont effectué des essais sur un béton ordinaire contenant de la poudre de caoutchouc traitée avec NaOH. Ils ont conclu que l'adhérence entre les particules de caoutchouc et pâte de ciment a été améliorée par le traitement chimique du caoutchouc.

4- L'absorption par immersion totale :

Les résultats expérimentaux des essais d'absorption d'eau de différents mortiers géopolymères sont présentés dans la figure 4-12. L'absorption d'eau et la perméabilité du mortier peuvent être corrélées, car l'absorption d'eau donne une idée générale sur la résistance

du béton contre la pénétration d'eaux et d'autres ions nocifs comme les ions de sulfate et les ions chlorure, qui peuvent attaquer chimiquement le mortier.

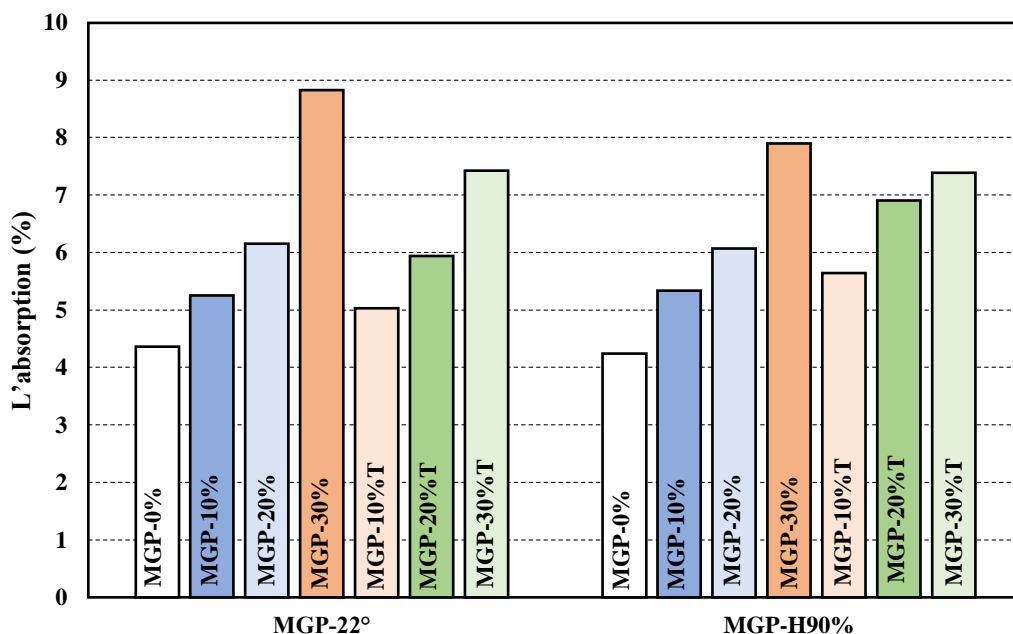


Figure 4- 12 : Effet de la teneur en caoutchouc sur le taux d'absorption totale.

Il convient de noter que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Ceci est dû à la capacité d'absorption plus faible du caoutchouc par rapport aux granulats naturels, ce qui permet de réduire la surface effective traversée par l'eau. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature obtenus pour des bétons avec des ajouts de caoutchouc (Segre and Joekes 2000, Yilmaz and Degirmenci 2009). Ces études antérieures ont permis de noter une diminution de porosité du béton avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Cependant, l'absorption d'eau pour le mélange témoin est de 4,36 %, tandis que l'absorption d'eau variait de 5 à 8 % lorsque la teneur en GC varie de 10 à 30 % pour tous les mortiers, quel que soit le mode de conservation.

En général, l'incorporation du granulat en caoutchouc est manifestée par un mélange poreux (Diaz-Loya, Allouche et al. 2011, Aly, El-Feky et al. 2019), cela augmenté le volume de vide et par conséquent plus d'eau absorbée par le mélange. Cependant, le traitement du GC par NaOH a entraîné une diminution de l'absorption d'eau globale, car une absorption d'eau initiale s'est produite pendant le traitement, et par conséquent, les mélanges n'ont pas absorbé plus d'eau à un âge plus avancé.

De plus, le traitement du GC a amélioré l'adhérence entre le GC et les autres constituants du mortier géopolymère et a formé une matrice compacte, ce qui a conduit à une absorption d'eau plus faible. Cette observation est portée par des études précédentes, c'est-à-dire qu'une tendance similaire pour l'absorption d'eau a également été signalée par Dong. et coll. (Dong, Elchalakani et al. 2021) lors de l'étude des propriétés de durabilité du béton géopolymère à base du granulats en caoutchouc. Mohammed. et coll. (Mohammed, Liew et al. 2018) ont rapporté une augmentation de l'absorption d'eau avec l'incorporation de caoutchouc dans le béton géopolymère.

5- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du remplacement partiel du volume total de sable d'un mélange de géopolymère par des granulats en caoutchouc. Le caoutchouc a été ajouté aux mélanges avec des dosages variant de 10%, 20% et 30%.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés du mortier géopolymère ont été affectées suite à l'introduction du caoutchouc, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. En présence du caoutchouc, le mortier géopolymère est devenu plus léger, plus ouvrable, plus ductile, plus résistant à la fissuration et moins perméable. En contre part, l'incorporation du caoutchouc affecte négativement les propriétés mécaniques du mortier géopolymère. La chute de résistance serait due à une faible adhérence entre les particules de caoutchouc et les autres composants et à l'aspect déformable du caoutchouc.

En ce concernant, l'effet de mode de conservation, les résultats montrent que les mortiers conservés à la chambre humide (H=90%) ont des résistances mécaniques supérieures à celle des mortiers préservés à l'air libre que soit la teneur en GC.

Conclusion générale

Dans la présente étude, la potentialité de produire des nouveaux matériaux écologiques de faible impact sur l'environnement à base de granulats d'origine caoutchouteuse a été expérimentalement examinée en laboratoire, comme première approximation. Les granulats de caoutchouc sont incorporés aux mélanges de géopolymère, par substitution volumique d'une partie du volume total de sable à différents pourcentages (10, 20 et 30%).

Une démarche expérimentale a été entreprise pour étudier l'influence du granulat en caoutchouc sur les propriétés du mortier géopolymère. A l'état frais, nous avons étudié l'effet du caoutchouc sur la densité et la maniabilité, tandis qu'à l'état durci, nous avons analysé l'effet du caoutchouc sur résistance à la compression et le taux d'absorption. A la fin de ce travail de thèse, nous avons procédé au traitement du caoutchouc afin d'améliorer leur performance dans le mortier géopolymère.

Les résultats obtenus sont très encourageants, il a été constaté que la formulation optimale obtenus peut être utilisée pour obtenir des bétons et des mortiers écologiques et durables. Les résultats obtenus montrent que les propriétés du mortier géopolymère ont été affectées suite à l'introduction du caoutchouc, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence du caoutchouc, le mortier géopolymère est devenu plus léger, plus ouvrable, plus ductile, plus résistant à la fissuration et moins perméable. En contre part, l'incorporation du caoutchouc affecte négativement les propriétés mécaniques du mortier géopolymère. La chute de résistance serait due à une faible adhérence entre les particules de caoutchouc et les autres composants et à l'aspect déformable du caoutchouc.

En ce qui concerne l'effet de mode de conservation, les résultats montrent que les mortiers conservés à la chambre humide (H=90%) ont des résistances mécaniques supérieures à celle des mortiers préservés à l'air libre quel que soit la teneur en GC.

En comparaison avec le caoutchouc non traité, l'utilisation du caoutchouc traité dans les mélanges de géopolymère a conduit à des résultats encourageants. La résistance a été améliorée de **30%** dans le cas du traitement par le NaOH.

Du point de vue environnemental, la valorisation du caoutchouc dans le mortier géopolymère peut aider à éliminer une certaine quantité de déchets et en même temps à réduire les besoins en granulats naturels.

Références bibliographiques

- Abdelmonem, A., et al. (2019). "Performance of high strength concrete containing recycled rubber." Construction and Building Materials **227**: 116660.
- Abraham, E., et al. (2011). "Recent advances in the recycling of rubber waste." Recent developments in polymer recycling **47**: 100.
- Adam, A. (2009). Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete, RMIT University.
- Adams, T. (2017). "American coal ash association production and use news release." American Coal Ash Association, Farmington Hills, MI: 1-4.
- Ali, N., Amos, A. & Roberts, M. (2000). "Use of Ground Rubber Tires In Portland Cement Concrete." In Proceedings of the international conference on concrete London, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd **390**.
- Aly, A. M., et al. (2019). "Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber." Construction and Building Materials **207**: 136-144.
- Amran, Y. M., et al. (2020). "Clean production and properties of geopolymer concrete; A review." Journal of Cleaner Production **251**: 119679.
- Anuradha, R., et al. (2014). "Optimization of molarity on workable self-compacting geopolymer concrete and strength study on SCGC by replacing fly ash with silica fume and GGBFS." Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng **3**(1): 11-18.
- Aslani, F., et al. (2020). "Development of lightweight rubberized geopolymer concrete by using polystyrene and recycled crumb-rubber aggregates." Journal of Materials in Civil Engineering **32**(2): 04019345.
- ASTM (2002). "ASTM C1437, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar."
- Azarsa, P. and R. Gupta (2020). "Comparative study involving effect of curing regime on elastic modulus of geopolymer concrete." Buildings **10**(6): 101.
- Azmi, A. A., et al. (2016). "A review on fly ash based geopolymer rubberized concrete." Key Engineering Materials **700**: 183-196.
- Bajpai, R., et al. (2020). "Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete." Journal of Cleaner Production **254**: 120147.
- Batayneh, M. K., Marie, I. & Asi, I., (2008). "2008. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries." Waste Management. **28**(11): 2171-2176.
- Bayomy, Z. K. K. a. F. M. (1999). "Concrete, Mixtures, Rubber, Compressive strength, Tire recycling, Materials processing, Aggregates, Portland cement." Journal of Materials in Civil Engineering **11**(3).
- Bensaci Hamza, M. Y. (2014). Amélioration de performance d'un béton compacté au rouleau routier contenant des particules en polymère. Département de Génie Civil. Bordj Bou Arreridj, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi. master: 123.
- Besancenot, J.-P. (2007). Notre santé à l'épreuve du changement climatique, Delachaux et Niestlé.

- Castel, A. (2016). Bond between steel reinforced and geopolymer concrete Ch14. pdf. Handb. Low Carbon Concr.: 375-386.
- Castel, A. and S. J. Foster (2015). "Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement." Cement and concrete research **72**: 48-53.
- Chandrakanth, V. and S. Koniki (2020). Effect of Review elevated temperature on geo-polymer concrete–A Review. E3S Web of Conferences, EDP Sciences.
- Chou, L. H., et al. (2007). "Use of waste rubber as concrete additive." Waste management & research **25**(1): 68-76.
- Costello, A., et al. (2009). "Managing the health effects of climate change: lancet and University College London Institute for Global Health Commission." The lancet **373**(9676): 1693-1733.
- cuong Ho, A. (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés.: application aux éléments de grande surface, Toulouse, INSA.
- Davidovits, J. (1976). "SOLID PHASE SYNTHESIS OF MINERAL BLOCKPOLYMER BY LOW TEMPERATURE POLYCONDENSATION OF ALUMINO-SILICATE POLYMERS."
- Davidovits, J. (1999). "Chemistry of Geopolymeric systems, terminology in: proceedings of 99 international conference. eds." Joseph Davidovits, R. Davidovits & C. James, France.
- Davidovits, J. (2015). "Geopolymer Chemistry & Applications, 4 th." Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.
- Davidovits, J. and J. Orlinski (1988). Proceedings Geopolymer'88, Geopolymer Institute.
- De Brito, J. and N. Saikia (2012). Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste, Springer Science & Business Media.
- Dhakal, S. (2009). "Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications." Energy policy **37**(11): 4208-4219.
- Diaz-Loya, E. I., et al. (2011). "Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete." ACI Materials Journal **108**(3): 300.
- Dong, M., et al. (2021). "Strength and durability of geopolymer concrete with high volume rubber replacement." Construction and Building Materials **274**: 121783.
- DUPONT, P. and C. TOURENQ (1997). "LA NOUVELLE NORME SUR LES GRANULATS, XP P15-540." Revue générale des routes et des aérodromes(756).
- Eldin NN & Senouci, A. (1994). "Rubber-Tire Particles As Concrete Aggregates." Journal of Materials in Civil Engineering, **5**(4): 478-496.
- Eldin, N. N. and A. B. Senouci (1993). "Rubber-tire particles as concrete aggregate." Journal of Materials in Civil Engineering **5**(4): 478-496.
- Emiroglu, M., Kelestemur, M. & Yildiz, S., (2007). "An Investigation on ITZ Microstructure of the Concrete Containing Waste Vehicle Tire." In 8th international fracture Conference. Istanbul, Turkey.: 453-459.
- Ezeldin, A. S. and P. N. Balaguru (1992). "Normal-and high-strength fiber-reinforced concrete under compression." Journal of Materials in Civil Engineering **4**(4): 415-429.

- Fadhil, D. T. H., et al. (2013). "Influence of using White cement kiln dust as a mineral filler on hot asphalt concrete mixture properties." International Journal of Civil Engineering **4**(1): 87-96.
- Fariéd, A. S., et al. (2021). "The effect of using nano rice husk ash of different burning degrees on ultra-high-performance concrete properties." Construction and Building Materials **290**: 123279.
- Fattuhi, N. I. C., L. a., (1996). "Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber." Construction and Building Materials **10**(4): 229-236.
- Fedroff, D., et al. (1996). "Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber." Transportation Research Record **1532**(1): 66-72.
- Ganjian, E., Khorami, M. & Maghsoudi, A.A., (2009). "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete." Construction and Building Materials **23**(5): 1828-1836.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. & Özturan, T. (2004). "Properties of rubberized concretes containing silica fume." Cement and Concrete Research **34**(12): 2309-2317.
- Hamada, H., et al. (2020). "Effects of nano-palm oil fuel ash and nano-eggshell powder on concrete." Construction and Building Materials **261**: 119790.
- Hamada, H. M., et al. (2020). "Use of oil palm shell as an aggregate in cement concrete: A review." Construction and Building Materials **265**: 120357.
- Han, B., et al. (2014). Self-sensing concrete in smart structures, Butterworth-Heinemann.
- Hansen, J., et al. (2006). "Global temperature change." Proceedings of the National Academy of Sciences **103**(39): 14288-14293.
- He, J., et al. (2013). "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites." Cement and Concrete Composites **37**: 108-118.
- Hossain, F. Z., et al. (2019). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber." Construction and Building Materials **225**: 983-996.
- Hulme, M. (2007). "Newspaper scare headlines can be counter-productive." Nature **445**(7130): 818-818.
- Islam, A., et al. (2014). "The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar." Materials & Design (1980-2015) **56**: 833-841.
- Ismail, M. K. and A. A. Hassan (2017). "Use of Steel Fibers to Optimize Self-Consolidating Concrete Mixtures Containing Crumb Rubber." ACI Materials Journal **114**(4).
- Jingfu, K., Chuncui, H. & Zhenli, Z (2008). "Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives." Materials and Structures **42**(8): 1117-1124.
- Jouzel, J. and A. Debroise (2004). Le climat: jeu dangereux, Dunod.
- Kerr, R. A. (2006). Yes, it's been getting warmer in here since the CO₂ began to rise, American Association for the Advancement of Science.
- Khaloo, A. R., Dehestani, M. & Rahmatabadi (2008). "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire – rubber particles." Waste Management **28**(12): 2472-2482.
- Konsta-Gdoutos, M. S. and S. P. Shah (2003). "Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag." Cement and concrete research **33**(8): 1269-1276.

- Kumar, A. and S. Kumar (2013). "Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization." Construction and Building Materials **38**: 865-871.
- Lee, H. (2007). "Intergovernmental panel on climate change."
- Liu, M. Y. J., et al. (2016). "Microstructural investigations of palm oil fuel ash and fly ash based binders in lightweight aggregate foamed geopolymer concrete." Construction and Building Materials **120**: 112-122.
- Luhar, S., et al. (2019). "Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies." Construction and Building Materials **204**: 740-753.
- Madheswaran, C., et al. (2013). "Effect of molarity in geopolymer concrete." International Journal of Civil & Structural Engineering **4**(2): 106-115.
- Martens, W. (1998). "Health impacts of climate change and ozone depletion: an ecoepidemiologic modeling approach." Environmental health perspectives **106**(suppl 1): 241-251.
- Martire, S., et al. (2018). "Widening the perspective in greenhouse gas emissions accounting: The way forward for supporting climate and energy policies at municipal level." Journal of Cleaner Production **176**: 842-851.
- Mashhadban, H., et al. (2016). "Prediction and modeling of mechanical properties in fiber reinforced self-compacting concrete using particle swarm optimization algorithm and artificial neural network." Construction and Building Materials **119**: 277-287.
- Mehsas, B., et al. (2021). "Development of supplementary cementitious materials from Algerian kaolin: elaboration of metakaolin and assessment of pozzolanicity." Innovative Infrastructure Solutions **6**(2): 1-12.
- Mohammed, A. N., et al. (2014). "Improving the engineering and fluid transport properties of ultra-high strength concrete utilizing ultrafine palm oil fuel ash." Journal of Advanced Concrete Technology **12**(4): 127-137.
- Mohammed, B. S., et al. (2018). "Development of rubberized geopolymer interlocking bricks." Case studies in construction materials **8**: 401-408.
- Naik, T. R. (2008). "Sustainability of concrete construction." Practice periodical on structural design and construction **13**(2): 98-103.
- Nehdi, M. K., A. (2001). "Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber : An Overview of Engineering Properties and Potential Applications." Cement, Concrete, and Aggregates **2**(1): 3-10.
- Nguyen, T. (2017). Durability of reinforced GGBS/FA geopolymer concretes, Loughborough University.
- Onuaguluchi, O. and D. K. Panesar (2014). "Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume." Journal of Cleaner Production **82**: 125-131.
- Palomo, A., Blanco Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vázquez, T. and Grutzeck, M.W. (1999). "Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation." Journal of Materials Science and Chemical Engineering **2**: 997-1004.
- Paramguru, R., et al. (2004). "Trends in red mud utilization—a review." Mineral Processing & Extractive Metall. Rev. **26**(1): 1-29.
- Parveen, S. D. and A. Sharma (2013). "Rubberized concrete: Needs of good environment (overview)." Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng **3**: 192-196.

- Patz, J. A., et al. (1996). "Global climate change and emerging infectious diseases." Jama **275**(3): 217-223.
- Pham, T. M., et al. (2019). "Durability characteristics of lightweight rubberized concrete." Construction and Building Materials **224**: 584-599.
- Poudenx, P. (2008). "The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation." Transportation Research Part A: Policy and Practice **42**(6): 901-909.
- Raghavan, D., Huynh, H. & Ferraris, C. (1988). "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite." Journal of Materials Science **33**: 1745-1752.
- Sahithi, K. and G. S. Priyanka (2015). "The Effect of Addition of Limestone powder and Granulated Blast Slag in Concrete." Int. J. Comput. Eng. Res. Trends **2**.
- Sangeetha, B. (2015). "Effect of rice husk ash and GGBS on performance of concrete." Int. J. Eng. Res **4**: 491-495.
- Sanjayan, J. G., et al. (2015). "FEA modelling of fracture toughness of steel fibre-reinforced geopolymer composites." Materials & Design **76**: 215-222.
- Sanni, S. H. and R. Khadiranaikar (2013). "Performance of alkaline solutions on grades of geopolymer concrete." International Journal of Research in Engineering and Technology **2**(11): 366-371.
- Saravanan, M. and M. Sivaraja (2017). "Mechanical behavior of concrete modified by replacement of cement by rice husk ash." Brazilian Archives of Biology and Technology **59**.
- Saraya, M. E.-S. I. (2014). "Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study." Construction and Building Materials **72**: 104-112.
- Segre, N. and I. Joekes (2000). "Use of tire rubber particles as addition to cement paste." Cement and concrete research **30**(9): 1421-1425.
- Segre, N. J., I., (2000). (2000). "Use of tire rubber particles as addition to cement paste. ." Cement and Concrete Research, **30**(9): 1421-1425.
- Shalini, A., et al. (2016). "Performance of rice husk ash in geopolymer concrete." Int J Innov Res Sci Tech **2**: 73-77.
- Shin, S., et al. (2019). "Predictions of compressive strength of GPC blended with GGBFS developed at varying temperatures." Construction and Building Materials **206**: 1-9.
- Si, C., et al. (2013). "Red mud as a carbon sink: variability, affecting factors and environmental significance." Journal of hazardous materials **244**: 54-59.
- Siddique, R. N., T.R., (2004). "Properties of concrete containing scrap-tire rubber--an overview." Waste management (New York, N.Y.), **24**(6): 563-569.
- Singh, B., et al. (2015). "Geopolymer concrete: A review of some recent developments." Construction and Building Materials **85**: 78-90.
- Singhal, D. (2017). "Development of mix design method for geopolymer concrete." Advances in concrete construction **5**(4): 377.

- Skripkiūnas, G., Grinys, A. & Černius, B (2007). "Deformation properties of concrete with rubber waste additives." Materials Science and Engineering: A **13**: 219-223.
- Sobolev, K. and M. F. Gutiérrez (2005). "How nanotechnology can change the concrete world: Part two of a two-part series." American Ceramic Society Bulletin **84**(11): 16-19.
- Spanlang, A., et al. (2016). "Development of a blast furnace model with thermodynamic process depiction by means of the rist operating diagram." Chemical Engineering Transactions **52**: 973-978.
- Swynghedauw, B. and J.-L. Weméau (2021). "Rapport 20-07. Conséquences du changement climatique sur la santé humaine et animale." Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine **205**(3): 219-226.
- Talakokula, V. and S. Bhalla (2016). "Non-destructive strength evaluation of fly ash based geopolymer concrete using piezo sensors." Procedia Engineering **145**: 1029-1035.
- Tawfik, T. A., et al. (2021). "Role of expanded clay aggregate, metakaolin and silica fume on the of modified lightweight concrete properties." Geosystem Engineering **24**(3): 145-156.
- Tayeh, B. A. (2018). "Effects of marble, timber, and glass powder as partial replacements for cement." Journal of Civil Engineering and Construction **7**(2): 63-71.
- Tayeh, B. A., et al. (2019). "Effect of incorporating pottery and bottom ash as partial replacement of cement." Karbala Int. J. Mod. Sci **5**(4).
- Tayeh, B. A., et al. (2021). "Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: a critical review." Journal of Cleaner Production **312**: 127734.
- Tayeh, B. A., et al. (2021). "Experimental and numerical studies on flexural behavior of high strength concrete beams containing waste glass." Advances in concrete construction **11**(11 (3) 239-253).
- Tayeh, B. A., et al. (2020). "Combined effect of lightweight fine aggregate and micro rubber ash on the properties of cement mortar." Advances in concrete construction **10**(10 (6) 537-546).
- Topçu, I. B. (1995). "The properties of rubberized concretes." Cement and Concrete Research **25**(2): 304-310.
- Trouzine, H., et al. (2011). "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie." Nature & Technology(5): 28.
- Ukwattage, N. L., et al. (2013). "The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon)." Fuel **109**: 400-408.
- Union, I. (2014). "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions." A new skills agenda for europe. Brussels.
- Yahya, Z., et al. (2018). Durability of fly ash based geopolymer concrete infilled with rubber crumb in seawater exposure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.
- Yao, M., et al. (2010). "Experimental study of n-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions." Fuel **89**(9): 2191-2201.
- Ye, N., et al. (2016). "Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud." Construction and Building Materials **111**: 317-325.

Yilmaz, A. and N. Degirmenci (2009). "Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials." Waste management **29**(5): 1541-1546.

Zeyad, A. M., et al. (2016). "Efficiency of treated and untreated palm oil fuel ash as a supplementary binder on engineering and fluid transport properties of high-strength concrete." Construction and Building Materials **125**: 1066-1079.

Zhuang, X. Y., et al. (2016). "Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications." Journal of Cleaner Production **125**: 253-267.