



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA

Fitiavana-Tanindrazana-Fandrosoana

\*\*\*\*\*

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

\*\*\*\*\*

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE VAKINANKARATRA

**Domaine : Science de l'Ingénieur**

**Mention : Génie Civil**

**Parcours : Matériaux Minéraux**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER II**

**Titre INGENIEUR**

# «BETON GEOPOLYMERE QUI RESISTE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES »



Soutenu le : 01 Mars 2023

**Présenté par** : RAMANITRARIVO Lucien André

**Rapporteur** : Professeur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Promotion 2020



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA

Fitiavana-Tanindrazana-Fandrosoana

\*\*\*\*\*

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

\*\*\*\*\*

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE VAKINANKARATRA

**Domaine : Science de l'Ingénieur**

**Mention : Génie Civil**

**Parcours : Matériaux Minéraux**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER II**

**Titre INGENIEUR**

# «BETON GEOPOLYMERE QUI RESISTE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES »

Soutenu le : 01 Mars 2023

**Présenté par :** RAMANITRARIVO Lucien André

**Président de jury :** Monsieur RANDRIANARIVELO Lanja

**Examineur :** Madame RAVERONIRINA Harimbola Sahondra

Monsieur RAKOTONANDRASANA Franck

**Rapporteur :** Professeur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Promotion 2020



## TENY FISAORANA

*Eto ampiandohana dia tsy hay ny tsy hisaotra an'Ilay Mpahary eram-po, eran-tsiana sy ireo rehetra izay nanampy mivantana na tsia tamin'ny fanatanterahana ity sehatry ny fikarohana ity. mankasitraka sy mankatelina ireto olona manan-kaja voatanisa manaraka eto ambany ireto:*

- *Dokotera ANTSONANTENAINARIVO Ononamandimby, Tale ny « Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra », pitarika ny fihaonam-be sy panatanteraka izany, nanaiky nandray anay tao amin'ny sekoly ambaratonga voalohany ;*
- *Andriamatoa RAJAONARISON Eddie Franck, Direktera taloha ny « Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra », tamin'izay dimy taona nianaranay tao izay ;*
- *Andriamatoa RANDRIANARIVELO Lanja pitarika ny fihaonam-be sy filohan'ny mpitsara ihany koa;*
- *Andriamatoa RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé mpiandraikitra tsy tapaka ny programa tamin'ny fotoam-pianarana ;*
- *Andriamatoa RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Profesora, mpitarika ny fihaonambe sy nitari-dalana anay tany amin'ny toeram-pikarohana sy nanara-maso akaiky dia akaiky amin'izay rehetra natao momban'ily fikarohana ary nanaiky ny itondra anay sy nanome hevitra amin'ny asa atao ;*
- *Ramatoa RAVERONIRINA Harimbola Sahondra sy Andriamatoa RAKOTONANDRASANA Franck nanaiky ny hanara-maso ary nanadihady ity fikarohana ity;*
- *Ho an'ny olona tao amin'ny toeram-pikarohana « Centre National de Recherches Industrielles et Technologie (CNRIT) » izay nampiantrano sy nanome alalana anay mba hanatanterahana ny fikarohana ary ireo olon'ny « Bloc Technique d'Ankatso » izay nanamora ny fidirana amin'ny fampiasana ny fitaovana mifindrany amin'ny fikarohana ;*

*Raha tsy teo ny fanohanana sy fitarihina manokana nataon'ireo olona voatanisa ireo dia tsy azo notanterahina izao asa fikarohana izao. Koa noho izany dia ankasitrahina manokana izy ireo.*

*Misaotra indrindra tompoko*

## REMERCIEMENTS

*A l'issu du cycle de notre formation, nous tenons à remercier le DIEU TOUT PUISSANT.*

*Nos remerciements les plus sincères vont à :*

- *Monsieur ANTSONANTENAINARIVO Ononamandimby, Docteur, Maitre de Conférences, Maitre-Assistant, Le Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra, qui a accepté de présider le jury de ce mémoire et de faciliter l'entrée dans son établissement ;*
- *Monsieur RAJAONARISON Eddie Franck ancien Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra, pour ces cinq années d'étude ;*
- *Monsieur RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé « Chef de mention Génie Civil » de nous avoir donné l'emploi du temps et de donner son aide précieux ;*
- *Monsieur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Professeur et Maitre de Conférences, qui a accepté d'encadrer ce vif mémoire, pour leurs conseils précieux et leurs suivis qu'il m'a prodigué durant tout notre travail ;*
- *Monsieur RAZAFY Nomenjanahary Rivo, Maitre-Assistant et Maitre de Conférences, qui a accepté d'examiner ce travail ;*
- *Monsieur RAKOTONANDRASANA Franck, Maitre de Conférences et membre de jury, qui accepte d'examiner ce travail ;*
- *Les membres du personnel du CNRIT, Laboratoire Vontovorona et Bloc technique d'Ankatso, qui a toujours aidé durant l'expérimentation de ce travail ;*
- *En fin toute personne qui a participé de près ou de loin, la famille, mes amis et mes collègues, à l'accomplissement de ce mémoire soit sincèrement remerciée et les enseignants qui ont participé à nos formations soient sincèrement remerciés ;*

*Toute ma Gratitude*

## **SOMMAIRE**

TENY FISAORANA

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABBREVIATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

INTRODUCTION GENERALE

### **PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES**

CHAPITRE 1 : NOTION SUR LE BETON

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES

CHAPITRE 3 : GENERALITES SUR LA BALLE DE RIZ

CHAPITRE 4 : GENERALITES SUR LE KAOLIN

CHAPITRE 5 : GENERALITES SUR LA CHAUX

CHAPITRE 6 : GENERALITES SUR LA SOUDE

CHAPITRE 7 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX ANTI-ACIDES

### **PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES**

CHAPITRE 8: APPROVISIONNEMENT ET IDENTIFICATION EN MATIERES  
PREMIERES,

CHAPITRE 9: ELABORATION ET FORMULATION DES EPROUVETTES

CHAPITRE 10 : LES ESSAIS PHYSIQUES, MECANIQUE ET CHIMIQUE

### **PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION**

CHAPITRE 11 : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 12 : APPROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

CHAPITRE 13 : MESURES DE SECURITE

CONCLUSION GENERALE

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIES ET WEBOGRAPHIES

TABLE DES MATIERES

RESUME

ABSTRACT

## LISTE DES ABBREVIATIONS

### LISTE DES NOTATIONS

C : ciment

S : sable

G : gravillon

MK : m éta kaolin

CX : chaux

E : eau

SS : silicate de soude

E/C : rapport eau sur ciment

BGAC(5,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 5% pendant 7 jours

BGAC(10,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 10 % pendant 7 jours

BTAC(5,7) Béton Témoin immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 5% pendant 7 jours

BTAC(10,7) : Béton Témoin immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 10% pendant 7 jours

BGAS(5,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Sulfurique à 5% pendant 7 jours

BGAS(10,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Sulfurique à 10% pendant 7 jours

BTAC(5,7) Béton Témoin immergé dans l'Acide Sulfurique à 5% pendant 7 jours

BTAC(10,7) : Béton Témoin immergé dans l'Acide Sulfurique à 10 % pendant 7 jours

CEM I : Ciments Portland

CEM II / A ou B : Ciments Portland compos és

CEM III / A, B ou C : Ciments de haut fourneau

CEM IV / A ou B : Ciments pouzzolaniques

CEM V/ A ou B : Ciments compos és

CPA : Ciment Portland Artificiel

CHF : Ciment de haut fourneau

CEM II/A ou B-P : Ciment Portland à la pouzzolane

CEM II/A ou B-V : Ciment Portland aux cendres volantes

CEM II/A ou B-W : Ciment Portland aux cendres volantes

CEM II/A ou B-T Ciment Portland au schiste calciné

CEM II/A ou B-M : Ciment Portland compos é

CEM II/A ou B-L : Ciment Portland au calcaire

CEM II/A ou B-LL : Ciment Portland au calcaire

CEM II/A ou B-Q : Ciment Portland à la pouzzolane  
CEM II/A ou B-D : Ciment Portland à la fumée de silice  
CEM II/A ou B-S : Ciment Portland au laitier  
CLC : Ciment au laitier et aux cendres  
CPZ : Ciment pouzzolanique  
CLK : Ciment de laitier au clinker  
CPJ : Ciment Portland Composé  
CNRIT : Centre Nationale de Recherche et Industriel et Technologique  
ES : Equivalent de Sable  
G/S : Gravier /Sable  
d : diamètre intérieur  
D : diamètre extérieur  
NM : Normes Malagasy  
JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy  
SSB : Surface Spécifique de Blaine  
AFNOR : Association Française pour la Normalisation  
CRH : Carbonized Rice Husk  
RHA : Rice Husk Ash  
CBR : Cendre de Balle de Riz  
NF EN: Normes Français et Européenne Norme  
NFP:  
FCFA: Franc Français  
J.C: Jésus Christ  
PROCHIMAD : Produit Chimique de Madagascar  
SPCI : Société de Produit Chimique  
PVC : Polychlorure de Vynil

## LISTE DES UNITES

% : pourcentage

$\mu\text{m}$  : micronm ère

mm : millim ère

$\text{m}^3$  : m ère cube

mg : milligramme

l : litre

kcal : kilocalorie

s: seconde

MJ: m égajoule

Km: kilom ère

kg : kilogramme

g : gramme

Mpa : M égaPascal

Ar : Ariary

$\text{cm}^3$  : centim ère cube

$\text{cm}^2$  : centim ère carr é

daN : d écaNewton

N : Newton

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Notation chimique du ciment [4] .....	3
Tableau 2 : Les différents types de ciments de la norme NF EN 197-1 [6].....	5
Tableau 3 : Domaines d'utilisation des ciments courants [8] .....	7
Tableau 4 : Caractéristiques des sables [12] .....	11
Tableau 5 : Caractéristiques des grains de sable.....	12
Tableau 6 : Caractéristiques de l'eau exigées selon la norme NFP 18 303 [16].....	14
Tableau 7 : Impuretés admissibles dans l'eau de gâchage [16] .....	15
Tableau 8 : Utilisations des adjuvants.....	17
Tableau 9 : Liste des principaux adjuvants [18] [19].....	18
Tableau 10 : Différents types de béton [22] .....	21
Tableau 12 : La chaleur massique de la silice .....	32
Tableau 13: Conductivité thermique de la silice [29] .....	33
Tableau 14 : Composants chimiques de la balle de riz en [%] .....	39
Tableau 15 : Composition élémentaire de la balle de riz .....	39
Tableau 16 : Résultat d'analyse granulométrique du sable.....	62
Tableau 17 : Résultat d'analyse granulométrique du gravillon.....	63
Tableau 18 : Caractéristiques physiques des cendres de balle de riz.....	64
Tableau 19 : La composition chimique élémentaire des cendres de balle de riz .....	64
Tableau 20 : composition chimique de la chaux .....	65
Tableau 21: Caractéristiques chimiques du kaolin.....	65
Tableau 22 : caractéristiques de la soude caustique.....	66
Tableau 23 : caractéristiques de l'eau de JIRAMA.....	66
Tableau 24: variation de l'aluminosilicate et de la chaux .....	74
Tableau 25: Résistance à la traction par flexion en fonction aluminosilicate (cendre de balle de riz et métaokaolin) et chaux .....	75
Tableau 26 : Résistance à la compression en fonction aluminosilicate et chaux.....	75
Tableau 27: Variation de l'eau de gâchage et du silicate de soude.....	76
Tableau 28 : Résistance à la traction par flexion en fonction eau de gâchage et silicate de soude .....	76
Tableau 29: Résistance à la compression en fonction eau de gâchage et silicate de soude .....	77
Tableau 30: Résultats sur les retraits volumique après séchage.....	78
Tableau 31 : Masse avant et après séchage et densité apparente .....	79

Tableau 32: Dimension et retrait volumique après avoir plongées dans la solution d'acide pendant 7 jours.....	81
Tableau 33: Masse avant et après immersion dans l'acide et densité apparente pendant 7 jours .	83
Tableau 34: Résistance à la compression après 7 jours d'immersion dans l'acide.....	84
Tableau 35: Dimension et retrait volumique après avoir plongées dans la solution d'acide pendant 14 jours.....	85
Tableau 36: Masse avant et après immersion dans l'acide et densité apparente pendant 14 jours .....	87
Tableau 37: Résistance à la compression après 14 jours d'immersion dans l'acide.....	88
Tableau 38 : Prix des matières premières pour le béton témoin .....	91
Tableau 39 : Prix des matières premières pour le béton géopolymère.....	91
Tableau 40 : Dosage 350 Kg en ciment d'un béton témoin .....	91
Tableau 41 : Prix de 1 m <sup>3</sup> de béton témoin .....	91
Tableau 42 : Dosage optimale du béton géopolymère .....	92
Tableau 43 : Prix de 1 m <sup>3</sup> de béton géopolymère .....	92
Tableau 44 : Les mesures d'atténuation .....	94
Tableau 45 : Les mesures à prendre pour les produits toxiques.....	95
Tableau 46 : Tableau comparative entre le béton témoin et notre béton géopolymère antiacide .	95

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Processus de fabrication du ciment.....	4
Figure 2: Applications sur les géopolymères. ....	29
Figure 3 : La forme d'un système rhomboédrique.....	30
Figure 4 : L'évolution de la chaleur massique de la silice en fonction de la température. .....	32
Figure 5 : La conductivité thermique de la silice transparente. ....	33
Figure 6 : La conductivité thermique de la silice fondue. ....	33
Figure 7 : Flowsheet de procédé Deville.....	35
Figure 8 : Flowsheet de procédé Bayer.....	37
Figure 9 : Classification de la chaux proposée par la norme NF EN 459-1 [35].....	44
Figure 10 : Courbe de solubilité de la soude dans l'eau.....	46
Figure 11 : Résine époxyde.....	50
Figure 12 : Application de la résine époxy sur le carreau.....	51
Figure 13 : Courbe granulométrique du sable.....	62
Figure 14 : Courbe granulométrique du gravillon.....	63
Figure 15: étape de l'obtention de silicate de soude.....	68
Figure 16: Evolution de la résistance mécanique en fonction de la variation des pourcentages de l'aluminosilicate de calcium pendant 07 jours d'âge.....	75
Figure 17: Evolution de la résistance mécanique en fonction de la variation du rapport massique entre le silicate de soude et l'eau pendant 07 jours d'âge.....	77
Figure 18: Evolution du retrait volumique après séchage en fonction de la variation du rapport massique entre le silicate de soude et l'eau pendant 07 jours d'âge.....	79
Figure 19: Evolution de la densité apparente en fonction de la variation du rapport massique entre le silicate de soude et l'eau pendant 07 jours d'âge.....	80
Figure 20: Evolution du retrait volumique des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 jours d'immersion.....	82
Figure 21: Evolution du retrait volumique des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 jours d'immersion.....	83
Figure 22: Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 jours d'immersion.....	85
Figure 23: Comparaison de l'évolution du retrait volumique des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 et 14 jours d'immersion.....	86

Figure 24: Comparaison de l'évolution de la perte de masse des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 et 14 jours d'immersion .....87

Figure 25: Comparaison de l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 et 14 jours d'immersion .....89

## LISTE DES PHOTOS

Photos 1: Sable 0/0,4.....	52
Photos 2: Gravillon 0/8 .....	53
Photos 3: Balle de riz .....	53
Photos 4: Kaolin 40 µm d'épaisseur.....	53
Photos 5: Chaux BOUTSIKA .....	54
Photos 6: Soude caustique.....	54
Photos 7: HCl et H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> purs .....	54
Photos 8: Four de calcination .....	55
Photos 9: Broyeur à boulet.....	55
Photos 10: Incinérateur balle de riz.....	55
Photos 11: Tamis d'après AFNOR 0,4 mm .....	56
Photos 12: Table vibrante de 1000 à 2000 vibrations par minutes .....	56
Photos 13: Balance de précision.....	56
Photos 14: Concassage .....	57
Photos 15: Tamis 0/8.....	57
Photos 16: Tamis 0/0,4.....	57
Photos 17: Incinérateur balle de riz.....	58
Photos 18: une part de balle de riz .....	58
Photos 19: amorçage charbon de bois .....	58
Photos 20: système d'aération .....	59
Photos 21: Pression à main nue.....	59
Photos 22: vérification du feu .....	59
Photos 23: Couvercle en tôle.....	59
Photos 24: Combustion balle de riz.....	60
Photos 25: balle de riz carbonisé (CRH) .....	60
Photos 26: mélange d'aluminosilicate et chaux .....	68
Photos 27: mélange d'aluminosilicate, chaux et gravier.....	68
Photos 28: Malaxage du béton frais géopolymère .....	69
Photos 29: moule 160cm x 40cm x 40cm .....	69
Photos 30 : Pesage de l'acide .....	70
Photos 31 : Mélange d'eau et de l'acide .....	70
Photos 32 : Solution d'acide.....	70

Photos 33: Mesure de retrait en mm.....	71
Photos 34 : Presse Hydraulique.....	72
Photos 35 : Résistance à la traction par flexion .....	73
Photos 36 : Résistance à la compression .....	73
Photos 37: Béton géopolymère après immersion dans l'acide chlorhydrique pendant 14 jours...	90
Photos 38 : Béton géopolymère après immersion dans l'acide sulfurique pendant 14 jours.....	90
Photos 39 : Béton témoin après immersion dans l'acide pendant 14 jours.....	90

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est parmi l'un des matériaux le plus utilisé dans le monde depuis l'antiquité dans tous les domaines de la construction et du bâtiment, du génie civil et dans la réalisation des travaux publics grâce à ces performances mécaniques. Les ingénieurs concepteurs, spécialistes ou non des matériaux, trouveront les éléments nécessaires pour les guider dans les choix des matériaux, de même que les informations indispensables au suivi.

Les géopolymères sont souvent utilisés en remplacement des systèmes à base de ciment car il consomme beaucoup d'énergie et très dangereux pour l'environnement du au dégagement de gaz carbonique dans l'atmosphère mais aussi de minimiser leur cout de fabrication et par contre ils sont des matériaux de construction inorganiques à base de matières premières et de déchets disponibles localement. Les matières premières alternatives que sont les scories et les cendres de balle de riz, bien que les sources d'aluminate et de silicate de haute qualité soient des déchets qui sont également disponibles localement.

Tous les matériaux sont sensibles aux attaques chimiques volontaires ou environnementales et sont donc soumis au vieillissement ou à la corrosion selon des mécanismes spécifiques. Il est donc important de connaître leur résistance au vieillissement ou à la corrosion, les moyens d'analyse et de diagnostic de leur dommage, ainsi que les mesures à prendre pour prévenir ou lutter contre ses phénomènes. C'est pourquoi nous avons choisi le sujet du mémoire «BETON GEOPOLYMERE QUI RESISTE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES ».

Pour entrer en profondeur, notre mémoire se présente en trois (3) parties :

- La première partie concerne l'étude bibliographique sur la notion du béton, des généralités sur : les géopolymères, la balle de riz, le kaolin, la chaux, la soude et les matériaux anti-acides.
- La deuxième partie consacrée à l'étude expérimentale : approvisionnement et identification en matière première, élaboration et fabrication des éprouvettes et les essais physiques, mécaniques et chimiques.
- La troisième et dernière partie concentrant sur les résultats et discussion, approche économique et environnementale et enfin les mesures de sécurité

**PARTIE I. ETUDES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

## CHAPITRE 1 NOTION SUR LE BETON

### 1.1 Définition [1]

Le béton est un matériau minéral obtenu en mélangeant un liant, de l'eau et des granulats. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis progressivement il devient dur et très résistant

Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire.

### 1.2 Les compositions du béton [2]

Nous avons indiqué que le béton s'obtient en mélangeant de liant, des granulats, de l'eau et d'adjuvant. Chaque constituant joue un très grand rôle dans la fabrication du béton et ses caractéristiques influent sur les propriétés et la destination du matériau.

Le béton est constitué de :

- Pâtes pur (liants, eau, air) ;
- Granulats (sable et gravillon) ;
- Produits additions éventuelles (adjuvants)

#### 1.2.1 Ciment [3]

##### 1.2.1.1 Définition

Les ciments sont produits en portant à une température de 1400-1450 °C un mélange de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs appelés clinker. Et pour l'obtention du ciment Portland, on broie très finement le clinker qui est additionné de gypse.

Le ciment, la norme NF EN 197-1 en donne une définition :

«Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve résistance et sa stabilité, même sous l'eau. »

##### 1.2.1.2 Notation des cimentiers [4]

L'utilisation de ces certaines formules abrégées et ces appellations courantes ci-dessous permettent de faciliter l'étude du ciment.

Voici la notation de la chimie des ciments :

**Tableau 1 : Notation chimique du ciment [4]**

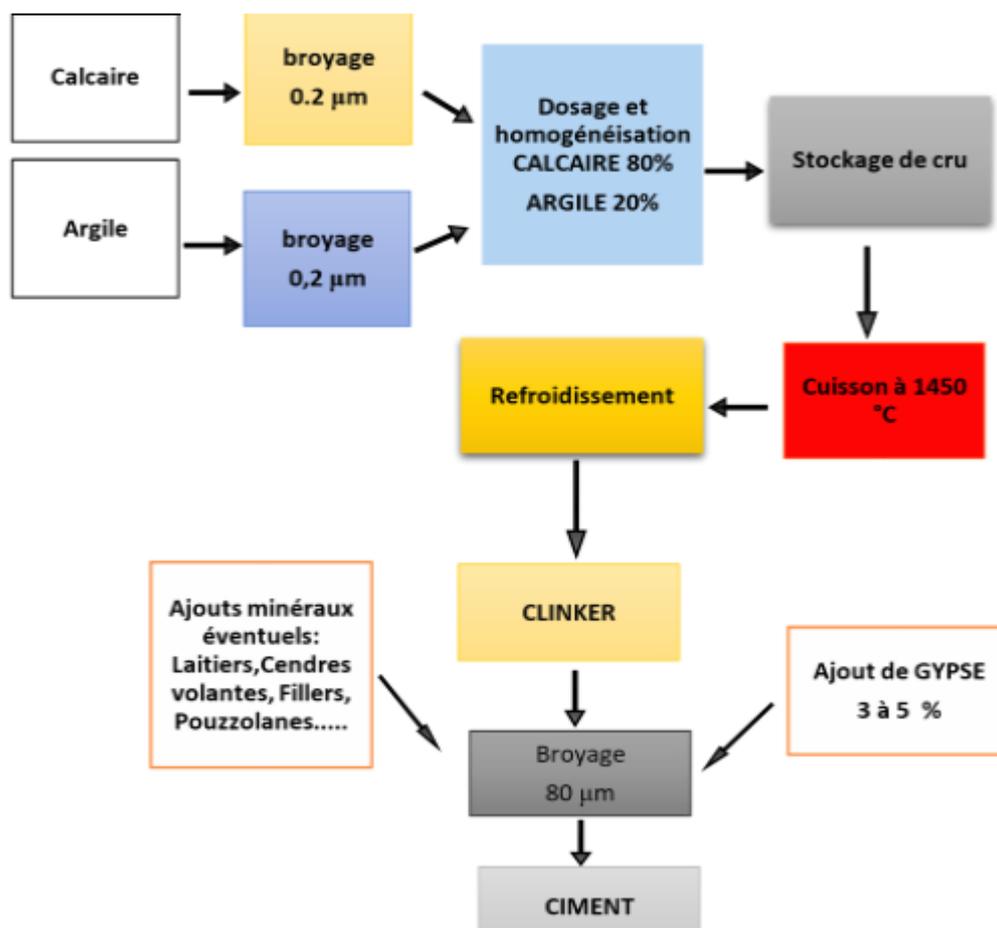
Formules et abréviations usuelles			
	Formule complète	Formule abrégée	Appellation courante
Eau	$H_2O$	H	Eau
Constituants chimiques	CaO	C	Chaux
	$SiO_2$	S	Silice
	$Al_2O_3$	A	Alumine
	$Fe_2O_3$	F	Oxyde ferrique
	$Na_2O, K_2O$	N, K	Alcalis
	MgO	M	Magnésie
	CaSO <sub>4</sub>	Cs	Sulfate calcium (anhydrite)
	CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	CsH <sub>2</sub>	Sulfate de calcium (gypse)
Constituants hydrauliques	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C <sub>3</sub> A	Aluminate de tricalcique
	$4CaO \cdot 3H_2O \cdot Fe_2O_3$	C <sub>3</sub> AF	Aluminoferrite tetracalcique
	$3CaO \cdot SiO_3$	C <sub>4</sub> AF	Silicate tricalcique
	$2CaO \cdot SiO_3$	C <sub>3</sub> S	Silicate bicalcique
Constituants hydratés	$3CaO \cdot 2SiO_3 \cdot 3H_2O$	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	Silicate de calcium hydraté (tobermorite)
	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$	C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	Aluminate de calcium hydraté
	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	
	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$	C <sub>3</sub> ACS <sub>3</sub>	Sulfoaluminate de calcium hydraté (attringite)
	Ca(OH) <sub>2</sub>	CH	Chaux hydraté

### 1.2.1.3 Matières premières pour la fabrication du ciment [5]

Pour la fabrication du ciment, les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Après on obtient le mélange appelé « le cru » qui est composé d'environ 80% de calcaire et d'environ 20% d'argile. La cuisson de cette matière crue à 1450 °C permet d'obtenir ce qu'on appelle le clinker qui est un constituant principal des ciments. Les constituants les plus utiles du ciment sont :

- Les calcaires,
- Le laitier granulé de haut fourneau,
- Les cendres volantes,
- Les schistes calcinés,
- Les fumées de silice, et les fillers.

### 1.2.1.4 Processus de fabrication du ciment



**Figure 1** : Processus de fabrication du ciment

### 1.2.1.5 Les différents types de ciment [6]

Les ciments de la norme NF EN197-1 sont définis comme ciments courants. Ils sont composés de clinker et des constituants secondaires, et on les classe en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon le tableau 2. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romain.

**Tableau 2 :** Les différents types de ciments de la norme NF EN 197-1 [6]

Types	Notation		Composition(en pourcentage en masse) (1)		
	dénomination	Symbole (2)	clinker	Constituants principaux	Constituants secondaires
CEMI	Ciment Portland	CEMI	95-100	0	0-5
CEMII	Ciment Portland au laitier	CEMII/A-S	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-S	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland à la Fumée de silice (3)	CEMII/A-D	90-94	6-10	0-5
		CEMII/A-P	80-94	6-20	0-5
	Ciment Portland à la Pouzzolane	CEMII/B-P	65-79	21-35	0-5
		CEMII/A-Q	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-Q	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland aux Cendres volantes	CEMII/A-V	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-V	65-79	21-35	0-5
		CEMII/A-W	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-W	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland au Schiste calciné	CEMII/A-T	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-T	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEMII/A-L	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-L	65-79	21-35	0-5
		CEMII/A-LL	80-94	6-20	0-5
		CEMII/B-LL	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland Composé(4)(5)	CEMII/A-M	80-94	6-20	0-5
CEMII/B-M		65-79	21-35	0-5	
CEMIII	Ciment de haut Fourneau (6)	CEMIII/A	35-64	36-65	0-5
		CEMIII/B	20-34	66-80	0-5
		CEMIII/C	5-19	81-95	0-5
CEMIV	Ciment Pouzzolanique(5)(7)	CEMIV/A	65-90	11-35	0-5
		CEMIV/B	45-64	36-55	0-5
CEMV	Ciment composé(5)	CEMV/A	40-64	36-60	0-5
		CEMV/B	20-39	61-80	0-5

-(1) : les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires

-(2) : Signification des lettres :

Les lettres A, B et C indiquent la quantité de constituants principaux autres que le clinker :

- A indique que cette quantité est faible ;
- B lorsque cette quantité est beaucoup plus grande
- C lorsque cette quantité est importante

La lettre M sert à signaler qu'on a au moins deux constituants principaux dans la composition du ciment.

Les caractères S (laitier de haut fourneau), D (fumée de silice), P (pouzzolane naturelle), Q (pouzzolane naturel calciné), V (cendre volante siliceuse), W (cendre calcaire), T (schiste calciné), L et LL (calcaire).

-(3) : la proportion de fumée de silice est limitée à 10% ;

-(4) : présence de plusieurs constituants principaux de différentes proportions ;

-(5) : les constituants principaux utilisés doivent figurer dans la désignation du ciment, symbole entre parenthèse () ;

-(6) : le laitier de haut fourneau est le seul principal ajout pour ce type de ciment ;

-(7) : les principaux ajouts sont de la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et des cendres volantes.

#### 1.2.1.6 Classe de résistance des ciments [7]

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, exprimée en MPa ( $1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2 = 10\text{ bar}$ ), conforme à la norme NF EN 196-1. Selon cette norme, les ciments sont répartis en trois classes : 32,5-42,5 et 52,5 ; définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours. Ces valeurs sont déterminées sur des mortiers normaux.

#### 1.2.1.7 Domaine d'utilisation des ciments courants [8]

Les domaines d'utilisation des ciments courants sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 3 : Domaines d'utilisation des ciments courants [8]**

Désignation	Symbole	Domaine d'utilisation
Ciment portland artificiel	CEMI	Béton armé ou béton précontraint ;  Décoffrage rapide ; Préfabrication ; Travaux en milieux agressif ;  Travaux à la mer ; travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
Ciment portland composé	CEMII	Travaux de maçonnerie, bétons peu sollicités ;  Travaux de toute nature en béton armé ou en béton précontraint ; Travaux massifs ;  Travaux exigeant de haute résistance initiale ;  Travaux en milieux agressifs
Ciment de haut fourneau ou au laitier	CEMIII/A  ou B	Travaux hydraulique, souterrains, fondations ;  Travaux en eaux agressives (eau de mer, eau séléniteuses, ...) ; Ouvrages massifs (barrages, fondations ...)
Ciment Pouzzolanique	CEMIV / A  ou B	Construction souterraine et sous-marine-en  Béton ;  Étanchéité et résistance l'eau
Ciment composé	CEM V/ A  ou B	Travaux importants en béton armé ;  Travaux en milieux agressifs ; Travaux en grande masse

## 1.2.2 Granulats

### 1.2.2.1 Définition [8]

Par définition, un granulats est un ensemble de grains minéraux appelés fines, sables, gravillons ou cailloux, suivant leur dimension comprise entre 0 et 125 mm, et qui est destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais. Il est constitué de squelette du béton, les granulats représentent environ 80 % du poids total du béton et améliorent leur résistance mécanique.

### 1.2.2.2 Rôle [9]

Le rôle des granulats dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. La maniabilité (l'ouvrabilité) des bétons dépend grandement des caractéristiques des granulats dont les principales sont:

- la granulométrie, la texture de surface des granulats et la forme des particules
- la résistance mécanique (compression, traction et module)
- La densité relative, la masse volumique
- l'absorption, la porosité et la teneur en humidité
- la présence de matières nuisibles
- la résistance aux cycles de gel et dégel
- la résistance à l'abrasion et aux chocs

### 1.2.2.3 Classification des granulats [10]

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulats est désigné par le couple d/D avec d : dimension inférieure du granulats et D : dimension supérieure du granulats.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés selon la norme NFP18-101 :

- Les fines 0/D avec  $D \leq 0,08$  mm,
- Les sables 0/D avec  $D \leq 6,3$  mm,
- Les gravillons d/D avec  $d \geq 2$  mm et  $D \leq 31,5$  mm,
- Les cailloux d/D avec  $d \geq 20$  mm et  $D \leq 80$  mm,
- Les graves d/D avec  $d \geq 6,3$  mm et  $D \leq 80$  mm,

#### 1.2.2.4 Les granulats les plus utilisés [11]

**Tableau 5** : Les granulats les plus utilisés

Les granulats les plus utilisés		
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,065 mm
Sables	0/D	$d=0$ et $D \leq 4$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Graves	0/D	$D \geq 6,3$ mm
Ballasts	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

Les intervalles d/D et 0/D sont appelés classes granulaires.

On peut avoir des différentes catégories de granulats selon leurs dimensions.

#### 1.2.3 Les fillers et les sables

##### 1.2.3.1 Le Filler

###### a) Définition

Les fillers sont des produits sous forme de poudres obtenus par broyage fin de certaines roches (calcaire, basalte...) naturelles ou non. On les utilise pour ajouts soit dans la confection des bétons, soit dans la formulation de bétons de sable

###### b) Rôles

La granularité de ces fillers ressemble à celle du ciment, cela contribue à une augmentation de certaines propriétés du mortier ou du béton et permet de réduire la perméabilité, la capillarité ou la fissure du mortier et les bétons

Le coût plus faible aussi rend l'exploitation de ces fillers à la confection des mortiers et des bétons

###### c) Les caractéristiques et les propriétés

Les fillers sont des grains minéraux de dimension inférieure à 2 mm, et dont 70 % sont inférieurs à 0,063 mm. On les utilise comme correcteurs pour l'emploi des différents bétons demandant une dureté spécifique comme dans une construction de route, dans des bétons hydrauliques, des bétons bitumineux. Ces mélanges sont donc très délicats car son dosage doit être précis et sa mélange d'une efficacité. Pour cela, il faut utiliser des matériels spécifiques et il faut qu'ils soient faits dans des installations.

### 1.2.3.2 Le sable

#### a) *Définition*

Les sables sont des substances granuleuses, dont les grains sont tous suffisamment petits qu'on peut faire passer dans de minuscules trous carrés de 5mm (Tamis) et 6,3 mm de diamètre dans des trous ronds (Passoire) c'est-à-dire que la dimension la plus grande (D) est supérieure ou égale à 5 mm et la dimension la plus petite (d) est supérieure ou égale à 2mm. Les graviers ou de gravillons ont des calibres plus supérieurs

#### b) *Rôles*

Le sable a un rôle primordial économique pour la résistance des mortiers et des bétons. Ajouté à la chaux grasse en quantité convenable, le sable augmente même sa résistance mécanique. De plus, en assurant l'aération qui facilite la prise, il empêche le gonflement de la chaux. Mélangé aux ciments, il en réduit de façon notable le retrait lors du séchage et le durcissement.

Utilisés comme constituants de bétons hydrauliques, de bétons bitumineux, de graves routières, de remblais ou d'enfouissement de réseaux divers. Le dosage du sable aux mélanges (Gravillons, fillers) doit être précis pour l'efficacité du mélange. Il est donc aussi recommandé de faire ces mélanges dans des installations spécifiques (centrales à béton, centrales d'enrobés, centrales de grave).

Il y a 3 catégories de sables :

- Sables fins dont les diamètres des grains variant de 80µm à 316µm
- Sables moyens dont les diamètres des grains variant de 316µm à 1,25mm
- Sables gros dont les diamètres des grains variant de 1,25mm à 5mm.

#### c) *Les différents types de sables*

Les types de sables se distinguent par la provenance du lieu où on les trouve, ils peuvent être donc d'origines naturelles ou artificielles. Mais le plus utilisé est les sables naturels, provenant de la désagrégation des roches sous l'action des agents atmosphériques ou de l'érosion superficielle ou encore durant leur charriage par les torrents les fleuves ou les courants marins.

On les distinguera suivants son origine

#### **Les sables de rivière**

Les sables de rivière sont en générale propres et de bonne qualité qui peuvent être siliceux ou calcaires. Le sable siliceux de rivière est constitué par des grains émoussés et luisants, et il est l'un de sable le plus utilisé

### ✚ Les sables de dunes

Les sables de dunes sont des fins et trop uniformes qui font pâte avec l'eau qui sont utilisés pour certains enduits, dans la condition de les mélanger à du sable plus gros.

### ✚ Les sables de carrière

Les sables de carrière contiennent souvent des éléments fins (matières organiques ou d'argile) selon le tamisage et la collecte.

Le tableau ci-dessous donne quelques caractéristiques de ces différents sables.

**Tableau 4 :** Caractéristiques des sables [12]

Sables de rivière	Sables de dune	Sables de carrière
10% de grains fins 30 à 60% de grain moyens Au moins 10% de gros grains	0 à 20% de grains fins 60 à 80% de grains moyens 10 à 25% de gros grains	10 à 30% de sables fins 20 à 30% de sables moyens 45 à 65% de sables gros

#### 1.2.4 Classification [13]

Les sables sont classés en différentes catégories en fonction de l'origine de leur formation : Les sables d'origine (issus de roches pré-existantes) sont dits « terrigènes » : lorsqu'ils sont formés par altération météorologique (pluie, neige) ou par érosion de roches grenues (granite, gneiss, etc.) (Ex : silicoclastiques). Dans ce cas, ils sont transportés par les cours d'eau. Ces sables peuvent également provenir des « éruptions explosives » qui émettent des sables volcaniques (autrement dit des cendres). Des sables d'origine, dits « reliques », se forment également sur les plateaux continentaux aux cours des fluctuations climatiques et des variations successives du niveau des mers. Ces sables se retrouvent alors en contrebas des marges continentales, grâce au transport réalisé par les courants de turbidité. Suivant la force du transport, les sables fluviaux peuvent atteindre la mer. Ils créent alors des deltas et des plages littorales.

Les sables éoliens s'accumulent en bordure des régions côtières (dune du Pilat dans le bassin d'Arcachon, par exemple) et dans des zones désertiques (les ergs du Sahara, par exemple) sous l'effet du vent.

Les sables bioclastiques, appelés aussi sables coquilliers, proviennent quant à eux de la fragmentation des animaux marins. Les sables coquilliers ou les constructions récifales sont enfouis progressivement sous les sédiments plus récents et entièrement lithifiés pour devenir des roches massives ou des roches calcaires.

D'autre part, l'accumulation des matières organiques essentiellement végétales et sa maturation en hydrocarbure et enfin son emprisonnement (par l'effet tectonique) vont former « le sable bitumineux ». Ce dernier va produire « du pétrole ». À Bemolanga par exemple renferme d'importantes quantités de sable consolidé bitumineux. C'est un grand gisement d'hydrocarbure à Madagascar.

### 1.2.5 Caractéristiques

Le sable est une arénite, c'est-à-dire une roche détritique non consolidée. Le sable représente un diamètre compris entre 0,0625 et 2 mm. Les sables peuvent être de très fins à très grossiers. Nous représentons dans un tableau ci-dessous les diamètres de chaque type du sable.

**Tableau 5 :** Caractéristiques des grains de sable.

Types des sables	Diamètre en mm
Sables très fins	0,0625 à 0,125
Sables fins	0,125 à 0,25
Sables moyens	0,25 à 0,5
Sables grossiers	0,5 à 1
Sables très grossiers	1 à 2

Source : [13]

En dehors de cette gamme de taille, on parle de lutites (silt, argile), lorsque la taille des grains est inférieure à celle des sables très fins et de rudites (graviers, galets, blocs), lorsque le diamètre des grains est supérieur à celui des sables grossiers.

Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées.

Le sable se caractérise également par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement.

On peut également différencier le sable par leur mode de transport. Ils sont anguleux quand le vent les transporte, et ronds quand le sable a été transporté par l'eau.

De plus, le sable éolien présente aussi une couleur plus opaque que le sable aquatique, plus translucide (poncé plus finement) dû aux multiples impacts que subit le sable aérien lors de son déplacement.

Le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature : rouge ou blanc. Exemple au cirque rouge présente de sable de couleur différente que les artisans l'utilisent pour la fabrication «des bouteilles de sable ».

Le sable noir vient des roches volcaniques (ex: Martinique, Réunion, cap d'Agde). Il y a même une plage de sable rouge en Bretagne, dû à la présence de nombreux grenats.

Sa dureté correspond à la dureté du quartz qui est égale à 7.

La densité massique du sable varie, selon sa granulométrie et sa composition, de 1,7 à 1,9Kg par litre (1850Kg en moyenne par m<sup>3</sup>).

### **1.2.6 Propriétés**

Le sable est généralement perméable. Suivant la granulométrie du sable, l'eau s'y infiltre facilement. Dans les granulations grossières, l'eau circule facilement mais par contre dans le sable très fin, l'eau s'écoule difficilement et peut se stocker. C'est ainsi que le sable est devenu un des éléments nécessaires et efficaces à la filtration d'eau. La qualité de l'eau s'améliore considérablement et diminue le nombre des micro-organismes dans l'eau filtrée.

Le sable suit généralement les variations de la température. Si la température du milieu augmente, le sable se chauffe et peut atteindre le maximum. Quand il se refroidit, il atteint la température de glace. A Madagascar par exemple, les gens mettent du sable dans leur four pour augmenter et maintenir la température. Les femmes l'utilisent pour griller les pistaches dans des poêles à frire remplies de grains de sable mélangés directement aux grains de pistaches rouges.

## **3.2. Les graviers ou gravillons : [14]**

Les graviers sont les éléments passant à travers des trous ronds des passoirs de 25 mm de diamètre.

On distingue :

- les petits graviers dont les diamètres des grains variant de 5 mm à 10 mm ;
- les graviers moyens dont les diamètres des grains variant de 10 mm à 16 mm ;
- les gros graviers dont les diamètres des grains variant de 16 mm à 25 mm.

Ils sont utilisés pour couche de base ou enduit spécial. Ils servent aussi de squelette pour les bétons usuels.

### 1.2.7 Eau [15]

L'eau utilisée pour la fabrication des mélanges de béton doit être de l'eau potable dépourvue de toutes impuretés et odeurs. La présence d'éléments nuisibles peut nuire aux propriétés du béton:

- Sucre retarde la prise du béton
- Acide réduit les résistances et corrode les armatures
- Les chlorures et les sulfates font dégrader le béton

L'eau de gâchage est conforme à la norme NF EN 1008. On n'a pas eu l'occasion de posséder cette norme donc par défaut, on a pris la norme NFP 18 303 qui régit les exigences requises pour les eaux de gâchage de béton.

Toutes les eaux potables conviendront, pourtant elle doit satisfaire aux exigences suivantes :

**Tableau 6 :** Caractéristiques de l'eau exigées selon la norme NFP 18 303 [16]

Constituants	Limites en pourcentage de l'eau (en masse)
Insoluble	< 0,2
Matières dissoutes	< 0,2
Carbonates+ bicarbonates alcalins	< 0,1
Sulfates en SO <sub>3</sub>	< 0,01
Sulfites en S	< 0,01
Sucres	< 0,01
Phosphates en P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0,05
Nitrates en NO <sub>3</sub>	< 0,01
Zinc	> 4
Acidité en pH	pas de coloration brunâtre
Acidité humique	

Quand l'une quelconque des limites indiquées dans le tableau est dépassée, l'eau peut éventuellement être utilisée sans réserve qu'elle satisfasse aux prescriptions concernant les essais de début et de fin de prise et les essais de résistance.

La teneur en chlorure ne doit pas dépasser 500mg/l.

La teneur maximale en ions- soufre est fixée à 0,5 %.

La quantité d'eau employée pour le gâchage du béton est toujours supérieure à celle nécessaire pour l'hydratation du ciment. La quantité d'eau de gâchage introduite dans la composition du béton influe, d'une part sur la qualité du béton, et d'autre part sur la facilité de mise en œuvre. L'eau entrant dans la composition du béton doit être pure, sans acide, ni alcali. L'eau de mer doit être à éviter dans toute la mesure du possible.

La normalisation officielle prescrit que les eaux employées pour le gâchage des bétons, ne doivent pas contenir des matières en suspension, ni être chargées de sels dissous au-delà de certaines proportions :

**Tableau 7** : Impuretés admissibles dans l'eau de gâchage [16]

Qualité du béton	Impuretés	
	En suspension	Dissoute
Pour les bétons de qualité	2 g / l	15 g / l
Autres bétons	5 g / l	30 g / l

### 1.2.8 Adjuvants [16]

#### 1.2.8.1 Définition

Les adjuvants sont des produits chimiques « purs » ou des mélanges de produits organiques ou minéraux qui sont généralement incorporés aux bétons lors du malaxage ou lors de la mise en œuvre. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton.

L'utilisateur peut être amené à utiliser simultanément plusieurs adjuvants ayant des fonctions différentes, soit pour obtenir des effets conjoints, soit pour corriger des effets secondaires non recherchés ou amplifier l'une des fonctions principales.

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant peuvent varier en fonction de son dosage dans le béton et les divers composants de celui-ci, en particulier du ciment. Pour l'interaction adjuvant-adjuvant, l'employeur doit s'assurer que les adjuvants utilisés sont compatibles entre eux, et qu'ils sont de même marque.

#### 1.2.8.2 Fonctions des adjuvants

##### a) Fonction principale

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons et (ou) mortiers et (ou) coulis, à l'état frais ou durci. L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier en fonction de son dosage et des matériaux utilisés.

##### b) Fonction secondaire

Un adjuvant peut également présenter accessoirement une ou plusieurs fonctions secondaires s'étendant au même domaine. Les fonctions secondaires sont également caractérisées par une efficacité qui est le plus souvent indépendante de celle de la fonction principale.

### c) *Effets secondaires*

L'emploi d'un adjuvant peut entraîner des conséquences dites effets secondaires qui sans être recherchés n'en sont pas moins inévitables.

#### 1.2.8.3 Les différents types d'adjuvants

On distingue :

##### ➤ *Les plastifiants réducteurs d'eau :*

De leur rôle double, ils permettent à la fois d'offrir au béton une consistance humide et la possibilité de réduire la quantité d'eau, la résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. Ils se caractérisent souvent par un effet secondaire «retardateur de prise » marqué lorsqu'on les utilise à un dosage élevé.

##### ➤ *Superplastifiants hautement réducteurs d'eau :*

Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants mais il se produit avec une intensité bien importante.

##### ➤ *Rétenteurs d'eau :*

Ils ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons. Ils sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment.

##### ➤ *Entraîneurs d'air*

Les entraîneurs d'air permettent une diminution du dosage en eau à maniabilité équivalente mais les résistances mécaniques sont cependant affaiblies et d'autant plus qu'elles sont plus élevées. Ils améliorent aussi la plasticité et l'ouvrabilité du béton.

##### ➤ *Accélérateurs de prise et de durcissement :*

Ils augmentent la vitesse d'hydratation du ciment donc permettent sa prise rapide. Ils sont utilisés souvent pour les bétonnages par temps froid ou pour les travaux urgents. Les résistances peuvent être légèrement diminuées

##### ➤ *Retardateurs :*

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation du ciment. Ils prolongent la durée de vie du béton frais.

##### ➤ *Hydrofuges :*

Ce sont des adjuvants qui, introduits dans la masse du béton, ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire. Ils ne sont vraiment efficaces que si le béton est bien compact et homogène et que toutes les précautions sont prises afin d'éviter la formation des fissures.

#### 1.2.8.4 Utilisations : [17]

**Tableau 8 : Utilisations des adjuvants**

<b>Adjuvants</b>	<b>Utilisation</b>
<b>Superplastifiants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité d'une bonne ouvrabilité</li> <li>• Pr é fabrication</li> <li>• B é tons è hautes r é sistance s</li> </ul>
<b>Plastifiants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport pneumatique du b é ton</li> <li>• Béton coulé sous l'eau</li> <li>• B é ton maigre : blancs, blocs manufactur é s</li> <li>• B é ton routier</li> <li>• Sable manquant de fines</li> <li>• B é ton tr è s ferrail lé</li> <li>• Injection (coulis et mortiers)</li> </ul>
<b>Acc é l é rateurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D é coffrage rapide</li> <li>• Temps froid – pr é fabrication</li> <li>• Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer</li> <li>• Réparation rapide, pistes d'aérodromes, routes, scellements</li> </ul>
<b>Retardateurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps chaud</li> <li>• Injection à grande profondeur ( é lévation de temp é rature)</li> <li>• Voile d'étanchéité</li> <li>• Transport de b é ton sur longue distance</li> <li>• Reprise de b é tonnage – confection de b é ton avec granulats apparents (parements lav é s)</li> <li>• Parois moul é s dans le sol</li> <li>• Coulage en contenu</li> </ul>
<b>Entraîneurs d'air</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Route, barrage, ponts – travaux maritimes</li> <li>• Ouvrages exposés à l'action des eaux agressives</li> <li>• B é tons extrud é s</li> </ul>

### 1.2.8.5 Les principaux adjuvants

**Tableau 9** : Liste des principaux adjuvants [18] [19]

<b>Retardateurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sucres et gluconates</li> <li>• Acides citriques et tartriques</li> <li>• Oxyde de zinc, les phosphates alcalins</li> </ul>
<b>Accélérateurs</b>	<u>De prise :</u> Alcalis, carbonates et sulfate de soude ou de potasse <u>De durcissement :</u> Chlorure et carbonate
<b>Plastifiant réducteur d'eau</b>	Lignosulfonates
<b>Entraineurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resine vinsol</li> <li>• Aryl alkyl sulfonates</li> </ul>
<b>Superplastifiant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resine melanine sulfonees</li> <li>• Naphtalene- sulfonates</li> <li>• Vinyl sulfonate</li> </ul>
<b>Rétenteurs d'eau</b>	Methyl cellulose ( methocel)

### 1.2.9 Additifs [20]

#### 1.2.9.1 Définition

Comme définition, un additif est un produit incorporé pour modifier certaines propriétés du béton ou pour lui conférer des propriétés particulières.

#### 1.2.9.2 Différents types d'additifs

Il existe plusieurs d'additifs admissibles dans le béton ; parmi eux citons les suivants :

- *Correcteurs granulaires :*

Les plus couramment utilisés sont les fillers calcaires et les cendres volantes. Ils sont utilisés surtout en raison de leur rôle de remplissage afin d'éliminer les vides présents dans les bétons.

- *Les fibres :*

Actuellement, il existe deux types de fibres : les fibres synthétiques (organiques ou minérales) et les fibres métalliques. Les bétons de fibres synthétiques se caractérisent par une meilleure cohésion liée à la dispersion des fibres dans toute la masse. Les fibres synthétiques peuvent constituer un réseau tridimensionnel très efficace permettant de maîtriser les risques de fissuration par retrait plastique du béton. Les fibres métalliques (acier, fonte amorphe, inox, fibres fraisées, fibres tréfilées...) améliorent le comportement post fissuration du béton en le transformant en un matériau ductile grâce à un effet des coutures des fissures. C'est le cas des ferrociments.

- *Les colorants :*

On utilise particulièrement des colorants pour des raisons d'esthétique. Pour la plupart, ce sont des oxydes minéraux.

La teinte finale recherchée dépend essentiellement du dosage et de la nature du colorant employé

### 1.3 Propriétés du béton [21]

Le béton possède deux comportements: **l'état frais** et **l'état durci**. Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est à grâce à l'eau que le béton peut être manipulé Réduire son dosage permet:

- d'augmenter la résistance en compression et en flexion
- réduire la perméabilité
- Réduire la contraction volumique (retrait de séchage)
- Moins de risques d'attaques d'agents agressifs extérieurs.

La réduction d'eau rend par contre le béton moins plastique. Avec l'incorporation des adjuvants chimiques, cela devient possible

### *1.3.1 Caractéristiques du béton frais*

La caractéristique essentielle du béton frais est l'**ouvrabilité** (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton:

- Méthode et durée de transport
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats)
- Forme, granulométrie et type de granulats
- Le volume d'air
- Le dosage en eau

### *1.3.2 Caractéristiques du béton durci*

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un mûrissement adéquat.

## **1.4 Différents types de béton [22]**

Il existe une grande variété de bétons permettant de réaliser. Voici un premier tableau synthétique ainsi qu'une liste non exhaustive de différents bétons utilisables.

**Tableau 10** : Différentes types de béton [22]

Type de béton	Avantages
Béton léger	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Malléable et léger</li> <li>• Résistant aux chocs</li> </ul>
Béton lourd	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Répond à des normes de sécurité très strictes</li> <li>• Dispose de granulats très lourds</li> </ul>
Béton armé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fondations renforcées par l'acier</li> <li>• Risque de fissuration du béton limité</li> <li>• Béton très adapté en utilisation avec un coffrage de type manuable, métallique, mixte, circulaire, sur-mesure...</li> </ul>
Béton autoplaçant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrêmement fluide</li> <li>• Mise en œuvre sans vibration pour un gain de temps conséquent</li> <li>• Béton très adapté en utilisation avec un coffrage métallique</li> </ul>
Béton fibré	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renforcement général de la fondation</li> <li>• Risque de fissuration du béton limité</li> </ul>
Béton prêt à l'emploi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gain de temps conséquent</li> <li>• Transféré et livré sur chantier</li> </ul>
Béton précontraint	<ul style="list-style-type: none"> <li>• État de compression optimal</li> <li>• Meilleure qualité de finition des fondations réalisées</li> </ul>
Béton haute-performance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus résistant à la compression</li> <li>• Plus fluide et moins poreux</li> </ul>
Béton projeté	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduit l'affaissement de la fondation</li> <li>• Empêche le coulage ultérieur du béton</li> </ul>

#### ***1.4.1 Le béton léger***

C'est un béton très malléable et très léger. Il est efficace pour tous les travaux de rénovation. Il résiste aux chocs et remplit très bien sa mission d'isolant thermique. Le béton léger s'emploie particulièrement pour les murs porteurs et les dalles.

#### ***1.4.2 Le béton lourd***

Le béton lourd dispose de granulats très lourds, ce qui permet de répondre à des besoins très précis tels que les ouvrages des centrales nucléaires. L'emploi de ce béton permet de ne laisser passer aucune trace de radiation et de répondre à des normes très strictes de sécurité

#### ***1.4.3 Le béton armé***

Le béton armé reprend les codes du béton pour fondation traditionnelle, mais auquel il est rajouté un nouveau matériau : l'acier. En posant des armatures de cette matière, la solidité d'une fondation en béton est renforcée. En effet, l'acier est un matériau très résistant aussi bien lorsqu'il est trébuché ou comprimé

Le principal objectif de ce béton est de compenser les principales faiblesses d'un béton plus conventionnel, à savoir sa résistance globale, et les risques de fissuration sur le plus long terme.

#### ***1.4.4 Le béton autoplaçant***

Le béton autoplaçant est un béton extrêmement fluide, facilitant grandement son utilisation. Avec ce béton, le but est de gagner un temps considérable lors du coulage sur chantier, car la mise en œuvre se fait sans vibration, contrairement aux bétons plus conventionnels.

Pour autant, une fois le béton solidifié sa qualité reste la même que sur un béton traditionnel.

Les coffrages béton métalliques sont adaptés au béton autoplaçant.

#### ***1.4.5 Le béton fibré***

Le béton fibré a le même objectif que le béton armé : renforcer la solidité générale de la fondation réalisée. La fibre a le même principe actif que l'armature utilisée sur le béton armé : elle limite les risques de fissuration du béton et améliore sa résistance sur le long terme.

L'avantage de la fibre, c'est également sa grande facilité de mise en œuvre sur chantier, assurant un gain de temps certain lors du coulage.

#### ***1.4.6 Le béton prêt à l'emploi***

Les bétons prêts à l'emploi sont des bétons directement con çus par les industriels dans leurs centrales à béton. Il est ensuite transporté à l'aide d'un camion toupie et directement transféré sur les chantiers clients. Une fois sur place, le béton prêt à l'emploi est appliqué par le camion toupie, soit par la pompe à béton, soit par la goulotte.

#### ***1.4.7 Le béton précontraint***

Le béton précontraint est un béton ayant la particularité de rester dans un état de compression optimal. Cet état de compression permet au béton d'être utilisé dans les meilleures conditions, ce qui favorise une meilleure finition.

Cet état de pression est construit à partir de câbles de précontrainte en acier, intégrés directement dans le béton comme cela est le cas avec les armatures en acier dans le béton armé. Sur un chantier, il est possible d'appliquer la précontrainte au béton avant le coulage du béton (pré-tension), ou bien après le coulage lorsque le béton durcit (post-tension).

Il est important de préciser que la précontrainte par post-tension est généralement plus efficace mais aussi plus difficile à mettre en œuvre que la précontrainte par pré-tension.

#### ***1.4.8 Le béton de ciment alumineux***

Le béton de ciment alumineux, se compose comme son nom l'indique de ciment alumineux. Ce type de ciment, à base d'aluminate de calcium, apporte différents avantages au béton : la prise est plus rapide, et la résistance est plus importante sur le long terme et également vis-à-vis des fortes chaleurs.

#### ***1.4.9 Le béton à haute performance***

Les bétons de haute-performance possèdent des caractéristiques beaucoup plus intéressantes que les bétons conventionnels. Ils ont à la fois plus résistants à la compression, et beaucoup plus fluides. Il s'agit également d'un béton moins poreux, protégeant ainsi plus efficacement les armatures préalablement déposées.

#### ***1.4.10 Le béton projeté***

Il s'agit d'un béton qui porte bien son nom, car il est volontairement projeté sur une surface solide par le biais d'un projecteur d'air comprimé.

Le but est de limiter l'affaissement et le coulage ultérieur du béton. En termes de composition, le béton projeté dispose de caractéristiques similaires au béton pour les fondations plus traditionnelles.

## **1.5 Principaux avantages et inconvénients [23]**

### ***1.5.1 Avantages du béton:***

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème d'écart de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

### ***1.5.2 Inconvénients du béton***

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants:

- son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux).

## CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES

### 2.1 Définition [24]

Etymologiquement, le mot géopolymère vient du mot grec « γῆ » qui veut dire terre et du mot polymère. Les géopolymères sont donc des polymères d'origine minérale. Ils font partie de la famille des aluminosilicates.

Le géopolymère est essentiellement un composé chimique minéral ou un mélange de composés constitués de motifs, par exemple silico-oxyde (-Si-O-Si-O-), silico-aluminate (-Si-O-Al-O-), ferro-silico-aluminate (-Fe-O-Si-O-Al-O-) ou aluminophosphate (-Al-O-P-O), créés par un processus de géopolymérisation.

### 2.2 Les Polymères [25]

Un polymère est une substance généralement organique, liquide ou solide à température ambiante et qui est constituée de macromolécules ayant la même nature chimique.

Nous pouvons aussi définir un polymère comme étant un matériau composé d'une répétition d'unité relativement simple, appelée monomère ou motif.

Les types de polymères

Selon leur structure, nous avons les polymères à structure linéaire et bi ou tridimensionnelle.

Mais selon leur mode d'obtention, nous avons les polymères naturels et synthétiques et selon la réaction d'obtention, nous pouvons citer les polymères de polycondensation, de polyaddition et de polymérisation.

### 2.3 La Géopolymérisation [26]

La géopolymérisation ou géosynthèse est une réaction qui intègre chimiquement des minéraux impliquant naturellement la présence de silicoaluminates. Dans ce genre de réaction, l'atome de silicium et de l'aluminium réagissent pour donner des molécules chimiquement et structurellement comparables à celles des liants des roches naturelles qui permettent d'acquérir les propriétés idéales des éléments rocheux, à savoir dureté, stabilité chimique et longévité.

En d'autre terme, à la place du pétrole et de la chaîne carbonée des polymères organiques, des matières minérales composées de silicium et de l'aluminium prennent place pour former les géopolymères.

## 2.4 Les Géopolymères [27]

### 2.4.1 Classification

Les géopolymères peuvent être classés en deux grands groupes : les géopolymères entièrement *inorganiques* et les géopolymères contenant une certaine quantité d'*organique*.

Au début de la recherche, les renseignements qui étaient à disposition étaient très succincts. Ils provenaient essentiellement de la minéralogie et de la cristallographie des argiles, notamment de la *kaolinite*.

Il était difficile de prédire et de comprendre la réactivité chimique et le mécanisme de géopolymérisation en se basant sur la représentation structurale géométrique sous forme de tétraèdre, pentaèdre ou hexaèdre, encore couramment en usage dans de nombreuses publications. D'où la nécessité d'introduire une écriture mettant en avant les groupes réactionnels chimiques, essentiellement basée sur l'analogie avec la chimie des polysilicones.

## 2.5 Synthèse des géopolymères [28]

On distingue deux voies de synthèse :

- en **milieu alcalin** ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cs}^{2+}$ , etc.), souvent confondu avec la simple activation alcaline des ciments ;
- en **milieu acide** avec de l'acide phosphorique et les acides humiques.

La voie alcaline est la plus importante en termes de réalisation, d'innovation et d'applications commerciales.

### 2.5.1 Avantages

- Dur Comme une roche
- ils résistent aux agressions chimiques et à l'érosion du temps
- Les matières premières sont principalement des minéraux d'origine géologique c'est-à-dire, il y a abondance de matière première en silice et en alumine.

### 2.5.2 Inconvénient

Le défaut des géopolymères est leur **caractère céramique**, c'est-à-dire leur manque d'élasticité. L'incorporation d'organique vise à améliorer cette propriété mécanique.

### 2.5.3 Utilisations et applications

- Il permet la fabrication de matériaux employés dans les applications céramiques
- les composites fibreux de haute technicité pour l'industrie automobile, l'aéronautique et la défense
- les peintures et colles anti-feu sans solvant organique, en passant par les biomatériaux pour prothèses osseuses
- les nouveaux ciments écologiques sans dégagement de gaz à effet de serre CO<sub>2</sub>
- Une nouvelle classe de matériaux hybrides à matrice organique et géopolymérique permet l'amélioration des propriétés mécaniques et physiques du géopolymère proprement dit
- À la place de dérivés du pétrole et de la chaine carbonée, on utilise de la matière minérale composée de silice et d'alumine. Cette géosynthèse permet de réaliser des matériaux pouvant remplacer certains plastiques, mais ils n'ont aucun solvant dangereux, ne brûlent pas et ne dégagent pas de gaz ni fumées toxiques

### 2.5.4 Les produits géopolymériques

Le domaine de leurs utilisations dépend de leurs propriétés ainsi que des proportions des matières premières utilisées ou exactement de la proportion de l'atome de silicium et celui de l'aluminium.

Nous pouvons citer :

- les ciments géopolymères ;
- la résine géopolymère pour la stabilisation des différents matériaux telles les latérites en vue de la fabrication de brique de terre ;
- les briques à basse température appelés en terme géopolymérique brique LTGS ;
- les matériaux à très haute résistance au feu ;
- les articles de décoration tels les statuettes.

Les géopolymères sont actuellement développés et appliqués dans 9 principales classes de matériaux :

- géopolymère à base de silicate : le poly (siloxonate), un silicate soluble, dans lequel Si:Al=1:0 ;
- géopolymère à base de kaolinite / Hydrosodalite : le poly(sialate), dans lequel Si:Al=1:1 ;
- géopolymère à base de métakaolin MK-750 : le poly(sialate-siloxo), dans lequel Si:Al=2:1 ;

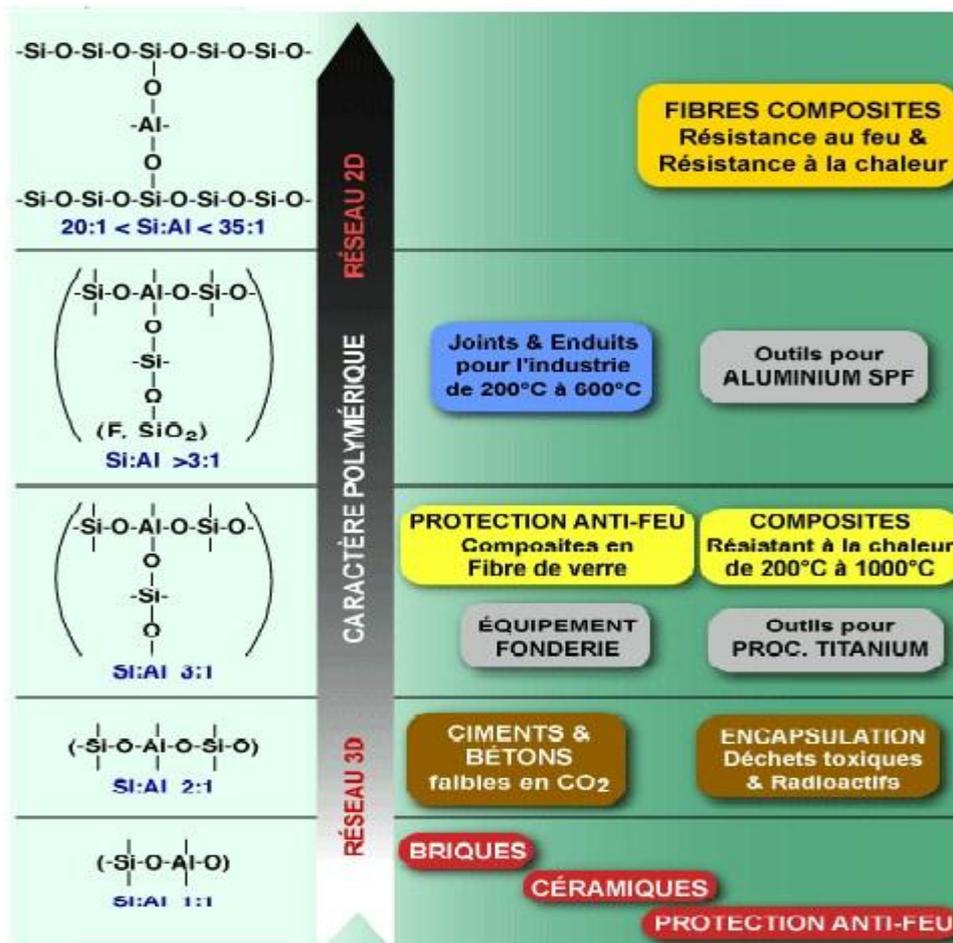
- géopolymère à base de calcium silico-aluminate, (Ca, K, Na)-sialate, dans lequel Si:Al=1, 2 ou 3 ;
- géopolymère à base de roches : le poly(sialate-multisiloxo), dans lequel  $1 < \text{Si:Al} < 5$  ;
- géopolymère à base de silices, liaisons sialate et siloxo dans un poly(siloxonate), dans lequel Si:Al>5 ;
- géopolymère à base de cendres volantes ;
- géopolymère à base de phosphate ;
- géopolymère à base d'organo-minéral.

Ils comprennent les unités moléculaires suivantes (oligomères et polymères):

- siloxo (-Si-O-Si-O-) et poly(siloxo) ;
- sialate (-Si-O-Al-O-) et poly(sialate) ;
- sialate-siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-) et poly(sialate-siloxo) ;
- sialate-disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) et poly(sialate-disiloxo) ;
- phosphate (-P-O-P-O-) et poly(phosphate) ;
- phospho-siloxo (-P-O-Si-O-P-O-) et poly(phospho-siloxo) ; • phospho-sialate (-P-O-Si-O-Al-O-P-O-) et poly(phospho-sialate) ;
- organo-siloxo [-(R)-Si-O-Si-O-(R)-] et poly-silicone.

Le domaine d'utilisations des produits géopolymères selon leurs structures est donné selon le tableau suivant :

Figure 2: Applications sur les g éopolym ères.



## 2.6 La Silice [29]

La silice compose notamment les roches magmatiques et les roches métamorphiques, tel le schiste ; le quartz est également très abondant dans certaines roches sédimentaires, comme le grès.

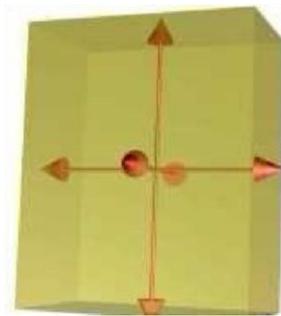
### 2.6.1 Définition

La silice est le constituant principal du sable. Sous forme de quartz, elle est formée par la combinaison de l'atome de silicium (numéros atomique 14, masse atomique 28) et l'atome d'oxygène (numéros atomique 8, masse atomique 16), sa formule chimique est SiO<sub>2</sub> (dioxyde de silicium).

### 2.6.2 Formes et structures cristalline

Tout comme d'autres matériaux, la silice a une forme cristalline. En général, elle cristallise dans un système rhomboédrique c'est-à-dire l'atome de silicium est situé au centre d'un tétraèdre dont les sommets sont occupés par les atomes d'oxygène. Dans la silice, les tétraèdres sont tous liés entre eux par leurs sommets et chaque atome d'oxygène est donc commun à deux tétraèdres successifs.

La figure suivante nous montre la forme d'un système rhomboédrique



**Figure 3 :** La forme d'un système rhomboédrique

Dans le système rhomboédrique : les longueurs des cotés sont égaux ( $a=b=c$ ), les angles sont définis par  $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$ , et les éléments de symétrie sont représentés par  $A_3 3A_2 3C_2$ .

### 2.6.3 Différents état de la silice

Elle est très répandue dans la nature, dans la plupart des cas, la silice se présente sous deux états différents :

- ✓ Etat naturel ou anhydre  $\text{SiO}_2$  (dioxyde de silicium).
- ✓ Etat amorphe ou hydraté sous forme d'opale de formule  $\text{SiO}_2 - n\text{H}_2\text{O}$ ,  $n=3$  ou  $4$

#### 2.6.3.1 La silice cristallisée

Sous forme cristallisée, la silice peut encore avoir différentes appellations.

Ce sont :

- le quartz : il cristallise dans le système hexagonal. Ce type de silice se trouve très répandu dans la nature et c'est l'un des éléments les plus importants de nombreuses roches. Leur densité est de 2,5.

Sous l'action de la chaleur, le quartz se transforme en Trydimite et en cristobalite.

- le trydimite : il cristallise dans le système orthorhombique. Mais, à plus de  $163^\circ\text{C}$ , la cristallisation se fait dans le système hexagonal.

Le Trydimite a une densité égale à 2,66.

- la cristobalite : ce nom vient du fait que cette variété a été identifiée pour la première fois près de San Cristobal, au Mexique .Il cristallise dans le système quadratique et dans le système cubique pour une température supérieure à 250 °C.

Comme zone de stabilité sous pression ordinaire, à 867 °C, le quartz se transforme en trydimite. Quand la température atteint 1470 °C, le trydimite se transforme en cristobalite et à 1725 °C, celui-ci se transforme en silice fondue.

Ces transformations sont réversibles et ont une grande importance dans la fabrication et dans l'usage des briques de silice. Comme exemple, le passage d'une espèce à l'autre se fait avec un changement de volume qui peut faire éclater les briques.

#### 2.6.3.2 La silice amorphe

Le verre de silice quelquefois improprement appelé verre de quartz a une structure mal connue.

La silice amorphe a une densité entre 2,10 à 2,20.

#### 2.6.3.3 La silice hydratée

La variété la plus pure est appelée opale.

La silice hydratée a une densité entre 1,9 et 2,3 selon la proportion de l'eau.

#### 2.6.3.4 Le point de fusion

La fusion s'accompagne d'un accroissement de volume important, près de 20%.

A 1670 °C, le trydimite fond avec un faible accroissement de volume : 3%. Tandis que la température de fusion de la cristobalite s'élève jusqu'à 1710°C accompagnant d'un accroissement de volume de 4%. Celle du verre de silice se trouve entre la température de 1710 °C et 1800 °C.

En outre, le verre de silice peut dévitrifier et cristalliser en cristobalite.

## 2.7 Propriétés

### 2.7.1 *Propriétés thermiques*

C'est la silice qui a la plus faible valeur de coefficient de dilatation de tous les corps connus. Son allongement est de 0,55mm/m pour une variation de température entre 20 °C et 1000 °C.

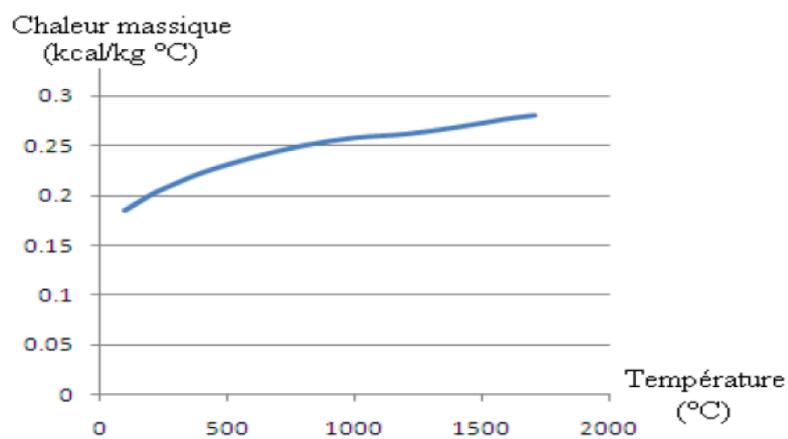
Elle résiste bien au choc thermique et est de ce fait supérieure aux autres réfractaires.

La chaleur massique et la conductivité thermique de la silice varie de façon croissante avec la température (Tableaux 13 et 14, figures 7, 8 et 9).

**Tableau 11** : La chaleur massique de la silice

Température ( °C)	Chaleur massique (kcal/kg °C)
100	0,1850
200	0,2006
250	0,2068
400	0,2229
600	0,2385
800	0,2506
1000	0,2584
1200	0,2621
1400	0,2691
1600	0,2777
1700	0,2810

Source : [29]

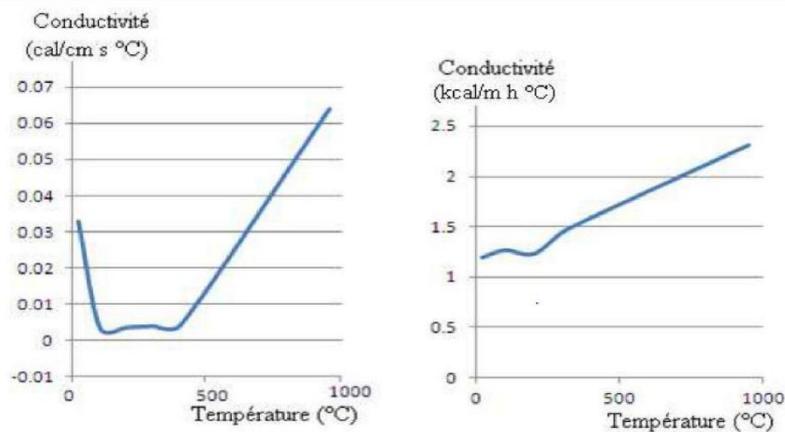


**Figure 4** : L'évolution de la chaleur massique de la silice en fonction de la température.

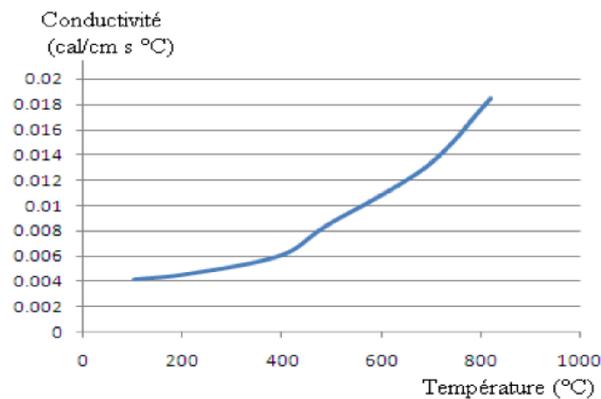
**Tableau 12:** Conductivité thermique de la silice [29]

Conductivité thermique de la silice						
Fondue		Transparente			Opaque	
T (°C)	$\lambda$ (cal/cm s °C)	T (°C)	$\lambda$ (cal/cm s °C)	$\lambda$ (kcal/mh °C)	$\lambda$ (cal/cm s °C)	$\lambda$ (kcal/m h °C)
104	0,0041	20	0,0330	1,1900	0,0026	0,9350
214	0,0046	100	0,0035	1,2600	-	-
398	0,0060	200	0,0037	1,2250	-	-
488	0,0084	300	0,0040	1,4400	-	-
691	0,0131	400	0,0044	1,5850	-	-
819	0,0185	950	0,0640	2,3100	-	-
		0-100			0,0033	1,1900

Source: [29]



**Figure 5 :** La conductivité thermique de la silice transparente.



**Figure 6 :** La conductivité thermique de la silice fondue.

### **2.7.2 Propriétés physiques et mécaniques**

La silice constitue un bon isolant électrique même à une température élevée et dans une atmosphère humide.

#### Densité

La densité se trouve entre 2,07 et 2,10 pour la silice opaque et 2,15 à 2,21 pour la silice transparente.

#### Dureté

La silice raye les métaux (aciers) et les verres.

D'après l'échelle de MOHS, si opaque, elle a une dureté entre 4,9 et 6 et si transparente, celle-ci peut atteindre 7.

#### La résistance à la compression

La résistance à la compression de la silice peut atteindre jusqu'à 250 MPa.

### **2.7.3 Propriétés chimiques**

En général, la silice ne peut pas être attaquée par les acides excepté l'acide fluorhydrique et l'acide phosphorique.

En outre, le cuivre pur et l'argent pur n'ont aucun effet sur la silice. Mais, le nickel la réduit à la température de 1200 °C et elle ne reste pas intacte avec les oxydes métalliques.

## **2.8 L'Alumine [29]**

### **2.8.1 Généralités**

L'alumine est l'un des éléments qui constituent la chimie géopolymère. La teneur en alumine influe sur la plasticité au matériau. Une teneur élevée confère au matériau une plasticité élevée.

### **2.8.2 Définition**

L'alumine est obtenue par la combinaison de l'atome d'aluminium avec l'oxygène, sa formule chimique est  $Al_2O_3$  et nommé oxyde d'aluminium. Elle est le plus abondant oxyde métallique de la croûte terrestre après la silice.

### **2.8.3 Procédés de fabrication de l'alumine**

On donne deux procédés de fabrication de l'alumine : **le procédé Deville** et **le procédé Bayer**.

### 2.8.3.1 Le procédé Deville

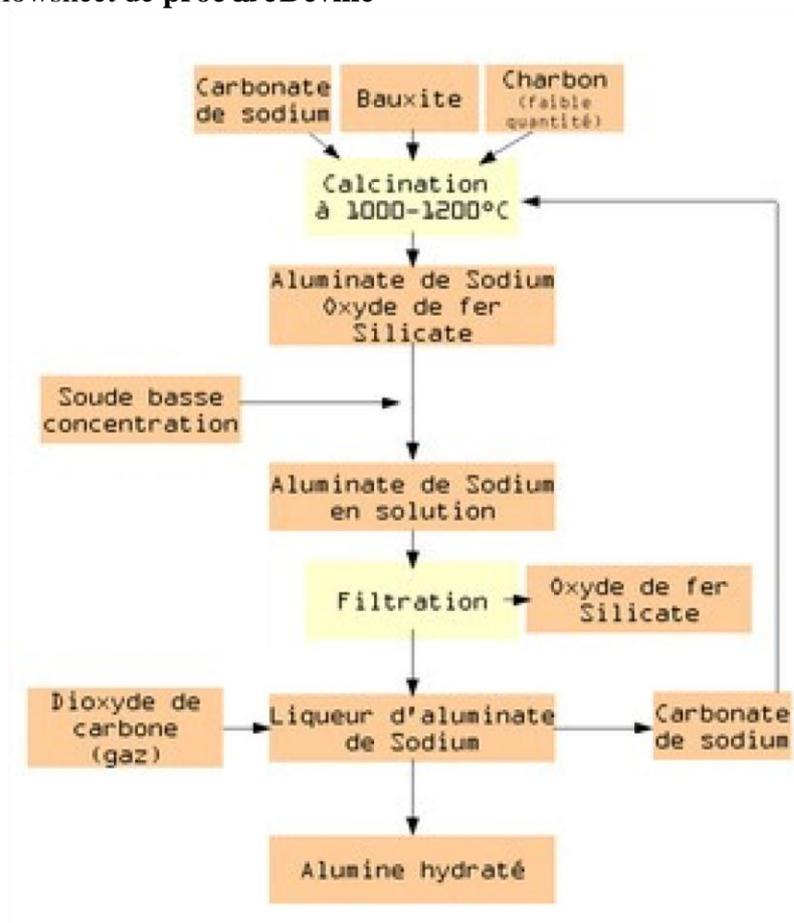
Il est bas é sur l'extraction de l'alumine contenue dans la bauxite par du carbonate de sodium.

La premi ère op ération consiste à calciner à 1 200 °C un m élange de bauxite broyé avec du carbonate de sodium et un peu de charbon. L'alumine se transforme en aluminat e de sodium. L'oxyde de fer reste inchang é et la silice forme un silicate double. Par addition de soude (NaOH), il y a dissolution de l'aluminat e de sodium alors que les autres composés restent sous forme solide. La quantit é de soude utilis ée d épend de la quantit é de silice contenue dans le minerais.

Par filtration, on s épare la liqueur d'aluminat e de sodium des autres corps. On fait barboter du dioxyde de carbone gazeux dans la liqueur afin de précipiter de l'alumine hydratée et de reconstituer du carbonate de sodium. Ce dernier peut être r éutilis é.

L'alumine hydratée est ensuite calcinée pour obtenir de l'alumine.

Voici le flowsheet de **proc é Deville**



**Figure 7 :** Flowsheet de proc é Deville

### 2.8.3.2 Le procédé Bayer

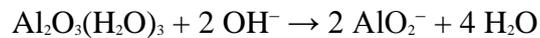
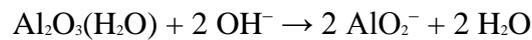
Il est basé sur la dissolution de l'alumine provenant de la bauxite par de la soude. Dans la bauxite, l'alumine est présente sous forme d'hydrate : gibbsite : trihydrate,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_3$  et boehmite ou diaspre : monohydrate,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})$ .

La soude est une base forte qui fournit des ions hydroxyde :



À chaud, la soude dissout l'alumine alors que les impuretés (oxyde de fer, silice, oxydes divers), restent insolubles.

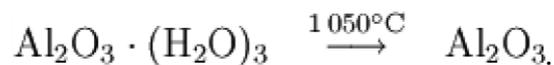
Les réactions de dissolution sont les suivantes :



Pour être efficace, la décomposition demande la présence d'hydrate d'aluminium fraîchement extrait. Une partie de l'hydrate d'alumine produit est réutilisée dans le processus de production. Les impuretés sont séparées de la liqueur d'alumine par décantation et filtration.

En refroidissant et en diluant la liqueur, la réaction est inversée. Il y a précipitation d'un hydrate d'alumine.

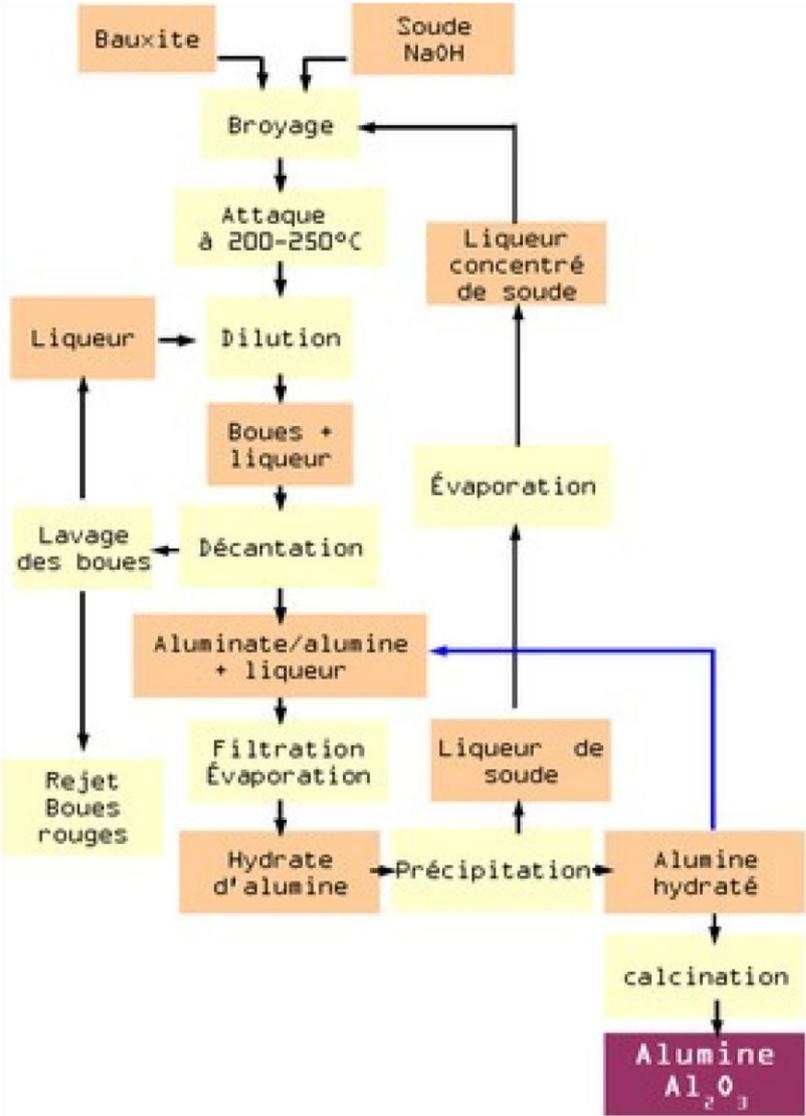
Le trihydrate d'alumine est calciné afin de produire de l'alumine :



La calcination permet donc au trihydrate d'alumine de perdre ses 3 molécules d'eau pour devenir de l'alumine.

Le procédé Bayer d'érônnera les autres méthodes de production de l'alumine à partir de la bauxite. Il est toujours utilisé aujourd'hui.

On donne ci-après le flowsheet de **procéd Bayer**



**Figure 8 : Flowsheet de procéd Bayer**

## CHAPITRE 3 : GENERALITES SUR LA BALLE DE RIZ

### 3.1 Définition [30]

La balle de riz est un sous-produit dérivé du décorticage du riz, opération qui permet de transformer le riz récolté (ou riz paddy), en riz complet (ou riz cargo). Ce dernier doit subir une deuxième étape de transformation, le blanchiment, qui consiste à ôter le péricarpe pour donner le riz blanc et un autre coproduit, le son. La balle de riz est constituée par les glumes et glumelles, bractées modifiées qui enveloppent l'épillet.

### 3.2 Propriétés [30]

#### 3.2.1 Aspect physiques et propriétés thermiques

La balle de riz est d'une couleur brun-beige, de consistance dure, beaucoup plus résistante que celle du blé

Ce produit, léger et volumineux, dont la densité oscille entre 132 et 140 kg/m<sup>3</sup>, est pratiquement imputrescible et inattaquable par les insectes.

Sa teneur en éléments nutritifs est faible (3,3 % de protéines et 1,1 % de matières grasses) quand la cellulose représente 45 % de la masse.

Le paddy, sur une moyenne, se compose d'environ 72% de riz, de 5 à 8% de son, et de 20 à 22% de balle.

En général, la densité de la balle de riz peut varier de 86 à 114, Le pouvoir calorifique supérieur varie entre 14,72 et 18,31 MJ/kg et le pouvoir calorifique inférieur entre 13,24 et 16,20 MJ/kg.



Figure 6: balle de riz en vrac

### 3.2.2 Propriétés chimiques [31]

Peu de travaux existent sur la composition chimique exacte de la balle de riz, qui est principalement constituée de polysaccharides. Certains rapportent cependant l'analyse élémentaire de cette dernière, ainsi que la nature des éléments minéraux présents comme présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 13 :** Composants chimiques de la balle de riz en [%]

Hémicellulose	Cellulose	Lignine	Silice	Matière extractive
18-21	25-35	26-31	15-25	2-5

Source : [31]

**Tableau 14 :** Composition élémentaire de la balle de riz

Teneur pondérale [%]						
Reference	C	H	O	N	S	Cendre
Kaupp	41,00	5,00	37,60	0,60	-	15,50
Cruz	35,80	5,20	35,80	-	-	23,50
Beagle	42,12	5,35	31,72	0,49	0,07	20,29
Mansaray et Ghaly	37,60-44,20	5,10-5,42	31,50-35,20	0,38-0,51	0,015-0,034	14,70

Source : [31]

### 3.3 Utilisation de la balle de riz [31]

#### 3.3.1 Combustible

La balle de riz est utilisée, par plusieurs pays en développement, comme combustible pour la cuisson des briques en terre cuite, des tuiles, des poteries Madagascar est parmi ces pays qui pratiquent cette technique.

Dans les pays développés elle est utilisée en tant que combustible dans des grandes industries pour remplacer les carburants.

#### 3.3.2 Isolant dans les briques cuites

Mélangée à l'argile avant cuisson, la balle de riz peut apporter des caractéristiques isolantes aux briques cuites. Les petits morceaux de balle de riz sont en effet gazéifiés lors de la cuisson et créent des micro-alvéoles au sein de la brique.

Ces petites poches d'air apportent un plus en terme d'isolation thermique et de légèreté

### **3.3.3 Confection de son**

Déjà au niveau des petites décortiqueuses, la balle de riz est broyée et mélangée avec tous les autres sons. On obtient en effet qu'un seul type de son où tout est mélangé.

Au niveau des grandes rizeries (qui séparent son et balle de riz), certains valorisent la balle de riz seule en un son de mauvaise qualité. Ces gens sont des opérateurs privés qui broient la balle de riz (avec les petites décortiqueuses), la mettent en sac et la vendent comme aliment pour bétail à Dakar et en Mauritanie. Le marché semble plus porteur en Mauritanie qu'au Sénégal. Parfois le sac de Balle de Riz (environ 15 kg) est acheté 100 FCFA au niveau des rizeries pour être revendu entre 1000 et 1500 FCFA comme «son ».

Cependant cet aliment de mauvaise qualité a entraîné quelques problèmes au niveau des troupeaux (maladie, gonflement de ventre...), ce qui fait que certains opérateurs ont arrêté l'activité.

### **3.3.4 Anti-moustiques**

Les animaux des troupeaux sont souvent fortement dérangés la nuit par les moustiques. Cela les empêche de bien se reposer et rend alors plus difficile la conduite des animaux (possibilité de maladies associées). La balle de riz est répartie en petit tas autour et dans le troupeau qui passe la nuit. Les tas sont allumés avec une braise. La combustion est lente et sans flamme et elle produit beaucoup de fumée qui agit comme répulsif anti-moustique.

### **3.3.5 Productions d'engrais**

Elle est utilisée comme engrais pour l'agriculture en la mélangeant avec du fumier des animaux domestiques; On la met dans leur dortoirs afin d'obtenir facilement l'engrais.

### **3.3.6 Matériaux de construction**

Les temples du site de Batujaya en Indonésie (V<sup>ème</sup> siècle après J.C) étaient construits avec des briques contenant de la balle de riz.

## CHAPITRE 4 : GENERALITES SUR LE KAOLIN

### 4.1 Le Kaolin

#### 4.1.1 *Définition* [32]

Ethimologiquement, le mot kaolin provient du mot chinois « kaoling » colline dev ée nom du lieu où l'on extrait le kaolin pour la première fois. C'est le plus commun d'un groupe de silicates hydratés d'aluminium qui résultent de la décomposition de silicate d'aluminium comme le feldspath ou la néph éline. La composante essentielle dans le kaolin est la kaolinite. La kaolinite pure correspond à la formule chimique  $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$  et appara ît en masse argileuse blanche, des impuret és peuvent lui donner des couleurs ou teintes vari és.

#### 4.1.2 *Propri ét és* [33]

##### 4.1.2.1 Propri ét és physiques

Le kaolin pur, est de couleur blanche ou blanch âtre. Néanmoins, il peut être diversement color é : jaun âtre, rouge âtre, grisâtre, ... en raison des impuret és constitués principalement par des micas, quartz, et des hydroxydes de fer. Il est opaque et sa température de fusion est d'environ 1750°C. On peut dire alors que le kaolin est un matériau réfractaire.

##### 4.1.2.2 Propri ét és chimiques

Le kaolin n'est pas attaqué par les acides et les bases diluées ; par contre il se décompose sous l'effet de l'acide sulfurique concentré.

Comme toutes les argiles, le kaolin présente des propri ét és absorbantes et adsorbantes :

- Absorption d'eau
- Absorption de mati ère grasse

##### 4.1.2.3 Propri ét és m écaniques

La propriété mécanique caractéristique du kaolin est sa plasticité ; avec l'eau il forme une p âte très plastique

EAU + KAOLIN —————> PÂTE PLASTIQUE

#### 4.1.3 *Les principales utilisations du kaolin* [33]

Le kaolin trouve son application dans la vie quotidienne de l'homme. Parmi lesquelles, nous pouvons citer :

- *la fabrication du papier*

Le kaolin est utilis ésoit comme charge soit comme couchage.

Employ écomme charge, celui-ci doit avoir une blancheur sup érieure à 80% sur cru ainsi qu'une granulométrie entre 2µm (au min 50% en masse) et 44µm (au max 0,1%).

- *la céramique fine*

Le kaolin doit avoir au minimum une blancheur de 80%.

- *la fabrication de caoutchouc*

Le kaolin améliore la résistance mécanique et la résistance à l'abrasion des produits.

Les teneurs en ses matières volatiles et solubles ne doivent pas excéder respectivement 2% et 3%.

- *la fabrication des matières plastiques*

Le kaolin permet d'obtenir des surfaces très lisses résistantes aux acides.

- *la production des peintures*

Il tient le rôle de charge et ne contenant pas de matières volatiles à teneur supérieure à 2%, ni de matières solubles plus de 0,5%. Ainsi, sa granulométrie reste entre 2 µm (de 15 à 85%) et 45 µm (0,05 à 0,5%).

- *en médecine*

Le kaolin est utilisé comme activateur pour tester la coagulabilité du plasma dans certains tests biologiques. Il est également utilisé pour le traitement de certains troubles digestifs.

## CHAPITRE 5 : GENERALITES SUR LA CHAUX

### 5.1 Définition [34]

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique.

### 5.2 Classification de la chaux [34][35]

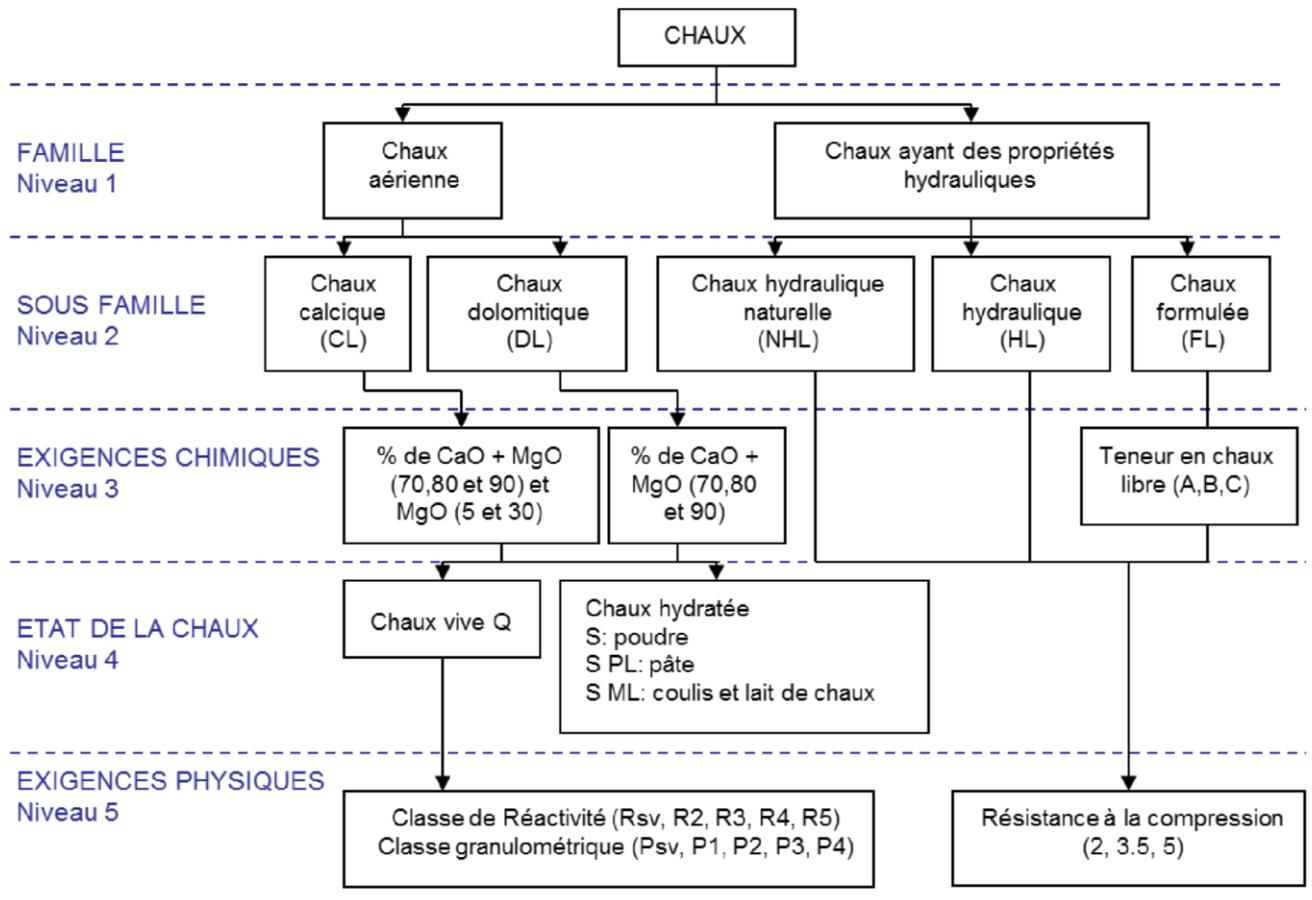
Les trois grandes familles de chaux (chaux aérienne, chaux naturelles et chaux hydrauliques) se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

- Les chaux aériennes : fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.

- La chaux vive ( $\text{CaO}$ ) : C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avide d'eau. La chaux vive en contact de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser  $150^\circ$  (réaction très exothermique).

- La chaux éteinte ( $\text{CaOH}_2$ ) : Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte s'appelle Extinction. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

- Les chaux hydrauliques : Sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent.



**Figure 9 :** Classification de la chaux proposée par la norme NF EN 459-1 [35]

### 5.3 Caractéristiques de la chaux : [34]

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tels que :

- Un pouvoir assainissant et désinfectant
- Une esthétique que l'on peut obtenir avec un autre liant ;
- Une participation à la respiration de l'ouvrage ;
- Une élasticité ;
- Une tenue dans le temps encore inégalée ;
- Une absorption des CO<sub>2</sub> lors de la carbonisation

### 5.4 Domaines d'application [35]

Les chaux aériennes et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont destinées au domaine de la construction en général (bâtiment et génie civil). Cependant, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et donc leur domaine d'application, diffèrent d'une famille à l'autre.

• *Dans le domaine du bâtiment :* les chaux aériennes, sous forme hydratée, et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont principalement utilisées dans la confection de mortiers, enduits et badigeons ainsi que dans la fabrication du béton de chanvre.

• Dans le domaine du génie civil : les chaux aériennes, principalement calciques à l'état vif, sont utilisées pour le traitement des sols et des matériaux (recyclage, valorisation, réemploi). La chaux aérienne calcique, sous forme vive ou hydratée, est utilisée comme composant, et éventuellement activateur, dans des liants à base de ciments, laitiers, cendres volantes, etc. La chaux aérienne calcique sous forme hydratée entre dans la composition des mortiers techniques (mortiers d'injection, mortiers de bourrage de tunnels, etc.).

• Dans le domaine des enrobés bitumineux : la chaux aérienne calcique, sous forme hydratée peut être utilisée comme additif multifonctionnel dans les enrobés bitumineux.

Les laits de chaux calciques, trouvent une application en protection des couches d'accrochages.

Ces dernières, répandues avant la pose de l'enrobé bitumineux, restent fragiles vis-à-vis de la circulation des engins de chantier. Les laits de chaux les protègent contre l'arrachement des roues et des chenilles d'engins.

## CHAPITRE 6 : GENERALITES SUR LA SOUDE [36]

### 6.1 Définition

L'hydroxyde de sodium est un solide blanc de formule chimique NaOH. Pur, il est appelé communément *soude caustique* ou *soude* mais ce dernier terme est ambigu car il est aussi utilisé pour désigner le carbonate de soude.

Sa présentation la plus connue est celle dissoute dans l'eau, c'est-à-dire en solution aqueuse, souvent appelé **soude**, ou encore **lessive de soude**. Il y est en effet très soluble. C'est une solution basique, transparente, visqueuse, encore plus corrosive qu'à l'état pur en raison de son aspect mouillant, qui augmente l'action et le contact avec la peau.

### 6.2 Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques de l'hydroxyde de sodium sont surtout liées à l'ion hydroxyde  $\text{HO}^-$  qui est une base forte. En outre, l'hydroxyde de sodium réagit avec le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'air et se carbonate.

#### Solubilité

La solubilité de l'hydroxyde de sodium caustique dans l'eau augmente avec la température, à pression constante ou ambiante. Elle est de 1 090 g/l à 20 °C (solution à 50 %) et atteint 3 137 g/l à 80 °C.

Cette solubilité élevée, très supérieure par exemple à celle de la chaux ou des autres hydroxydes alcalino-terreux, l'abondance de sa production industrielle et son prix de revient inférieur à la potasse caustique, en font la base minérale la plus utilisée dans le monde.

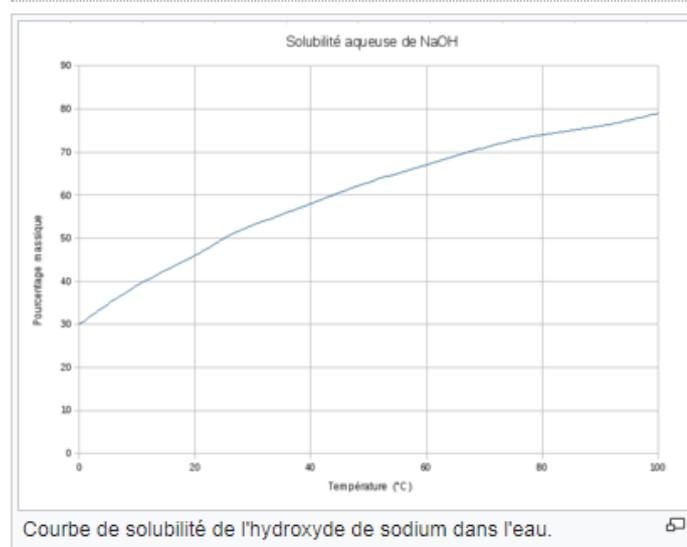


Figure 10 : Courbe de solubilité de la soude dans l'eau

### 6.3 Techniques de fabrication

La soude est obtenue par électrolyse du chlorure de sodium (NaCl).

Il s'obtenait majoritairement par une *électrolyse avec cathode de mercure* (anode : titane ; cathode : mercure). Cette opération produit en même temps du chlore, de l'hydroxyde de sodium en solution et de l'hydrogène. Mais le mercure est un métal lourd nocif à très faible dose par bioaccumulation, plus encore lorsqu'il est transformé en mono- ou di-méthylmercure par les bactéries.

### 6.4 Utilisations industrielles importantes

#### 6.4.1 Dans l'industrie chimique

L'hydroxyde de sodium est utilisé en grande quantité par plusieurs industries. La moitié de la production reste dans l'industrie chimique, où elle participe à l'élaboration de plus de 400 produits de base, par des procédés de chimie minérale ou de synthèse organique.

L'autre emploi, principalement en tant que base, la rend indispensable, par ordre d'écroissant des besoins :

- à la fabrication des pâtes à papier ;
- à l'industrie des produits de nettoyage :
  - savons,
  - détergents,
  - les déboucheurs chimiques sont souvent à base d'hydroxyde de sodium ;
- au traitement des eaux ;
- au lavage des gaz ;
- dans l'industrie pétrolière ;
- dans l'industrie de l'aluminium :
  - à la préparation du minerai (attaque ou traitement de la bauxite du procédé Bayer),
  - lors des préparations par immersion dans une solution plus ou moins concentrée, décapages des pièces avant les traitements anticorrosion par anodisation et les préparations de soudure ;
- dans l'industrie textile :
  - traitement des fibres naturelles (cellulose),
  - obtention de fibres régénérées,
  - de la rayonne ou soie synthétique,
  - dans l'industrie de certaines fibres textiles artificielles et des plastiques ;

- dans l'industrie des colorants...

La soude est utilisée dans certains produits d'éfrisant pour cheveux, mais a tendance à être abandonnée dans les cosmétiques modernes.

#### **6.4.2 Dans l'agroalimentaire**

L'hydroxyde de sodium sert à :

- nettoyer les installations (circuits, bouteilles) ;
- modifier l'amidon ;
- dans le raffinage de l'huile alimentaire ;
- épiluchage chimique ;
- c'est aussi un additif alimentaire (E524), il sert comme régulateur de l'acidité et il est utilisé dans une large gamme de produits.

#### **6.4.3 Dans l'énergie**

La soude peut être utilisée pour stocker de l'énergie solaire sous forme chimique. En effet, la réaction entre l'hydroxyde de sodium (ou la soude, sa solution aqueuse) et l'eau est fortement exothermique. Une fois la soude diluée, il suffit d'utiliser directement l'énergie solaire pour faire s'évaporer l'eau et revenir à l'état initial.

La réaction de l'hydroxyde de sodium avec l'eau et l'aluminium produit un dégagement d'hydrogène qui peut faire fonctionner un moteur à explosion sans émission de dioxyde de carbone.

#### **6.4.4 Dans les laboratoires d'analyse et industries chimiques**

L'hydroxyde de sodium est la base la plus communément utilisée en laboratoire. Elle sert à de nombreux dosages, ainsi qu'à la précipitation d'hydroxydes. Elle intervient dans les réactions d'hydrolyse.

La soude est également utilisée comme un réactif pour des tests de chimie. En effet, en présence de certains cations métalliques, elle forme un précipité d'une certaine couleur (et de formule générale  $M(OH)_n$ , où M est le métal).

## **CHAPITRE 7 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX ANTI-ACIDES**

### **7.1 Effets positifs des couches de protection sur le béton [37]**

Mais comment fabriquer un béton plus résistant aux acides ? Une possibilité est la pose d'une couche protectrice. Il peut s'agir d'un revêtement, d'un imprégnant ou d'un agent hydrofuge, combiné ou non. Sur la base de cette recherche, nous pouvons conclure que les systèmes de protection fournis améliorent la résistance du béton contre la corrosion des acides : par rapport au ciment Portland non traité et à un facteur eau-ciment de 0,50, les systèmes de protection testés affichent des performances meilleures, de 22 à 42 %.

La résistance aux acides peut être améliorée en choisissant un facteur eau-ciment moindre, en utilisant du ciment de haut fourneau et/ou en appliquant une couche de protection.

### **7.2 Facteur eau-ciment moindre, meilleure résistance à l'acide**

Une première analyse indique que les différences dans les compositions du béton ont un impact sur la résistance aux acides. À un facteur eau-ciment moindre, la résistance aux acides est améliorée. Cela s'explique par le fait que les pores du béton rétrécissent. L'acide s'y infiltre plus difficilement et la corrosion s'en voit dès lors atténuée.

### **7.3 Le ciment de haut fourneau affiche de meilleures performances**

Le choix de ciment influence lui aussi considérablement le résultat. Un ciment de haut fourneau affiche des performances nettement meilleures qu'un ciment Portland. Cela est dû à deux choses : tout d'abord, un ciment de haut fourneau présente une structure de pore plus dense, ce qui induit une infiltration de l'acide plus lente. Ensuite, un ciment de haut fourneau présente une proportion de calcaire plus faible dans le collage. Le graphique et la photographie ci-joints présentent les résultats d'un ciment de haut fourneau et d'un ciment Portland.

Une résine de sol industriel qui s'applique sur du béton brut ou en recouvrement de tout revêtement époxy. Cette résine de finition pour sol industriel est destinée à un usage intérieur. Ce vernis anti-acide contre l'agression chimique du sol est doté d'une excellente résistance aux acides, bases dilués et solvants.

Le béton est généralement protégé avec une résine de protection anti acide, par exemple époxy. Le revêtement époxy résiste généralement chimiquement aux eaux acides stockées, mais par contre la protection n'est plus efficace en cas de fissuration du béton. Le revêtement se fissure également à ces endroits, et les produits corrosifs attaquent le béton par les fissures et créent ensuite

des décollements du revêtement. Dans de tels cas, il est nécessaire de tout déposer et de refaire un traitement complet de protection.



**Figure 11 : Résine époxyde**

#### **7.4 Applications de la résine époxy [38]**

Le revêtement résine Epoxy émail glacés sans solvant destiné à une protection anti-acide sur les supports (ciment, acier, bois, PVC). Voici quelques exemples d'applications de ce résine :

Trafic industriel :

- permet de sécuriser les zones de stockage de produits chimiques.
- protection anti-corrosion, antiacide et anti-base sur résine époxy, polyuréthane, quartz coloré
- béton brut, carrelage, joints anciens ou poreux, bois, métal, PVC.
- permet d'obtenir des revêtements de sols glacés et décontaminables pour industries chimiques et nucléaires.
- protection anti-acide et anti-base des bacs de rétention, des caniveaux.
- traitement des bacs de récupération des effluents.
- protection interne des cuves ciment et acier.

#### **7.5 Avantages de la résine époxy**

- Résistance exceptionnelle aux agressions chimiques : acides, bases, alcool, soude ;
- Pas de vapeur nocive, sans odeur, séchage rapide ;
- Tenue excellente à l'abrasion et aux chocs ;
- Finition glacée : facilite le décontamination ;
- Application à froid ou à chaud (système de pistolet bi composants)



**Figure 12 :** Application de la résine époxy sur le carreau

## **7.6 Autres types de matériaux anti-acides**

### **7.6.1 Des plastiques résistants aux acides**

- Polypropylène
- PTFE (polytétrafluoroéthylène)
- PEEK (polyétheréthère)
- ECTFE (chlorotrifluoroéthylène-éthylène)
- PVDF (polyfluorure de vinylidène)

### **7.6.2 Des matériaux métalliques résistants à la corrosion**

- Acier inoxydable : acier, inox...
- Alliage : fer, carbone, nickel...

### **7.6.3 Autres matériaux anti-acides**

- Combinaisons de matériaux :
  - matériaux céramiques : fibre, mastic...
  - géopolymères : peintures géopolymères...

**PARTIE II. ETUDES  
EXPERIMENTALES**

## CHAPITRE 8 : APPROVISIONNEMENT ET IDENTIFICATION EN MATIERES PREMIERES

### 8.1 Choix de matière première de base

Les critères de choix sont :

- ces matières premières de base sont disponibles in-situ ;
- les réserves sont en grande quantité donc économiquement exploitables ;
- les carrières sont facilement accessibles ;
- ces matières premières de base possèdent les qualités requises à la fabrication du liant et le béton.

Ces critères cités ci-dessus sont très importants, car ils influent sur la qualité technique, la disponibilité et le coût du produit obtenu. Nous tenons à signaler que la qualité technique, la disponibilité et le coût constituent le triangle qualité d'un produit.

### 8.2 Les matières premières

Pour la fabrication de notre béton géopolymères, nous allons citer quelques matières premières très importantes les uns que les autres :

- **Sable** : provient de la rivière d'Ambohimambola



**Photos 1:** Sable 0/0,4

- **gravillon** : qui constitue le squelette du béton, acheté localement



**Photos 2:** Gravillon 0/8

- **balle de riz** : acheté dans une machine de décorticage de riz à Antsirabe



**Photos 3:** Balle de riz

- **Kaolin** : dont la formule chimique est  $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$  acheté dans la société PROCHIMAD. Ce kaolin provient du gisement d'Analabe qui se trouve à 200km au Sud d'Antananarivo ; plus précisément dans la carrière d'Ibity à Antsirabe.



**Photos 4:** Kaolin 40  $\mu\text{m}$  d'épaisseur

- **Chaux** : c'est une fleur de chaux nommée BOUTSIKA, d'un sac de 4kg acheté et déjà en poudre assez fine dans une quincaillerie :



**Photos 5:** Chaux BOUTSIKA

- **Eau** : extrait d'une pompe locale, nous avons utilisé celle de JIRAMA ;
- **Soude** : acheté par kg dans l'industrie SPCI situé à Iavoloha Antananarivo ;



**Photos 6:** Soude caustique

- **Ciment Lucky CEM II/A 42,5**: utilisé pour la fabrication du béton ordinaire en faisant témoins et de les comparer ensuite ;
- **L'acide chlorhydrique** et **l'acide sulfurique** : acheté dans un magasin de produit chimique situé à Analakely Antananarivo dans une bouteille de un (1) litre à chacun. Ses deux (2) acides sont purs et très dangereux.



**Photos 7:** HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> purs

### 8.3 Mat ériels utilis és

#### 8.3.1 Four

C'est un appareil ou une enceinte maçonnée, muni d'un syst ème de chauffage puissant, qui transforme, par la chaleur, les produits et les objets. Il atteint une temp érature tr ès élevée jusqu'à 1000 °C.



**Photos 8:** Four de calcination

#### 8.3.2 Broyeur

Il est constitué d'un cylindre en rotation sur son axe horizontal, contenant une charge de boulets, dans lequel on introduit un mat ériau à broyer finement.



**Photos 9:** Broyeur à boulet

#### 8.3.3 Incin érateur

Un incin érateur est un dispositif visant à réduire ou détruire des objets par incin ération, c'est-à-dire, par une combustion aussi compl ète que possible.



**Photos 10:** Incin érateur balle de riz

### 8.3.4 *Tamis*

C'est une grille de maillage plus ou moins fin, servant à trier les particules solides, fixée sur un cadre.



**Photos 11:** Tamis d'après AFNOR 0,4 mm

### 8.3.5 *Table vibrante*

C'est une machine électrique, panneau vertical lisse, formant éventuellement le fond d'un cadre ou en saillie ; ici, elle est utilisée pour éliminer les vides.



**Photos 12:** Table vibrante de 1000 à 2000 vibrations par minutes

### 8.3.6 *Balance*

C'est un outil permettant de peser et tarer de façon précise (généralement au gramme près) les matériaux nécessaires à l'élaboration d'un mélange. Elle est donc de taille réduite et a une capacité limitée.



**Photos 13:** Balance de précision

## 8.4 Préparation des matières premières

### 8.4.1 Concassage

Nous avons concassés les gravillons, c'est-à-dire de réduire en petites parties (jusqu'à 8 millimètres) avec un outil (marteau).



**Photos 14:** Concassage

### 8.4.2 Tamisage

Puis nous avons tamisé les gravillons concassés sur un tamis d'ouverture 8 mm, afin d'obtenir le diamètre voulu.



**Photos 15:** Tamis 0/8

De même pour le sable et la chaux.



**Photos 16:** Tamis 0/0,4

### 8.4.3 Combustion balle de riz

Le but principal est d'avoir des cendres riches en silice fine très essentielles et aussi pour les rendre très actifs. Il est donc nécessaire de faire :

#### 8.4.3.1 Calciner la balle de riz ;

La température de cuisson des balles de riz est de l'ordre de 600°C. A ce titre nous avons besoin d'un incinérateur de balle de riz pour atteindre notre objectif.

Il est constitué de brique 1m de côté et d'une hauteur 1m dont la partie supérieure est fermée par un couvercle. Nous avons placé une cheminée à l'intérieur du four et une petite ouverture en bas pour contrôler la température et l'action du vent atmosphérique.



**Photos 17:** Incinérateur balle de riz

#### 8.4.3.2 Un processus de cuisson balle de riz

Etape n°1 : on introduit une quantité de balle de riz, la moitié ;



**Photos 18:** une part de balle de riz

Etape n°2 : Nous allons amorcer le feu par des charbons de bois incandescents, quand la balle commence à s'allumer, on enlève les débris de charbons ;



**Photos 19:** amorçage charbon de bois

Étape n° 3 : On contrôle les systèmes d'aération en fonction du mouvement du vent atmosphérique ;



**Photos 20:** système d'aération

On le presse pour que le feu puisse bien se propager ;



**Photos 21:** Pression à main nue

Avant de le fermer avec le couvercle, il faut bien vérifier si le feu se propage suivi d'une émission de gaz carbonique ou plus sur une fumée blanche ;



**Photos 22:** vérification du feu

Et on ferme par une toiture en tôle ;



**Photos 23:** Couvercle en tôle

Si la combustion est complète, on obtient de la RHA (Rice Husk Ash), sinon, on obtient du CRH (Carbonized Rice Husk).



**Photos 24:** Combustion balle de riz

La RHA possède de bonnes propriétés pouzzolaniques. Elle se présente sous forme « amorphe », et s'obtient au travers d'une combustion contrôlée à haute température.

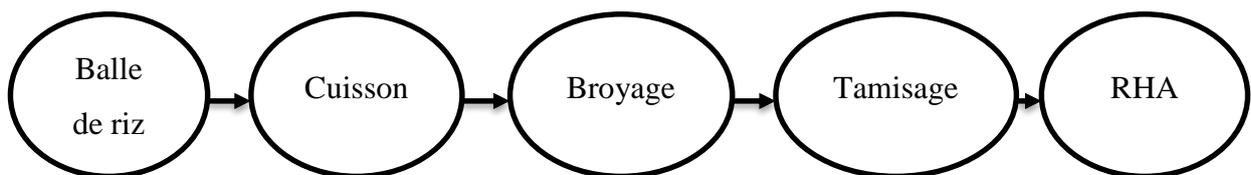
La CRH est obtenue par une combustion non contrôlée de balles de riz. Elle se présente sous la forme de « cristallite » et possède de faibles propriétés pouzzolaniques.



**Photos 25:** balle de riz carbonisé (CRH)

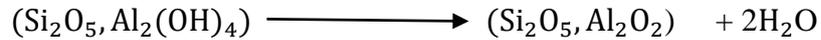
Lorsqu'on obtient les cendres de balle de riz, on les met dans le broyeur à boulet pour les rendre fine près pour la prochaine étape qui est le tamisage, ça sert à éliminer les incuits et les dimensions supérieures à son ouverture.

Processus de l'obtention de cendre de balle de riz:



#### 8.4.4 Traitement du kaolin

Le besoin est le métakaolin source en alumine. Notre kaolin est en poudre fine de 40 µm de diamètre. Elle est mise au four qui commence à une température de 50°C et monte jusqu'à 750°C d'une vitesse constante de 7°C/mn. Et lorsque la température 750°C est atteinte, on gère le temps de calcination de 3 à 4 heures. D'où la réaction ;



### 8.5 Caractéristiques des matières premières

#### 8.5.1 Caractéristiques géométriques des granulats

##### 8.5.1.1 Granulométrie

Le but de l'essai est de déterminer la granularité des granulats utilisés.

L'essai consiste à :

- fractionner au moyen d'une série de tamis à mailles carrés, les granulats en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes ;
- peser les refus sur chaque tamis.

#### Matériels :

- tamis à mailles carrés ;
- balance de précision

#### Conduite de l'essai :

Soit M la prise d'essai nécessaire pour l'analyse granulométrique par tamisage. La prise d'essai est en fonction de la dimension du plus gros grain observé visuellement noté D. M est défini par la marge suivante :

$$300 \cdot D \text{ [mm]} < M \text{ [g]} < 500 \cdot D \text{ [mm]}.$$

- Peser une quantité de masse M de l'échantillon ;
- Former la série de tamis et introduire la masse M dedans, et tamiser. Chaque tamis va retenir des grains de diamètre supérieur à celui de ses mailles ;
- Noter le refus de chaque tamis ;
- Calculer le pourcentage de refus cumulés correspondant à chaque tamis. On utilise les relations suivantes :

$$\% \text{ Refus} = \sum \frac{\text{Refus cumulé}}{\text{Refus cumulé}} * 100 ;$$

$$\% \text{ Passant} = 100 - \% \text{ Refus}$$

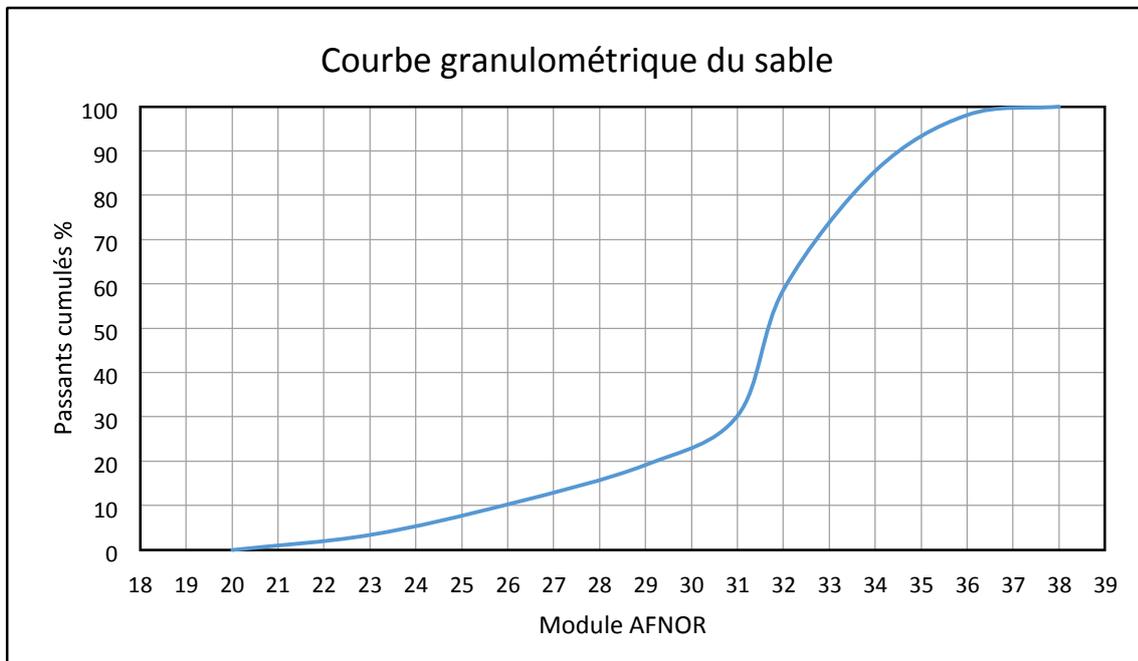
## Résultats :

L'analyse granulométrique du sable est présentée dans le tableau suivant :

**Tableau 15** : Résultat d'analyse granulométrique du sable

Diamètres des tamis en (mm)	Module AFNOR	Refus cumulés en (%)	Passants cumulés en (%)
5	38	0	100
3,15	36	3,4	96,6
2	34	10,3	89,7
1,25	32	19,2	80,8
1	31	30,3	69,7
0,630	29	58,7	41,3
0,315	26	85,5	14,5
0,160	23	98,1	1,9
0,080	20	100	0

La courbe granulométrique du sable est montrée par la figure suivante :



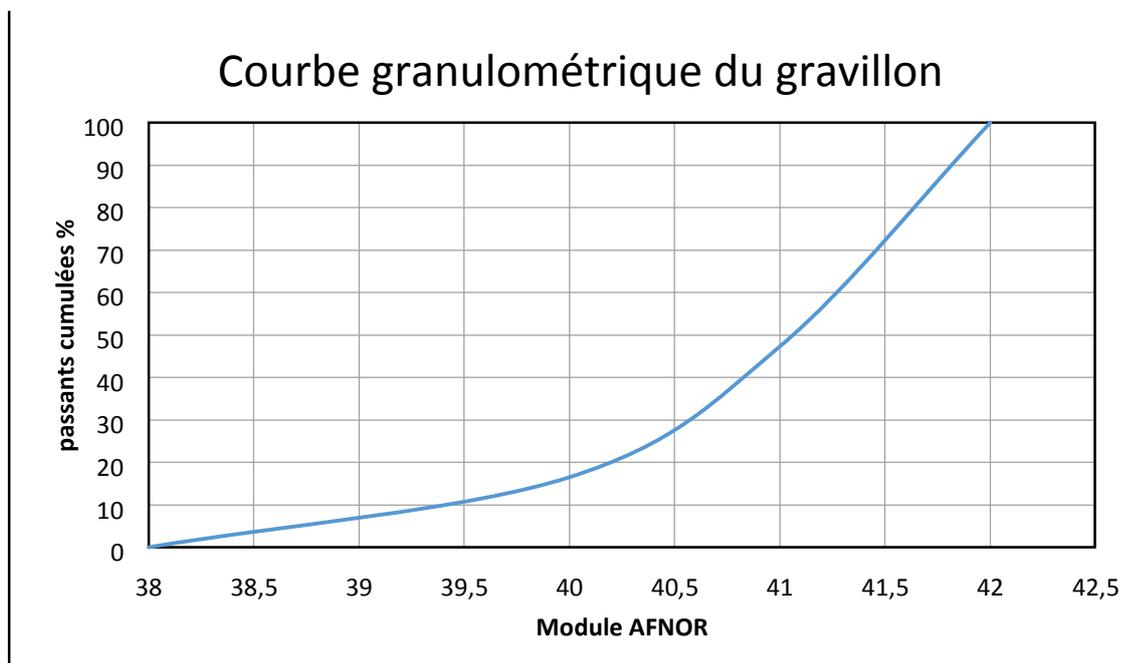
**Figure 13** : Courbe granulométrique du sable

Les résultats de l'analyse granulométrique du gravillon sont présentés par le tableau suivant :

**Tableau 16** : Résultat d'analyse granulométrique du gravillon

Diamètres des tamis en (mm)	Module AFNOR	Refus cumulés en (%)	Passants cumulés en (%)
12,5	42	0	100
10	41	16,5	83,8
8	40	47,3	52,7
5	38	100	0

La figure suivante montre la courbe granulométrique du gravillon :



**Figure 14** : Courbe granulométrique du gravillon

#### 8.5.1.2 Module de finesse

La norme française NFP 18 - 540 définit que le module de finesse est calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{1}{1000} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{016 - 0,315 - 063 - 125 - 25 - 5\}$$

D'après le calcul, le sable a un module de finesse  $Mf = 2,71$

On peut dire que le sable a une bonne qualité pour la confection d'un béton car il est compris entre 2,2 et 2,8 ; ce qui est le module de finesse mieux pour la fabrication d'un bon béton.

### 8.5.2 Caractéristiques physiques RHA

**Tableau 17 :** Caractéristiques physiques des cendres de balle de riz

Surface spécifique de Blaine (SSB) cm <sup>2</sup> /g	10000
Masse volumique apparente en Kg / m <sup>3</sup>	295,00
Couleur	Noir-gris
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,61
Poids spécifiques (g/cm <sup>3</sup> )	2,40

Source : Auteur

### 8.5.3 Composition chimique de cendre de balle de riz

La composition chimique élémentaire de nos cendres de balle de riz est donnée après les analyses chimiques dans le tableau suivant (teneur en pourcentage) :

**Tableau 18 :** La composition chimique élémentaire des cendres de balle de riz

Minéralisation	Teneur en %
SiO <sub>2</sub>	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trace – 0,50
K <sub>2</sub> O	1,25
Na <sub>2</sub> O	0,90
CaO	0,55
MgO	0,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,52
SO <sub>3</sub>	0,61
Cl	Trace – 0,35
TiO <sub>2</sub>	<0,10
MnO <sub>2</sub>	0,10
PF	3,1

Source : Auteur

### 8.5.4 Caractéristiques de la chaux

Voici les résultats des analyses chimiques donnés par le producteur Exama à Madagascar :

**Tableau 19 :** composition chimique de la chaux

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Perte au feu
0,20	0,05	0,10	-	15,80	53,95	28,90

Source : Auteur

### 8.5.5 Caractéristiques du kaolin et m éakaolin

Le kaolin est caract éris é par :

- Une faible dureté (2 selon l'échelle de Mohs)
- Un haut degré de blancheur
- Un contenu élevé en alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui en fait un excellent réfractaire
- Une granularité très fine et une bonne opacité due à la forme lamellaire des cristaux de kaolinite.
- La teneur en eau du kaolin est de w= 1%
- La masse volumique apparente du m éakaolin est  $\rho_{MK} = 680 \text{ Kg/m}^3$
- La masse spécifique du m éakaolin est  $\gamma_{MK} = 2710 \text{ Kg/m}$

La composition min éralogique du kaolin de la société PROCHIMAD est ci-dessous :

**Tableau 20:** Caractéristiques chimiques du kaolin

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	PF
50,62	32,30	1,95	0,72	0,03	0,44	0,14	0,15	0,03	0,02	0,05	12,50

Source : Auteur

### 8.5.6 Caractéristiques de la soude

La soude ou soude caustique de formule chimique NaOH est distribuée par l'entreprise SPCI sous forme de granule. Elle est très cher donc nous sommes obligé de bien approfondir l'étude pour ne pas gaspiller et pour avoir une bonne performance de nos échantillons.

**Tableau 21** : caractéristiques de la soude caustique

T° d'ébullition	318 °C
T °de fusion	1390
Solubilité dans l'eau	20 °C
Masse volumique	2,1 g.cm <sup>-3</sup>

Source : Auteur

### 8.5.7 Caractéristiques de l'eau

**Tableau 22** : caractéristiques de l'eau de JIRAMA

Constituants	Caractéristiques
Insolubles [mg/l]	0
Matières dissoutes [mg/l]	0,0034 à 0,005
Carbonates + bicarbonates alcalins [%]	0,0028
Sulfates en SO <sub>3</sub> [%]	0
Sulfates en S [%]	0
Sucres [%]	0
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0
NO <sub>3</sub> [%]	
Acidité en Ph	7,20 à 8,50
Acidité humique	Aucune coloration brunâtre
Chlorures [mg/l]	3,55 à 8,50
Ions soufre [%]	0

Source : JIRAMA

## CHAPITRE 9 : ELABORATION ET FORMULATION DES EPROUVETTES

### 9.1 Mode opératoire

#### 9.1.1 Les paramètres

Nous avons des paramètres fixes et des paramètres variables :

➤ Paramètres fixes :

Les paramètres fixes pendant cette opération sont :

- La température d'incinération de balle riz est 600 °C
- La finesse de la cendre de balle de riz, chaux, métakaolin est 0,1mm ;
- La durée de broyage de cendre de balle de riz est de 4 h ;
- La température de calcination du kaolin est 750 °C pendant 4 h ;
- La température de préparation du silicate de soude est la température ambiante ;
- La pression est la pression atmosphérique ;
- La quantité du sable pour la confection des éprouvettes est 12,4% ;
- La quantité du gravillon pour la confection des éprouvettes est 24,8% ;
- Le mode de conservation des échantillons : à l'air libre et dans la solution d'acide ;

➤ Paramètres variables :

Les paramètres que nous avons variés sont :

- Variation du rapport molaire ;
- Variation de la quantité de cendre de balle de riz, chaux et métakaolin pour l'aluminosilicate ;
- Variation de la quantité de l'eau de gâchage et le silicate de soude ;
- Variation de la quantité de la solution d'acide ;
- Age des éprouvettes : 2 jours, 7 jours et 14 jours ;

#### 9.1.2 Essai de fabrication des éprouvettes de béton géopolymères dans un moule rectangulaire

Voici les étapes de fabrication et leur manipulation :

- Préparation de l'aluminosilicate ;

Dans chaque essai, tout d'abord, on pèse avec précision la cendre de balle de riz, le métakaolin, la chaux car ils sont de même dimension, sur une balance, puis on les verse dans un bol en plastique ou dans une cuvette, ensuite l'heure de malaxage par un malaxeur ou une cuillère, ensuite malaxer encore jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène ;



**Photos 26:** mélange d'aluminosilicate et chaux

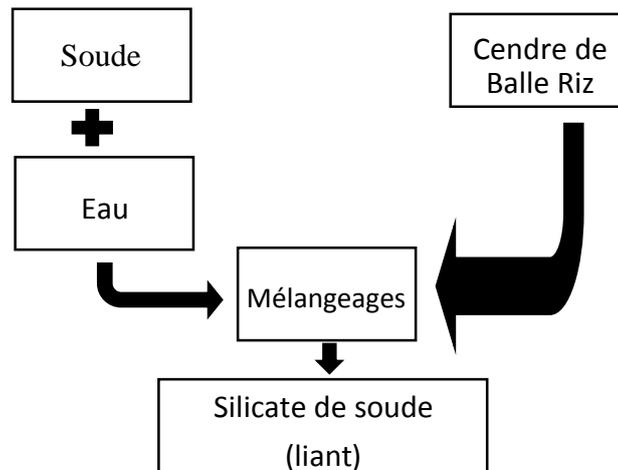
- Mélangeage de l'aluminosilicate et des graviers ;

Lorsque l'aluminosilicate et la chaux sont bien mélangés, on ajoute les graviers (sable et gravillon) puis encore mélanger une fois ;



**Photos 27:** mélange d'aluminosilicate, chaux et gravier

- Préparation de silicate de soude ;



**Figure 15:** étape de l'obtention de silicate de soude

On prépare le silicate de soude en faisant réagir la soude avec la silice amorphe. Plus précisément on rend soluble la silice amorphe en milieu basique à basse température (de l'ordre de 100 °C), voire même à température ambiante.

Les matières premières pour la fabrication du silicate de soude sont : **la soude, les cendres de balle de riz et l'eau** ;

On définit le module silice-oxyde de diazote noté  $R_m$  par le rapport entre le nombre de mole de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Na}_2\text{O}$  :

$$R_m = \frac{n \text{SiO}_2}{n \text{Na}_2\text{O}}; (1)$$

Pour,  $R_m > 1$  ; nous avons un module acide ou abrasif (comme le colle)

Pour,  $R_m < 1$  ; on a un module basique ou d'édtergent (comme le savon)

La r éaction chimique de la synth èse du silicate de soude est la suivante :



Notons que le pH > 11

Le silicate de soude dont sa formule chimique est de :  $\text{Na}_2(\text{H}_3\text{SiO}_4)_2$

Pendant notre é tude, nous avons effectu é des essais pr éliminaires en utilisant les deux modules de silicate de soude (l'un module acide  $R_m > 1$ , et l'autre module basique  $R_m \leq 1$ ). Mais les éprouvettes fabriqu ées à partir du module basique ne sont pas concluantes, car elles sont tr ès corrosives, molles, et difficile à s écher. A ce titre nous avons effectu é quatre (4) essais dont les rapports molaire  $R_m$  sont respectivement : **1,25 ; 1,5 ; 1,75 ; 2 ;**

- M élangeage et malaxage ;

On verse l'eau de gâchage dans le mélange homogène de l'aluminosilicate, chaux, gravier et le silicate de soude apr ès pesage pour avoir notre ultime m élange du b éton géopolym ère.



**Photos 28:** Malaxage du b éton frais géopolym ère

- Moulage et d énoilage ;

Le moulage se fait dans une éprouvette trirectangulaire de 160 mm de longueur, 40 mm de largeur et 40 mm de hauteur.



**Photos 29:** moule 160mm x 40mm x 40mm

L'intérieur du moule est huilé pour faciliter le démoulage. On met le moule sur la table vibrante et on verse le béton frais.

Le **démoulage** s'effectue dans un endroit sec et à l'abri de la lumière pendant 24 heures où elles sont bien aérées pour leur conservation.

- Séchage ;

Les échantillons sont séchés à l'air libre et dans la solution d'acide pendant 2, 7 et 14 jours prêt pour les essais physiques et mécaniques.

- Préparation de solution d'acide ;

Durant la préparation de la solution d'acide, il s'avère nécessaire de porter un gant pour la sécurité. L'acide HCl et  $H_2SO_4$  sont fort et très corrosif donc nous avons utilisé du plastique pour la peser et minimiser l'attaque chimique et on pèse aussi de l'eau. On met l'acide et l'eau dans un seau puis mélange.



**Photos 30** : Pesage de l'acide



**Photos 31** : Mélange d'eau et de l'acide



**Photos 32** : Solution d'acide

## CHAPITRE 10 : Les essais physiques, mécaniques et chimiques

Ce chapitre est une des bases de notre béton antiacide qui est exigé par des normes particulières pour satisfaire l'étude tels que :

- Essai physique : retrait volumique et dimensionnel, densité;
- Essai mécanique : résistance à la traction par flexion et à la compression ;
- Essai chimique : perte de masse en immergeant les éprouvettes de différents essais dans la différente solution d'acide pendant la durée déterminée ;

### 10.1 Essai physique

#### 10.1.1 Retrait linéaire et volumique

Nous avons utilisé le pied à coulisse pour mesurer le retrait linéaire RL et volumique RV.

Notons : L : la longueur de l'éprouvette au démoulage ;

L' : la longueur de l'éprouvette après séchage.

On a pour formule :

$$RL = \frac{L - L'}{L} \times 100$$

Et notons aussi V le volume apparent de l'éprouvette au démoulage et V' celui après séchage, elle est donnée par la relation :

$$RV = \frac{V - V'}{V} \times 100$$



Photos 33: Mesure de retrait en mm

#### 10.1.2 Densité apparente et densité réelle

La densité apparente  $\gamma_d$  est le rapport de la masse volumique apparente du matériau à celle de l'eau ou de l'acide. Elle s'exprime par la relation :

$$\gamma_d = \frac{ms}{V} \times \frac{1}{\rho_e}$$

La densité réelle  $\gamma_r$  d'un matériau est le rapport entre la masse volumique réelle de ce matériau à celle de l'eau ou de l'acide. La masse volumique réelle d'un matériau est le rapport entre sa masse et le volume réel  $V_r$  des grains de ce matériau :

$$\gamma_r = \frac{ms}{V_r} \times \frac{1}{\rho_e}$$

## 10.2 Essai mécanique

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux. La loi de comportement établit une relation entre les contraintes et les déformations. Nous avons utilisé la machine de type Wolpert Testwell auprès de bloc technique d'Ankatso pour connaître la valeur à la rupture :



**Photos 34 :** Presse Hydraulique

### 10.2.1 Résistance à la traction par flexion

La flexion est la déformation d'un objet sous l'action d'une charge. Elle se traduit par une courbure. Dans notre cas, elle tend à rapprocher les deux (2) extrémités. On a la formule :

$$Rf = \frac{3N}{a^2}$$

Avec « $N$ » est l'effort de rupture en [daN]

« $a$ » le côté de section carrée de l'éprouvette en [mm<sup>2</sup>]



**Photos 35 :** Résistance à la traction par flexion

### 10.2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression définit l'aptitude de l'éprouvette à résister la pression appliqué verticalement. Elle est donné e par la formule :

$$RC = \frac{f_{max}}{S} \text{ et } S = L \times l \times h$$

Avec  $f_{max}$  : force maximale atteint jusqu'à rupture [daN]

$S$  : volume de l'éprouvette [ $cm^3$ ] et  $L$  : longueur,  $l$  : largeur,  $h$  : hauteur



**Photos 36 :** Résistance à la compression

### 10.3 Essai chimique

L'essai chimique notamment le test d'immersion dans un milieu acide, évalue la durée de vie de notre éprouvette. Cela ne se limite certainement pas à l'étanchéité, d'autres facteurs tels que des changements rapides de pression ou des résistances, telle qu'une exposition à des produits chimiques caustiques, la soude, sont également fait partie du test.

**PARTIE III. RESULTATS  
ET DISCUSSION**

## CHAPITRE 11 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 11.1 Méthode

Dans ce chapitre, nous allons voir les différentes valeurs en fonction de rapport molaire  $R_m = \frac{nSiO_2}{nNa_2O}$ , la variation en fonction cendre de balle de riz, m éakaolin et chaux puis la variation de l'eau de gâchage et du silicate de soude. Nous donnons aussi les valeurs de retrait, la perte de masse, densité en forme de courbe, diagramme et d'autres schémas. Enfin, on immerge dans différente solution d'acide. Et on n'oublie pas aussi de comparer le béton géopolymère avec le béton témoin.

La méthode est de varier un param ètre en fixant les autres param ètres.

### 11.2 Variation en fonction rapport molaire $R_m = \frac{nSiO_2}{nNa_2O}$

- Nous avons le module  $R_m$  : 1,25 ; 1,5 ; 1,75 et 2.
- L'âge des éprouvettes est à jeun âge, pendant deux (2) jours.
- Le mode de conservation est à l'air libre ;

### 11.3 Variation de l'aluminosilicate et de la chaux en pourcentage massique

Les param ètres fixes sont :

- Mode de conservation des éprouvettes : à l'air libre ;
- Age des éprouvettes : 7 jours ;
- n SiO<sub>2</sub>/n Na<sub>2</sub>O = 1,5

Le tableau suivant indique la variation des dosages de l'aluminosilicate (cendre de balle de riz et m éakaolin) et la chaux ;

**Tableau 23:** variation de l'aluminosilicate et de la chaux

	S	G	RHA	MK	CX	SS	E
Essai 1	12	24	10	8	8	27	10
Essai 2			12	8	6		
Essai 3			12	7	7		
Essai 4			12	6	8		

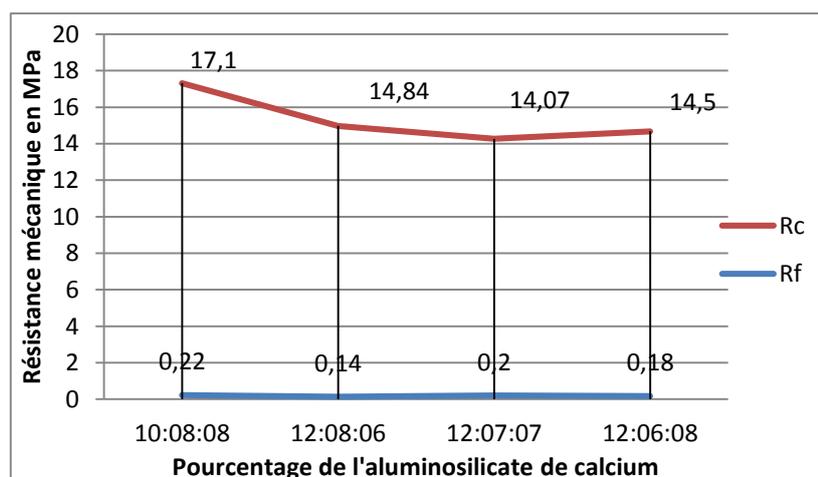
Avec : 10 :8 :8 veut dire qu'on a utilisé 10% de RHA : 8% de MK et 8% de CX

**Tableau 24:** Résistance à la traction par flexion en fonction aluminosilicate (cendre de balle de riz et méta kaolin) et chaux

	$F_{max}$ (daN)	Rf (Mpa ou bars)
Essai 1	120	0,22 ou 22,5
Essai 2	76	0,14 ou 14,25
Essai 3	110	0,20 ou 20,62
Essai 4	100	0,18 ou 18,75

**Tableau 25 :** Résistance à la compression en fonction aluminosilicate et chaux

	$f_{max}$ en (daN)	$R_c$ (Mpa)	$R_c$ moyenne en (MPa)
Essai 1	4000	15,63	17,10
	4750	18,55	
Essai 2	3980	15,54	14,84
	3620	14,14	
Essai 3	4000	15,63	14,07
	3200	12,5	
Essai 4	3240	12,65	14,50
	4180	16,33	



**Figure 16:** Evolution de la résistance mécanique en fonction de la variation des pourcentages de l'aluminosilicate de calcium pendant 07 jours d'âge

La figure 15 nous informe que :

- Par rapport aux résultats précédents, l'ajout de la chaux dans l'aluminosilicate amène les caractéristiques mécaniques de nos éprouvettes, cela explique que le silicate de soude réagit avec la chaux pour former du silicate de calcium qui est le premier responsable de durcissement
- les résistances mécaniques sont meilleures si les taux de Métakaolin et de la chaux sont élevés : par exemple pour 10% RHA et 8% de MK avec 8% de CX :  $R_f = 0,22 \text{ MPa}$  et  $R_c = 17 \text{ MPa}$  pendant 07 jours d'âge ;

#### 11.4 Variation de l'eau de gâchage et du silicate de soude

Les paramètres fixes sont :

- Mode de conservation des éprouvettes : à l'air libre ;
- Age des éprouvettes : 7 jours ;
- Pourcentage : RHA=10% ; MK=8% ; CX=8% ; les valeurs optimales ;
- $n \text{ SiO}_2 / n \text{ Na}_2\text{O} = 1,5$

**Tableau 26:** Variation de l'eau de gâchage et du silicate de soude

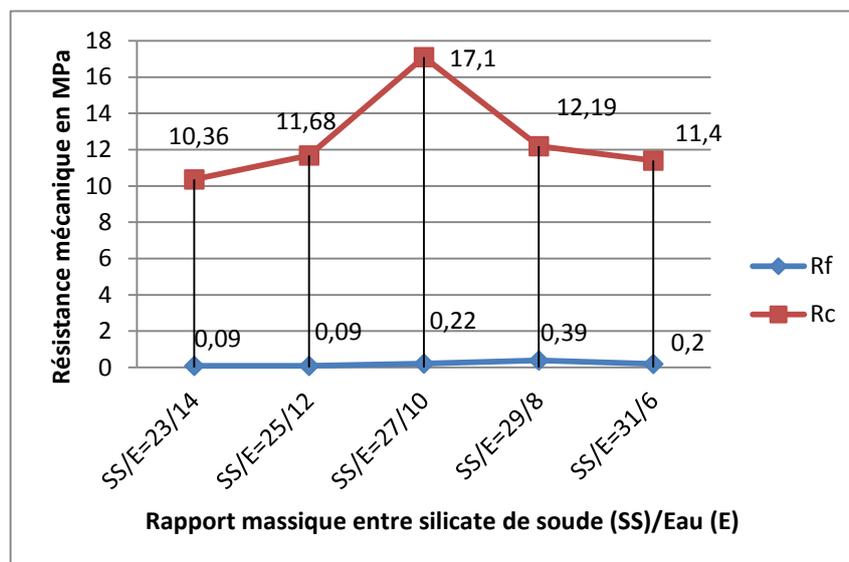
	S	G	RHA	MK	CX	SS	E
<b>Essai 5</b>	12	24	10	8	8	23	14
<b>Essai 6</b>						25	12
<b>Essai 7</b>						27	10
<b>Essai 8</b>						29	8
<b>Essai 9</b>						31	6

**Tableau 27 :** Résistance à la traction par flexion en fonction eau de gâchage et silicate de soude

	$F_{max} (daN)$	$R_f$ (bars)
Essai 5	48	0,09
Essai 6	50	0,094
Essai 7	120	0,22
Essai 8	209	0,39
Essai 9	110	0,2

**Tableau 28:** Résistance à la compression en fonction eau de gâchage et silicate de soude

	$f_{max}$ en (daN)	$R_c$ (Mpa)	$R_c$ moyenne en (MPa)
Essai 5	3000	11,72	10,36
	2300	9,00	
Essai 6	2840	11,10	11,68
	3140	12,26	
Essai 7	4000	15,63	17,10
	4750	18,55	
Essai 8	2960	11,56	12,19
	3280	12,81	
Essai 9	2960	11,56	11,40
	2880	11,25	



**Figure 17:** Evolution de la résistance mécanique en fonction de la variation du rapport massique entre le silicate de soude et l'eau pendant 07 jours d'âge

La Figure 16 nous montre que :

- La résistance à la compression simple et la résistance à la traction par flexion n'ont pas la même allure
- Pour  $23/14 \leq SS/E < 27/10$  : la résistance mécanique augmente légèrement: Rc de 10,36 MPa à 17,10 MPa, et Rf de 0,09 MPa à 0,2 MPa pendant 07 jours d'âge, ceci est dû à l'insuffisance du silicate de soude pour dissoudre l'aluminosilicate de calcium, c'est-à-dire il y a excès d'aluminosilicate de calcium qui ne sont pas transformés en géopolymère

- Pour SS/E= 27/10 : on a un dosage optimum de silicate de soude et de l'eau pour dissoudre la majorité de l'aluminate de calcium puis se recombinaient en oligomère de silicate pour se transformer ensuite en gel qui le béton géopolymère, et on a obtenu une résistance maximale  $R_c = 17,10$  MPa ;
- Pour SS/E = 29/10 on a une résistance maximale pour  $R_f = 0,39$  MPa
- Pour SS/E >27/10 : on observe une chute de résistance à la compression, ceci est dû au excès de silicate de soude qui ne participe plus à la réaction de géopolymérisation

### 11.5 Résultats sur les essais physiques

On donne le tableau de mesure des dimensions des éprouvettes avant et après séchage 7 jours à l'air libre :

**Tableau 29:** Résultats sur les retraits volumique après séchage

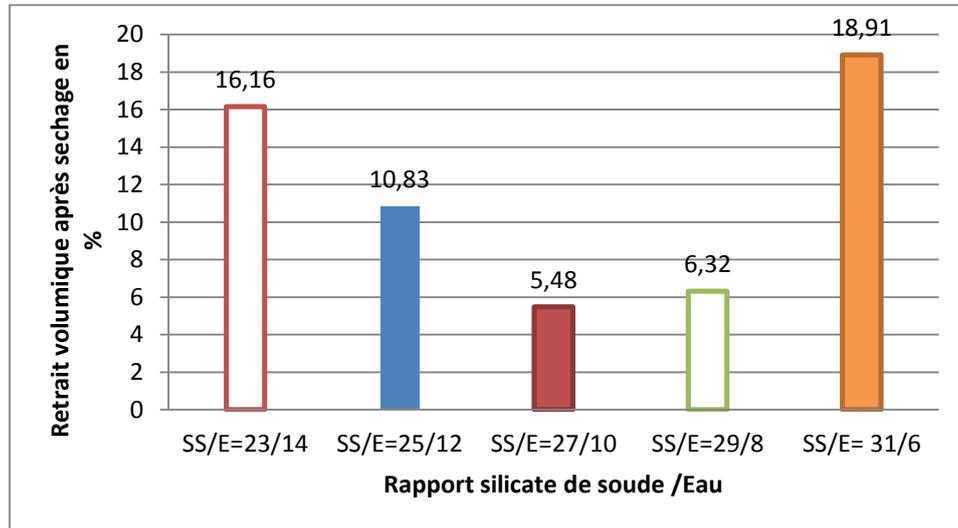
Essai	N°	5	6	7	8	9
AVS	L (cm)	15,9	15,7	16	15,6	15,5
	l (cm)	3,7	3,8	3,6	3,6	3,8
	h (cm)	3,7	3,9	3,6	3,5	3,7
	V (cm <sup>3</sup> )	217,67	232,67	207,36	196,56	217,93
APS	L (cm)	15,8	15,6	16	15,5	15,3
	l (cm)	3,5	3,5	3,5	3,6	3,5
	h (cm)	3,3	3,8	3,5	3,3	3,3
	V (cm <sup>3</sup> )	182,49	207,48	196,00	184,14	176,71
RVS[cm <sup>3</sup> ]		35,18	25,19	11,36	12,42	41,22
RVS[%]		16,16	10,83	5,48	6,32	18,91

**Avec :**

AVS : Avant s'échage

APS : Apr ès s'échage

RVS : Retrait volumique apr ès s'échage

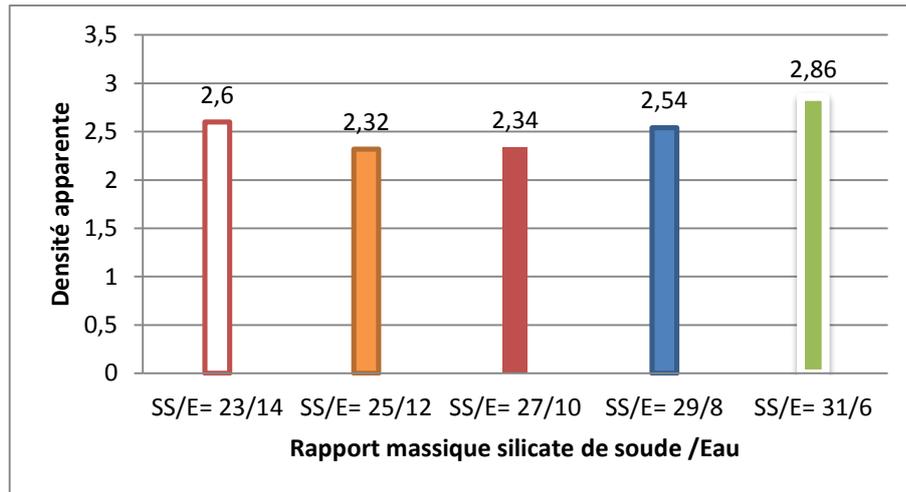


**Figure 18:** Evolution du retrait volumique après s'échage en fonction de la variation du rapport massique entre le silicate de soude et l'eau pendant 07 jours d'âge

Cette figure 17 nous met en exergue que pour SS/E= 27/10 c'est-à-dire à 27% de silicate soude et 10% d'eau, le retrait volumique après séchage est minimum : RVS= 5,48%, cela veut dire pour cette dosage, plus l'aluminosilicate de calcium est presque dissoute puis se transformer en gel, et plus le retrait volumique après s'échage de notre éprouvette est faible.

**Tableau 30 :** Masse avant et après s'échage et densité apparente

Essai N°	5	6	7	8	9
Masse AVS [g]	485	489	467	475	509
Masse APS [g]	475	482	458	467	506
Perte de masse [g]	10	7	9	8	3
Perte de masse [%]	2,06	1,43	1,92	1,69	0,60
Volume APS [cm <sup>3</sup> ]	182,49	207,48	196,00	184,14	176,71
Densité apparente	2,60	2,32	2,34	2,54	2,86



**Figure 19:** Evolution de la densité apparente en fonction de la variation du rapport massique entre le silicate de soude et l'eau pendant 07 jours d'âge

La figure 18 nous montre que pour  $SS/E = 27/10$ , la densité apparente de notre éprouvette est de l'ordre de 2,34 qui est égale à la densité apparente du béton ordinaire.

## 11.6 Résultats sur les essais chimiques

### ➤ Paramètre fixe

D'après ce qui précède, l'essai N°7 avait le résultat le plus convaincant avec la résistance à la compression  $R_c = 17,10$  Mpa mais la résistance à la traction par flexion était en moyenne  $R_f = 0,22$  Mpa ou 22,50 bars tandis que pour l'essai N° 8,  $R_f = 0,39$  Mpa ou  $R_f = 39,18$  bars ( $39,18 \gg 22,5$ ). On a pris la  $R_c$  la plus élevée.

### ➤ Paramètres variables

- Jours d'immersion : 7 jours et 14 jours
- Immersion dans l'Acide Chlorhydrique et Acide Sulfurique
- Taux d'acidité : 5% et 10%

**Tableau 31:** Dimension et retrait volumique après avoir plongés dans la solution d'acide pendant 7 jours

Essai	N°	A	B	C	D	E	F	G	H
Avant immersion	L (cm)	15,8	15,9	16	15,6	16	16	15,7	16
	l (cm)	3,8	3,9	3,9	3,8	3,7	3,9	3,8	3,8
	h (cm)	3,9	3,9	3,8	3,8	3,7	3,7	3,9	3,6
	V(cm <sup>3</sup> )	234,16	241,84	237,12	225,26	219,09	230,88	232,67	218,88
Après immersion	L (cm)	15,7	15,8	15,8	15,1	15,9	15,5	15,6	14,5
	l (cm)	3,7	3,6	3,6	3,3	3,4	3,8	3,5	2,9
	h (cm)	3,7	3,8	3,7	3,2	3,6	3,4	3,5	2,8
	V (cm <sup>3</sup> )	214,93	216,14	210,46	159,46	194,62	200,26	191,1	117,74
RVS[cm <sup>3</sup> ]		19,23	25,70	26,66	65,80	24,47	30,62	41,57	101,14
RVS[%]		8,21	10,63	11,24	29,21	11,17	13,26	17,87	46,21

**Notons :**

BGAC(5,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 5% pendant 7 jours

BGAC(10,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 10 % pendant 7 jours

BTAC(5,7) Béton Témoin immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 5% pendant 7 jours

BTAC(10,7) : Béton Témoin immergé dans l'Acide Chlorhydrique à 10% pendant 7 jours

BGAS(5,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Sulfurique à 5% pendant 7 jours

BGAS(10,7) : Béton Géopolymère immergé dans l'Acide Sulfurique à 10% pendant 7 jours

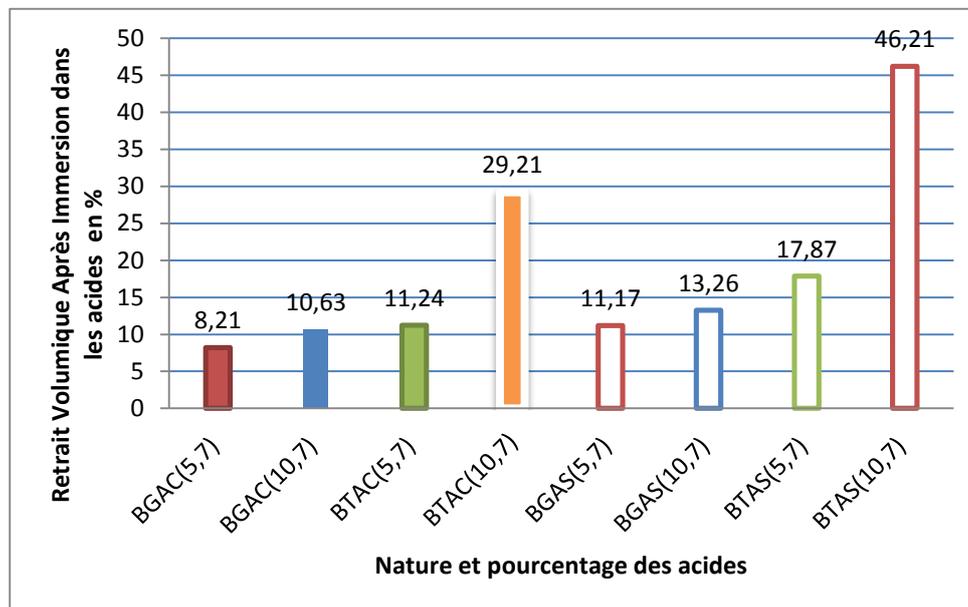
BTAC(5,7) Béton Témoin immergé dans l'Acide Sulfurique à 5% pendant 7 jours

BTAC(10,7) : Béton Témoin immergé dans l'Acide Sulfurique à 10 % pendant 7 jours

Les éprouvettes des Bétons Témoins sont fabriquées à partir du ciment Lucky 42,5

### 11.6.1 Résultats après 7 jours d'immersion dans les acides

- Retrait Volumique après Immersion



**Figure 20:** Evolution du retrait volumique des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 jours d'immersion

La figure 19 nous met en exergue que :

- Les retraits volumiques des éprouvettes après immersion dans l'acide sulfurique sont largement supérieures à ceux qui sont immergés dans l'acide chlorhydrique : par exemple  $BGAS(5,7) = 11,17\%$  et  $BGAC(5,7) = 8,21\%$ , cela veut dire que l'acide sulfurique est très agressif par rapport à l'acide chlorhydrique sur les bétons ;
- Quelques soient la nature et la concentration de l'acide, les retraits volumiques des bétons géopolymères sont nettement inférieures à ceux des bétons témoins : par exemple  $BGAS(10,7) = 13,26\%$  et  $BTAS(10,7) = 46,21\%$

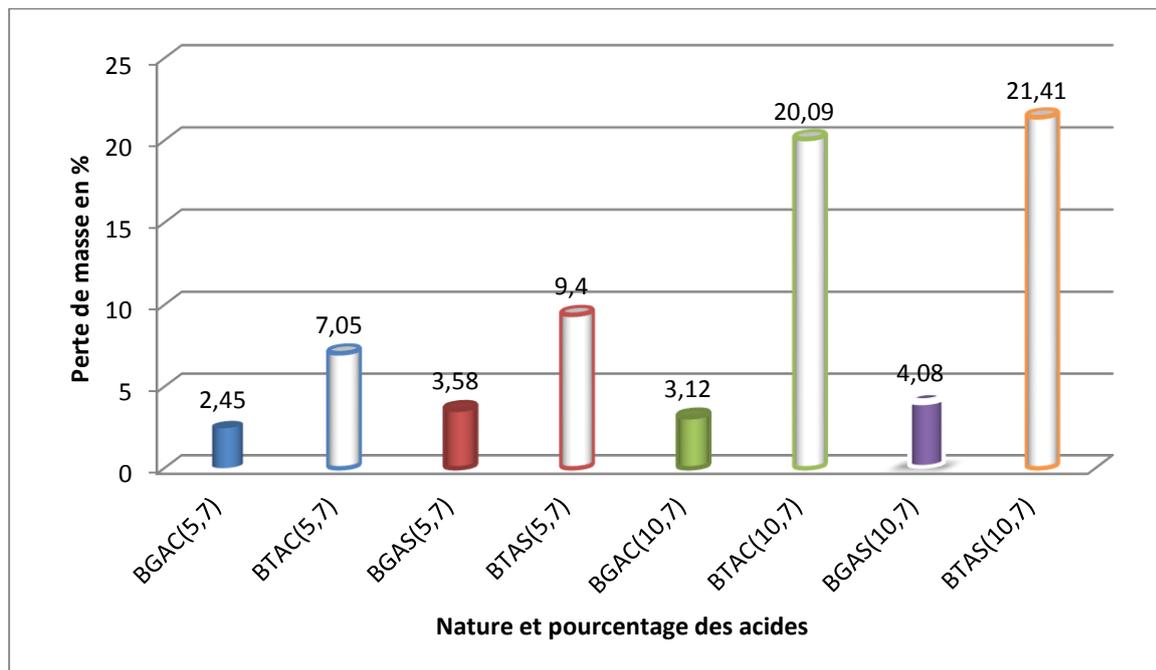
**Tableau 32:** Masse avant et après immersion dans l'acide et densité apparente pendant 7 jours

Essai N°	A	B	C	D	E	F	G	H
Masse AVI [g]	489	468	475	447	480	453	490	467
Masse API[g]	477	435	458	405	465	362	470	367
Perte de masse [g]	12	33	17	42	15	91	20	100
Perte de masse [%]	2,45	7,05	3,58	9,40	3,12	20,09	4,08	21,41
Volume API[cm <sup>3</sup> ]	214,93	210,46	194,62	191,1	216,14	159,46	200,26	117,74
Densité apparente	2,22	2,07	2,35	2,12	2,15	2,27	2,35	3,12

Avec : AVI avant immersion dans l'acide

API après immersion dans l'acide

- Perte de masse



**Figure 21:** Evolution du retrait volumique des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 jours d'immersion

Cette figure nous montre que : les pertes de masse des éprouvettes en bétons géopolymères sont nettement inférieures à celles des bétons témoins : par exemple BGAS(10,7) = 4,08% et

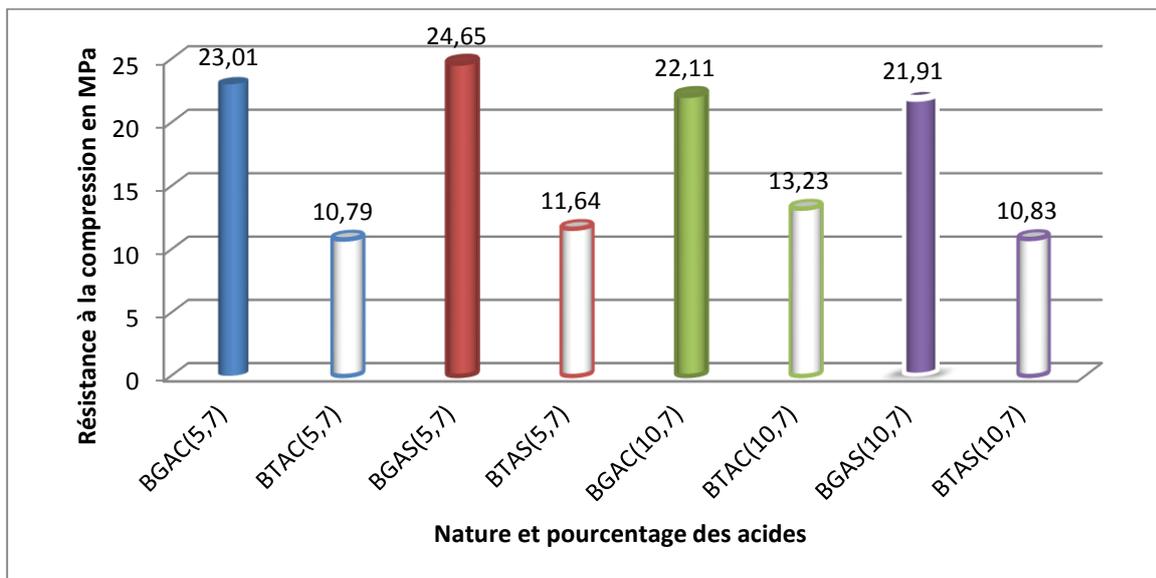
BTAS(10,7)= 21,41%, c'est-à-dire l'éprouvette en béton témoin a perdu presque le quart de son poids.

**Tableau 33:** Résistance à la compression après 7 jours d'immersion dans l'acide

	$f_{max}$ en (daN)	$R_c$ (Mpa)	$R_c$ moyenne (Mpa)
A	4990	23,22	23,01
	4900	22,80	
B	2240	10,64	10,79
	2300	10,93	
C	4875	25,05	24,65
	4720	24,25	
D	2300	12,03	11,64
	2150	11,25	
E	4800	22,21	22,11
	4760	22,02	
F	2180	13,67	13,23
	2040	12,79	
G	4560	22,77	21,91
	4220	21,06	
H	1300	11,04	10,83
	1250	10,62	

- Résistance à la compression

Les éprouvettes sont séchées à l'air libre pendant 7 jours puis immergées dans l'acide pendant 7 jours



**Figure 22:** Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 jours d'immersion

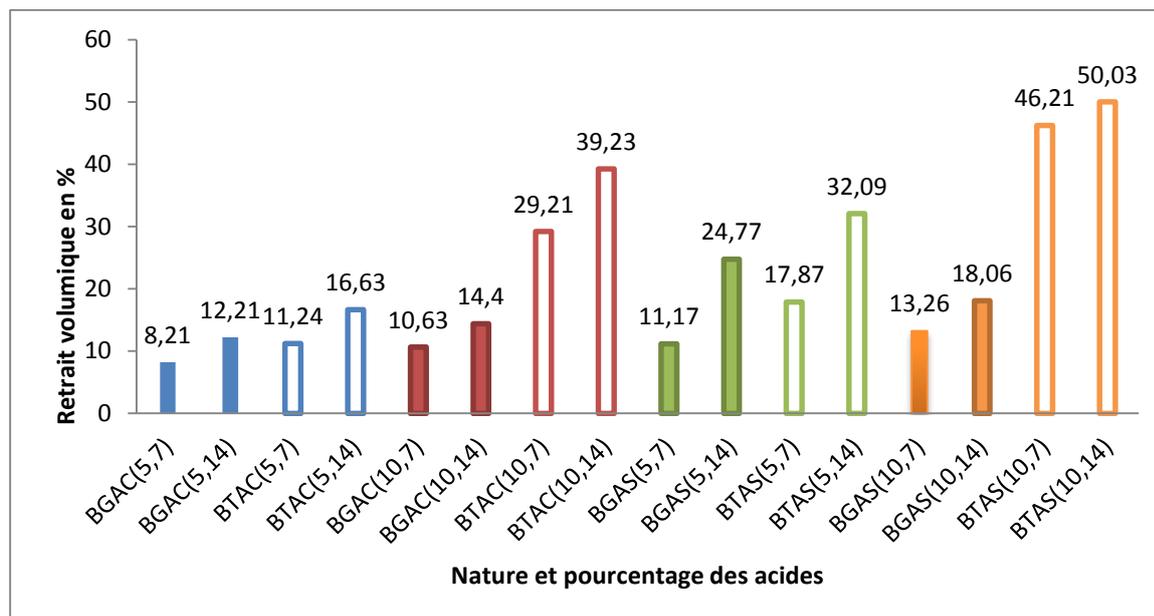
La figure 21 nous montre que : Les résistances à la compression des éprouvettes en béton géopolymère immergées dans les deux acides sont largement supérieures à celles des éprouvettes en béton ténoin : par exemple pour BGAS(5,7)  $R_c = 24,65\text{MPa}$  et BTAS(5,7)  $R_c = 11,64\text{MPa}$ , cela veut dire que le béton ordinaire ne résiste pas à l'agression chimique.

### 11.6.2 Résultats de comparaison après 07 jours et 14 jours d'immersion dans les 2 acides

**Tableau 34:** Dimension et retrait volumique après avoir plongées dans la solution d'acide pendant 14 jours

Essai	N°	A	B	C	D	E	F	G	H
Avant immersion	L (cm)	15,8	15,9	15,9	16	15,7	15,8	16	15,6
	l (cm)	3,7	3,8	3,9	3,7	3,9	3,8	3,6	3,9
	h (cm)	3,6	3,6	3,6	3,8	3,8	3,7	3,8	3,9
	V(cm <sup>3</sup> )	210,46	217,51	223,24	224,96	232,67	222,14	218,88	237,27
Après immersion	L (cm)	15,5	15,7	15,6	15,4	15,6	15,0	15,5	14,9
	l (cm)	3,6	3,5	3,5	3,2	3,4	3,0	3,5	2,8
	h (cm)	3,3	3,3	3,5	3,1	3,3	3,0	3,5	2,9
	V (cm <sup>3</sup> )	184,14	181,33	191,10	152,77	175,6	135	189,87	120,99
RVS[cm <sup>3</sup> ]		26,32	36,17	32,14	72,20	57,64	87,14	29,00	116,28
RVS[%]		12,50	16,63	24,77	32,09	14,40	39,23	18,6	50,01

- Retrait volumique



**Figure 23:** Comparaison de l'évolution du retrait volumique des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 et 14 jours d'immersion

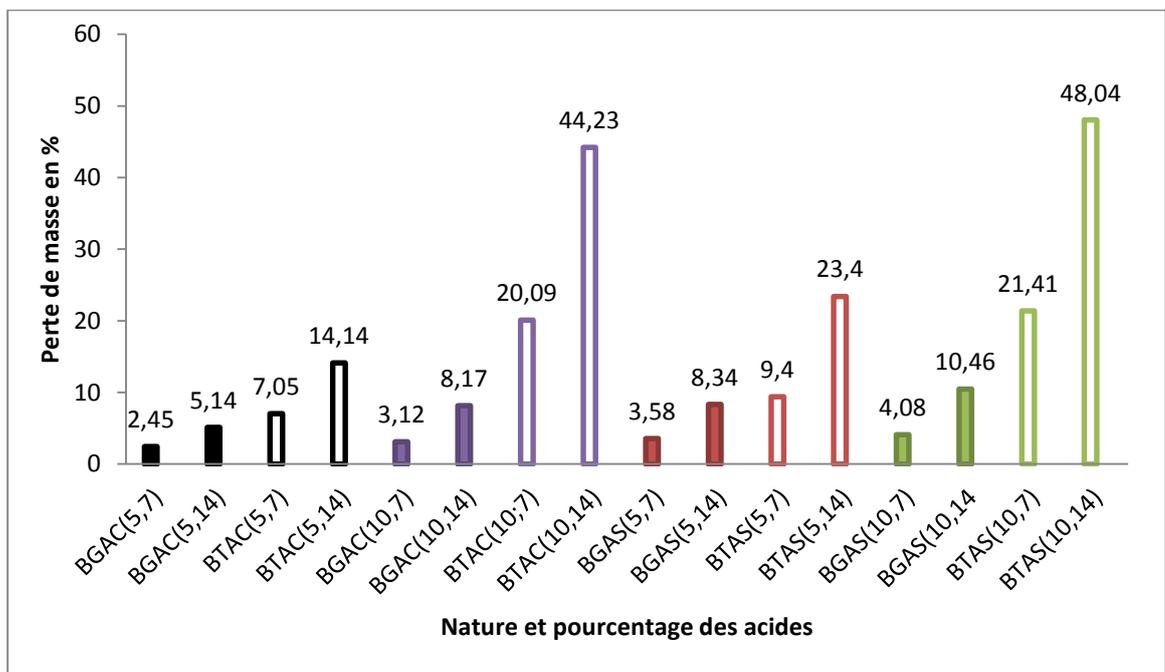
Cette figure 22 nous permet de conclure que :

- Au fur et à mesure qu'on augmente la durée d'immersion et le pourcentage des acides dans la solution d'immersion, les retraits volumiques augmentent également ;
- Même remarque que pour les résultats précédents, l'acide sulfurique est plus agressif que l'acide chlorhydrique sur les bétons : par exemple le retrait volumique après immersion (RVAI) après 14 jours pour les bétons géopolymères BGAC(10,14) = 14,4% et BGAS(10,14) = 18,06%
- Les bétons témoins résistent encore moins aux acides : BTAC(10,14) = 39,23% et BTAS(10,14) = 50,03%, cela veut dire qu'avec 14 jours d'immersion dans 10% d'acide dans la solution d'acide sulfurique ; il ne reste plus que 50% de son volume initiale ;

**Tableau 35:** Masse avant et après immersion dans l'acide et densité apparente pendant 14 jours

Essai N°	A	B	C	D	E	F	G	H
Masse AVI [g]	486	465	492	470	477	459	478	512
Masse API[g]	461	398	451	359	438	256	428	266
Perte de masse [g]	25	67	41	111	39	203	50	246
Perte de masse [%]	5,14	14,40	8,34	23,61	8,17	44,23	10,46	48,04
Volume API[cm <sup>3</sup> ]	184,14	181,33	191,10	152,77	175,6	135	189,87	120,99
Densité apparente	2,50	2,19	2,36	2,34	2,49	1,89	2,25	2,19

- Perte de masse



**Figure 24:** Comparaison de l'évolution de la perte de masse des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 et 14 jours d'immersion

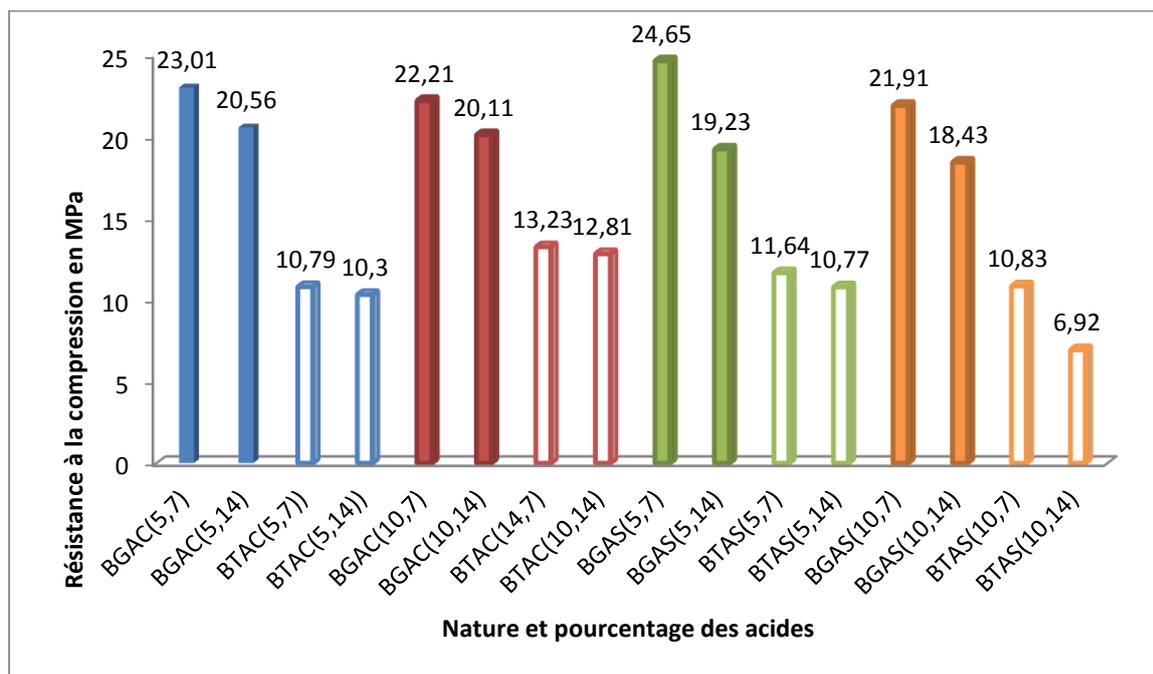
La figure 23 nous met en exergue :

- Entre 7 et 14 jours d'immersion l'acide chlorhydrique : la perte de masse est de l'ordre de 200% ; par exemple pour les bétons géopolymères :  $BGAC(5,7) = 2,45\%$  et  $BGAC(5,14) = 5,14\%$ , et pour les bétons témoins :  $BTAC(5,7) = 7,05\%$  et  $BTAC(5,14) = 14,14\%$ , cela veut dire les pertes de masse sont doublées après 14 jours d'immersion avec un même pourcentage d'acide
- A 10% d'acide sulfurique avec 14 jours d'immersion, le béton témoin perd presque la moitié de son poids :  $BTAS(10,14) = 48,04\%$ , tandis que le béton géopolymère a perdu environ 10% de son poids :  $BGAS(10,14) = 10,46\%$

**Tableau 36:** Résistance à la compression après 14 jours d'immersion dans l'acide

	$f_{max}$ en (daN)	$R_c$ (Mpa)	$R_c$ moyenne (Mpa)
A	3875	21,04	20,56
	3700	20,09	
B	2100	11,58	11,30
	2000	11,03	
C	3750	19,62	19,23
	3600	18,84	
D	2000	13,10	12,77
	1900	12,44	
E	3600	20,50	20,11
	3460	19,70	
F	2050	15,18	14,81
	1950	14,44	
G	3600	18,96	18,43
	3400	17,91	
H	975	8,06	6,92
	700	5,78	

- Résistance à la compression



**Figure 25:** Comparaison de l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la nature et le pourcentage des acides pendant 07 et 14 jours d'immersion

La figure 24 nous montre que :

- Les résistances à la compression des éprouvettes diminuent si on augmente, le taux de l'acide dans solution et aussi si on augmente le temps d'immersion par exemple pour les bétons géopolymères  $BGAS(5,7) = 24,65\text{MPa}$  et  $BGAS(10,14) = 18,43\text{MPa}$  ;
- Les résistances à la compression des bétons témoins sont largement inférieures à celles des éprouvettes en béton géopolymères, par exemple pour  $BTAC(5,14) = 10,30\text{MPa}$  et  $BGAC(5,14) = 20,56\text{MPa}$ .

Les bétons géopolymères plongés dans l'acide chlorhydrique ont une couleur un peu gris, ils sont tachetés de blanchâtre c'est-à-dire une signe de désintégration. Il y a une réaction entre le silicate de soude et l'acide qui donne du sel de table.



**Photos 37:** Béton géopolymère après immersion dans l'acide chlorhydrique pendant 14 jours

Les bétons géopolymères plongés dans l'acide sulfurique ont une couleur noirâtre, ils sont aussi tachetés de blanchâtre. L'acide est très corrosif et le liant employé persiste.



**Photos 38 :** Béton géopolymère après immersion dans l'acide sulfurique pendant 14 jours

Pour les bétons témoins, les éprouvettes sont dégradées presque totalement, la couleur est sa couleur initiale, grisâtre, mais on voit tous son intérieur qui se dégradent.



**Photos 39 :** Béton témoin après immersion dans l'acide pendant 14 jours

## CHAPITRE 12 : APPROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

### 12.1 COMPARAISON DES COUTS

#### 12.1.1 Les prix des matières premières

Pour la fabrication du béton témoin, les prix des matières premières sont les suivants :

**Tableau 37** : Prix des matières premières pour le béton témoin

Matières premières	Unité	Prix unitaire (Ar)
Ciment 42,5A Orimbato	Sac	38 000
Sable	m <sup>3</sup>	30 000
Gravillon	m <sup>3</sup>	40 000
Eau	m <sup>3</sup>	25 00

Pour la fabrication du béton géopolymère, les prix des matières premières sont :

**Tableau 38** : Prix des matières premières pour le béton géopolymère

Matières premières	Unité	Prix unitaire (Ar)
Sable	m <sup>3</sup>	30 000
Gravillon	m <sup>3</sup>	40 000
Cendre de balle de riz	Kg	500
Métakaolin	Kg	600
Chaux	Kg	1100
Soude	Kg	8 000
Eau	m <sup>3</sup>	25 00

#### 12.1.2 Coûts de 1 m<sup>3</sup> de béton témoin

Sachant que le dosage 350 Kg en ciment d'un béton témoin est :

**Tableau 39** : Dosage 350 Kg en ciment d'un béton témoin

	S	G	C	E
Pourcentage (%)	12,4	24,8	41,8	21

$$\text{Le rapport } \frac{E}{C} = 0,6$$

**Tableau 40** : Prix de 1 m<sup>3</sup> de béton témoin

Matières premières	Unité	Prix unitaire (Ar)	Quantité	Sous prix	TOTAL (Ar)
Ciment 42,5A Orimbato	Sac	38 000	7	266 000	336 205
Sable	m <sup>3</sup>	30 000	0,632	18 960	
Gravillon	m <sup>3</sup>	40 000	1,268	50 720	
Eau	m <sup>3</sup>	25 00	0,210	525	

### 12.1.3 Coûts de 1 m<sup>3</sup> de béton géopolymère

Sachant que notre dosage qui résulte l'optimum est :

**Tableau 41** : Dosage optimale du béton géopolymère

	S	G	RHA	MK	CX	E	SS
Pourcentage (%)	12	24	10	8	8	10	27

Et pour obtenir le silicate de soude dans le moule trirectangulaire de volume 768 cm<sup>3</sup>, on a :

mRHA = 215 g

mH<sub>2</sub>O = 215g

mNaOH = 160 g

**Tableau 42** : Prix de 1 m<sup>3</sup> de béton géopolymère

Matières premières	Unité	Prix unitaire (Ar)	Quantité	Sous prix	TOTAL (Ar)
Sable	m <sup>3</sup>	30 000	0,632	18 960	323 995
Gravillon	m <sup>3</sup>	40 000	1,268	50 720	
Cendre de balle de riz	Kg	500	50	25 000	
Métaokaolin	Kg	600	40	24 000	
Chaux	Kg	1100	40	44 000	
Soude	Kg	8 000	20	160 000	
Eau	m <sup>3</sup>	25 00	0,526	1 315	

## 12.2 APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

### 12.2.1 Evaluation des impacts

#### 12.2.1.1 Milieu physique

##### ❖ Impacts sur l'air

Les sources du rejet atmosphérique sont :

- la préparation des matières premières (broyage, concassage, malaxage) ;
- le four ;
- l'évaporateur.

Les émissions sont formées de monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), des oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) et des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>).

Les principales pollutions de l'air engendrées sont les poussières et les fumées émises par l'usine et par les appareils utilisés. Ces émanations peuvent provoquer ou aggraver des maladies respiratoires chez les êtres humains et chez les animaux. De même, ces poussières peuvent se déposer sur les plantes et perturber leur développement.

Mais selon la nature des activités, ces poussières sont susceptibles d'être toxiques.

#### ❖ Impact sur les ressources en eau

Les rejets liquides sont constitués par des eaux de lavage des différents matériels utilisés. Par contre, les déchets solides seront exposés aux pluies et pouvant être sources de pollution des eaux souterraines.

#### ❖ Impact sur le sol

La basicité des produits utilisés a un effet sur le sol et sur l'eau. Les effets sont l'augmentation du pH provoquant une baisse de la teneur en nutriments et l'augmentation de la teneur en élément potentiellement toxique.

Les déchets solides peuvent constituer comme une source de pollution du sol dans la mesure où les restes des produits chimiques persistent.

##### 12.2.1.2 Milieu biologique

Les pollutions de l'air, du sol et de l'eau entraînent des problèmes sur le milieu biologique environnant.

##### 12.2.1.3 Milieu humain

Les bruits, les poussières, les odeurs et les déchets émis lors du concassage, du broyage et de la cuisson peuvent perturber la vie humaine.

En outre, l'émission des gaz polluants peuvent provoquer des maladies et des irritations des parties exposées (yeux, peau, ...).

##### 12.2.1.4 Les impacts positifs

Les avantages de ce procédé de fabrication des liants sont :

- la réduction de la température pour la production des liants ;
- la facilité de la méthode ;
- la réduction de la consommation d'énergie ;
- la réduction d'émission des gaz polluants ;
- la réduction du prix de ciment.

## CHAPITRE 13 : LES MESURES DE SECURITE

### 13.1 Mesures d'atténuation

**Tableau 43** : Les mesures d'atténuation

Pollution	Origines	Mesures d'atténuation
Bruits	Moteurs électriques	-Utiliser des appareils antisonores -Isoler les unités bruyantes -Porter des casques antibruit
Poussières	Matières premières Produits finis Four	-Porter des protections lors de la manipulation -Mettre en place des systèmes antipoussiéreux -Procéder par voie humide lors de broyage et lors du Concassage
Déchets	Bureau Procédés de fabrication	-Mettre en place des poubelles -Améliorer les mesures d'hygiène
Odeur et fumées	Machines Calcination de balle de riz Incinération kaolin	-Eviter l'exposition prolongée -Les fours de calcinations doivent être plus loin des habitations environnantes -Porter des masques de protections Adéquats

Source : Auteur

A part les pollutions provenant de la fabrication, nous signalons aussi la toxicité de certains produits et les mesures à prendre pendant la manipulation.

### 13.2 Les mesures à prendre pour les produits toxiques.

**Tableau 44** : Les mesures à prendre pour les produits toxiques.

Produit	Impact	Mesures à prendre
CBR	Maladie : silicose	-Éviter le contact -Porter des protections (masques,...) -Assurer une bonne surveillance médicale
Soude	Irritant et corrosif	-Porter des chaussures, gants et tabliers de protection (en caoutchouc, en PVC) -Porter des lunettes de sécurité étanches -Assurer une bonne surveillance médicale

Source : Auteur

### 13.3 Comparaison entre le béton témoin et notre béton géopolymère antiacide

**Tableau 45** : Tableau comparative entre le béton témoin et notre béton géopolymère antiacide

CARACTERISTIQUES	BETON TEMOIN	BETON ANTIACIDE GEOPOLYMERE
<u>Techniques</u>	Dosage 350 Kg en ciment	Changement de variable
Matières premières	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Calcaire</li> <li>➤ Argile</li> <li>➤ Gypse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Métakaolin</li> <li>➤ Silicate de soude</li> <li>➤ Aluminosilicate</li> </ul>
Température	1450 °C	750 °C pour métakaolin 600 °C pour RHA
Prise	Quelques jours	Quelques heures seulement
Eau de gâchage	21%	10%
Densité apparente	3,12	2,34

Résistance mécanique (après immersion dans l'acide)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>à 7 jours</u></li> <li>➤ Rc= 13,23 Mpa</li> <li>▪ <u>à 14 jours</u></li> <li>➤ Rc= 14,81Mpa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>à 7 jours</u></li> <li>➤ Rc=24,65 Mpa</li> <li>▪ <u>à 14 jours</u></li> <li>➤ Rc= 20,56Mpa</li> </ul>
Résistance à la corrosion	Les mortiers ou béton à base de CPA sont dissous en milieu acide	Les mortiers ou béton à base de ciment géopolymérique résiste aux conditions extrêmes : milieu très acide

Pour les résultats des comportements des éprouvettes aux acides, on peut conclure :

## CONCLUSION GENERALE

En guise de conclusion, ce présent mémoire est le résultat d'un travail, patient et méthodique mené au sein du laboratoire CNRIT. Nous rappelons que le béton géopolymère est un béton essentiellement composé d'une source aluminosilicate et une solution alcaline.

Le but est d'avoir un béton performant mécanique, physique et résistant aux attaques chimiques grâce aux différents propriétés de notre matière première, de valoriser les matériaux locaux, minimiser l'usage d'énergie et d'éviter de dégager trop de dioxyde de carbone.

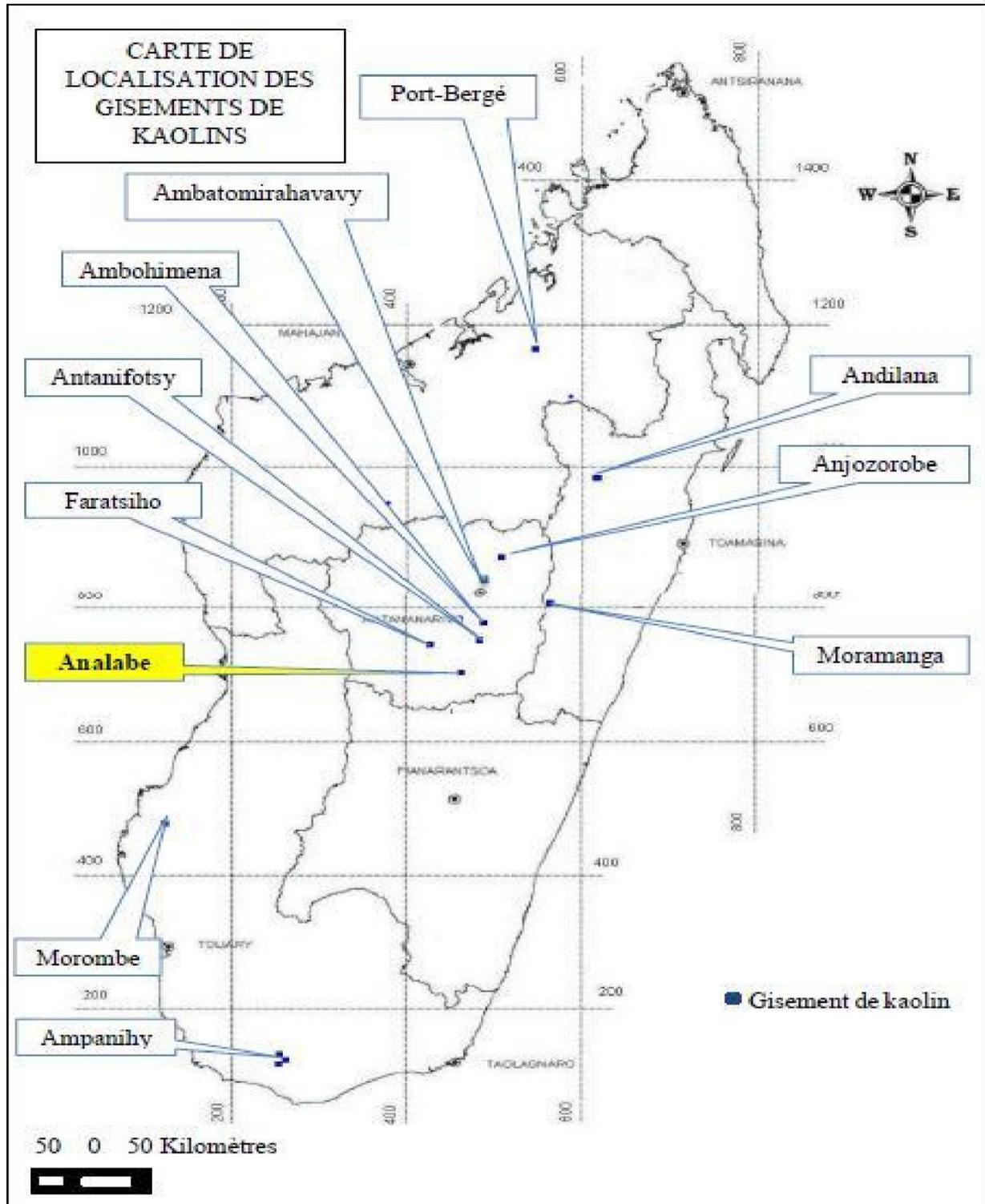
Après les études bibliographiques approfondies, nous avons effectués des essais expérimentaux, et les résultats obtenus sont les suivants :

- Le dosage optimum de l'aluminosilicate de calcium est 10% de cendres de balle de riz, 8% de métakaolin, et 8% de chaux et la résistance maximale obtenue est 17,10MPa pendant 07 jours d'âge et les éprouvettes sont conservées à l'air libre ;
- les éprouvettes en bétons géopolymères (BG) résistent aux agressions chimiques par rapport aux éprouvettes témoins (BT) fabriqués à partir du ciment Lucky 42,5 avec un dosage 350, à titre d'illustration ;
  - L'acide sulfurique (AS) est plus agressif que l'acide chlorhydrique (AC) : pour la résistance à la compression  $BGAC(10,14) = 20,11MPa$  et  $BGAS(10,14) = 18,43MPa$
  - pour le Retrait Volumique Après Immersion RVAI :  $BGAS(10,14) = 18,06\%$  et  $BTAS(10,14) = 50,03\%$ ,
  - pour la Perte de Masse :  $BGAS(10,14) = 10,46\%$  et  $BTAS(10,14) = 48,04\%$ ,
  - et pour la résistance à la compression  $BGAS(10,14) = 18,43MPa$  et  $BTAS(10,14) = 6,92MPa$ .

Malgré la difficulté sur la préparation des matières premières pour la fabrication du béton géopolymère anti-acide, notre projet est bien rentable avec une économie de la somme 12 210Ar. Notre étude peut être moins coûteuse si on se focalise sur la fabrication de la soude caustique ou d'envisager de le remplacer par un matériau moins cher et si possible disponible in-situ pour que l'étude économique soit encore meilleure.

## ANNEXES

### ANNEXE I: CARTE DE LOCALISATION DES GISEMENTS DE KAOLIN A MADAGASCAR



## **ANNEXE II : FICHE TECHNIQUE DU KAOLIN D'ANALABE**



Tel : 032 03 230 08  
E-mail : fdv.prochimad@blueline.mg  
Z.I. Mandrosoa Ivato - B.P. 3145  
Antananarivo 101  
MADAGASCAR

### **FICHE TECHNIQUE**

## **SILICATE D'ALUMINE** **(KAOLIN)**

#### **Formule chimique**

$\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$

#### **Caractéristiques physiques**

Aspect : Poudre fine  
Couleur : Blanc crème  
Densité : 2.5  
Refus au tamis 350 : 3 % (30/50 microns)  
Granulométrie : 40microns, 20 microns, fine

#### **Composition chimique :**

Perte au feu : 14.6%  
Humidité : 1%  
 $\text{SiO}_2$  : 39.8%  
 $\text{Fe}_2\text{O}$  : - traces  
 $\text{TiO}_2$  : 1.2%  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  : 41.3%  
MgO : 1.4%

**P.H.** : 7.8 – 8.3

**Alcalinité** : équivaut à 1.2 grammes de NaOH par kilogramme de kaolin maximal

**Principales utilisations** : Peinture, savonnerie, céramique, pesticide...

**Conditionnement** : Sac de 50 kg  
(Marquage sac : K40, K20, KF)

*Usine / Direction Générale : Z.I. Mandrosoa Ivato - B.P. 3145 - Antananarivo 101 - MADAGASCAR.  
Tel : 032 11 441 40 - E-mail : [prochimad@blueline.mg](mailto:prochimad@blueline.mg)*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1][9][21][23][15] S. Laldji. Caractéristiques fondamentales du béton Cours ETS
- [3] Monsieur KOERA Rasolonaina Antoine Cours Ciment 3<sup>ème</sup> année Semestre 5 en SIM, année scolaire 2016-2017
- [8] RAKOTOBE Jean Arlys «Contribution à l'étude de valorisation des cendres volantes en Cimenterie», Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur matériaux, Promotion 2011 bétons
- [11] RAKOTOLAHY Riantsoa Nasandratra, «Utilisation de presse vibrante PVT pour le compactage de pavés en béton», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'étude approfondie en Sciences des Matériaux, Promotion 2014
- [12] RADOELIZO Seheny Andriamitantoa, «Contribution à l'étude des bétons : influence des fines d'ajout sur le comportement des », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie Chimique, Promotion 2010
- [13] RANDRIANANTENAINA Tsirindraravo Gilbertin Bien Aimé «Valorisation économique du sable et ses dérivés», Mini-mémoire de Master I en Sciences de la Terre et Sciences de l'Environnement en Géologie, Paléontologie, Muséologie, Promotion 2010
- [14] RANDRIAMIFIDY Avotra Richardin, «Valorisation de la pouzzolane naturelle pour la fabrication des bétons géopolymères», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en Sciences et Ingénieries des Matériaux, Promotion 2018
- [16][17][19]RAJERISON Tahianasoah Sahoby, «Etude d'Optimisation du béton de sable, Applications», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Mines, Promotion 2004
- [18] Pierre CHARON (1983), Le Calcul et la vérification des ouvrages en béton armé
- [24] DAVIDOVITS F., (1993) : Mémoire de fin d'étude
- [25] RAKOTONDRAMANANA : Cours sur les polymères
- [26] DAVIDOVITS J., «Geopolymer Chemistry and application»
- [27] RATOVONDRAHONA J.H, RAKOTONIRINA Z.N.A, (2007), «Essai de fabrication de résine minérale par le procédé de géopolymérisation», Mémoire de fin d'étude ESPA
- [29] RAKOTOARIMANANA Mika Jean Yves et RASOLOFONIRINA Andry Franck «Essai de fabrication d'un ciment par le procédé de géopolymérisation », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'étude approfondie en Sciences des Matériaux, Promotion 2007

- [31] RAHELIARIMANANA Tolojanahary Lucie, «Valorisation des cendres de balle de riz pour la production des liants minéraux», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master II en Génie des Procédés Chimique Industriels, Promotion 2017
- [32] RAKOTOARIMANANANJY ESPA M2 Promotion 2007
- [33] VOLOLOJANAHARY RAZANAKOTO Ida «Contribution à l'étude de fabrication de ciment écologique par le procédé de géopolymérisation», Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie Chimique, Promotion 2008
- [34] Diaf Oussama «Valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment et de la chaux», Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Matériaux
- [35] IDRRIM Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité «Norme NF EN 459 : Chaux de construction», En Février 2015
- [38] RAZAFIMANDIMBY Tolojanahary «Etude et essai de fabrication d'un matériau anti-acide à base de cendre de balle de riz», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de Master II, Promotion 2019

## WEBOGRAPHIES

- [2] <https://www.futurascience.com/définition/béton>
- [4] <https://www.Kaddour.Chimie de Ciment>
- [5][6] <https://www.GénieCivil Leniv-tse3.fr/.Cours Ciment et béton>
- [7] <https://www.Construction 2 connaissance mat Partie%208.pdf>
- [10] <https://www.civilmania.com/topic/19135-les granulats-classification des granulats>
- [20] [https://www.bétondeFrance.com \(2001\), Constituants du béton](https://www.bétondeFrance.com (2001), Constituants du béton)
- [21] <https://www.coffrages-cosmos.com/les différents types de béton et leurs spécificités>
- [28] <https://www.techniques-ingénieur.fr/base-documentaire/matériaux-thll/surfaces et structures fonctionnelles-42534210/Chimies des géopolymères-introduction>
- [30][36] <https://www.wikipédia.com>
- [37] <https://www.cbr-be/fr/zuurbestand>

## TABLE DES MATIERES

TENY FISAORANA.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
SOMMAIRE.....	iii
LISTE DES ABBREVIATIONS.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES PHOTOS.....	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : NOTION SUR LE BETON.....	2
1.1 Définition [1].....	2
1.2 Les compositions du béton [2].....	2
1.2.1 Ciment [3].....	2
1.2.2 Granulats.....	8
1.2.3 Les fillers et les sables.....	9
a) Définition.....	9
b) Rôles.....	9
c) Les caractéristiques et les propriétés.....	9
1.2.4 Classification [13].....	11
1.2.5 Caractéristiques.....	12
1.2.6 Propriétés.....	13
1.2.7 Eau [15].....	14
1.2.8 Adjuvants [16].....	15
1.2.9 Additifs [20].....	19
1.3 Propriétés du béton [21].....	19
1.3.1 Caractéristiques du béton frais.....	20
1.3.2 Caractéristiques du béton durci.....	20
1.4 Différents types de béton [22].....	20

1.4.1 Le béton léger.....	22
1.4.2 Le béton lourd.....	22
1.4.3 Le béton armé.....	22
1.4.4 Le béton autoplaçant.....	22
1.4.5 Le béton fibré.....	22
1.4.6 Le béton prêt à l'emploi.....	23
1.4.7 Le béton précontraint.....	23
1.4.8 Le béton de ciment alumineux.....	23
1.4.9 Le béton à haute performance.....	23
1.4.10 Le béton projeté.....	23
1.5 Principaux avantages et inconvénients [23].....	24
1.5.1 Avantages du béton:.....	24
1.5.2 Inconvénients du béton.....	24
CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES.....	25
2.1 Définition [24].....	25
2.2 Les Polymères [25].....	25
2.3 La Géopolymérisation [26].....	25
2.4 Les Géopolymères [27].....	26
2.4.1 Classification.....	26
2.5 Synthèse des géopolymères [28].....	26
2.5.1 Avantages.....	26
2.5.2 Inconvénient.....	26
2.5.3 Utilisations et applications.....	27
2.5.4 Les produits géopolymériques.....	27
2.6 La Silice [29].....	29
2.6.1 Définition.....	29
2.6.2 Formes et structures cristalline.....	30
2.6.3 Différentes état de la silice.....	30
2.7 Propriétés.....	31

2.7.1 Propriétés thermiques.....	31
2.7.2 Propriétés physiques et mécaniques.....	34
2.7.3 Propriétés chimiques.....	34
2.8 L'Alumine [29].....	34
2.8.1 Généralités.....	34
2.8.2 Définition.....	34
2.8.3 Procédés de fabrication de l'alumine.....	34
CHAPITRE 3 : GENERALITES SUR LA BALLE DE RIZ.....	38
3.1 Définition [30].....	38
3.2 Propriétés [30].....	38
3.2.1 Aspect physiques et propriétés thermiques.....	38
3.2.2 Propriétés chimiques [31].....	39
3.3 Utilisation de la balle de riz [31].....	39
3.3.1 Combustible.....	39
3.3.2 Isolant dans les briques cuites.....	39
3.3.3 Confection de son.....	40
3.3.4 Anti-moustiques.....	40
3.3.5 Productions d'engrais.....	40
3.3.6 Matériaux de construction.....	40
CHAPITRE 4 : GENERALITES SUR LE KAOLIN.....	41
4.1 Le Kaolin.....	41
4.1.1 Définition [32].....	41
4.1.2 Propriétés [33].....	41
4.1.3 Les principales utilisations du kaolin [33].....	41
CHAPITRE 5 : GENERALITES SUR LA CHAUX.....	43
5.1 Définition [34].....	43
5.2 Classification de la chaux [34][35].....	43
5.3 Caractéristiques de la chaux : [34].....	44
CHAPITRE 6 : GENERALITES SUR LA SOUDE [36].....	46
6.1 Définition.....	46

6.2 Propriétés chimiques .....	46
6.3 Techniques de fabrication .....	47
6.4 Utilisations industrielles importantes.....	47
6.4.1 Dans l'industrie chimique .....	47
6.4.2 Dans l'agroalimentaire .....	48
6.4.3 Dans l'énergétique .....	48
6.4.4 Dans les laboratoires d'analyse et industries chimiques.....	48
CHAPITRE 7 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX ANTI-ACIDES .....	49
7.1 Effets positifs des couches de protection sur le béton [37] .....	49
7.2 Facteur eau-ciment moindre, meilleure résistance à l'acide .....	49
7.3 Le ciment de haut fourneau affiche de meilleures performances.....	49
7.4 Applications de la résine époxy [38].....	50
7.5 Avantages de la résine époxy .....	50
7.6 Autres types de matériaux anti-acides .....	51
7.6.1 Des plastiques résistants aux acides.....	51
7.6.2 Des matériaux métalliques résistant à la corrosion .....	51
7.6.3 Autres matériaux anti-acides.....	51
CHAPITRE 8 : APPROVISIONNEMENT ET IDENTIFICATION EN MATIERES PREMIERES ...	52
8.1 Choix de matière première de base .....	52
8.2 Les matières premières.....	52
8.3 Matériels utilisés .....	55
8.3.1 Four .....	55
8.3.2 Broyeur .....	55
8.3.3 Incinérateur .....	55
8.3.4 Tamis .....	56
8.3.5 Table vibrante.....	56
8.3.6 Balance .....	56
8.4 Préparation des matières premières.....	57
8.4.1 Concassage.....	57

8.4.2 Tamisage.....	57
8.4.3 Combustion balle de riz.....	58
8.4.4 Traitement du kaolin.....	61
8.5 Caractéristiques des matières premières .....	61
8.5.1 Caractéristiques géométriques des granulats.....	61
8.5.2 Caractéristiques physiques RHA Tableau 17 : Caractéristiques physiques des cendres de balle de riz.....	64
8.5.3 Composition chimique de cendre de balle de riz.....	64
8.5.4 Caractéristiques de la chaux .....	64
8.5.5 Caractéristiques du kaolin et méta-kaolin.....	65
8.5.6 Caractéristiques de la soude .....	65
8.5.7 Caractéristiques de l'eau.....	66
CHAPITRE 9 : ELABORATION ET FORMULATION DES EPROUVETTES.....	67
9.1 Mode opératoire .....	67
9.1.1 Les paramètres .....	67
9.1.2 Essai de fabrication des éprouvettes de béton géopolymères dans un moule rectangulaire....	67
CHAPITRE 10 : Les essais physiques, mécaniques et chimiques .....	71
10.1 Essai physique.....	71
10.1.1 Retrait linéaire et volumique .....	71
10.1.2 Densité apparente et densité réelle.....	71
10.2 Essai mécanique.....	72
10.2.1 Résistance à la traction par flexion.....	72
10.2.2 Résistance à la compression.....	73
10.3 Essai chimique .....	73
CHAPITRE 11 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	74
11.1 Méthode .....	74
11.2 Variation en fonction rapport molaire $R_m = nSiO_2/nNa_2O$ .....	74
11.3 Variation de l'aluminosilicate et de la chaux en pourcentage massique.....	74
11.4 Variation de l'eau de gâchage et du silicate de soude.....	76
11.5 Résultats sur les essais physiques .....	78

11.6 Résultats sur les essais chimiques.....	80
11.6.1 Résultats après 7 jours d'immersion dans les acides .....	82
11.6.2 Résultats de comparaison après 07 jours et 14 jours d'immersion dans les 2 acides.....	85
CHAPITRE 12 : APPROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE .....	91
12.1 COMPARAISON DES COUTS.....	91
12.1.1 Les prix des matières premières .....	91
12.1.2 Coûts de 1 m <sup>3</sup> de béton témoin.....	91
12.1.3 Coûts de 1 m <sup>3</sup> de béton géopolymère .....	92
12.2 APPROCHE ENVIRONNEMENTALE .....	92
12.2.1 Evaluation des impacts.....	92
CHAPITRE 13 : LES MESURES DE SECURITE .....	94
13.1 Mesures d'atténuation.....	94
13.2 Les mesures à prendre pour les produits toxiques. ....	95
13.3 Comparaison entre le béton témoin et notre béton géopolymère antiacide .....	95
CONCLUSION GENERALE.....	97
ANNEXES.....	I
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	III
WEBOGRAPHIES .....	V
TABLE DES MATIERES .....	VI
RESUME .....	vii
ABSTRACT.....	vii

Auteur : RAMANITRARIVO Lucien André

Titre : «BETON GEOPOLYMERE QUI RESISTE AUX  
AGRESSIONS CHIMIQUES »

Nombres de pages : 97

Nombres de tableau : 46

Nombres de figures : 25

Nombres de photos : 39



### RESUME

Le but de ce mémoire est d'optimiser un béton géopolymère résistant aux acides fabriqué à partir des matières premières disponibles localement en excès tels la cendre de balle de riz et le kaolin en renforçant avec la chaux et le liant silicate de soude. Des essais physiques, mécaniques et chimiques ont été réalisés.

Pour conclure, les résultats expérimentaux ont été démontré visiblement l'infériorité du béton témoin à celle du béton géopolymère en terme de résistance aux attaques chimiques ou à la corrosion.

Mots clés : géopolymères, acide, cendre de balle de riz, kaolin, chaux, silicate de soude.

### ABSTRACT

The purpose of this thesis is to optimize an acid-proof geopolymer concrete made from locally available raw materials in excess such as rice husk ash, kaolin to reinforce with lime and the binder sodium silicate. Physical, mechanical and chemical tests were carried out.

To conclude, the experimental results have visibly demonstrated the inferiority of the control concrete to that of the geopolymer concrete in terms of resistance to chemical attack or corrosion.

Key words: geopolymer, acid, rice husk ash, kaolin, lime, sodium silicate.

Coordonnées de l'auteur :

Tel : 034 74 457 82

E-mail : iarivolucititi@gmail.com

Rapporteur : Professeur RATSIMBAZAFY Hery Mikaelaa