



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA



MENTION : GENIE CIVIL

Parcours : MATERIAUX MINERAUX

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master – Titre Ingénieur en
Science et Ingénierie des Matériaux*

.....

**ETUDE ET ESSAI DE FABRICATION
DES BETONS GEOPOLYMERES A
BASE DE POZZOLANE NATURELLE
DE BETAFO VAKINANKARATRA**

.....

Présentée par : **Mme MIHAJANAVALONA Rindraniavo**

Soutenu le 22 Décembre 2021

Encadreur : **Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela**

Année Universitaire 2018 - 2019



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA



MENTION : GENIE CIVIL

Parcours : MATERIAUX MINERAUX

*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master – Titre Ingénieur en
Science et Ingénierie des Matériaux*

.....

ETUDE ET ESSAI DE FABRICATION DES BETONS GEOPOLYMERES A BASE DE POUZZOLANE NATURELLE DE BETAFO VAKINANKARATRA

.....
Soutenu le 22 Décembre 2021

Présentée par : Mme MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Président de jury : Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur
Titulaire

Directeur de mémoire : Monsieur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Maître de
Conférences

Examineurs :

- ☆ Madame RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Maître de Conférences
- ☆ Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine, Maître-assistant
- ☆ Monsieur Rivo Razafy NOMENJANAHARY, Maître-assistant

Année Universitaire 2018 - 2019

TENY FISAORANA

Voalohany indrindra dia tsy hay ny tsy hisaotra an'ily Andriamanitra Ray be fitiavana noho ny famindram-pony sy ny fahasoavany ka nahavitana izao asa izao, ho Azy anie ny dera sy laza ary ny voninahitra mandrakizay, Amen.

Manarak'izany dia misaotra manokana an'i:

- ☆ Andriamatoa RAJAONARISON Eddie Franck “Professeur”, Talean'ny sekoly ambon'ny Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra noho ny andraikitra lehibe izay sahaniny amin'ny fitantanana ny sekoly.
- ☆ Andriamatoa RAKOTONIRAINY “Professeur Titulaire”, Talen'ny sekoly teo aloha, izay nandray anay hanaraka ny lalam-piofanana tao amin'ny sekoly ;
- ☆ Andriamatoa RANDRIANARIVELO Lanja, “maître-assistant”, Lehiben'ny sampam-piofanana “Genie Civil” noho ny asa lehibe izay sahaniny amin'ny fitondrana ny departemanta ;
- ☆ Andriamatoa RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely “Professeur Titulaire”, Izay nampiofana anay tao amin'ny lalam-piofanana, ary koa nanaiky hitarika ny mpitsara izao asanay izao.
- ☆ Ramatoa RAKOTOMALALA Zolimboahangy “Maître de conferences”, Mpampianatra izay nampiofana anay ihany koa tao amin'ny lalam-piofanana izay nanaiky ny hitondra fanatsarana ity asa ity.
- ☆ Andriamatoa KOERA Rasoloniaina Antoine “Maître-assistant”, izay anisan'ireo mpampianatra namolavola anay ihany koa nandritra ny taom-pianarana rehetra, ary koa ny nanekeny hitsara izao vokatry izao.
- ☆ Andriamatoa Rivo Razafy NOMENJANAHARY “Maître-assistant”, izay nampiofana anay ihany koa ka nanome anay ny fahalalana saha anay nandritra ny taona maromaro nianaranay, ary ihany koa ny fahatsorany ka nanaiky hitsara izao asa izao.
- ☆ Andriamatoa RATSIMBAZAFY Hery Mikaela “Maître de conferences”, mpiandraikitra ahy, izay nahafoy fotoana tsy nitandro hasasarana ka teo akaiky teo fona nanaramaso sy nanoro hevitra ahy ka nahatontosako izao asa izao.

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Isaorana manaraka izany ihany koa ny:

- ☆ Tompon'andraikitra rehetra tao amin'ny "Centre National des recherches Industrielle et Technologique (CNRIT)" Fiadanana Tsimbazaza, tamin'ny namelany ahy nanatanteraka ny fikarohana sy ny andrana rehetra ka nahafahako nampiasa ireo fitaovana tao amin'ny "laboratoire" iadidiny.
- ☆ Tompon'andraikitra tao amin'ny "Bloc Technique Ankatso" sy "Bloc Technique Vontovorona", izay namela ahy ampiasa ny fitaovana tao ka nahatontosa izao asa izao.
- ☆ Ireo mpampianatra rehetra nandritra izay dimy taona izay, nohon'ny fitivan'izy ireo nizara ireo traikefa anany avy ka nahazonay fahaizana amam-pahalalana.
- ☆ Ireo tompon'andraikitra isan'ambaratongany ao amin'ny sekoly ambony IESA-V izay nikarakara sy niandraikitra anay ka nahavitanay soa aman-tsara ny fianaranay tao.

Misaotra ihany koa ireo Tompon'andraikitra sy Technicien ny "Centre National de Recherches Industrielle et Technologie (CNRIT)", sy ny Mpiandraikitra ny "Bloc Technique Ankatso" ny naneken'izy ireo ny hanaovana ny fikarohana ka nahazoana alalana ny amin'ny fampiasana ireo fitaovana sy nanamora ny fanatontosana ireo andrana rehetra nandritra ny famitana ity fikarohana ity.

Misaotra betsaka an'i Neny, izay loharano nipoirako, tsy nikely soroka nanao izay ahatafita ahy ka nikolokolo sy nanampy ahy tamin'ny zavatra rehetra. Misaotra ny amin'ny fitiavana ka tsy mba reraka fa nankahery ahy hatrany ka nahavitako izay taona maro izay.

Fisaorana mitafotafo ihany koa ho an'ilay vadiko izay teo foana hatrany nanampy ahy sy nanohana ahy tamin'ny zavatra rehetra hatramin'ny farany tamin'ny fanatontosana izao asa izao.

Misaotra ihany koa ireo fianankaviana rehetra sy ireo tapaka sy namana akaiky na lavitra nanampy sy nanohana ahy tamin'ny lafiny rehetra.

‘Andriamanitra manan-karem-pahasoavana anie hamaly ny soa sy n tsara rehetra nataonareo tamiko ka hanatanteraka ireo fikasana tsara rehetra kasainareo.’

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu qui m'a donné la santé et l'intelligence pour mener à bien mon travail.

Mes vifs remerciements s'adressent plus particulièrement à l'endroit de :

- ✓ Monsieur, RAJAONARISON Eddie Frank, Professeur Titulaire, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra (IESA-V) pour m'avoir permis d'étudier au sein de son établissement ;
- ✓ Monsieur RAKOTONIRAINY, Professeur Titulaire, ancien Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe-Vakinankaratan (IES-AV) pour l'honneur qu'il nous en fait de nous accepter à intégrer dans l'école ;
- ✓ Monsieur RANDRIANARIVELO Lanja, Maître-Assistant, Chef de mention Génie Civil, de nous avoir pris soin pendant ses années que nous avons étudié ;
- ✓ Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur Titulaire, qui m'a fait l'honneur de présider ce mémoire ;
- ✓ Madame RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Maître de conférences, pour son aide et avoir accepté de donner une partie de leur précieux temps afin de bien mener ce mémoire ;
- ✓ Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine, Maître-Assistant, d'avoir partagé une partie de leur savoir et d'accepter en tant qu'examineur ;
- ✓ Monsieur Rivo Razafy NOMENJANAHARY, Maître-Assistant, de nous avoir donné une partie de son temps pour que cet étude soit acceptable ;
- ✓ Monsieur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Maître de conférences et Encadreur de ce travail, Malgré ces occupations, il m'a tant aidé et donné des conseils importants pour la réalisation de ce mémoire ;

Mes remerciements vont aussi :

- ✓ Aux personnes du laboratoire du Centre National de Recherches Industrielle et Technologie (CNRIT), et au personnel du Bloc Technique Ankatso qui m'a facilité l'accès aux matériels nécessaires pour la réalisation de mon travail ;
- ✓ À ma chère mère qui m'a aidé et me toujours soutenir ainsi de m'encourager pendant tout ce temps, merci pour tous.
- ✓ A mon époux aussi, merci d'exister sur ma vie car tu m'as toujours aidé et m'as soutenu toujours même dans la difficulté, tu es toujours là pour moi ;

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

✓ Et à mes amis qui m'ont soutenu moralement, matériellement et financièrement tout au long de mes études et enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire.

Que Dieu vous bénisse et réalise tous vos souhaits !

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

SOMMAIRE

TENY FISAORANA

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES NOTATIONS

INTRODUCTION

PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons

CHAPITRE II : Généralités sur les géopolymères

CHAPITRE III : Généralités sur la balle de riz et la cendre de balle de riz

CHAPITRE IV : Généralités sur la pouzzolane naturelle

CHAPITRE V : Notions sur le kaolin et métakaolin

CHAPITRE VI : Généralités sur la chaux hydraulique

PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE VII : Préparation et caractérisation des matières premières

CHAPITRE VIII : Essai de formulation et de fabrication des éprouvettes

CHAPITRE IX : Résultats et interprétation des essais expérimentaux

CHAPITRE X : Aspect économique et environnemental des bétons géopolymères

CONCLUSION GENERALES

BIBLIOGRAPHIES

WEBOGRAPHIES

ANNEXES

TABLES DES MATIERES

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: les éléments constitutifs d'un béton</i>	3
<i>Figure 2 : rôles des constituants de béton</i>	4
<i>Figure 3 : étape de fabrication de ciment</i>	5
<i>Figure 4 : Observation d'un grain de ciment au microscope électronique</i>	6
<i>Figure 5 : représentation schématique de l'hydratation du ciment (Jaw et al.85)</i>	7
<i>Figure 6 : Processus de fabrication du ciment</i>	10
<i>Figure 7 : Forme de granulats</i>	18
<i>Figure 8: les oligomères de polysialate</i>	30
<i>Figure 9 : synthèse des géopolymères</i>	34
<i>Figure 10 : Application sur les géopolymères</i>	35
<i>Figure 11: Balles de riz</i>	36
<i>Figure 12 : Schéma d'installation type d'usine de traitement de matériaux pouzzolaniques (d'après BRGM et CETE ? 1980).</i>	42
<i>Figure 13 : poudre de métakaolin</i>	48
<i>Figure 14 : structure cristalline du kaolin</i>	51
<i>Figure 15 : morphologie d'une kaolinite très bien cristallisée</i>	52
<i>Figure 16 : représentation d'une plaquette de kaolinite</i>	52
<i>Figure 17 : Transformation du kaolin en métakaolin</i>	55
<i>Figure 18 : cycle de la chaux</i>	56
<i>Figure 19 : four verticaux à marche continue pour la cuisson de la chaux</i>	58
<i>Figure 20: La courbe granulométrique du sable 0/5</i>	70
<i>Figure 21: courbe granulométrique du gravier 5/12,5</i>	71
<i>Figure 22 : Etapes de fabrication des éprouvettes</i>	83
<i>Figure 23: Etapes de fabrication de silicate de soude</i>	84
<i>Figure 24: Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction du rapport molaire variation du rapport molaire Rm pendant 7 jours d'âge</i>	95
<i>Figure 25 : Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction des quantités des constituants de l'aluminosilicate.</i>	97
<i>Figure 26: Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la masse du silicate de soude pendant 7 jours d'âge</i>	99
<i>Figure 27 : Résistance à la compression des éprouvettes obtenues par la variation des quantités de l'eau de gâchage.</i>	101

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Figure 28 : Résistance à la traction par flexion selon l'âge de l'éprouvette (MPa).... 103

Figure 29: Comparaison et évolution de la résistance à la compression de l'éprouvette en fonction de leur mode de conservation et l'âge de béton. 104

Figure 30: histogramme de la masse volumique selon l'âge de l'éprouvette 105

Figure 31: histogramme de la porosité selon l'âge de l'éprouvette..... 106

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Notation des cimentiers</i>	8
<i>Tableau 2 : types des ciments</i>	10
<i>Tableau 3: Domaines d'utilisation des ciments courants</i>	11
<i>Tableau 4 : Les granulats les plus utilisés</i>	12
<i>Tableau 5: Caractéristiques des sables</i>	15
<i>Tableau 6: Classe, affaissement, consistance à l'état frais</i>	24
<i>Tableau 7 : Classe de résistance du béton</i>	24
<i>Tableau 8 : Affaissement au cône d'Abrams</i>	25
<i>Tableau 9 : Caractéristiques des balles de riz</i>	36
<i>Tableau 10: Composition de différentes parties de la balle de riz</i>	37
<i>Tableau 11 : Composition chimique élémentaire des cendres RHA</i>	40
<i>Tableau 12 : Conductibilité thermique du béton</i>	44
<i>Tableau 13 : Résistance à la compression d'un béton caverneux</i>	45
<i>Tableau 14 : Résistance à la compression d'un béton plein</i>	45
<i>Tableau 15: propriétés physiques, thermique et mécanique du kaolin</i>	50
<i>Tableau 16 : Composition chimique du kaolin</i>	50
<i>Tableau 17 : propriété mécanique de la chaux hydraulique</i>	59
<i>Tableau 18 : Propriété physique et composition chimique de la chaux</i>	60
<i>Tableau 19: Caractéristiques de la pouzzolane naturelle de Betafo</i>	66
<i>Tableau 20: Masse volumique apparente du sable de Vontovorona</i>	67
<i>Tableau 21 : Masse volumique apparente du gravillon de Vontovorona</i>	67
<i>Tableau 22 : masse spécifique du sable et du gravier</i>	68
<i>Tableau 23: Résultat d'analyse granulométrique du sable 0/5</i>	70
<i>Tableau 24: Résultat d'analyse granulométrique du gravier 5/12,5</i>	71
<i>Tableau 25: Caractéristique chimique du kaolin</i>	73
<i>Tableau 26: Caractéristiques chimique de la chaux</i>	74
<i>Tableau 27 : caractéristique de la soude caustique</i>	79
<i>Tableau 28 : caractéristique de l'eau de JIRAMA</i>	79
<i>Tableau 29: Quantité en mole de nSiO₂ et NaOH</i>	93
<i>Tableau 30 : quantité en g de chaque constituant</i>	94

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

<i>Tableau 31: Résultats de la résistance en compression en fonction du rapport.</i>	
<i>R_m = nSiO₂nNa₂O</i> pendant 7 jours à l'air libre.....	94
<i>Tableau 32: variation des composants de l'aluminosilicate</i>	96
<i>Tableau 33: résistance à la compression obtenue par variation des constituants de l'aluminosilicate</i>	96
<i>Tableau 34: variation de la quantité du silicate de soude.....</i>	98
<i>Tableau 35 : Résistance à la compression en fonction de liants</i>	98
<i>Tableau 37: Variation de la quantité de l'eau de gâchage</i>	100
<i>Tableau 38: Résistance en fonction de l'eau de gâche.....</i>	100
<i>Tableau 39: résultat de la résistance à la traction par flexion</i>	102
<i>Tableau 40 : résultat de la résistance à la compression par variation de temps de prise</i>	103
<i>Tableau 41: Masse volumique apparente du béton géopolymère selon leur âge.....</i>	105
<i>Tableau 42: Résultat de la porosité de notre béton géopolymère selon leur âge</i>	105
<i>Tableau 43 : Retrait linéaire du béton géopolymère selon leur âge</i>	106
<i>Tableau 44: prix de chaque matière première de béton ordinaire.....</i>	108
<i>Tableau 45 : Prix d'1 m³ de béton ordinaire.....</i>	108
<i>Tableau 46 : Prix à chaque matière première pour béton géopolymères</i>	109
<i>Tableau 47 : prix d'1 m³ du béton géopolymères.....</i>	109
<i>Tableau 48 : Notation chimique du ciment.....</i>	V

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 1: pouzzolane naturelle vient de gisement de Betafo</i>	65
<i>Photo 2: broyeur à boulet du CNRIT</i>	66
<i>Photo 3: Tamisage de la pouzzolane calcinée</i>	66
<i>Photo 4: kaolin de PROCHIMAD</i>	72
<i>Photo 5: Four de calcination du kaolin à 750°C</i>	73
<i>Photo 6: fleur de chaux « Fotsy Botsiaka »</i>	74
<i>Photo 7: tamisage de chaux</i>	75
<i>Photo 8: Incinérateur pour la cuisson des balles de riz</i>	76
<i>Photo 9: introduction de la balle de riz dans l'incinérateur</i>	76
<i>Photo 10: feu du charbon de bois</i>	76
<i>Photo 11 : couverture de l'incinérateur</i>	77
<i>Photo 12 : Balles de riz au cours de la carbonisation après 24h</i>	77
<i>Photo 13: cendre de balle de riz broyé</i>	78
<i>Photo 14: soude caustique</i>	78
<i>Photo 15 : photos des matériels utilisés</i>	82
<i>Photo 16: pesage et mélangeage de silicate de soude</i>	85
<i>Photo 17: pesage des constituants de l'aluminosilicate et mélangeage</i>	86
<i>Photo 18: mélangeage de l'aluminosilicate et les agrégats</i>	86
<i>Photo 19: mélangeage de l'aluminosilicate et du silicate de soude</i>	87
<i>Photo 20: moulage des éprouvettes</i>	87
<i>Photo 21: Séchage des éprouvettes</i>	88
<i>Photo 22: Mesure du retrait à l'aide d'un mètre graduée</i>	88
<i>Photo 23: Mesure de la porosité</i>	89
<i>Photo 24 : Machine d'essai Mécanique « Wolpert TESTWELL »</i>	90
<i>Photo 25: dispositif de flexion 3 points</i>	91
<i>Photo 26: dispositif de compression</i>	92

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : NOTATION DES CIMENTIERES

ANNEXE 2 : FICHE TECHNIQUE DU KAOLIN D'ANALABE

ANNEXE 3 : CARTE DE LOCALISATION DES GISEMENT DE KAOLIN A
MADAGASCAR

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

LISTE DES ABREVIATIONS

CNRI : Centre National de Recherches Industrielle et Technologie

AFNOR : Association Française des Normalisations

NF EN : Norme Française de références Européenne

d/D : diamètre inférieur et supérieur

ES : équivalence de sable

h : hauteur

Mf : Module de finesse

Cu : coefficient d'uniformité

V : volume

pH : potentiel d'hydrogène

d app : densité apparente

C : compacité

P : porosité

W : teneur en eau

NA : norme

Rc: résistance à la compression

CRH: Carbonized Rice Husk

RHA: Rice Husk Ash

PCI : le pouvoir calorifique inférieur

PCS : le pouvoir calorifique supérieur

Rm : Rapport molaire

SS : Silicate de soude

R : retrait

F : force

CBR : Cendre de Balle de riz

MK : Métakaolin

L : liant

Pz Nat : pouzzolane naturel

CX : chaux

e : épaisseur

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

LISTE DES NOTATIONS

ρ_{app} : Masse volumique apparente

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

C : compacité

λ : Conductivité thermique

τ : masse spécifique

ρ : masse volumique apparente

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

INTRODUCTION

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources naturelles nécessitent d'établir des nouvelles lois et d'adapter des nouveaux concepts. La valorisation des matériaux naturels et le recyclage des déchets sont un moyen efficace face aux contraintes d'ordre économiques et écologiques de ces dernières années.

Depuis plusieurs décennies, l'industrie du béton a développé l'utilisation des pouzzolanes naturelles et artificielles dans les bétons hydrauliques pour augmenter les performances mécaniques et les propriétés de durabilité.

Comme la ville de Betafo, dans la région de Vakinankaratra Madagascar, dispose des potentialités liées au volcanisme telles que la géothermie et les pouzzolanes, et que ses pouzzolanes sont conformes à la Norme Française NFP18-310, nous avons l'idée de formuler un béton géopolymère à base de cette dernière, sans ajout de ciment, d'où le thème de notre mémoire qui s'intitule :

« Etude et essai de fabrication des bétons géopolymères à base de pouzzolane naturelle de Betafo Vakinankaratra ».

Le but de ce travail de recherche est de caractériser des matériaux naturels disponibles localement, en vue de leur utilisation dans le domaine des bâtiments. L'objectif final étant double : d'une part valoriser des matériaux locaux et d'autre part faire baisser le coût de fabrication, contribuant ainsi à un environnement durable. Cette étude consiste à caractériser les matériaux utilisés pour l'élaboration et la formulation des bétons à base de pouzzolane. Dans ce sens, nous avons mené une série d'essais mécaniques et physiques, pour caractériser notre béton géopolymère.

Actuellement, les chercheurs et les scientifiques ne cessent pas de faire des découvertes pour améliorer les performances techniques des matériaux de construction tels que le ciment : de diminuer les coûts de leur fabrication et la consommation d'énergie et tout en préservant l'environnement. Le ciment géopolymère peut substituer partiellement ou totalement le ciment standard avec des propriétés comparables mais surtout de diminuer la pollution dégagée dans l'atmosphère et la technique de géopolymérisation est une technique fiable pour atteindre ces objectifs.

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Pour mener à bien notre travail, notre mémoire comporte trois grandes parties :

La première partie est consacrée à l'étude bibliographique notamment sur les généralités de : géopolymère, kaolin et métakaolin, pouzzolane naturelle, cendre de balle de riz, la deuxième partie consiste à la méthodologie expérimentale : les matières premières et leurs caractéristiques, l'expérimentation, et la dernière partie traite les résultats et discussions, ainsi que l'évaluation des prix et l'aspect environnementaux.

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

PARTIE I :
ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS

I.1 Définition [1]

Le béton est un matériau composite aggloméré, constitué de granulat durs et diverses dimensions collés entre eux par un liant. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont dans les bétons courants de 1 pour l'eau à plus de 3 pour le ciment (en t/m³). Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire.

Le béton est alors un mélange d'agrégat (sable + granulat) et de la pâte composée : de ciment, d'eau et d'adjuvant.

- Pâte 30 à 40%
 - Ciment portland : 7% to 15% par volume
 - Eau : 14% to 21% par volume
- Granulats 60% à 80%
 - Gros granulats
 - Granulats fins
- Adjuvants chimiques



Figure 1: les éléments constitutifs d'un béton :

Ciment + gravillon + sable + eau = Béton

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

I.2 Rôles des constituants [1]

Chaque constituant de béton a son rôle qui est défini sur cette figure ci-dessous :

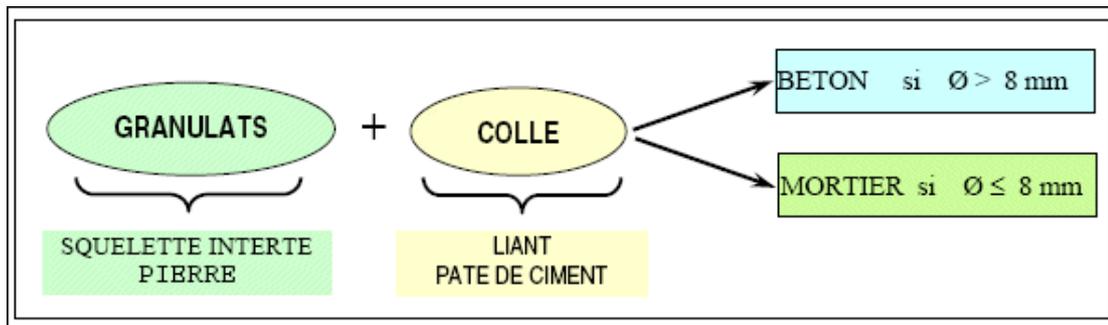


Figure 2 : rôles des constituants de béton

I.2.1 - Le liant ou le ciment

Les Romains connaissaient déjà le secret de la production d'un matériau hydraulique dense et durable en mélangeant de la chaux avec des matériaux d'origine volcanique pour former un liant qui a des propriétés, très semblable à celles qu'on retrouve dans la pâte du ciment hydraté. Toutefois, les connaissances des Romains furent perdues après les invasions des barbares et ne furent retrouvées qu'à la fin de 18e siècle. L'invention du ciment est attribuée à un maçon Anglais du nom de Joseph Aspdin et date de 1824. Le nom de portland est dû au fait que la couleur du béton obtenu ressemble à une roche d'excellente qualité extraite de la presqu'île de calcaire de Portland, situé à l'ouest de l'Île of Wight. Son importation au Canada remonte à 1889 dans des barils en bois.

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre très fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis, composée d'oxydes minéraux dont les deux principaux sont la chaux (CaO) et la silice (SiO₂). Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air ou dans l'eau.

Le ciment Portland:

- Est une poudre sèche ayant des particules très fines
- forme une pâte au contact de l'eau (liant hydraulique)
- Réagit pour former des produits d'hydratation
- colle
- Enrobe tous les granulats ensemble
- Durci pour former une masse solide

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

a. Production du ciment

Pour fabriquer du ciment Portland, on fait cuire à température très élevée (1450°C), dans un four rotatif, un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile (ou de matériaux similaires). La pierre calcaire fournit la chaux, et l'argile fournit principalement la silice et l'alumine.

Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle clinker. Le ciment Portland est ensuite fabriqué en ajoutant au clinker pulvérisé (grosseur des particules varie à peu près entre 1 et 80µm) une faible quantité (5%) de gypse. La description sommaire de la fabrication du ciment est illustrée dans la figure.

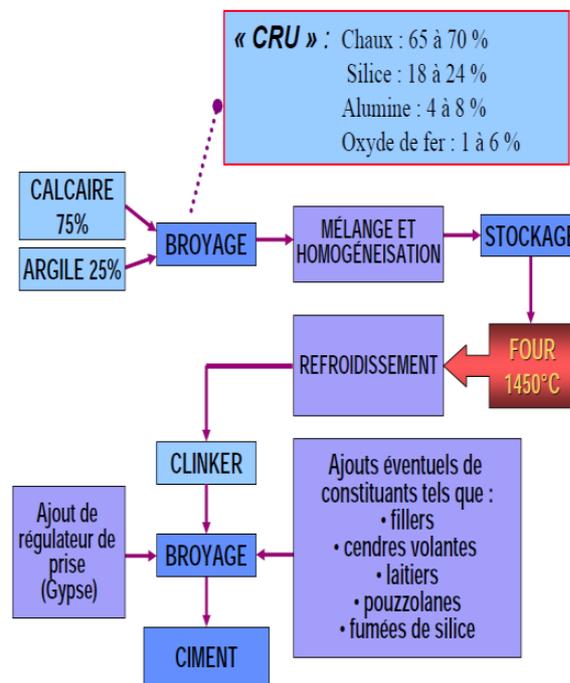


Figure 3 : étape de fabrication de ciment [2]

b. Propriétés physico-chimiques du ciment

Les ciments sont caractérisés par leur vitesse de réaction, leur chaleur d'hydratation, leur finesse etc... Ces caractéristiques sont définies par des essais tels que:

- Composition chimique
- Consistance normale
- Temps de prise
- Leur finesse de mouture (broyage)
- Leur composition chimique

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

c. Composition chimique

A l'issue de la cuisson, nous obtenons 4 phases cristallines

- 45 à 65 % de silicate tricalcique (Alite) **C3S**
- 15 à 25 % de silicate bicalcique (Bélite) **C2S**
- 0 à 10 % d'alumino-ferrite tétracalcique **C4AF**
- 0 à 15 % d'aluminate tricalcique **C3A**

Résumé chimique et notation cimentière :

- Silice SiO_2 **S**
- Chaux..... CaO **C**
- Alumine..... Al_2O_3 **A**
- Oxyde de Fer..... Fe_2O_3 **F**

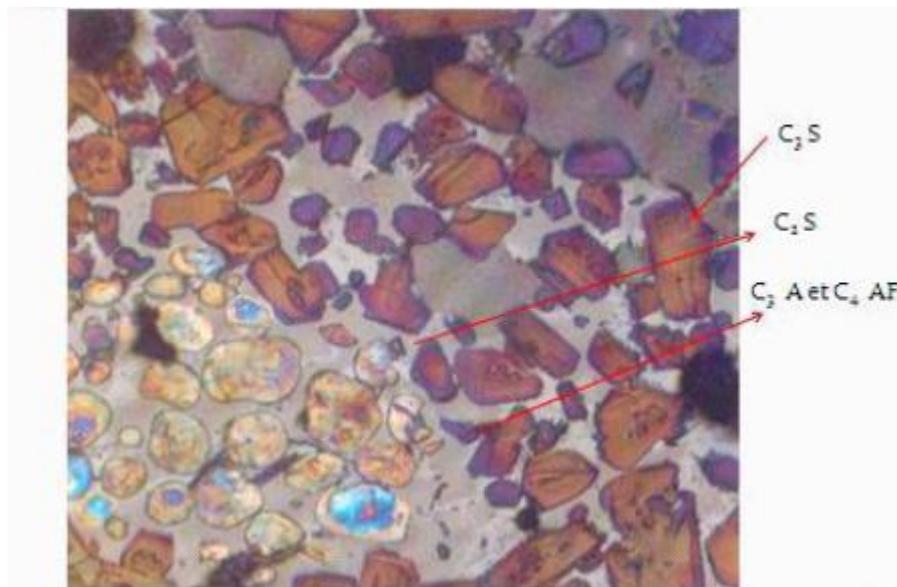


Figure 4 : Observation d'un grain de ciment au microscope électronique

d. Hydratation du ciment [3]

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation comprenant (dans l'ordre où elles s'effectuent) les réactions d'absorption, d'hydrolyse, de dissolution ; de solvatation, de précipitation, de cristallisation, de germination, de migration, et de diffusion. Ce mécanisme doit être considéré dans toute sa complexité, en tenant compte des différentes interactions mutuelles de ses différentes réactions.

L'hydratation du ciment correspond à une suite de réactions chimiques entre les différents composants du clinker, le gypse et l'eau. Celles-ci s'effectuent suivant un processus de

dissolution précipitation très complexe qui peut être schématisé sur la figure 5. L'ordre de réactivité des composants du ciment est connu : C3A > C3S > C4AF > C2S

L'hydratation du CPA est un phénomène complexe faisant intervenir divers processus (mécanisme d'hydratation) qui ont été élucidés dès la fin du 19ème siècle. Il a notamment décrit trois étapes relatives à la prise du ciment :

L'absorption physique et chimique de l'eau par les grains de ciment ;

La dissolution ou solvataion correspondant à un changement d'état du solide ionique (ciment) en présence de solvant (eau) ;

La cristallisation, qui débute par la germination et se poursuit par la croissance de cristaux

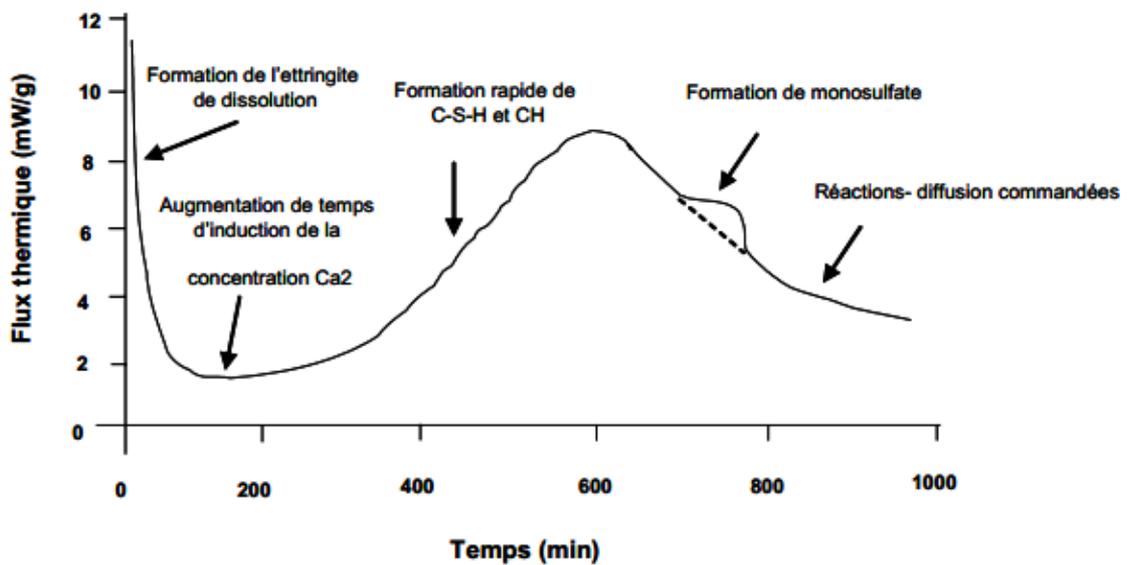


Figure 5 : représentation schématique de l'hydratation du ciment (Jaw et al.85)

e. Notation des cimentiers [W1]

L'utilisation de ces certaines formules abrégées et ces appellations courantes ci-dessous est très importante pour faciliter l'étude du ciment

Le tableau ci-après nous montre la notation de la chimie des ciments

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Tableau 1 : Notation des cimentiers

Formules et abréviations usuelles			
	Formule complète	Formule agrégée	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 ₄	Cs	Sulfate calcium (anhydrite)
	CaSO ₄ , 2H ₂ O	CsH ₂	Sulfate de calcium (gypse)
Constituants hydrauliques	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C3A	Aluminate de tricalcique
	$4CaO \cdot 3H_2O \cdot Fe_2O_3$	C3AF	Aluminoferrite tetracalcique
	$3CaO \cdot SiO_3$	C4AF	Silicate tricalcique
	$2CaO \cdot SiO_3$	C3S	Silicate bicalcique
Constituants hydratés	$3CaO \cdot 2SiO_3 \cdot 3H_2O$	C3S2 H3	Silicate de calcium hydraté (tobermorite)
	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$	C4 AH13	Aluminate de calcium hydraté
	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	C3A H6	
	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$	C3ACS3	Sulfoaluminate de calcium hydraté (attringite)
	Ca(OH) ₂	CH	Chaux hydraté

f. Matière première pour la fabrication du ciment [W2]

Pour la fabrication du ciment, les matières premières essentielles sont la roche 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,
- Les fillers.

g. Processus de fabrication du ciment :

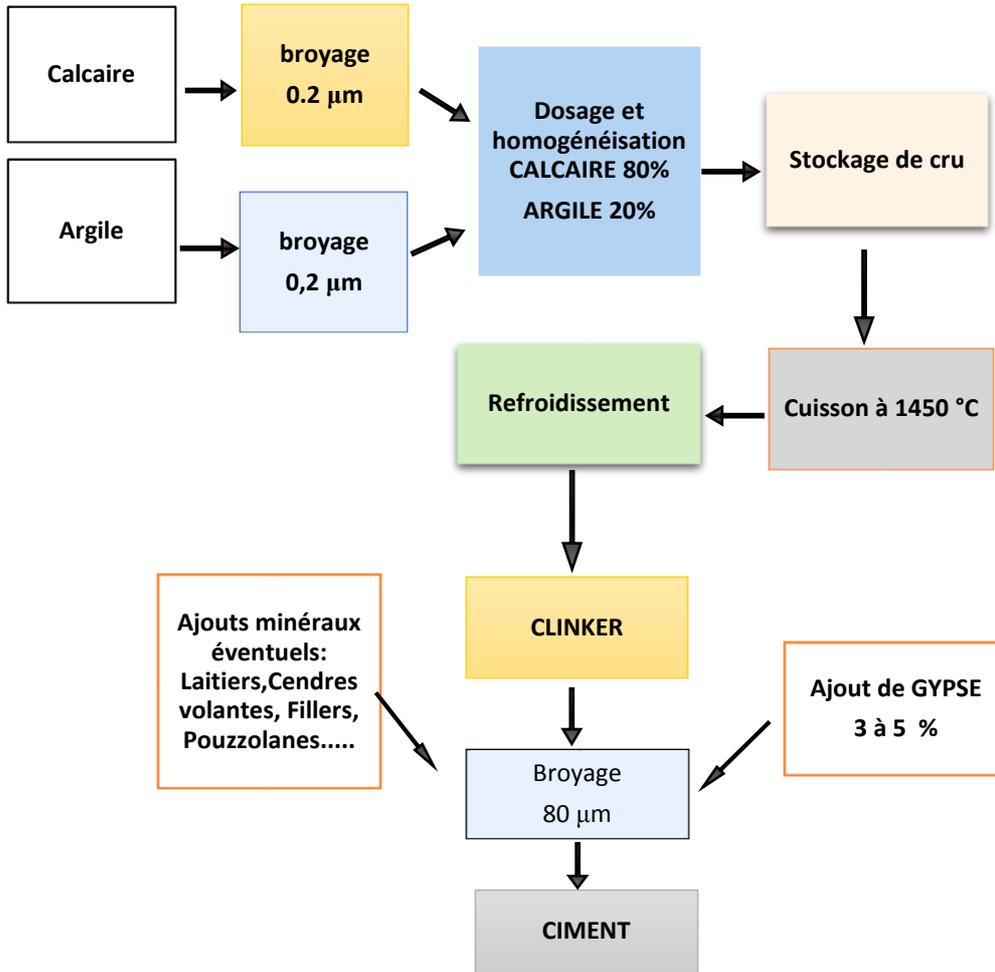


Figure 6 : Processus de fabrication du ciment

h. Les différents types des ciments [W3]

Il y a 5 types de ciment qui sont dans le tableau ci-dessous

Tableau 2 : types des ciments

Type	Désignation
Ciments Portland	CEM I
Ciments Portland composés	CEM II / A ou B
Ciments de haut fourneau	CEM III / A, B ou C
Ciments pouzzolaniques	CEM IV / A ou B
Ciments composés	CEM V / A ou B

Domaine d'utilisation des ciments courants :

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

Tableau 3: Domaines d'utilisation des ciments courants

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 Demer, eau séléniteuses, ...); Ouvrages massifs (barrages, fondations ...)
Ciment pouzzolanique	CEMIV / A ou B	Construction souterraine et sous-marine-en Béton ; Etanchéité et résistance l'eau
Ciment composé	CEM V/ A ou B	Travaux importants en béton armé; Travaux en milieux agressifs; Travaux en grande masse

I.3. Les granulats [4] :

I.3.1. Définition

Le granulat 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. Constitué de squelette du béton, les granulats représentent environ 80 % du poids total du béton et améliorent leur résistance mécanique.

I.3.2. Classification des granulats

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

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

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées 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,

I.3.3. Les granulats les plus utilisés

Tableau 4 : 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.

I.3.3.1 Les fillers et les sables

a. Le Filler

- **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

- **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

- **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,

b. Le sable

- **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

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

- **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 utilisés 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 utilisé 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 5: Caractéristiques des sables

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

c. Les graviers ou gravillons

Les graviers sont les éléments passant à travers des trous 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.

d. Les cailloux :

Les cailloux sont les éléments qui passent entre les passoirs de 25 mm à 100 mm.

On distingue :

- les petits cailloux dont les diamètres des grains variant de 25 mm à 40 mm ;
- les cailloux moyens dont les diamètres des grains variant de 40 mm à 63 mm ;
- les gros cailloux dont les diamètres des grains variant de 63 mm à 100 mm

Les cailloux sont utilisés pour l'empierrement et pour la fabrication de « gros bétons ».

e. Propriétés des granulats

La norme NF P 18 541, les déchets organiques sont interdits pour les granulats, dont le pourcentage doit être inférieur à 0,1%.

Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur limite est comprise entre 2 et 5% selon le béton.

La propriété est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm sous l'eau dans le cas de gravillons et cailloux

Le pourcentage de matières, vase argile, éliminée lors de l'essai de propriété doit être inférieur à 1,5 dans le cas de gravillon n'ayant subi de concassage et inférieur ou égal à 3% dans le cas de gravillon concassés, et on procède en plus à un « essai au bleu de méthylène ». Pour les sables comme pour les graviers la propriété peut se contrôler, mais de préférence par l'essai « équivalent de sable » consistant à séparer le sable des matières argileuses ou fines et qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette ou l'on a effectué le lavage.

I.3.4. Propriétés des granulats fins [5]

I.3.4.1 Propreté du sable (teneur en fines argileuses)

La propreté du sable est déterminée par l'essai d'équivalent de sable (ES), cet essai est en général utilisé pour les sables destinés au béton.

La méthode consiste au lavage des sables par une solution dans un cylindre gradué jusqu'au trait repéré inférieur figurant sur le cylindre. Puis 10 minutes de repos pour humidifier l'éprouvette. Après avoir fermé le cylindre, on le dispose ensuite sur une machine d'agitation et procédé à l'agitation du cylindre pendant 30 secondes.

Après ces quelques minutes de repos, on mesure la hauteur totale h_1 du niveau supérieur du floculant par rapport au fond du cylindre gradué et la hauteur h_2 , distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon. L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$ES = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$$

Cet essai a pour but donc de mettre en suspension les fines (particules <0.063 mm soit 63 μ m).

h_1 : Hauteur du sable propre.

h_2 : Hauteur totale du sable.

I.3.4.1.1 Spécification

- Si $ES < 60\%$, sable argileux (risques de retrait ou gonflement du béton)
- Si $60\% \leq ES \leq 70\% \leq 80\%$: Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses ; convenant parfaitement pour des bétons de qualité.
- Si $ES \geq 80$: Sable très propre

I.3.4.1.2 Module de finesse

Le module de finesse est appliqué spécialement pour les sables (0/5), afin d'évaluer sa finesse et pour avoir une finesse fiable à l'utilisation. Le module de finesse est égal au 1/100 des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série. 5 mm ; 2,5 mm ; 1,25 mm ; 0,630mm ; 0,315mm ; 0,160mm.

Et pour un bon sable à béton, il doit avoir un $M_f = 2,2$ à $2,8$. Un Module de finesse faible indiquant une majorité d'élément fin dans le sable, tandis qu'un module de finesse élevé marque la présence d'élément grossier dans le sable.

C'est la somme de pourcentages des refus cumulés pour les tamis de modules : 23, 26, 29, 32, 35, 38.

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulés (0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5)}}{100}$$

Sable Fin : MF = 1,8

Sable optimal : MF = 2,2 à 2,8

Sable Grossier : MF = 3,2

I.3.4.1.3 La propreté

Particules fines (argileuse ou poussière)

- ❖ Mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte de ciment
- ❖ Mauvaise résistance et faible ouvrabilité

Propreté superficielle « P » = Élément fin ($\leq 0,5$ mm) < 1.5%

I.3.4.1.4 Résistances mécaniques :

a. Coefficient Los Angeles : (fragmentation par choc et Usure par frottement)

Le but de cet essai c'est la détermination de la résistance au choc par fragmentation et à l'usure des granulats. Le coefficient « LA » est mesuré à partir du passage au tamis de 1,6 mm

exprimé en pourcentage en masse. Une roche ne peut être classée comme granulat que si $LA < 45$.

Le mode d'opération s'applique aux gravillons utilisés par la constitution des chaussées et de béton hydraulique.

b. Essais de micro-Deval (Usure par frottements)

Ce sont des essais dont le principe est de reproduire des phénomènes d'usure dans un cylindre en rotation. En fin d'essai la dureté Deval ou Microdeval est mesurée par le pourcentage de passant au tamis de 1,6 mm d'ouverture

Intérêt :

La bonne résistance du granulat permet d'éviter des modifications de la granularité lors du malaxage et du transport.

I.3.5 Caractéristiques des granulats

I.3.5.1 Caractéristique géométrique des granulats

Les granulats sont caractérisés par les dimensions et la forme de leurs grains

a. Forme

Pour éviter les chutes de résistance des bétons par suite du risque d'apparition de plans de glissements potentiels une bonne forme des granulats est essentielle

La forme d'un élément granulométrique est donc définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales : l'épaisseur (E), la grosseur (G) et la longueur (L).

L'utilisation des granulats les plus isotropes est conseillée dans différents usages. Et aussi il est très recommandé que les granulats soient d'une forme assez ramassée pour l'utilisation dans le béton.

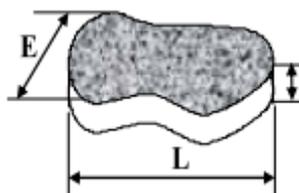


Figure 7 : Forme de granulat

b. Dimensions

Selon les dimensions de ses grains les sols varient du plus pulvérulent au plus fin
Les grains d'un matériau granulaire ont des dimensions variables, quelques μm à quelques dizaines de cm.

La granulométrie est la distribution massique des grains suivant leur dimension ainsi la technique employée pour la détermination de la granulométrie dépend des dimensions des granulats

- **Gros granulats**

Tamisage jusqu'à 40 ou 80 μm , en utilisant des tamis ou des passoires.

- **Granulats fins**

La caractérisation de la granulométrie d'un matériau se fait à l'aide de 2 coefficients.

- *Coefficient d'uniformité :*

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$C_u > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée.

$C_u < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée.

- *Coefficient de courbure*

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$1 < C_c < 3 \rightarrow$ matériau bien gradué (la continuité est bien répartie).

$C_c < 1$ ou $C_c > 3 \rightarrow$ matériau mal gradué (la continuité est mal répartie).

I.3.6 Caractéristique physique des granulats

I.3.6.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse des granulats par unité de volume total.

Il comprend les vides entre les grains (volume apparente).

$$\rho_{app} = \frac{m_s}{V_t}$$

m_s : masse de solide ou masse de granulat

V_t : volume total

I.3.6.2 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue désigne la masse des granulats par unité de volume de substance plein sans aucun vide entre les grains (volume absolue).

$$\rho_{abs} = \frac{m_s}{V_s}$$

m_s : masse des granulats ou solide

V_s : volume des granulats ou absolue

I.3.6.3 Densité absolue

La densité absolue des granulats est le rapport entre la masse volumique absolue et la masse volumique d'eau.

$$d = \frac{\rho_{abs}}{\rho_e}$$

I.3.6.4 Densité apparente

La densité apparente des granulats est définie comme les rapports entre leur masse volumique et leur masse d'un égal volume d'eau à 4°C. Elle est égale au millième de la masse volumique.

$$d_{app} = \frac{\rho_{app}}{\rho_e}$$

I.3.6.5 Teneur en eau d'un granulat :

La teneur en eau d'un granulat est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\% W = \frac{m_o - m_1}{m_o} \times 100$$

m_o : La masse d'un granulat avant le séchage

m_1 : La masse d'un granulat sortie d'un Etuve

I.3.6.5 Compacité :

La compacité est le rapport du volume de matière plein du volume total

$$C = \frac{V_t - V_{vide}}{V_t}$$

I.3.6.6 Porosité :

La porosité indique l'importance d'un vide dans un granulat. Elle peut être en fonction de volume total (V_t), de volume du vide (V_{vide}) et de la composite C ou encore d'indice de vide (ϕ)

$$P = \frac{V_{vide}}{V_t}$$

$$\%P = \frac{V_{vide}}{V_t} * 100$$

Indice du vide ϕ est exprimé :

$$\phi = \frac{V_{vide}}{V_t - V_{vide}}$$

I.4 Différents types de béton [6]

I.4.1 Béton ordinaire

C'est un mélange homogène composé exclusivement des constituants de base : ciment, granulat, eau, avec un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Il est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre 20 MPa = f_{c28} = 50 MPa

I.4.2 Béton à haute résistance (BHR)

C'est un béton dont la résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété de béton, depuis la découverte du béton armé, les études sont axées sur la recherche de méthode permettant de renforcer cette résistance.

Selon la norme Européenne EN 206-1, le béton est considéré un béton à haute résistance à partir d'une classe de résistance C55/67, le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la R_c caractéristique mesurée sur des cylindres de 30 mm de hauteur et de 150 mm de diamètre et le deuxième nombre à la R_c sur un cube de 150 mm de côté.

I.4.3 Béton à haute performance (BHP)

Le Béton de haute performance est un béton aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (supérieure à 50 MPa), et un rapport pondéral E/C inférieur à 0,40. Sa propriété essentielle est la grande résistance en compression qui dépasse largement celle des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à sa faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants

I.4.4 Béton auto-plaçant (BAP)

Le béton auto-plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration.

Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes ; il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Il se caractérise en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité.

I.4.5. Béton fibrés (BF)

Le béton de fibre est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou naturelles, ce qui permet suivant l'ouvrage, de supprimer le treillis soudés traditionnel. Parmi les caractéristiques du béton fibré, on peut citer : sa résistance à la traction, à la fissuration et au choc.

I.4.6. Béton fibrés ultra à haute performance (BFUHP)

Les progrès dans le domaine de superplastifiant, des méthodes de formulation et de l'utilisation des ultrafines ainsi que l'optimisation de l'empilement granulaire, on conduit à une évolution spectaculaire des bétons. Les BFUHP sont les derniers nés de cette génération de béton. Ce sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances à la compression : $150 \text{ MPa} \leq R_c \leq 250 \text{ MPa}$.

I.4.7. Béton à durcissement rapide

C'est un béton dont le développement des résistances mécaniques est accéléré ; ce béton permet la réalisation de petits ouvrages de réparation ou des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide, ainsi que le décoffrage. Ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication.

I.4.8. Béton léger

Le béton légers est défini comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2100 kg/m^3 . Parmi ces bétons, on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction.

I.4.9. Béton lourd

On définit le béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m^3 ; les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées, compte tenu des faibles dosages en eau.

I.4.10. Béton réfractaire

Le béton réfractaire est un béton qui résiste à des températures élevées pouvant atteindre 1300°C , il est obtenu par le mélange de ciment Alumineux et de granulats réfractaires (chamottes, corindon), ou granulats isolants (Pouzzolane, vermiculite, argile expansée) ; le béton réfractaire sert à la construction de cheminées et de sols d'usines sidérurgiques

I.4.11. Béton à poudre réactive (BPR)

Le béton appelé BPR qui est des matériaux caractérisés par une forte teneur en poudre de silice et un rapport en eau très faible peuvent répondre à ses exigences. Des fibres métalliques viennent s'ajouter comme une crussions particulière pour augmenter la caractéristique mécanique telle que la résistance à la traction et la résistance à la pression.

Pour rendre les BPR plus performants, on peut aussi mes presser avant et pendant la prise et leur microstructure peut être amélioré par traitement thermique.

I.4.12. Béton compacté au rouleau (BCR)

Le BCR tient son nom de la technique employé pour le mettre en place. Il est épandu au moyen de matériel pour revêtement à haute densité (Compacité par des rouleaux). Il réunit les mêmes constituants de base que le béton classique : ciment, granulat et eau. Toutefois, le mélange employé est plus sec, il est assez ferme pour qu'on puisse le compacter à l'aide de rouleau vibrant.

I.5. Classification des bétons

On définit des modes de classification de béton à l'état frais et à l'état durcit.

❖ A l'état frais classe de consistance

Pour les bétons à l'état frais il existe cinq classes de consistances selon la norme NF 206-1, On les définit par les lettre S1 à S5, caractérisé par la mesure de l'affaissement aux cônes d'Abram (exprimé en millimètre).

Tableau 6: Classe, affaissement, consistance à l'état frais

Classe	Affaissement [mm]	Consistance
S1	10 – 40	Ferme
S2	50 – 90	Moyennement plastique
S3	100 – 150	Plastique
S4	160 - 210	Très plastique
S5	≥ 220	Fluide

A l'état durci

❖ Classe de la masse volumique

En général, on classe trois groupes de bétons (norme NF EN 206-1), selon sa masse volumique ρ :

- ✓ Béton léger, $800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$;
- ✓ Béton courant, $2000 \leq \rho \leq 2600 \text{ kg/m}^3$;
- ✓ Béton lourd, $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$.

En plus de ses 3 classes il y a :

- ✓ Le béton ultraléger qui est fabriqué avec des granulats le même très léger ou contraire comportant de vide dans la structure
- ✓ Le béton très lourd avec une masse volumique comprise entre 4000 à 7000 kg/m³.

❖ Classe de résistance

La norme EN 206-1 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression. Selon leur résistance à la compression à 28 jours, on peut trouver ci-dessous les classes de béton.

Tableau 7 : Classe de résistance du béton

Classe	Béton ordinaire	Béton à haute performance	Béton à très haute performance	Béton à ultra haute performance
RC à 28 jours	16 – 40	45 – 60	65 – 100	>110

Actuellement, il est préférable d'utiliser le mode de classification qui se base uniquement sur la résistance et caractéristique mesuré sur l'éprouvette cylindrique, dont l'élancement est exprimé en [MPa].

I.6. Propriétés et caractéristiques du béton

Le béton possède de comportements :

- État frais
- État durcit

I.6.1. Propriété à l'état frais du béton

La propriété essentielle du béton à l'état frais est son ouvrabilité, caractérisée par sa consistance. Les méthodes les plus utilisés pour l'évaluation de la consistance du béton sont donc l'affaissement au cône d'Abram et l'étalement à la table de secousse.

I.6.2. Affaissement au cône d'Abrams

Selon la norme NFP 18 451 c'est dans un moule en forme de tronc que le béton frais est compacté. Lorsque le cône est soulevé, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

Tableau 8 : Affaissement au cône d'Abrams

Affaissement A (cm)	Consistance
0-4	ferme
5-9	plastique
10-15	Très plastique
≥16	Fluide ou coulée

I.6.3. Propriétés du béton durcit

Les principales propriétés du béton durcit sont :

- Les résistances mécaniques dont la résistance à la compression simple et à la traction
- La compacité
- Le retrait
- L'homogénéité
- Le fluage

I.7. Formulation du béton [7]

Plusieurs méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et ayant le but d'obtenir les meilleures caractéristiques possibles.

Une méthode de composition du béton pourra être acceptable si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- ❖ Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression.
- ❖ Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisés sur le chantier.
- ❖ Le béton doit présenter un faible retrait

Ils existent plusieurs méthodes de formulations du béton :

- ✓ La méthode Baron Olivier ;
- ✓ La méthode Bolomey ;
- ✓ La méthode de Féret ;
- ✓ La méthode de Faury ;
- ✓ La méthode Dreux-Gorisse.
- ✓ La méthode de Valette
- ✓ La méthode de Joisel

I.8. Fabrication du béton

I.8.1. Fabrication manuel

Elle est exécutée par une surface très propre, bétonnier si possible, le mélangeage de différentes constituantes est effectué avec une pelle.

Les différents constituants solide (gravillons, sable, ciment) sont mélangés à sec et on forme un trou au milieu du tas dans lequel on verse progressivement l'eau du gâchage et on effectue le mélangeage avec d'une pelle, on additionne petit à petit l'eau jusqu'à avoir la consistance voulue généralement à vue d'œil.

I.8.2. Fabrication mécanique

Ce sont des cuves basculantes pour le plus petit ou de cuve à axe horizontal pour le plus grand. Les cuves sont pour vue des palettes qui assure les malaxages des constituants différents, la capacité de la cuve varie de 30 à 100 l pour la cuve basculant. Elle peut atteindre 1m³ pour les bétonnières axe horizontal, le vidange de la cuve se fait par le basculant de la cuve pour la cuve basculante et par l'insertion du sens de rotation de la cuve pour la bétonnière à axe horizontale

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES

II.1. Introduction [8]

Depuis près de trente ans, les instances internationales s'intéressent particulièrement au concept de développement durable. Celui-ci vise à répondre aux besoins des générations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Nous sommes aujourd'hui conscient qu'il faut agir, et agir rapidement, s'il on veut léguer à nos enfants une Terre où il est agréable de vivre.

Le monde scientifique se penche depuis une vingtaine d'années sur des alternatives au ciment Portland traditionnel. En effet, en tant que grand consommateur de matières calcaires naturelles et grand producteur de CO₂, sa fabrication ne s'inscrit pas dans le concept de développement durable.

Les « ciments alcalins » aussi appelés « ciments activés aux alcalins » font partie de ces alternatives. Ceux-ci sont formés de deux grandes catégories de produits. D'une part, les géopolymères, développés par J. Davidovits dans les années 80. Ceux-ci sont synthétisés à partir d'argile kaolinique calcinée et d'alcalins.

II.2. Historique

Suite aux multiples incendies catastrophiques survenus en France dans la période allant de 1970 à 1973 et dont la gravité est attribuée pour la plupart aux matériaux de décoration de type polyester utilisés, il est devenu impératif de produire sur le marché de nouveaux matériaux plastiques qui résistent au feu, des matériaux ininflammables et incombustibles. C'est dans ce contexte que Davidovits décide d'orienter ses travaux vers la conception de nouveaux matériaux. Dans cette quête, il remarque une similarité dans les conditions de synthèse de certains matériaux plastiques organiques d'une part, et de minéraux feldspathoïdes et zéolites résistants au feu d'autre part. Ces deux types de synthèse se déroulent en milieu alcalin concentré, à la pression atmosphérique et à une température inférieure à 150° C [36,38]. Enfin, la revue de la littérature montre qu'à cette période, l'exploitation de la géochimie de ces minéraux pour l'élaboration de liants et des polymères minéraux n'est pas encore assez investiguée.

Ceci a conduit à l'élaboration, dans la période allant de 1973 à 1976, aux premiers géopolymères et leur application dans le domaine des matériaux de construction [37]. Ce sont des panneaux géopolymères agglomérés résistants au feu, une sorte de matériau composite constitué d'une matrice de copeaux de bois recouverte par un géopolymère.

était synthétisé à partir d'un mélange de kaolinite, de quartz et d'une solution d'hydroxyde de sodium, à une température variant de 130 à 200° C.

II.3. Définition

Les géopolymères font partie de la famille des polymères inorganiques. Leur comportement est similaire aux matériaux minéraux naturels que sont les zéolites et les feldspaths tout en étant différents par leur microstructure qui est amorphe dans le cas des géopolymères et cristalline pour les minéraux naturels.

La géopolymérisation est une réaction chimique, exothermique, entre un précurseur (un aluminosilicate) et un activateur (des hydroxydes alcalins et/ou des silicates alcalins) pour former des liaisons polymériques Si-O-Al.

Un géopolymère est essentiellement un composé chimique minéral ou un mélange de composés constitués de motifs monomères répétés (géopolymérisation), par exemple :

- Silico-oxyde (—Si—O—Si—O—) silicate ou siloxonate
- Silico-aluminate (—Si—O—Al—O—) ou sialate
- Ferro-silico-aluminate (—Fe—O—Si—O—Al—O—) ou ferro-sialate
- Alumino-phosphate (—Al—O—P—O—)
- Hybride organo-minéral de type (—R—O—Si—O—Al—O—R—)

Le terme poly(sialate) a été proposé pour désigner les géopolymères silicoaluminates de sodium, de potassium et de calcium. Le réseau sialate est constitué par des groupes (SiO_4) et (AlO_4) reliés par liaison covalente Si—O—Al— . Les cations (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , H_3O^+) présents dans les cavités structurales du poly(sialate) équilibrent la charge négative de Al^{3+} en coordination (IV).

Une matrice géopolymérique de type :

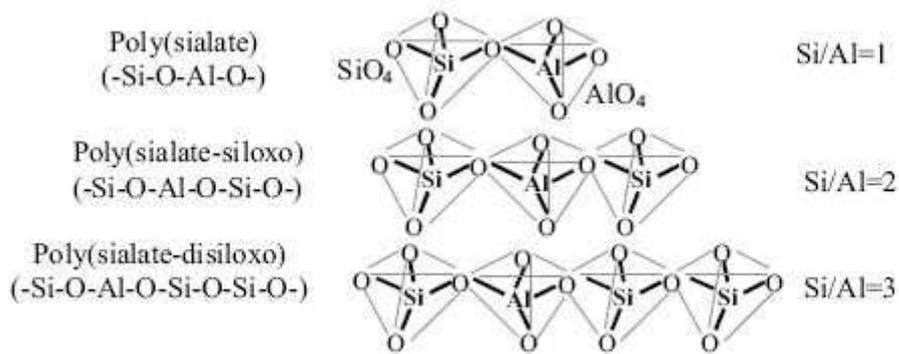


Figure 8: les oligomères de polysialate

Généralement, les polysialates ont pour formule : $M_n\{(SiO_2)_z - AlO_2\}_n ; wH_2O$

Avec :

- M, un cation métallique : le sodium, le potassium ou le calcium ;
- n : degré de polymérisation ;
- z : valant 1,2 ou 3 ;
- w décrivant l'hydratation du composé.

On peut donc rencontrer trois chaînes de polysialates selon la valeur de z :

- Pour z=1 : le produit serait appelé polysialates ou PS ;
- Pour z=2 : polysialate siloxo ou PSS (Si-O-Al-Si-O) ;
- Pour z=3 : polysialate disiloxo ou PSDS (Si-O-Al).

II.4. La découverte des géopolymères

La découverte des géopolymères provient d'une volonté de mettre au point des matériaux plastiques sans carbone, résistants au feu et à la chaleur. Ce sont des matières minérales, obtenues par des procédés chimiques de géosynthèse, qui ne brûlent pas et ne dégagent ni gaz ni fumées toxiques. Ils sont aussi pauvres en émission de gaz à effet de serre CO_2 .

Comme les roches et autres matériaux géologiques, ces polymères minéraux résistent aux agressions chimiques, basiques ou acides, ainsi qu'aux solvants organiques.

Certains s'obtiennent par copolymérisation d'éléments individuels aluminosilicates qui proviennent en général des produits de dissolution de minéraux silico-alumineux, sous fort pH et en présence de silicates alcalins solubles.

Par ailleurs, la géopolymérisation est obtenue par une grande variété de sous-produits industriels silico-alumineux : comme les cendres volantes de centrales thermiques à charbon et le laitier de haut fourneau, conduit à l'obtention de matériaux destinés au bâtiment ou au génie minier dotés d'excellentes propriétés physiques et chimiques, par exemple la résistance au feu et aux acides.

II.5. Les matières premières des géopolymère et la géosynthèse [9]

Les matières premières utilisées dans la synthèse de polymères à base de silicium sont principalement des minéraux d'origine géologique, d'où le nom géopolymère employé depuis 1979. Cette synthèse minérale (géosynthèse) fut présentée lors d'un symposium IUPAC en 1976.

En générale, pour élaborer les géopolymères, les matières premières utilisées sont :

- Les matériaux aluminosilicates ;
- Les solutions activatrices

II.5.1. Matériaux aluminosilicates

Les matières premières aluminosilicates utilisées pour la synthèse des géopolymères doivent être à la fois riches en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3) et peuvent être très variées, qu'il s'agisse de minéraux naturels (illite, stilbite, kaolinite), de minéraux calcinés (métakaolin) ou de minéraux de substitution, principalement des sous-produits calcinés ou résidus d'exploitation industrielle (cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, scories volcaniques, des pouzzolanes naturelles et des cendres de balle du riz).

Le kaolin et le métakaolin ont été les premières à être utilisées comme sources d'aluminosilicates. Le métakaolin est une bonne source d'alumine et de silice ; il a une grande réactivité au contact des solutions alcalines et peut être utilisée pour comprendre le mécanisme de la géopolymérisation. Sa grande réactivité est liée à l'état de désorganisation du réseau cristallin après activation thermique.

II.5.2. Les solutions activatrices

Pour la synthèse des géopolymères, le choix de la solution activatrice est très important car les propriétés du produit obtenu en dépendent fortement.

La solution d'activation comprend le cation de compensation ou le mélange de cations de compensation sous forme d'une solution ionique ou d'un sel. Ainsi, la solution d'activation est notamment choisie parmi :

- Une solution aqueuse de silicate de sodium (Na_2SiO_3) et de silicate de potassium (K_2SiO_3) ;
- D'hydroxyde de sodium (NaOH), d'hydroxyde de potassium (KOH) et d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ; d'hydroxyde de césium (CsOH) et leurs dérivés sulfates, phosphates et nitrates,...

La solution alcaline la plus utilisée pour l'élaboration des matériaux géopolymères est la combinaison d'une solution de sodium ou de potassium hydroxyde (NaOH ou KOH) et le sodium ou potassium silicate (Na_2SiO_3 , K_2SiO_3).

L'utilisation de la solution alcaline contient le silicate de sodium ou de potassium comparé à celle ne contenant que l'hydroxyde alcalin rend la réaction de géopolymérisation plus rapide. De même, l'utilisation d'une solution d'hydroxyde de sodium par rapport à celle d'hydroxyde de potassium favorise la géopolymérisation et améliore les propriétés mécaniques des géopolymères.

II.6. Mécanisme de la géopolymérisation [10]

Le mécanisme exact de la géopolymérisation demeure inconnu en raison notamment de la rapidité de la réaction. Toutefois la plupart des spécialistes s'accorde pour dire qu'il s'agirait d'un mécanisme de dissolution des produits bruts utilisés (comme le métakaolin) suivie d'une polycondensation sous forme de gel.

En 1956, Glukhovsky proposa un mécanisme général pour l'activation alcaline des matériaux comprenant de la silice et de l'alumine réactive. Il divisait le processus en trois parties : destruction/coagulation, coagulation/condensation et condensation/cristallisation.

Des études récentes basées sur un mécanisme de Davidovits et d'autres spécialistes comme Xu et Van Deventer divisent la réaction en trois étapes : dissolution/hydrolyse, restructuration et polycondensation/gélation. Ces trois étapes sont concomitantes, et en partie réversibles. La cinétique de chaque étape dépend de plusieurs facteurs comme le type de minéral d'aluminosilicate, le ratio solide/liquide, les concentrations en silicates et alcalins.

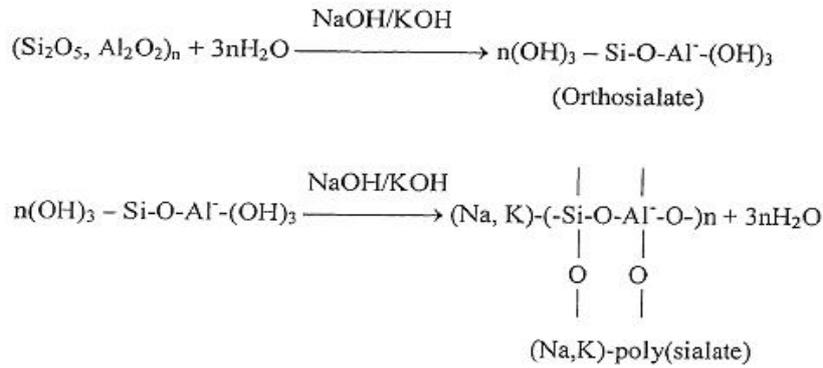


Figure 9 : synthèse des géopolymères

II.7. Autres produits géopolymères [9], [11], [12]

Les applications sur le géopolymère engendrent plusieurs produits, autre que notre étude sur le béton géopolymère en citant le liant ou résine géopolymère, le ciment géopolymère et la brique géopolymère.

II.7.1. Liant ou résine géopolymère

On a plusieurs liants géopolymères tels le K-PSS, Potassium-poly(sialate-siloxo) de formule chimique $[1.3\text{K}_2\text{O}][\text{Al}_2\text{O}_3, 4.5\text{SiO}_2]$ et le Na,K-PSS, Sodium-Potassium-poly(sialatesiloxo)

de formule chimique $[0.6\text{Na}_2\text{O}, 0.65\text{K}_2\text{O}][\text{Al}_2\text{O}_3, 4.6\text{SiO}_2]$.

Les liants géopolymères sont préparés en mélangeant divers silico-aluminates précondensés avec un durcisseur. Ils doivent être durcis dans une étuve pour des meilleurs résultats.

La polycondensation des résines K-PSS et Na,K-PSS se fait à température ambiante ou entre 20°C et 85°C.

II.7.2. Ciment géopolymère

Le ciment géopolymère «K, Ca-PSS » est un liant à prise rapide de résistance supérieure. Il se définit comme un ciment inorganique dérivé des matériaux géologiques à base de silice et d'alumine.

La fabrication de ce ciment de qualité supérieure n'emploie aucun calcaire, mais utilise à sa place un silico-aluminate naturel.

Ce ciment est propre, écologique, respecte l'environnement. Sa fabrication émet jusqu'à 90% moins de CO₂ que le ciment classique de Portland.

II.7.3. Brique géopolymère

Cette brique utilise la terre d'argile latéritique comme matière première, cette terre mélangée à un simple liant géopolymère est compressée pour donner la forme d'une brique puis cuite dans un four.

- Cuite à 85°C, la brique est stable à l'eau et à une résistance suffisante pour en faire un mur.
- Cuite à 250°C, elle résiste au gèle.
- Cuite à 450°C, sa résistance augmente encore, permettant de fabriquer des éléments de structure comme les poutres pour les portes et fenêtres.

Par rapport à une brique traditionnelle cuite, la brique géopolymère consomme en moyenne huit fois moins d'énergie pour une résistance équivalente.

Selon le type de géopolymère et le rapport Si /Al, l'application de ce dernière est résumé comme suit :

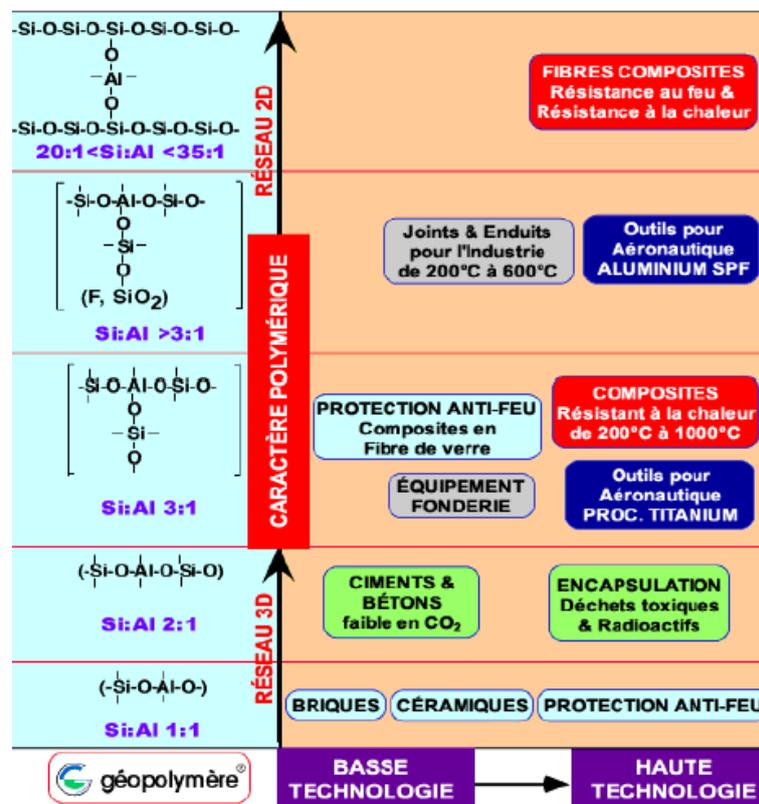


Figure 10 : Application sur les géopolymères

Source : Davidovits J

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LA BALLE DE RIZ ET LA CENDRE DE BALLE DE RIZ

III.1. Les balles de riz [13]

ette matière première de base est très abondante dans toute la Grande Ile, notamment dans les régions productrices : Ambatondrazaka et Marovoay.

III.1.1. Définition

La balle de riz est l'enveloppe externe du grain de riz. Elle s'obtient par décortilage du riz par simple abrasion et elle ne subit aucune transformation chimique.



Figure 11: Balles de riz

III.1.2. Caractérisation

La balle de riz a des différentes caractéristiques physiques qui sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Caractéristiques des balles de riz

Biométrie	Longueur [mm]	5 à 7
	Largeur [mm]	1 à 3
Couleur		Beige
Aspect		Fluide
Densité		0,12
TAUX D'APSORPTION		1,6
pH eau		6,8
Pouvoir calorifique [kcal/Kg]		3300

Source : [12]

III.1.3. Composition chimique des balles de riz

Les balles de riz pures sont composées de silicium, de carbone et d'oxygène. Leurs proportions ne sont pas homogènes.

Tableau 10: Composition de différentes parties de la balle de riz

Eléments	Surface extérieure [%]	Cœur [%]	Surface intérieure [%]
C	6,91	62,54	30,20
O	47,93	35,19	42,53
Si	45,16	2,27	27,27

Source : [12]

III.1.4. Utilisations [13]

La balle de riz est utilisée dans un large éventail d'applications :

III.1.4.1. Combustible

La balle de riz constitue l'un des meilleurs combustibles naturels, son pouvoir calorifique est de 3 300 Kcal/kg. A Madagascar, la balle de riz est utilisée principalement comme combustible pour la cuisson des briques et des tuiles en terre cuite.

III.1.4.2. Production d'engrais organique

La balle de riz peut être utilisée comme engrais organique. La technique de traitement de la balle de riz en engrais organique est très simple : les agriculteurs mélangent la balle de riz avec un produit bio et laissent composter le mélange pendant environ 10 jours, à la température de 50 à 52°C. Après 30 à 35 jours, la balle va pourrir et se transformer en engrais organique de couleur brun foncé.

En moyenne, une tonne de balle de riz donne 600 à 700 kg d'engrais organique.

III.1.4.3. Isolation des bâtiments

Les balles de riz constituent un bon isolant thermique, elles ont une faible conductivité thermique de $\lambda = 0,05 \text{ W/m.K}$. L'utilisation de la balle de riz en isolation thermique par voie sèche se développe depuis 2004, en remplissage d'ossatures et en combles perdus, par déversement ou par soufflage, ou en complément d'isolants rigides ou semi-rigides pour boucher les vides.

Par voie humide, son utilisation en isolation se présente sous forme de bétons « chaux-balles de riz » ou « terre-balles de riz ».

III.1.4.4. Fabrication de carburant à base de balles de riz

En 2008, le professeur Alexis Belonio de l'Université centrale de Philippines a inventé un fourneau à gaz simple alimenté à la balle de riz, l'un des déchets agricoles les plus abondants en Asie. Ce fourneau à bas coût, qui ne génère aucune fumée, est destiné à une utilisation domestique ou par des entreprises artisanales. Cette invention a pour impact majeur de réduire les frais de combustible et les émissions de gaz à effet de serre.

III.1.4.5. Fabrication des panneaux de gypse

Les panneaux de gypse sont fabriqués à froid à partir de gypse, de balle de riz (inférieur à 30%) et d'acide citrique. La présence de la balle de riz améliore la résistance mécanique des panneaux et diminue leur capacité d'absorption d'eau.

III.1.4.6. Litière animale

La balle de riz est aujourd'hui utilisée principalement en litière avicole et en litière bovine et cheval. Elle apporte confort aux animaux et permet de les maintenir dans un milieu propre.

III.1.4.7. Fabrication des adobes

Les adobes sont fabriqués généralement à partir d'un mélange séché de terre argileuse et de la balle de riz. La présence de la balle de riz dans le mélange permet d'augmenter à la fois la dureté et la résistance de la brique à l'humidité.

III.1.4.8. Fabrication des enduits de terre

Les balles de riz permettent de réduire le risque de fissuration des enduits de terre. Les enduits de terre sont faits à partir de terre argileuse, de l'eau et d'une grande quantité de balles de riz. La balle est ajoutée à la terre qui a été préalablement mélangée à beaucoup d'eau. Le mélange est laissé à pourrir trois (3) semaines, période pendant laquelle on le remouille et le remélange régulièrement, afin d'obtenir une bonne résistance du mortier.

Malgré ses nombreuses possibilités d'utilisation, une grande quantité de balles de riz n'est pas encore valorisée dans notre pays, ce qui constitue aujourd'hui une nouvelle source de problèmes dans les régions productrices car les lieux de stockage ne sont plus suffisants :

- Pollutions de l'air et de sol dues au brûlage des balles de riz pour la libération des espaces de stockage ;
- Problème d'écoulement des eaux de pluie car les ouvrages d'assainissement sont souvent obstrués par les balles de riz.

III.2. les cendres de balles de riz [W4]

III.2.1. Définition

La cendre de balles de riz est le produit obtenu après la combustion des balles de riz pendant certain temps.

III.2.2. Type

On peut distinguer deux types de cendres : la RHA « Rice Husk Ash » ou cendre de balle de riz et la CRH « Carbonized Rice Husk » ou balle de riz carbonisée.

III.2.2.1. La RHA ou Rice Husk Ash

La RHA s'obtient au travers d'une combustion contrôlée et complète des coques de riz dans une chaudière à haute température (de l'ordre de 600°C). Elle possède de bonnes propriétés pouzzolaniques.

a. Taux de RHA

Lorsque la balle de riz est brûlée, le taux de cendre RHA est de 17 à 26%, beaucoup plus que le bois (0,2 à 2%) et le charbon (12.2%).

b. Composition chimique des RHA

La RHA est un produit très riche en silice, sa teneur en silice peut atteindre 80 à 97,3% (en masse) qui est le plus important en comparaison des autres matériaux pouzzolaniques. Cette teneur en silice dépend de la température de combustion et de la bonne maîtrise de la combustion. Elles possèdent une teneur élevée en silice, d'autant plus élevée que la combustion est complète et qu'elle se fait à haute température (de l'ordre de 600°C).

Tableau 11 : Composition chimique élémentaire des cendres RHA [8]

Elément chimique	Teneur [%]
SiO ₂	86,00 - 97,30
K ₂ O	0,58 - 2,50
Na ₂ O	0 - 1,75
CO	0,20 - 1,50
MO	0,12 - 1,96
Fe ₂ O ₃	trace - 0,54
P ₂ O ₅	0,20 - 2,85
SO ₃	0,10 - 1,13
Cl	trace - 0,42

Cette teneur élevée en silice dans les RHA rend intéressante leur utilisation comme ajout pouzzolanique dans les bétons au ciment pour remplacer une partie du ciment et réduire la perméabilité du béton. Pour cela, le taux de remplacement optimal est situé autour de 10%.

III.2.2.2. La CRH ou Carbonized Rice Husk

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. Par conséquent, ce type de cendre est moins intéressant.

La cendre CRH renferme de silice cristalline qui est connue pour poser des problèmes de santé puisqu'elle est à l'origine de la silicose

CHAPITRE IV : GENERALITES SUR LA POUZZOLANE NATURELLE

IV.1. Définition [15]

Le terme pouzzolane vient du Pouzzoles, nom d'une ville italienne de la région de Naples. Il y désigne un matériau volcanique cendreuse de composition trachytique, de couleur claire et fiable, utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment. Cette application en tant que ciment naturel remonte aux constructions romaines de l'Antiquité.

Les pouzzolanes comportent beaucoup d'avantages comme :

- ✓ Légèreté ;
- ✓ Isolation thermique et phonique ;
- ✓ Résistance au gel ;
- ✓ Effet pouzzolanique ;
- ✓ Facilité de mise en place.

IV.2. Extraction et traitement

L'extraction des pouzzolanes en carrière se fait au moyen de pelles mécaniques ou au bouteur. Le matériau brut est ensuite acheminé par camions à l'usine de traitement, où il subit une série d'opérations de criblage (dont le pré-criblage des gros blocs), concassage et broyage (figure 12).

Pour des applications spécifiques, qui nécessitent de très faibles humidités des matériaux, les pouzzolanes sont soumises à un séchage à l'étuve.

L'élaboration des produits pouzzolaniques pose quelques problèmes spécifiques :

- Leur teneur élevée en eau naturelle (10 à 15% dans les sable 0/3 mm broyés) occasionne un colmatage des toiles criblantes ;
- Leur abrasivité conduit à une usure importante des appareils de réduction.

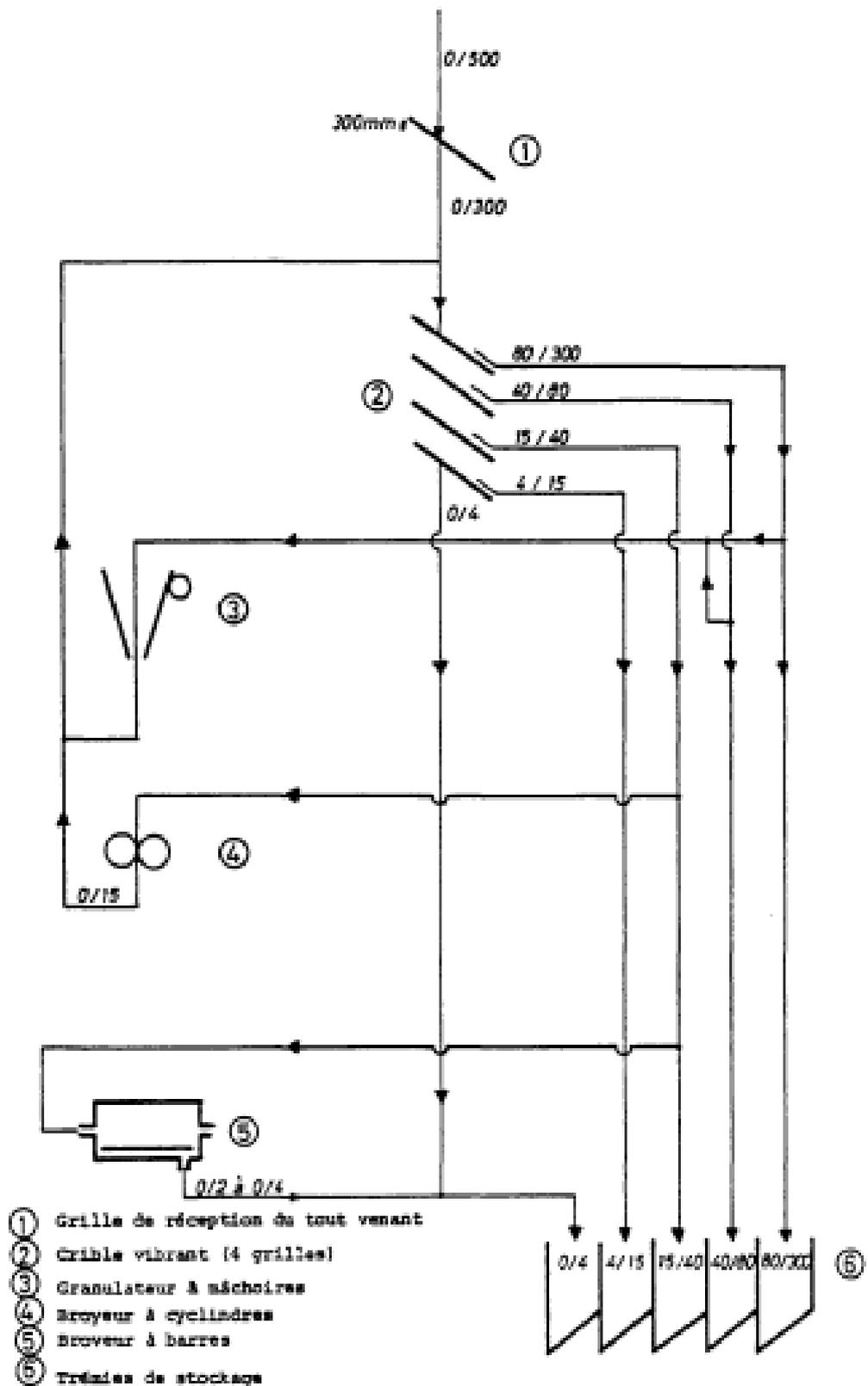


Figure 12 : Schéma d'installation type d'usine de traitement de matériaux pouzzolaniques

Source : [15]

IV.3. Propriétés physiques et chimiques de la pouzzolane

IV.3.1. Granulométrie de la pouzzolane

D'après la norme NFP 18310, les 7 classes granulométriques de la pouzzolane sont : 0/5 – 0/10 – 0/20 – 5/10 – 10/20 – 20/31.5 et 20/50.

Mais en fait, les granulométries réelles varient suivant les carrières : 0/3 – 0/4 – 0/5 – 0/7 – 0/10 – 4/7 – 5/10 – 7/15 – 10/20 – 15/40 – 20/50 – 40/80 – 50/100 – 100/150 et éléments hors criblage : CV de carrière, bombe volcaniques.

IV.3.2. Teneur en eau de la pouzzolane

Par rapport aux autres roches naturelles, la teneur en eau de la pouzzolane est élevée et peut varier de 8 à 17% suivant les saisons et l'état hygrométrique ambiant.

IV.3.3. Porosité de la pouzzolane

La porosité varie de 30 à 60% en volume suivant les granulométries. Contrairement à ce qui se passe pour les agrégats lourds, ce sont les gros éléments qui possèdent le coefficient de porosité le plus important.

Les essais d'absorption d'eau à 24 heures montrent que la texture cellulaire, et la porosité de la pouzzolane lui confèrent une grande capacité d'absorption qui peut varier de 20 à 30% en poids du granulat sec. Normalement dans les conditions de stockage en tas à l'extérieur, la teneur en eau ne dépasse pas les 2/3 de l'absorption à 24 heures. C'est ainsi que les sables 0/3 stockés en tas ont une teneur en eau de 10 à 15% dans des conditions climatiques normales.

IV.3.4. Densité

La densité moyenne des bétons de pouzzolane, mesurée à l'état sec à l'air, à 28 jours d'âge se situe généralement entre 1.1 et 1.5 T/m³ suivant les dosages utilisés.

IV.3.5. Résistance à la chaleur

La température de fusion de la pouzzolane est de 1140°C mais sa mauvaise conductibilité est telle qu'un élément de 0.150m d'épaisseur exposé sur une face huit heures à cette chaleur présente sur la face opposée une température d'environ 100°C seulement. La face exposée se vitrifie.

IV.3.6. Résistance à la chaleur

La température de fusion de la pouzzolane est de 1140°C mais sa mauvaise conductibilité est telle qu'un élément de 0,150m d'épaisseur exposé sur une face huit heures à cette chaleur présente sur la face opposée une température d'environ 100°C seulement. La face exposée se vitrifie.

IV.3.7. Conductibilité thermique (Isolation thermique)

Ce coefficient est facteur pour une température déterminée dans d'étroites limites de la densité du béton, et cette propriété est aussi modifiée par la teneur en eau d'équilibre de celui-ci. Le coefficient augmente en même temps que la teneur en eau.

Tableau 12 : Conductibilité thermique du béton

granulométrie	Densité apparente sèche non tassée	Coefficient de conductibilité thermique en Kcal/h m ²		
		Théorique	extérieur	intérieur
Sable	0,9 à 1,00	0,13	0,23	0,20
Granulométries moyennes	0,75 à 0,9	0,21	0,21	0,17
Grosses granulométries	0,65	0,19	0,19	0,15

Ils comportent les avantages suivants :

- Légèreté
- Isolation thermique et phonique
- Facilité de mise en place
- Résistance au gel
- Effet pouzzolanique

IV.3.8. Caractéristique chimique

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄	Cl	PF	Total
Les teneurs (%)	47.48	12.83	1.51	3.92	0.34	-	-	0.21	100.29

IV.3.9. Propriétés mécanique

Les résistances mécaniques (compression, traction, etc...) sont essentiellement fonction des densités des bétons. La rugosité de la pouzzolane qui permet un bon accrochage du liant est un élément favorable.

IV.3.9.1. Résistance à la compression

a. Bétons caverneux

Tableau 13 : Résistance à la compression d'un béton caverneux

granulométrie	dosage en liant (kg)	résistance à la compression (Kg.F/cm ²) à		
		7jours	28jours	90jours
7/15	150	15	255	30
	200	20	35	40
	250	25	45	50

Des résistances bien supérieures ont été obtenues soit en laboratoire, soit sur chantier avec des bétons caverneux. Les compositions du béton sont : pouzzolane 7/15 saturée d'eau (27% en poids) ; 1140kg/m³, ciment CPALC 325 250 kg ; résultat à 90 jours : 78 bars.

b. Bétons pleins

Tableau 14 : Résistance à la compression d'un béton plein

granulométrie	dosage en liant (kg)	résistance à la compression (kg/cm ³) à		
		7jours	28jours	90jours
0/15	150		30	35
	200	30 à 35	45	55
	250	45 à 50	60	70
	300	60 à 65	80	90
	350		105	120

Sur chantier, les compositions de béton sont : Sable lourd 0/5 ; 60 litres, sable de pouzzolane 0/30 ; 60 litres, gravillons pouzzolane 12/25 1080 litres ciment CPB 250/315 275 kg ; résultat à 21 jours (moyenne) : 90 bars.

IV.3.9.2. Résistance à la traction

Les rapports des résistances en compression et en traction des bétons légers de pouzzolane s'échelonnent :

$$\frac{R_c}{R_t} = 6 \text{ à } 9 : \text{ Pour les bétons caverneux}$$

$$\frac{R_c}{R_t} = 9 \text{ à } 10 : \text{ Pour les bétons pleins}$$

Ces rapports sont de 8 à 15 pour les bétons normaux

IV.3.10. Résistivité du béton de pouzzolane

IV.3.10.1. Résistance au feu

Les bétons de pouzzolane sont plus résistants au feu que les bétons d'agrégats lourds.

Transmission de la chaleur

L'épaisseur du béton exigée pour une durée donnée de tenue au feu est inférieure d'environ 20% à celle qu'on demande à un béton d'agrégat lourd.

Perte de résistance

Les bétons de pouzzolane conservent à haute température une grande partie de leur résistance. A 650°C, les éprouvettes possèdent encore 80% de leur résistance à 28 jours.

IV.3.10.2. Résistance au gel

Des essais de gélivité de 25 cycles de + 15°C à – 15°C ont été pratiquement sans influence sur la tenue du béton de pouzzolane. La résistance moyenne à la compression peut baisser de 10 à 15%.

IV.3.10.3. Résistance aux acides

Ce béton résiste bien aux acides faibles, c'est pour cela qu'il a été employé dans certains travaux de bâtiments industriels : laiteries, étables, abattoirs.

IV.3.11. Durabilité

Elle dépend essentiellement de : la densité du béton, la disposition, la taille et la quantité des vides d'air, la capillarité, le type du béton (plein ou caverneux). La résistance au gel et dégel est un respect de durabilité. Les Romains ont de tout temps utilisé ce matériau dans leurs constructions et il en reste de nombreux vestiges (colisée, temple de Sérapis, Villa Cicéron à Rome). Comme pour les autres bétons, l'utilisation d'un entraîneur d'air à la fabrication augmente la durabilité.

IV.4. Différents types d'utilisations de pouzzolane

IV.4.1. Dans le bâtiment

Béton réfractaire

- ❖ Toiture-terrasse
- ❖ Planchers légers et isolants
- ❖ Béton de remplissage ou de forme sur planchers anciens, en réhabilitation
- ❖ Béton poreux
- ❖ Eléments préfabriqués
- ❖ Bordures de trottoirs
- ❖ Pavés autobloquants
- ❖ Béton de résine
- ❖ Mortier spéciaux ...

IV.4.2. Dans les techniques routières

- ❖ Liant pouzzolane chaux utilisé en technique routière
- ❖ Grave pouzzolane chaux
- ❖ Tranchées et couches drainantes
- ❖ Sablage hivernal
- ❖ Structure de chaussées

IV.4.3. Dans l'agriculture

- ☆ Amendement des sols
- ☆ Horticulture

IV.4.4. Dans les équipements sportifs

- ❖ Sols gazonnés
- ❖ Sols stabilisés
- ❖ Sols de compétition
- ❖ Terrains de football, rugby, golf, hockey.
- ❖ Pistes d'évolution pour chevaux et hippodromes
- ❖ Litières pour chats, barbecues...

IV.4.5. Dans l'industrie

- ☆ Epuration des eaux
- ☆ Filtres de fosse septique
- ☆ Lits bactériens de stations d'épuration
- ☆ Filtres pour eau potable
- ☆ Cimenterie
- ☆ Cuisson des argiles

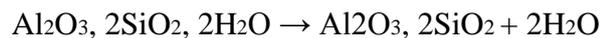
CHAPITRE V : NOTIONS SUR LE KAOLIN ET METAKAOLIN

V.1. Métakaolin [16]

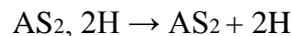
V.1.1. Définition [16]

Le métakaolin est une pouzzolane de synthèse, issue du traitement de la kaolinite, argile assez courante sur la surface du globe. Le métakaolin appartient à la famille des ultrafines, particules minérales de dimension inférieure à 10µm, utilisées dans les bétons pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité.

Le métakaolin (MK) est obtenu par la calcination de la kaolinite à une température entre 500°C et 800°C. Industriellement il existe essentiellement deux modes de calcination, une calcination lente (cinq heures environ dans des unités de production) et une calcination flash (très rapide en comparaison avec la calcination lente). A une température élevée, la kaolinite perd son eau par deshydroxylation selon l'équation suivante :



(En notation cimentière)



Le métakaolin est considéré comme un matériau pouzzolanique, c'est-à-dire qu'il réagit en présence de chaux pour former des silicates de calcium hydratés et des silico-aluminates de calcium hydratés.



Figure 13 : poudre de métakaolin

V.1.2. Historique de l'utilisation du métakaolin

L'utilisation du métakaolin remonte à l'année 1963 lorsqu'il a été intégré dans le béton du barrage Jupia au Brésil. Il est apparu sur le marché de l'Amérique du Nord au milieu des années 1980. La croissance de son utilisation est due aux avantages techniques qu'il confère au béton.

V.1.3. Fabrication

Nous allons intéresser à la préparation du métakaolin, aussi nous présentons dans un premier temps le matériau avant traitement thermique : le kaolin.

V.2. Kaolin

Le kaolin est une argile blanche, douce et plastique composé principalement de fines particules sous forme de plaquettes. Le kaolin est le résultat de l'altération des aluminosilicates anhydres que l'on retrouve dans les roches riches en feldspaths, comme le granite, sous l'action de la météorisation et de processus hydrothermaux. Le processus de conversion du granite dur en une matrice tendre que l'on trouve dans les gisements de kaolin s'appelle la « kaolinisation ». Le quartz et le mica de granite ne changent pratiquement pas tandis que le feldspath se transforme en kaolinite.

Le kaolin est largement utilisé dans la fabrication des ustensiles en porcelaine, des isolants électriques, des sanitaires et des matériaux réfractaires. L'usage du kaolin dans l'industrie des réfractaires provient du fait qu'il présente l'avantage d'être très peu onéreux et disponible en gisements facilement exploitables. Le kaolin calciné est utilisé dans la formulation de ces matériaux pour réduire le rétrécissement et augmenter la réfractarité. Le kaolin est souvent blanchâtre. La présence d'impuretés, particulièrement à base de fer ou de titane, donne au kaolin une certaine coloration. Généralement, le kaolin naturel brut contient d'autres impuretés telles que le quartz, feldspath... Le kaolin présente une grande surface spécifique (comprise entre 10 et 100 m² /g) et une masse volumique d'environ 2,6 g/cm³

La kaolinite est un phyllosilicate de type 1:1 dioctaédrique qui est constitué d'un empilement régulier de feuillet composés d'une couche tétraédrique siliceuse en alternance avec une couche octaédrique alumineuse. On la trouve soit sous forme hydratée ou non. La kaolinite dioctaédrique non hydratée a une distance basale qui varie de 7,1 à 7 Å. Chaque tétraèdre est relié aux tétraèdres voisins par trois de ses sommets, le quatrième sommet étant lié à la couche octaédrique sous-jacente. Cette dernière est formée par la superposition de deux plans anioniques qui délimitent trois types de sites octaédriques non équivalents désignés A, B et C, qui sont disposés suivant une géométrie hexagonale. L'eau de ces sites reste vacante afin d'assurer la neutralité électrique du feuillet. La position des sites vacants permet de différencier la Kaolinite des autres minéraux appartenant à cette même famille. Ainsi, une Kaolinite idéale est caractérisée par un empilement de feuillets où tous les sites B sont libres alors que, par exemple, la dickite est constituée par une alternance de feuillets inoccupés de type B et de type

C. En tous les Kaolins comprennent quatre variétés cristallographiques: la kaolinite idéale, la nacrite, la dickite et le métahalloysite

V.2.1. Propriétés physique, thermique et mécanique du kaolin

Tableau 15: propriétés physiques, thermique et mécanique du kaolin

Masse volumique (g /cm ³)	2.60 - 2.63
Surface spécifique (m ² /g)	16
Dureté (mohs)	2.0 - 2.50
Coefficient de dilatation linéaire (20-700°C)	5 - 7.10 ⁻³
Conductivité thermique (Cal/cm.s.°C)	50 – 210
Température d'utilisation (°C)	1400
Résistance de flexion (kg/cm ²)	50 – 210

V.2.2. Composition chimique du kaolin

La composition chimique du kaolin est présentée sur ce tableau :

Tableau 16 : Composition chimique du kaolin

Composant %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	PF	Cl
Kaolin	49.00	29.76	5.11	0.64	2.40	0.29	0.43	0.93	10.09	0.01

V.2.3. Structure cristalline du kaolin

Parmi les minéraux argileux, ceux de la famille de la kaolinite sont les plus simple. Ils appartiennent au groupe des phyllo silicates, les silicates en feuillets.

On peut considérer le feuillet comme un empilement de 5 plans atomiques :

- un plan non compact d'atomes d'oxygène appelé plan hexagonal ; il constitue la base des tétraèdres SiO₄,
- un plan d'atomes silicium,
- un plan compact d'atomes d'oxygène et d'hydroxyles (hydroxyles internes) : ce plan est commun à la couche tétraédrique et à la couche octaédrique,
- un plan d'atomes d'aluminium,
- un plan compact d'hydroxyles (hydroxyles externes).

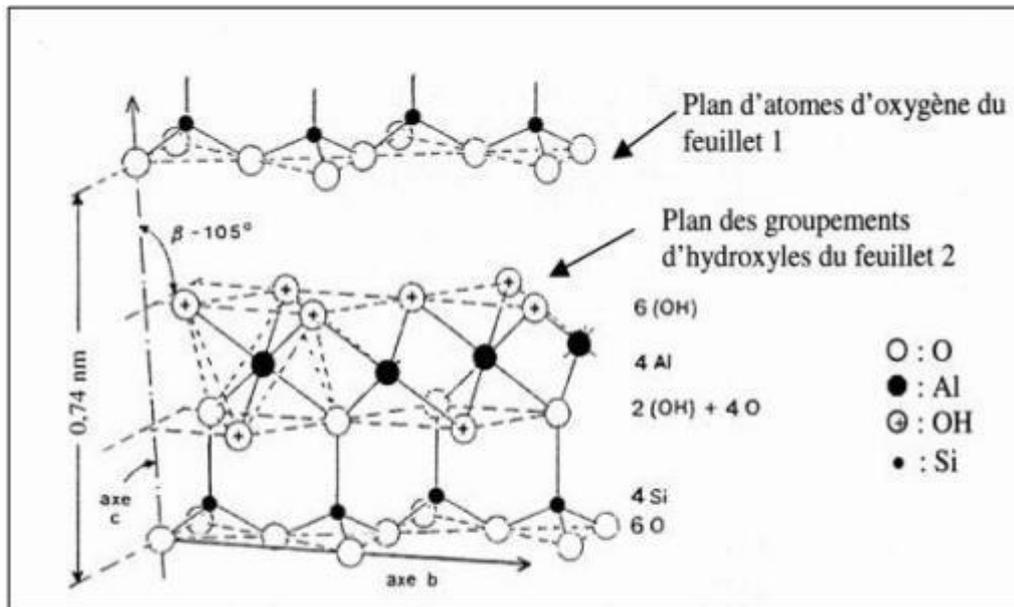


Figure 14 : structure cristalline du kaolin

Les liaisons Si - O ont un caractère covalent beaucoup plus marqué que les liaisons Al - O qui sont légèrement ioniques, les liaisons covalentes forment des liaisons fortes, résistantes et stables. Leurs énergie de liaison est 200 à 400 KJ alors que celle des liaisons ioniques est plus faible, de l'ordre de 20KJ, elles sont plus faciles à briser. Ce qui explique la forte dissociation de l'alumine par rapport à la silice en milieu alcalin.

Les liaisons inter foliaires, dont dépend directement la stabilité de l'édifice, font intervenir les atomes d'hydrogène. En effet, le proton (des hydroxyles externes) qui est à la surface du feuillet, se trouve à proximité des atomes d'oxygène des deux couches de la couche tétraédrique SiO₄ du feuillet suivant. Il subit alors l'attraction des atomes d'oxygène des deux couches (liaison de Van der Waals) et il est à l'origine de la liaison

V.2.4. Morphologie

La morphologie des cristaux est généralement assez régulière. Ceux-ci se présentent sous la forme de plaquette hexagonale (figure 16), parfois allongées ou réduites à de simples Losanges, délimitées par les faces basales et les faces latérales (figure 15). Les dimensions des cristaux varient sensiblement, leur diamètre est compris entre 0,04 et 5µm et leur épaisseur entre 10 et 200 nanomètres. Les faces latérales portent des groupes- SiOH ou .AlOH, susceptibles de dissociations amphotériques en fonction du pH du milieu.

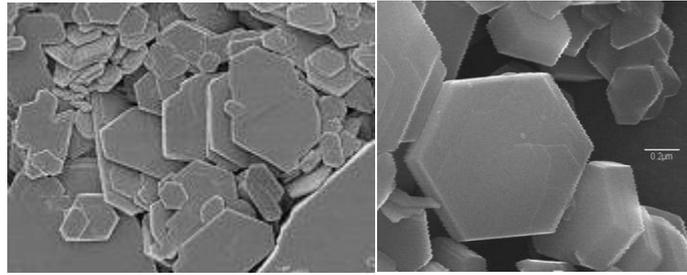


Figure 15 : morphologie d'une kaolinite très bien cristallisée

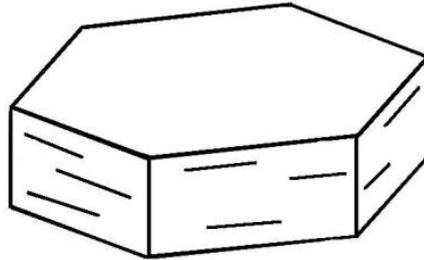


Figure 16 : représentation d'une plaquette de kaolinite

V.2.5. Impureté dans le kaolin

Tout sol est constitué d'une fraction minérale et de matière organique. La fraction minérale représente l'ensemble des produits d'altération physique et chimique d'une roche mère.

Ces impuretés sont de deux sortes :

- débris minéraux provenant des roches qui ont donné naissance à l'argile,
- impuretés mélangées au cours du déplacement des argiles en formation.

Toutes ces impuretés peuvent aller depuis les impalpables, jusqu'aux débris assez considérables. Les impuretés trop fines modifient les propriétés de l'argile, très souvent elles diminuent le retrait, abaissent le point de fusion.

Parmi ces impuretés, on cite la silice dite silice à l'état libre, elle est la plus abondante. Elle se présente sous forme cristallisée quartz. Allant de l'invisible au grain grossier. Parfois, elle est même considérée comme l'un des principales constituantes du kaolin.

On y trouve le fer qui se rencontre sous forme de silicates de fer, d'hydrates de fer (limonite $\text{FeO}(\text{OH})_n\text{H}_2\text{O}$), d'oxydes de fer (hématites Fe_2O_3).

On y trouve aussi les sels de magnésie, les alcalis (soude Na_2O et potasse K_2O), le titane TiO_2 , les matières organiques...etc.

Ces sels contenus dans le kaolin donneront en grande partie sa coloration après cuisson, mais aussi le rendent moins résistant à la corrosion chimique et aux brusques variations de températures

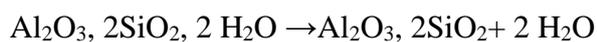
V.2.6. Calcination du kaolin [17]

V.2.6.1. La calcination flash

La calcination flash est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. Les valeurs typiques sont des chauffages et refroidissements de l'ordre de 10^3 à 10^5 K.s⁻¹ et des durées d'exposition de l'ordre de quelques dixièmes de secondes jusqu'à quelques secondes.

V.2.6.2. La calcination lente

Le plateau isotherme de température dure en général, plusieurs heures. L'objectif de la calcination est la stabilisation des matériaux par déshydroxylation. Elle apparaît à partir de 550 à 600°C pour la kaolinite chauffée à vitesse normale. Le solide résultant est la métakaolinite selon la réaction :



Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant une durée suffisamment longue (une voire plusieurs heures). La métakaolinite résultant a une densité absolue d'environ 2.74 g.cm⁻³. Toutefois surchauffer de la kaolinite forme ensuite de la mullite (3Al₂O₃, 2SiO₂) indésirable en raison d'une absence de réactivité vis-à-vis de l'hydroxyde de calcium.

V.2.7. Domaine d'utilisation du kaolin [W5]

Le kaolin fait partie de notre environnement. Ses utilisations sont multiples. Sa blancheur et sa plasticité le rendent particulièrement approprié pour un usage extensif comme charge, agent d'allongement, matière première pour la céramique et comme pigment. C'est également une matière première importante pour les réfractaires, et un catalyseur dans les industries du ciment et des fibres de verre.

Le kaolin est utilisé dans de nombreuses applications. C'est un minéral unique qui reste chimiquement inerte sur une plage relativement large de pH et possède un excellent pouvoir couvrant lors de son utilisation comme pigment ou agent d'étirement pour les applications de revêtement et de bouchage. Il est également non abrasif et possède une faible conductibilité thermique et électrique.

Ses deux plus importantes applications sont le couchage du papier pour masquer les fibres de la pâte à papier et la production de produits céramiques de haute qualité. Il est également utilisé dans de nombreux autres processus industriels:

Charges: Utilisé comme pigment, le kaolin est réparti généralement en kaolin de charge ou de couchage de papier en fonction de son éclat et de sa viscosité. Ses propriétés principales, spécialement sa blancheur, en font un produit particulièrement approprié comme charge ou pigment. Il reste également inerte sur une large plage de pH, il est non abrasif, possède une faible conductibilité thermique et électrique et donne éclat et opacité.

Peinture: Sous ses formes hydratées ou calcinées, le kaolin peut améliorer les propriétés optiques, mécaniques et rhéologiques d'une peinture. Les kaolins calcinés sont largement utilisés dans les peintures satinées et mates dont ils augmentent l'opacité, la blancheur et la résistance à l'abrasion. Le kaolin est particulièrement utile comme alternative au pigment blanc à base d'oxyde de titane TiO₂.

Caoutchouc: Le kaolin augmente la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion et la rigidité du caoutchouc. Le kaolin calciné en particulier, avec ou sans traitement chimique de surface au silane, est également utilisé dans les élastomères thermoplastiques de haute qualité, notamment dans les isolants à base de caoutchouc sur les installations électriques à haute tension.

Plastiques: Le kaolin est utilisé dans les plastiques pour leur apporter finesse d'aspect, stabilité dimensionnelle et résistance aux attaques chimiques, pour dissimuler les structures de renforcement par fibres et pour réduire le retrait et la fissuration pendant la polymérisation et la mise en forme. Il est également utilisé comme modificateur rhéologique et charge fonctionnelle car il améliore les propriétés mécaniques, électriques et thermiques, notamment les propriétés d'isolation électrique du PVC.

V.2.8. Domaine d'utilisation de métakaolin

Les métakaolins sont utilisés en substitutions du ciment dans le BTP. Applications routières : mélangés avec de la chaux ou du ciment le métakaolin est l'élément principal des liants routiers élaborés pour le traitement des sols, les sables stabilisés, le roulement de chaussées routières. Les applications béton : il permet d'améliorer les caractéristiques techniques des bétons tout en

permettant de générer des économies sensibles dans les secteurs de la préfabrication du béton prêt à l'emploi.

Autres applications : la fabrication d'enduits, en particulier, pour la réhabilitation du patrimoine bâti, la réalisation de coulis pour injections et parois moulées...

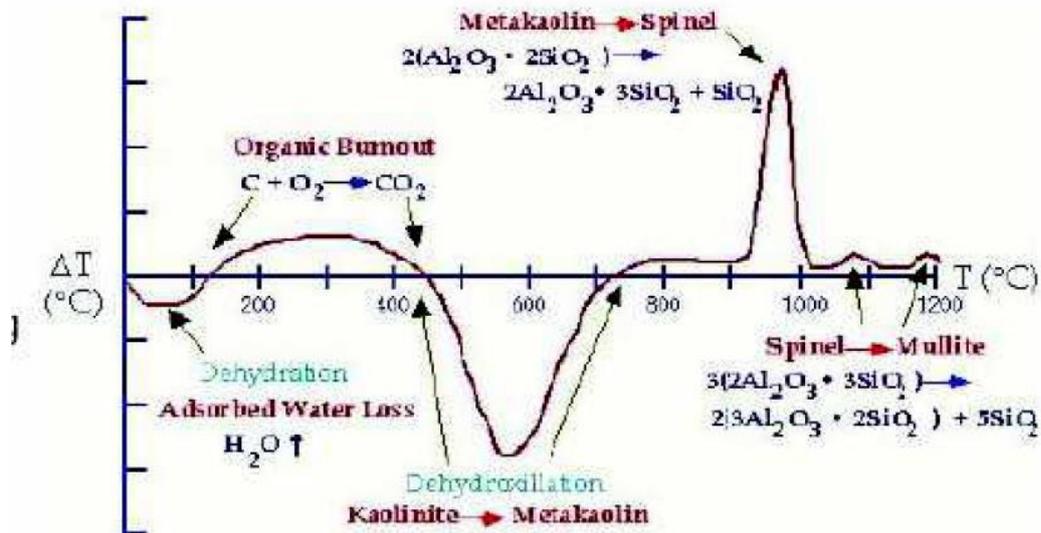


Figure 17 : Transformation du kaolin en métakaolin

Source : [18]

CHAPITRE VI : GENERALITES SUR LA CHAUX HYDRAULIQUE

VI.1. Matière première: [19], [W6]

La chaux hydraulique naturelle est un liant hydraulique en poudre, partiellement hydraté, qu'il est issue de la cuisson d'un calcaire siliceux qui contient entre 15 à 20% d'argile, correctement dénommé marne. Aux températures de cuisson (approxima. 1200° C), le calcium se combine avec ces éléments pour former des silicates, des aluminates et des Ferro-aluminates de calcium. Au contact de l'eau, lors de l'extinction de la chaux vive, et surtout pendant la mise en œuvre des mortiers, ces molécules forment des hydrates insolubles. C'est après la mise en œuvre que la chaux et les hydrates vont se carbonater au contact de l'air humide pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine. C'est la partie aérienne de la prise. Le rapport entre différents composants associés à l'argile et la part en chaux définit l'indice d'hydraulicité.

VI.2. Cycle de la chaux [20], [W7]

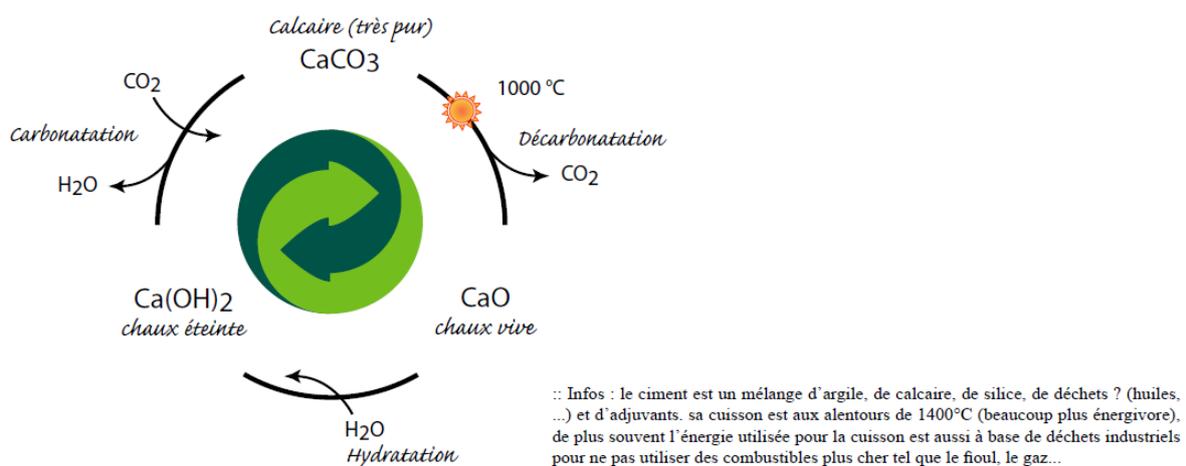


Figure 18 : cycle de la chaux

VI.3. Dénomination des chaux naturelles

Les chaux se divisent en deux catégories :

- Les chaux hydrauliques, qui font leur prise avec l'eau.

Vous trouverez donc toujours ces chaux sous forme de poudre. Elles se composent en général de plus ou moins 70% de Calcaire et 30% d'Argile. On les classe par rapport à leur degré de résistance et les nomme ainsi NHL 2, NHL 3.5, NHL 5. Plus le chiffre est grand plus la chaux est résistante.

Pour information, une chaux hydraulique nommée NHL-Z, est une chaux adjuvantée : elle est donc pas 100% naturelle (Quelle est ou quelles sont ses adjuvants ?)

- La chaux aérienne, dite aussi suivant les régions chaux grasse, fleur de chaux, fait sa prise avec l'air. En France vous trouverez de la chaux aérienne sous forme de poudre sous la dénomination CL90-S, qui veut dire qu'elle contient un minimum de 90% de calcaire. et aussi sous forme de pâte.

Attention à la dénomination avec un «Z» qui est une chaux adjuvantée.

La chaux aérienne se trouve donc sous deux formes : en poudre ou en pâte.

La chaux en pâte peut venir de deux procédés de fabrication.

- soit on ré-hydrate de la chaux en poudre.
- soit c'est de la chaux vive éteinte. Pour ce procédé il existe en France que deux petits «producteurs» amoureux de leur savoir. Cette deuxième méthode confère à la chaux des propriétés décuplées. C'est pour cela que nous vous proposons de la chaux en pâte POZZO NUOVO.

La norme : NHL ou Natural Hydraulic Lime (Chaux Hydraulique Naturelle) [21]

On peut distinguer trois sortes de NHL :

NHL 2, NHL 3.5 et la NHL 5 dont les indices : 2 (8% de silice) ; 3.5 (10% de silice) et 5 (12% de silice) précisent la résistance en mégapascal de la chaux à la compression par cm^2 au bout de 28 jours. L'hydraulicité détermine aussi la prise dans la prise dans l'eau. L'argile siliceuse se combinant au calcaire à la cuisson, provoque une vitrification naturelle de la chaux. Plus la résistance à la compression est élevée, plus la chaux est dure, et plus elle sera cassante et grise.

VI.4. La fabrication [22]

VI.4.1. L'extraction :

La Chaux Hydraulique Naturelle, provient de gisements de calcaire siliceux. Les indices 2 (8% de silice); 3.5 (10% de silice) et 5 (12% de silice) précisent la résistance en megapascal de la chaux à la compression par cm^2 au bout de 28 jours. L'hydraulicité détermine aussi la prise dans l'eau. L'argile siliceuse se combinant au calcaire à la cuisson, provoque une vitrification naturelle de la Chaux. Plus la résistance à la compression est élevée, plus la Chaux est dure, et plus elle sera cassante et grise.

VI.4.2. La cuisson

Le Calcaire siliceux est cuit aux alentours de 1 030 °C et est transformé en un agglomérat appelé chaux vive, qui sera concassé, broyé et mis en sac.

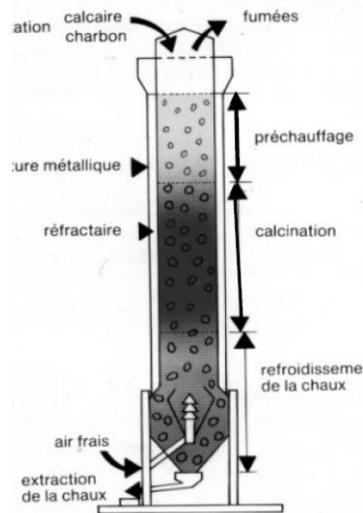


Figure 19 : four verticaux à marche continue pour la cuisson de la chaux

VI.5. Caractéristiques de la chaux

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

- un pouvoir assainissant et désinfectant
- une esthétique que l'on ne peut obtenir avec un autre liant (badigeon, patine, stuc tadelakt,...)
- une participation à la respiration de l'ouvrage.
- une élasticité
- une tenue dans le temps encore inégalée (regarder les ruines romaines)
- une absorption de CO₂ lors de sa carbonatation.
- un excellent comportement au feu

De plus la chaux en pâte POZZO NUOVO :

- à une meilleure carbonatation (plus rapide)
- est plus souple sous l'outil
- se conserve indéfiniment si elle n'est pas exposée au gel et est au moins recouverte d'un centimètre d'eau
- est livrée avec un peu d'eau de chaux (le surnageant) qui est un produit recherché pour fixer les patines, reminéraliser un support, ferrer les stucs. (C'est un véritable vernis naturel grâce au calcin)

VI.6. Propriété de la chaux hydraulique.

VI.6.1. Propriété mécanique

Tableau 17 : propriété mécanique de la chaux hydraulique

Résistance à la compression 7 jours	2,0 MPa (minimale) 5,1 MPa (moyenne)	1,78 MPa (moyenne)	2,02 MPa (moyenne)	
Résistance à la compression 28 jours	5 MPa (minimale) 8,1 MPa (moyenne)	3,5 MPa (minimale) 5,41 MPa (moyenne)	3,5 MPa (minimale) 5,79 MPa (moyenne)	2 MPa (minimale) 3,42 MPa (moyenne)
Résistance à la compression 90 jours	10 MPa (minimale) 11,5 MPa (moyenne)			
Résistance à la compression 180 jours	12 MPa (minimale) 13,2 MPa (moyenne)			
Résistance à la flexion 7 jours	0,9 MPa (minimale)			
Résistance à la flexion 28 jours	1,3 MPa (minimale)			
Résistance à la flexion 90 jours	2,5 MPa (minimale)			
Résistance à la flexion 180 jours	3,5 MPa (minimale)			
Debut de prise	>= 60 minutes 78 min (valeur moyenne)	108 min (valeur moyenne)	229 min (valeur moyenne)	410 min (valeur moyenne)
Résidu	12,8% (valeur moyenne) < 15%	5,2% (valeur moyenne) < 15%	0,4% (valeur moyenne) < 15%	< 15%

VI.6.2. Propriété physique et composition chimique de la chaux [23]

On va les présentés sous forme d'un tableau :

Tableau 18 : Propriété physique et composition chimique de la chaux

Nom chimique	Chaux
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe ₂ O ₃	< 2
Al ₂ O ₃	< 1.5
SiO ₂	< 2.5
SO ₃	< 0.5
Na ₂ O	0.4 - 0.5
CO ₂	< 5
CaCO ₃	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600-900

VI.6.3. Origine de calcaire [W8]

Le calcaire est soit d'origine chimique et d'origine biologique. Sa formule chimique est CaCO₃ connue sous le nom de « carbonate de calcium » sous l'influence des facteurs physiques (salinités, pH) et biochimique (actions bactériennes). La formation chimique dépend de l'abondance du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'eau de mer.

L'accumulation biologique de carbonate de calcium (CaCO₃) se produit dans une eau (de mer de préférence) comprise entre 25 et 30 C° contenant des coraux, des algues et des coquillages. Les eaux ne doivent pas être trop profondes pour permettre aux organismes de profiter des rayons solaires. Les mers tropicales peu profondes répondent à ces critères.

VI.6.4. Gisement de calcaire à Madagascar

A Madagascar, on peut trouver des gisements de calcaire un peu partout, mais leur exploitabilité n'a pas encore été bien étudiée.

Il existe plusieurs gisements de calcaire à Madagascar :

- Les gisements d'Andatabo, de Soalala et de Baie de St augustin situent dans la province de Tulear
- Le gisement d'Anosirano a Antsiranana
- Le gisement d'Antsangy, de Talata-Ampano dans la province de Fianarantsoa
- Le gisement d'Amboanio sis à Mahajanga

VI.6.5. domaine d'utilisation de la chaux

En général, la chaux est utilisée dans le bâtiment ;

VI.6.5.1. Enduit

Elle joue les rôles de protections et esthétiques. Le mortier de chaux présente une grande élasticité. Les mortiers de chaux une fois durci en a la propriété d'être imperméable à l'eau toute on mettant perméable à l'air. On dit que le mur respire le durcissement d'enduit à base de chaux est long. Le temps de séchage à observer entre chaque couche peut variée entre la première et la dernière à plusieurs jours selon le changement climatique et de mise en œuvre.

VI.6.5.2. Mortier de pose et de jointement

La force de liaison d'un mortier de pose est plus importante c'est-à-dire sa résistance à la compression. Le mortier de chaux qui développe cette adhérence grâce à leur plasticité, les mortiers de chaux constitue de très bon mortier de jointement de maçonnerie en pierre tendre, en béton cellulaire ou en brique.

VI.6.5.3. Badigeons

Les badigeons sont obtenus en mettant la chaux éteinte en suspension dans l'eau à raison de 40 litres d'eau par sac de 25 kg. Ils sont réalisés à deux ou trois couches.

Les badigeons sont réalisés sur des supports enduises, lissés, frottés ou décoratifs, pour donner un aspect uniforme aux couleurs et aux matériaux.

Ils peuvent avoir un effet curatif de bouchage sur des enduits microfissures ou faïencés, et rattraper des défauts d'aspect.

VI.6.5.4. Matériau de construction

La chaux intervient aussi dans la fabrication de construction :

- Les briques silico calcaire sont fabriquées avec un mélange de chaux et de sable siliceux, compacté et étuvé.

- Les bétons cellulaire ce sont de matériaux légers et isolant ils sont fabriqués à base sable siliceux et de chaux dans le quelle on provoque la formation de bulle de gaz, souvent pour action de la chaux sur l'aluminium en poudre.

VI.6.6. Quelques utilisations

Généralement, la chaux est utilisée dans la vie courante ; elle est presque toute employée dans la vie. Telles sont : en pisciculture, ostréiculture, pour le traitement des lisiers de porcs, en reminéralisations des eaux de consommation, en verrerie, en tannerie, en environnement, en industries, en bâtiment et travaux publics, etc.

PARTIE II :
ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE VII: PREPARATION ET CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES

Après les études et contexte bibliographiques, on va entamer les études expérimentales. Nous avons choisi nos matières premières selon les deux critères suivants :

- Economiques
- Approvisionnements

Le but de notre travail c'est de promouvoir un liant alternatif en remplaçant le ciment traditionnel et d'avoir un béton de bonne performance mécanique.

Mais avant toute chose, il est primordiale de faire la préparation de toutes les matières premières à utiliser afin d'accomplir les différents essais aux niveaux de laboratoire et à petit échelle pour obtenir de bon résultat qu'on étudie.

VII.1. Enumération des matériaux d'expérimentation

Il est nécessaire de bien choisir l'origine de tous les matériaux pour avoir les caractéristiques attendu de notre étude :

- ❖ Pouzzolane naturelle : elle vient du gisement de Betafo
- ❖ Sable de rivière 0/5 de Vontovorona
- ❖ Gravillon de carrière 5/8 de Vontovorona
- ❖ Métakaolin de PROCHIMAD
- ❖ Chaux BOUTSIKA
- ❖ Balle de riz d'Antsirabe
- ❖ Soude de l'AGRIVET
- ❖ Eau de JIRAMA

VII.2. Méthode de caractérisation

Ce paragraphe nous annonce toutes les techniques de formulation ainsi que les modes opératoires à adopter lors des travaux de caractérisations.

Les caractérisations des matières premières ont une influence pour la qualité des produits obtenus, d'où la nécessité de leur détermination.

VII.2.1. Détermination des caractéristiques physiques

VII.2.1.1. Teneur en eau

La teneur en eau est définie par le rapport du poids d'eau que l'échantillon contient au poids de ses éléments secs, et qui est exprimé en pourcentage.

La teneur en eau est déterminée à partir de la formule suivante :

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Où : w: teneur en eau (%)

m_h : masse à l'état humide de l'échantillon

m_s : masse à l'état sec de l'échantillon

VII.2.1.2. Masse volumique apparente (ρ)

La masse volumique apparente désigne la masse de matériau par unité de volume, les vides entre les éléments inclus. Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Où : ρ : la masse volumique apparente

m : la masse de matériau

v : le volume du récipient contenant le matériau ($v = v_s + v_{vide}$)

VII.3. Pouzzolane naturelle⁵

D'après l'approvisionnement en matériaux, on a vu que la pouzzolane naturelle qu'on va utiliser pendant notre étude vient de Betafo.



Photo 1: pouzzolane naturelle vient de gisement de Betafo

VII.3.1. Calcination de la pouzzolane naturelle

Le but de la calcination de la pouzzolane naturelle est de l'activer thermiquement. La cuisson est faite dans un four de calcination de laboratoire de génie chimique Vontovorona. On va alors voir tous les étapes de calcination :

VII.3.2. Déroulement de la cuisson

- Au début, Le four de calcination prend la température ambiante et la température monte linéairement de $7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à la température 750°C ;
- Maintient isotherme à la température de palier pendant 2 heures ;
- Puis on laisse refroidir lentement à la vitesse propre du four pendant quelque heure et après on récupère si la température est variée 100 à 150°C .

On laisse refroidir la pouzzolane naturelle granuleuse pendant 2 heures, puis on met dans un broyeur à boulet pour rendre les grains en poudre. La pouzzolane naturelle est broyée pendant 8 heures de temps.



Photo 2: broyeur à boulet du CNRIT

Et enfin, la dernière étape est le tamisage pour avoir la finesse voulue par le tamis de 0.4 mm afin d'enlever les gros grains et les impuretés.



Photo 3: Tamisage de la pouzzolane calcinée

VII.3.3. Caractéristiques

La couleur de la pouzzolane naturelle est rouge et noire violacée.

Très rugueux et poreux, scories

La masse volumique apparente du Pz Nat est $\rho_{Pz\ Nat} = 1470 \text{ Kg/m}^3$

Tableau 19: Caractéristiques de la pouzzolane naturelle de Betafo (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₃	PF
44,63	13,04	12,48	12,08	09,56	01,33	00,02	02,29	00,21	02,40	00,11	00,71	01,15

VII.4. Les granulats

Dans cette étude, le sable que nous avons utilisé est un sable 0/5 qui est un sable provenant de la rivière de Vontovorona.

Le gravillon utilisé est un gravier concassé artisanal provenant de la carrière de granite de Vontovorona. Comme nous utilisons pour nos essais une moule prismatique de dimension 4x4x16 cm ; le granulat que nous avons utilisé est de classe granulaire 5/12,5.

VII.4.1. Caractéristiques physiques

VII.4.1.1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des granulats est déterminé par un moule de volume $V = 650 \text{ cm}^3$ qui a été rempli et qu'on arase après, en respectant les normes.

☆ Sable

Les résultats des deux essais sont présentés sur ce tableau suivant :

Tableau 20: Masse volumique apparente du sable de Vontovorona

	1ere essai	2ere essai
Masse de l'échantillon m(g)	916,60	911,57
Volume du moule (cm^3)	654	654
$\rho = m / V \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$	1,40	1,39

En calculant la moyenne, on obtient : $\rho_s = 1\,390 \text{ Kg/m}^3$

☆ Gravier

Les résultats des deux essais sont présentés dans ce tableau suivant :

Tableau 21 : Masse volumique apparente du gravillon de Vontovorona

	1ere essai	2ere essai
Masse de l'échantillon m(g)	1 022,25	1 018,22
Volume du moule (cm^3)	654	654
$\rho = m / V \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$	1,56	1,55

D'après le calcul, la masse volumique apparente du gravillon est $\rho_s = 1\,555 \text{ kg/m}^3$

VII.4.1.2. Masse spécifique

D'après l'étude, on obtient les résultats suivants :

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Tableau 22 : masse spécifique du sable et du gravier

	Sable 0/5	Gravier 5/12,5
$\gamma = \frac{m}{V}$ (Kg/m ³)	2630	2760

VII.4.1.3. Equivalence de sable

L'essai d'équivalence de sable est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition du béton. La mesure, effectuée sur la fraction de granulat passant au tamis 5mm, rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction.

- **Matériels :**

- Un godé ;
- Eprouvette gradué ;
- Règle gradué ;
- Piston ;
- Machine à agitateur ;
- Balance électronique de précision.

- **Conduite de l'essai :**

- verser de la « solution lavant » jusqu'au 1er repère de l'éprouvette ;
- remplir du sable le godet, puis araser, le verser dans l'éprouvette et on commence de chronométrer ;
- attendre 10mn ;
- après, mettre l'éprouvette sur la machine à agitateur ;
- puis, ajouter de « solution lavant » jusqu'au 2eme repère en agitant la solution de sable, et attendre 20 mn ;
- mesurer la hauteur du sable plus fine h1 ;
- faire entrer le piston dans l'éprouvette, le serrer et on mesure la hauteur du sable h2.

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$ES (\%) = \frac{h2}{h1} \times 100$$

Avec : h2: sable propre + élément fin.

h1: sable propre seulement.

Spécifications :

- ES < 60, sable argileux (risque de retrait ou de gonflement)
- $60 \leq ES < 70$, sable légèrement argileux (admissible pour le béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait)
- $70 \leq ES < 80$, sable propre à faible pourcentage de fines argileuses (convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité)
- ES > 80, sable très propre.

. Résultat :

On a % ES = 78, notre sable est donc propre

VII.4.2. Caractéristiques géométriques des granulats

VII.4.2.1. 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

VII.4.2.2. Conduite de l'essai :

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

$$\% \text{ Refus} = \frac{\text{Refus cumulé}}{\Sigma \text{Refus cumulé}} * 100 ; \% \text{ Passant} = 100 - \% \text{ Refus}$$

VII.4.2.3. Résultats :

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

Tableau 23: Résultat d'analyse granulométrique du sable 0/5

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 0/5 est montrée par la figure suivant :

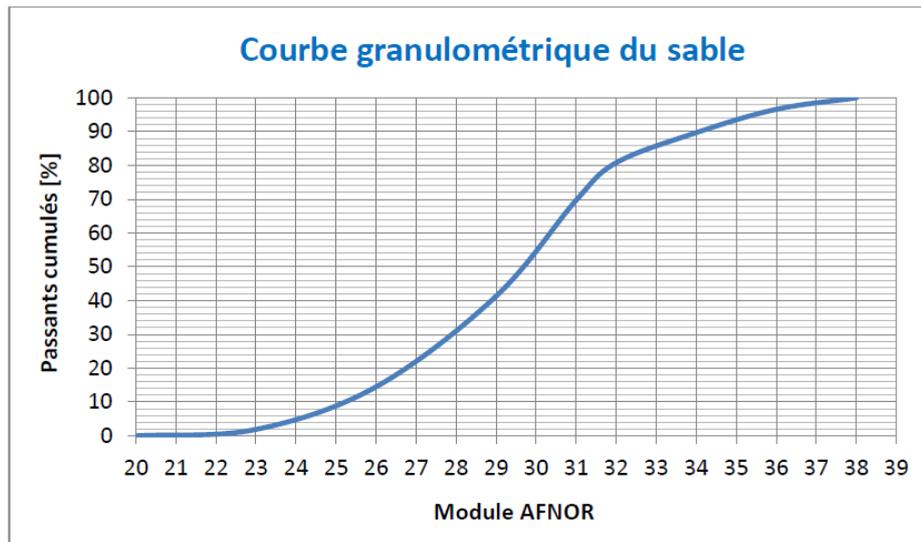


Figure 20: La courbe granulométrique du sable 0/5

Les résultats de de l'analyse granulométrique du gravier est présenter par le tableau suivant :

Tableau 24: Résultat d'analyse granulométrique du gravier 5/12,5

Diamètres des tamis en [mm]	Module AFNOR	Refus cumulés en [%]	Passants cumulés en [%]
12,5	42	0	100
10	41	16,2	83,8
8	40	47,3	52,7
5	38	100	0

La figure suivant montre la courbe granulométrique du gravier 5/12,5:

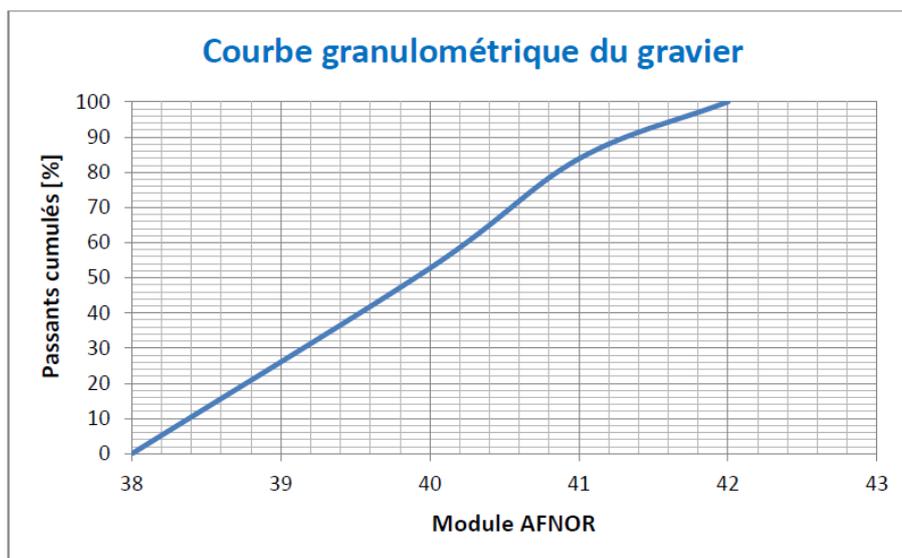


Figure 21: courbe granulométrique du gravier 5/12,5

VII.4.2.4. Module de finesse

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

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\}$$

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.

VII.5. Métakaolin

VII.5.1. Kaolin

Sur cet étude, on a décidé d'utiliser le kaolin provient de PROCHIMAD qui est déjà broyé avec une classe granulométrique de 40µm.

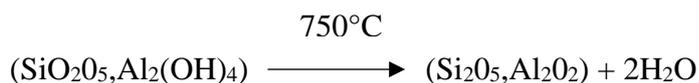


Photo 4: kaolin de PROCHIMAD

VII.5.2. Calcination du kaolin

Le but de cette calcination du kaolin est d'avoir le métakaolin qui est activé thermiquement, elle est effectuée dans un four électrique au laboratoire de la CNRIT à lit fixe. Nous l'avons calciné pendant 3 heures à la température 750°C pour qu'il devienne actif puis on laisse refroidir.

On a la réaction :



VII.5.3. Le déroulement de la cuisson :

- Le four de calcination prend en départ la température ambiante et la température monte linéairement de 7°C/min jusqu'à la température 750°C ;
- Maintient isotherme à la température de cuisson pendant la durée optimum ;
- Puis on laisse refroidit lentement à la vitesse propre du four pendant quelque heure et après on récupère si la température est variée 100 à 150°C pour empêcher le choc thermique contre l'atmosphère extérieur.



Photo 5: Four de calcination du kaolin à 750°C

VII.5.4. Caractéristiques

a. Caractéristiques chimique du kaolin

On va voir sur le tableau ci-dessous la composition minéralogique du kaolin de la société PROCHIMAD :

Tableau 25: Caractéristique chimique du kaolin (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₂	Cl ₂ O ₃	CR ₂ O ₂	PF
50,62	32,30	0,72	0,44	0,03	0,14	0,15	0,03	0,02	0,05	12,50

b. Caractéristique physique du kaolin et métakaolin

Le kaolin a des caractéristiques physiques comme suit :

- Une faible dureté (2 selon l'échelle de Mohs)
- Un haut degré de blancheur
- Un contenu élevé en alumine (Al₂O₃) 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 métakaolin est $\rho_{MK} = 680 \text{ Kg/m}^3$
- La masse spécifique du métakaolin est $\gamma_{MK} = 2710 \text{ Kg/m}^3$

VII.6. Chaux

Pendant notre étude, on a choisi d'utiliser la chaux boutsika dans un cas de 4kg qui est produite par l'Exama à Madagascar. Ce choix est doté particulièrement de ses qualités.



Photo 6: fleur de chaux « Fotsy Botsiaka »

VII.6.1. Caractéristiques chimique de la chaux

Voici les résultats d'analyse chimique :

Tableau 26: Caractéristiques chimique de la chaux

Compositions chimiques	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Perte au feu
Teneur en %	1.10	0.76	0.10	-	14.30	54.01	28.20

VII.6.2. Caractéristiques physique de la chaux

- La chaux est une poudre de couleur blanche
- La masse volumique apparente de la chaux est $\rho_{\text{Chaux}} = 725 \text{ Kg/m}^3$
- La masse spécifique de la chaux est $\gamma_{\text{chaux}} = 2\,300 \text{ Kg/m}^3$

VII.6.3. Préparation de la chaux

Avant d'utiliser la chaux, on va la tamiser sur un tamis normalisé par l'AFNOR de 0,050 mm d'ouverture pour améliorer la finesse des grains et pour éliminer s'il y a des impuretés.



Photo 7: tamisage de chaux

VII.7. Cendre de balle de riz

On va utiliser la balle de riz d'Antsirabe pour bien accomplir cette étude. Elles sont obtenues en incinérant la balle de riz

La préparation des cendres de balle de riz est une étape très importante de notre étude.

Cette préparation a pour objectif d'obtenir une cendre riche en silice fines actives. Pour atteindre cet objectif, on doit faire donc toutes les opérations comme suit :

VII.7.1. Cuisson de la balle de riz

Pour obtenir une cendre RHA riche en silice, il faut les calciner à une température de l'ordre de 600°C.

VII.7.1. Caractéristiques de l'incinérateur de balles de riz

On fait la cuisson de la balle de riz dans un incinérateur construit en briques non hourdées. Lors de la cuisson, il faut fermer la partie supérieure de l'incinérateur par un tôle, il a aussi besoin de quelque espace pour que les fumées soient évacuer. On a aussi créé une petite ouverture au bas du four comme système d'aération pour contrôler la température et de l'action du vent atmosphérique.

Elle est sous forme cubique de hauteur 1m avec 20cm d'épaisseur et de 1m² de couverture :



Photo 8: Incinérateur pour la cuisson des balles de riz

VII.7.2. Processus de la cuisson des balles de riz

Une fois l'incinérateur est prêt, la calcination s'effectue comme suit :

- On introduit une quantité de balle de riz dans l'incinérateur ;



Photo 9: introduction de la balle de riz dans l'incinérateur

On amorce le feu par des charbons de bois incandescents, puis en remplissant l'incinérateur, après, on enlève les charbons quand les balles de riz commencent à s'allumer;



Photo 10: feu du charbon de bois

On le ferme par un couvercle en tôle



Photo 11 : couverture de l'incinérateur

Pendant la cuisson, il faut bien contrôler régulièrement les systèmes d'aération pour avoir une cendre réactive c'est-à-dire avoir de bonne propriété pouzzolanique. En effet, si l'air a vrai dire l'oxygène est abondant, on a eu une cendre rougeâtre pour laquelle les silices ne sont plus à l'état actif, donc elle est moins intéressante, en revanche si l'aire est insuffisante, la combustion est incomplète, on risque ainsi d'obtenir une cendre CRH (produit noirâtre) qui a faible propriétés pouzzolaniques.

Pendant qu'on a fait l'expérience, elle a passé deux étapes afin d'obtenir des cendres riche en silice :

1^{ère} étape :

Carbonisation : La balle de riz devient noirâtre. Cette étape est faite pendant 18 heures.



Photo 12 : Balles de riz au cours de la carbonisation après 24h

2^{ème} étape :

Combustion lente : les produits obtenus dans la 1^{ère} étape se transforme progressivement en cendre de couleur gris qui est une silice amorphe. Cette étape est aussi faite pendant 18 heures.

VI.7.3. Broyage de la cendre de balles de riz

Le broyage a pour but de mettre en poudre la cendre de balle de riz pour qu'elle soit très réactive. Dans notre étude, on utilise le broyeur à boulet de CNRIT pour l'activation mécanique. Après le broyage, on a la poudre de cendre qui est sur la photo ci-dessous



Photo 13: cendre de balle de riz broyé

VII.7.4. Tamisage

Le but de cette opération c'est d'éliminer les impuretés, c'est-à-dire les cendres de balle de riz incuits et surcuits.

Nous avons utilisés le tamis de maille 0,4mm, pour obtenir une silice fine et réactive.

VII.8. Soude caustique

La soude caustique de formule chimique NaOH, sous forme de granule est distribué par l'entreprise AGRIVET.

D'après l'étude bibliographie qu'on a faite, il faut bien étudier et faire attention sur l'utilisation de ce produit pour avoir un dosage optimum en obtenant la performance mécanique de nos échantillons.

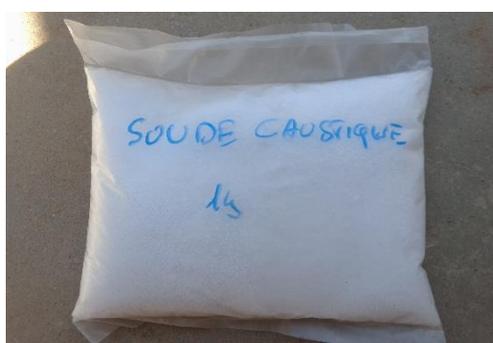


Photo 14: soude caustique

On va voir ci-dessous sous forme de tableau les caractéristiques de la soude caustique :

MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Tableau 27 : caractéristique de la soude caustique

T° de fusion	318 °C
T° d'ébullition	1 390
Solubilité dans l'eau	20°C
Masse volumique	2,1 g.cm ³

Remarque : La réaction de l'eau avec la soude caustique provoque une augmentation de température à pression constante ou ambiante.

VII.9. Eau de JIRAMA

L'eau gâchage doit être propre, potable et a un pH entre 6,5 et 9, on choisit l'eau de JIRAMA pour la réalisation de cette étude.

L'eau de gâchage est essentielle pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, notre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

Caractéristiques de l'eau de JIRAMA

Tableau 28 : caractéristique de l'eau de JIRAMA (source : JIRAMA)

Constituants	Caractéristiques
Insolubles (mg/l)	0
Matières dissoutes (mg /l)	0,0034 à 0,005
Carbonates + bicarbonates alcalins(%)	0,0028
Sulfates en SO ₃ (%)	0
Sulfates en S(%)	0
Sucres (%)	0
P203 (%)	0
Acidité en Ph	7,20 à 8,50
Acide chimique	Aucune coloration brunâtre
Chlorures (mg/l)	3,55 à 8,50
Ions soufre (%)	0

CHAPITRE VIII : ESSAI DE FORMULATION ET DE FABRICATION DES EPROUVETTES

Dans ce chapitre le but c'est de déterminer la formule optimale qu'on pourra avoir le béton de meilleure performance.

VIII.1. Les paramètres de l'essai

Pour bien mener l'étude, on a pris deux types de paramètres afin d'atteindre l'objectif :

- Les paramètres variables
- Les paramètres fixes

VIII.1.1. Paramètres variables

Les paramètres à varier sont ci-dessous :

- Variation du rapport molaire
- Variation de la quantité de l'Aluminosilicate
- Variation de la quantité du liant c'est-à-dire le silicate de soude.
- Variation de la quantité de l'eau de gâchage
- Influence du mode de conservation.

VIII.1.2. Paramètres fixes

On a fixé les restes des paramètres :

- La température de calcination du kaolin = 750 ° C pendant 3h ;
- La température de calcination de la pouzzolane naturel = 700 °C pendant 2h ;
- La température d'incinération de balle riz = 600 °C
- La finesse de la cendre de balle de riz est inférieure à 0,04 mm ou 40 microns ;
- La température de préparation du silicate de soude est la température ambiante
- La quantité du sable pour la confection des éprouvettes = 124g
- La quantité du gravier pour la confection des éprouvettes = 248g
- Le mode de conservation des échantillons : à l'air libre et dans l'eau
- Age des éprouvettes : 7 jours et 28 jours ;

VIII.1.3. Essai de fabrication des éprouvettes en béton géopolymère à base de pouzzolane naturelle dans un moule de forme prismatique

VIII.1.3.1. Les matériels utilisés

Pour bien mener la réalisation, nous avons besoin de quelques matériels comme :

- ☆ Une moule de dimension 4cm x 4cm x 16 cm



- ☆ Une balance de précision



- ☆ Des spatules et une truelle



- ☆ Une table vibrante



☆ Des cuves



☆ Tamis



Photo 15 : photos des matériels utilisés

VIII.1.3.2. Fabrication des éprouvettes

La fabrication de l'éprouvette se fait par étape comme ci-dessous :

- Préparation de liant géopolymère (silicate de soude)
- Préparation de l'aluminosilicate
- Mélangeage de l'aluminosilicate et des agrégats (ajouts des agrégats dans l'aluminosilicate)
- Mélangeage et malaxage de l'aluminosilicate et le silicate de soude
- Moulage et démoulage
- Séchage

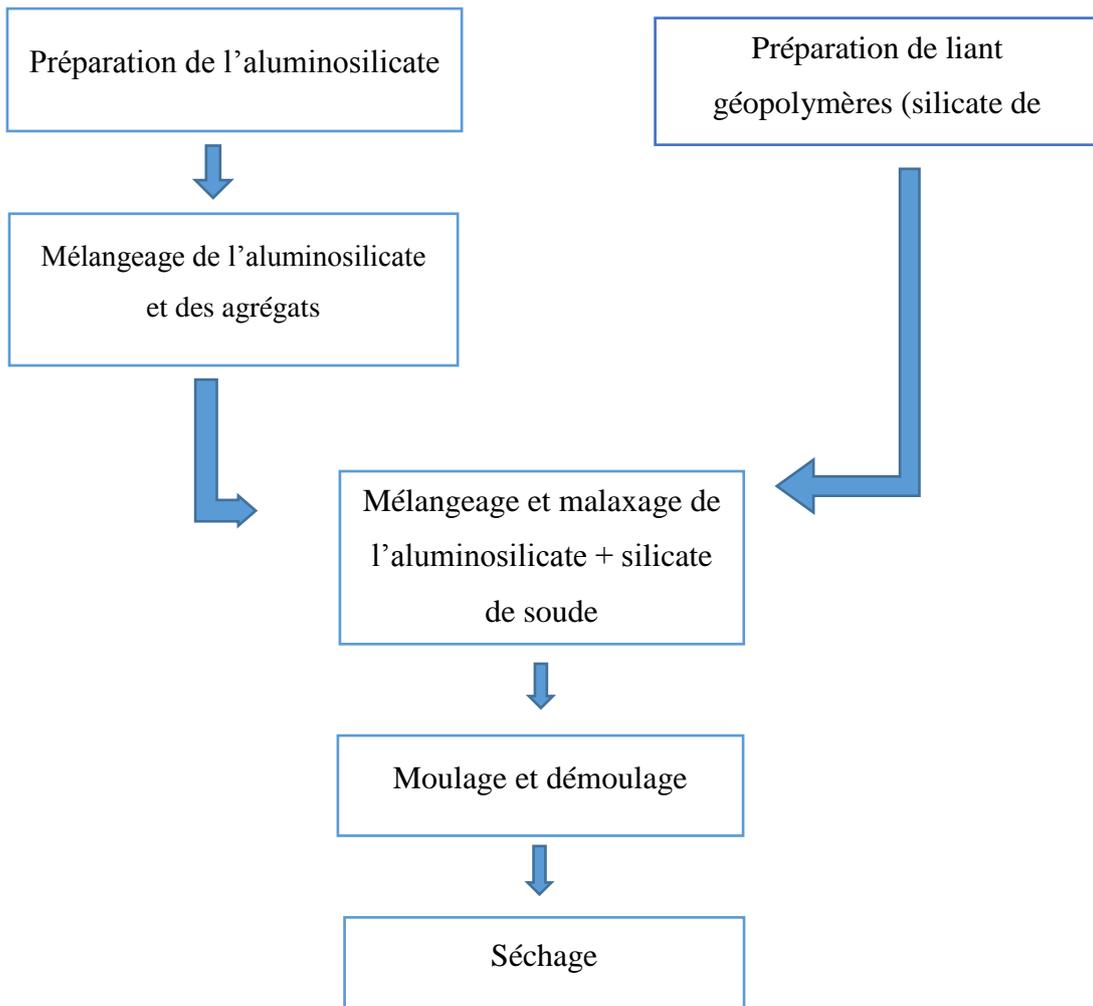


Figure 22 : Etapes de fabrication des éprouvettes

a. Préparation de liant géopolymère (silicate de soude)

Le silicate de soude est fait par le mélange de la soude, de l'eau et de la cendre de balle de riz.

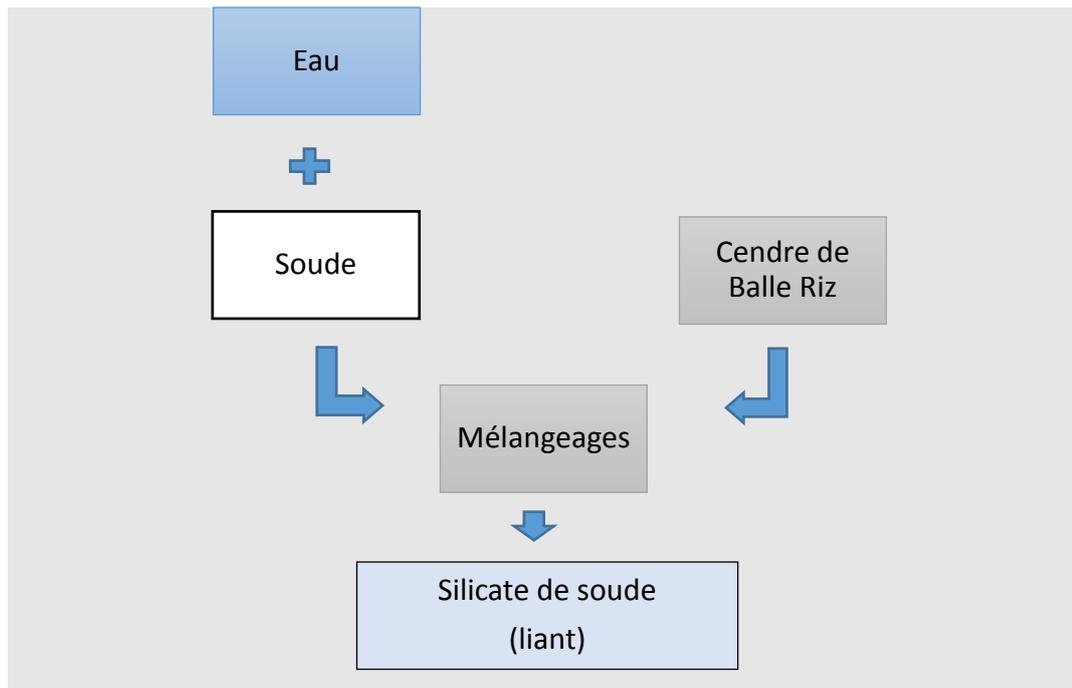


Figure 23: Etapes de fabrication de silicate de soude

Le 1^{er} essai qu'on va étudier c'est la variation du rapport molaire afin de connaître la quantité de soude dans le silicate de soude. Sa synthèse se fait par la réaction de la soude avec l'eau pour qu'elle soit soluble, et après sa réaction avec la silice amorphe, en milieu basique à basse température (de l'ordre de 100°C), ou à température ambiante.

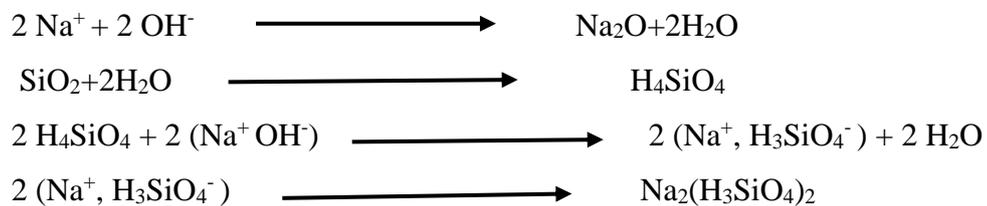
Le module Rm se note par le rapport entre le nombre de mole de SiO₂ et Na₂O.

$$Rm = \frac{n_{SiO_2}}{n_{Na_2O}}$$

Remarque :

- Si $Rm > 1$: c'est un module acide ou abrasif (comme le colle)
- Si $Rm \leq 1$: c'est un module basique ou détergent (comme le savon)

La réaction chimique de la synthèse du silicate de soude est comme suit :



Notons que le pH est supérieur à 11

D'après cette équation, la formule chimique du silicate de soude est de : Na₂(H₃SiO₄)₂.

Pendant la réalisation, nous avons effectué quelques essais préliminaires afin de déterminer la quantité d'eau optimum. Et nous avons constaté que la quantité en masse de l'eau

doit être égale à la quantité de la cendre ; on constate aussi que les éprouvettes fabriquées à partir du module basique ($R_m \leq 1$) ne sont pas concluantes, car elles sont très corrosives, molles, et difficile à sécher.

Donc nous avons effectué quatre (04) essais dont les rapports molaire **R_m** sont respectivement : 1,25 ; 1,5 ; 1,75 et 2.

b. Etape de fabrication du silicate de soude

▪ Pesage et mélangeage

Il faut bien préciser chaque dosage de constituants afin d'avoir les résultats voulu.



Photo 16: pesage et mélangeage de silicate de soude

c. Préparation de l'aluminosilicate

Dans cette étude, on formule l'aluminosilicate par le mélange de la pouzzolane calcinée, de la chaux et du métakaolin. Pour sa préparation, on va les peser une par une d'après la formule qu'on va prendre afin d'avoir un mélange homogène.



Photo 17: pesage des constituants de l'aluminosilicate et mélangeage

d. Malaxage de l'aluminosilicate et les agrégats

Avant de mélanger l'aluminosilicate avec le silicate de soude, on va ajouter le sable, le gravillon et l'eau de gâchage pour avoir un mélange homogène.



Photo 18: malaxage de l'aluminosilicate et les agrégats (AS + agrégats)

e. Mélangeage et malaxage de l'aluminosilicate et le silicate de soude

Si l'aluminosilicate et le silicate de soude sont tous prêts, on pèse le silicate de soude à mélanger et on le verse dans le silicate de soude et puis on les mélange jusqu' à obtention d'un mélange homogène.



Photo 19: mélangeage de l'aluminosilicate et du silicate de soude

f. Moulage et démoulage

Avant le moulage, il faut préparer le moule pour éviter la difficulté sur le démoulage. Cette préparation consiste à graisser le moule à l'aide d'un agent démoulage (exemple : huile, graisse, etc).

Le moulage se fait dans une éprouvette de dimension 4x4x16 cm sur une table vibrante. On verse petit à petit le béton frais et presser à l'aide de la tige métallique en le posant sur une table vibrante pendant 60 secondes pour minimiser l'espace vide.

Le démoulage est effectué après 24h de moulage.



Photo 20: moulage des éprouvettes

g. Séchage

Après le démoulage, nous avons séché les échantillons à l'air libre. Et après quelque temps précis, on les mets dans l'eau pour avoir les résultats sur la porosité et la teneur en eau.



Photo 21: Séchage des éprouvettes

VIII.1.4. Essai physique

VIII.1.4.1. Retraits linéaire et volumique

Les mesures des retraits linéaire (RL) et volumique (RV) sont effectuées à l'aide d'un pied à coulisse ou un mètre gradué sur notre éprouvette. En désignant par L_0 la longueur de l'éprouvette au démoulage et L celle après séchage ou après cuisson, voici la formule de retrait :

$$R_L = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100$$

Et en désignant par V_0 le volume apparent de l'éprouvette au démoulage et par V celui après séchage ou après cuisson, le retrait volumique est donné par la relation :

$$R_V = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100$$



Photo 22: Mesure du retrait à l'aide d'un mètre graduée

VIII.1.4.2. Porosité

La porosité % P est le rapport du volume des vides au volume total du matériau c'est-à-dire le volume occupé par l'eau et l'air sur le volume total du matériau.

La mesure de la porosité se fait en pesant une éprouvette sèche puis la repeser après qu'on l'est immergé dans l'eau pendant 48h, la différence de ces deux valeurs donne la masse d'eau adsorbée dans les pores donc le volume du vide.

La porosité est donnée par la relation :

$$\% P = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

Avec :

m_h : masse de l'éprouvette après immersion 48h

m_s : masse de l'éprouvette séché



Photo 23: Mesure de la porosité

VIII.1.4.3. Densité apparente et densité réelle

La densité apparente γ_d est le rapport de la masse volumique apparente du matériau à celle de l'eau. Elle s'exprime par cette relation :

$$\gamma_d = \frac{m_s}{\rho_e \times V}$$

La densité réelle γ_r d'un matériau est le rapport entre la masse volumique réel de ce matériau à celle de l'eau. La masse volumique réelle d'un matériau est le rapport entre sa masse et le volume réel V_r des grains de ce matériau (c'est-à-dire somme des volumes élémentaires des grains y compris les volumes des pores fermés).

La densité réelle est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_d = \frac{m_s}{\rho_e \times V_r}$$

VIII.1.5. Essai mécanique

Après le séchage du compte du jour déterminé, on a fait cet essai pour faire connaître la résistance à la flexion et à la compression de notre éprouvette, on le fait à l'aide d'une machine de type Wolpert Testwell auprès de bloc technique Ankatso. On presse l'éprouvette et mettre progressivement sous une charge jusqu'à la rupture.



Photo 24 : Machine d'essai Mécanique « Wolpert TESTWELL »

VIII.1.5.1. Résistance à la traction par flexion

La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer expérimentalement la résistance d'un béton à la traction est l'essai de flexion 3 points sur des éprouvettes prismatiques de section carrée

Le moule est donc de forme parallélépipédique. Ses dimensions sont 40x40x160 mm.

Les éprouvettes sont moulées, serrées pendant 24h puis démoulées. Après démoulages, elles sont conservées à l'air libre jusqu'au temps déterminé.

a. Mode opératoire

Les faces latérales de l'éprouvette sont posées sur un dispositif de flexion, constitué de deux appuis en acier distants l'un de l'autre de 100mm et d'un appui de mise en charge, en acier également et équidistant des deux premiers. La longueur de ces appuis est de 50mm. Ce dispositif est représenté à la photo 25.



Photo 25: dispositif de flexion 3 points

b. Expression des résultats

La résistance en traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{1,5.F_f.l}{b^3} [MPa]$$

Avec

- b : le côté de la section carrée du prisme [mm]
- F_f : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture [N]
- l : la distance entre les appuis [mm]

La résistance en traction par flexion est mesurée à 2, 7, 14 et 28 jours.

VIII.1.5.2. La résistance à la compression

a. Préparation des échantillons

Aucune préparation particulière n'est réalisée. Les deux morceaux d'éprouvette résultant de l'essai de flexion sont réutilisés pour l'essai de compression. On comptabilise donc 2 essais de compression pour un essai de flexion.

b. Mode opératoire

Les faces latérales de l'éprouvette sont posées sur un dispositif de compression (photo 26). Celui-ci est composé d'une partie fixe et d'un piston mobile rotulé sur lequel il est possible d'appliquer une charge. Les supports qui transmettent la charge à l'éprouvette sont carrés, de dimension 40 x 40 mm.

c. Expression des résultats

La résistance en compression est calculée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{f_{max}}{S} [MPa]$$

Avec :

- R_c : Résistance à la compression (Mpa)
- F_{max} : force de compression maximale supportée (N)
- S : Section initiale de l'éprouvette



Photo 26: dispositif de compression

La résistance en compression sera, elle aussi mesurée à 2, 7, 14 et 28 jours.

CHAPITRE IX : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Dans ce chapitre, on va voir un à un tous les résultats mécaniques et physique de chaque éprouvette qu'on a formulé, on va les interpréter aussi en les présentant sous forme de courbe ou d'histogramme.

IX.1. Résultats des essais mécaniques avec ses interprétations

On a fait quelques variations en masse de la quantité de chaque constituant de notre béton pour avoir la résistance optimale, premièrement, on a varié la valeur du rapport molaire R_m , deuxièmement, la quantité de l'aluminosilicate c'est-à-dire ces composants comme la pouzzolane, la chaux et le métakaolin, troisièmement, variation de la quantité du liant, plus précisément la silicate de soude, quatrièmement la variation de la teneur en eau ou la quantité de l'eau de gâchage, et la dernière si on a eu le résultat optimum, on va varier l'âge des éprouvettes pendant deux (2), sept (7), quatorze (14) et vingt-et-huit (28) jours.

Lors de dernier essai, on a préparé deux (2) échantillons à chaque essai de prise de temps, l'un pour la conservation dans l'eau et l'autre à l'air libre.

IX.1.1. La variation du rapport molaire

Pour ce 1^{er} essai, on a varié le R_m par une raison de 0.25 ;

D'où $R_m = 1,25 ; 1,50 ; 1,75 ; 2$

a. Quantité pour une éprouvette

On a obtenu les valeurs sur ce tableau ci-dessous d'après le calcul de ce rapport :

$$R_m = \frac{nSiO_2}{nNa_2O}$$

Tableau 29: Quantité en mole de $nSiO_2$ et $NaOH$

Essai	1	2	3	4
Module R_m	1,25	1,50	1,75	2,00
nNa_2O (mole)	2	1.67	1.43	1.25
$nSiO_2$(mole)	2.5	2.5	2.5	2.5
$nNaOH$(mole)	4	3.34	2.86	2.5

Pour formuler une éprouvette, les dosages à fixer sont :

- Sable = 124 g
- Gravillon = 248 g
- Aluminosilicate 210 g c'est-à-dire :
 - *métakaolin = 60g
 - * pouzzolane naturelle calciné = 90g
 - *chaux : 60g
- Eau de gâchage = 137g
- Liants (SS) = 254 g

Tableau 30 : quantité en g de chaque constituant

Désignations	Sable	gravillon	métakaolin	Pouzzolane calcinée	chaux	eau	Liant
Masse en g	124	248	60	90	60	137	254

b. Résistance à la compression

Tableau 31: Résultats de la résistance en compression en fonction du rapport.

$$Rm = \frac{nSiO_2}{nNa_2O} \text{ pendant 7 jours à l'air libre}$$

Résistance à la compression	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4
Rc (MPa)	7,9	12,5	9,7	9,5

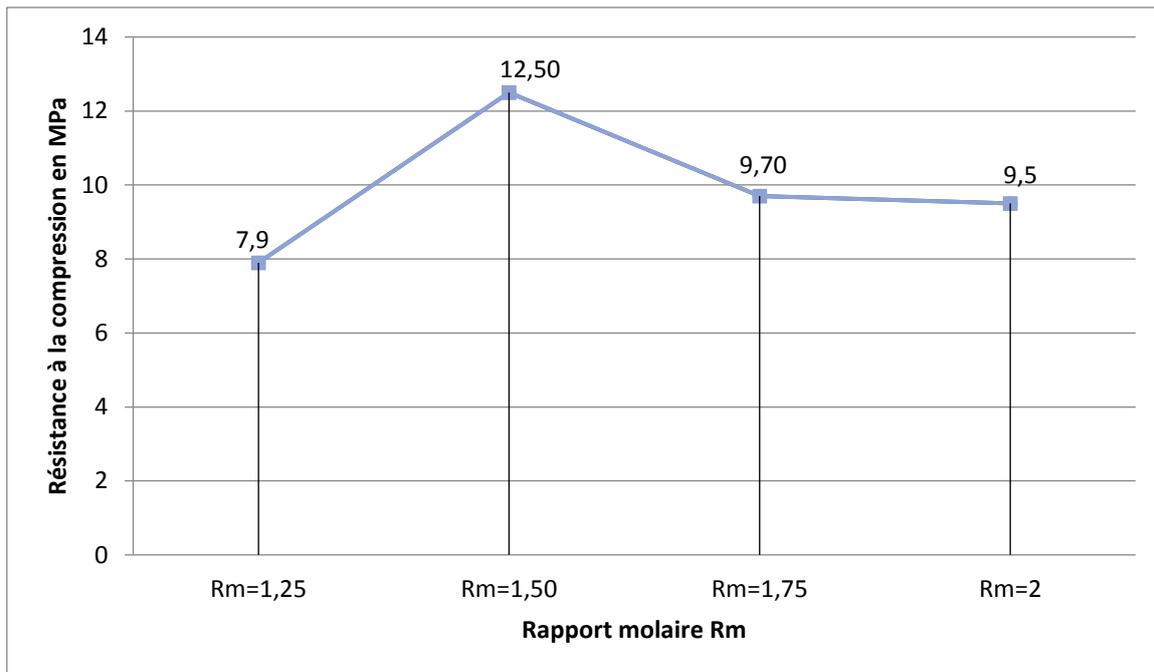


Figure 24: Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction du rapport molaire Rm à 7 jours d'âge

Interprétations

Lorsqu'on voit la courbe ci-dessus, on remarque que le rapport molaire $\frac{nSiO_2}{nNa_2O} = 1,50$ donne la meilleure résistance à la compression ($R_c = 12,5$ MPa) en 7 jours d'âge. Donc ce rapport molaire est optimal puisque la dissolution de l'aluminosilicate (pouzzolane naturelle calcinée + chaux + métakaolin) est maximale.

On observe aussi que la résistance à la compression des éprouvettes du rapport molaire entre 1,50 et 2 diminue mais faiblement, cela explique que la quantité de la silice est en excès ou bien la quantité de la soude est insuffisante pour attaquer la silice du silicate de soude, et cela entraîne une partie des aluminosilicates non dissoutes.

D'après ce résultat, on va fixer le rapport molaire en 1,50 pour effectuer l'essai suivant, et on va varier les quantités des composants de l'aluminosilicate.

IX.1.2. Variation de l'aluminosilicate

a. Quantité pour une éprouvette :

Dans cet essai, on essaye de varier les quantités des matières premières qui constituent l'aluminosilicate c'est-à-dire les quantités de la pouzzolane calcinée, le métakaolin et la chaux. Les restes des matières premières sont à fixer comme :

 MIHAJANAVALONA Rindraniavo

- Rm = 1,5
- Sable = 124 g
- Gravillon = 248 g
- Eau de gâchage = 137g
- Liants = 254 g

Les variations de chaque constituant de l'aluminosilicate sont sur le tableau ci-dessous :

Tableau 32: variation des composants de l'aluminosilicate

Essais	5	6	7	8	9
Pz (g)	80	90	90	100	110
MK (g)	80	60	75	70	65
CX (g)	80	60	75	70	65
Pz/ MK/CX	80/80/80	90/60/60	90/75/75	100/70/70	110/65/65

Pz/MK/CX : désigne les compositions des constituants de l'alumino-silicate de calcium

Avec :

Pz : Pouzzolane naturelle

Mk : Métakaolin

CX : Chaux

b. Résistance à la compression

Tableau 33: résistance à la compression obtenue par variation des constituants de l'aluminosilicate

Résistance à la compression	E 5	E6	E 7	E8	E 9
	80/80/80	90/60/60	90/75/75	100/70/70	110/65/65
Rc (MPa)	10,7	12,50	9,9	7,6	5,5

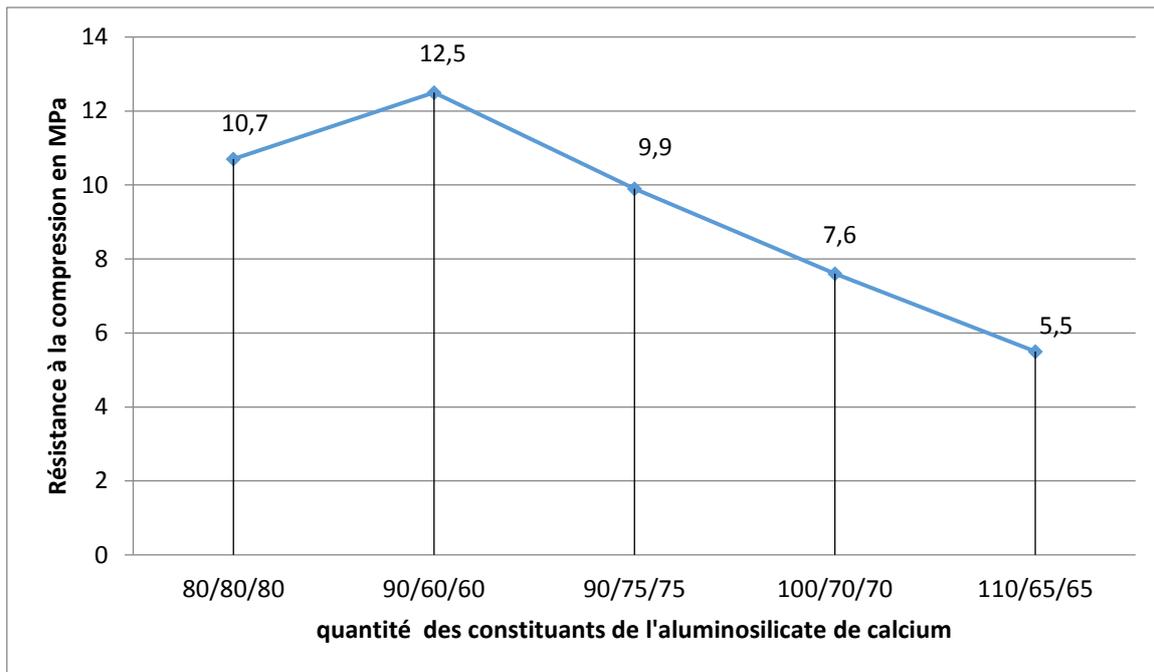


Figure 25 : Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction des quantités des constituants de l'aluminosilicate.

c. Interprétations

La figure 24 nous montre que :

- Pour une composition de notre aluminosilicate 90/60/60, c'est-à-dire pour cette composition, les monomères de silice (la Pz et MK) sont presque combinés avec l'alumine du MK, qui sont recombinaés en majeure partie en oligomère et ensuite transformés en gel ou géopolymérisation d'où la résistance optimale $R_c = 12,50 \text{ MPa}$ en 7 jours d'âge ;
- Pour une composition plus riche en pouzzolane, la teneur en silice est en excès d'où la chute de la résistance par exemple pour 110/65/65, $R_c = 5,5 \text{ MPa}$.

On tire sur ce résultat que l'éprouvette n°6 a la résistance à la compression optimale. Donc on prend les dosages de l'aluminosilicate de cet essai, c'est-à-dire on va les fixer (pouzzolane naturelle =90g, chaux =60 g et métakaolin =60 g), et on va maintenant varier la quantité du silicate de soude.

IX.1.2. Variation de la quantité du liant ou le silicate de soude

a. Quantité pour une éprouvette :

D'après les résultats précédents, on va fixer les quantités des constituants de l'aluminosilicate.

Donc, les dosages fixes sont :

- Rm = 1,5
- Sable = 124 g
- Gravillon = 248 g
- Aluminosilicate
 - *Métakaolin = 60g
 - *Pouzzolane naturelle calcinée = 90g
 - *chaux = 60g
- Eau de gâchage = 137g

Tableau 34: variation de la quantité du silicate de soude

Essais	9	10	11	12	13
Silicate de soude (g)	244	254	264	284	294

b. Résistance à la compression

Tableau 35 : Résistance à la compression en fonction de liants

Résistance à la compression	Eprouvette 9	Eprouvette 10	Eprouvette 11	Eprouvette 12	Eprouvette 13
Silicate de soude (g)	244	254	264	284	294
Rc (MPa)	11,1	12,50	13,1	13,5	10,4

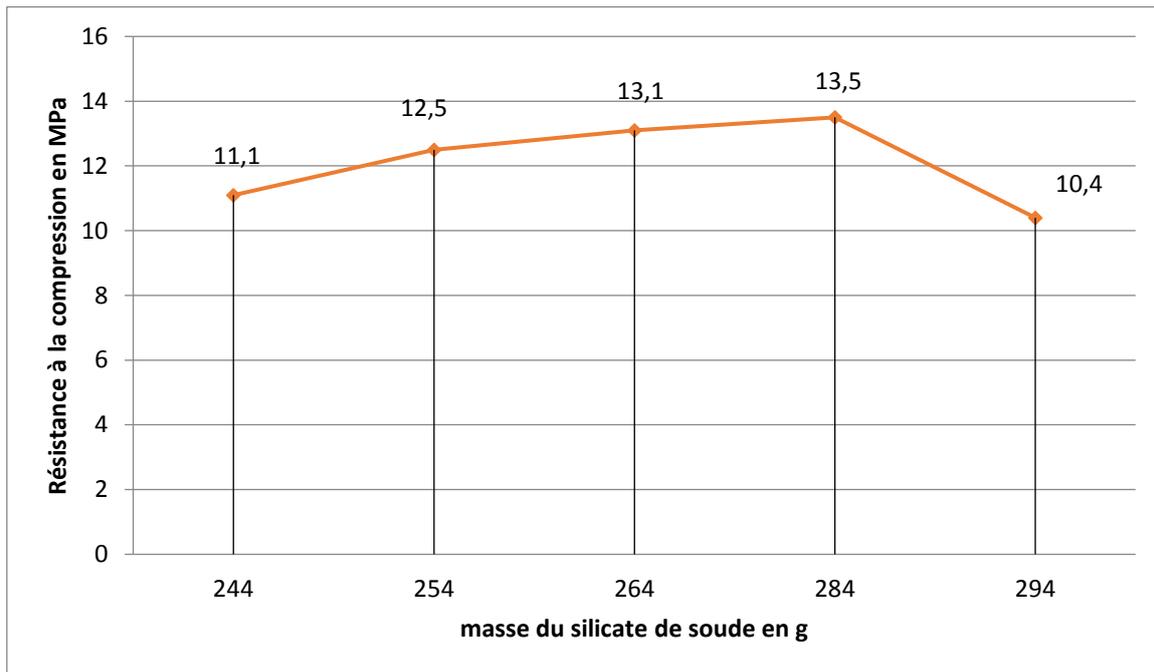


Figure 26: Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la masse du silicate de soude pendant 7 jours d'âge.

c. Interprétations

Le liant joue un rôle très important dans la résistance du béton c'est pour ça qu'on a essayé de varier la quantité du liant.

- Pour $244g \leq \text{masse du liant} < 284g$, la résistance à la compression augmente, mais on n'atteint pas l'optimum, ceci est dû à l'insuffisance du silicate de soude pour dissoudre complètement l'aluminosilicate
- Pour la masse du liant = 284g, cette quantité est optimale pour dissoudre complètement l'aluminosilicate d'où la résistance maximale $R_c = 13,50 \text{ MPa}$ en 7 jours d'âge ;
- Pour masse du liant $> 284g$, la résistance à la compression diminue à cause de l'excès du silicate de soude

La courbe nous montre qu'au fur et à mesure qu'on augmente la quantité du liant ou bien la quantité du silicate de soude, la résistance à la compression augmente également jusqu'à l'éprouvette n°12 avec $R_c = 13,5 \text{ MPa}$ en 7 jours de prise ; qui a donc la résistance à la compression le plus optimum, cela explique que pour une quantité optimale de silicate de soude égale à 284g, l'aluminosilicate de calcium sont presque dissoutes d'où la résistance optimale

Depuis ce résultat, on va fixer la quantité du liant ou le silicate de soude (SS= 284g) de l'essai suivant, et on varie la quantité de l'eau de gâchage.

IX.1.3. Variation de la quantité de l'eau de gâchage

a. Quantité pour une éprouvette

D'après précédent ; on a vu que l'éprouvette n° 12 a la résistance le plus optimum ; donc ; on va fixer la quantité du silicate de soude, et on va varier maintenant la quantité de l'eau de gâchage.

Les dosages à fixer sont :

- Rm = 1,5
- Sable = 124 g
- Gravillon = 248 g
- Aluminosilicate
 - *métakaolin = 60g
 - *pouzzolane naturel = 90g
 - *chaux = 60g
- liants = 284g

Tableau 36: Variation de la quantité de l'eau de gâchage

Essais	13	14	15	16	17
Eau de gâchage (g)	117	127	137	147	157

b. Résistance à la compression

Tableau 37: Résistance en fonction de l'eau de gâche

Résistance à la compression	Eprouvette 13	Eprouvette 14	Eprouvette 15	Eprouvette 16	Eprouvette 17
Eau de gâchage (g)	117	127	137	147	157
Rc (MPa)	8,7	10	13,5	8,5	8,0

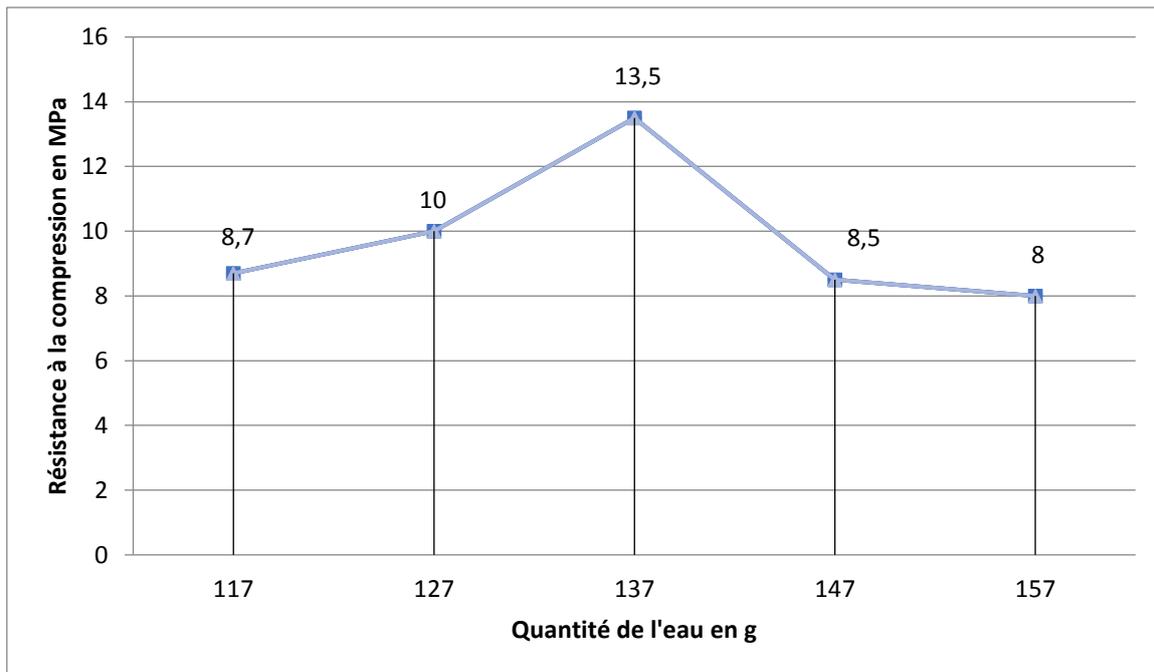


Figure 27 : Résistance à la compression des éprouvettes obtenues par la variation des quantités de l'eau de gâchage.

c. Interprétations

La figure 26 nous informe que :

- Pour $117 \leq$ quantité d'eau < 137 , la résistance à la compression augmente mais faiblement ceci est dû à l'insuffisance de l'eau pour le gâchage et surtout pour la dissolution de l'aluminosilicate de calcium par exemple pour la masse de l'eau égale à 127g, la résistance à la compression correspondante est de 10MPa ;
- Pour masse de l'eau = 137g, cette quantité est optimale d'où la résistance optimale $R_c = 13,50$ MPa en 7 jours d'âge
- Pour masse d'eau > 137 g la résistance à la compression diminue car il y a excès d'eau.

Si on voit tous les résultats de tous ces quatre (4) essais qu'on a déjà faits, on peut conclure que le résultat de la résistance en compression de l'essai n° 12 dans la variation du liant ou le silicate de soude est le plus optimum avec une $R_c = 13,51$ MPa en 7 jours d'âge.

Donc, on le prend pour notre résultat final et on va faire un dernier essai à varier le temps de prise en 2 jours, 7 jours, 14 jours et 28 jours. Et on va voir aussi ses modes de conservation dans l'eau et à l'air libre.

IX.1.4. Variation du temps de prise et le mode de conservation

D'après tous les quatre essais qu'on a déjà faits et en comparant leurs résultats en résistance à la compression, on a vu que le résultat dans l'essai de variation du silicate de soude, éprouvette numéro 12 a la plus bonne la résistance à la compression, à vrai dire le plus optimum.

Donc, à part de ce résultat, on va faire la variation de temps de prise en 2 ; 7 ; 14 et 28 jours, et on va voir aussi sa résistance à la compression après sa conservation dans l'eau et à l'air libre.

IX.1.4.1. Quantité pour une éprouvette

Dosage fixes

- Gravillon : 248g
- Sable : 124g
- Aluminosilicate (pouzzolane naturel calciné + métakaolin + chaux) : 90g + 60g + 60g = 210g
- Eau de gâchage : 137g
- Silicate de soude (liant) : 284g

IX.1.4.2. Résultats des essais mécaniques

a. Résistance à la traction par flexion

Tableau 38: résultat de la résistance à la traction par flexion

Ages	2 jours		7 jours		14 jours		28 jours	
	dans l'eau	à l'air libre						
F (daN)	480	500	730	750	945	1000	1120	1170
L (mm)	160	160	160	160	160	160	160	160
b(mm)	40	40	40	40	40	40	40	40
R_T (MPa)	1,80	1,875	2,74	2,81	3,554	3,75	4,2	4,4

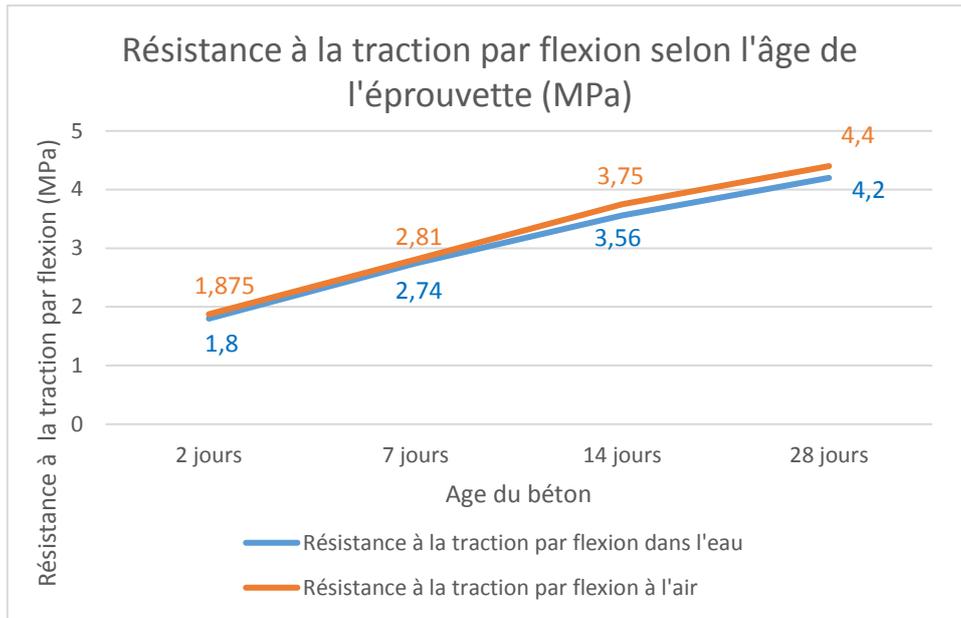


Figure 28 : Résistance à la traction par flexion selon l'âge de l'éprouvette (MPa)

Interprétation

Les résultats nous montrent que plus notre béton est âgé plus il résiste bien à la traction. On constate aussi que la résistance à la traction par flexion du béton conservé à l'air libre est un peu élevée par rapport à celle qui est conservé dans l'eau, mais les deux sont presque présentés linéairement.

b. Résistance à la compression

Tableau 39 : résultat de la résistance à la compression par variation de temps de prise

Ages	2 jours		7 jours		14 jours		28 jours	
	dans l'eau	à l'air libre						
Rc1 (daN)		1 500		4 300		4 680		7 500
Rc2 (daN)		1 450		4 350		4 650		7 000
Rc3 (daN)	1 200		4 120		4 570		6 890	
Rc moyenne (MPa)	3,75	9,22	12,87	13,51	14,28	14,58	21,53	22,67

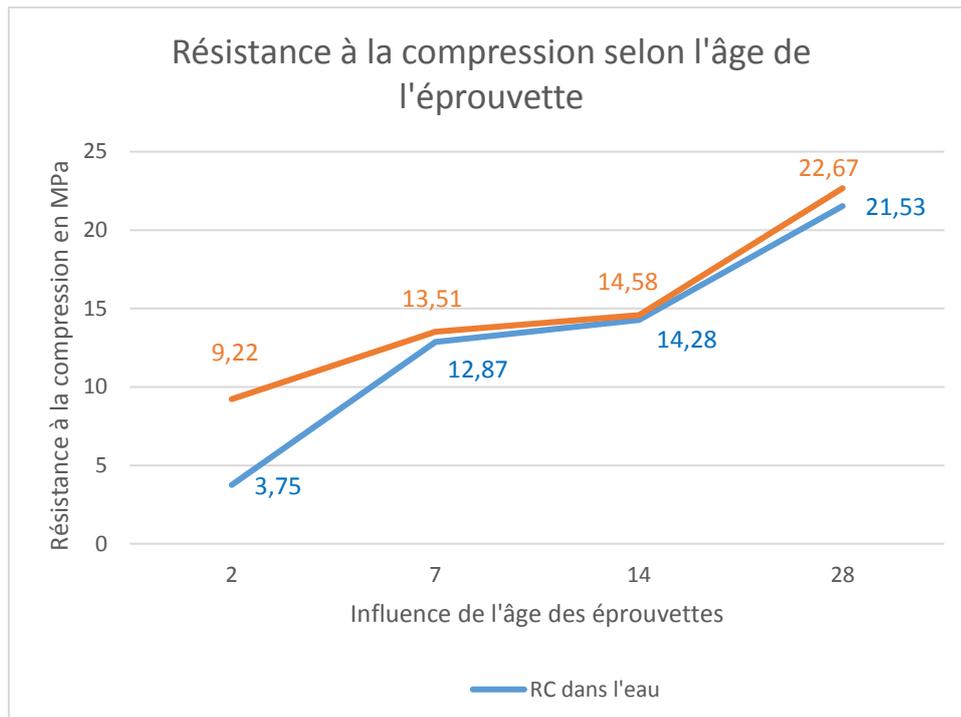


Figure 29: Comparaison et évolution de la résistance à la compression de l'éprouvette en fonction de leur mode de conservation et l'âge de béton.

Interprétation :

D'après cette figure, on a constaté que la résistance à la compression de notre béton croît suivant l'âge des éprouvettes, on a eu le résultat que nous avons étudié parce que sa résistance en compression de notre béton à 28^{ème} jours atteint jusqu'à 22,67 MPa qui est conservé à l'air libre.

On a vu aussi que la conservation à l'air libre a une bonne résistance en compression par rapport à la conservation dans l'eau qui atteint jusqu'à 21,53 MPa, mais la différence est un peu serrée.

IX.2. Résultats des essais physiques

On va maintenant voir les résultats des essais physiques qu'on a fait sur la variation du temps de prise ou l'âge de béton.

IX.2.1. Masse volumique apparente

Sur ce tableau ci-dessous, on va voir les masses volumiques de tous les essais que nous avons faits pendant le dernier essai.

Tableau 40: Masse volumique apparente du béton géopolymère selon leur âge.

Age de l'éprouvette	M_s myenne (g)	V (cm ³)	ρ_{app} (g/cm ³)
2 jours	550	256	2.14
7 jours	547	256	2.13
14 jours	544	256	2.12
28 jours	543	256	2.12

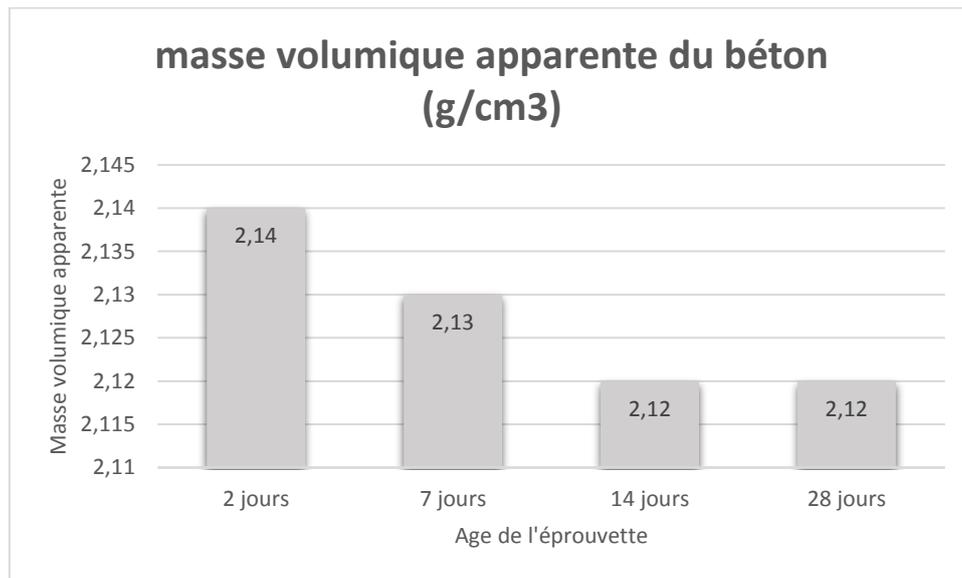


Figure 30: histogramme de la masse volumique selon l'âge de l'éprouvette

IX.2.2. Porosité

Tableau 41: Résultat de la porosité de notre béton géopolymère selon leur âge

Age de l'éprouvette	M_h (g)	M_s myenne (g)	Porosité (%)
2 jours	560	550	1,8
7 jours	555	547	1,46
14 jours	550	544	1,1
28 jours	548	543	0,9

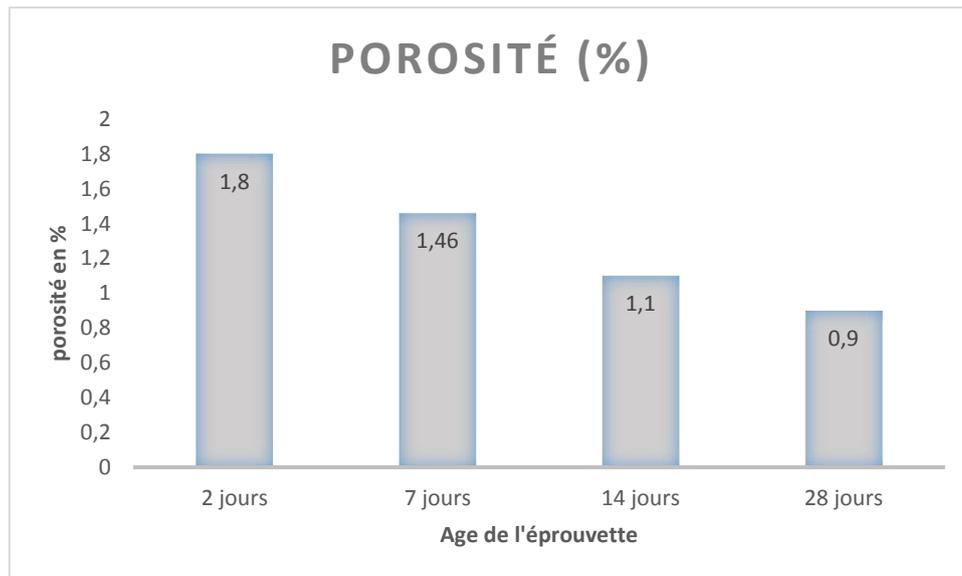


Figure 31: histogramme de la porosité selon l'âge de l'éprouvette

Interprétation

Lors de la 2^e jour de prise, on a vu sur cette figure que le poids de notre éprouvette diminue de 1.8%, et après 28^e jour, elle diminue jusqu'à 0.9%. Cela signifie que la porosité de notre béton est si faible, donc il est bien compacté.

IX.2.3. Retrait

IX.2.3.1. Retrait linéaire

Tableau 42 : Retrait linéaire du béton géopolymère selon leur âge

Age		2 jours	7 jours	14 jours	28 jours
Avant séchage	L (cm)	16	16	16	16
	l (cm)	4	4	4	4
	h (cm)	4	4	4	4
	V (cm ³)	256	256	256	256
Après séchage	L (cm)	16	16	16	16
	l (cm)	4	4	4	4
	h (cm)	4	3,9	3,8	3,8
	V (cm ³)	256	249,6	243,2	243,2
Retrait volumique après séchage (RVS) (cm³)		0	6,4	12,8	12,8
RVS (%)		0	2,56	5,26	5,26

Interprétation

Après avoir vu ce tableau ci-dessus, nous constatons que le retrait de notre béton est de 5,26% de son volume jusqu'aux 28^e jours ; c'est-à-dire il y a diminution de volume sur notre béton suivant son âge.

**CHAPITRE X : ASPECT ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DES
BETONS GEOPOLYMERES**

X.1. ASPECT ECONOMIQUE

X.1.1. Pour le béton ordinaire

a. Prix des matières premières

Tableau 43: prix de chaque matière première de béton ordinaire

Matières premières	unité	Prix unitaires (Ar)
Ciment 42,5 Orimbato	sac	35 000
Sable de rivière 0/5	m ³	30 000
Gravillon concassé 5/8	m ³	65 000
Eau	m ³	2 500

b. Cout d'1 m3 de béton ordinaire

Tableau 44 : Prix de matériaux pour 1 m³ de béton ordinaire

Désignation	unité	Prix unitaire (Ar)	Quantité	Sous prix	Prix total (Ar)
Ciment 42,5 Orimbato	sac	35000	7	245 000	314 187.5
Sable de rivière	m ³	30000	0,45	13500	
Gravillon concassé	m ³	65000	0.85	55250	
eau	m ³	2500	0,175	437.5	

X.1.2. Pour le béton géopolymères

a. Prix des matières premières

Tableau 45 : Prix à chaque matière première pour béton géopolymères

Matières premières	unité	Prix unitaires (Ar)
soude	kg	3500
Métakaolin	kg	460
Pouzzolane naturel	kg	100
Cendre de balle de riz	kg	50
chaux	kg	400
Sable de rivière 0/5	m ³	30 000
Gravillon concassé 5/8	m ³	65 000
Eau	m ³	2 500

b. Cout d'1 m3 de béton géopolymères

Tableau 46 : prix des matières premières pour 1 m³ du béton géopolymères

Matières premières	unité	Prix unitaires (Ar)	quantité	Sous prix	Prix total (Ar)
soude	kg	3500	17.45	61 075	187 652
Métakaolin	kg	450	10.41	46 845	
Pouzzolane naturel	kg	100	10.41	1 041	
Cendre de balle de riz	kg	50	24.44	1 222	
chaux	kg	400	10.41	4 164	
Sable de rivière 0/5	m ³	30000	0,36	10 800	
Gravillon concassé 5/8	m ³	65000	0.96	62 400	
Eau	m ³	2500	0,042	105	

Interprétation

Si on compare les prix de 1m³ des deux bétons, on a vu que le prix de 1m³ du béton géopolymère est un peu moins chère que le béton ordinaire à cause du prix du ciment. Si on achète la soude de petit à petit, les distributeurs les vendent en 6500ar le kilo, on voit une augmentation de prix car le prix d'un sac de 25kg de soude est de 90 000ar ce qui est un prix adorable pour nous, Cela implique la réduction du prix des matières premières de notre béton.

X.2. Études des impacts environnementaux

Nous avons étudié les impacts environnementaux concernant la fabrication du béton géopolymères, notre objectif est d'évaluer les avantages et les inconvénients de la réalisation et l'utilisation de la production, touchant l'impact sur le milieu humain et l'impact sur le lieu naturel.

X.2.1. Impact sur le milieu naturel

a. Impact sur l'air

Les principales pollutions de l'air engendrées sont les poussières et les fumées émises par l'usine, cuisson, calcination 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. Notre usine sera donc équipée d'un grand aspirateur à fin de minimiser le dégagement de gaz. Pour conclure, on peut dire que la présence de notre usine n'affecte en rien l'air environnant.

b. Impact sur les sols, flore et la faune

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, l'augmentation 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. Par contre, Pour l'installation de l'usine, il n'y aura pas d'impacts particuliers sur la flore et la faune. L'installation n'occupera qu'une petite superficie.

c. Impact sur les eaux

L'eau issue de toutes les opérations sera traitée au préalable dans des bassins avant d'être rejetée. On procédera ainsi à sa floculation et à sa décantation. En effet elle ne renfermera pas d'autres produits que la poussière

X.2.2. Impact sur le milieu humain

a. Impact socio-économique

La fabrication du béton géopolymères demande beaucoup de machine et de matériel, comme le malaxeur, le four de calcination, des broyeur, concasseur,... c'est-à-dire besoin de personne pour travail dans cet usine. Il y a création d'emploi, donc le taux de chômage diminue.

b. Impact sur les bruits et vibrations

Le broyeur, le concasseur, le malaxeur provoque des bruits et des vibrations, l'usine a utilisée des préservations contre tous les effets sonores provoquants par l'usine.

Aucun effet particulier par les bruits et les vibrations n'est à envisager puisque l'usine sera assez isolée des lieux d'habitation et les ouvriers portent des casques anti- bruits. En plus, les machines ne sont pas assez bruyantes pour que le bruit se fasse sentir au-delà de l'enceinte de l'entreprise.

c. Impact par les poussières et les odeurs

La préservation contre les poussières et les odeurs sont mises avant la construction d'usine, c'est-à-dire Pendant la phase de production, il n'y a pas des risques pour le dégagement des poussières et des odeurs car les manipulations se font dans une enceinte close. En plus, l'usine sera équipée d'un système anti-poussiéreux et les ouvriers portent des masques de protections adéquats lors de la manipulation.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail est de valoriser la pouzzolane naturelle de Betafo, pour élaborer et formuler un béton géopolymère

Nous avons varié les paramètres qui influent sur les propriétés de nos éprouvettes

La composition optimale obtenue lors de l'étude expérimentale est de :

- ✓ $R_m = 1,5$
- ✓ Composition de l'aluminosilicate de calcium
 - Pouzzolane naturelle : 14.26%
 - Métakaolin : 9.51%
 - Chaux : 9.51%
- ✓ Liant : 45%
- ✓ Eau : 21.72%

Les essais expérimentaux ont donné les résultats suivants :

- Résistance à la compression simple $R_c = 22,67$ MPa et la résistance à la traction par flexion $R_t = 4,4$ MPa, en conservant les éprouvettes à l'air libre pendant 28 jours d'âge
- Une masse volumique apparente égale à $2,2T/m^3$
- Une faible porosité au environ de 0,9 %
- Un retrait volumique de l'ordre de 5,26%

Ces résultats obtenus au niveau laboratoire et à petite échelle pendant les études expérimentales sont encourageants et mérite d'être confirmé à l'échelle pilote pour sa vulgarisation.

BIBLIOGRAPHIES

- 1 : Cours ETS, ‘‘caractéristiques fondamentales du béton’’, hiver 2015
- 2 : Technologie du béton : guf\formation\beton\technobeton v05_01-BETON Degussa
Construction Chemicals France
- 3 : Henri Le Chatelier (1887)
- 4 : Georges DREUX et Jean FESTA, « Le nouveau guide du béton »
- 5 : Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy, cours sur les granulats L3, en matériaux minéraux, IES-AV, Université d’Antananarivo, 2017.
- 6 : Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, cours sur les nouveaux bétons M2, en matériaux minéraux, IES-AV, Université d’Antananarivo, 2019.
- 7 : Professeur Titulaire RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, cours sur mortiers et bétons M1, en matériaux minéraux, IES-AV, Université d’Antananarivo, 2019.
- 8 : Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, cours sur le béton géopolymère, M2, en matériaux minéraux, IES-AV, Université d’Antananarivo, avril 2019.
- 9 : RAKOTOARIMANANA Mike Jean Yves, RASOLOFONIRINA Andry Franck,
« Essai de fabrication d’un ciment par le procédé de géopolymérisation »
Mémoire DEA SM, 2006
- 10: DAVIDOVITS J., «Synthesis of new high temperature geopolymers for reinforced plastic/composite »
- 11: DAVIDOVITS J., « Method for the obtention of geopolymer cement, with no CO2 emission, and product there by obtained », French patentent 1992
- 12: RATOVONDRAHONA J. et RAKOTONIRINA Z., «Essai de fabrication d’une résine minérale par le procédé de géopolymérisation», Mémoire DEA SM 2006
- 13: FICHE 27 BALLE DE RIZ_v14.pdf , consulté le 10/10/17
- 14: Pierre DELOT, ‘‘Balle de riz, Compilation d’élément technique en vue de son utilisation en isolation thermique’’, 6 octobre 2015
- 15: Ph. Rocher., « Mémento et minéraux Industriels - Ponces et pouzzolanes, décembre 1992, R 36447 »
- 16: Belmenaouar Samir., « Recherche Bibliographique sur la valorisation de métakaolin dans les matériaux de construction », Université Mohamed Boudiaf _ M’sila Faculté de technologie, promotion : 2015/2016.

- 17: Bich Cristelle « Contribution à l'étude de l'activation Thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat spécialité Génie Civil de l'Institut National des sciences appliquées de Lyon 264 p, (2005)
- 18 : Ahmed Taфраoui, T. Rikioui, S. Lebaili et A. Mekkaoui « Emploi du métakaolin de la région sur ouest d'Algérie dans la transformation du béton économique ». Université de Bechar, FIMAS (Laboratoire Fiabilité des Matériaux et Structures), Université USTHB, SGM (Laboratoire des sciences et Génie des Matériaux)
- 19: FICHE TECHNIQUE CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE (EN 459-1)
- 20: MAISON Nature, « Fiche technique : cycle de la chaux »
- 21 : Olivier Labesse, « Précis d'Utilisation de Chaux Naturelle Hydraulique NHL », 2005
- 22: Dr. GHOMARI Fouad, « SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION », Université ABOUKER BELKAID, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Civil,
- 23 : K.HARICHANE, M. GHRICI, S.KENAI, « Effet de la combinaison chaux pouzzolane naturelle sur les caractéristiques de plasticité des sols argileux ». Laboratoire Géomatériaux, Université Hassiba Benbouali, 02000 Chlef (Algérie), Laboratoire Géomatériaux, Université Saab Dahleb, 09000 Blida (Algérie) ; Novembre 2012

WEBOGRAPHIES

W1 : http://.wikiwand.fr/Notation_cimentiere/, consulté le 10/10/19

W2 : <http://www.ecocem.fr/fabrication-du-ciment/>, consulté le 14/11/17

W3 : <http://www.ecocem.fr/types-de-ciments/>, consulté le 14/11/17

W4 : www.ballderiz.fr/wa_files/b2r_cendres_20141001.pdf, consulté le 10/10/17

W5: [http://01_FR_Kaolin_fact.pdf/](http://01_FR_Kaolin_fact.pdf), consulté le 15/11/2020

W6 :

http://www.cannabric.com/media/documentos/84362_CHAUX_HYDRAULIQUE_NATURE_LLE_fiche_technique.pdf, consulté le 16/06/21

W7 : <https://fr.scribd.com/document/323240321/Le-Cycle-de-La-Chaux>, consulté le 16/06/21

W8: <http://www.origine-des-roches-calcaires/>, consulte le 2/11/2020

ANNEXES

ANNEXE 1 : NOTATION CIMENTIER

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

Voici la notation de la chimie des ciments

Tableau 47 : Notation chimique du ciment

Formules et abréviations usuelles			
	Formule complète	Formule agrégée	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
	$CaSO_4$	Cs	Sulfate calcium (anhydrite)
	$CaSO_4, 2H_2O$	CsH2	Sulfate de calcium (gypse)
Constituants hydrauliques	$3CaO.Al_2O_3$	C3A	Aluminate de tricalcique
	$4CaO.3H_2O.Fe_2O_3$	C3AF	Aluminoferrite tetracalcique
	$3CaO.SiO_3$	C4AF	Silicate tricalcique
	$2CaO.SiO_3$	C3 S	Silicate bicalcique
Constituants hydratés	$3CaO.2SiO_3.3H_2O$	C3S2 H3	Silicate de calcium hydraté (tobermorite)
	$4CaO.Al_2O_3.13H_2O$	C4 AH13	Aluminate de calcium hydraté
	$3CaO.Al_2O_3.6H_2O$	C3A H6	
	$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.3H_2O$	C3ACS3	Sulfoaluminate de calcium hydraté (attringite)
	$Ca(OH)_2$	CH	Chaux hydraté

ANNEXE 2 : 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%
 SiO_2 : 39.8%
 Fe_2O : - traces
 TiO_2 : 1.2%
 Al_2O_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

ANNEXE 3 : CARTE DE LOCALISATION DES GISEMENTS DE KAOLIN A MADAGASCAR

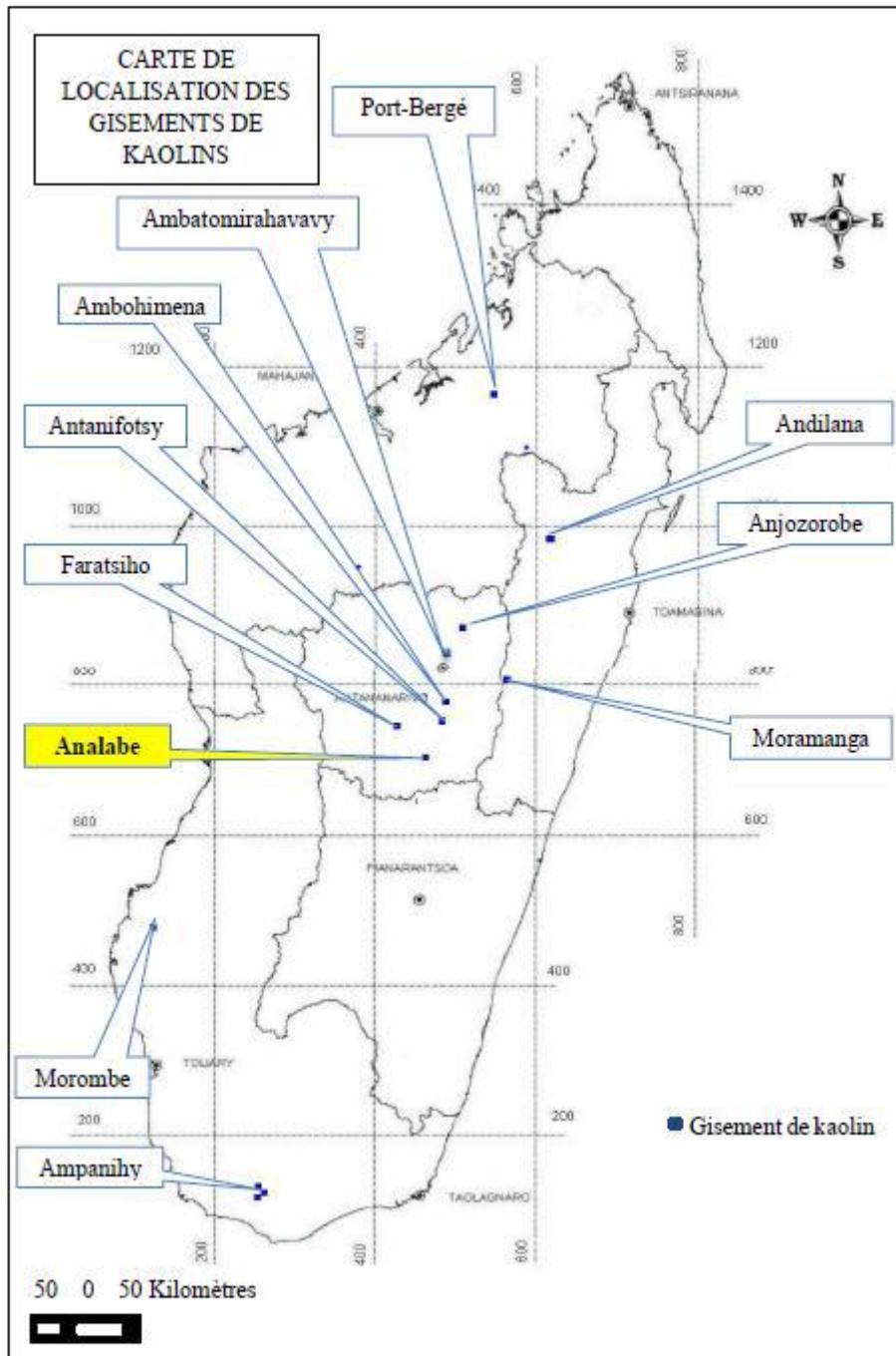


TABLE DES MATIERES

TENY FISAORANA	i
REMERCIEMENTS	iii
SOMMAIRE	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES PHOTOS	x
LISTE DES ANNEXES	xi
LISTE DES ABREVIATIONS	xii
LISTE DES NOTATIONS	xiii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I :	1
ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS	3
I.1 Définition [1]	3
I.2 Rôles des constituants [1]	4
I.2.1 - Le liant ou le ciment	4
I.3. Les granulats [4] :	12
I.3.1. Définition	12
I.3.2. Classification des granulats	12
I.3.3. Les granulats les plus utilisés	12
c. Les graviers ou gravillons	15
I.3.4. Propriétés des granulats fins [5]	16
I.3.4.1 Propreté du sable (teneur en fines argileuses)	16
I.3.4.1.1 Spécification	16
I.3.4.1.2 Module de finesse	17
I.3.4.1.3 La propreté	17
I.3.4.1.4 Résistances mécaniques :	17

I.3.5	Caractéristiques des granulats	18
I.3.5.1	Caractéristique géométrique des granulats.....	18
I.3.6	Caractéristique physique des granulats.....	19
I.3.6.1	Masse volumique apparente	19
I.3.6.2	Masse volumique absolue.....	20
I.3.6.3	Densité absolue.....	20
I.3.6.4	Densité apparente	20
I.3.6.5	Compacité :.....	20
I.3.6.6	Porosité :	21
I.4	Différents types de béton [6]	21
I.4.1	Béton ordinaire	21
I.4.2	Béton à haute résistance (BHR).....	21
I.4.3	Béton à haute performance (BHP).....	21
I.4.4	Béton auto-plaçant (BAP)	22
I.4.5.	Béton fibrés (BF).....	22
I.4.6.	Béton fibrés ultra à haute performance (BFUHP)	22
I.4.7.	Béton à durcissement rapide.....	22
I.4.8.	Béton léger	22
I.4.9.	Béton lourd	23
I.4.10.	Béton réfractaire	23
I.4.11.	Béton à poudre réactive (BPR).....	23
I.4.12.	Béton compacté au rouleau (BCR).....	23
I.5.	Classification des bétons.....	23
I.6.	Propriétés et caractéristiques du béton	25
I.6.1.	Propriété à l'état frais du béton	25
I.6.2.	Affaissement au cône d'Abrams	25
I.6.3.	Propriétés du béton durcit	25

I.7. Formulation du béton [7]	26
I.8. Fabrication du béton	26
I.8.1. Fabrication manuel	26
I.8.2. Fabrication mécanique	27
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES	28
II.1. Introduction [8]	28
II.2. Historique	28
II.3. Définition	29
II.4. La découverte des géopolymères	30
II.5. Les matières premières des géopolymère et la géosynthèse [9]	31
II.5.1. Matériaux aluminosilicates	31
II.5.2. Les solutions activatrices	31
II.6. Mécanisme de la géopolymérisation [10]	32
II.6.1. L'étape de dissolution/hydrolyse	33
II.6.2. L'étape de restructuration	33
II.6.3. L'étape de polycondensation/gélation	33
II.7. Autres produits géopolymères [9], [11], [12]	34
II.7.1. Liant ou résine géopolymère	34
II.7.2. Ciment géopolymère	34
II.7.3. Brique géopolymère	35
CHAPITRE III : GENERALITES SUR LA BALLE DE RIZ ET LA CENDRE DE BALLE DE RIZ	36
III.1. Les balles de riz [13]	36
III.1.1. Définition	36
III.1.2. Caractérisation	36
III.1.3. Composition chimique des balles de riz	37
III.1.4. Utilisations [13]	37

III.1.4.1. Combustible	37
III.1.4.2. Production d’engrais organique	37
III.1.4.3. Isolation des bâtiments	37
III.1.4.4. Fabrication de carburant à base de balles de riz	38
III.1.4.5. Fabrication des panneaux de gypse	38
III.1.4.6. Litière animale	38
III.1.4.7. Fabrication des adobes	38
III.1.4.8. Fabrication des enduits de terre	38
III.2. les cendres de balles de riz [W4]	39
III.2.1. Définition	39
III.2.2. Type	39
III.2.2.1. La RHA ou Rice Husk Ash	39
III.2.2.2. La CRH ou Carbonized Rice Husk	40
CHAPITRE IV : GENERALITES SUR LA POUZZOLANE NATURELLE	41
IV.1. Définition [15]	41
IV.2. Extraction et traitement	41
IV.3. Propriétés physiques et chimiques de la pouzzolane	43
IV.3.1. Granulométrie de la pouzzolane	43
IV.3.2. Teneur en eau de la pouzzolane	43
IV.3.3. Porosité de la pouzzolane	43
IV.3.4. Densité	43
IV.3.5. Résistance à la chaleur	43
IV.3.7. Conductibilité thermique (Isolation thermique)	44
IV.3.8. Caractéristique chimique	44
IV.3.9. Propriétés mécanique	44
IV.3.9.1. Résistance à la compression	45
IV.3.9.2. Résistance à la traction	45

IV.3.10. Résistivité du béton de pouzzolane.....	46
IV.3.10.1. Résistance au feu.....	46
IV.3.10.2. Résistance au gel.....	46
IV.3.10.3. Résistance aux acides.....	46
IV.3.11. Durabilité.....	46
IV.4. Différents types d'utilisations de pouzzolane.....	46
IV.4.1. Dans le bâtiment.....	46
IV.4.2. Dans les techniques routières.....	47
IV.4.3. Dans l'agriculture.....	47
IV.4.4. Dans les équipements sportifs.....	47
IV.4.5. Dans l'industrie.....	47
CHAPITRE V : NOTIONS SUR LE KAOLIN ET METAKAOLIN.....	48
V.1. Métakaolin [16].....	48
V.1.1. Définition [16].....	48
V.1.2. Historique de l'utilisation du métakaolin.....	48
V.1.3. Fabrication.....	49
V.2. Kaolin.....	49
V.2.1. Propriétés physique, thermique et mécanique du kaolin.....	50
V.2.2. Composition chimique du kaolin.....	50
V.2.3. Structure cristalline du kaolin.....	50
V.2.4. Morphologie.....	51
V.2.5. Impureté dans le kaolin.....	52
V.2.6. Calcination du kaolin [17].....	53
V.2.6.1. La calcination flash.....	53
V.2.6.2. La calcination lente.....	53
V.2.8. Domaine d'utilisation de métakaolin.....	54
CHAPITRE VI : GENERALITES SUR LA CHAUX HYDRAULIQUE.....	56

VI.1. Matière première: [19], [W6].....	56
VI.2. Cycle de la chaux [20], [W7]	56
VI.3. Dénomination des chaux naturelles.....	56
VI.4. La fabrication [22]	57
VI.4.1. L'extraction :.....	57
VI.4.2. La cuisson	58
VI.5. Caractéristiques de la chaux.....	58
VI.6. Propriété de la chaux hydraulique.....	59
VI.6.1. Propriété mécanique.....	59
VI.6.2. Propriété physique et composition chimique de la chaux [23]	60
VI.6.3. Origine de calcaire [W8]	60
VI.6.4. Gisement de calcaire à Madagascar.....	60
VI.6.5. domaine d'utilisation de la chaux.....	61
VI.6.5.1. Enduit.....	61
VI.6.5.2. Mortier de pose et de jointement.....	61
VI.6.5.3. Badigeons.....	61
VI.6.5.4. Matériau de construction	61
VI.6.6. Quelques utilisations.....	62
PARTIE II :	63
ETUDES EXPERIMENTALES	63
CHAPITRE VII: PREPARATION ET CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES	63
VII.1. Énumération des matériaux d'expérimentation.....	63
VII.2. Méthode de caractérisation	63
VII.2.1. Détermination des caractéristiques physiques	64
VII.2.1.1. Teneur en eau	64
VII.2.1.2. Masse volumique apparente (ρ)	64

VII.3. Pouzzolane naturelle	64
VII.4. Les granulats	67
VII.4.1. Caractéristiques physiques	67
VII.4.2. Caractéristiques géométriques des granulats	69
VII.5. Métakaolin	72
VII.5.1. Kaolin	72
VII.5.4. Caractéristiques	73
VII.6. Chaux	74
VII.6.1. Caractéristiques chimique de la chaux	74
VII.6.2. Caractéristiques physique de la chaux	74
VII.6.3. Préparation de la chaux	75
VII.7. Cendre de balle de riz	75
VII.7.1. Cuisson de la balle de riz	75
VII.7.3. Broyage de la cendre de balles de riz	78
VII.7.4. Tamisage	78
VII.8. Soude caustique	78
VII.9. Eau de JIRAMA	79
CHAPITRE VIII : ESSAI DE FORMULATION ET DE FABRICATION DES EPROUVETTES	80
VIII.1. Les paramètres de l'essai	80
VIII.1.1. Paramètres variables	80
VIII.1.2. Paramètres fixes	80
VIII.1.3. Essai de fabrication des éprouvettes en béton géopolymère à base de pouzzolane naturelle dans un moule de forme prismatique	80
VIII.1.3.1. Les matériels utilisés	81
VIII.1.3.2. Fabrication des éprouvettes	82
VIII.1.4. Essai physique	88
VIII.1.4.1. Retraits linéaire et volumique	88

VIII.1.4.2. Porosité	88
VIII.1.4.3. Densité apparente et densité réelle	89
VIII.1.5. Essai mécanique	90
VIII.1.5.1. Résistance à la traction par flexion	90
VIII.1.5.2. La résistance à la compression	91
CHAPITRE IX : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES ESSAIS EXPERIMENTAUX	93
IX.1. Résultats des essais mécaniques avec ses interprétations.....	93
IX.1.2. Variation de la quantité du liant ou le silicate de soude.....	98
IX.1.3. Variation de la quantité de l'eau de gâchage	100
IX.1.4. Variation du temps de prise et le mode de conservation	102
IX.1.4.1. Quantité pour une éprouvette.....	102
IX.2. Résultats des essais physiques.....	104
IX.2.1. Masse volumique apparente	104
IX.2.2. Porosité	105
IX.2.3. Retrait	106
IX.2.3.1. Retrait linéaire	106
CHAPITRE X : ASPECT ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DES BETONS GEOPOLYMERES	108
X.1. ASPECT ECONOMIQUE.....	108
X.1.1. Pour le béton ordinaire	108
X.1.2. Pour le béton géopolymères.....	109
X.2. Études des impacts environnementaux	110
X.2.1. Impact sur le milieu naturel	110
X.2.2. Impact sur le milieu humain.....	111
BIBLIOGRAPHIES.....	I
WEBOGRAPHIES.....	III
ANNEXE 1 : NOTATION CIMENTIER	V

ANNEXE 2 : FICHE TECHNIQUE DU KAOLIN D'ANALABE VI
ANNEXE 3 : CARTE DE LOCALISATION DES GISEMENTS DE KAOLIN A
MADAGASCARVII
TABLE DES MATIERES VIII

Auteur : MIHAJANAVALONA Rindraniavo

Titre : “ ETUDE ET ESSAI DE FABRICATION DES BETONS GEOPOLYMERES A BASE DE POUZZOLANE NATURELLE DE BETAFO VAKINANKARATRA ”



Nombre de page : 112

Nombre de tableau : 48

Nombre de figure : 31

Nombre de photo : 26

RESUME

Le présent travail a pour objet de valoriser la pouzzolane naturelle de Betafo pour élaborer et formuler un béton géopolymère. Des essais expérimentaux ont été réalisés pour élaborer notre nouveau matériau. Nous avons effectué des essais mécaniques et physiques pour caractériser notre matériau en variant quelques paramètres tels que, le rapport molaire, la quantité des constituants de l'aluminosilicate de calcium, la quantité de liant, la quantité d'eau, ainsi que l'âge de conservation des éprouvettes. Les résultats expérimentaux nous donnent que la $R_m = 1,5$ est le résultat optimale et des résistances mécaniques fiable telles que la résistance à la compression est de l'ordre 22,67MPa et la résistance à la traction par flexion est de 4,4 MPa après 28 jours d'âges.

Mots clés : pouzzolane naturelle de Betafo, géopolymère, silicate de soude, cendres de balle de riz, métakaolin, chaux

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop the natural Betafo pozzolan and formulate a geopolymer concrete. Experimental tests were carried out to develop our new material. We performed mechanical and physical tests for characterizing our material by varying some parameters such as the molar ratio, the quantity of calcium aluminosilicate, quantity of binder quantity of water, as well as the preservation age of tests pieces. The experimental results give us that the $R_m = 1,5$ is the optimum of our results, and trustworthy mechanical resistances such as the compressive strength is of the order of 22,67 MPa and the tensile strength by bending is 4,4 MPa after 28 days of age.

Keywords: natural Betafo pozzolan, geopolymer, soda silicate, rice ball ash, metakaolin, lime.

Encadreur : Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela

Coordonnées de l'auteur :

Adresse: LOT 0502 B 91 Ampanataovana Antsirabe 110

Téléphone : +261 34 91 261 06

E-mail : mihindraniavo@gmail.com