



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**



**DEPARTEMENT SCIENCES DES MATERIAUX ET DE
METALLURGIE**



***MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'ETUDE APPROFONDIE
OPTION : SCIENCES DES MATERIAUX***

Intitulé :

**ESSAI DE FABRICATION D'UN CIMENT PAR LE
PROCEDE DE GEOPOLYMERISATION**

Présenté par :

RAKOTOARIMANANA Mike Jean Yves

RASOLOFONIRINA Andry Franck

Le 11 décembre 2007

Cinquième promotion – Année 2005/2006



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
- - - - -
DEPARTEMENT SCIENCES DES MATERIAUX ET DE
METALLURGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'ETUDE APPROFONDIE
OPTION : SCIENCES DES MATERIAUX

Intitulé :

ESSAI DE FABRICATION D'UN CIMENT PAR
LE PROCEDE DE GEOPOLYMERISATION

Présenté par :

RAKOTOARIMANANA Mike Jean Yves
RASOLOFONIRINA Andry Franck

Le 11 décembre 2007

Devant le jury composé de :

Dr. RANARIVELO Michel

Président

Pr. RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely

Rapporteur

Pr. RAKOTOMARIA Etienne

Examineur

Pr. ANDRIANARY Philippe

Examineur

Dr. RANDRIANA Richard

Examineur

Cinquième promotion – Année 2005/2006

REMERCIEMENTS

Nous voudrions exprimer nos entières reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudes :

- à Monsieur le Professeur **RAMANANTSIZEHENA** Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
- à Monsieur le Docteur **RANARIVELO** Michel, Chef du Département Sciences des Matériaux et de Métallurgie, pour le grand honneur qu'il nous fait d'avoir accepté de présider cette soutenance de mémoire
- à Monsieur le Professeur **RAKOTOMARIA** Etienne, à Monsieur le Professeur **ANDRIANARY** Philippe, Chef du Département Génie chimique, et à Monsieur le Docteur **RANDRIANA** Richard membres de Jury, qui ont accepté d'examiner ce travail.
- à Monsieur le Professeur **RANAIVONIRIVO** Velomanantsoa Gabriely, notre Directeur de recherche, pour son dévouement et pour les conseils qu'il nous a donnés pour la réalisation ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent également à toutes les équipes du Laboratoire Génie chimique et Laboratoire Sciences des Matériaux pour leurs conseils au cours de nos études, en particulier, les enseignants, les chercheurs et les collègues étudiants.

Sans oublier de remercier du fond du cœur nos familles, en particulier les parents qui nous ont soutenus tout au long de cette étude.

A tous nos chers collègues et amis qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous adressons nos vifs remerciements pour le soutien moral et technique qu'ils ont toujours témoigné à notre égard.

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
CHAPITRE I : LES LIANTS MINÉRAUX.....	3
CHAPITRE II : LE SILICATE ET L'ALUMINE.....	10
CHAPITRE III : L'ARGILE ET LES LATERITES.....	17
CHAPITRE IV : POLYMERES.....	27
CHAPITRE V : GEOPOLYMERES.....	33
CHAPITRE VI : LES SILICATES SOLUBLES.....	39
PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES.....	42
CHAPITRE VII : CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES.....	43
CHAPITRE VIII : ESSAI DE FABRICATION DU LIANT.....	47
CHAPITRE IX : APPLICATIONS AUX MATERIAUX DE CONSTRUCTION	60
CHAPITRE X : EVALUATIONS ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE	66
CONCLUSION	68

Bibliographie

Annexes

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: UTILISATIONS POSSIBLES DES CIMENTS DE LA CLASSE 35 (SOURCE SOMACIM).....	9
FIGURE 2 : LA FORME D'UN SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE	10
FIGURE 3 : FLOWSHEET DE PROCÉDÉ DEVILLE.....	15
FIGURE 4 : FLOWSHEET DE PROCÉDÉ BAYER.....	16
FIGURE 5 : L'ATOME.....	17
FIGURE 6 : LES REPARTITIONS DES ÉLÉMENTS QUI CONSTITUENT LE SOL	18
FIGURE 7 : TRIANGLE DES TEXTURES.....	20
FIGURE 8 : LES RÉACTIONS ENTRE LES ARGILES ET LES MATIÈRES ORGANIQUES.....	20
FIGURE 9 : LES DIFFÉRENTS TYPES DES COPOLYMÈRES.....	32
FIGURE 10 : LA STRUCTURE CHIMIQUE D'UN POLY(SIALATE-SILOXO)..	34
FIGURE 11 : MONOMÈRE DE BASE.....	35
FIGURE 12 : STRUCTURE D'UN PS.....	36
FIGURE 13 : STRUCTURE D'UN PSS.....	36
FIGURE 14 : STRUCTURE D'UN PSDS.....	36
FIGURE 15 : SODIUM POLY(SIALATE) : NA-PS.....	36
FIGURE 16 : POTASSIUM POLY(SIALATE) : K-PS	37
FIGURE 17 : POTASSIUM-POLY(SIALATE-SILOXO) : K-PSS.....	37
FIGURE 18: POTASSIUM-POLY(SIALATE-DISILOXO) : K-PSDS.....	37
FIGURE 19 : CALCIUM-POTASSIUM-POLY(SIALATE-SILOXO) : CA,K-PSS	38
FIGURE 20 : ETUVE.....	48
FIGURE 21 : MORTIER.....	48
FIGURE 22 : SÉRIE DE TAMIS.....	49
FIGURE 23 : PLAQUE CHAUFFANTE.....	49

FIGURE 24 : FOUR DE CALCINATION.....	49
FIGURE 25 : BALANCES.....	50
FIGURE 26 : CENDRE DE BALLE DE RIZ DANS LE FOUR ARTISANAL.....	51
FIGURE 27 : FLOWSHEET DE FABRICATION DE SILICATE DE SODIUM...	52
FIGURE 28 : RENDEMENT D'OBTENTION DE SILICATE DE SODIUM EN FONCTION DE LA QUANTITÉ EN SOUDE.....	52
FIGURE 29 : FLOWSHEET DE FABRICATION DE LA RÉSINE MINÉRALE...	54
FIGURE 30 : EVOLUTION DU RENDEMENT D'OBTENTION DE RÉSINE MINÉRALE EN FONCTION DE LA NORMALITÉ DE LA SOLUTION DE SOUDE.....	55
FIGURE 31 : RENDEMENT D'OBTENTION DE RÉSINE MINÉRALE EN FONCTION DU TEMPS DE CUISSON.....	56
FIGURE 32 : FLOWSHEET DE FABRICATION NOUVEAU PRODUIT.....	57
FIGURE 33 : FLOWSHEET DE LA FABRICATION DE BRIQUE À BASE DE LATÉRITE.....	62
FIGURE 34 : FLOWSHEET DE LA FABRICATION DES AGGLOMÉRÉS À BASE DE SABLE.....	63
FIGURE 35 : APPAREIL « TEST WELL ».....	64
FIGURE 36 : RÉSISTANCE À LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA QUANTITÉ DE LIANT.....	64
FIGURE 37 : AGGLOMÉRÉ STABILISÉ AVEC LE NOUVEAU PRODUIT.....	66

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES CEMENTS (EN % MASSIQUE).....	4
TABLEAU 2: DOMAINE D'UTILISATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE CEMENTS.....	7
TABLEAU 3 : VARIATION DE LA CHALEUR MASSIQUE DE LA SILICE	11
TABLEAU 4 : VARIATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DE LA SILICE	11
TABLEAU 5 : VARIATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DE LA SILICE TRANSPARENTE ET OPAQUE.....	12
TABLEAU 6 : LA CLASSIFICATION TOPOCHIMIQUE DE MACHATSKI-BRAGG ET CELLE TOPOLOGIQUE DE ZOLTAL.....	13
TABLEAU 7 : ÉCHELLE GRANULOMÉTRIQUE DE LA TEXTURE DU SOL... 	19
TABLEAU 8 : TEST D'ESTIMATION DE LA TEXTURE DOMINANTE D'UN SOL	19
TABLEAU 9 : L'AGENCEMENT DES GRAINS DES MINÉRAUX.....	21
TABLEAU 10 : LA NOMENCLATURE UICPA.....	33
TABLEAU 11 : LES APPLICATIONS POSSIBLES SUR LA GÉOPOLYMÈRE... 	39
TABLEAU 12 : LES VALEURS DE DIFFÉRENTS CARACTÈRES PHYSIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES :	46
TABLEAU 13 : LES CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES (EN POURCENTAGE PONDÉRAL).....	46
TABLEAU 14 : RENDEMENT D'OBTENTION DE SILICATE DE SODIUM EN FONCTION DE LA QUANTITÉ DE SOUDE	52
TABLEAU 15 : RENDEMENT D'OBTENTION DE RÉSINE MINÉRALE EN FONCTION DE LA NORMALITÉ DE LA SOLUTION DE SOUDE.....	55
TABLEAU 16 : RENDEMENT D'OBTENTION DE RÉSINE MINÉRALE EN FONCTION DU TEMPS DE CUISSON.....	55

TABLEAU 17 : VALEURS DE TOUS LES PARAMÈTRES FIXES.....	59
TABLEAU 18 : RÉSISTANCE À LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA QUANTITÉ DE LIANT	64
TABLEAU 19 : COMPARAISON DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS

A	: Al_2O_3
ATD	: Analyse thermique différentielle
C	: Chaux
Ca,K-PSS	: Calcium, Potassium-poly(sialate-disiloxo)
CBR	: Cendre de Balles de Riz
CPA	: Ciment Portland Artificiel
DB	: Degré Baumé
DRX	: Diffraction des rayons X
F	: Fe_2O_3
IR	: Infra- rouge
K-PS	: Potassium poly(sialate)
K-PSDS	: Potassium-poly(sialate-disiloxo)
K-PSS	: Potassium-poly(sialate-siloxo)
MA	: Module d'alumine
MC	: Module de chaux
MEB	: Microscopie électronique à balayage
MS	: Module de silice
Na,K-PSS	: Sodium, Potassium poly(sialate-siloxo)
Na-PS	: Sodium poly(sialate)
PF	: Perte au feu
PS	: Polysialate
PSDS	: Poly(sialate-disiloxo)
PSS	: Poly(sialate-siloxo)
Rc	: Résistance à la compression
S	: SiO_2
SIR	: Spectrométrie Infra Rouge

INTRODUCTION

Actuellement, le monde bascule dans les problèmes liés à l'environnement, surtout celui de la pollution atmosphérique. Le rejet en gaz carbonique dû aux activités industrielles est l'une des sources de cette pollution.

Parlant de la fabrication des matériaux, dans le domaine des sciences des matériaux, les chercheurs ont découvert la géosynthèse. Cette technique a conduit ensuite aux phénomènes de polymérisation et de géopolymérisation. La chimie géopolymère est à base de silice et alumine contrairement aux polymères ordinaires qui contiennent du carbone et des composés organiques.

Les applications de la chimie géopolymère conduisent à la fabrication des produits géopolymères à caractère polymérique. Ces produits sont « propres », écologiques et respectent l'environnement.

L'objet de cette étude consiste à fabriquer un nouveau liant par le procédé de la géopolymérisation. L'ouvrage est intitulé : « Essai de fabrication d'un ciment par le procédé de géopolymérisation ».

Le travail se divise en deux parties :

- La première partie est réservée à des études bibliographiques concernant la silice, l'alumine et le kaolin. Dans cette partie, on parlera aussi de la notion du polymère et de la géopolymérisation ainsi que les différents produits obtenus à partir de ce procédé.
- La deuxième partie est consacrée à des études expérimentales. Elle débute par la caractérisation des matières premières, ensuite aux essais de fabrication du ciment géopolymère. On recourt à la suite à la caractérisation des produits obtenus. Et finalement, cette étude est clôturée par les applications du ciment géopolymère aux matériaux de construction et ses avantages économique et écologique.

PARTIE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I: LES LIANTS MINÉRAUX

I.1. DÉFINITION

Les liants minéraux sont des poudres des matériaux minéraux finement broyés qui mélangés avec de l'eau forment une pâte plastique qui fait prise puis durcit. Les principaux liants minéraux sont : les ciments, les chaux, les plâtres, les silicates solubles, le ciment magnésien et le ciment de Sorel. Les liants géopolymères font parties des liants minéraux les plus récemment étudiés.

I.2. LES CEMENTS

Les ciments sont des liants hydrauliques : ils se combinent à l'eau en donnant des composés hydratés stables qui leur confèrent une résistance mécanique. Ils sont constitués essentiellement de silicates et aluminates de calcium. Ils sont obtenus par la cuisson à haute température (1400-1450 °C) de mélanges dosés de calcaire et d'argile et se présentent sous forme de poudres inodores.

Un ciment est caractérisé par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte pure, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196-1). Ces critères constituent les caractéristiques du ciment. Elles sont d'ordre chimique, minéralogique, physique et mécanique.

I.2.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

I.2.1.1. Composition chimique élémentaire

Elle renseigne sur les différents éléments chimiques présents dans le ciment. Les éléments sont déterminés sous forme d'oxydes (et sous forme d'ions pour quelques rares exceptions). On distingue :

- Les quatre principaux oxydes : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3
- Les éléments secondaires : MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , Cl^-

Elle est la base de calcul de la composition minéralogique.

Plusieurs auteurs donnent des compositions chimiques types des ciments Portland; nous pouvons citer R.H BOGUE et PAPADAKIS.

Tableau 1 : Composition chimique moyenne des ciments (en % massique)

Auteurs	Teneur	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
BOGUE	Minimum	20	3.4	2.7	62	1	1	0.8
	Maximum	25	6	4.3	64	3	3	3
PAPADAKIS	Minimum	19	2	1	62	0	1	0.2
	Maximum	25	9	5	67	3	3	1.3

1.2.1.2.Composition minéralogique potentielle - formules de Bogues

➤ Définition

La composition minéralogique d'un ciment est l'ensemble des teneurs en constituants principaux (C₃S, C₂S, C₄AF, et C₃A ou C₂F), ainsi que celles d'autres constituants du clinker de moindre importance, et celles des composés introduits volontairement (constituants principaux, constituants secondaires et régulateurs de prise) ou accidentellement dans le ciment.

La composition minéralogique est déterminante sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des ciments et par conséquent sur leur mode d'utilisation.

La composition minéralogique peut être déduite de la composition chimique en utilisant la « formule de BOGUE ». Dans ce cas elle est dénommée composition minéralogique potentielle.

➤ Formule de BOGUE

Bogue a établi, sur la base de la composition chimique, et sur le principe de la proportion stoechiométrique, pour les différents cas qui peuvent se présenter, des systèmes d'équations qui permettent de calculer la composition minéralogique du ciment. L'ensemble des équations constitue la « formule de Bogue » pour le cas considéré.

Quantité insuffisante de chaux : $MC \leq 90$

Système C₂S – C₃A – C₅A₃ – C₄AF (C₂S ne peut se transformer en C₃S).

$$C_2S = 2.87 SiO_2$$

$$C_3A = 3.61 - 6.74 SiO_2 - 3.81 Al_2O_3 - 2.96 Fe_2O_3$$

$$C_5A_3 = 4.88 SiO_2 + 4.31 Al_2O_3 + 0.92 Fe_2O_3 - 2.61 CaO$$

$$C_4AF = 3.04 Fe_2O_3$$

Quantité suffisante de chaux mais sans excès : $90 < MC \leq 100$

Système C₃S – C₂S – C₃A – C₄AF (Théoriquement il n'y a pas de chaux libre).

$$C_3S = 4.07 CaO - 7.61 SiO_2 - 6.72 Al_2O_3 - 1.43 Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2.87 SiO_2 - 0.75 C_3S$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.69 Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.04 Fe_2O_3$$

Excès de chaux : $MC > 100$

Système $CaO - C_3S - C_3A - C_4AF$ (Théoriquement tout x est transformé en y, et il y a existence de chaux libre)

$$C_3S = 3.80 S$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.69 Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.04 Fe_2O_3$$

$$CaO_L = CaO - CaO_{sat}$$

Quantité suffisante de chaux mais excès en oxyde de fer : $90 < MC \leq 100$ et $MA < 0.638$

Système $C_3S - C_2S - C_2F - C_4AF$ (théoriquement il n'y a pas de chaux libre)

$$C_3S = 4.07 CaO - 7.61 SiO_2 - 4.48 Al_2O_3 - 2.86 Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2.87 SiO_2 - 0.75 C_3S$$

$$C_2F = 1.70 Fe_2O_3 - 2.67 Al_2O_3$$

$$C_4AF = 4.77 Al_2O_3$$

I.2.2. Caractéristiques physiques

I.2.2.1. Couleur

Elle varie avec la composition chimique des matières premières (particulièrement la teneur en oxydes de fer) et la nature des combustibles utilisés pour la fabrication du clinker.

Généralement elle est grise (à cause des cendres des combustibles) mais il existe toute une gamme de colories, et particulièrement les ciments blancs obtenues par l'utilisation de matières premières très pures et de combustibles fluides.

I.2.2.2. Finesse de mouture (NF EN 196-6)

Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains dans un gramme de matériau sous forme de poudre. La notion la plus utilisée est la surface spécifique de BLAINE notée SSB

Elle s'exprime en g/cm^2 . Suivant le type de ciment, cette grandeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 g/cm^2

I.2.2.3. Masse volumique apparente

Appelée aussi « poids au litre du ciment », elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus).

Elle est de l'ordre de 1kg/L en moyenne pour un ciment.

1.2.2.4. Poids spécifique

Il représente la masse de tous les grains de solides contenus dans une unité de volume (vides entre les éléments exclus).

Il varie de 2.9 à 3.15 Kg/L suivant le type de ciment. Un ciment de faible poids spécifiques ($d < 2.9$) indique une forte concentration en produits d'addition ou une mauvaise cuisson pour son clinker.

I.2.3. Début de prise (NF EN 196-3)

C'est le temps au bout duquel le ciment commence à faire prise. Le temps de début de prise est déterminé par l'instant où l'aiguille de VICAT de 1mm² de section ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou 1 heure.

I.2.4. Expansion (NF EN 196-3)

C'est un phénomène qui se passe au cours de la prise et le durcissement du ciment par une augmentation de volume due à un excès de sulfates, de chaux libre ou de magnésie.

Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne soit pas dépassée 10mm sur pâte pour tous les ciments (NF EN 197-1).

I.2.5. Retrait (NF P 15 433)

C'est une diminution de volume pendant le durcissement qui est due à un départ d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation. La mesure est effectuée sur éprouvette prismatique de « mortier normale » 4x4x16 cm.

Le retrait est limité à 8mm/m ou 1mm/m suivant le type de ciment.

I.2.6. Eau de consistance normale

Elle caractérise la quantité d'eau pour obtenir une consistance normale pour un mortier normal (NF EN 196-1).

I.3. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Elles sont définies par la capacité d'un matériau à résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force. La plus importante, pour les ciments, est la résistance à la compression simple. Quelque fois il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à l'usure.

Conformément à la norme NF EN 196-1, la classe de résistance d'un ciment est définie par la valeur minimale de la résistance à la compression simple du mortier normal à 28 jours d'âge et exprimée en MPa.

Selon la norme NF EN 197-1, les ciments sont repartis en trois classes : 32.5, 42.5 et 52.5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours.

I.4. DOMAINE D'UTILISATION

Les ciments tirent leurs principaux domaines d'utilisation dans la confection de mortiers et de bétons ainsi que d'autres produits dérivés.

A partir des différents types de ciment et en fonction de leur usage et de leur dosage, il est possible d'obtenir une infinité de bétons aux caractéristiques pouvant varier en fonction du type de ciment, de la nature et des caractéristiques des granulats, de leur mélange, des colorants, des adjuvants, de la mise en œuvre, des traitements ultérieurs..

Le béton peut s'adapter aux exigences de chaque réalisation par ses performances comme par ses aspects : on peut, à volonté, lui demander une résistance aux chocs, à l'usure, aux agents agressifs, ainsi que des caractéristiques de légèreté ou de lourdeur, d'isolation phonique et/ou thermique, d'étanchéité, une durabilité accrue, un bel aspect. Le béton, application majeur du ciment, fait partie intégrante de notre cadre de vie. Il est présent dans tous les types de construction, qu'il s'agisse de logements, d'écoles, d'hôpitaux, de bureaux, d'usines, d'ateliers, d'espaces commerciales... Il est aussi présent dans de nombreuses applications routières et aussi, et surtout, dans de grands ouvrages d'art...

A titre indicatif, nous donnons dans le tableau et les figures les principales applications des différents types de ciments avec les recommandations y afférents.

Tableau 2: Domaine d'utilisation des différents types de ciments

TYPES	DOMAINE D'UTILISATION	EMPLOIS NON
-------	-----------------------	-------------

		RECOMMANDES
CEMI CEM II / A ou B CEM V/ A ou B	Travaux courants de béton en élévation ou fondation	Présences d'eau agressive
CEM III/A,B ou C	— Travaux de béton armé souterrains — Travaux en eaux agressives — Travaux hydrauliques	— Travaux en élévation — Enduits et chapes — Ouvrages de faible épaisseur
CEM IV/ A ou B	— Construction sous marine et souterraine en béton et béton armé — Etanchéité et résistance à l'eau	— Travaux aériens — Bétonnage par temps froids
CNP	— Travaux à prise rapide : scellement, aveuglement de voies d'eau — Travaux en milieu agressif	— Tout autre emploi
CA	— Doublure des appareils thermiques — Mortier et béton réfractaire — Bétonnage par temps froid — Pieux d'essai en béton armé	— Bétonnage par temps chaud — Travaux de masse — Présence d'eau alcaline — Mélange avec d'autres ciments
CLX	— Travaux de maçonnerie — Présence d'eau quelque peu agressive — Travaux de génie rural — Tous travaux souterrains	— Travaux en élévation — Travaux en béton armé
CM	— Maçonnerie — Agglomérés	Travaux de béton armé
CN	— Petits travaux de bétonnage — Maçonnerie — Enduits — Agglomérés — Présence d'eau quelque peu agressive	Travaux de béton armé
(ES) (PM)	— Travaux de fondation à décoffrage rapide — Présence d'eau agressives	— Présences d'eaux acides — Ouvrages soumis au gel — Mélange avec d'autres ciments
(CP)	— Travaux de béton armé souterrains — Travaux en eaux agressives — Travaux hydrauliques	— Travaux en élévation — Enduits et chapes — Ouvrages de faible épaisseur

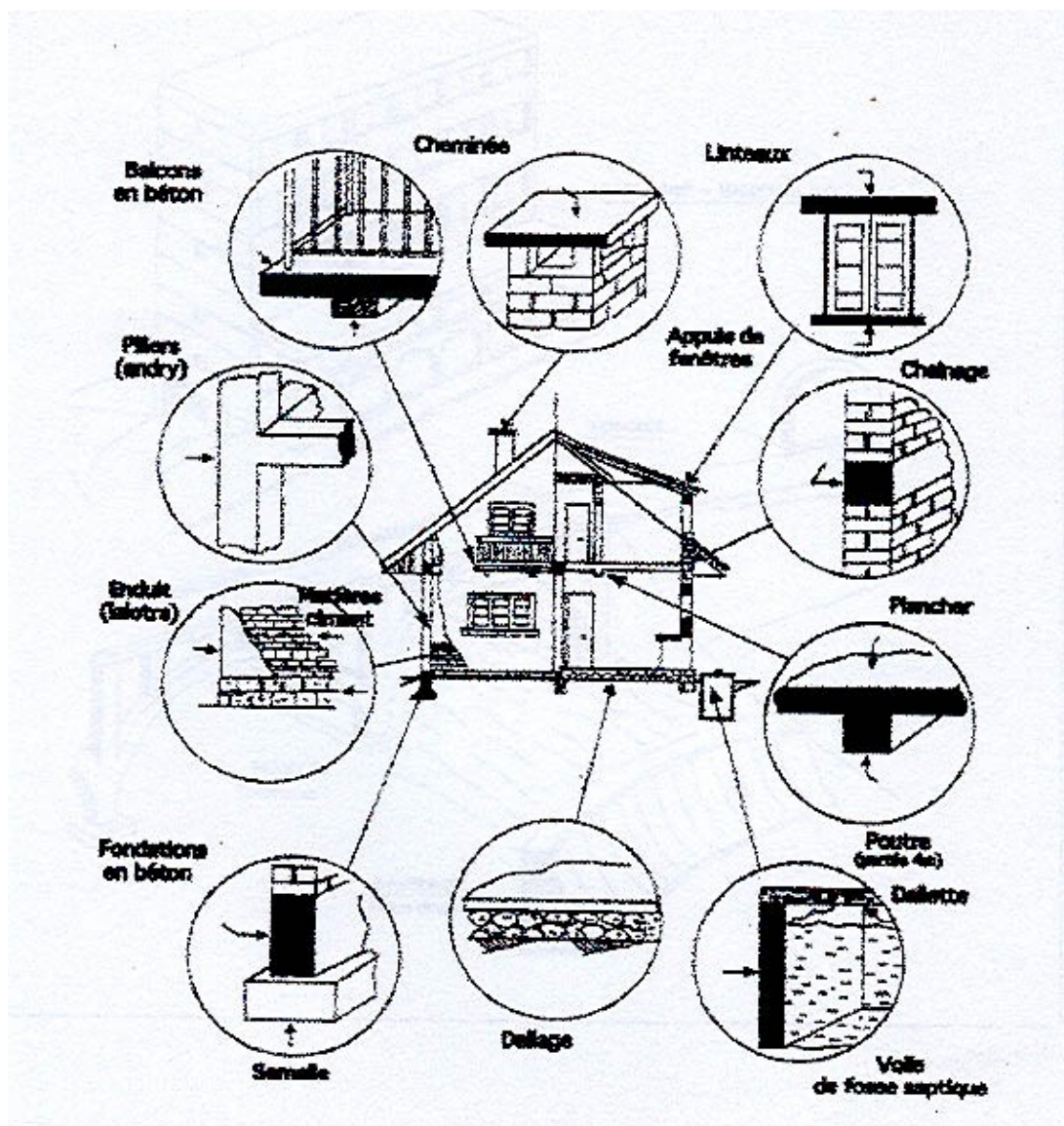


Figure 1: Utilisations possibles des ciments de la classe 35 (source SOMACIM)

CHAPITRE II: LE SILICATE ET L'ALUMINE

II.1. LA SILICE

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

II.1.1. Définition

La silice est le constituant principal du sable. Sous forme de quartz, elle est formée par la combinaison de l'atome de silicium (numéros atomique 14, masse atomique 28) et l'atome d'oxygène (numéros atomique 8, masse atomique 16), sa formule chimique est SiO_2 (dioxyde de silicium).

II.1.2. Formes et structures cristalline

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

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

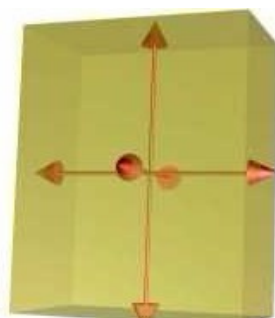


Figure 2 : La forme d'un système rhomboédrique

(Source : Encyclopédie Encarta 2007)

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

II.1.3. Différentes état de la silice

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

- Etat naturel ou anhydre SiO_2 (dioxyde de silicium).
- Etat amorphe ou hydraté sous forme d'opale de formule $\text{SiO}_2 - n\text{H}_2\text{O}$, $n=3$ ou 4

II.1.4. Propriétés de la silice

La silice est corps insoluble dans l'eau, elle résiste à une température très élevée avec une température de fusion 1710°C .

Les tableaux et les courbes ci-dessous montrent les variations de la chaleur massique

Tableau 3 : Variation de la chaleur massique de la silice

TEMPERATURE ($^\circ\text{C}$)	CHALEUR MASSIQUE (Kcal/ $^\circ\text{C}$)
100	0,185
200	0,2006
250	0,2068
400	0,2229
600	0,2385
800	0,2506
1000	0,2584
1200	0,2621
1400	0,2691
1600	0,2777

Source : LUCEZEAU – Technique d'ingénieur

La conductivité thermique distingue les matériaux isolants caractérisés par une faible conductivité (inférieur à $0.17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), les matériaux thermiquement conducteurs ($12 < \lambda < 415$) et les matériaux à caractère thermique non spécifique (valeurs intermédiaires de λ). Les tableaux en bas montrent les différentes valeurs de conductivités thermiques suivant les températures correspondantes. [20]

Tableau 4 : Variation de la conductivité thermique de la silice

T ($^\circ\text{C}$)	SILICE FONDUE
104	0,00412
214	0,00458
398	0,00602
488	0,00835
691	0,0131
819	0,0185

Source : KNAPP- Technique de l'ingénieur

Tableau 5 : Variation de la conductivité thermique de la silice transparente et opaque

TEMPERATURE	SILICE TRANSPARENTE	SILICE OPAQUE
20	1,19	0,935
100	1,26	
200	1,33	
300	1,44	
400	1,58	
900	2,31	

Source :
HERAEUS- Technique d'ingénieur

II.2. LES SILICATES

Il est à noter que les silicates tels les argiles, constituent 95 % des roches de la croûte terrestre. Ils sont des sels dérivant de la silice (SiO_2).

II.2.1. Définition

Les silicates, sont des minéraux dont le squelette est essentiellement formés par des tétraèdres de Silicium et d'Oxygène additionnés d'aluminium et autres éléments. Les sommets sont occupés par les ions négatifs (O^{2-}) et au centre desquels se trouvent les ions positifs (Si^{4+} , Al^{3+} , ...)

L'indice de coordinence d'un ion positif par rapport à l'oxygène est le nombre d'ions d'oxygène qui l'entoure.

II.2.2. Les différents types de silicates et structures

On distingue suivant le type d'association entre les groupements tétraédriques. En général, on trouve six types de silicate :

Nésosilicates (tétraèdre isolé),

Sorosilicates (tétraèdre en paire),

Inosilicates (en chaîne simple : Pyroxène, et en chaîne double : amphibole),

Cyclosilicates (association de six tétraèdres),

Phyllosilicates (tétraèdre en feuillet),

Tertosilicates (tétraèdres associés dans les trois plans de l'espace)

II.2.3. Classifications des silicates

Ils peuvent être classés selon plusieurs critères, mais les deux classifications les plus employées en minéralogie sont basées sur l'enchaînement des tétraèdres

II.2.3.1. La classification topochimique

D'après Machatski-Bragg, la classification est basé sur l'enchaînement des tétraèdres où le silicium et l'aluminium peuvent donner lieu à substitution isomorphe ; les tétraèdres où seul l'aluminium est présent sont considérés hétéro-tétraèdres;

II.2.3.2. La classification topologique

Zoltai a trouvé de faire classer à nouveau le silicate, elle est basée sur l'enchaînement des tétraèdres centrés par n'importe quel cation.

Le tableau suivant donne les principales différences entre la classification topochimique de Machatski-Bragg et celle topologique de Zoltai.

Tableau 6 : La classification topochimique de Machatski-Bragg et celle topologique de Zoltai.

Exemples de différence entre les deux classifications des aluminosilicates. [4], [6] et [8] indiquent le nombre de coordination des cations

Minéral	formule	Classification topochimique (Machatski-Bragg)	Classification topologique (Zoltai)	Hétéro-tétraèdre(s)
Pétalite	[4]Li[4]Al[4]SiO ₄	phyllo	tecto	Al, Li
α-eucryptite	[4]Li[4]Al[4]SiO ₄	neso	tecto	Al, Li
Phénacite	[4]Be ₂ [4]SiO ₄	neso	tecto	Be
Willemite	[4]Zn ₂ [4]SiO ₄	neso	tecto	Zn
Béryl	[6]Al ₂ [4]Be ₃ [4]Si ₆ O ₁₈	cyclo	tecto	Be
Cordiérite	[6]Mg ₂ [4]Al ₃ [4](AlSi ₅)O ₁₈	cyclo	tecto	Al
Hémimorphite (Calamine)	[4]Zn ₄ [4]Si ₂ O ₇ (OH) ₂ (H ₂ O)	soro	tecto	Zn
Mélilite	[8]CaNa[4]Al[4]Si ₂ O ₇	soro	phyllo	Al
Sillimanite	[6]Al[4]Al[4]SiO ₅	neso	soro	Al

Source : wikipedia

II.2.4. Minéraux de silicate [16]

Selon le nombre de couches octaédriques et tétraédriques, on distingue trois groupes de minéraux

Les minéraux 1/1 à une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres : l'équidistance caractéristique est voisine de 7Å.

Les minéraux 2/1 à une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques.

Les minéraux 2/1/1 à une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques et un interfoliaire constitué par une couche d'octaèdres.

II.3. L'ALUMINE

II.3.1. Généralités

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

II.3.2. Définition

L'alumine est obtenue par la combinaison de l'atome d'aluminium avec l'oxygène, sa formule chimique est Al_2O_3 et nommé oxyde d'aluminium.

II.3.3. Procédés de fabrication de l'alumine

On donne deux procédés de fabrication de l'alumine : [le procédé Deville](#) et le [procédé Bayer](#).

II.3.3.1. [Le procédé Deville](#)

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

La première opération consiste à calciner à 1 200°C un mélange de bauxite broyé avec du carbonate de sodium et un peu de charbon. L'alumine se transforme en aluminat de sodium. L'oxyde de fer reste inchangé et la silice forme un silicate double. Par addition de soude (NaOH), il y a dissolution de l'aluminat de sodium alors que les autres composés restent sous forme solide. La quantité de soude utilisée dépend de la quantité de silice contenue dans le minerai. Par filtration, on sépare la liqueur d'aluminat de sodium des autres corps. On fait barboter du dioxyde de carbone gazeux dans la liqueur afin de précipiter de l'alumine hydratée et de reconstituer du carbonate de sodium. Ce dernier peut être réutilisé. L'alumine hydratée est ensuite calcinée pour obtenir de l'alumine.

Voici le flowsheet de [procédé Deville](#)

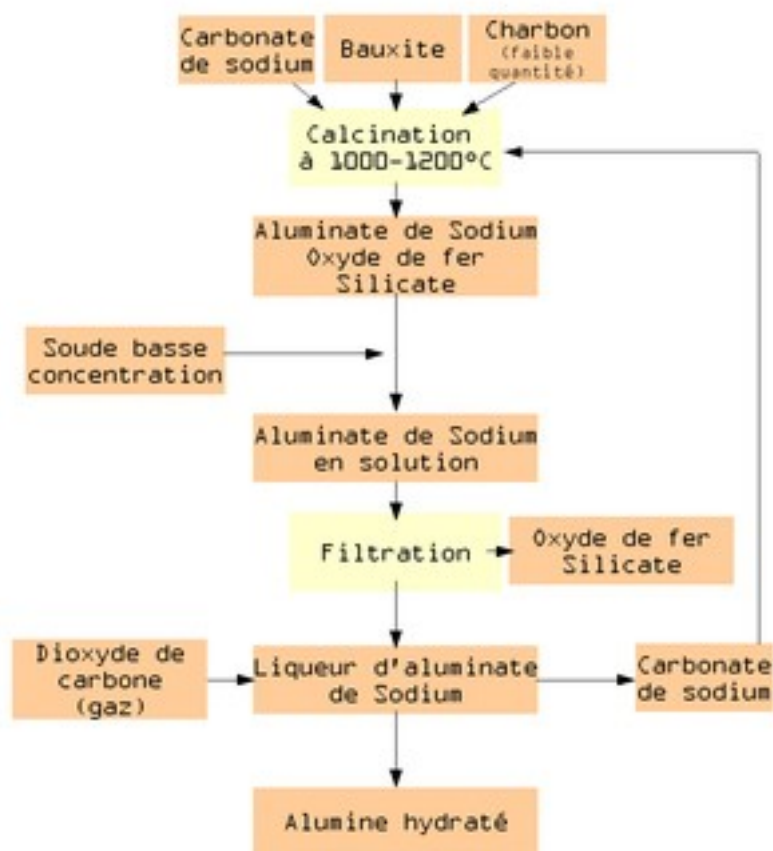


Figure 3 : Flowsheet de [procédé Deville](#)

II.3.3.2. Le [procédé Bayer](#)

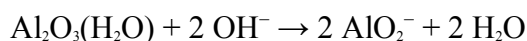
Il est basé sur la dissolution de l'alumine provenant de la bauxite par de la soude. Dans la bauxite, l'alumine est présente sous forme d'hydrate : gibbsite : trihydrate, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_3$ et boehmite ou diaspre : monohydrate, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})$.

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



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

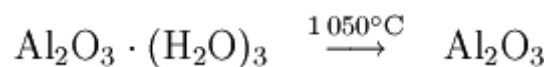
Les réactions de dissolution sont les suivantes :



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

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

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



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

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

On donne ci-après le flowsheet de [procédé Bayer](#)

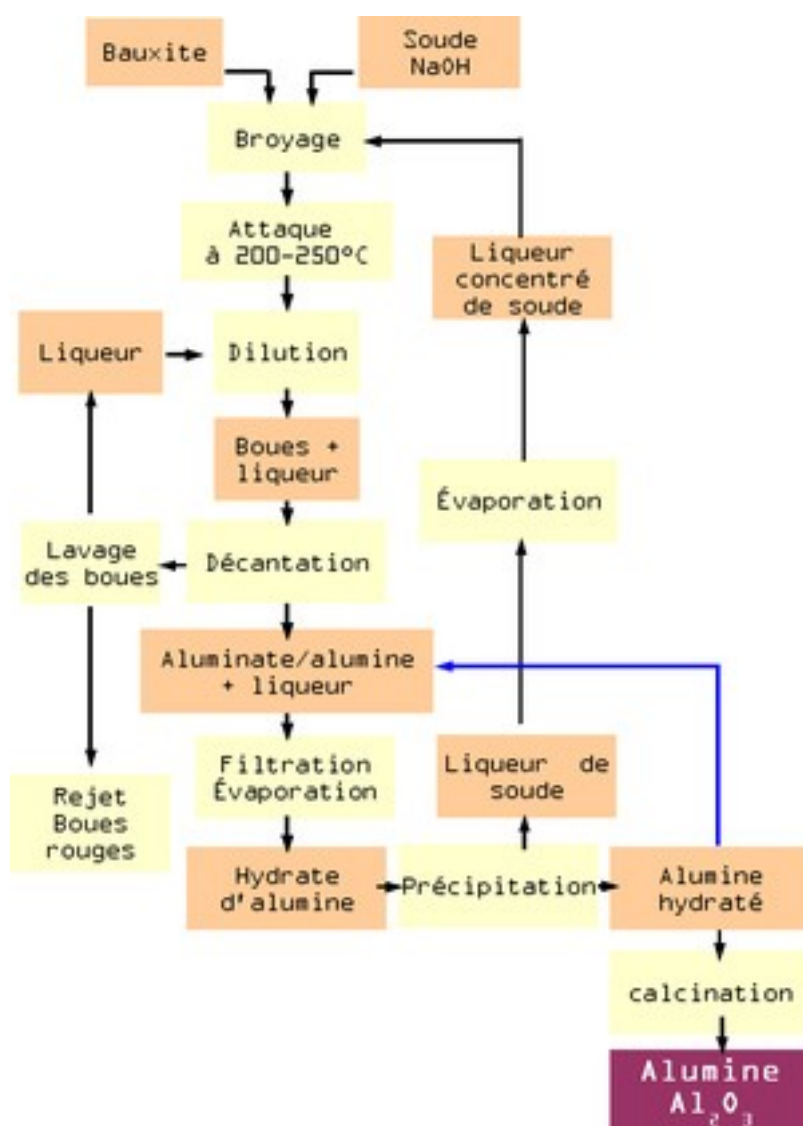


Figure 4 : Flowsheet de [procédé Bayer](#)

CHAPITRE III : L'ARGILE ET LES LATERITES

III.1. LE SOL

III.1.1. Définition

Le sol est un système complexe formé de très nombreux composants minéraux et organiques soumis à des phénomènes physiques, chimiques et biologiques en constante interaction.

III.1.2. Compositions des sols

III.1.2.1. Compositions minérales

Le sol est constitué par de plusieurs roches du plus fins au plus gros entre autres des argiles, des limons, des sables, lesquels constituent la fraction minérale d'un sol. Toutes les roches sont formées par des atomes ou des ions comme les anions phosphate, (PO_4^{3-}), sulfate (SO_4^{2-}) et nitrate (NO_3^-). Dans le sol, de nombreux phénomènes chimiques interviennent, telles l'hydrolyse et la dissolution des carbonates. Ils dépendent des conditions de pH, d'humidité, de température, d'oxygénation du milieu, ainsi que de la diversité des êtres vivants. Des molécules de toute nature vont échanger et mettre en commun, des [électrons](#), en quantité plus ou moins grande et plus ou moins rapidement.

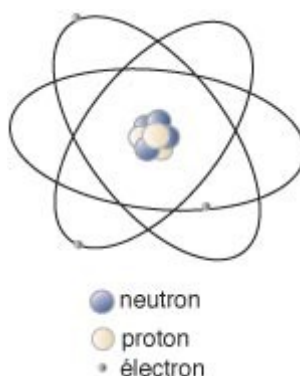


Figure 5 : L'atome

III.1.2.2. Des organismes vivants

Ces matériaux peuvent avoir plusieurs origines : racines, champignons, invertébrés, quelques vertébrés et une multitude de micro-organismes qui transforment la matière organique en matière minérale.

III.1.2.3. De l'humus

L'humus se trouve à la subsurface de la terre. Elle provient de la matière organique en cours de minéralisation essentiellement issue des feuilles mortes, cadavres, excréments.

III.1.3. Evolution d'un sol

Les sols se forment sur des milliers d'années. Leur évolution dépend notamment du relief, de facteurs climatiques, des organismes qui y vivent, de la nature de la roche-mère du sous-sol et des activités humaines. Ainsi, selon les aires biogéographiques, les sols évoluent plus ou moins vite vers une roche tendre (latérites, argile, limons,...). Lors de son évolution, la roche-mère sera altérée dans sa partie supérieure par des réactions physiques, chimiques et biochimiques, ce qui l'éloignera progressivement de la surface. On distingue ainsi dans le monde de nombreux types de sols plus ou moins durs et plus ou moins altérés. Parmi eux, on compte notamment les sols peu évolués et caractérisés par leur richesse en alumine ,

La figure ci-dessous évoque les repartitions des éléments qui constituent le sol :



Figure 6 : Les repartitions des éléments qui constituent le sol

Le sol est d'abord caractérisé par une texture et une structure qui vont fortement conditionner ses propriétés physiques et chimiques, notamment celles liées à l'eau.

III.1.1. La texture

Elle est la résultante du mélange argile, sable, limon, dont les pourcentages varient d'un sol à l'autre. Le tableau suivant donne les différentes dimensions de sol.

Tableau 7 : Échelle granulométrique de la texture du sol

Terre fine					Terre grossière	
Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers	Cailloux
< 2 μ m	2 μ m à 20 μ m	20 μ m à 50 μ m	50 μ m à 200 μ m	200 μ m à 2 mm	2 mm à 20 mm	> 20 mm

Source : wikipedia

La connaissance de la granulométrie nous permet de classer la nature du sol, les éléments qui ont le pourcentage le plus élevé déterminent les caractéristiques et les textures de la terre.

Le tableau ci-dessous illustre l'estimation de la texture dominante d'un sol.

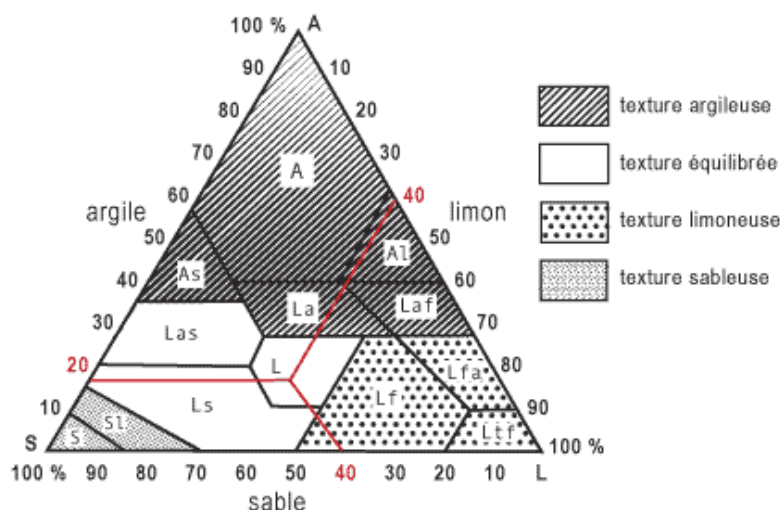
Tableau 8 : Test d'estimation de la texture dominante d'un sol

TEST	RÉSULTAT	CONSÉQUENCE SUR LA TEXTURE
Toucher de la terre sèche	Soyeux ou talqueux	Abondance de limons fins
	Savonneux	Abondance de limons grossiers
	Rugueux	Sables grossiers
Réalisation d'un boudin de terre humide	Possible	A > 10 %
	Impossible	A < 10 %
Réalisation d'un anneau avec le boudin de terre	Fissuration avant 1/2 fermetures de l'anneau	L > A A < 30 %
	Fissuration au 3/4 de la fermeture	L < A A < 30 %
	Anneau réalisable	A > 30 %

Source : A. Fleury et B. Fournier, INA P.G.

Pour déterminer plus finement sa texture, on évalue pour cet échantillon de sol la teneur en sable, en argile et limon. Ensuite on utilise un diagramme qui permet de déterminer la classe texturale du sol.

La figure suivante donne la texture d'un sol selon la composition:



A : argileux	L : limoneux
As : argilo-sableux	Ls : limono-sableux
Al : argilo-limoneux	Lfa : limoneux fins argileux
La : limono-argileux	Lf : limoneux fins
Laf : limono-argileux fins	Ltf : limoneux très fins
Las : Limono-argileux sableux	Sl : sablo-limoneux
	S : sableux

Figure 7 : Triangle des textures

III.1.4. Minéralisation

Dans le sol, il y a des échanges d'atomes pour avoir des nouveaux corps ou pour améliorer les éléments qui s'y trouvent déjà, par des réactions chimiques ou d'autres phénomènes. Le schéma ci-dessous montre les réactions qui se passent entre les argiles et les matières organiques :

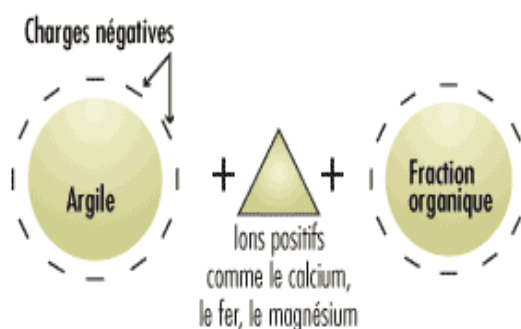


Figure 8 : Les réactions entre les argiles et les matières organiques

III.1.5. La structure

Elle correspond à la façon dont les minéraux sont agencés.

L'agencement des grains, appelés agrégats est suffisamment espacé pour permettre à la fois une infiltration et une rétention suffisante de l'eau nécessaire à la réaction chimique ; c'est la Structure fragmentaire du sol.

Tableau 9 : L'agencement des grains des minéraux

ASPECT DES AGRÉGATS	STRUCTURE	POROSITÉ	PÉNÉTRATION RACINAIRE
	Polyédrique	Moyenne	Variable
	Grenue	Élevée	Bonne
	Grumeuleuse	Très élevée	Très bonne
	Lamellaire	Faible	Mauvaise, racines déviées
	Prismatique	Faible	Racines localisées sur la surface des prismes

III.2. L'ARGILE

III.2.1. Généralités

L'argile, roche plastique, imperméable et résistante quand elle est imbibée d'eau, qui durcit à la cuisson de façon irréversible. Les argiles, souvent employées dans l'industrie, sont nécessaires à la fabrication des matériaux notamment dans le domaine du génie civil tels que la brique, le parpaing, ...

III.2.2. Définition

L'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllosilicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite) qui explique leurs qualités d'absorption. L'argile est aussi un matériau de [granulométrie](#) inférieure à deux [micromètres](#).

Les terres argileuses sont composées d'éléments très fins, provenant de la dégradation mécanique et chimique de roches préexistantes (en particulier les micas et les [feldspaths](#)). On trouve les bancs d'argile dans les sédiments déposés par l'érosion des eaux depuis l'ère [Tertiaire](#), au pied des montagnes et dans les grandes vallées fluviales.

III.2.3. Classifications de l'argile

On les classe en trois grandes familles selon l'épaisseur des feuillets (0,7 ou 1 ou 1,4 nm), qui correspondent à un nombre de couches d'oxydes tétraédriques (Si) et octaédriques (Al, Ni, Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn, Na, K, ...).

III.2.4. Minéraux dans l'argile

Les minéraux argileux contenus dans le sol influent sur les propriétés mécaniques du matériau. Les minéraux les plus communs dans les argiles sont :

- la kaolinite (0,7 nm), de formule $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ est blanchâtre, pâteuse et grasse ; Elle est constituée par la superposition d'une couche tétraédrique et octaédrique. La couche tétraédrique est formée par la liaison SiO_4 dans un arrangement hexagonal. La couche octaédrique est formée par des octaèdre de $\text{AlO}_2(\text{OH})_4$

- la montmorillonite, dont une forme, a pour formule $\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_{5/3}\text{Mg}_{1/3}\text{Na}_{1/3}(\text{OH})_2$, elle a des propriétés colloïdales (plastifiant).Cependant, plusieurs couches d'eau peuvent prendre place entre deux feuillets de montmorillonite et par conséquent la séparation entre deux feuillets peut aller de 0,96 nm à la séparation complète ;

Exemple l'illite, (1 nm) de formule $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ est la plus répandue, c'est elle qui sert à la fabrication des objets en terre cuite. La structure des illites est proche de celle des [micas](#) mais en diffère par le degré de substitution Si / Al (inférieur dans l'illite), la présence de potassium (inférieure dans l'illite) et pour un certain degré de désordre dans l'empilement des feuillets.

- les [vermiculites](#) (environ 1,4 nm, comme les [chlorites](#), qui baisse à 1 nm suite à un réchauffement). Le feuillet a une composition proche du [talc](#) ; toutefois, dans le talc il est neutre,

tandis que dans les vermiculites il possède une charge négative, comme dans les chlorites. Cette charge négative est compensée par des ions magnésium hydratés placés entre les feuillets. L'eau d'hydratation des ions magnésium dans la région interfoliaire est éliminée par réchauffement, ce qu'explique la diminution de la période.

À noter que ces minéraux ne se rencontrent pas isolément, mais dans des roches composées d'un mélange de minéraux typiques des argiles et d'autres minéraux ou matériaux associés (sable, oxyde de fer, calcaire, débris végétaux).

III.2.5. Caractérisation de l'argile

Une des manières de reconnaître les argiles est l'analyse par [diffraction de rayons X](#). Une simple analyse de diffraction ne donne pas de résultats intéressants : les phases cristallines en elles-mêmes ne sont pas différentes d'une argile à l'autre et du fait de la structure en feuillets. Pour différencier les argiles, on effectue divers traitements visant à modifier l'espace inter-feuillet : chauffage, acidification... En regardant l'évolution des pics de diffraction aux faibles angles selon le traitement, on peut reconnaître l'argile. Cette analyse se fait sur une fraction granulométrique donnée, obtenue en mettant l'argile en suspension dans l'eau, en agitant et en prélevant à une profondeur donnée après un temps de repos donné.

Les particules d'argile ne sont nullement responsables de la couleur du sol. La couleur rouge, orange, jaune, vert, bleu d'un sol argileux est due à l'état du [fer](#) dans le sol. Lorsque le sol est de couleur tendant vers le blanc, c'est que cet élément a été dissous et évacué hors du profil.

III.3. LE KAOLIN

III.3.1. Définition

Ethimologiquement, le mot kaolin provient du mot chinois « kaoling » colline élevée nom du lieu où l'on extrait le kaolin pour la première fois. C'est le plus commun d'un groupe de silicates hydratés d'aluminium qui résultent de la décomposition de silicate d'aluminium comme le feldspath ou la néphéline. La composante essentielle dans le kaolin est la kaolinite.

La kaolinite pure correspond à la formule chimique $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ et apparaît en masse argileuse blanche, des impuretés peuvent lui donner des couleurs ou teintes variées.

III.3.2. Propriétés et caractéristiques du kaolin

III.3.2.1. Propriétés physiques

Le kaolin pur, est de couleur blanche ou blanchâtre. Néanmoins, il peut être diversement coloré : jaunâtre, rougeâtre, grisâtre, ... en raison des impuretés constitués principalement par des micas, quartz, et des hydroxydes de fer. Il est opaque et sa température de fusion est d'environ 1750°C. On peut dire alors que le kaolin est un matériau réfractaire.

III.3.2.2. Propriétés chimiques

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

Comme toutes les argiles, le kaolin présente des propriétés absorbantes et adsorbantes :

- Absorption d'eau
- Absorption de matière grasse.

III.3.2.3. Propriétés mécaniques

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

III.4. LES LATERITES

III.4.1. Introduction

On trouve des latérites surtout en zone intertropical. Elles recouvrent 33% des continents.

Les sols latéritiques sont des sols maigres, lessivés et appauvris en éléments nutritifs fertilisants (Ca, Mg, K, Na). Lors de l'altération, les cations peu mobiles restent sur place (Fe^{3+} , Al^{3+}). Il s'agit aussi d'une réserve importante d'aquifère, les sols latéritiques filtrant environ 50% de l'écoulement global.

III.4.2. Définition

La latérite vient du mot latin «*later*» qui signifie brique. Elle est une [roche](#) rouge ou brune. Elle constitue aussi un produit commun de l'altération des roches sous les climats tropicaux. Un sens ancien désigne une latérite comme un matériau induré ou d'indurant à l'air, utilisé pour fabriquer des maisons dans les régions tropicales. Le sens large désigne l'ensemble des matériaux, meubles ou indurés, riches en [hydroxydes](#) de fer ou d'aluminium, constituant des sols, des horizons superficiels, des horizons profonds de [profil d'altération](#).

III.4.3. Minéraux des latérites

On trouve les minéraux secondaires néoformés suivants :

- De fer : [limonite](#), [ferrihydrite](#), [hématite](#)
- D'aluminium : [gibbsite](#), [clachite](#), [boehmite](#), [corindon](#), [claspore](#)
- De titane : [anatase](#)
- De manganèse : [pyrolusite](#), [manganite](#)
- De silicium : [allophane](#), [imogolite](#), [halloysite](#), [kaolinite](#), [ferrikaolinite](#)

Il ne faut pas oublier de citer les solutions solides obtenues par mélange de pôles : goethite alumineuse, hématite alumineuse... Certains minéraux primaires très peu altérables peuvent être hérités : [quartz](#), [rutil](#), [zircon](#), [or](#) natif...

III.4.4. Caractéristiques des latérites

Un profil d'altération typique des massifs latéritiques contient les grands ensembles suivants :

- Cuirasse et carapace : formation massive à oxydes de fer et d'aluminium, quartz, kaolinite
- Formation tachetée : formation nodulaire à oxydes de fer et d'aluminium, quartz, kaolinite
- [Saprolithe](#) fine ou lithomarge : zone saturée d'eau à quartz, marquée par la dominance des minéraux secondaires d'altération
- [Saprolithe](#) grossière ou arène : formation dominée par la nature de la roche mère, possédant des fragments de roche et des minéraux primaires en grains séparés
- Roche mère silico-alumineuse.

III.4.5. Le développement des latérites

Diverses visions peuvent expliquer le développement de sols latéritiques :

Résidus : Les latérites se développeraient sur une roche mère saine après une très longue période d'altération et d'exposition à un climat aride. Un tel développement nécessiterait une très grande quantité de roche pour produire assez de fer résiduel, sous forme d'oxydes, comme l'hématite ou la goethite. Cette vision est la plus couramment reconnue.

- Horizon de sol : cette vision consiste en la précipitation directe au dessus de la zone de fluctuation de la nappe d'eau. Cependant, cette théorie n'existe pas le cas des latérites très épaisses.

- Dépôt : un dépôt de fer et d'aluminium, à partir d'ions en solution. Ceci serait valable pour les latérites béchiques ou constituées d'agrégats [pisolithiques](#), mais n'expliquerait pas le cas des latérites massives

- Nappes influencées par les conditions de surface : les latérites se formeraient par altération de la roche mère, du fait d'eaux acides issues de marécages, ou enrichies en acides organiques par l'action des végétaux.

III.4.6. Différents profils latéritiques

III.4.6.1. Types de sols

Trois grands types de sols constituent les horizons latéritiques : les sols ferrigineux, les sols ferralitiques, les ferrisols.

III.4.6.2. Carapaces

La carapace est la partie du profil d'altération située juste en dessous de la cuirasse, en constitue une zone de prélude au cuirassement. La carapace est une formation tachetée. Les zones claires sont plus riches en quartz, et les taches de rubéfaction sont dues à la kaolinite. Le fond matriciel peut être jaune, rose ou bien rouge. Au fur et à mesure que l'on monte dans le profil d'altération, les taches noduleuses se forment des concrétions ferrugineuses.

III.4.6.3. Cuirasses

Le sommet du profil est très enrichi en fer (jusqu'à 75% de Fe_2O_3), et très induré. La transition entre carapace et cuirasse se fait par augmentation du nombre et de la taille des nodules, de l'incrustation de fer sur les parois, ainsi que la diminution des volumes vides, et des plages argileuses à goethite. La couleur du fond matriciel vire au rouge du fer de la concentration en fer.

Les cuirasses, directement soumises à l'érosion, peuvent se dégrader. Cette dégradation se marque par une augmentation de la taille des vides et une individualisation des nodules marquée.

La dégradation des nodules donne :

Des granules : par dissolution sélective de l'hématite

Des pisolithes : dégradation par hydratation

Des gravillons : séparation du fond matriciel.

CHAPITRE IV : POLYMERES

IV.1. DÉFINITION

Les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base. Le nombre moyen de ces unités de base, nommées monomères, dans les molécules finales appelées polymères, est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères; lorsqu'il est faible, le composé est une oligomère. Les homopolymères ne sont constitués que d'un seul type de monomère dont le motif se répète dans la molécule; les copolymères sont constitués de plusieurs types de monomères.

Certains composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose ou la lignine du bois, la chitine, ainsi que le latex et les résines naturelles, sont des polymères, ainsi que de nombreux matériaux synthétiques, comme les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs. Des composés tels que le verre, les silicates ou le graphite, peuvent être considérés, au sens large, comme des polymères.

IV.2. POLYMÉRISATION

Le terme polymérisation désigne l'ensemble des procédés de formation de chaînes à partir de molécules plus petites appelée monomères. Il existe deux types de polymérisation : la polycondensation et la polymérisation en chaîne, communément appelée polymérisation

IV.2.1. Polycondensation

Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes. Les polyamides, les polyesters et certains polyuréthanes sont des exemples typiques de polymères obtenus par polycondensation. Dans ce cas, les réactions qui démarrent la polymérisation, appelées réactions d'initiation, sont de type ionique. Par un choix judicieux du groupement ionique initiateur, on peut dans certains cas obtenir une réaction stéréospécifique, c'est-à-dire que la disposition des monomères dans le polymère n'est pas aléatoire, mais au contraire orientée. C'est la seule façon d'obtenir des polymères semi-cristallins aux propriétés mécaniques particulières, et qui ont, par exemple, donné lieu à des applications dans le domaine des élastomères de synthèse.

IV.2.2. Polymérisations en chaîne

Dans la polymérisation en chaîne, les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie : le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, l'alcool polyvinylique et le polytétrafluoroéthylène (Téflon) sont des exemples de polymères obtenus par polymérisation en chaîne. Comme toute réaction en chaîne, cette polymérisation comporte les étapes suivantes :

- l'amorçage : c'est la formation des centres actifs à partir du monomère
- la propagation : c'est la croissance des chaînes de polymère par additions successives.
- la terminaison : c'est la destruction du centre actif et interruption de la croissance des chaînes.

➤ ***Polymérisation radicalaire***

La polymérisation peut être radicalaire, cationique ou anionique selon la nature de l'espèce active. Dans le cas des polymérisations radicalaires, les plus courantes, l'amorçage s'effectue sous l'action de la chaleur, par irradiation ou par des molécules spécifiques. Les espèces actives sont des radicaux libres. Le polymère ainsi obtenu est dit atactique où il a une structure totalement désorganisée, ou amorphe.

➤ ***Polymérisation par addition***

En 1983, on a découvert une nouvelle méthode de polymérisation par addition : la polymérisation par transfert de groupe, ou télomérisation. Un groupe activant dans la molécule initiant le procédé établit une réaction de transfert aux extrémités des chaînes en croissance, et limite ainsi la longueur des chaînes. La télomérisation est par exemple utilisée pour synthétiser les plastiques acryliques.

IV.3. RÉACTION DE POLYMÉRISATION

Il existe quatre techniques principales de mise en oeuvre des réactions de polymérisation :

- les polymérisations en solution,
- les polymérisations en masse,
- les polymérisations en suspension,
- et les polymérisations en émulsion.

IV.3.1. Différents types de réaction des polymères

➤ ***Polymères linéaires***

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin.

Le polyéthylène (PE), de formule $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$, où n dépend des conditions de préparation, la valeur de n peut atteindre plusieurs centaines de milliers, l'alcool polyvinylique et le chlorure de polyvinyle (PVC) sont des exemples types.

➤ ***Polymères ramifiés***

Dans les polymères ramifiés, certaines chaînes latérales sont liées à la chaîne principale. Les ramifications peuvent être dues à des impuretés ou à la présence de monomères ayant plusieurs groupes réactifs. Les polymères formés de monomères présentant des ramifications, comme le polystyrène et le polypropylène, ne sont pas considérés comme des polymères ramifiés.

➤ ***Polymères tridimensionnels***

Dans les polymères tridimensionnels, plusieurs chaînes principales sont reliées à des chaînes latérales au niveau de "noeuds". Avec un faible degré de coliaisons latérales, un réseau lâche est obtenu et le polymère reste essentiellement bidimensionnel. Dans les polymères tridimensionnels lamellaires, la cohésion reste faible dans certaines directions de l'espace. Certains de ces composés peuvent se trouver sous forme de cristaux liquides, de liants pour les colles, peintures ou vernis.

Avec des degrés élevés de coliaisons latérales, on obtient une structure fortement tridimensionnelle. Parmi ces derniers composés, on peut citer les produits fibreux, les élastomères, les matières plastiques et les thermoplastiques, les résines, certains revêtements de surface. Par exemple, dans le caoutchouc vulcanisé, les liaisons latérales sont formées par des atomes de soufre. Les plastiques thermostables comme l'ébonite ou les résines thermodurcissables sont des exemples de polymères tridimensionnels; leur structure est tellement rigide que, par chauffage, ils se décomposent ou brûlent, mais ne ramollissent pas.

D'une façon générale, en jouant sur le degré de polymérisation, la composition chimique des monomères et les transformations thermiques, on peut obtenir toute une gamme de produits depuis l'état presque liquide à l'état de solide semi-cristallin.

IV.3.2. Caractéristiques

Un polymère donné n'est pas un corps pur, mais un mélange de macromolécules de différentes tailles, et de compositions variées si l'on a plusieurs monomères différents. Ainsi, pour caractériser un polymère, on utilise des données statistiques : composition chimique moyenne, masse moléculaire moyenne, degré de polymérisation, structure (amorphe ou semi-cristallin), indice de polydispersité (dispersion en masse autour de la masse moyenne).

IV.3.2.1. Comportements mécaniques et thermiques

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent fortement de la température. À basse température, la plupart des polymères présentent un état vitreux : ils sont rigides. Lorsque la température augmente, ils passent par un état de transition : pour une plage de températures spécifique du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit. Cette plage de températures est appelée température de transition vitreuse. À une température plus élevée, le polymère passe par un plateau caoutchoutique : son comportement est visco-élastique. À cet état, les forces de Van der Waals et la réticulation entre chaînes servent de force de rappel lorsque l'on déforme le matériau (élasticité). Enfin, lorsque l'on élève la température de polymères peu réticulés, on peut assister à une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques. Certains polymères présentent également un point de fusion, supérieur à la température de transition vitreuse.

Les polymères étant utilisés la plupart du temps à température ambiante, on dit qu'ils sont élastomères si leur température de transition vitreuse est inférieure à la température ambiante qui a un comportement caoutchoutique; ils sont plastomères c'est-à-dire qui a un comportement rigide dans l'autre cas.

La nature du polymère, sa masse moléculaire moyenne, son degré de polymérisation, sa structure influent énormément sur la largeur de ces différents domaines et sur leur seuil d'apparition en fonction du temps ou de la température. Les propriétés mécaniques des polymères sont étudiées en rhéologie.

IV.3.2.2. Structure

Les macromolécules constituant les polymères sont des molécules "géantes" d'où le préfixe "macro-", résultant de l'enchaînement covalent de "motifs de répétition" identiques ou différents les uns des autres. La masse molaire de ces molécules dépasse souvent 10 000 g/mol, à comparer par exemple aux 18 g/mol de la molécule d'eau. Les liaisons covalentes constituant le squelette macromoléculaire sont le plus souvent des liaisons carbone-carbone (cas du

[polyéthylène](#), du [polypropylène](#)...), mais peuvent également résulter de la liaison d'atomes de carbone avec d'autres atomes, notamment l'oxygène (cas des [polyéthers](#) et des [polyesters](#)) ou l'azote (cas des [polyamides](#)). Il existe également des polymères pour lesquels l'enchaînement résulte de liaisons ne comportant pas d'atomes de carbone ([polysilanes](#), [polysiloxanes](#), etc...)

Cet enchaînement de motifs répétés présente chez les polymères les plus simples une structure linéaire, un peu comme un collier de perles.

On peut également rencontrer des branches latérales (elles mêmes plus ou moins branchées), résultant soit d'une réaction chimique parasite au cours de la synthèse du polymère (par exemple dans le cas du polyéthylène basse densité), soit d'une réaction de greffage pratiquée volontairement sur le polymère pour en modifier les propriétés physico-chimiques

IV.4. TYPES DE POLYMÈRE

IV.4.1. Homopolymères

Dans le cas où la macromolécule est composée de la répétition d'un seul motif ; ce qui résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère.

IV.4.2. Copolymères

Quand plusieurs motifs différents sont répétés. On distingue ensuite plusieurs types de copolymères suivant l'organisation entre les différents monomères. Dans le cas le plus fréquent, on a :

Un copolymère statistique : les différents monomères se mélangent en fonction de la réactivité et de la concentration de ceux-ci. Les propriétés mécaniques sont alors moyennées.

Un copolymère à blocs (appelé également copolymère séquencé) ou *copolymère alterné* : il peut y avoir combinaison des propriétés mécaniques.

Les schémas suivants représentent les différents types des copolymères

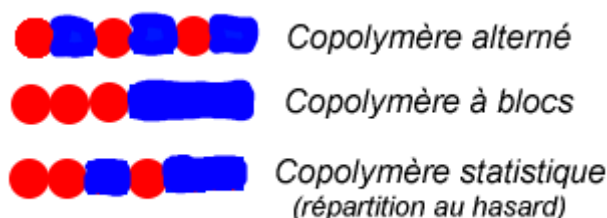


Figure 9 : Les différents types des copolymères

IV.5. NOMENCLATURE

La nomenclature UICPA recommande de partir du motif de base de la répétition. Cependant de très nombreux polymères ont des noms usuels ne respectant pas la nomenclature UICPA. Un exemple : Le polymère de formule $(CH_2 - CH_2)_n$ est couramment appelé [polyéthylène](#). Pourtant, si l'on respecte la nomenclature, il devrait être nommé polyméthylène car le motif constitutif n'est pas l'éthylène $CH_2 = CH_2$ mais le méthylène CH_2 .

Voici un tableau qui donne quelques exemples de cas où l'appellation usuelle et la nomenclature UICPA diffèrent :

Tableau 10 : La nomenclature UICPA

Formule	Nom UICPA	Appellation usuelle
$(O - CH_2 - CH_2)_n$	Poly(oxyéthylène)	Polyoxyde d'éthylène
$(O - CH_2)_n$	Poly(oxyméthylène)	Polyformaldéhyde
$(CH_2 - CH = CH - CH_2)_n$	Poly(1-butényle)	Polybutadiène

CHAPITRE V : GEOPOLYMERES

V.1. DÉFINITION

Les géopolymères sont basés sur des aluminosilicates désignés sous le terme poly(sialate), qui est une abréviation de poly(silico-oxo-aluminate) ou $(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)_n$ (soit n le [degré](#) de polymérisation).

La figure suivante montre un [géopolymère](#) poly(sialate-siloxo) résultant d'une géosynthèse de poly(silisique) [acide](#) $(\text{SiO}_2)_n$ et de potassium aluminosilicate, en milieu alcalin (KOH, NaOH). Dans cette structure, le groupement sialate $(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)$ est un agent de réticulation.

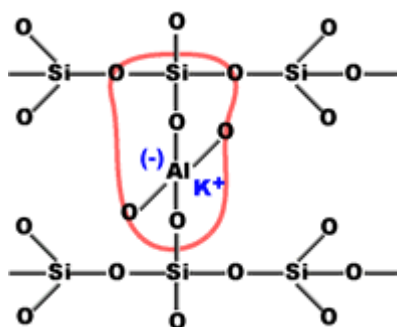
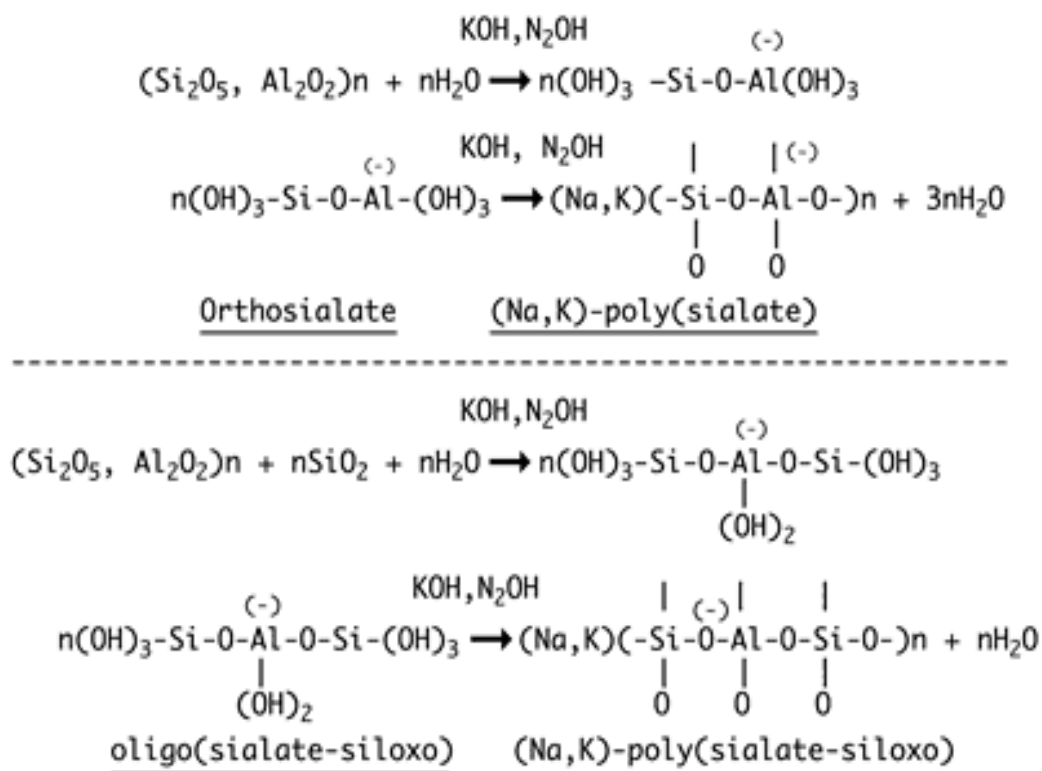


Figure 10 : La structure chimique d'un poly(sialate-siloxo)

Exemples de polycondensation vers un poly(sialate) et un poly(sialate-siloxo),



V.2. GÉOPOLYMÉRISATION

La géopolymérisation est une géosynthèse qui est une réaction qui intègre chimiquement des minéraux, impliquant naturellement la présence de silico-aluminates. Les atomes de silice (Si) et d'aluminium (Al) réagissent pour former des molécules qui sont chimiquement et structurellement comparables à celles liant la roche naturelle qui permet d'acquérir les propriétés idéales des éléments rocheux, comme par exemple la dureté, la stabilité chimique et la longévité qui est égale à la longévité naturelle géologique.

V.3. GÉOSYNTHESE

La [géosynthèse](#) est l'art de fabriquer à une [température](#) inférieure à 100°C de la [matière](#) minérale, de manière artificielle pour en obtenir toutes les qualités (dureté, longévité, stabilité, etc.). Il s'agit de synthétiser, par la géochimie, un analogue géologique, c'est-à-dire un [matériau](#) ressemblant à une roche naturelle et correspondant à une classification minéralogique précise. Par exemple, le [géopolymère](#) et les mortiers, ciments, liants à réaction géopolymériques sont des [matériaux](#). On pense que le mécanisme de la synthèse géochimique se fait par l'intermédiaire d'oligomères (dimère, trimère) qui constituent les véritables groupements structuraux unitaires [formant](#) la structure macromoléculaire tridimensionnelle.

V.4. STRUCTURES

La structure générale de ces composés est une association de SiO_4 , AlO_4 .

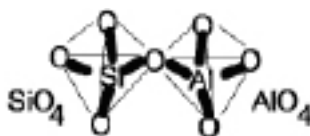


Figure 11 : Monomère de base

Dans cette structure, l'excès de charge négative de l'aluminium tétraédrique est compensé par un cation métallique tel que Na^+ , K^+ ou Ca^{2+} suivant la nature de la base utilisée dans la réaction de synthèse.

Généralement, les polysialates ont pour formule : $\text{M}_n\{(\text{SiO}_2)_z\text{-AlO}_2\}_n ; w\text{H}_2\text{O}$ avec :

- M est un cation métallique : sodium, potassium ou calcium.
- n : degré de polymérisation
- z = 1, 2, 3

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

- Polysialates ou PS : (Si-O-Al) pour z=1



Figure 12 : Structure d'un PS

- Poly(sialate-siloxo) ou PSS : $(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{Si}-\text{O})$ pour $z=2$



Figure 13 : Structure d'un PSS

- Poly(sialate-disiloxo) ou PSDS : $(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O})$ pour $z=3$



Figure 14 : Structure d'un PSDS

On pense que le mécanisme de la synthèse géochimique se fait par l'intermédiaire d'oligomères (dimère, trimère) qui constituent les véritables groupements structuraux unitaires formant la structure macromoléculaire tridimensionnelle, selon les schémas suivants. (Figure 14 à Figure 18)

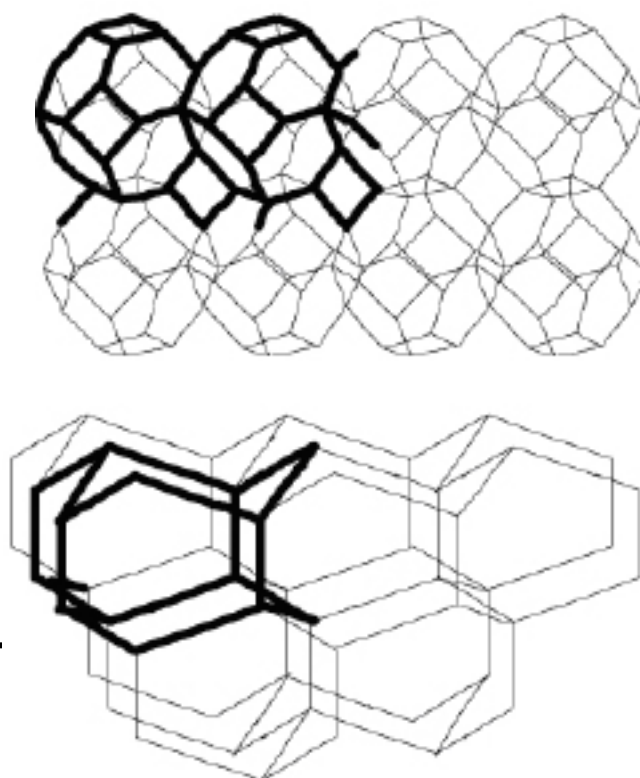


Figure 16 : Potassium poly(sialate) : K-PS

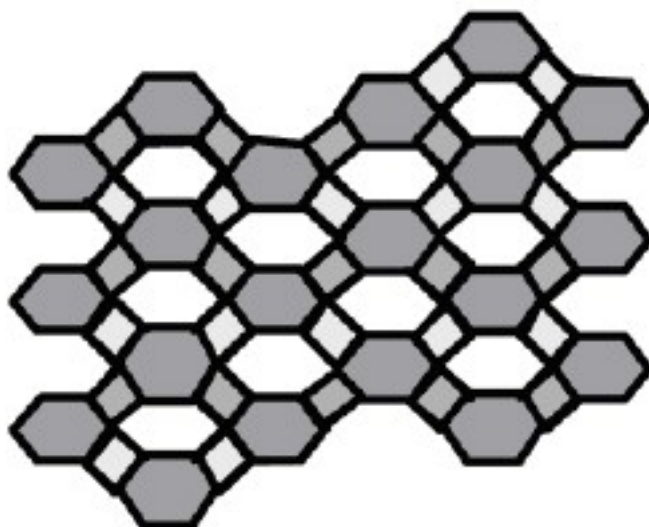


Figure 17 : Potassium-poly(sialate-siloxo) : K-PSS

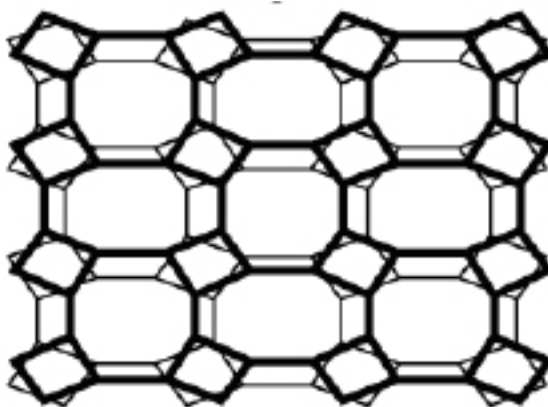


Figure 18: Potassium-poly(sialate-disiloxo) : K-PSDS

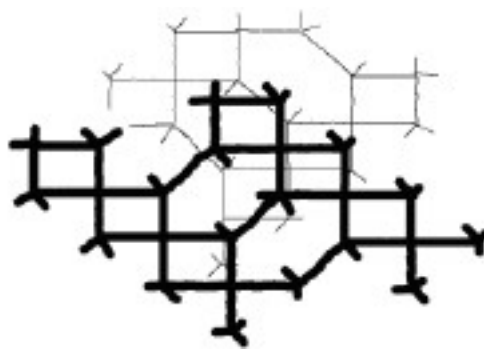


Figure 19 : Calcium-Potassium-poly(sialate-siloxo) : Ca,K-PSS

V.5. DIFFÉRENTS PRODUITS GEOPOLYMÈRES

Les applications sur le géopolymère engendrent plusieurs produits, en citant le liant ou résine géopolymère, le ciment géopolymère et la brique géopolymère.

V.5.1. Liant ou résine géopolymère [6]

On a plusieurs liants géopolymères tels le K-PSS, Potassium-poly(sialate-siloxo) de formule chimique $[1.3K_2O][Al_2O_3, 4.5SiO_2]$ et le Na,K-PSS, Sodium-Potassium-poly(sialate-siloxo) de formule chimique $[0.6Na_2O, 0.65K_2O][Al_2O_3, 4.6SiO_2]$

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.

V.5.2. Ciment géopolymère [10] [11]

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.

V.5.3. Brique géopolymère [2]

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.

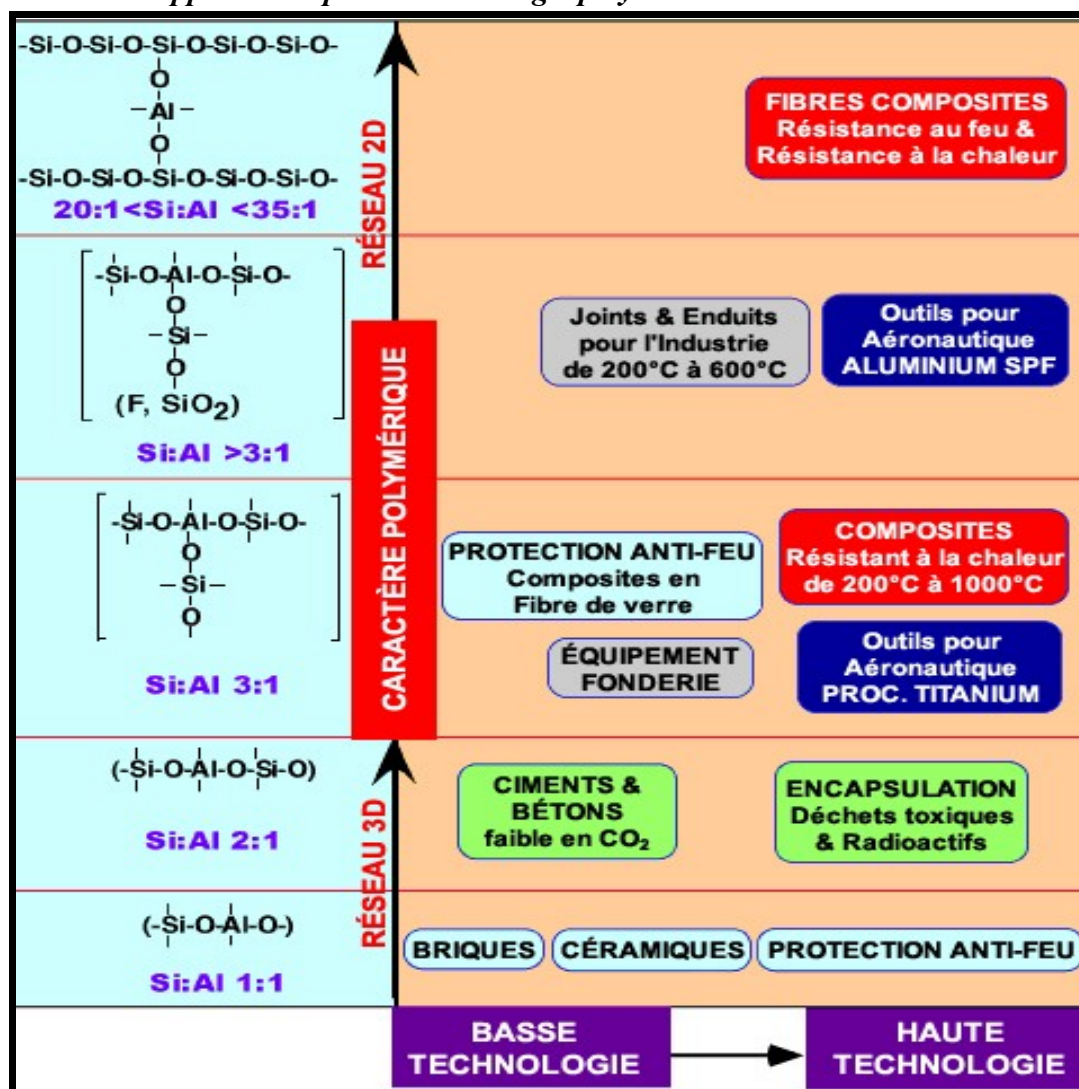
Cuite à 250°C, elle résiste au gèle.

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

Le tableau suivant résume les applications possibles des géopolymères

Tableau 11 : Les applications possibles sur la géopolymère



Source : DAVIDOVITS J.

CHAPITRE VI : LES SILICATES SOLUBLES

VI.1. INTRODUCTION

Le chapitre suivant consiste à la fabrication des silicates solubles. Ces silicates sont obtenus à partir du mélange de la silice avec des alcalis et du charbon.

On distingue deux méthodes de préparations de silicates solubles : [13] [14]

- Méthode par voie humide
- Méthode par voie sèche

VI.2. METHODE PAR VOIE HUMIDE

VI.2.1. Cuissons sous pression

On dissous directement la silice dans une lessive de soude ou de potasse caustique. On effectue l'opération dans un autoclave en acier inox, dans des conditions bien déterminées : température, pression et temps de cuisson.

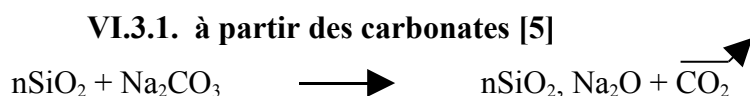
VI.2.2. Cuisson à la pression atmosphérique

Cette méthode dérive de la précédente. On dissous par ébullition la silice finement broyée dans une lessive de soude ou de potasse caustique sans faire intervenir la pression. L'opération dure quelques heures.

VI.3. MÉTHODE PAR VOIE SÈCHE OU FUSION ALCALINE

On obtient aussi les silicates par fusion de la silice avec des alcalis et du charbon. Les mélanges intimes de la silice et des alcalis sont soumis à une température élevée pendant cinq à huit heures.

Les sels entrent en fusion, favorisée par la température et le charbon agissant comme réducteur selon les réactions suivantes :

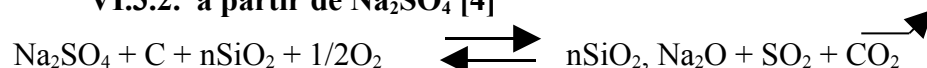


La réaction se passe à la température de 1200°C à 1500°C

La nature des produits de réaction obtenus dépend essentiellement des proportions respectives du carbonate et de la silice

Pour un rapport $\text{Na}_2\text{CO}_3 / \text{SiO}_2 = 1, 2$ ou 3 , il se forme de métasilicate Na_2SiO_3 . Si le rapport est très grand, on obtient l'orthosilicate Na_4SiO_4

VI.3.2. à partir de Na_2SO_4 [4]



VI.3.3. à partir de NaCl [13]



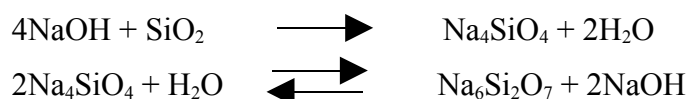
La formation de Na_2SiO_3 commence à 800°C et on arrive à une transformation de SiO_2 en silicate à 80% vers 1100°C .

Pour chacune de ces trois réactions, la masse en fusion bien liquéfiée est refroidie. Elle se fige en un fondu vitreux. Les morceaux de verre solubles sont envoyés au concasseur puis au broyeur.

On traite la poudre obtenue par l'eau sous pression jusqu'à dissolution totale. La solution obtenue est alors évaporée jusqu'à la concentration voulue.

VI.3.4. à partir de la soude [13]

Avec la soude fondue, la formation de l'orthosilicate se fait à 700°C , et sous l'action de l'eau, ce dernier se transforme en diorthosilicate avec recyclage de la moitié de la soude.



PARTIE II

ETUDES EXPERIMENTALES

PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES

Cette deuxième partie conduit aux études expérimentales que nous avons entreprises au laboratoire. Elle expose les itinéraires afin de parvenir à l'essai de fabrication d'un nouveau produit dans la famille de géopolymère. En effet, on commence par la caractérisation des matières premières avant d'entamer des essais de fabrication. Ensuite, on va voir l'application de ce produit aux matériaux de construction. Finalement, cette partie sera terminée par l'intérêt économique et écologique de l'emploi du nouveau produit.

CHAPITRE VII : CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES

La connaissance des caractéristiques matières premières tant physiques que chimiques nous aide à leurs utilisations.

VII.1. PROVENANCE DES MATIÈRES PREMIÈRES

Ce paragraphe renseigne sur la provenance des différentes matières premières utilisées :

- Kaolin : Le kaolin est parmi les matières premières très utilisées à la fabrication de nos produits. Dans la suite, nous utilisons le kaolin d'Ambatomirahavavy où il se situe sur la route nationale N° 1 à 15 Km de Tananarive. Il y a une carrière qui contient un filon de kaolin.
- Silice : elle est obtenue par la calcination de balle de riz
- Soude : elle joue le rôle en tant que réactif de synthèse, présente sous forme de granule. La soude utilisée provient de la société CNAPMAD.

VII.2.CARACTÉRISATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

VII.2.1. Caractéristiques physiques

VII.2.1.1.Teneur en eau

La connaissance de la teneur en eau naturelle du kaolin est utile car cela nous aide beaucoup à l'utilisation de ce matériau.

Plusieurs méthodes peuvent être réalisées pour la mesure de ce paramètre. Celle que nous avons adoptée pour sa simplicité, consiste à prendre un échantillon de masse connue (environ 100g), à le dessécher à l'étuve jusqu'à avoir un poids constant. Le séchage s'effectue dans une étuve à 105 °C pendant 48 heures.

Soient :

m : la masse de l'échantillon

m_s : la masse de l'échantillon sec

On obtient alors la teneur en eau par la formule suivante :

$$W = \frac{m - m_s}{m_s} * 100$$

VII.2.1.2.Densité apparente

Ce paramètre évoque la relation entre le poids de matériau par unité de volume.

Pour connaître la densité apparente, on procède aux opérations suivantes :

Remplir une éprouvette graduée avec le matériau versé en filet continue à l'aide d'un entonnoir.

Araser la surface en évitant de tasser. La valeur est obtenue par le rapport de la masse de l'échantillon versé par son volume.

$$d = \frac{m_s}{V}$$

m_s : masse de l'échantillon sec

V : Volume de l'échantillon

VII.2.2. Caractéristiques chimiques

VII.2.2.1.Analyse chimique

L'analyse chimique d'un matériau est très essentielle afin de connaître les différents constituants chimiques.

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la détermination de la teneur en silice et en alumine de nos échantillons.

Lors de l'expérience, on utilise les échantillons bien sec et broyés finement (diamètres de grains : $80 \mu m$).

VII.2.2.2.Dosage de la silice SiO_2

Ce dosage consiste à :

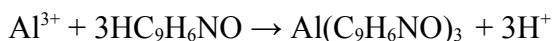
- Attaquer dans un bêcher 1g d'échantillon avec 60 ml de mélange triacides
- Chauffer progressivement jusqu'à fumée blanche, puis reprendre par HCl à 10 %, filtrer, laver, puis rincer avec de l'eau bouillante et on obtient :
 - Le filtrat (F) contenant Fe, Al, Mg, Ca, Ti et Ni
 - Le résidu (R) contenant de la silice à peser

$$\% \text{SiO}_2 = (R * 100) \%$$

VII.2.2.3. Dosage de l'alumine Al_2O_3

Le dosage de l'alumine se déroule comme suit :

- Prendre 100ml de F auxquels on ajoute 30ml de précipitant,
- chauffer jusqu'à entrée en ébullition,
- mettre dans un bain-marie bouillant.
- Précipiter Al $(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$, en ajoutant goutte à goutte une solution 2N de CH_3COOH_4 (Ammonium acétate)
- Laisser reposer pendant 10 à 15 minutes dans un bain-marie, filtrer ensuite à travers un creuset filtrant (verre fritté) préalablement lavé et séché à 130 °C jusqu'à poids constant.
- Lors de la précipitation, il se produit la réaction :



Calcul: soit m la masse de $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$ obtenue à partir de 100 ml de F (volume de filtrat) lors de l'attaque triacide

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = (0.11 * m * F) \%$$

VII.2.2.4. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique permet d'identifier les différents constituants minéralogiques de nos échantillons et éventuellement de connaître leurs teneurs respectives en oxydes.

Beaucoup de méthodes peuvent être réalisées :

➤ Analyse thermique différentielle (ATD)

Cette analyse est basée sur l'étude de la chaleur dégagée ou absorbée par le matériau quand il subit des transformations physiques ou chimiques

➤ Diffraction des rayons X ou DRX

Elle permet de prévoir l'état de cristallisation du matériau. Elle sert aussi à la détermination qualitative et quantitative des constituants minéralogiques des échantillons.

➤ Spectrométrie infra-rouge ou SIR

Il renseigne sur les informations suivantes :

- Identification des liaisons, notamment dans les mélanges à plusieurs constituants.
- Altération des structures soumises à un traitement thermique ou chimique.

- Etude des différentes formes d'eau.
- Etat de cristallinité.

➤ Microscopie électronique à balayage ou MEB

Elle permet de visualiser les structures grâce à des appareils dont la source de rayonnement émet des électrons.

Malheureusement, faute de matériels, on ne peut pas réaliser cette expérience au sein de notre laboratoire.

VII.3. RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

VII.3.1. Caractéristiques physiques

Le tableau suivant donne les valeurs de différents caractères physiques des matières premières :

Tableau 12 : Les valeurs de différents caractères physiques des matières premières :

Matières premières	Teneur en eau W [%]	Densité apparente d_a [kg/l]	Masse volumique absolue ρ [kg/l]
Kaolin	25	0.67	1.12
CBR	-	-	1.34

VII.3.2. Caractéristique chimique

Le tableau ci-dessous donne les compositions chimiques de nos matières premières

Tableau 13 : Les caractéristiques chimiques des matières premières (en pourcentage pondéral)

M.P	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3	Cr_2O_3	PF
Kaolin	80	7	1.95	-	trace	0.44	0.15	0.72	-	trace	13.5
CBR	80.70	2.71	1.82	3.2	3.01	0.95	1.25	-	0.8	-	1.7

VII.3.3. Interprétation des résultats

- Le kaolin d'Ambatomirahavavy présente une forte teneur en SiO_2 . Cela peut être expliqué par la formation géologique du site dans laquelle le terrain est riche en silice amorphe.

- Les cendres de balle de riz renferment une teneur en silice de l'ordre de 81%, la calcination de balle de riz donne des cendres à haut pourcentage en silice.

CHAPITRE VIII : ESSAI DE FABRICATION DU LIANT

VIII.1. MATÉRIEL UTILISÉ

VIII.1.1.L'étuve

L'étuve sert à sécher l'échantillon ou les autres matériels utilisés. Sa température est variée entre l'ambiante jusqu'à 105°C .



Figure 20 : Etuve

VIII.1.2. Le mortier

C'est un instrument fabriqué à partir d'une céramique, dur et résiste au choc en général, qui sert à piler et broyer les échantillons.



Figure 21 : Mortier

VIII.1.3. Les tamis

Les tamis sont des outils en zinc ou en acier inoxydable qui servent à obtenir les dimensions de grains voulues. C'est pourquoi, il y a plusieurs tamis, à des ouvertures différentes exprimées en mm, dans une série.

Lorsque la série est normalisée, elle permet de déterminer la distribution granulaire d'un échantillon ; ce qui est matérialisé par sa courbe granulométrique. Un tamis peut être aussi caractérisé par son module M tel que :

$$M = 31 + 10 \log d$$

Avec M : module du tamis

d : ouverture exprimée en mm

Voici un exemple de tamis qui existe dans notre laboratoire :

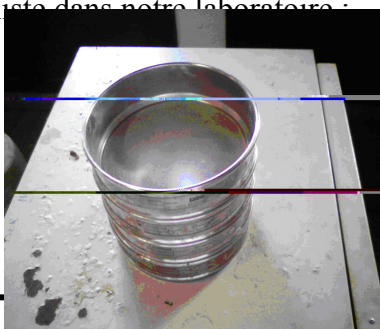


Figure 22 : série de Tamis

VIII.1.4.Plaques chauffantes

C'est une plaque chauffée électriquement et qui permet d'atteindre des températures assez modestes. Elle sert à chauffer les échantillons, généralement sous forme de solution, mais aussi à les dessécher par évaporation de l'eau absorbée. Une plaque chauffante est thermostatée et éventuellement couplée à un agitateur magnétique.



Figure 23 : Plaque chauffante

VIII.1.5.Four de calcination

C'est un appareil qui sert à cuire ou à calciner un échantillon. Il atteint jusqu'à 950°C, si on fait la cuisson à cette valeur, elle ne dure pas très longtemps (inférieur à trois heures). L'échantillon est toujours mis dans un bûcher réfractaire, c'est-à-dire qui résiste à une température assez élevée. On ne peut pas le sortir tout de suite après la cuisson, on attend jusqu'à avoir une température inférieure à 300°C pour éviter un choc thermique qui pourrait abîmer le four.



Figure 24 : Four de calcination

VIII.1.6.Balances

La balance est un outil qui permet d'évaluer la quantité de l'échantillon. En effectuant les travaux, nous utilisons deux balances. D'une part, la balance de précision qui donne la masse en milligramme et elle ne fonctionne pas si l'échantillon a un poids supérieur à 220 mg, d'autre part

la balance qui est utilisée pour l'échantillon en grande quantité. Elle mesure la masse en gramme.

La précision de la mesure est :

- De ± 0.0001 g pour la première.
- De ± 0.1 g pour la deuxième.



Figure 25 : Balances

VIII.2. PRÉTRAITEMENTS DES MATIÈRES PREMIÈRES

VIII.2.1. Le kaolin

Après l'extraction du kaolin, plusieurs opérations ont été faites davantage :

- Le séchage : élimination de l'eau d'humidité jusqu'à avoir un poids constant
- Le broyage : Réduction de dimension des grains de l'échantillon.
- Le tamisage : Obtention de dimension voulue à l'aide de tamis.

Le kaolin réduit en poudre de diamètre inférieur à $80\ \mu m$. Elle est calcinée six heures à la température de $750^\circ C$ pour avoir le métakaolin, dans lequel la silice et l'alumine deviennent particulièrement réactives. On a la réaction :



La cuisson du kaolin est l'une des possibilités d'éliminer le taux de carbone qui est transformé en gaz carbonique.

VIII.2.2. La silice

Dans notre cas, on essaie de fabriquer la silice à partir de la balle de riz. La méthode adoptée est la suivante :

On calcine la balle de riz dans un four artisanal pendant soixante douze heures environ. La balle de riz engendre 20% de cendre dont 95% de silice pure. La température durant la cuisson varie entre 400 °C et 900°C mais la moyenne est 850°C, ces valeurs sont obtenues à l'aide d'un thermocouple lors de la calcination. La cuisson se fait en atmosphère régulée, la quantité d'air est limitée.

La figure suivante montre la cendre de balle de riz dans le four artisanal

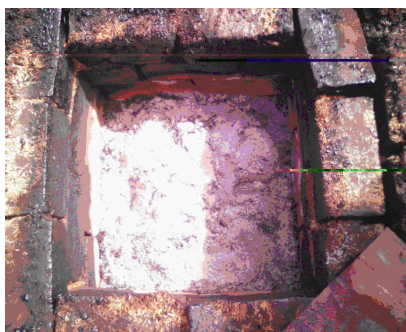


Figure 26 : Cendre de balle de riz dans le four artisanal

Lorsque la silice est ôtée du four, on la broie facilement et la dimension de grain est celle du kaolin.

VIII.3. FABRICATION DE SILICATE DE SODIUM

On fabrique le silicate de sodium à partir de la silice obtenue dans le paragraphe précédent avec la soude fondue. La silice est finement broyée à diamètre inférieur ou égal 80µm. Dans notre cas, on adopte la méthode de réaction chimique par voie sèche.

La réaction mise en jeu :



Après la cuisson dans le four, on obtient une masse dure de couleur vert. La perte au feu pendant la cuisson est de l'ordre de 2%.

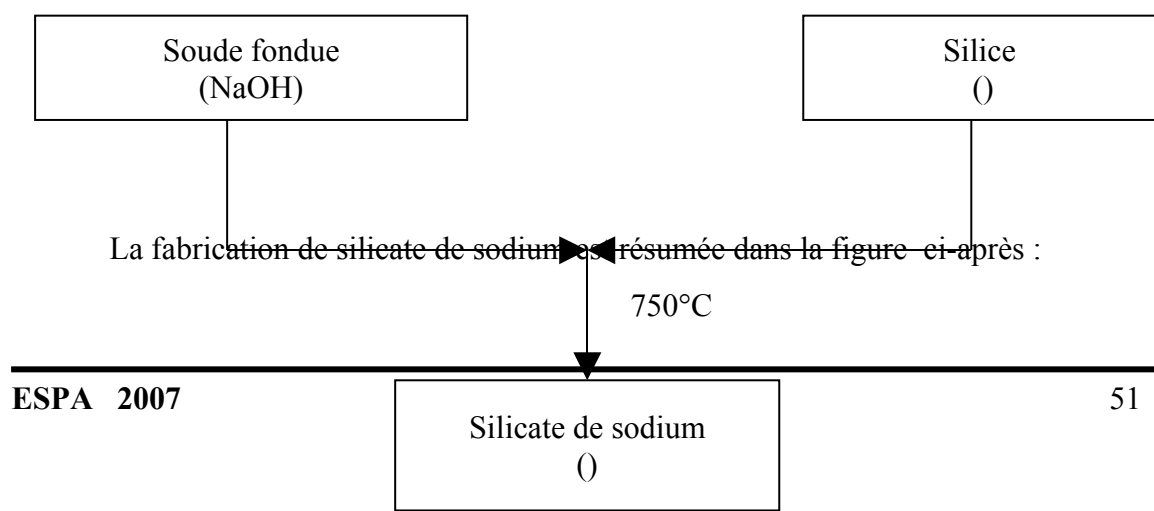


Figure 27 : Flowsheet de fabrication de silicate de sodium

➤ Influence de la quantité de soude

Quant à la fabrication du silicate de sodium, on essaie de varier la quantité de la soude, caractérisée par le rapport molaire soude/silice.

Tableau 14 : Rendement d'obtention de silicate de sodium en fonction de la quantité de soude

Rapport en masse molaire de la quantité soude / silice	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Rendement (%)	25	50	75	100	100	100

$$\text{Avec : } Q_n = \frac{n[NaOH]}{[SiO_2]}$$

Q_n : Le rapport molaire de la quantité soude / silice

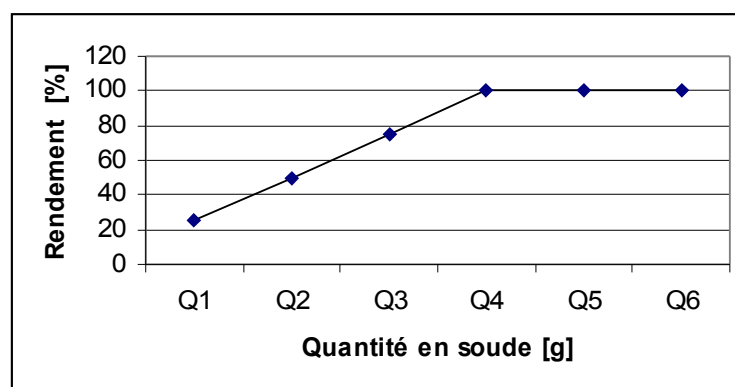


Figure 28 : Rendement d'obtention de silicate de sodium en fonction de la quantité en soude

On voit que le rendement augmente avec le rapport soude / silice. La réaction chimique mise en jeu demande une quantité de soude quatre fois plus que celle de CBR. Celle-ci donne un résultat fiable et correspond à la formation de l'orthosilicate. En effet, dans cette proportion, la silice est consommée en totalité au cours de la réaction chimique.

On essaie de varier le rapport soude / silice jusqu'à Q_5 et Q_6 mais le rendement ne varie plus. Dans ces conditions, une partie de la soude ne participe pas à la réaction.

VIII.4.FABRICATION DE RÉSINE MINÉRALE

VIII.4.1. Paramètres influençant la fabrication

On tient compte deux groupes de paramètres dans la fabrication de la résine minérale : les paramètres fixes et les paramètres variables.

➤ Paramètres fixes

Les paramètres fixes, que nous considérons, sont :

- le rapport molaire : $SiO_2 / Al_2O_3 = 4$
- la température de cuisson : $100^\circ C$
- la pression : pression atmosphérique.
- l'agitation

➤ Paramètres variables

Les paramètres que nous avons faits varier sont :

- Le temps de cuisson
- La concentration de la soude dans la solution aqueuse

VIII.4.2. Processus de fabrication

On prépare la résine en mélangeant de la soude et du métakaolin, produits issus de la phase de prétraitement des matières premières.

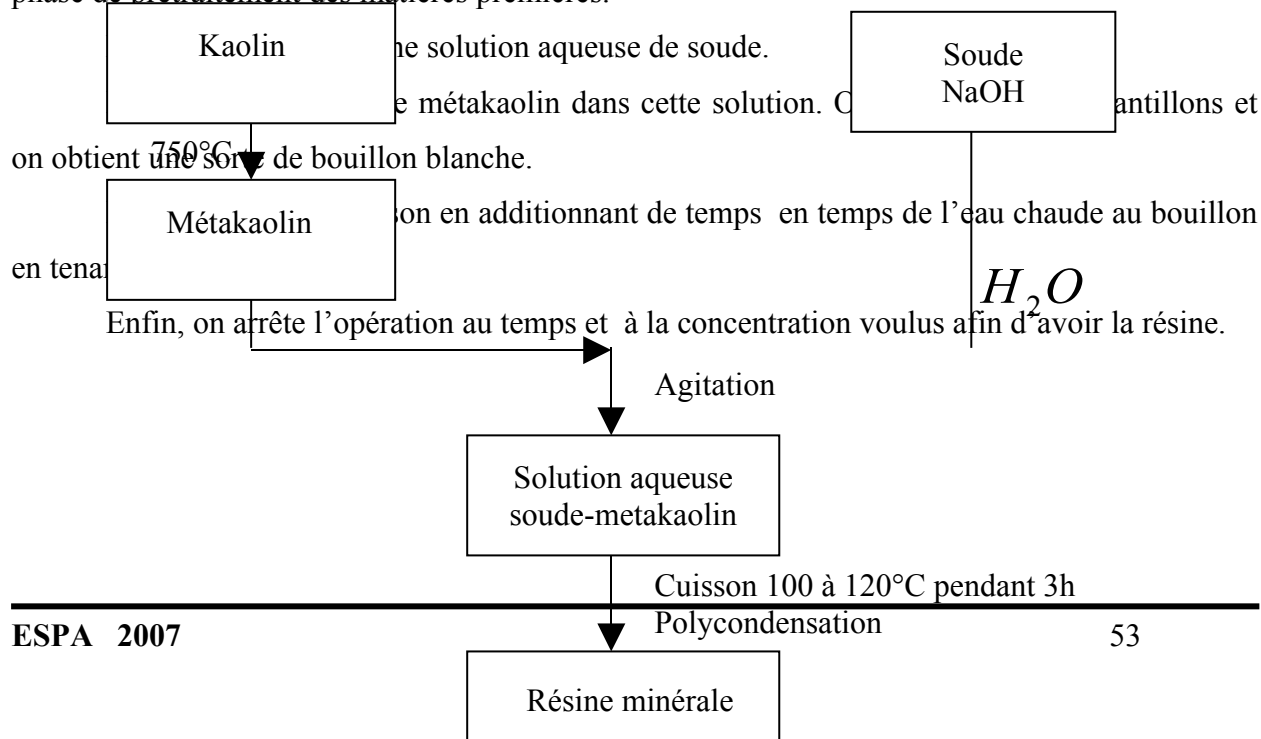




Figure 29 : Flowsheet de fabrication de la résine minérale

VIII.4.3. Modes opératoires

➤ *Pesage*

Après le prétraitement, en se referant sur le rapport molaire que nous avons donné auparavant ; on pèse les matières premières.

➤ *Agitation*

Cette opération consiste à bien mélanger le métakaolin avec la solution aqueuse de soude (eau + soude).

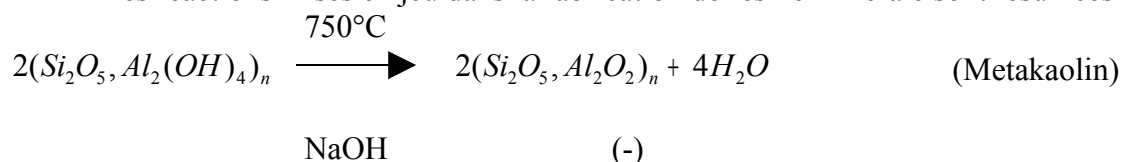
➤ *Cuisson*

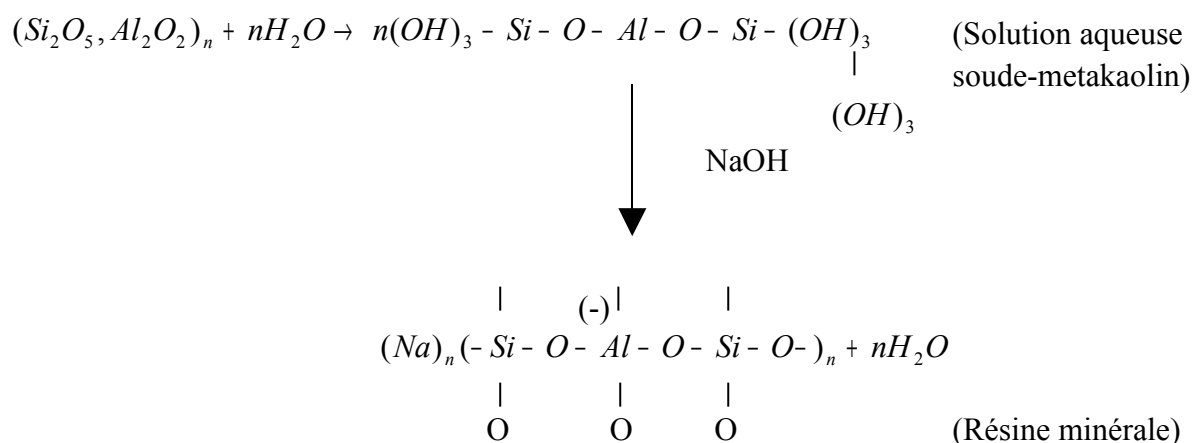
La solution obtenue est portée à l'ébullition pendant trois heures sur la plaque chauffante, pendant lesquelles, on maintient constant le volume d'eau dans le bêcher en ajoutant de l'eau chaude de temps en temps.

➤ *Polycondensation*

Après la cuisson, on reportera la solution sur la plaque chauffante jusqu'à l'ébullition pour faire disparaître les molécules d'eau. Le résidu obtenu forme la résine minérale.

Les réactions mises en jeu dans la fabrication de résine minérale sont résumées ci-après :





VIII.4.4. Influence de la concentration en soude

Le tableau suivant évoque la variation de rendement d'obtention de résine minérale en fonction de la normalité de la solution de soude. Ce qui est illustré par la figure 29.

Tableau 15 : Rendement d'obtention de résine minérale en fonction de la normalité de la solution de soude

Normalité	1N	2N	3N	4N
Rendement (%)	60	69	82	90

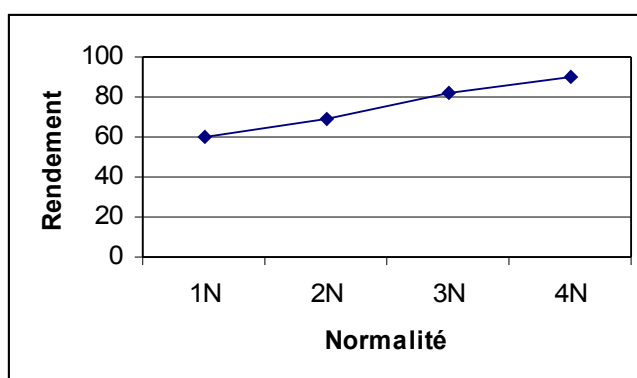


Figure 30 : Evolution du rendement d'obtention de résine minérale en fonction de la normalité de la solution de soude

Le rendement d'obtention de résine minérale croît linéairement avec la normalité de la solution de soude.

VIII.4.5. Influence du temps de cuisson

Le tableau ci-dessous montre les différentes valeurs du rendement d'obtention de résine minérale en fonction du temps de cuisson. La figure donne l'allure générale.

Tableau 16 : Rendement d'obtention de résine minérale en fonction du temps de cuisson

Temps	30	60	90	120	150	180	210
-------	----	----	----	-----	-----	-----	-----

(mn)							
Rendement	58	62	64	65	70	75	80
(%)							

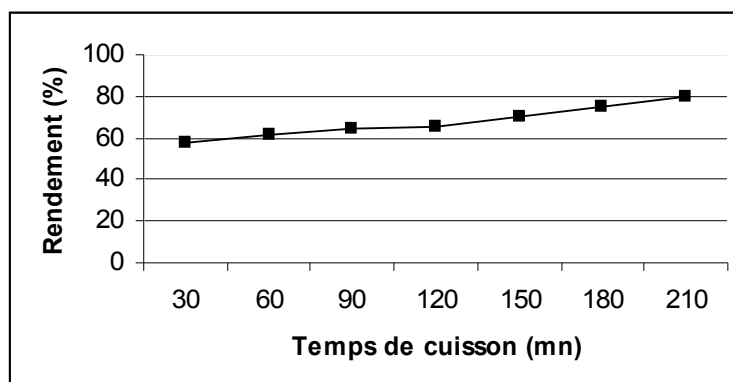


Figure 31 : Rendement d'obtention de résine minérale en fonction du temps de cuisson

Le résultat démontre que le rendement augmente progressivement avec le temps de cuisson. Au dessus de 210 minutes, le rendement reste le même et on risque de dépenser beaucoup d'énergie.

VIII.5. FABRICATION DU NOUVEAU PRODUIT

La fabrication du nouveau produit consiste à mélanger du silicate de sodium avec la résine minérale en tenant compte des paramètres fixe et variable.

VIII.5.1. Paramètres fixe et variable

➤ Paramètres fixes

Les paramètres fixes, que nous considérons, sont :

- le rapport molaire : $SiO_2 / Al_2O_3 = 4$
- la température : température ambiante
- La pression : pression atmosphérique.

➤ Paramètre variable

Le paramètre que nous avons fait varier est :

- Les proportions de silicate de sodium et de résine minérale.

VIII.5.2.Processus de fabrication

On fait une solution de silicate soluble en mélangeant du silicate de sodium avec quelques quantités d'eaux, on y introduit ensuite la résine minérale; ce mélange donne le nouveau produit.

Voici le flowsheet de fabrication du nouveau produit.

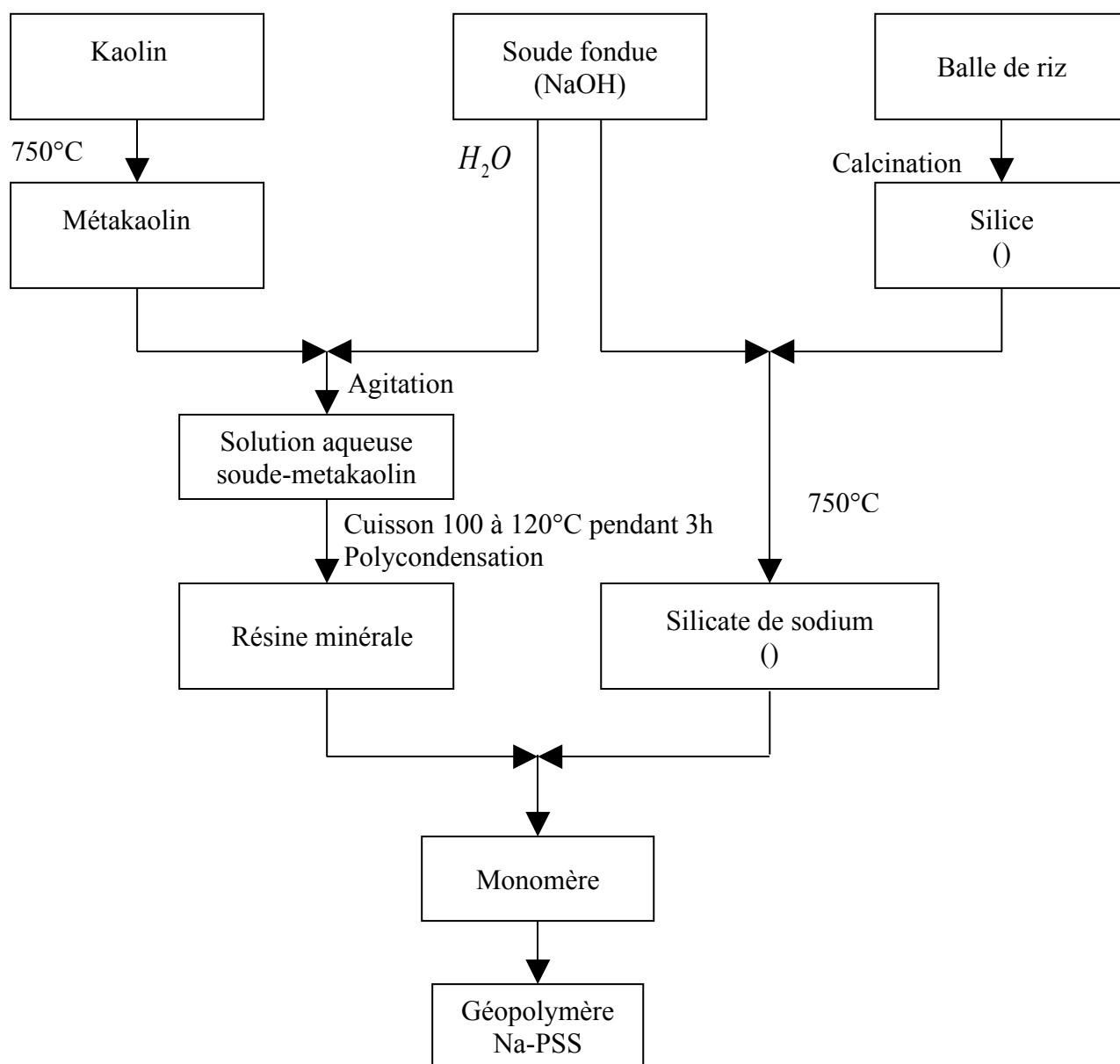


Figure 32 : Flowsheet de fabrication nouveau produit

VIII.5.3. Modes opératoires

➤ Pesage

En vue d'avoir les quantités nécessaires pour la fabrication, on pèse les matières premières.

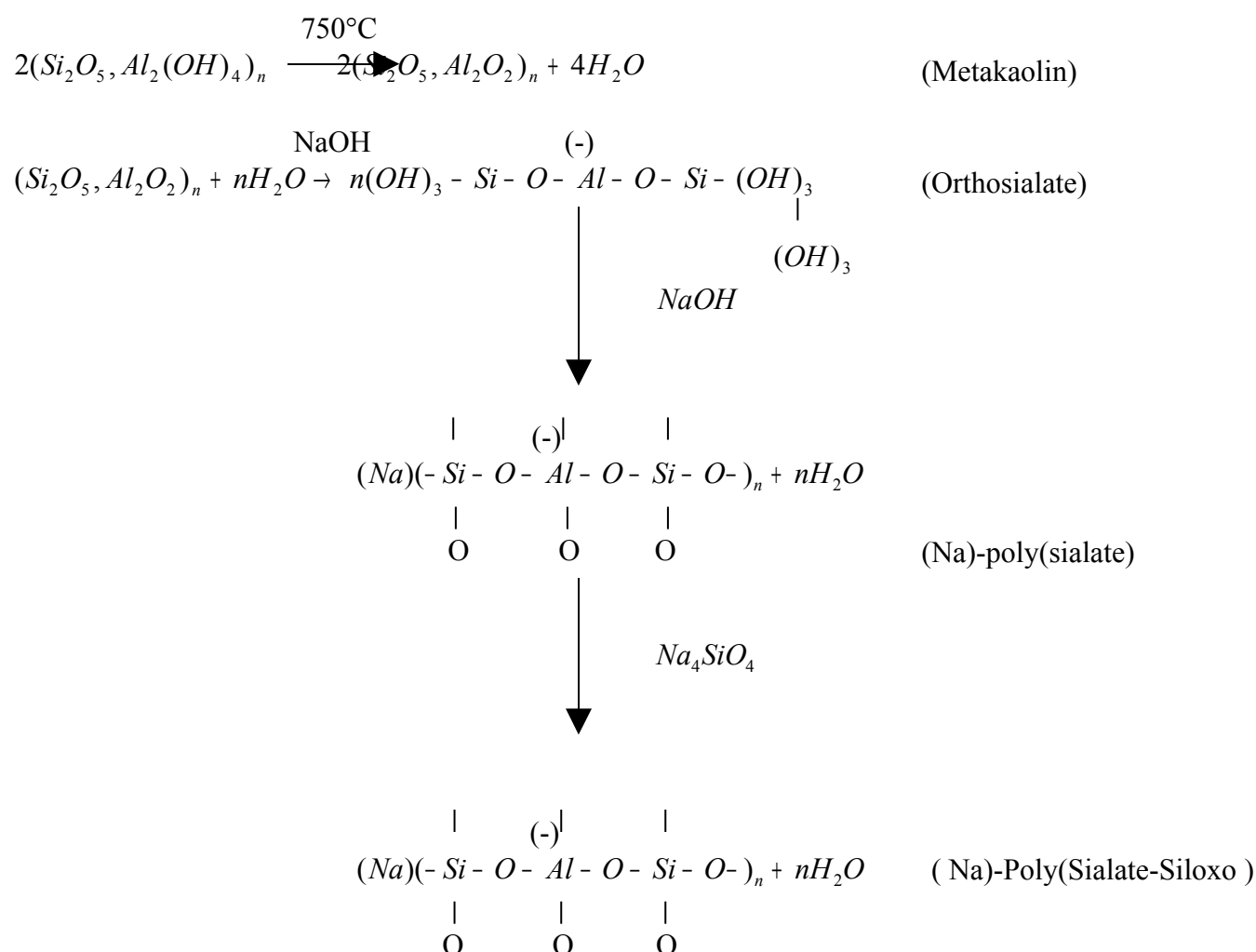
➤ Malaxage

On mélange le silicate de sodium et la résine en additionnant de l'eau à la quantité voulue, puis on malaxe le mélange afin d'avoir une pâte homogène et pour que les réactions, entre les différents constituants, puissent se produire.

➤ Temps de repos

Après le malaxage, on obtient le monomère. Pendant cette période, la réaction ne cesse de se produire. La consistance de l'ensemble augmente progressivement, jusqu'à obtenir un composé qui a durci C'est la polymérisation.

Réactions mises en jeu dans la fabrication du nouveau produit.



VIII.5.4. Influence des paramètres

➤ Paramètre fixe

Dans l'expérience, on doit fixer certains paramètres pour que les résultats soient bien précis.

Le tableau suivant donne les valeurs de tous les paramètres fixes

Tableau 17 : Valeurs de tous les paramètres fixes

Paramètres fixes	Température	Pression	Rapport molaire SiO ₂ / Al ₂ O ₃
Valeurs	25°C	Pression atmosphérique	4

La température mise en jeu a une influence sur la réaction. Comme la réaction se fait à l'air libre, on opte la température ambiante.

La pression atmosphérique accélère ou retarde les durcissements du nouveau produit.

Influence de paramètre variable.

La connaissance du rapport molaire aide beaucoup à atteindre l'objectif de l'expérience.

➤ *Paramètre variable*

La quantité du mélange de silicate de sodium et de résine minérale doit être bien étudiée pour que la réaction mise en jeu soit assouvie.

VIII.6.CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTS PRODUITS

Voici les rapports molaires mis en jeu durant les expériences :

$$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 4$$

$$\frac{SiO_2}{Na_2O_3} = 4$$

$$\frac{Al_2O_3}{Na_2O} = 1$$

$$\frac{H_2O}{Na_2O} = 17.5$$

➤ *La densité et le degré Baumé*

La concentration d'une solution de silicate est caractérisée par sa densité souvent exprimée en Degré Baumé.

Le Degré Baumé sera donné par la formule :

$$DB = 144,32 \frac{d - 1}{d}$$

Avec : - DB : Degré Baumé

- d : Densité

La résine obtenue a des valeurs $d = 1,3$ ce qui correspond à $DB = 33,30$ Degré Baumé.

➤ ***La masse volumique***

Le silicate de sodium et le nouveau liant ont respectivement des masses volumiques 1,2 g/ml et 1,4g/ml.

CHAPITRE IX : APPLICATIONS AUX MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Ce chapitre nous amène à l'utilisation du nouveau produit dans différents domaines notamment la stabilisation des latérites et les agglomérés à base de sable.

IX.1. APPLICATION À LA STABILISATION DES LATÉRITES

IX.1.1. Principe

Le produit est utilisé comme liant pour stabiliser la brique de latérite. Cette fabrication consiste à faire le mélange entre eux, en introduisant quelques quantités de sable.

Le procédé que nous avons employé n'est pas identique à celui de la fabrication de la brique artisanale.

IX.1.2. Mode de fabrication

Le procédure de la fabrication est comme suit :

➤ *Extraction des matières premières*

Les latérites que nous avons utilisées, ont été extraites de sol aux environs du campus de Vontovorona.

➤ *Dosage*

On essaie de déterminer la quantité minimale du liant qu'on doit utiliser pour obtenir une stabilité admise. Nous avons utilisé des différentes proportions. Le mélange suivant conduit au meilleur résultat.

Latérite : 60 parties en volume

Sable : 30 parties en volume

Liant : 10 parties en volume

➤ *Malaxage et moulage*

On a fait un mélange de ces produits en additionnant de l'eau afin d'avoir une pâte homogène. On le met ensuite dans un moule métallique de dimension 4x4x16 cm.

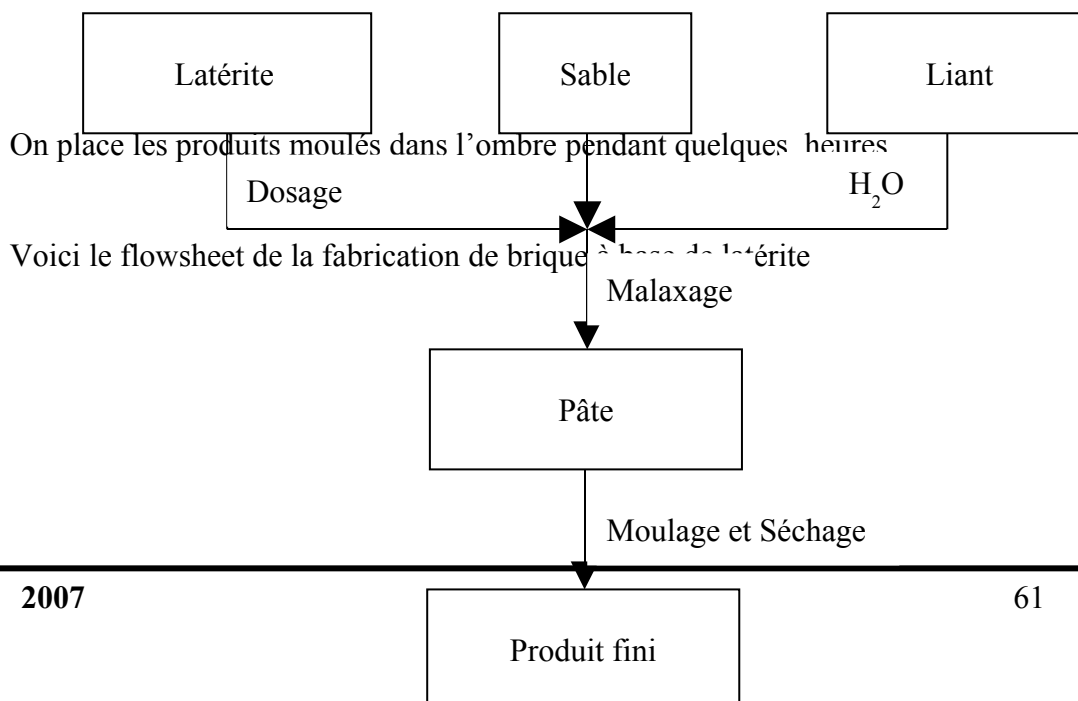


Figure 33 : Flowsheet de la fabrication de brique à base de latérite

IX.2. APPLICATION AUX AGGLOMÉRÉS À BASE DE SABLE

IX.2.1. Principe

Le principe de fabrication consiste à mélanger du sable siliceux à granulométrie bien définie avec une solution aqueuse du nouveau liant.

IX.2.2. Mode de fabrication

L'itinéraire de la fabrication est comme suit :

➤ Matières premières

On emploie du sable siliceux qui contient encore de matières terreuses et des débris végétaux. Le sable sera donc lavé et envoyé au séchage afin d'éviter le colmatage des toiles du tamis. On essaie de faire le mélange d'un granulats de module de finesse bien déterminé

➤ Dosage

En vue d'avoir une résistance mécanique acceptable, on essaie de déterminer la quantité minimale du liant. Nous avons varié les proportions du liant en fixant les autres. Les mélanges suivants donnent le meilleur résultat.

Gros sable (0,8 à 2 mm) : 60 parties en volume

Sable fin (0,08 à 0,2mm) : 30 parties en volume

Liant : 10, 15, 20, 25 parties en volume

Charge (silice amorphe): 5 parties en volume

➤ Malaxage et moulage

On a réalisé un mélange formé par le nouveau produit en solution aqueuse afin d'avoir une pâte homogène. On le met ensuite dans le même moule qu'on a utilisé dans la fabrication de brique à

base de latérite. On essaie de respecter le teneur en eau pendant le malaxage. On n'applique aucune force de pression au cours du moulage, seulement des simples piquages.

➤ Séchage

On place les produits moulés dans l'ombre pendant quelques heures.

Le flowsheet de la fabrication des agglomérés à base de sable s'illustre comme suit :

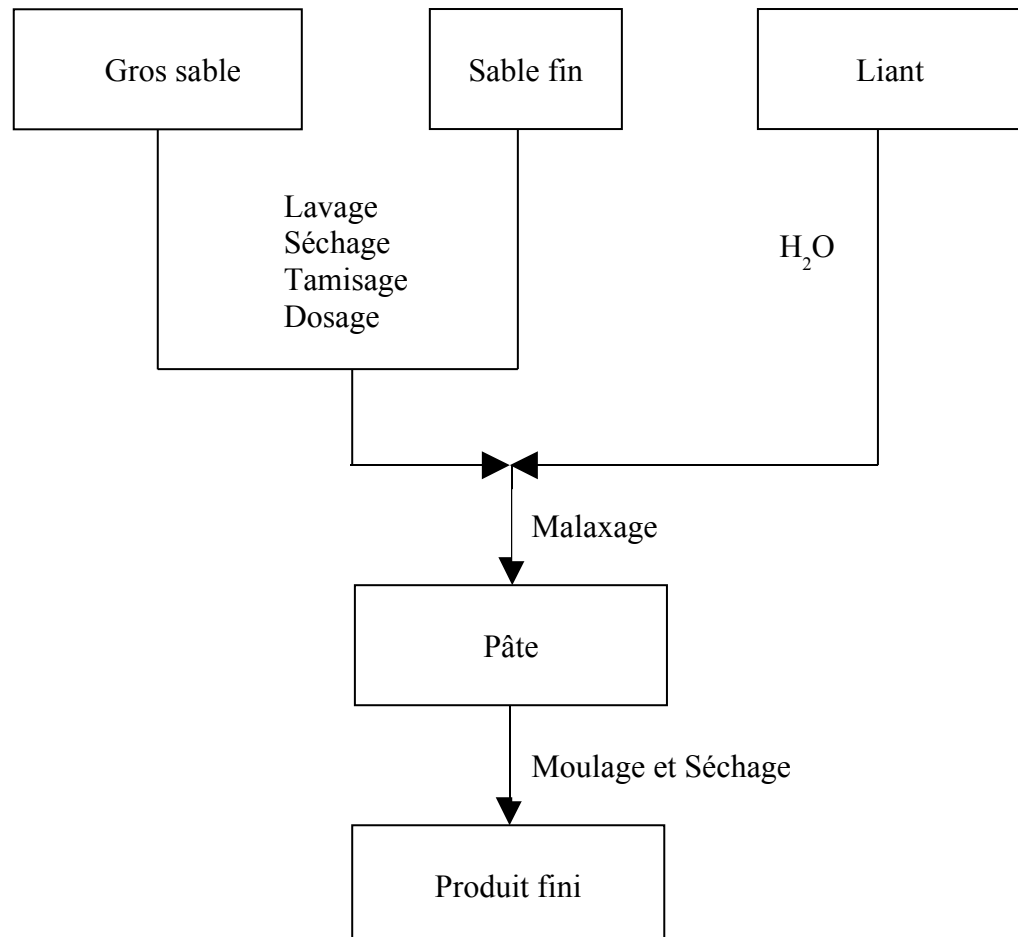


Figure 34 : Flowsheet de la fabrication des agglomérés à base de sable



Figure 35 : Appareil « Test well »

Tableau 18 : Résistance à la compression en fonction de la quantité de liant

Quantité de liant (Parties en volume)	10	15	20	25
Résistance à la compression R_c (MPa)	12	16	19	22

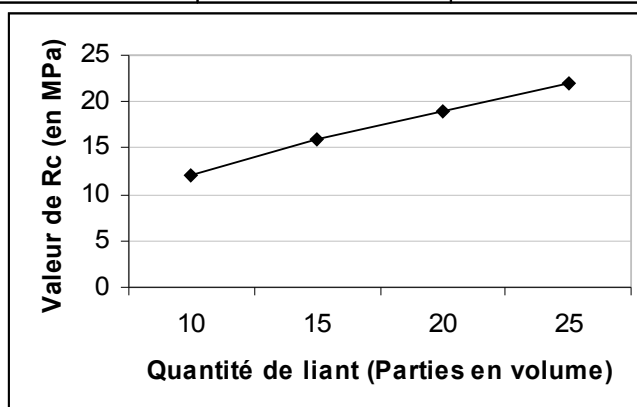


Figure 36 : Résistance à la compression en fonction de la quantité de liant

D'après la courbe ci-dessus, on constate que la valeur de la résistance à la compression croît avec la quantité de liant utilisée. Pourtant, si la quantité de liant dépasse la valeur maximale indiquée sur le schéma, il faut remarquer qu'il y a des nouveaux éléments qui cristallisent en surface de l'échantillon ; ceux-ci sont dus à l'excès de soude.

IX.2.4. Dosage de la soude dans le nouveau produit

D'après l'analyse chimique que nous avons réalisé. La soude qui n'a pas réagi, est dosée par acidimétrie à l'aide de l'acide chlorhydrique en présence du rouge de méthyle jusqu'au premier virage de jaune au rouge.

Le résultat obtenu donne une valeur de l'ordre de 27% de soude qui ne participe pas à la réaction de géopolymérisation.

IX.2.5. Retrait au séchage

Il consiste à mesurer la longueur du produit façonné frais, on le laisse sécher pendant 28 jours, et on mesure de nouveau.

Le retrait au séchage est donné par la formule suivante :

$$R(\%) = \frac{(L_1 - L_2)}{L_1} * 100$$

Avec : L_1 : la longueur du produit façonné frais

L_2 : la longueur du produit complètement sec

Le résultat est de l'ordre de 1,5 %, cela signifie que la diminution du volume est très petite.

IX.2.6. Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau C du produit est donné par :

$$C(\%) = \frac{100 * M}{S * t}$$

Avec : M : Masse d'eau en gramme, absorbée par le produit depuis le début de l'immersion.

S : Produit de la longueur par la largeur de la surface immergée (cm²)

t : Temps (mn) écoulé depuis le début de l'immersion

Après 48 heures d'immersion le coefficient d'absorption est à l'ordre de 20%. Cette valeur a une influence sur la résistance à la compression.

Tableau 19 : Comparaison de la résistance à la compression

	Résistance à la compression (MPa)	
	A sec	Humide
Aggloméré stabilisé avec le nouveau liant	22	23
Aggloméré stabilisé au ciment	30	35
Brique cuite artisanale	17	15

On voit que la résistance à la compression de l'aggloméré stabilisé avec le nouveau liant à sec ou à humide ne diffère pas trop à celle stabilisée au ciment. On constate que la résistance à sec est inférieure à celle humide pour les agglomérés stabilisés avec le nouveau liant et le ciment. Cela signifie que les pores vides dans les agglomères sont remplis d'eau et la réaction chimique durant la prise continue.

Tandis que l'ajout d'eau dans la brique cuite artisanale abîme ses structures et diminue sa résistance



Figure 37 : Aggloméré stabilisé avec le nouveau produit

CHAPITRE X : EVALUATIONS ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

X.1. EVALUATION ÉCONOMIQUE

Dans la suite, on essaie de faire l'évaluation économique du nouveau produit. Cela concerne les coûts des matières premières et les charges des personnels.

On sait que le nouveau produit est à base de silicate de sodium et de résine minérale. Ces deux produits sont à la base de kaolin, de silice et de soude.

X.1.1. Le kaolin

Nous avons déjà dit dans le paragraphe précédent que le kaolin utilisé vient des carrières d'Ambatomirahavavy. Le problème se pose sur la quantité de la réserve disponible dans le site. En général, on ne peut pas exploiter le kaolin en grande quantité.

Pour solutionner cette difficulté, on propose d'utiliser le kaolin venant d'Analabe par exemple. Ce gisement se trouve à 216 km au Sud d'Antananarivo dans le massif d'Ibity. On peut faire une extraction à ciel ouvert de ce produit avec l'accord du propriétaire de cette carrière ou en demandant une autorisation au Service des Mines.

On estime que l'acquisition de cette matière première est à bon marché.

X.1.2. La silice

Madagascar est un pays producteur de riz. On estime une dizaine de millions de tonnes de paddy par an. L'exploitation de ce produit engendre de la balle de riz.

Comme la silice est obtenue à partir de la calcination de balle de riz. Cette dernière renferme plus de 84% de silice (SiO_2). La balle de riz peut fournir 14% de cendres lorsqu'elle est calcinée.

On peut dire que le coût de cette matière première est abordable.

X.1.3. La soude

La soude est un élément essentiel dans notre expérience. Le prix de ce produit est évaluée actuellement à 2800 Ariary le kilo. Cela augmente le coût de production de notre produit.

En totalité, c'est le prix de la soude qui augmente le coût de fabrication du nouveau produit. Concernant la cuisson et la combustion, ces opérations ne consomment pas beaucoup d'énergie car la température maximale utilisée ne dépasse pas 750°C.

En résumé, le coût de fabrication du nouveau produit est un peu plus élevé par rapport à celui du ciment portland ordinaire. Le prix du nouveau produit est de 28 000 Ariary / 50 Kilos tandis que celui du ciment portland ordinaire est de 25 000 Ariary / 50 Kilos. Cela est dû au coût de la soude. Mais on remarque que les mains d'œuvre et les dépenses d'énergie au cours de la nouvelle fabrication sont très minimisées.

X.2. EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

X.2.1. Définition

L'écologie est l'étude des interactions des [êtres vivants](#) entre eux et avec leur milieu. L'écologie est l'une des [sciences naturelles](#).

Le terme « écologie » vient du [grec](#) oikos (« maison », « habitat ») et logos (« science », « [connaissance](#) ») : c'est la science de la maison, de l'habitat. Il fut inventé en [1866](#) par le [biologiste](#) allemand [Ernst Haeckel](#), bien que [Henry David Thoreau](#) l'ait peut-être inventé dès [1852](#). Il semble avoir été utilisé pour la première fois en [français](#) vers [1874](#). Dans son ouvrage Morphologie générale des organismes, Haeckel désignait en ces termes:

L'écologie se définit rigoureusement par l'objet d'étude défini ci-dessus. On y distingue deux ensembles :

- les [êtres vivants](#) ([biocénose](#))
- le milieu physique ([biotope](#)), le tout formant l'[écosystème](#).

L'écologie étudie les flux d'[énergie](#) et de matières circulant dans un [écosystème](#). L'écosystème désigne un ensemble homogène localisé (une [forêt](#), une [prairie](#), un [étang](#)...), c'est un [habitat](#) local.

X.2.2. Impact de la fabrication à base de géopolymère

La chimie géopolymère est basée sur l'utilisation de la silice et de l'alumine. Ces éléments ne produisent pas de la pollution atmosphérique au cours de la manipulation. L'utilisation des produits géopolymères est très intéressante surtout dans le contexte écologique. Pour une même contrainte environnementale, il est possible de fabriquer plus de ciment géopolymère que de ciment portland. Cette fabrication ne dégage pas de gaz carbonique qu'en très faibles quantités.

L'impact sur la santé humaine est très réduit. Pourtant on doit prendre des mesures sociales et techniques au cours de l'installation de l'usine de fabrication. Par exemple, on essaie de recycler la soude en excès au cours de la fabrication.

CONCLUSION

Des études bibliographiques ont permis d'acquérir les différents résultats de la littérature technique. La connaissance des travaux effectués par différents chercheurs nous aide, dans la première partie, à bien comprendre la chimie géopolymère et nous amène aussi à innover un nouveau matériau.

La partie expérimentale est marquée par la fabrication d'un nouveau liant. La présentation des matières premières nous a permis de connaître leurs caractéristiques, leurs types et leurs propriétés à l'état brut. Ensuite, pour avoir les propriétés optimales adéquates aux expérimentations, nous avons effectué des préparations telles que le broyage, le séchage et le tamisage. Beaucoup de tests, aussi bien chimiques que physiques, ont été effectués sur les matières premières prétraitées.

Le résultat final est acceptable malgré les failles qu'on peut citer ci-dessous. Notre première remarque portera sur l'excès de la soude au niveau du nouveau produit. Il y a toujours une partie qui ne participe pas à la réaction. Pourtant, si la soude mise en jeu est insuffisante, on constate qu'il y a une conséquence négative au point de vue rendement et résistance du produit. Il faut souligner aussi que le temps de prise est assez long par rapport aux autres liants. Cela est dû à la température de l'endroit où on conserve l'échantillon car les deux paramètres ont une liaison étroite.

Cette étude s'est terminée par l'évaluation économique et écologique. Malgré la fluctuation du coût des matières premières dans le marché, on peut produire le nouveau liant dans maintes domaines tels les matériaux de constructions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ANDRIANARY Phillipe**, «*Polymère*» cours DEA Sciences des matériaux 2006
- [2] **ANDRIANIRIANA Feno R**, «*Contribution à l'élaboration de briques de terres stabilisée par polymérisation de la matrice argileuse, cas de la latérite de Vontovorona* » Mémoire DEA SM 2003
- [3] **DERRIEN Anne – Cécile**, «*Synthèse et caractérisation physico-chimique de géopolymère* ». Thèse : Université de Rennes 1, 08 octobre 2004
- [4] **NEKRASOV B.**, «*Chimie minérale* », Edition Mir Moscou
- [5] **MONTEL C.**, «*Silicate alcalin* » Technique de l'ingénieur, Tome J.6 1967
- [6] **DAVIDOVITS J.**, «*Synthesis of new high temperature geopolymers for reinforced plastic/composite* », SPE PACTEC' 79 USA 1979
- [7] **DAVIDOVITS J.**, «*Mineral Polymers and Methods of Marketing them* » US Patent, 1982
- [8] **DAVIDOVITS J.**, France, vol 1-2, 1988, «*Proceeding of geopolymer* » 88, European conference on soft Mineralurgy. Université de Technologie, Compiègne.
- [9] **DAVIDOVITS J.**, 1991, «*Géopolymères : Inorganic Polymeric New Materials* » J. Thermal Analysis, vol 37, p 1633-1656.
- [10] **DAVIDOVITS J.**, French patentent 1992 «*Method for the obtention of geopolymer cement, with no CO2 emission, and product there by obtained* »
- [11] **HEITZMANN R. F., GRAVITT B. B. and Sawyer J. L.**, US Patent 1989 «*Cement composition curable at low temperature* »
- [12] **LAFUMA H., MASSON et Cie**, «*Chimie appliquée aux matériaux de construction chaux et ciments, céramique et verrerie* », Paris 1962.
- [13] **P. PASCAL, MASSON et Cie**, «*Nouveau traité de Chimie minérale*», Tome II 1966
- [14] **RAKOTOMAMONJY P.** et ses collègues. «*Contribution aux études sur la valorisation de la silice et silicate soluble*». Mémoire d'ingénieur du Génie Chimique
- [15] **RANDRIANJA R.**, ESPA 2003 «*Les nouvelles méthodes de caractérisation des matériaux minéraux*»
- [16] **RANDRIANJA R.**, ESPA 2003 «*Les Argiles*».
- [17] **RATOVONDRAHONA J. et RAKOTONIRINA Z.**, «*Essai de fabrication d'une résine minérale par le procédé de géopolymérisation*». Mémoire DEA SM 2006
- [18] **RANDRIANJA R.**, ESPA 2003. «*Les Argiles*»

[19] **RANAIVONIRIVO V.**, ESPA 2006. «*Liants minéraux*». Cours DEA Sciences des Matériaux.

[20] **RAHELIARILALAO B.**, ESPA 2006. «*Caractéristiques thermiques des matériaux*». Cours DEA Sciences des Matériaux.

SITE WEB

Larousse 2006

Encyclopédie Encarta 2007

<http://www.wikipedia.org>

<http://www.techno-science.net>

<http://www.scienceamusante.net>

<http://www.geopolymer.org>

<http://www.silmaco.com>

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
CHAPITRE I: LES LIANTS MINÉRAUX.....	3
I.1. Définition.....	3
I.2. Les ciments.....	3
I.3. Caractéristiques mécaniques.....	6
I.4. Domaine d'utilisation.....	7
CHAPITRE II: LE SILICATE ET L'ALUMINE.....	10
II.1. La silice.....	10
II.2. Les silicates.....	12
II.3. L'alumine.....	14
CHAPITRE III : L'ARGILE ET LES LATERITES.....	17
III.1. Le sol.....	17
III.2. L'argile.....	21
III.3. Le kaolin.....	23
III.4. Les laterites	24
CHAPITRE IV : POLYMERES.....	27
IV.1. Définition.....	28
IV.2. Polymérisation.....	28
IV.3. Réaction de polymérisation.....	29
IV.4. Types de polymère.....	32
IV.5.Nomenclature.....	32
CHAPITRE V : GEOPOLYMERES.....	33
V.1. Définition.....	33
V.2. Géopolymérisation	34
V.3. Géosynthèse.....	35
V.4. Structures.....	35
V.5. Différents produits geopolymères.....	38
CHAPITRE VI : LES SILICATES SOLUBLES.....	39
VI.1. Introduction.....	40
VI.2. Methode par voie humide.....	40
VI.3. Méthode par voie sèche ou fusion alcaline.....	40
PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES.....	42

CHAPITRE VII : CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES.....43

VII.1. Provenance des matières premières.....	43
VII.2.Caractérisation des matières premières.....	43
VII.3.Résultats de la caractérisation des matières premières.....	46

CHAPITRE VIII : ESSAI DE FABRICATION DU LIANT.....47

VIII.1. Matériel utilisé.....	47
VIII.2. Prétraitements des matières premières.....	50
VIII.3. Fabrication de silicate de sodium.....	51
VIII.4.Fabrication de résine minérale.....	53
VIII.5. Fabrication du nouveau produit.....	56
VIII.6.Caractérisation des différents produits.....	59

CHAPITRE IX : APPLICATIONS AUX MATERIAUX DE CONSTRUCTION.. 60

IX.1. Application à la stabilisation des latérites.....	61
IX.2. Application aux agglomérés à base de sable.....	62

CHAPITRE X : EVALUATIONS ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE 66

X.1. Evaluation économique.....	66
X.2. Evaluation environnementale.....	67

CONCLUSION 68

Bibliographie

Annexes

ANNEXES

**ANNEXE A :
QUELQUES TERMES À UTILISER POUR CARACTÉRISER LA NATURE D'UN SOL**

Termes à utiliser	Caractéristique
Sable : - Grains fins - Moyens - Grossiers	< 0,2mm 0,2mm à 0,5mm 0,5mm à 2mm
Argiles	- rouges, blanches, grises, verdâtres, bleuâtre - plastique quand c'est collant - friable quand c'est pulvérulent
Sable argileux (sable dominant) : - Grains fins - Grains moyens - Grains grossiers	< 0,2mm 0,2mm à 0,5mm 0,5mm à 2mm
Argile sableuse (argile dominante)	- rouges, blanches, grises, verdâtres, bleuâtre - plastique - friable
Gravats : galets et grains	2mm à 10cm
Roche dure	- rouge, blanche, grise, verdâtre, noir, beige - Arènes : désagrégation des roches sur place

ANNEXE B :

DOSAGE DE LA SILICE ET DE L'ALUMINE

1- Dosage de silice SiO_2

- Attaquer dans un Becher 1g d'échantillon avec 60 ml de mélange triacides
- Chauffer progressivement jusqu'à fumée blanche, puis reprendre par HCl à 10 %.

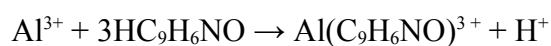
Filtrer, Laver, puis rincer avec de l'eau bouillante et on obtient :

- a- Le filtrat (F) contenant Fe, Al, Mg, Ca, Ti et Ni
- b- Le résidu (R) contenant de la silice à peser

$$\% \text{SiO}_2 = (\text{R} * 100) \%$$

2- Dosage de l'alumine Al_2O_3

- On fait la prise 100ml de F qu'on ajoute 30ml de Précipitant*
- Chauffer jusqu'à entrée en ébullition
- Mettre dans un bain-marie bouillant.
- Pour séparer le précipité de Al $(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$, ajouter goutte à goutte une solution de 2N de CH_3COOH_4 (Ammonium acétate)
- Laisser reposer pendant 10 à 15 minutes dans un bain-marie, filtrer ensuite à travers un creuset filtrant (verre fritté) préalablement lavé et séché à 130 °C jusqu'à poids constant.
- Lors de la précipitation, il se produit la réaction :



Calcul: soit m la masse de $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$ obtenue à partir de 100 ml de F (volume de filtrat) lors de l'attaque triacide

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = (0.11 * m * F) \%$$

Préparation de précipitant

Prendre 3g d'hydroxy- 8-quinoleine à dissoudre dans la plus petite quantité d'acide acétique

- Diluer dans l'eau distillée jusqu'à 100 ml
- Ajouter de l'ammoniaque jusqu'à apparition de trouble
- Dissoudre le dit trouble dans quelques gouttes de CH_3COOH

Préparation de mélange triacide

Ce mélange demande:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 115 \text{ ml}$$

$$\text{HNO}_3 = 100 \text{ ml}$$

$$\text{HCl} = 300 \text{ ml}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 485 \text{ ml}$$

ANNEXE C :

MODULE DE FINESSE D'UN GRANULAT

Le module de finesse d'un granulat est égal au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante :

d [mm]	0.16	0.315	0.63	1.25	2.5	5	10	20	40	80
Relation entre d[mm] et module de tamis										

$$\text{Mod} = 31 + 10 \log d[\text{mm}]$$

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante; par exemple le sable a pour module de finesse. $M_f = 2.66$ calculé ainsi :

Refus sur le tamis

Diamètre d[mm]	%
0.16	93
0.315	81
0.63	57
1.25	27
2.5	8
5	0
Total	266

$$M_f = \text{Module de finesse} = 1/100 \times 266$$

Correction éventuellement du module de finesse de sable

On pourra utiliser la règle d'Abrams :

Soient :

sable S_1 et M_{f1} son module de finesse

sable S_2 et M_{f2} son module de finesse

M_f module de finesse de mélange; les proportions des deux sables composant devraient être les suivantes :

$$\text{Proportion du sable } S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

$$\text{Proportion du sable } S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$$

Calcul

Diamètre du tamis d[mm]	S_1	S_2
0.16	92	74
0.315	82	58
0.63	70	28
1.25	53	0
2.5	10	0
5	2	0
Total	309	160

$$M_{f1} = \frac{309}{100} = 3.09$$

$$M_{f2} = \frac{160}{100} = 1.60$$

Le pourcentage de S_1 et S_2

Soit $M_f = 2.66$

On trouve le résultat $S_1 = 29\%$ et $S_2 = 71\%$

Auteurs : **RAKOTOARIMANANA** Mike Jean Yves
RASOLOFONIRINA Andry Franck

Titre : « ESSAI DE FABRICATION D'UN CIMENT PAR LE PROCEDE DE GEOPOLYMERISATION »

Nombre de pages : 69

Nombre de tableaux : 19

Nombre de figures : 37

RESUME

Ce présent mémoire ayant pour thème : « ESSAI DE FABRICATION D'UN CIMENT PAR LE PROCEDE DE GEOPOLYMERISATION » a pu être réalisé grâce à la collaboration entre le Département Sciences des Matériaux et le Département Génie Chimique.

L'objectif consiste à chercher un nouveau liant en adoptant la chimie géopolymère. Les matières premières utilisées sont le kaolin, la soude caustique et les cendres de balle de riz. Ces matières sont facilement accessibles mais le coût de la soude augmente le coût de production.

La synthèse des réactifs donne des résultats intéressants en donnant un nouveau produit applicable aux matériaux de construction.

Mots clés : Géopolymérisation, Kaolin, Soude caustique, Cendres de balle de riz, Ciment.

ABSTRACT

This present memory having for theme: "TEST OF MANUFACTURE OF A CEMENT BY THE PROCESS OF GEOPOLYMERISATION" has can be achieved thanks to the collaboration between the Department of the Science of the Materials and the Mineral chemistry Department.

The objective consists in looking for a new binder while adopting the chemistry géopolymère. The used raw materials are the kaolin, the caustic sodium carbonate and the ashes of bullet of rice. These matters are easily accessible but the cost of sodium carbonate increases the cost of production.

The synthesis of the reagents deal of the interesting results while giving a new product applicable to the materials of construction.

Keys words : Geopolymerisation, Kaolin, Caustic sodium carbonate, Ashes of bullet of rice, Ciment.

Directeur de recherche:

Professeur **RANAIVONIRIVO** Velomanantsoa Gabriely

Adresses des auteurs :

Lot IPT 92 Itaosy 102 Tana

Lot VT-11 Ampahateza Ambohipo 101 Tana

E-mail :

Yves_arimana@yahoo.fr

andryfranck@yahoo.fr