

TABLEAU DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
DÉDICACE	ii
TABLEAU DES MATIÈRES	iii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vi
LISTE DE FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES	3
Chapitre I: GÉNÉRALITÉ SUR LE CIMENT	3
I.1. Définition.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Matières premières.....	5
I.3.1. Calcaire	5
I.3.2. Argiles.....	5
❖ Définition.....	5
❖ Structure des minéraux argileux	6
❖ Groupe	7
I.3.3. Ajouts minéraux	8
a) Principaux ajouts minéraux inertes.....	8
b) Principaux ajouts minéraux actifs	8
I.4. Normalisation et classification des ciments	9
I.4.1. Normalisation	9
I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale.....	11
I.5. Procédé de fabrication.....	11
I.5.2. Processus de fabrication de ciment Portland	13
I.5.2.1. Extraction de la matière première dans la carrière et son homogénéisation.....	13
I.5.2.2. Préparation des matières premières afin de constituer le cru (ou pâte).....	13
I.5.2.3. Cuisson aboutissant à la création du clinker	13
I.5.2.4 : Broyage de clinker et des ajouts pour fabriquer le ciment.....	14
I.5.2.5 : Stockage et expédition des ciments.....	15
I.6 : Chimie du ciment.....	15
I.6.1 : Notations chimiques cimentières.....	15
I.6.2: Étude de clinker.....	16
I.6.2.1 : Composition chimique du clinker.....	16
I.6.2.2 : Phases minérales du clinker	17
I.6.3 : Hydratation et prise du ciment CPA.....	21
I.6.3 1: Hydratation de la C ₃ S.....	21

I.6.3.2: Hydratation du C ₂ S.....	22
I.6.3.3 : Hydratation de l'aluminat tricalcique C ₃ A.....	23
I.6.3.4 : Hydratation des aluminoferrites de calcium C ₄ AF.....	24
I.7 .Conclusion.....	27
Chapitre II : VALORISATION DES DÉCHETS d'ANDRALANITRA.....	28
II.1: Introduction.....	28
II.2 : Définition du terme : « déchet ».....	28
II.3. Localisation et historique : « déchet d'Andralanitra ».....	28
Source : « Auteur ».....	30
II.4.Types de déchets d'Andralanitra.....	31
II.5. Les techniques de traitement.....	32
II.6.Conclusion.....	33
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	34
Chapitre III : MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	35
III.1.Caractérisation des matières premières.....	35
III.1.1. Matières premières.....	35
III.1.2. Hydratation.....	35
III.2. Caractérisation du ciment.....	35
III.2.1. Analyses chimiques.....	35
III.2.2 : Détermination de la composition minéralogique.....	36
III.2.3 : Performances des ciments.....	37
III.2.3.1.Module hydraulique de Michaelis.....	37
III.2.3.2.Module silicique de Kühl.....	37
III.2.3.3Module aluminoferrique de Kühl.....	37
III.2.3.4. Indice d'hydraulicité de Vicat.....	37
III.2.3.5. Indice de saturation de Kühl.....	38
III.2.3.6. Facteur de saturation de Lea et Parker.....	38
III.2.4: Chaux libre.....	39
III.2.5. Analyse physiques.....	39
III.2.5.1. Caractérisation de la pate.....	39
III.2.5.2. Caractérisation du mortier.....	42
III.2.5.2.1 Mesure des résistances à la compression et à la flexion (EN 196-1).....	42
III.3.Conclusion.....	46
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	47
Chapitre IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	48
IV.1.Introduction.....	48
IV.2. : Caractérisation chimique du ciment.....	48
IV.2.1.Caractéristique des matières premières.....	49
IV.3: Caractérisation physique du ciment.....	52

IV.3.1: Temps de prise	53
IV.3.2. Résistance à la compression	54
IV.3.3.Résistance à la flexion.....	54
IV.4.Conclusion.....	55
CONCLUSION GÉNÉRALE	57
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	58
ANNEXE.....	I

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CHF : Ciment de Haut fourneau

CPA : Ciment Portland Artificiel

CPJ : Ciment Portland composé

CPZ : Ciment Pouzzolanique

CUA : Commune Urbaine d'Antananarivo

DIB : Déchets Industriels Banals

DIS : Déchets Industriels Spéciaux

DMS : Déchets Ménagères Spéciaux

FFOM : Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères

MEB : Microscope Electronique à Balayage

NF : Norme Française

NM : Norme Malgache

PCB : PolyChloroBiphényles

PET : Poly Ethylène Téréphtalate

PVC : PolyChlorure de Vinyle

REFIOM : Résidus d'Épuration de Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères

SAMVA : Service Autonome de Maintenance de la Ville d'Antananarivo

LISTE DE FIGURES

FIGURE 1: PHYLLOSILICATES	6
FIGURE 2: CONSTITUTION ET JUXTAPOSITION DES FEUILLETS TÉTRAÉDRIQUES ET OCTAÉDRIQUES	7
FIGURE 3 : GRAINS DE POUZZOLANE [<i>J.BEAUCHAMP, LE CENTRE 2009</i>]	8
FIGURE 4 : SCHÉMA DU PROCÉDÉ DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND	12
FIGURE 5:ÉLABORATION DU CLINKER	14
FIGURE 6:OBTENTION DU CIMENT PAR BROyage DU CLINKER [<i>ROMILLIAT E</i>]	15
FIGURE 7: RÉACTIONS DANS LE CRU EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	17
FIGURE 8: POLYMORPHES AU SILICATE TRICALCIQUE (C ₃ S) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	17
FIGURE 9: DIAGRAMME DE PHASE CAO-SIO ₂ [<i>TAYLOR</i>]	19
FIGURE 10: POLYMORPHES DU SILICATE DICALCIQUE (C ₂ S) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	20
FIGURE 11: DIAGRAMME DE LA PHASE CAO-AL ₂ O ₃ [<i>H.F.W.TAYLOR</i>]	21
FIGURE 12 : FIBRE DE CSH (MEB 1100 X) (PATE DE CIMENT À 7 J) [<i>DOC ; HYDRATATION</i>]	22
FIGURE 13: CRISTAUX DE PORTLANDITE (MEB7000 X) (PATE DE CIMENT À 7 J) [<i>DOC ; HYDRATATION</i>]	22
FIGURE 14: AIGUILLE D'ETTRINGUITE [<i>DOC ; HYDRATATION</i>]	23
FIGURE 15: CRISTAUX HEXAGONAUX DE MONOSULFOALUMINATE	23
FIGURE 16: REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DE L'HYDRATATION DES GRAINS DE CIMENT	25
FIGURE 17: LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	30
FIGURE 18: CENDRES DES DÉCHETS D'ANDRALANITRA	35
FIGURE 19: MALAXEUR [<i>DOC</i>]	40
FIGURE 20: APPAREIL DE VICAT MUNI DE L' AIGUILLE AMOVIBLE [<i>V.PHOUMMAVONG</i>]	40
FIGURE 21: MOULE POUR MOULAGE DES ÉPROUVETTES DE MORTIER [<i>V.PHOUMMAVONG</i>]	44

FIGURE 22: APPAREIL À CHOCS [<i>DOC</i>]	44
FIGURE 23: MACHINE D'ESSAI DE RESISTANCE À LA FLEXION [<i>DOC</i>]	45
FIGURE 24: MACHINE D'ESSAI DE RESISTANCE À LA COMPRESSION [<i>DOC</i>]	45
FIGURE 25: ECRASEMENT SUR LE RÉSISTANCE DE FLEXION	46

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: CINQ TYPES DE CIMENT DE NORME EUROPÉENNE	10
TABLEAU 2: DIFFÉRENTES CLASSES DE CIMENT	11
TABLEAU 3: NOTATIONS CHIMIQUES CIMENTIÈRES.....	15
TABLEAU 4 : LISTE DES PRINCIPAUX HYDRATES FORMÉS LORS DE L'HYDRATATION DU CIMENT.....	26
TABLEAU 5: EXTRAIT DU TABLEAU DES COMPOSITIONS DES ORDURES MÉNAGÈRES DE SAMVA EN 2011	31
TABLEAU 6: CRITÈRES CHIMIQUES DE COMPOSITION DU CLINKER	38
TABLEAU 7: OPÉRATION POUR LA FABRICATION DE LA PÂTE NORMALISÉE .	41
TABLEAU 8: GRANULOMÉTRIE DU SABLE NORMALISÉE	42
TABLEAU 9: OPÉRATION POUR LA FABRICATION DU MORTIER NORMAL [V.PHOUMMAVONG]	43
TABLEAU 10: COMPOSITION CHIMIQUE DES MATIÈRES PREMIÈRES PAR DOSAGE.....	48
TABLEAU 11: COMPOSITION MINÉRALOGIQUE	48
TABLEAU 12: COMPOSITION CHIMIQUE DES CIMENTS SYNTHÉTISÉS PAR DOSAGE.....	49
TABLEAU 13: PERFORMANCE DES CIMENTS	49
TABLEAU 14: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT A.....	51
TABLEAU 15: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT B.....	51
TABLEAU 16: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT C.....	51
TABLEAU 17: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT D.....	52
TABLEAU 18: MESURE DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET À LA FLEXION (PETITE QUANTITÉ).....	52
TABLEAU 19: MESURE DE RÉSISTANCE COMPRESSION ET FLEXION (GRANDE QUANTITÉ DE DÉCHET)	53
TABLEAU 20: ESSAI DE TEMPS DE PRISE DU CIMENT SYNTHÉTISÉ	53
TABLEAU 21 : DÉTERMINATION DE LA PERTE AU FEU À 975 °C.....	I
TABLEAU 22: DOSAGE DES RÉSIDUS INSOLUBLES (RI) DANS L'ACIDE CHLORHYDRIQUE	I

TABLEAU 23: DOSAGE DES RÉSIDUS INSOLUBLES ET SILICE (SiO ₂)	II
TABLEAU 24: DOSAGE DE L'ALUMINE (Al ₂ O ₃) ET DE L'OXYDE DE FER (Fe ₂ O ₃)	III
TABLEAU 25: DOSAGE DE L'OXYDE DE FER (Fe ₂ O ₃).....	IV
TABLEAU 26: DOSAGE DE CHAUX (CAO) TOTALE.....	V
TABLEAU 27: DOSAGE DE MAGNÉSIUM (MGO).....	VI
TABLEAU 28: DOSAGE DU SULFATE (SO ₃ ²⁻)	VI

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les déchets ne sont pas inutiles ni sans valeurs. Depuis déjà un certain temps, ils sont considérés comme une ressource précieuse, et partant des matières premières et de l'énergie peuvent en être extraites. Le réemploi, la réutilisation et le recyclage des déchets contribuent à économiser des ressources naturelles et à limiter les pressions sur l'environnement.

C'est pourquoi le terme « traitement des déchets » est, de plus en plus souvent, remplacé par l'industrie des ressources. Traditionnellement, l'industrie cimentière emploie 4/5 de calcaire et 1/5 d'argile pour fabriquer le ciment. Depuis longtemps les cimenteries recourent à des sous produits pour substituer des matières premières sans modifier la qualité du ciment.

Cependant, pour Madagascar, en l'occurrence la commune Urbaine d'Antananarivo [*Rindra 2011*] gérer les déchets pose un grand problème, bien qu'ils soient tous dans plusieurs quartiers d'Antananarivo collectés, transportés et déposés dans des endroits à ciel ouvert comme le cas d'Andralanitra. En plus, la ville d'Antananarivo en globe 192 quartiers ou fokontany abritant 2,0 millions d'habitants qui produisent 250 000 tonnes de déchets municipaux [*Gevalor*]. Compte tenu de ce que les quantités ces derniers augmentent, les sites de décharge sont sursaturés. Par conséquent, cela engendre de nombreux inconvénients sur le plan sanitaire et sur le plan environnemental.

Face à cette situation, la réflexion tend à se pencher vers la recherche d'un moyen efficace permettant de pouvoir réduire les déchets en grande quantité. C'est dans cette optique que l'idée de traiter les sites pollués, tels la décharge d'Andralanitra, nous oriente vers la valorisation des sédiments à l'instar d'adjuvant d'un clinker.

En effet, l'objectif de cette recherche est axé à valoriser les déchets de ce site étudié pour fabriquer du liant hydraulique. En fait, leurs cendres sont utilisées comme ajout principal dans l'élaboration du ciment. Donc Cela permet de pouvoir réduire et éliminer des déchets par recyclage et d'emblée de protéger l'environnement.

Pour mieux saisir ce mémoire, il va s'articuler principalement sur trois parties : la première décortique une étude bibliographique qui concerne la généralité du ciment, le processus jusqu'à la fabrication et la valorisation existant sur les déchets. La deuxième est consacrée aux analyses expérimentales où sont décrits les matériels utilisés, le protocole expérimental

et les techniques d'analyse. Finalement, la dernière partie va récapituler les résultats et les discussions y afférentes, suivie de la conclusion générale.

PREMIÈRE PARTIE :
ÉTUDES
BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I: GÉNÉRALITÉ SUR LE CIMENT

I.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une poudre minérale qui, par simple mélange avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et qui durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et la stabilité même sous l'eau. [RANAIVONJARIVO ; S.Catinaud 2000]

En fait, les différents états du ciment peuvent être classés en trois parties: [R.Dupain]

- Avant son mélange avec l'eau, le ciment s'appelle: « ciment anhydre » cela veut dire mélange sans eau ;
- Ciment hydraté: les composés insolubles dans l'eau, obtenus par combinaison chimique de l'eau et de la poudre de ciment anhydre ;
- Pâte de ciment durcissant: la combinaison de ciment anhydre et le ciment hydraté.

I.2. Historique

Auparavant, le ciment aurait été inventé par les Égyptiens, puis fut amélioré par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à l'argile. La chaux, connue depuis l'antiquité: ne durcit pas sous l'eau.

Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage fut repris et généralisé par les Romains.

Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux additionnée à des adjuvants tels des tuiles ou briques concassées, où l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane est très utilisée comme adjuvant.

Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il dénomma « chaux éminemment » hydrauliques, ou chaux limites, en 1840.

Par suite, la recherche sur l'hydraulicité des chaux débuta à la fin du XVIIIe siècle pour aboutir vers 1840, à la fabrication des ciments modernes. Elle concerne les chaux grasses, non hydrauliques, qui ne durcissent pas sous l'eau, puis les chaux hydrauliques qui durcissent même sous l'eau, les chaux éminemment hydrauliques (riches en argiles) qui se solidifient très rapidement, et les chaux limites (trop riches en argiles) qui le soit très vite aussi mais qui se décomposent, si elles ne sont pas cuites au degré de fusion pâteuse [R.Dupain].

En 1796, James Parker découvrit, sur l'Île de Sheppey en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900 °C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptisa commercialement ciment romain. Ce ciment acquit par la suite, de 1820 à 1920 environ, une grande réputation. Il fut fabriqué dans toute l'Europe et servit à faire des moulages au gabarit, ou à fabriquer des pierres artificielles de ciment moulé.

Au début du 19^{em} siècle, dans toute l'Europe, une émulation se créa pour remplacer les fameux mélanges chaux et pouzzolanes datant de l'époque romaine. La pouzzolane, importée d'Italie, coûta cher et de qualité très inégale. Dans l'esprit du siècle des lumières, pour des raisons économiques, d'indépendance nationale et de recherche de technicité pour aller vers plus d'hydraulicité, de nombreux chauxfourniers se mirent à cuire des calcaires moins purs, de manière empirique, avec plus ou moins de bonheur. Et le français Louis Vicat découvrit en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux (concernant la proportion d'argile et la température de cuisson) et publia ses travaux sans prendre de brevet.

En 1824, le Britannique Joseph Aspdin déposa un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appela commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemble aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche. Ce fut un ciment similaire à celui décrit par Vicat, bien que son brevet soit imprécis. Mais il fallut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits aujourd'hui ciments Portland) toujours par Louis Vicat (une cuisson à température de fusion pâteuse de 1 450 °C qui permet d'obtenir le clinker) pour parvenir une réelle fabrication de ces ciments modernes, et à voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé.

En 1835, l'augmentation de la température de cuisson donne naissance au véritable ciment Portland.

En 1838, William Aspdin (fils de Joseph) put convaincre Brunel de l'utiliser pour réparer son tunnel sous la Tamise, ce fut la première utilisation du ciment Portland en génie civil.

La première usine de ciment fut créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se réaliser que grâce à l'apparition de matériels nouveaux, tels le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire à produire une tonne de clinker, constituant la base du ciment, est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement [*W.H.Duda, C.Avenier*].

I.3. Matières premières

En général, nous pouvons fabriquer du ciment à partir des matériaux : calcaire, argile et ajouts minéraux.

I.3.1. Calcaire

Les calcaires peuvent être de pureté et de duretés variables, ils proviennent des dépôts de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisés par l'intermédiaire d'organismes vivants (mollusques, algues). Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins [Doc].

Il existe deux types de calcaire :

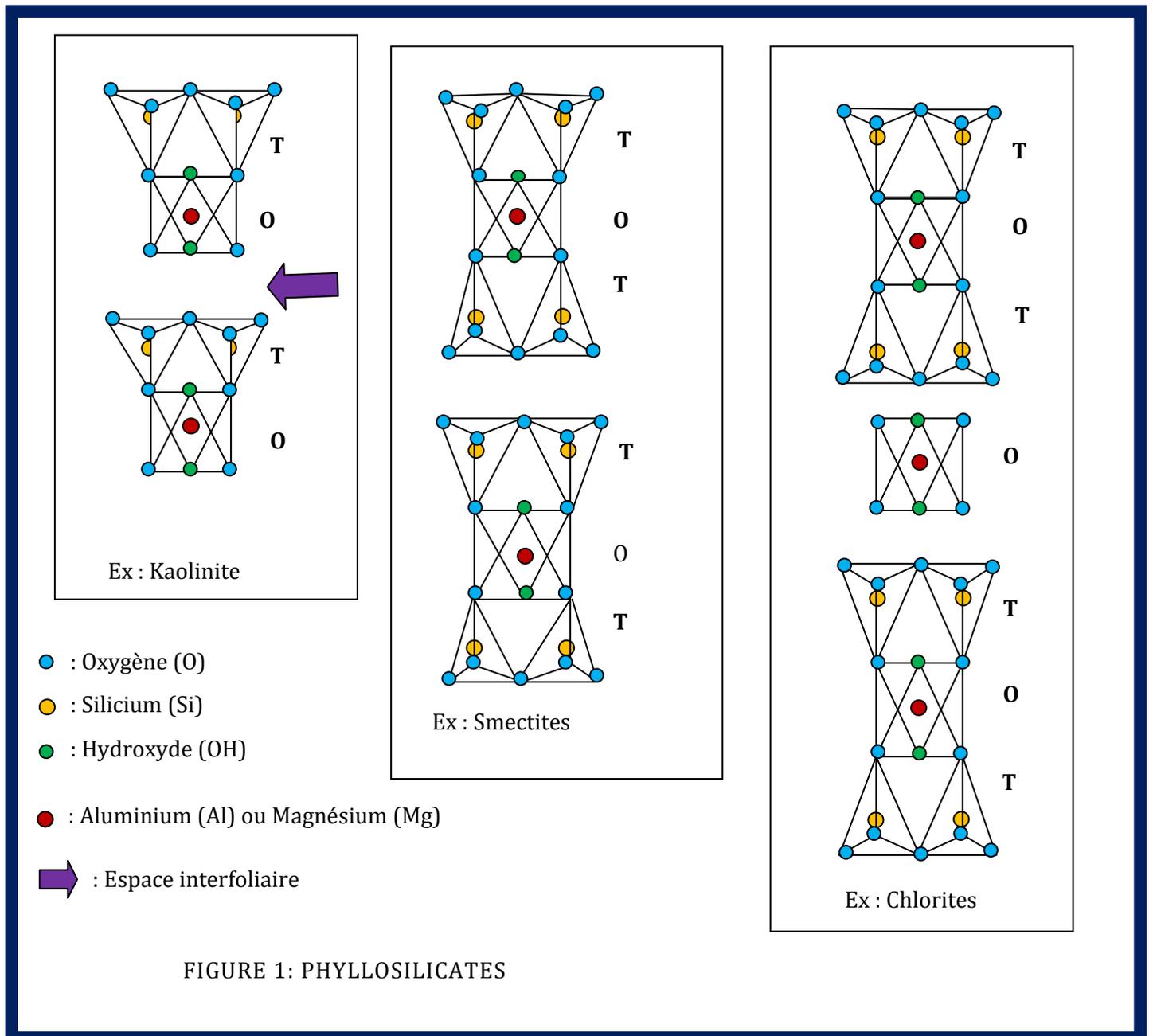
Calcaire pur : celui dit « pur » contient au moins 95 % de CaO_3 . Il donne une chaux aérienne qui fera prise par réaction avec le gaz carbonique de l'air ;

Calcaire argileux : sa cuisson permet d'obtenir une chaux hydraulique faisant prise par réaction de l'eau. La chaux sera plus hydraulique et plus résistante, si le pourcentage d'argile est plus élevé.

I.3.2. Argiles

❖ Définition

Le terme argile correspond à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à 2 μm et ayant la propriété de donner avec l'eau une pâte qui se laisse façonner, qui devient consistante au séchage, qui durcit et qui devient plus ou moins inaltérable en présence d'eau, lorsqu'elle est portée à une certaine température. Dans son sens minéralogique, l'argile est principalement composée d'un ensemble de minéraux argileux dont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant soit une structure feuilletée tridimensionnelle : phyllosilicates (figure 1) ou minéraux phylliteux, soit une structure bidimensionnelle fibreuse ou hormite (sépiolite et palygorskite) ou encore unidimensionnelle amorphe (allophane). Sa structure en feuillets des phyllosilicates y induit sa plasticité, alors que celle fibreuse explique sa propriété d'absorption. Elle est associée à d'autres minéraux argileux et non argileux comme les feldspaths, le quartz, les carbonates, les sulfates, [Njopwouo, 1984].



❖ Structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont tous constitués d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupés par un espace appelé espace interfoliaire. Les feuillets tétraédriques sont agencés en mailles hexagonales et sont constitués de tétraèdres d'oxygène entourant un atome de silicium (Si - O) ou aluminium (Al - OH). Les feuillets octaédriques sont composés d'octaèdres formés par deux plans d'oxygènes - hydroxydes encadrant des atomes plus larges tels : Al, Fe, Mg, Li. Les cations constituant du feuillet octaédrique induisent, selon leur valence, une modification du taux de remplissage de la couche. Ainsi, une couche octaédrique purement magnésienne par exemple, constituée donc d'atomes de Mg^{2+} , à un taux de remplissage de 100%, tous les octaèdres sont occupés, il s'agit d'argile trioctaédrique. À l'inverse, pour une couche octaédrique purement alumineuse par exemple, constituée donc d'atomes Al^{3+} , leur taux de remplissage sera au 2/3, deux octaèdres sont remplis et un laissé vide, on parle de vacance. [Njopwono, 1984].

Les deux structures sont présentées par la figure 2 suivante :

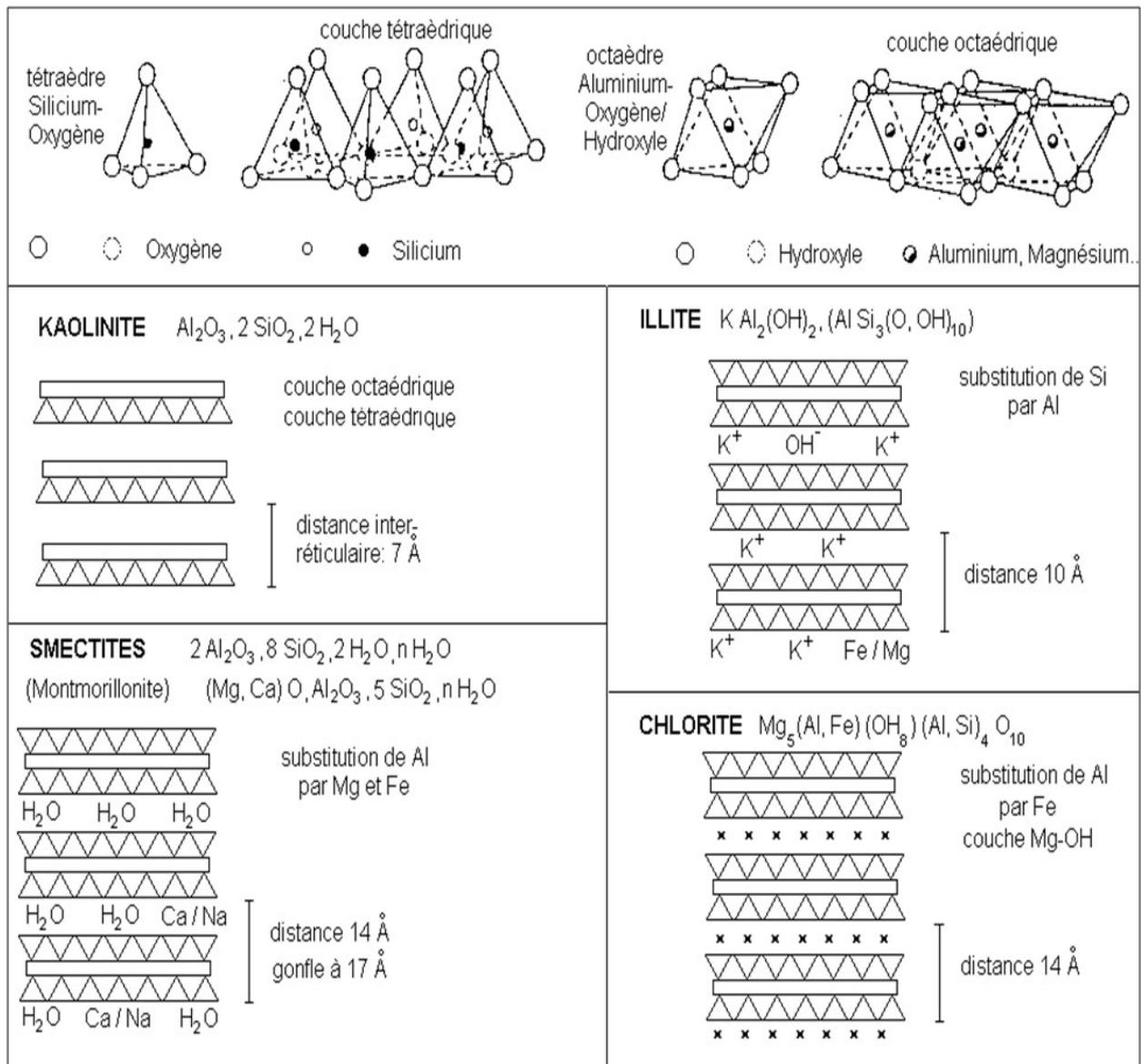


FIGURE 2: CONSTITUTION ET JUXTAPOSITION DES FEUILLETS TÉTRAÉDRIQUES ET OCTAÉDRIQUES

❖ Groupe

Du point physico- chimique, les argiles peuvent être en différents groupes :

- Groupe Kaolin : formule générale : $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$,
- Groupe Halloysite : formule générale : $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$,
- Groupe montmorillonite : formule générale : $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$,
- Groupe des minéraux argileux micacés : (ex : séricite),
- Groupe des minéraux argileux magnésiens : (ex : sépiolite).

Les argiles utilisées en cimenterie sont celles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes susénumérés.

I.3.3. Ajouts minéraux

Ils sont des constituants secondaires dans le ciment. Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centres thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197-1 en ajouts minéraux inertes et actifs.

a) Principaux ajouts minéraux inertes

- **fillers calcaires** : Ce sont des produits obtenus par broyage très fin de roches naturelles présentant une forte proportion en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%. Ils sont ajoutés en tant que fines au ciment c'est-à-dire qu'ils permettent d'améliorer la maniabilité de la pâte de ciment mais sans présenter aucune propriété ni hydrauliques ni pouzzolaniques.

- **schistes calcinés** : Ce sont des produits obtenus par la calcination d'un type d'argile bien défini (schiste). Ces produits sont fabriqués pour être utilisés dans la fabrication de ciment. Ils contiennent déjà certaines phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate mono calcique et même de la chaux libre et du sulfate de calcium. Finement broyés, ils montrent de fortes propriétés hydrauliques et des propriétés pouzzolaniques.

b) Principaux ajouts minéraux actifs

- **Le laitier granulé de haut fourneau** : C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts-fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à 1 750 °C ; figé par refroidissement brusque, il donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportion variable pour être broyé finement avec lui. Il contient de la chaux (45 à 50 %) de la silice (25 à 30 %) de l'alumine (15 % à 20 %) et 10 % environ de magnésie, d'autres oxydes.

- **Les pouzzolanes naturelles ou artificielles** : Ce sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement, soit après calcination, des propriétés « pouzzolaniques ». En général, il s'agit des matières volcaniques.



FIGURE 3 : GRAINS DE POUZZOLANE [J.Beauchamp, le centre 2009]

- **Les fumées de silice** : ce sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe (non cristallisée). Elles sont des sous produits de l'industrie de fabrication de silicium et d'alliage Ferro- silicium.

- **Les cendres volantes siliceuses ou calciques** : Ce sont des particules pulvérulentes récupérées dans les gaz émis par les chaudières des centrales thermiques fonctionnant avec du charbon pulvérisé.

I.4.Normalisation et classification des ciments

I.4.1.Normalisation [RANAIVONIARIVO]

L'objectif de la normalisation est de répondre à un souci de qualité et de régularité des ciments, grâce à des spécifications rigoureuses de leurs compositions et de leurs caractéristiques.

Plusieurs normes sont utilisées pour normaliser les ciments. Elles peuvent être propres à un pays ou adaptées par un ensemble de pays. Les pays membres de l'Union Européenne (UE), par exemple, emploient la même norme (EN 197-1) dans le domaine des ciments.

Dans ce cadre de normalisation Madagascar, a fait sortir ses normes en juillet 2005. Révisées en 2009, les normes et leurs amendements ont été retenus en janvier 2010. Leur utilisation est facultative pendant toutes ces années jusqu'à ce jour.

Le conseil de gouvernement du 9 octobre 2012 a adopté le décret d'application portant sur les normes de matériaux de construction. Ces dernières sur le territoire de Madagascar, y compris les Normes Malagasy sur les ciments élaborées sous la direction du Bureau des Normes de Madagascar, édition Janvier 2010 à savoir :

- NM 031 – 1: ciment à usage courant,
- NM 031 – 2: évaluation de la conformité,
- NM 032 – 1: liants à maçonner,
- NM 032 - 2: ciments pour travaux près bord de mer,
- NM 032 – 3: ciments à usage tropical.

❖ La norme Malagasy NM 031-1

La norme Malagasy de référence des ciments courants est la NM 031-1 inspirée de celle européenne EN 197-1 : « Ciment-Partiel: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».

La NM 031-1 définit et englobe les spécifications de 27 ciments courants différents et de leurs constituants. La définition de chaque ciment inclut les proportions dans lesquelles les constituants doivent être associés pour produire des produits différents dans une plage de six classes de résistance.

Cette définition comporte également les exigences que les constituants doivent satisfaire ainsi que les exigences mécaniques, physiques et chimiques applicables à ces produits et aux classes de résistance.

Par ailleurs, la NM 031-1 établit les critères de conformités et les règles correspondantes. En outre, elle fait référence aux exigences portant sur la durabilité.

Les ciments courants doivent répondre aux exigences de la norme NM 031-1 par conséquent tout ciment importé doit afficher le marquage sur le sac : soit NM, soit CE, soit le double NM et CE attestant:

- pour le marquage NM, que les produits sont conformes aux réglementations malgaches ;
- pour le marquage CE, que les produits sont conformes aux réglementations européennes.

Dans la norme NM 031-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon leur nature et la proportion de leurs constituants.

TABLEAU 1: CINQ TYPES DE CIMENT DE NORME EUROPÉENNE

Types	Désignation
Ciment Portland (CPA)	CEM I
Ciment Portland composites (CPJ)	CEM II
Ciment de haut fourneau (CHF)	CEM III
Ciment pouzzolaniques (CPZ)	CEM IV
Ciments au laitier et aux cendres	CEM V

I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Le mode de classification des ciments le plus utilisé suit les résistances mécaniques et, plus exactement, la résistance à la compression.

La résistance normale d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la NF EN 196-1, mesurée à 28 jours sur mortier normal et exprimé en MPa. Selon la norme NM 031-1, les ciments sont réparties en trois classes de résistance : classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5 (tableau 2).

A chaque classe de résistance, des ciments courants identifiés dans la norme NM 031-1 y correspondent à deux classes au jeune âge définies par :

-Une classe de résistance appelée sous classe normale, notée N,

-Une classe de résistance correspond à une résistance au jeune âge élevée (Rapide), notée R.

TABLEAU 2: DIFFÉRENTES CLASSES DE CIMENT

DÉSIGNATION DE LA CLASSE DE RÉSISTANCE	Résistances à la compression (MPa)		
	à 2 jours	à 28 jours	
	Limite Inférieure	Limite Inférieure	Limite Supérieure
32,5N 32,5R	- ≥ 10	≥ 32,5	≤ 52,5
42,5N 42,5R	≥ 10 ≥ 20	≥ 42,5	≤ 62,5
52,5N 52,5R	≥ 20 ≥ 30	≥ 52,5	-

I.5. Procédé de fabrication

I.5.1. Principes et méthodes de fabrication

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru,
- Cuisson,
- Broyage et conditionnement.

La figure 4 ci-dessous présente les étapes de la fabrication du ciment avec ajout : « ciment portland ».

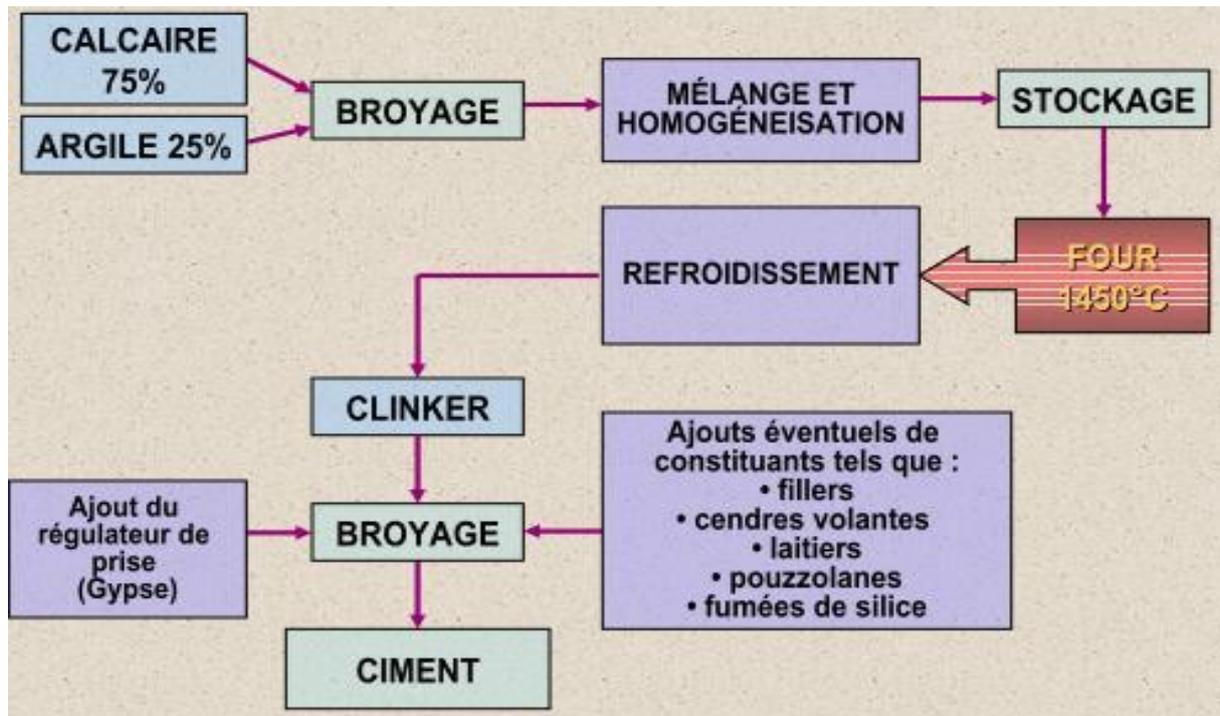


FIGURE 4 : SCHÉMA DU PROCÉDÉ DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND

La préparation de cru au cours de laquelle est réalisé le mélange de calcaire et de l'argile, peut être accomplie suivant quatre procédés différents : la voie sèche, la semi- sèche, la semi-humide, l'humide.

- Dans la voie sèche : les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four ;
- Dans la voie semi- sèche : la farine mélangée à de l'eau forme des granulats qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons ;
- Dans la voie semi- humide : la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre- presse est ensuite extrudé sous forme de granulats et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru ;
- Dans la voie humide : les matières premières sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Celle-ci est ensuite introduite directement dans le four ou peut passer auparavant dans un sécheur [Doc].

I.5.2. Processus de fabrication de ciment Portland

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, puis des contrôles rigoureux et continus de la qualité. Nous pouvons distinguer 5 étapes principales y constituant ce processus de fabrication :

I.5.2.1. Extraction de la matière première dans la carrière et son homogénéisation

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière (Figure : 5 ; étape 1) à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. Même si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre, en fonction de la qualité du gisement exploité, le calcaire en est la matière première principale et introduite à raison de 75 à 80 % dans le mélange cru. Il contient majoritairement de la calcite CaCO_3 (carbonate de calcium). Les autres oxydes sont en général apportés par l'argile (SiO_2 , Al_2O_3), le sable (SiO_2) et le minerai de fer (Fe_2O_3). [Romilliat E].

I.5.2.2. Préparation des matières premières afin de constituer le cru (ou pâte)

Les matières premières sont concassées (Figure 5 : étape 2) afin de disposer des particules de taille inférieure à 50 mm. Un mélange de 80% de calcaire et de 20% d'argile est réalisé dans un hall de préhomogénéisation. La préhomogénéisation (Figure 5 : étape 3) assure la micro homogénéité du mélange cru ainsi que la régularité de sa composition chimique [Romilliat E].

I.5.2.3. Cuisson aboutissant à la création du clinker

La ligne de cuisson est constituée par :

- Un préchauffeur,
- Un four rotatif,
- Un refroidisseur.

Le préchauffeur est une succession d'échangeurs à cyclone qui chauffe progressivement la farine arrivant par le haut, de 50 jusqu'à 850 °C (figure 5 : étape 5).

Les gaz chauds proviennent du four rotatif qui assure ce préchauffage.

Cette étape assure la décarbonisation partielle du cru avant son entrée dans le four. Le four cylindrique (figure 5 : étape 6), de longueur comprise entre 40 à 70 mètre, tourne à une vitesse

de 1,5 à 3,5 tr/min. Grâce à sa légère inclinaison du four, la matière y transite pendant 30 à 60 minutes, en s'avancant vers la partie la plus chaude à 1 450 °C.

Dès son entrée dans le four à 1 050 °C, il se produit des réactions chimiques :

-La matière achève sa décarbonisation et subit plusieurs réactions à l'état solide jusqu'à 1 250 °C. Par la suite, un ensemble de réactions solides- liquides constituant la clinkérisation, conduit à la formation des minéraux constitutifs du clinker ;

-Le refroidisseur (Figure 5: étape 7) fige, par trempe, le clinker à l'état où il se trouve aux températures élevées de cuisson. La vitesse de refroidissement, particulièrement aux hautes températures, affecte le mode et la texture de cristallisation des composés du clinker et, par là-même, leur réactivité. Le choc thermique au cours du refroidissement provoque aussi un réseau de microfissures, qui sera utile par la suite, car il favorise le broyage du clinker.

La figure5 résume l'étape de processus de la fabrication du clinker [Romilliat E].

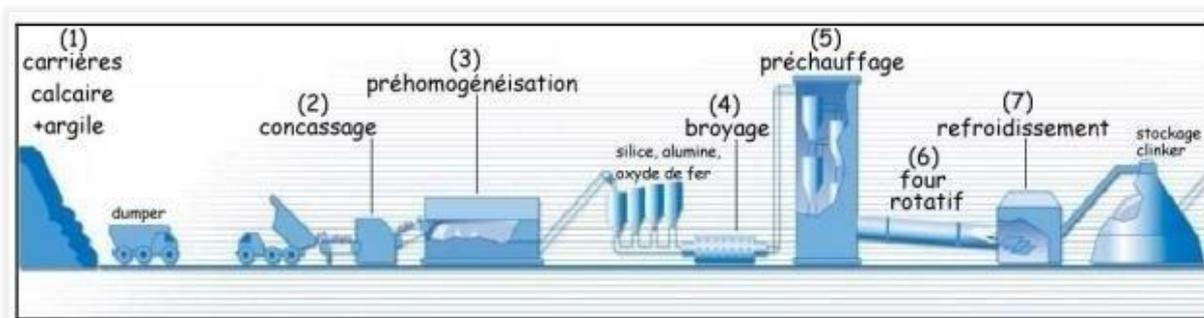


FIGURE 5:ÉLABORATION DU CLINKER

I.5.2.4 : Broyage de clinker et des ajouts pour fabriquer le ciment

A la sortie du four, la granulométrie du clinker est très grossière parce que sa réactivité est suffisante. Le broyage du clinker développe les propriétés hydrauliques du ciment qui lui confère ses principales propriétés rhéologiques. Par la suite, les différents minéraux naturels ou artificiels sont ajoutés (figure : 6 ; étape : 8) pour ajuster la composition du mélange. Ainsi, 5% de sulfate de calcium sont ajoutés sous forme de gypse. Ce composé sert à réguler la prise du ciment en agissant sur la réaction du C₃A.

Le clinker et ses additifs sont réduits finement dans un broyeur à boulets (Figure : 6; étape : 9). Celui-ci comporte un compartiment dégrossisseur et un compartiment finisseur. Un séparateur à cyclone récupère les particules les plus fines afin que le broyage soit plus efficace. Une valeur de surface spécifique courante du ciment est requise de 3 200 cm²/g après le broyage, mesurée par la méthode de Blaine. Pour atteindre cette surface, appelée

finesse, une énergie électrique spécifique de l'ordre de 50 kWh/T doit être fournie. [Romilliat E].

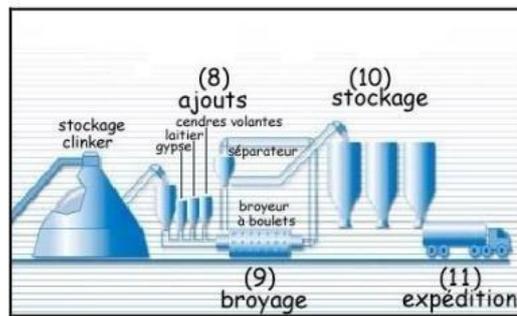


FIGURE 6:OBTENTION DU CIMENT PAR BROyage DU CLINKER [Romilliat E]

I.5.2.5 : Stockage et expédition des ciments

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers les silos de stockage, pour y être soit ensaché, soit expédié en vrac. L'ensachage qui, dans les pays industrialisés, ne représente qu'environ 30 % de la production du ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide des machines capables d'en remplir 2 000 à 4 000 unités par heure.

La livraison en vrac est assurée par camions et/ou wagons [Doc].

I.6 : Chimie du ciment

I.6.1 : Notations chimiques cimentières

Les notations chimiques communément utilisées dans la chimie du ciment sont regroupées dans le tableau 3. [Doc ; Hydratation]

TABEAU 3: NOTATIONS CHIMIQUES CIMENTIÈRES

COMPOSÉS	FORMULES CHIMIQUES	NOMENCLATURES
SILICE	SiO ₂	S
ALUMINE	Al ₂ O ₃	A
FERRITE	Fe ₂ O ₃	F
CHAUX	CaO	C
TRIOXYDE DE SOUFRE	SO ₃	Š
EAU	H ₂ O	H
MAGNÉSIE	MgO	M
DIOXYDE DE CARBONE	CO ₂	Ć
OXYDE DE POTASSIUM	K ₂ O	K
OXYDE DE SODIUM	Na ₂ O	N

I.6.2: Étude de clinker

I.6.2.1 : Composition chimique du clinker

En cas : - clinker portland

Il comprend les oxydes suivants : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂ .

- CaO : il fait des liaisons avec SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ; à l'état libre, il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation.

Réaction d'hydratation du CaO :



Il existe une hausse de résistance du ciment lorsque le pourcentage de composé CaO lié augmente. La teneur en CaO est de 63% à 67% dans le clinker ;

- SiO₂: il réagit avec le CaO qui donne le Silicate de Calcium ; l'augmentation de pourcentage de SiO₂ y provoque plusieurs C₂S, parce qu'il réagit avec tout le CaO. En effet, l'augmentation de C₂S donne une grande durabilité au ciment surtout en milieu agressif, sa teneur est de 21% à 24% ;
- Al₂O₃: Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment ; cependant, une haute teneur en Al₂O₃ donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7% ;
- Fe₂O₃: Il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5% à 4% ;
- MgO : Une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de périclase, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation, sa teneur est inférieure à 5% ;
- TiO₂: Sa teneur est inférieure à 0,5%, il provient des argiles.
- MnO₂: Il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau serait utilisé comme matières premières, sa teneur est de 1,5% ;
- P₂O₅: Se trouve sous forme d'impureté dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2%, il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2 à 0,3%.
- Na₂O et K₂O: Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson ; sa composition est de 0,5 à 1%. Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des principaux minéraux. La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique.

Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment. Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux [Doc].

I.6.2.2 : Phases minérales du clinker

Les principales phases présentes dans les ciments anhydres Portland sont [H.F.W.Taylor, Cim 1993] :

- L'alite (forme impure de silicate tricalcique : Ca_3SiO_5 , notée C_3S),
- La bélite (forme impure desilicate dicalcique : Ca_2SiO_4 , notée C_2S),
- Les aluminates tricalciques ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, noté CaA),
- Les alumino-ferrites calciques ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$, noté Ca_4AF), le gypse ($\text{C}\hat{\text{S}}$) et la chaux libre (CaO notée C).

Ainsi, l'ordre d'apparition de ces différents constituants lors de la fabrication est illustré par la figure 7 ci-après :

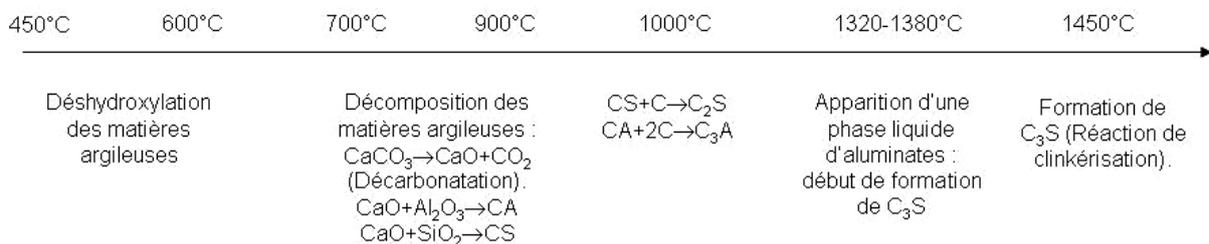


FIGURE 7: RÉACTIONS DANS LE CRU EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

La plupart des phases du clinker peuvent exister sous forme de plusieurs polymorphes. Les polymorphes et la teneur des différents éléments mineurs présents y dépendent, entre autres, de la nature des matières premières, de la température de cuisson et du mode de refroidissement du clinker.

➤ L'alite :

L'alite est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %). Il s'agit d'une forme impure du silicate tricalcique de formule C_3S réagissant très rapidement avec l'eau. L'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux hydrates à l'origine des propriétés mécaniques du ciment durci.

Le silicate tricalcique (C_3S) pur existe sous six formes cristallines entre 20 et 2 070 °C (figure 8). À température ambiante, il se trouve sous la forme triclinique T_1 .

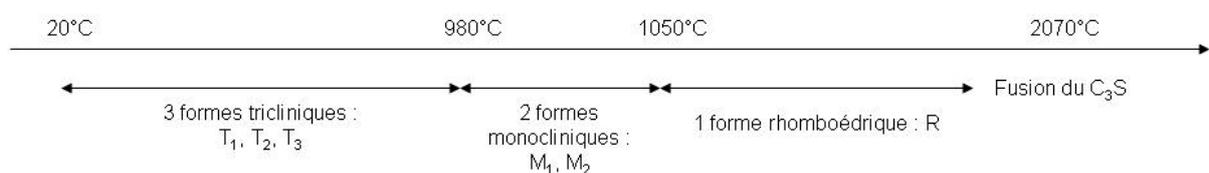
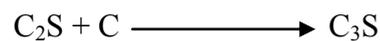


FIGURE 8: POLYMORPHES AU SILICATE TRICALCIQUE (C_3S) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

En plus de la structure C_3S , l'alite contient des traces de Mg, d'Al et de Fe en substitution ou en insertion dans le réseau cristallin, ce qui améliore la réactivité du produit. Ces impuretés en solution solide dans C_3S stabilisent à température ambiante les formes haute-température, ou font apparaître une autre forme cristallographique M_2 . Dans les clinkers industriels, les formes les plus fréquemment stabilisées sont M_1 et M_2 , ou le mélange des deux.

La formation de l'alite est essentiellement une réaction de dissolution partielle du silicate dicalcique (C_2S) et de la chaux, puis de précipitation dans la phase liquide d'aluminates. Le diagramme de phase CaO-SiO₂ (Figure 9) permet d'observer la formation des silicates de calcium du clinker pour les températures allant de 1 250 à 1 450 °C et pour des compositions en chaux comprises entre 65 et 70 % correspondant aux conditions généralement utilisées en cimenterie. La durée de cette réaction met 10 à 15 minutes ; elle diminue quand la finesse des particules de matière première augmente. Cependant, l'alite peut aussi se former par diffusion de CO₂ dans la bélite par réaction solide-solide avec diffusion de Ca²⁺ et de O²⁻ à travers la bélite, selon l'équation suivante :



C'est essentiellement l'alite qui confère la résistance mécanique au ciment, en particulier à court terme ; l'hydratation de l'alite génère l'essentiel des phases faiblement cristallines (C-S-H) à l'origine des propriétés de cohésion du ciment.

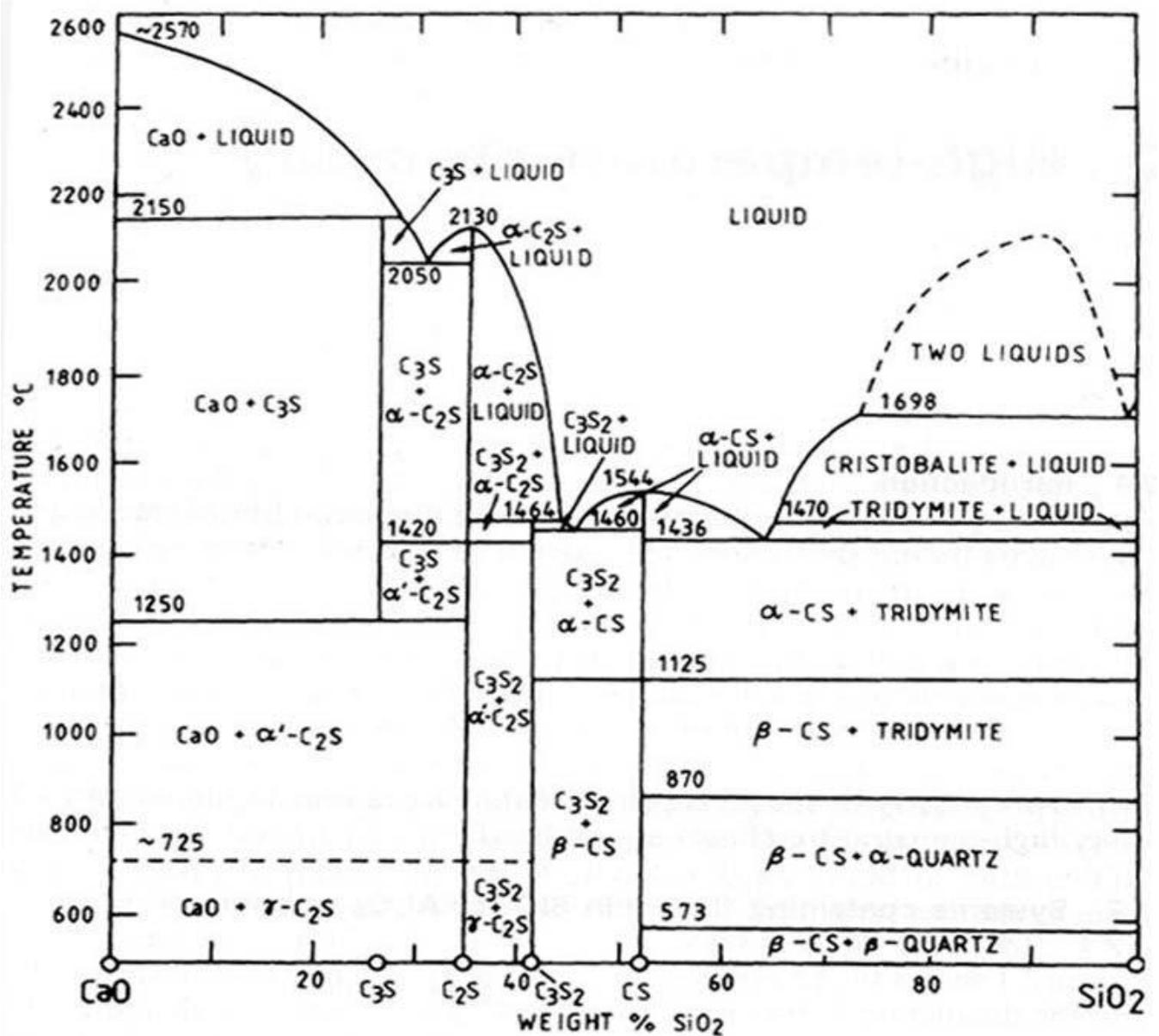


FIGURE 9: DIAGRAMME DE PHASE CaO-SiO₂ [Taylor]

➤ La bélite :

La bélite est une forme impure du silicate dicalcique C₂S et constitue 15 à 30 % du clinker. Le C₂S peut se présenter sous cinq formes cristallines stables, mais leurs domaines de stabilité diffèrent au chauffage et au refroidissement (figure 10). Les transformations allotropiques dépendent de la taille des cristaux et de leur vitesse de refroidissement. Les différentes formes du C₂S ont des propriétés physiques et chimiques spécifiques qui donnent lieu à la variation de masse volumique et à celle de la résistance à la compression de leur produit d'hydratation.

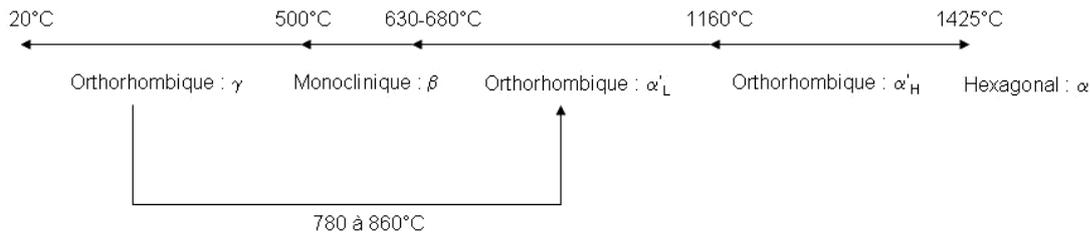


FIGURE 10: POLYMORPHES DU SILICATE DICALCIQUE (C_2S) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Dans les clinkers, la bélite se trouve majoritairement sous forme β . Dans certaines conditions, la forme β peut se transformer en γ inactive. Cette conversion s'accompagne d'une augmentation de volume de 10 % qui conduit à la désintégration du clinker. Pour éviter cette conversion, il faut procéder à un refroidissement rapide du clinker. La bélite réagit lentement à l'eau et contribue donc à la résistance du ciment à long et très long terme. En quantité importante, elle réduit la chaleur d'hydratation du ciment.

Les aluminates tricalciques et les alumino-ferrites calciques :

Les aluminates (C_3A ; C_4AF) cristallisent à partir de la phase liquide présente dans le four pour des températures de l'ordre de 1 350 °C (figure 11). Ces deux phases englobent celles alite et bélite formant ainsi la « phase interstielle » du clinker.

L'aluminate tricalcique constitue 5 à 10% du clinker de ciment CEM I. à l'état pur, le C_3A est cubique, mais peut toutefois être combiné avec le Na_2O , le SiO_2 et le K_2O (qui se substituent partiellement au CaO). Il peut cristalliser sous forme soit cubique soit orthorhombique. Le C_3A est ralenti par l'ajout de sulfates (gypse) qui jouent le rôle de régulateur de prise.

Les alumino-ferrites calciques sont des solutions solides de C_2A et de C_4F , proches de C_4AF mais sans composition chimique définie. Ils constituent environ 5 à 10 % du clinker du ciment CEM I et jouent un rôle peu important dans ses réactions de durcissement. Les oxydes de fer confèrent la couleur grise caractéristique de certains ciments.

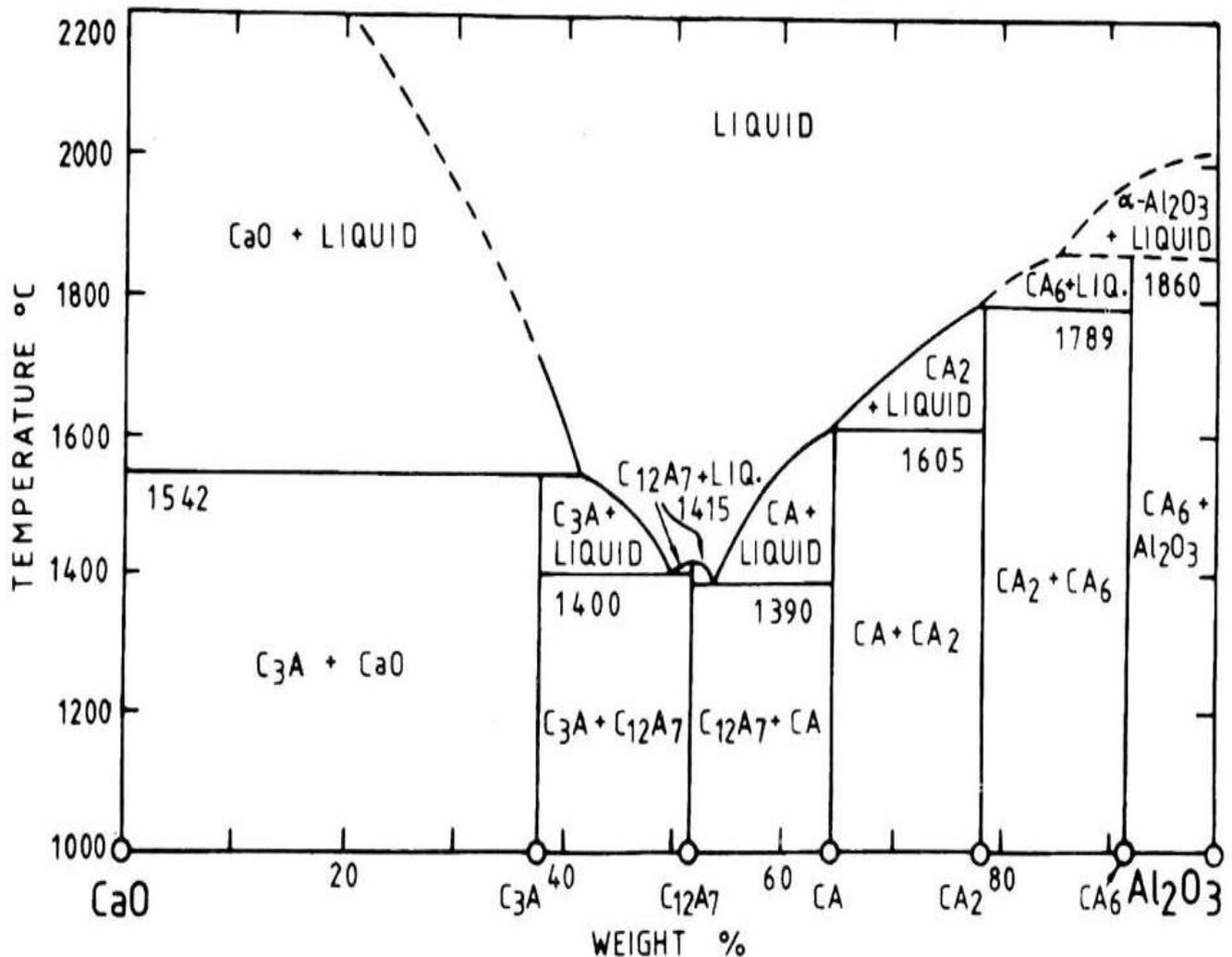


FIGURE 11: DIAGRAMME DE LA PHASE CaO-AL₂O₃ [H.F.W.Taylor]

I.6.3 : Hydratation et prise du ciment CPA

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe qui a été étudié pour la première fois par Henri Lechatelier (1887). [G.Seidel, I.Jawed, C.Vernet].

Pour décrire l'hydratation du ciment, nous avons différentes phases pures comme l'alite : C₃S [I.Older, Y.Tong], bélite : C₂S [P.Barret], et l'aluminate tricalcique : C₃A [V.S.Ram 1992, E.Breval], ou la phase alumino-ferritique : C₄AF [V.S.Ram 1995].

I.6.3 1: Hydratation de la C₃S

Pour la phase C₃S, les ions : calcium, hydroxydes, silicates sont passés en solution lors du gâchage avec l'eau. La solution devient rapidement sursaturée par rapport aux phases hydratées, à savoir : l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ encore appelé- portlandite, noté CH (figure 13) , ainsi que les hydrates silico-calciques, notés CSH (Figure 12) qui sont des composés non stochiométriques où le rapport C/S varie entre 1,5 et 1,8. Les hydrates CSH ont les propriétés d'un gel [D.Sedan].

Une partie des ions $(SO_4)^{2-}$ provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance [Doc ; Hydratation]. Les notations cimentières (tableau 4,5) ont servi dans l'écriture des réactions.

Nous établissons la réaction chimique :

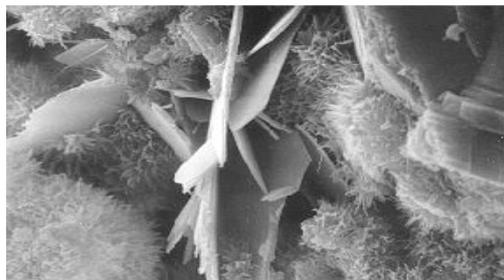
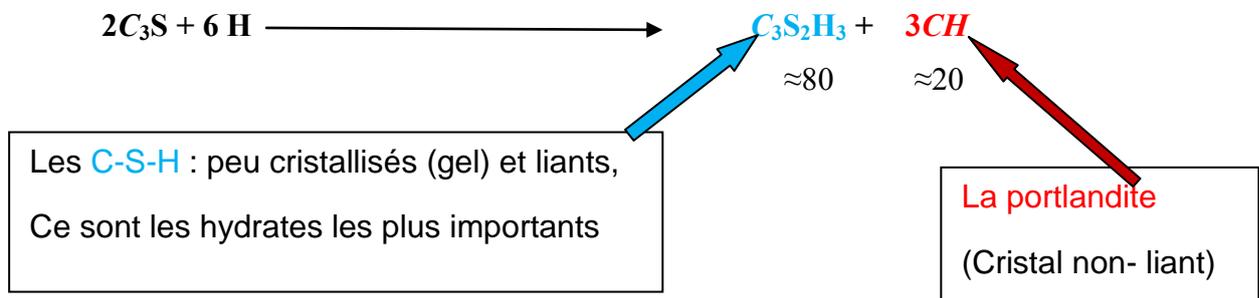


FIGURE 12 : FIBRE DE CSH (MEB 1100 X) (PATE DE CIMENT À 7 J) [DOC ; HYDRATATION]

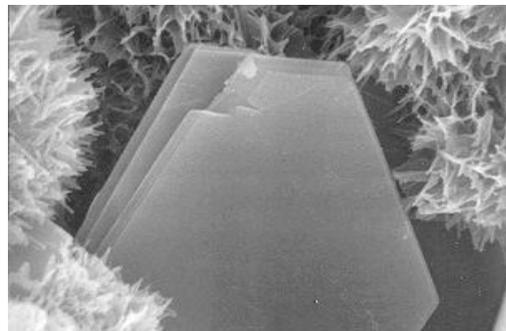
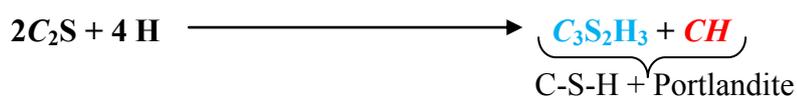


FIGURE 13: CRISTAUX DE PORTLANDITE (MEB7000 X) (PATE DE CIMENT À 7 J) [DOC ; HYDRATATION]

I.6.3.2: Hydratation du C_2S



L'hydratation de la phase C_2S a été peu étudiée, malgré son impact sur la résistance mécanique finale du ciment [I.Older]. Les mécanismes et les produits d'hydratation du silicate dicalcique sont similaires à ceux dérivés de C_3S . En revanche, son hydratation est généralement plus lente et la production de portlandite plus faible [D.Sedan].

Une partie des ions $(\text{SO}_4)^{2-}$ provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance, tel le cas du C_3S [Doc ; Hydratation].

I.6.3.3 : Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

L'aluminate tricalcique est une phase extrêmement réactive en présence d'eau. Le C_3A est le responsable du phénomène de « prise éclair » qui conduit à la formation d'aluminates hydratés, sans que la tenue mécanique de l'ensemble soit satisfaisante. Afin d'éviter ce phénomène de prise rapide dans le ciment portland, l'hydratation du C_3A est contrôlée par l'addition d'environ 5% de sulfate de calcium $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ($0 < x \leq 2$). C_3A va réagir avec le gypse pour former les différents intermédiaires relativement stables : le triSulfoAluminate de calcium ou étringite (figure 14), de formule $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$ noté TSA et le MonoSulfoAluminate de calcium (figure 15), de formule $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4) \cdot 15 \text{H}_2\text{O}$ noté MSA [D.Sedan].

Nous pouvons l'expliquer avec les réactions suivantes : [Chandra]

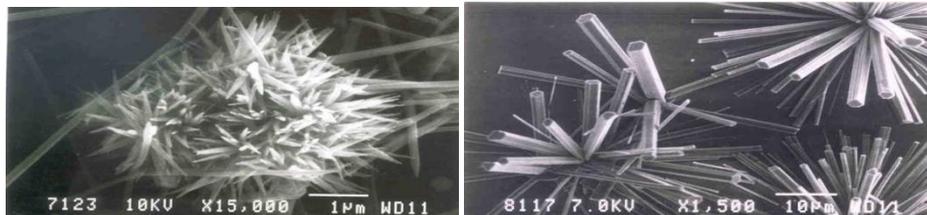
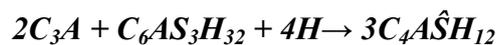
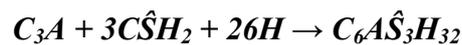


FIGURE 14: AIGUILLE D'ETTRINGUITE [Doc ; Hydratation]

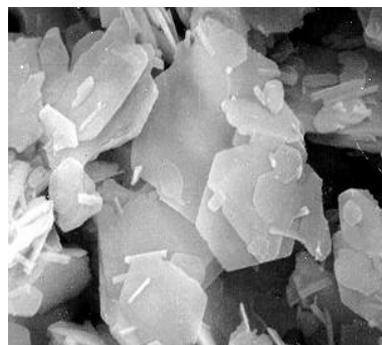
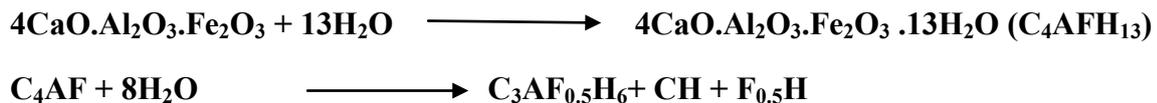


FIGURE 15: CRISTAUX HEXAGONAUX DE MONOSULFOALUMINATE

I.6.3.4 : Hydratation des aluminoferrites de calcium C₄AF

La phase ferritique (C₄AF) constitue environ 1 à 15 % de la masse d'un ciment Portland. Elle est en réalité une solution solide dont la composition répond à la formule C₄(Ax, F_{1-x}) pour x compris entre 0 à 0,7 [V.S.Ram 1995]. Elle adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase C₃A. Les réactions sont cependant plus lentes. En présence de gypse, l'hydratation de C₄AF est plus efficacement retardée que celle de C₃A. Il y a formation d'intermédiaires analogues à l'ettringite et au monosulfate [D.Sedan].

L'hydratation de C₄AF se déroule suivant la réaction [Doc ; Hydratation]:



Parmi ces produits d'hydratation on décèle la présence de C₂AH₈.

A la température supérieure à 35 °C, on a la formation des solutions solides cubiques de C₃AH₆ et C₃AFH₆ à une température comprise entre 15-35 °C, nous avons l'existence simultanée des solutions cubiques et hexagonales [Doc ; Hydratation].

La réaction d'hydratation du ciment Portland va combiner les réactions d'hydratation des principaux constituants du clinker. Les mécanismes sont complexes du fait des interactions qui se produisent entre les différentes phases au cours du processus d'hydratation [A.Nonat]. D'une manière générale, la vitesse de réaction, avec l'eau, des différentes phases minérales d'un ciment respecte l'ordre suivant : C₃A > C₃S > C₄AF ≈ C₂S.

Dans les premiers instants après la gâchée (0-15 min), les éléments les plus solubles (Na₂SO₄, K₂SO₄, CaSO₄, xH₂O) sont dissous dans la phase aqueuse. Simultanément, les phases les plus réactives (C₃A et C₃S) libèrent des ions de calcium, d'hydroxydes, de silicates et d'aluminates.

Du fait que les silicates et les aluminates sont fortement solubles en milieu alcalin, leurs concentrations vont augmenter avec le pH de la solution, tout en restant nettement inférieures à celles des alcalins, du calcium, des hydroxydes et des sulfates.

Suite à cette étape de dissolution des espèces, la formation des hydrates va être gouvernée par un processus de germination. Ce dernier peut se produire de manière homogène, à partir de la solution, ou de manière hétérogène, à l'interface solide solution. Le temps nécessaire à l'obtention d'un germe de taille critique va dépendre des fluctuations locales de concentration des espèces et des vitesses de précipitation dissolution des hydrates.

Ensuite, la croissance des hydrates intervient (Figure 16) et sa vitesse est gouvernée par les concentrations des espèces au voisinage des sites réactionnels. A ce stade, les principaux hydrates formés sont les composés CSH et l'ettringite.

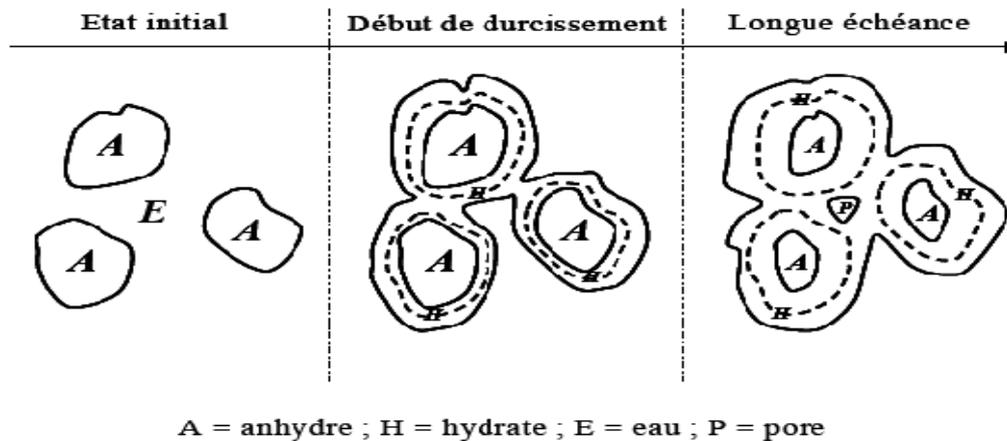


FIGURE 16: REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DE L'HYDRATATION DES GRAINS DE CIMENT

De manière analogue aux phases pures, un ciment possède une période d'induction pendant laquelle se forme une faible quantité d'hydrates (ettringite et CSH). Le système présente ensuite une période d'accélération de l'hydratation provoquée par la précipitation de la portlandite. Les hydrates formés sont alors : la portlandite, CSH et l'ettringite. Lorsque la totalité du gypse est consommée, l'ettringite va se dissoudre pour libérer des ions sulfates qui vont réagir avec l'excès de C_3A et former le monosulfoaluminate.

Au cours de l'hydratation du ciment, la pâte se rigidifie puis durcit. Cependant, la prise du ciment n'est pas uniquement liée à la quantité d'hydrates formés. La structuration et la prise peuvent être caractérisées par deux processus distincts : la coagulation et la rigidification [S.P.Jiang 1995]. La coagulation correspond à la formation de contacts entre particules par interactions réversibles. Ce phénomène est principalement déterminé par la concentration en ions calcium présents en solution interstitielle. Une valeur minimale est nécessaire pour que la coagulation ait lieu [S.P.Jiang 1996].

Les rigidifications des particules coagulées, phénomène irréversible, est assurée par la formation d'hydrates au niveau de la zone de contact. A ce stade, la rigidité de la pâte est proportionnelle à la quantité d'hydrates précipités [D.Sedan].

En résumé, l'hydratation du ciment conduit trois produits principaux qui sont : l'ettringite, présente entre 20 et 30 % dans le ciment hydraté, les C-S-H, constituant 60 à 70 % du ciment hydraté et la Portlandite, dont la teneur varie entre 5 et 15 % du ciment hydraté.

Connaître les principaux hydrates formés (tableau 4) lors de l'hydratation de chacune des phases du ciment est très importante afin de mieux comprendre les effets éventuels de l'introduction de polluants organiques sur les réactions d'hydratation.

TABLEAU 4 : LISTE DES PRINCIPAUX HYDRATES FORMÉS LORS DE L'HYDRATATION DU CIMENT

Dénomination	Formule chimique	Notation cimentière
Portlandite	Ca(OH)_2	CH
Silicate de calcium hydraté (C-S-H)	$(\text{CaO})_X\text{-SiO}_2\text{-(H}_2\text{O)}_Y$	CSH
Trisulfoaluminate de calcium hydraté (TSA) ou ettringite	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}.\text{(CS)}_3.\text{H}_{32}$
MonoSulfoaluminate de calcium hydraté (MSA)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaSO}_4.12\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}.\text{CS}.\text{H}_{12}$
Aluminate dicalcique Hydraté	$(\text{CaO})_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(H}_2\text{O)}_8$	C_2AH_8
Aluminate tricalcique hydraté	$(\text{CaO})_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(H}_2\text{O)}_6$	C_3AH_6
Aluminate tétracalcique hydraté	$(\text{CaO})_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(H}_2\text{O)}_{13}$	C_4AH_{13}

Avant de terminer ce chapitre, nous allons montrer le résumé du cas de l'ajout de déchet sur la fabrication du ciment. Ce travail fit par Abdoulaye Thiam, Alpha Ousmane touré, Falilou Mbacké Samb, Codou Gueye Mar Diop au Laboratoire d'Electrochimie et des Procédés Membranaires (LEPM), Département de Génie Chimique et de Biologie Appliquée, Ecole Supérieure Polytechnique (ESP), Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) B.P. 5085 Dakar-Fann, Sénégal. Il concerne « l'ajout de déchet (mélange de silicate de calcium et de fluorure de calcium) à des mortiers à base de clinker ».

« Résumé : Ce travail est consacré à l'étude de la possibilité de la valorisation d'un déchet industriel pour la fabrication de ciment. On se propose d'étudier l'effet de l'ajout de ce déchet sur le clinker. Les échantillons sont préparés par ajout de 5, 20 et 35 % de ce déchet sur le clinker. Les mélanges sont hydratés et caractérisés par fluorescence X. La mesure du temps de prise des mortiers (445 min), réalisée par l'appareil de Vicat, montre que le début et la fin de la prise sont proportionnels à l'ajout du déchet. La résistance à la compression des mortiers des différents mélanges, mesurée par l'appareil de compression montre des résultats acceptables avec 5% de déchet, les résistances à 1 jour (2,9 MPa), à 2 jours (15,9 MPa) et à 28 jours (47,5 MPa) diminuent avec l'ajout »

D'après cette étude, les techniques et les méthodes peuvent être appliquées au cas des déchets d'Andralanitra à Madagascar.

I.7 .Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu général sur le ciment et la fabrication du liant hydraulique, passant par l'étape pour élaborer le ciment jusqu'à son expédition, ses constituants principaux. Ensuite nous en avons donné quelques classes normales et aussi ses caractéristiques chimiques. Enfin, nous terminons ce chapitre par le cas de l'ajout de déchet dans la fabrication de ciment, parce qu'il est le point commun entre le ciment et le déchet.

Chapitre II : VALORISATION DES DÉCHETS D'ANDRALANITRA

II.1: Introduction

Avant de valoriser un déchet, il faut en connaître la définition, sa localisation, les types de déchets, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps puis évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de mesurer pour les déterminer et pour agir.

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, et de savoir quel type de valorisation choisir.

II.2 : Définition du terme : « déchet »

La notion de déchet peut être définie de différentes manières, selon le domaine et l'intérêt d'étude et, parfois, l'origine et l'état du déchet.

Parmi les nombreuses définitions existantes, nous pouvons mentionner celles qui nous paraissent les plus intéressantes :

- Le déchet est un résidu abandonné par son propriétaire, car inutilisable, sale ou encombrant.
- « Est considéré comme déchet, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

La Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit : « **Déchets** : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer. » (PNUD-MATE, 2008).

II.3. Localisation et historique : « déchet d'Andralanitra »

La décharge municipale d'Andralanitra où se focalise notre étude a été mise en place depuis 1940, et est devenue un site officiel pour la Capitale d'Antananarivo en 1966. Elle se trouve dans la périphérie Nord-Est de la ville d'Antananarivo, à environ 9 km du Centre-ville, le long de la Route nationale N°2. Administrativement, le site est localisé dans la Commune Rurale d'Ambohimangakely, Fokontany d'Ikianja, dans le district Antananarivo-Avaradrano. Les coordonnées géographiques de la décharge sont comprises entre la longitude 47°34'25.5''

Est et la latitude 18°54'46.1'' Sud, située entre 1 290 m (les collines) et 1 245 m (les rizières et le marais) d'altitude.

La zone d'étude est limitée :

- Au Nord par les Commune rurales d'Ilafy et la Fieferana,
- Au Sud par la Commune rurale d'Ambohimambola,
- A l'Ouest par la Commune Urbaine d'Antananarivo,
- A l'Est par la Commune Rurale d'Ambohimalaza.

Depuis sa création jusqu'à maintenant, la décharge publique d'Andralanitra contient déjà 2 millions de m³ de déchets. Si ce site s'étend sur une superficie initiale autorisée de 13 ha, à l'heure actuelle, ces milliers de tonnes de déchets s'étalent sur 18 ha de terrains. La hauteur de ce dépôt atteint maintenant 17 m par rapport au terrain naturel qui l'entoure. Chaque jour, ce site d'ordures reçoit environ 1 400 m³ de déchets, l'équivalent de plus de 1 000 tonnes. Dans l'agglomération d'Antananarivo, la collecte des déchets solides se fait en bloc, sans aucun tri préalable et sans tenir compte ni de leur origine, ni de leur composition chimique, ni de leur toxicité éventuelle. Cette décharge d'Andralanitra réceptionne toutes les ordures de diverses catégories.

En général, les déchets urbains y sont envoyés sans suivre la norme en la matière et la décharge d'Andralanitra est très saturée. Des déchets de différentes natures y trouvent. (Ordures ménagères, déchets verts, déchets de marché, déchets industriels, boues de curage et de vidange, etc.).

La carte ci- après représente la zone d'étude au niveau de la Région Analamanga et de la commune d'Ambohimangakely.

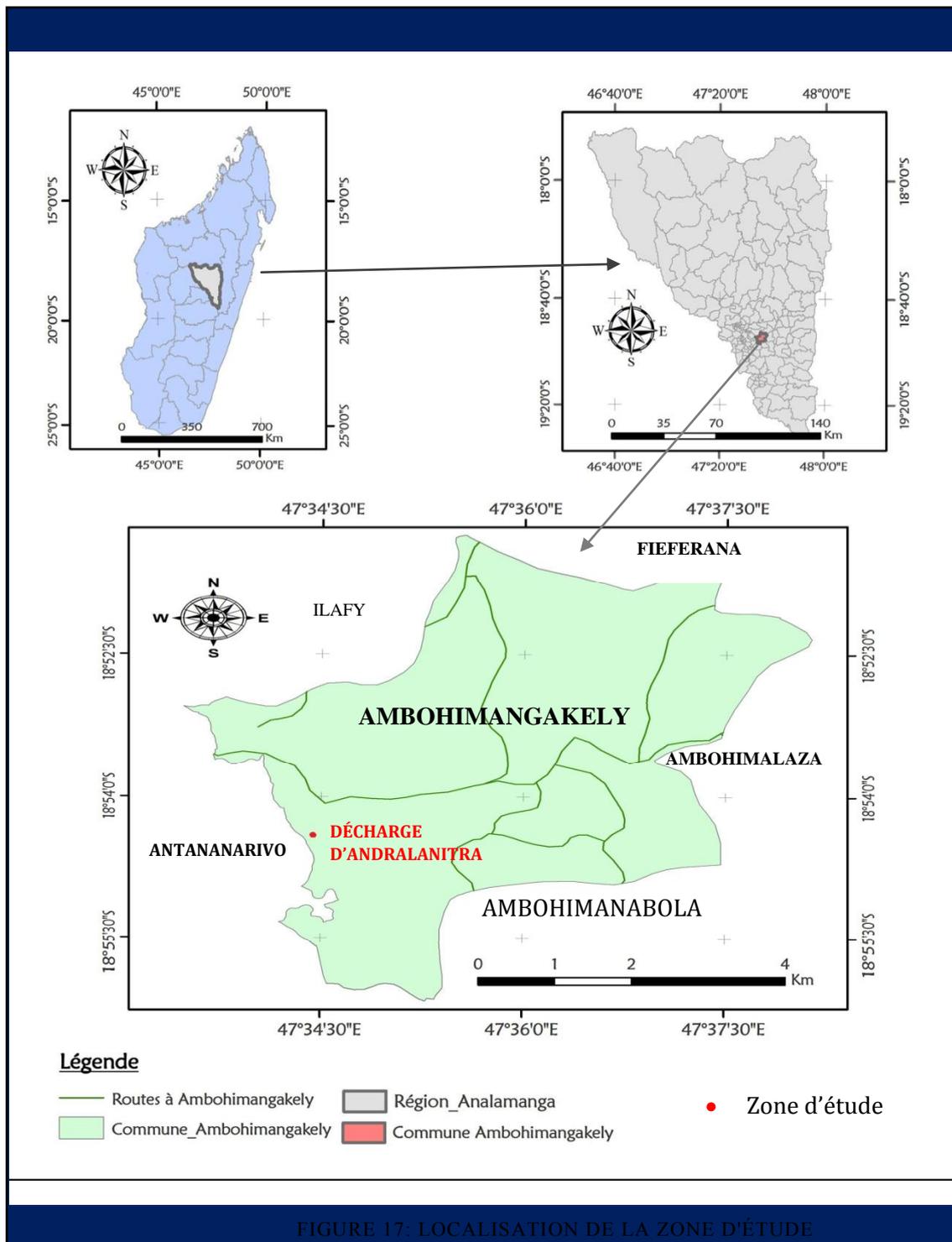


FIGURE 17: LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Source : « Auteur »

II.4.Types de déchets d'Andralanitra

Andralanitra est le seul site de décharge de l'agglomération d'Antananarivo, y compris les suburbaines environnantes. Les déchets peuvent être classés selon leurs origines (déchets ménagers, déchets industriels) ou selon leurs natures (dangereuses, non dangereuses, inertes).

Les déchets déposés à Andralanitra sont des déchets ménagers. Le tableau 5 montre la composition des ordures ménagères. (C.C.E 2011).

TABLEAU 5: EXTRAIT DU TABLEAU DES COMPOSITIONS DES ORDURES MÉNAGÈRES DE SAMVA EN 2011

CATÉGORIES	Pourcentage massique (%)
DÉCHETS FERMENTES CIBLES	
Déchets alimentaires	7.90
Déchets de jardin	37.47
Papiers	1.69
Cartons	1.84
Composites	0.34
Textiles	1.86
Textiles sanitaires	1.59
PLASTIQUES	
PET (bouteilles)	0.14
PVC (bouteilles)	0.15
Films plastiques	4.43
Autres : Pot yaourt/barquette plastique	1.07
Combustibles non classes	2.35
Verres	0.76
Métaux	1.29
Incombustibles non classes	3.71
Déchets spéciaux	0.12
Fines < 20mm	33.29
TOTAL	100.00

Source : « SAMVA »

II.5. Les techniques de traitement

Procédés biologiques :

Le procédé biologique comprend le compostage et la méthanisation

- Le compostage est un procédé de transformation des matières organiques en un produit stable utilisable pour améliorer la qualité des sols par des microorganismes. Il se déroule en présence d'air. Cette technique est intéressante mais elle nécessite de l'espace et le compost produit demande encore une technique adéquate.
- La méthanisation est un processus de la dégradation de la matière organique contenue dans les déchets par des microorganismes en l'absence d'oxygène. Cette dégradation conduit à la production de biogaz et de digestat. Le procédé est effectué dans des digesteurs. Ce mode de traitement nécessite une exploitation complexe et les coûts sont très élevés.

Procédés thermiques :

- L'incinération est une combustion à une température élevée dans un incinérateur. Le volume de déchets est réduit de 90 % et le traitement est rapide. Cependant, l'incinérateur libère des cendres et résidus polluants. Les fumées rejetées contiennent des métaux lourds et de la dioxine qui sont une menace pour la santé humaine. Le coût d'investissements est très élevé.
- La gazéification est une technique alternative à l'incinération. Elle est parfois compliquée.
- La thermolyse : c'est un mode de traitement permettant de décomposer les déchets en gaz de synthèse et en solides carbonés. Elle en l'absence d'air à des températures d'environ 450 à 700 °C
- La torche plasma : elle permet de vérifier des produits dangereux, tels les armes chimiques PCB, l'amiante, les REFIOM à haute température.

Procédés chimiques

- La catalyse : cela consiste à transformer les plastiques pour produire du gazoil. La conversion en éthanol de la biomasse est issue des ordures ménagères. Le procédé s'effectue en deux étapes à savoir :
 - La transformation en sucres de molécules de cellulose par des acides
 - Le blocage du processus de méthanisation par l'ajout d'inhibiteurs, suivi de la fermentation des sucres par des organismes bactériens spécialisés, pour produire de l'éthanol.
- La mise en décharge ou stockage

Cela consiste à déposer les déchets, d'une façon permanente, dans une installation ou site répondant aux caractéristiques et prescriptions techniques règlementaires.

➤ La mise en valeur des déchets en cimenterie

Cette technique consiste à valoriser les déchets pour fabriquer du liant hydraulique, du béton, des matériels de constructions. Elle est appliquée dans les pays développés et en voie de développement. Alors, elle est applicable dans notre pays.

II.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu relater la définition des déchets, leur localisation et les types de ceux d'Andralanitra. Enfin pour pouvoir les valoriser, il nous a fallu développer les types des techniques pour traiter ou recycler les déchets. En fait, qu'en est-il des matériels et méthodes à employer pour y parvenir ?

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre III : MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1. Caractérisation des matières premières

III.1.1. Matières premières

Dans ce travail, nous avons utilisé le ciment Portland de marques : OMBILAHY, Sol 2000, Mada- Japon puis Malo ci, gypse et les cendres des déchets d'Andralanitra (figure18). Le clinker de ces ciments est basé sur le mélange de calcaire et d'argile.



FIGURE 18: CENDRES DES DÉCHETS D'ANDRALANITRA

III.1.2. Hydratation

Les mélanges de départ sont préparés à partir des proportions massiques suivantes :

A = 95 % Maloci + 2 % gypse + 3 % de déchets,

B = 96 % OMBILAHY + 4 % de déchets,

C = 96 % Sol 2000 + 4 % de déchets,

D = 96 % Mada-Japon + 4 % déchets.

E= 80 % Mada-Japon + 20 % de déchets,

F= 65 % Mada-Japon + 35 % de déchets,

G= 50 % Mada-Japon + 50 % de déchets.

Ces mélanges sont hydratés suivant le rapport eau/ciment = 0,5 et le gypse utilisé va jouer le rôle de régulateur de prise.

III.2. Caractérisation du ciment

III.2.1. Analyses chimiques

Les analyses chimiques ont permis de déterminer :

- Les pourcentages des éléments du ciment à savoir : la silice SiO_2 , la chaux CaO , la magnésie MgO , l'oxyde de fer Fe_2O_3 , l'alumine Al_2O_3 , les sulfates SO_3 , les alcalis: Cl^- , Na_2O , K_2O ,
- La Perte au feu (PAF),
- La chaux libre CaOL ,
- Les insolubles.

Ces éléments sont déterminés par voie chimique classique (par dosage volumique).

❖ Par voie chimique classique

Les détails de la détermination des pourcentages des éléments chimiques du ciment sont communiqués en annexe à la page I : nous avons énuméré le mode opératoire, la méthode de calcul et les matériels utilisés.

III.2.2 : Détermination de la composition minéralogique

Dans le four, le mélange cru après séchage et décarbonation arrive sous forme de poudre en petites granules dans la zone de cuisson. Les réactions chimiques commencent sous l'effet de la température. L'oxyde de fer se combine à l'oxyde d'aluminium et à l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF). L'alumine restante réagit avec de l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tricalcique (C_3A). Ces deux composants correspondent à la phase liquide.

Les oxydes de silicium et de calcium réagissent ensemble pour former la silicate bicalcique (C_3S) qui, elle-même, se transforme en silicate tricalcique tant qu'il reste de l'oxyde de calcium non combiné. A la sortie du four, ce dernier s'appelle chaux libre.

La magnésie ne réagit pas avec les autres constituants. Elle cristallise sous forme de périclase ou reste en solution solide dans la phase liquide. Les alcalis et les sulfates forment les sulfates alcalins ou réagissent avec l'aluminate tricalcique pour donner des cristaux d'alcali aluminate. Les métaux lourds peuvent remplacer le fer dans certains cristaux. Une variation des constituants principaux (oxydes de calcium, de silicium, de fer et aluminium) ou des éléments mineurs et secondaires (alcalis, sulfate, titane, phosphate, Fluor,...) modifie d'une part, l'aptitude à la cuisson du mélange cru et, d'autre part, les caractéristiques hydrauliques du ciment produit.

Pour déterminer la composition minéralogique du ciment, la formule de Bogue est appliquée.

Selon le ciment ordinaire :

$$C_3S = 4.07 \times CaO - 7.6 \times SiO_2 - 6.72 \times Al_2O_3 - 1.43 \times Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2.87 SiO_2 - 0.75 \times C_3S$$

$$C_3A = 2.65 \times Al_2O_3 - 1.69 \times Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.04 \times Fe_2O_3$$

Selon le ciment sans C₃A :

$$C_3S = 4.07 \times CaO - 7.6 \times SiO_2 - 4.48 \times Al_2O_3 - 2.86 \times Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2.87 SiO_2 - 0.75 \times C_3S$$

$$C_4AF = 4.77 \times Al_2O_3$$

$$C_2F = 1.70 \times Fe_2O_3 - 2.67 \times Al_2O_3$$

Lorsque les valeurs calculées pour C₂S sont négatives, le ciment contient du C₃S associé à de la chaux libre :

$$C_3S = 3.80 \times SiO_2$$

$$CaO \text{ libre} = CaO - 2.80 \times SiO_2 - 1.65 \times Al_2O_3 - 0.35 \times Fe_2O_3$$

Dans le ciment Portland les formules sont intégralement appliquées en tenant compte de la chaux non combinée ou présente dans le régulateur de prise.

$$CaO = CaO_{\text{totale}} - CaO \text{ libre} - 0.7 \times SO_3$$

III.2.3 : Performances des ciments

III.2.3.1. Module hydraulique de Michaelis

Nous pouvons le calculer comme suit : $HM = CaO / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)$

Le Module hydraulique de Michaelis est compris entre 1,7 et 2,3

III.2.3.2. Module silicique de Kühl

Le calcul se fait par $SM = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$

Le Module silicique de Kühl est compris entre 1,5 et 5

Sa valeur élevée correspondant à une hausse de silice au détriment des agents fondants. Une valeur faible provoque un croûtage excessif dans la zone de clinkérisation et nuit à la bonne marche du four.

III.2.3.3 Module aluminoferrique de Kühl

Nous avons $TM = Al_2O_3 / Fe_2O_3$

Le module aluminoferrique de Kühl est compris entre 1,5 et 2,5.

III.2.3.4. Indice d'hydraulicité de Vicat

Nous pouvons calculer par la formule suivante:

$$HI = ([SiO_2] + [Al_2O_3]) / ([CaO] + [MgO])$$

Les composants sont exprimés en moles et non en pourcent. L'indice d'hydraulicité de Vicat est compris entre 0,4 et 0,5.

III.2.3.5. Indice de saturation de Kühl

$$LSI = CaO / (2.8 \times SiO_2 + 1.1 \times Al_2O_3 + 0.7 \times Fe_2O_3)$$

L'indice de saturation de Kühl est compris entre 0,85 et 1.

III.2.3.6. Facteur de saturation de Lea et Parker

$$LSF = CaO / (2.8 \times SiO_2 + 1.18 \times Al_2O_3 + 0.65 \times Fe_2O_3)$$

Le facteur de saturation de Lea et Parker est compris entre 0.85 et 1.0. Il se présente aussi sous forme :

$$LSF = 100 \times CaO / (2.8 \times SiO_2 + 1.18 \times Al_2O_3 + 0.65 \times Fe_2O_3)$$

TABLEAU 6: CRITÈRES CHIMIQUES DE COMPOSITION DU CLINKER				
Inférieur ou égal	Plage de variation acceptable			Supérieur ou égal
Résistances initiales faibles	1.7	Module hydraulique	2.3	-stabilité de volume, Gonflement
-Diminution de la température de clinkerisation -Prise et durcissement rapides -croûtage favorisé	1.5	Module silicique	5	-cuisson difficile par manque de fondant -prise de durcissement lent -Diminution du croûtage dans le four
-faible chaleur d'hydratation -ciment sans C3A	1.5	Module aluminoferrique	2.5	- prise rapide -ciment alumineux
-faible dégagement de chaleur	0.85	Indice de saturation	0.93	-Résistances initiales élevées -hautes résistances finales

III.2.4: Chaux libre

Lorsque le facteur de saturation en chaux est supérieur à 100 %, il existe un déséquilibre entre les constituants. Toute la chaux ne peut être saturée et reste sous forme de chaux non combinée ou chaux libre. La chaux libre est un paramètre essentiel pour juger de la qualité et du degré de cuisson de la pâte. Des clinkers bien cuits résultant d'un cru bien dosé et de bonne granulométrie présentent des teneurs inférieures à 2 %. L'augmentation de la teneur en chaux libre peut provenir d'un dérèglement du processus de cuisson ou d'un manquement dans la préparation du cru.

III.2.5. Analyse physiques

Les analyses physiques sont principalement réalisées sur la pâte, c'est-à-dire : ciment plus eau (mesure du temps de prise) ainsi que sur le mortier (résistances mécaniques : à la compression et à la flexion).

III.2.5.1. Caractérisation de la pâte

❖ temps de prise [*V.PHOUMMAVONG*]:

- Objectif :

Il vise à connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour mettre en place correctement des mortiers et des bétons allant par la suite être confectionnés.

Les mesures se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: le début de prise et la fin de prise.

- Principe :

Il consiste à suivre l'évolution d'une pâte jusqu'à ce que sa consistance soit normalisée; l'appareil utilisé est l'appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4 \text{ mm} (\pm 1 \text{ mm})$ nous disons que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DÉBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus au delà de 0,5 mm.

- Équipements nécessaires :

- Une salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20 \text{ °C} (\pm 1 \text{ °C})$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90 %. A défaut

de cette dernière, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à 20°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) ;

- Un malaxeur normalisé: (voir figure 19),
- L'appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français) est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre comme représentée sur la figure 20,
- Une balance précise,
- Un chronomètre.



FIGURE 19: MALAXEUR [Doc]

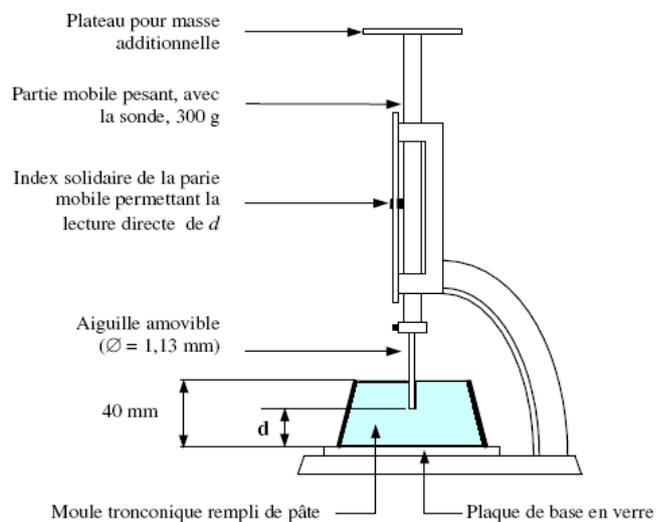
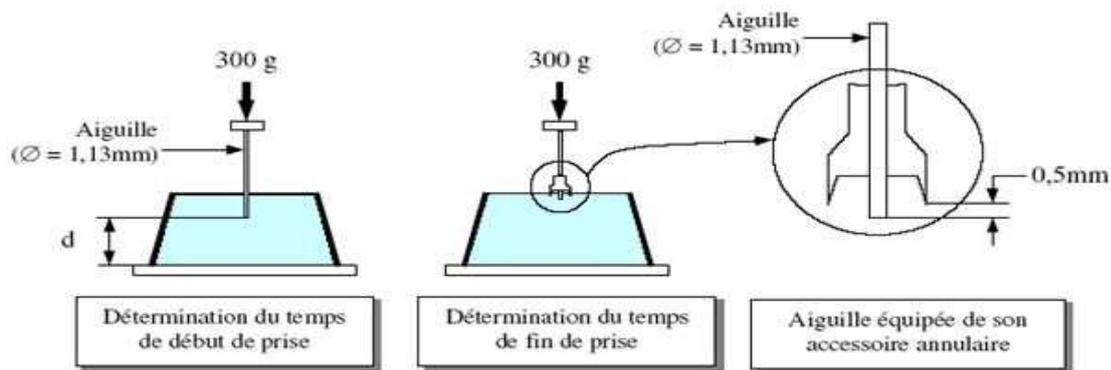


FIGURE 20: APPAREIL DE VICAT MUNI DE L'AIGUILLE AMOVIBLE [V.PHOUMMAVONG]



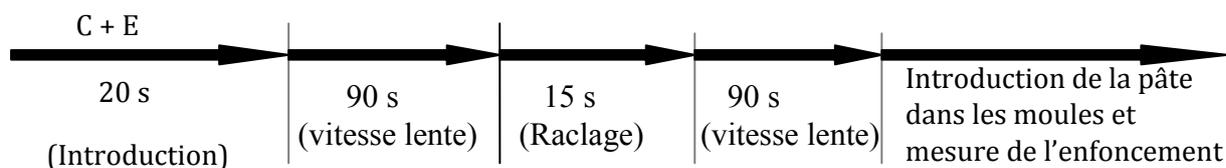
- Conduite :

500g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau retenue est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Le malaxeur est mis en route à la vitesse lente pendant 90s, puis arrêté pendant 15 s et la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au-delà de la zone de malaxage est ramenée dans la gâchée avec une petite truelle. La machine est de nouveau remise en marche pour une durée de 90 s à vitesse lente. (Voir tableau 7).

Tableau 7: OPÉRATION POUR LA FABRICATION DE LA PÂTE NORMALISÉE

Opération	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mise en route	Raclage de la cuve	Mise en route
Durée de l'opération		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
État du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente



La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive ; l'excès de la pâte est enlevé par un mouvement de va et vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde s'enfoncé alors dans la pâte.

Lorsque l'aiguille s'immobilisée (ou après 30 s d'attente), la distance d séparant son extrémité de la plaque de base est relevée.

L'opération recommence à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10-15$ mn) jusqu'à ce que $d = 4$ mm (± 1 mm).

Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné.

III.2.5.2. Caractérisation du mortier

III.2.5.2.1 Mesure des résistances à la compression et à la flexion (EN 196-1)

❖ Définition du mortier normal (EN 196-1) [29]:

Le mortier normal sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Il est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est appelé "sable normalisé EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce dernier est commercialisé en sac plastique de 1 350 g (± 5 g).

❖ Confection du mortier normal:

Les matériaux utilisés pour fabriquer le mortier normal sont :

- sable normalisé = 1 350 g (± 5 g). [tableau 8],
- ciment = 450 g,
- eau de gâchage = 225 ml (le rapport de E/C est donc de 0,50).

TABLEAU 8: GRANULOMÉTRIE DU SABLE NORMALISÉE

Module	Tamis	Refus %	Poids de refus cumulé	Poids de refus partiel
33	1,6	7,5	101,25	101,25
31	1	35,5	479,25	370
28	0,5	69,5	938,25	459
27	0,4	71	958,5	20,5
26	0,315	76	1026	67,5
24	0,2	85	1147,5	121,5
23	0,16	89	1201,5	54
22	0,125	98	1323	121,5
20	0,08	100	1350	25

Avant d'être utilisé pour les différents essais de maniabilité, de prise, de résistance ou de retrait, mélanger la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1 qui est la suivante :

-L'eau est introduite en premier dans la cuve du malaxeur ; le ciment est versé par la suite et le malaxeur est mis en marche à vitesse lente ;

-Après 30 s de malaxage, le sable est introduit de façon régulière pendant 30 s ;

Le malaxage se poursuit à la vitesse rapide pendant 30 s supplémentaires ;

-Le malaxeur est arrêté pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes, le mortier adhérant aux parois et au fond du récipient est enlevé au moyen d'une raclette en caoutchouc, en ramenant vers le milieu ;

-Le malaxage est repris de nouveau à grande vitesse pendant 60 s.

TABLEAU 9: OPÉRATION POUR LA FABRICATION DU MORTIER NORMAL
[V.PHOUMMAVONG]

opération	Introduc tion de l'eau	Introducti on du ciment	Malaxa ge	Introducti on du sable	malaxa ge	Raclage de la cuve	arrêt	Malaxage
Durée des opérations			30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
État du malaxage	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

- **objectif:**

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment ; donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

- **Principe:**

Il consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier, la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

- **Équipements nécessaires :**

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1 et énuméré ci-dessous :

- Une salle maintenue à une température de 20 °C (± 2 °C) et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %,
 - Un malaxeur normalisé (voir figure20),
 - Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm, ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes 4×4×16" (voir figure 21),
 - Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm (± 0,3mm) à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s (voir figure 22),

- Une machine d'essais de résistance à la flexion doit comporter deux rouleaux d'appui en acier de $10.0 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de diamètre, distant l'un de l'autre de $100.0 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ et un troisième rouleau, de chargement en acier, de même diamètre, équidistant des deux premiers. La longueur «a» de ces rouleaux doit être comprise entre 45 et 50 mm. La disposition des charges est montrée sur la figure 23

- Une machine d'essais de résistance à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus, si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s ($\pm 200 \text{ N/s}$). Elle est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure 24.

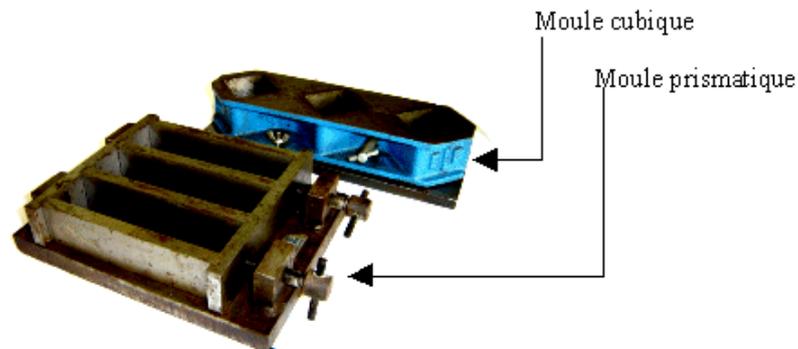


FIGURE 21: MOULE POUR MOULAGE DES ÉPROUVETTES DE MORTIER [V.PHOUMMAVONG]



FIGURE 22: APPAREIL À CHOCS [Doc]



FIGURE 23: MACHINE D'ESSAI DE RESISTANCE À LA FLEXION [Doc]



FIGURE 24: MACHINE D'ESSAI DE RESISTANCE À LA COMPRESSION [Doc]

- **Conduite:**

La norme EN 196-1 décrit, de manière détaillée, le mode opératoire concernant cette expérience.

Remplir un moule 4 x 4 x 16 avec du mortier normal. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 C° (± 1 C°) jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

Les normes EN V 197-1 et NF P 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 jours, à 7 jours et 28 jours.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément à la disposition décrite sur la figure 25:

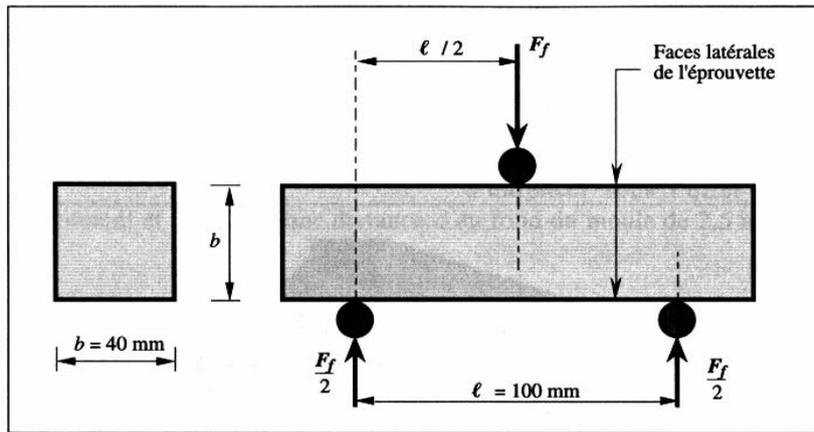


FIGURE 25: ECRASEMENT SUR LE RÉSISTANCE DE FLEXION

Nous pouvons calculer la résistance de flexion par la formule suivante :

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Où :

R_f : la résistance de flexion, en newtons par millimètre carré,

b : le côté de la section carrée du prisme, en millimètre,

F_f : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons,

l : distance entre les appuis, en millimètres.

III.3.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Les différentes méthodes et formulations ont détaillées dans cette partie.

Ces différentes formulations vont servir à réaliser notre campagne expérimentale relative aux études des propriétés chimiques et physiques. Quels en sont les résultats obtenus ?

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1.Introduction

A titre de rappel, l'objectif de notre travail vise à diminuer les déchets dans la décharge d'Andralanitra. En effet, le ciment est un produit nécessaire pour réaliser des travaux de construction. Utiliser des déchets dans la fabrication de ciment a déjà fait l'objet de nombreuses études [L.KACIMI].

Dans ce chapitre, nous allons prendre les résultats obtenus à la caractérisation chimique et physique du ciment et en discuter, afin de mettre en évidence les propriétés essentielles et utiles qui ont motivé leur utilisation dans cette étude.

IV.2. : Caractérisation chimique du ciment

La caractérisation chimique a été exécutée selon les protocoles expérimentaux détaillés dans le chapitre III (paragraphe III.2.2) et les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux qui suivent :

TABLEAU 10: COMPOSITION CHIMIQUE DES MATIÈRES PREMIÈRES PAR DOSAGE

Composants chimiques en % massique	PF à 975° C	RI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaOtotal	MgO	SO ₃	Non dosé	CaO libre	CaO
Clinker (Malo ci)	4.25	2.09	19	7.70	5.35	56.00	1.05	3.01	1.50	1.05	52.84
Ombilahy	4.46	2.42	22.99	6.92	4.78	57.18	0.98	1.17	-	1.06	55.30
Sol 2000	3.45	3.00	22.70	6.11	2.45	58.32	1.1	2.80	1.07	1.09	55.27
Mada- Japon	3.17	2.84	21.34	2.70	2.12	63.00	1.03	2.77	1.03	1.11	59.95
Déchet	4.26	33.27	12.27	3.60	0.08	27.34	2.07	5.65	11.46	0.99	22.395

TABLEAU 11: COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Composants chimiques en % massique	C ₃ S [(CaO) ₃ -(SiO ₂)]	C ₂ S [(CaO) ₂ -(SiO ₂)]	C ₃ A [(CaO) ₃ -(Al ₂ O ₃)]	C ₄ AF [(CaO) ₄ -(Al ₂ O ₃)-Fe ₂ O ₃]
Clinker	11.26	46.08	11.36	16.26
Ombilahy	-2.99	62.22	10.25	14.53
Sol 2000	7.86	59.254	12.051	7.44
Mada Japon	60.63	15.77	3.57	6.44
Clinker normalisé	50 à 70	10 à 30	5 à 12	5 à 12

TABLEAU 12: COMPOSITION CHIMIQUE DES CIMENTS SYNTHÉTISÉS PAR DOSAGE

Composants chimiques en % massique	PF à 975°C	RI	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaOtotale	MgO	SO₃	Non dosé
D : 4 % de déchets	3.53	5.42	18.02	4.45	2.02	57.75	2.01	3.25	3.55
E : 20 % de déchets	3.65	6.65	17.55	3.70	1.75	56.69	1.99	4.75	3.17
F : 35 % de déchets	3.75	7.05	16.03	2.65	1.45	56.25	2.00	4.25	6.57
G : 50 % de déchets	4.5	8.45	15.66	2.03	1.01	55.67	1.88	4.95	5.85

TABLEAU 13: PERFORMANCE DES CIMENTS

Ciments	HM	SM	TM	HI	LSI	LSF
A	1.65	1.45	1.44	0.50	0.81	0.80
B	1.59	1.96	1.45	0.53	0.73	0.73
C	1.76	2.65	2.49	0.51	0.77	0.77
D	2.29	4.43	1.27	0.4	O93	0.93

IV.2.1.Caractéristique des matières premières

Les compositions chimiques et minéralogiques de ces matériaux sont déterminées à travers leur dosage. Pour les matières premières, elles sont récapitulées donnée dans le tableau 10. La composition en élément chimique, déterminée par dosage volumétrique des matières premières (tableau 10), nous montre la composition du déchet aux matières premières de base de la fabrication du clinker (calcaire et argile). Le déchet contient tous les éléments retrouvés dans la base du ciment.

Cependant, les pourcentages des éléments chimiques dans les matières premières sont différents. En détail, les taux de CaO dans les différents clinkers : Maloci, Ombilahy, sol 2000, Mada- Japon sont respectivement estimés à 52.84, 55.30, 55.27, 59.95. D'après ces valeurs, Mada-japon a un fort pourcentage en CaO par rapport aux autres clinkers (voir tableau 10). Cela implique que la forte teneur provoque l'augmentation de résistance du ciment, à cause des fortes liaisons aux autres oxydes tels le SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

Par ailleurs, le déchet comporte un pourcentage trioxyde de soufre élevé (tableau 10). Le SO₃ que contient le déchet est l'élément important à utiliser comme ajout dans la fabrication des ciments [G.K.Moir-Bleu].

Le tableau 12 montre le changement de pourcentage des éléments chimiques du ciment synthétisé après avoir y ajouté des déchets. Ceci est dû à la composition chimique de ces derniers.

Pour la composition minéralogique, le tableau 11 montre les pourcentages massiques des phases des différents clinkers.

D'après le tableau 11, le clinker Mada-Japon est la plus forte phase de l'Alite (C_3S) avec un taux de 60.63 %, il appartient à l'intervalle de clinker normalisé mais les autres clinkers : Maloci, Ombilahy, Sol 2000 sont plus faibles par rapport à celui normalisé avec des taux respectifs de 11.26 % ; -2.99 % et 7.86 %.

Pour la phase Bélite, les taux de la phase C_2S dans les trois clinkers : Maloci, Ombilahy, Sol 2000 sont plus élevés, estimés respectivement à 46 %, 62.22 % et 59.25 % mais la phase de bélite du clinker Mada -Japon appartient à l'intervalle du clinker normalisé avec un taux de 15.77 %.

Pour la phase Aluminate, d'après le tableau 11, le clinker Mada- japon a un faible taux d'aluminate de 3.57 % par rapport aux autres clinkers : Maloci, Ombilahy, Sol 2000 avec des pourcentages respectifs de : 11.36 %, 10.25 %, 12.05 %.

En cas de phase Aluminoferrite, les clinkers Sol 2000 et Mada Japon avec les taux respectifs de 7.44 % et de 6.44 % appartiennent à l'intervalle du clinker normalisé, sauf les autres Maloci et Ombilahy dont les taux atteignent 16.26 %; 14.53 %.

Les résultats obtenus pour la composition minéralogique des clinkers sont établis par la formule de Bogue.

Du point de vue quantitatif et qualitatif, le clinker de Mada- japon est proche du clinker normalisé devant les autres sur le tableau 11.

Les résultats de l'analyse de performance sont résumés dans le tableau 13. Chaque ciment est interprété à travers des tableaux suivants :

Pour le ciment A

TABLEAU 14: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT A

	Valeurs	Conclusion
Module hydraulique	1.65	Résistance un faible
Module silicique	1.45	-Diminution de la température de clinkerisation -Prise et durcissement rapides - croûtage favorisé
Module aluminoferrique	1.44	Faible chaleur d'hydratation Ciment sans C₃A
Indice de saturation	0.81	Faible dégagement de chaleur

Pour le ciment B :

TABLEAU 15: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT B

	Valeurs	Conclusion
Module hydraulique	1.59	Résistance initiale faible
Module silicique	1.96	-Prise et durcissement moyens
Module aluminoferrique	1.45	Faible chaleur d'hydratation Ciment sans C₃A
Indice de saturation	0.73	Faible dégagement de chaleur

Pour le ciment C

TABLEAU 16: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT C

	Valeurs	Conclusion
Module hydraulique	1.76	Un peu de stabilité de volume et de gonflement
Module silicique	2.65	- cuisson difficile par manque de fondant -Prise de durcissement lent
Module aluminoferrique	2.49	-prise rapide -Ciment alumineux
Indice de saturation	0.77	Faible dégagement de chaleur

Pour le ciment D

TABLEAU 17: CRITÈRE CHIMIQUE POUR LE CIMENT D

	Valeurs	Conclusion
Module hydraulique	2.29	-stabilité de volume -gonflement
Module silicique	4.43	-Prise de durcissement lent -Diminution du croûtage dans le four
Module aluminoferrique	1.27	-prise rapide -faible taux de C ₃ A
Indice de saturation	0.93	-Résistances initiales élevées - Hautes résistances finales

D'après l'interprétation le clinker de Mada- Japon a une haute performance par rapport aux autres. Alors nous avons comparé les clinkers pour les caractérisations physiques du ciment.

IV.3: Caractérisation physique du ciment

La caractérisation physique s'est faite selon les protocoles expérimentaux détaillés dans le chapitre III. Les résultats obtenus sont affichés dans les tableaux 18, 19 et 20 ci-dessous :

TABLEAU 18: MESURE DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET À LA FLEXION (PETITE QUANTITÉ)

Composition	Résistance à la Compression (MPA)	Résistance à la flexion (MPA)
A : 3 % de déchets	2j : 4.10	2j : 1.25
	7j : 12.70	7j : 3.00
	28j : 24.15	28j : 3.88
B : 4 % de déchets	2j : 9.30	2j : 2.50
	7j : 24.60	7j : 4.50
	28j : 32.8	28j : 5.00
C : 4 % de déchets	2j : 12.10	2j : 2.63
	7j : 29.60	7j : 4.63
	28j : 40.30	28j : 5.38
D : 4 % de déchets	2j : 19.10	2j : 4.00
	7j : 30.70	7j : 4.87
	28j : 41.05	28j : 5.90

TABLEAU 19: MESURE DE RÉSISTANCE COMPRESSION ET FLEXION (GRANDE QUANTITÉ DE DÉCHET)

Composition	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)
E : 20 % de déchets	2j : 17.90	2j : 3.75
	7j : 25.44	7j : 4.13
	28j : 36.8	28j : 5.63
F : 35 % de déchets	2j : 14.80	2j : 3.25
	7j : 18.20	7j : 4.00
	28j : 32.65	28j : 5.00
G : 50 % de déchets	2j : 4.70	2j : 0.63
	7j : 12.00	7j : 3.88
	28j : 18.25	28j : 4.25

TABLEAU 20: ESSAI DE TEMPS DE PRISE DU CIMENT SYNTHÉTISÉ

Ciments synthétisés	Temps de prise
D : 4 % de déchets	307.2 min
E : 20 % de déchets	420 min
F : 35 % de déchets	438 min
G : 50 % de déchets	498 min

IV.3.1: Temps de prise

Les résultats du temps de prise des ciments synthétisés D, E, F, G avec des taux de déchets respectifs de 4 %, de 20 %, de 35 % et de 50 % sont donnés par le tableau 20 ci dessus.

Le tableau 20 montre que le temps de prise augmente en ajoutant des cendres de déchets dans la composition du ciment.

Pour cela, le temps de prise évolue dans le même sens que le pourcentage de déchet.

La mesure des temps de prise est effectuée sur une pâte pure de ciment de consistance normale à 20 °C. Pour le ciment synthétisé, cette consistance normale correspond au rapport E/C = 0,5.

La présence des impuretés en grande quantité affecte, d'une façon défavorable, l'hydratation du ciment [A.A.TABIKH].

IV.3.2. Résistance à la compression

Pour étudier le durcissement des ciments synthétisés, des mesures de résistance à la compression ont été réalisées sur des mortiers âgés de 2 jours, de 7 jours, de 28 jours. Les résultats de ces essais sont affichés dans les tableaux (18 et 19) ci dessus. Ils montrent l'augmentation de la résistance à la compression, en fonction de l'âge du ciment pour le mortier de sable normalisé.

La résistance à la compression du mortier de 2 jours avec sable normalisé est faible dans les compositions A, B et G avec des valeurs de 4.1, de 9.3 et de 4.7 MPa mais, pour les autres C, D, E, F leurs valeurs ont atteint 12.1, 19.1, 17.9 et 14.8 MPa.

Pour le cas de 7 jours, elle est forte pour les compositions B, C, D, E, avec les valeurs sont respectives de 24.6, de 29.6, de 30.7, de 25.44 MPa, par rapport aux autres A, F, G dont les valeurs correspondent à 12.7, à 18.2, à 12 MPa.

En ce qui concerne le cas de 28 jours, elle appartient à l'intervalle de classe normale du ciment : 32.5 à 42.5 (voir tableau 3 paragraphe I.3.4.3) pour les compositions B, C, D, E et F leurs valeurs respectives de résistance à la compression de l'unité MPa atteignent 32.8, 40.3, 41.05, 36.8 et 32.65. Mais pour les deux ciments A et G leurs valeurs de 24.15 et de 18.25 sont faibles par rapport à la norme du ciment.

D'ailleurs, le tableau 18 montre que Mada- Japon (D) a une résistance finale plus élevée avec la valeur 41.05 MPa par rapport aux autres compositions des ciments A, B, C lorsque nous y ajoutons une petite quantité de déchets. A cause de cette forte résistance du ciment D, nous avons choisi d'y ajouter une grande quantité. Les résultats sont indiqués sur le tableau 19.

IV.3.3. Résistance à la flexion

Les tableaux 18 et 19 affichent les résultats de la résistance à la flexion. Pour ainsi dire la résistance de flexion augmente en fonction de l'âge pour toutes les éprouvettes.

La résistance de flexion du mortier de 2 jours avec le sable normalisé, pour les différentes composantes : A et G avec des valeurs respectives de 1.25 et de 0.63 MPa, est faible par rapport aux autres : B ; C ; D ; E ; F qui ont des valeurs de résistance à la traction respectives de 2.5, de 2.63 de 4, de 3.75, de 3.25 MPa.

Dans le cas de 7 jours, pour les différentes composantes après l'écrasement, elle augmente petit à petit. Les écarts entre ces deux mortiers sont de 1.75, de 2, de 2, de 0.87, de 0,38, de 0.75 et 3.27 respectivement pour les composants A, B, C, D, E, F et G.

Pour 28 jours, pour la composante D, elle est grande par rapport aux autres composantes. La valeur de résistance de D est de 5.90 Mpa et pour les autres A, B, C, E, F, G leurs valeurs respectives atteignent 3.88 ; 5 ; 5.38 ; 5.63 ; 5 ; 4.25 MPa.

IV.4.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la caractérisation chimique et physique du ciment à étudier. L'influence des additions de déchet a été étudiée et discutée à partir de nombreux essais sur le mortier. Pour chacun d'eux, la performance de composition chimique et physique pour différents taux de substitution est analysée et les conclusions tirées sont :

- ❖ Le mélange de clinker avec le déchet a donné des résultats acceptables dans les essais ;
- ❖ L'ajout de déchets diminue la résistance à la compression. Mais les valeurs sont acceptables à la norme du ciment pour les ciments D, E, F avec les taux de déchets respectifs de 4 %, de 20 % et de 35 %.

Les résultats de notre étude montrent l'intérêt d'utiliser les cendres de déchets d'Andralanitra en substitution partielle au ciment sur les performances mécaniques des mortiers. Les ciments D, E, F développent des résistances de compressions égales respectivement à 41.05 à 36.8 et à 32.65 MPa en 28 jours d'âge, cela traduit le rôle physique et chimique à moyen terme et surtout à long terme des ajouts.

A souligner l'effet économique de la réduction des bases de ciment (clinker) par l'addition des cendres, qui est la diminution des coûts du ciment.

Un effet physique : au lieu de fournir le centre volant, et la pouzzolane au ciment composé, la réaction des cendres d'Andralanitra en consomme et tend vers la même classe. Nous remarquons que la cendre ajoutée retarde la prise de la pâte, retard qui devient plus important quand le taux de substituant est élevé. Ces retards des temps de prise pourraient être dus à la diminution de la vitesse du processus d'hydratation : une partie de la quantité d'eau nécessaire au durcissement du ciment seul est consommée par la cendre ou l'effet de dilution des grains de ciment.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les déchets d'Andralanitra augmentent en raison du développement technologique au fur et à mesure de la hausse de la population dans le commune urbaine d'Antananarivo. Nous avons donc pensé à leur exploitation pour les réduire et nous avons ainsi choisi les déchets d'Andralanitra sous forme de cendres pour les rendre substituant en au ciment.

D'ailleurs, nous notons l'existence de l'industrie cimentière à Madagascar, d'où valoriser les déchets peut être applicable compte tenu de l'augmentation de leur quantité sur place. Nous avons préparé plusieurs mélanges (différents pourcentages) pour étudier l'influence des additions partielles et progressives de cendres des déchets d'Andralanitra en fonction des caractérisations chimiques et physiques de leurs compositions.

Nous pouvons conclure ainsi que :

- L'ajout de cendre des déchets donne des résultats acceptables par rapport au ciment existant à Madagascar et plus important encore les quantités des déchets d'Andralanitra vont diminuer en fonction de l'utilisation partielle des cendres au ciment avec des pourcentages élevés de 20 %, et de 35 %.
- Les résistances à la compression et à la traction obtenues par ces 20 et 35 % des déchets ne sont pas mauvaises ni négligeables.
- utiliser des déchets pour fabriquer du ciment peut en donner un autre type de caractéristiques différentes qui influent sur la matrice cimentière et sur la durabilité des ouvrages.

Recommandations

Afin de compléter cette étude et de pouvoir cerner de près les lois qui vont régir le comportement de cendres des déchets d'Andralanitra, nous recommanderions, pour un travail futur, d'aborder les points suivants :

- ❖ Étude de l'utilisation de cendres des déchets d'Andralanitra sur les bétons,
- ❖ Étude des performances des mortiers et des bétons à base d'ajout des déchets de verre d'Andralanitra,
- ❖ Effet des ajouts minéraux sur le comportement de la pâte de ciment.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) [**A. TABIKH**]: A.TABIKH et F. M. MILLER, "The nature ophosphogypsum impurities and their influence on cement hydration", *Cement and Concrete Research*, Vol. 1, p. 663(1971).
- 2) [**A.Nonat**] :A. Nonat; Hydratation et prise des liants hydrauliques; Partie I et II; Physique, Chimie et Mécanique des Matériaux Cimentaires; École Thématique ATHIL; 2003.
- 3) [**A.WESSELSKY**]:A. WESSELSKY, O.M. JENSEN, Synthesis of pure Portland cement phases, *Cement and Concrete Research*, 39, 973–980, 2009.
- 4) [**ADEME**]:ADEME.Les Techniques de Stabilisation des Déchets Industriels Spéciaux, Paris : ADEME, 1996, 105 p.
- 5) [**C.Avenir**]:C. Avenier, B. Rosier, D. Sommain; Ciment naturel; Grenoble, Glénat éd. ISBN10 : 2723461580, 176 p ; 2007.
- 6) [**C.Vernet**] :C. Vernet; Évolution de la microstructure des hydrates des ciments - Aspects théoriques; 8^{ème}Congrès International - Journal of Cement composites and light weight concrete; Vol. 11, pp. 11-19 ; 1989.
- 7) [**Chandra**] : Chandra, S. and Flodin,P.Interactions of Polymersand Organic Admixtures on Portland Cement Hydration. *Cementand Concrete Research*, 1987, Vol. 17, pp. 875-890.
- 8) [**COURS**] : COURS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION, chapitre 2 : Les ciments [en ligne]. Agence Universitaire de la Francophonie, AUF. [Consulté en mars 2015]
- 9) [**D.Sedan**] : D. Sedan; Étude des interactions physico-chimiques aux interfaces de fibre chanvre / ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite; Thèse de doctorat, Université de Limoges; 2007.
- 10) [**Doc ; Hydratation**] : Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane; Hydratation de ciment Portland
- 11) [**Doc**] : Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane; Le ciment portland.
- 12) [**Dupain**] : Dupain R., Lanchon R., Arroman S. J. C. Granulats, sols, ciments et béton. Edition Casteilla, Paris, France (2000) 226 p.
- 13) [**E.Breval**] : E. Breval, "C3A hydration", *Cement and Concrete Research*, pp. 129-138, 1976.
- 14) [**Eyrolles**] : Eyrolles,Ciments Français, *La fabrication des ciments.*, 1993.

- 15) [**G.K.Moir**]: G.K.Moir- BlueCircle Minéralised High Alite Cements.World Cement Dec.1982.
- 16) [**G.Seidel**] : G. Seidel, H. Huckuf et J. Stark; Technologie des ciments, chaux et plâtres, processus et installations de cuisson; Paris; Septima éd; 230 p ; 1980.
- 17) [**Gevalor**] : Accord de coopération entre UN HABITAT et Gevalor : « Identification des opportunités de recyclage et évaluation rapide de secteur de la gestion des déchets solides à Antananarivo (Madagascar). Mai 2012
- 18) [**H.F.W.Taylor**]: H.F.W. Taylor, *Cement chemistry*. Thomas Telford publishing, 1998.
- 19) [**I.Jawed**]: I. Jawed, J. Skalny, J.F. Young; Structure and performance of cements; Hydratation of Portland Cement Structure and Performance of Cements; pp. 237-317; 1985.
- 20) [**I.Older**]: I. Older, S. Abdul-Maula, “Possibilities of quantitative determination of the Aft-(etringite) and Afm-(monosulfate) phases in hydrated cement pastes”, Cement and Concrete Research; Vol. 14, pp. 133-141; 1984.
- 21) [**L.KACIMI**] : L. KACIMI, A. GHOMAR, S. SALEM, Z. DERRICHE. Obtention d'un clinker Portland consommant peu d'énergie. Sciences & Technologies A N°25, p. 49-54. 2007.
- 22) [**M. Fukuhara**]: M. Fukuhara, S. Goto, K. Asaga, M. Daimon, R. Kondo; Mechanisms and kinetics of C4AF hydration with gypsum; Cement and Concrete Research; Vol. 11, pp. 407-414; 1981.
- 23) [**Njopwouo**] : Njopwouo Daniel. Minéralogie et physico-Chimie des argiles de Bomkoul et de Balengou(Cameroun) Utilisation dans la polymérisation du styrène et dans le renforcement di caoutchouc naturel. *Thèse PhD, Université de Yaoundé I N°2, (1984)*
- 24) [**P.Barret**] : P. Barret, D. Bertrandie; Fundamental hydration kinetic features of the majorcement constituents : Ca_3SiO_5 and $\beta\text{Ca}_2\text{SiO}_4$; Journal de Chimie Physique, pp. 765-775; 1986.
- 25) [**R. Dupain**] : R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Sain-Arroman; Granulats, sols, ciment et béton; 2^{ème} Edition; Casteilla éd.; ISBN 19952713514711
- 26) [**RAIVONIARIVO**] : RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, «Cours de Mortiers et Bétons», École Supérieur Polytechnique d'Antananarivo Université d'Antananarivo;
- 27) [**Rindra**] : Rindra Raharinjanahary (2011), « La question des ordures à Antananarivo : Une question en déséquilibre permanent » Madagascar-*Revue de Géographie*, volume 47, p 43-66.
- 28) [**Romilliat**] : Romilliat E., Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker. Thèse de Doctorat Université Jean Monnet de Saint-Etienne (2006) 136p.

- 29) [**S. Catinaud**] : S. Catinaud; Durabilité à long terme de matériaux cimentaire, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines; thèse du doctorat; Université de LAVAL Canada; décembre 2000.
- 30) [**S.P. Jiang;1995**] : S.P. Jiang, J.C. Mutin, A. Nonat; Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of cement setting; Part I. The fundamental processes involved during the cement setting; Cement and Concrete Research; Vol. 25, pp. 779-789; 1995.
- 31) [**S.P. Jiang;1996**] : S.P. Jiang, J.C. Mutin; A. Nonat; Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of cement setting; Part II; Physico-chemical parameters determining the coagulation process; Cement and Concrete Research; Vol. 26, pp. 491-500; 1996.
- 32) [**SAMVA**] : SAMVA. Cahier de charge environnementale «projet de sécurisation de la déchargé'Andralanitra et son exploitation dans un Horizon de cinq ans avant sa fermeture. 2011.
- 33) [**SPERANDIO K**]: SPERANDIO K : identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001
- 34) [**Taylor**]: Taylor, J.R., and Dinsdale, A.T., Calphad, 1990.**14**(1): p. 71-88.
- 35) [**V.S. Ramachadran; 1992**]: V.S. Ramachadran, M.S. Lowery; Conduction calorimetric investigation of the effect of retarders on the hydration of Portland cement; Termochimica Acta; pp. 373-387; 1992.
- 36) [**V.S. Ramachadran; 1995**]: V.S. Ramachadran; Concrete Science; Concrete admixture Handbook; Second Edition; Noyes Publication; pp. 12-13; 1995.
- 37) [**Venuat M**]: Venuat M. La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : «Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur (1989) 277p.
- 38) [**W. H. Duda**]: W. H. Duda; Cement data book; 3rd édition; French& European Pubns ed. ISBN 0828802041 ; décembre 1985.
- 39) [**Y. Tong**]: Y. Tong, H. Du, L. Fei; Comparison between the hydration processes of tricalcium silicate and beta-dicalcium silicate; Cement and Concrete Research; Vol. 21, pp. 509-514; 1991.

WEBOGRAPHIES

- 1) [**Centre**]Le Centre d'information sur l'eau Paris France;
<http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/4/contenu/423.htm>, 2009.
- 2) [**J.Beauchamp**]: J.Beauchamp; Mécanique des roches et des sols; Cours en ligne;
Université de Picardie Jules Verne; <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/eadaa/mecasol.htm>; septembre 2003.
- 3) [**PHOUMMAVONG**] : PHOUMMAVONG; Matériaux de construction; Cours en ligne;
Université Nationale du Laos;
<http://www.la.refer.org/materiaux/default.html>,2009.

ANNEXE

TABLEAU 21 : DÉTERMINATION DE LA PERTE AU FEU À 975 °C

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<ul style="list-style-type: none"> -reprendre le creuset avec l'échantillon calciné à 550 °C -Introduire dans le four électrique réglé à 975 °C pendant 45 mn -Laisser refroidir dans le dessiccateur pendant 15 mn -Peser le creuset avec son contenu calciné à 975 °C 	<ul style="list-style-type: none"> -Balance de précision -Creuset en platine -Four électrique réglable jusqu'à 1 000 °C -dessiccateur 	<p>Le teneur en eau à 550 °C exprimé en % :</p> $(P_3 - P_4) \times 100$ <p>P_3 = poids du creuset avec l'échantillon calciné à 550 °C</p> <p>P_4 = poids du creuset avec l'échantillon, calciné à 975 °C</p>

TABLEAU 22: DOSAGE DES RÉSIDUS INSOLUBLES (RI) DANS L'ACIDE CHLORHYDRIQUE

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<ul style="list-style-type: none"> -Peser 1g d'échantillon à analyser -Introduire dans un bêcher de 600 ml -Délayer avec 100 ml d'eau froide -Attaquer par 25 ml d'acide chlorhydrique dilué à 50 % -Chauffer pendant 10 à 15 mn jusqu'à ce que le liquide soit jaune clair -Filtrer à chaud à l'aide du papier rapide -Laver le papier à filtre et le bêcher à l'eau distillée chaude -Réserver le filtrat pour le dosage SO_3 -Mettre le papier avec son contenu dans un bêcher -Recouvrir par 100ml de Na_2CO_3 à 5 % puis faire bouillir pendant 15mn -Filtrer rapidement sur un papier filtre rapide -Laver le papier filtre et le bêcher à l'eau chaude additionnée de quelque ml de HCl dilué à 50 % -Enfin, laver à l'eau distillée chaude -Mettre le papier filtre avec son contenu dans un creuset préalablement pesé -Calciner à 1 000 °C pendant 30 mn, le creuset avec son contenu -Laisser refroidir dans un dessiccateur pendant 10 mn -Peser le creuset avec le résidu calciné 	<ul style="list-style-type: none"> -Creuset platine -Balance de précision -Réchaud électrique muni d'un bac à sable -Dessiccateur -Matériel courant de laboratoire (verrerie) -Four électrique pouvant atteindre jusqu'à 1 050 °C -Papier filtre à filtration rapide -Réactifs et produits utilisés : <ul style="list-style-type: none"> .Acide chlorhydrique (HCl) .Carbonate de sodium (Na_2CO_3) .Eau distillée 	<p>le teneur en RI exprimée en % :</p> $(P_1 - P_0) \times 100$ <p>P_0 = poids du creuset dans le vide</p> <p>P_1 = poids du creuset + résidu calciné en gramme</p>

TABLEAU 23: DOSAGE DES RÉSIDUS INSOLUBLES ET SILICE (SiO₂)

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<p>-Peser 1g d'échantillon à analyser</p> <p>-Introduire dans un bêcher de 600 ml</p> <p>-Attaquer par 35 ml de HCl concentré et 5 gouttes de HNO₃ concentré</p> <p>-Bien écraser les grains à l'aide d'un agitateur en verre</p> <p>-Faire bouillir pendant 6 à 7 mn dans un bain de sable sur le réchaud électrique</p> <p>-Abaisser la densité du mélange par 15 à 20 ml d'eau distillée chaude</p> <p>-Ajouter 10 ml de la solution de gélatine à 2,5 % en agitant</p> <p>-Laisser reposer pendant 5 mn</p> <p>-Filtrer sur papier filtre rapide</p> <p>-Laver le papier filtre et le bêcher à l'eau distillée chaude</p> <p>-Mettre le papier filtre dans un creuset en platine préalablement pesé</p> <p>-Calciner à 1000 °C pendant 30 mn ; le creuset avec son contenu</p> <p>-Laisser refroidir dans un dessiccateur pendant 10mn</p> <p>-Peser le creuset avec le résidu calciné</p>	<p>-Creuset platine</p> <p>-Balance de précision</p> <p>-Réchaud électrique muni d'un bac à sable</p> <p>-Dessiccateur</p> <p>-Matériel courant de laboratoire (verrerie)</p> <p>-Four électrique pouvant atteindre jusqu'à 1 050 °C</p> <p>-Papier filtre à filtration rapide</p> <p>- réactifs et produits utilisés :</p> <p>.Acide chlorhydrique (HCl)</p> <p>.Acide nitrique(HNO₃)</p> <p>.Gélatine en poudre</p> <p>.Eau distillée</p>	<p>Le teneur en (RI + SiO₂)</p> <p>Exprimé en %</p> <p>$(P_1 - P_0) \times 100$</p> <p>P₀= poids du creuset vide en gramme</p> <p>P₁= poids du creuset + résidu calciné en gramme</p>

TABLEAU 24: DOSAGE DE L'ALUMINE (Al₂O₃) ET DE L'OXYDE DE FER (Fe₂O₃)

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<p>-Ramener le filtra obtenu par l'essai précédent (RI + SiO₂) à 200 ml par l'eau distillée froide</p> <p>-Après homogénéisation, faire deux parts de 100 ml dans deux béchers</p> <p>-Réserver la 2^{ème} partie de 100ml pour le dosage de Fe₂O₃</p> <p>-Sur la 1^{ère} partie de 100 ml, ajouter 20 ml de l'ammoniaque</p> <p>-Porter à l'ébullition pendant 10 mn</p> <p>-Laisser reposer pendant 30 mn</p> <p>-Filtrer sur papier rapide</p> <p>-Laver le papier filtre et le bêcher à l'eau distillée chaude</p> <p>-Mettre le papier filtre dans un creuset en platine préalablement pesé</p> <p>-Calciner à 1 000 °C pendant 30 mn le creuset avec son contenu</p> <p>-Laisser refroidir dans un dessiccateur pendant 10 mn</p> <p>-Peser le creuset avec le résidu calciné</p>	<p>-Creuset platine</p> <p>-Balance de précision</p> <p>-Réchaud électrique muni d'un bac à sable</p> <p>-Dessiccateur</p> <p>-Matériel courant de laboratoire (verrerie)</p> <p>-Four électrique pouvant atteindre jusqu'à 1 050 °C</p> <p>-Papier filtre à filtration rapide</p> <p>-Réactifs et produits utilisés :</p> <p>.Ammoniaque</p> <p>.Eau distillée</p>	<p>La teneur en (Al₂O₃ + Fe₂O₃), exprimé en% :</p> <p>$(P_1 - P_0) \times 2 \times 100$</p> <p>P₀= poids du creuset vide en gramme</p> <p>P₁= poids du creuset + résidu calciné en gramme</p>

TABLEAU 25: DOSAGE DE L'OXYDE DE FER (Fe₂O₃)

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<p>-Prendre la deuxième partie du filtrat obtenu par l'essai précédent (RI + SiO₂)</p> <p>-Faire précipiter (Al₂O₃ + Fe₂O₃)</p> <p>-Dissoudre le précipité obtenu dans 10ml de HCl dilué à 50 %</p> <p>-Chauffer jusqu'à l'ébullition</p> <p>-Ajouter quelques ml de Cl₂S_n jusqu'à la décoloration</p> <p>-Laisser refroidir et ajouter 10 ml de Cl₂Hg 5 %</p> <p>-Ajouter encore 200 ml d'eau distillée froide</p> <p>-Ajouter 10ml de H₂SO₄ dilué à 50 % puis 5 ml de H₃PO₄ concentré</p> <p>-Mettre dans la solution 6 à 8 gouttes de diphénylamine (0,25g/l)</p> <p>-Titrer avec une solution de K₂Cr₂O₇ .N/10</p> <p>-Titrer jusqu'à l'apparition de la couleur violette</p> <p>-Soit V=volume de la solution de K₂Cr₂O₇ versé</p>	<p>-Balance de précision</p> <p>-Réchaud électrique muni d'un bac à sable</p> <p>-Agitateur magnétique</p> <p>-Burette de 25 ml</p> <p>-Matériel courant de laboratoire (verrerie)</p> <p>-Réactifs et produits utilisés :</p> <p>.Ammoniaque</p> <p>.Acide chlorhydrique (HCl)</p> <p>.Chlorure mercurique (Cl₂Hg)</p> <p>.Acide sulfurique (H₂SO₄)</p> <p>.Acide phosphorique (H₃PO₄)</p> <p>.Diphénylamine</p> <p>.Bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇)</p> <p>Eau distillée</p>	<p>La teneur en Fe₂O₃ exprimée en % :</p> $\frac{V \times 2 \times 7,98 \times 100}{1000}$ <p>V= volume de la solution K₂Cr₂O₇ versé</p>

TABLEAU 26: DOSAGE DE CHAUX (CaO) TOTALE

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<p>-Prendre le filtrat obtenu par l'essai précédent ($Al_2O_3 + Fe_2O_3$)</p> <p>-Ajouter deux gouttes de méthyle orange et agiter. La solution aura de couleur orange</p> <p>-Verser une solution HCl diluée à 50 % jusqu'à l'obtention de couleur rouge</p> <p>-Ajouter 35 ml d'oxalate d'ammonium $(NH_4)_2 C_2O_4$ à 5 % et agiter</p> <p>-Chauffer la solution à 80 °C, dans le bain thermostatique pendant 15 mn</p> <p>-Laisser refroidir à l'air libre pendant 12 heures</p> <p>-Filtrer sur deux papiers filtres lents</p> <p>-Laver le papier filtre et le bûcher avec l'eau distillée chaude</p> <p>-Mettre le papier filtre dans un creuset en platine préalablement pesé</p> <p>-Calciner à 1 000 °C pendant 30 mn le creuset avec son contenu</p> <p>-Laisser refroidir dans un dessiccateur pendant 10mn</p> <p>-Peser le creuset avec le résidu calciné</p>	<p>-Creuset en platine</p> <p>-Balance de précision</p> <p>Bain thermostatique pouvant atteindre jusqu'à 100 °C</p> <p>-Four électrique pouvant atteindre jusqu'à 1 050 °C</p> <p>-Dessiccateur</p> <p>-Matériel courant de laboratoire (verrerie)</p> <p>-Papier filtre à filtration lente</p> <p>-Réactifs et produits utilisés :</p> <p>.Méthyle orange</p> <p>.Acide chlorhydrique concentré</p> <p>.Oxalate d'ammonium</p> <p>.Eau distillée</p>	<p>Le teneur en CaO totale, exprimé en %</p> $(P_1 - P_0) \times 2 \times 100$ <p>P_0 = poids du creuset vide en gramme</p> <p>P_1 = poids du creuset + résidu calciné en gramme</p>

TABLEAU 27: DOSAGE DE MAGNÉSIUM (MgO)

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<p>-Prendre le filtrat obtenu par l'essai précédent (CaO)</p> <p>-Ajouter 25 ml d'ammoniaque à 5 %, la solution aura de couleur jaune</p> <p>-Verser 10 ml de phosphate d'ammonium (NH₄PO₄) à 10%</p> <p>-Laisser reposer pendant 12 Heures</p> <p>-Filtrer sur deux papiers filtres lents</p> <p>-Laver le papier filtre et le bêcher à l'eau distillée froide</p> <p>-Mettre les papiers filtres dans un creuset en platine préalablement pesé</p> <p>-Calciner à 950 °C pendant 30 mn, le creuset avec son contenu</p> <p>-Laisser refroidir dans le dessiccateur pendant 10 mn</p> <p>-Peser le creuset avec le résidu calciné</p>	<p>-Creuset platine</p> <p>-Balance de précision</p> <p>-Réchaud électrique muni d'un bac à sable</p> <p>-Dessiccateur</p> <p>-Matériel courant de laboratoire (verrerie)</p> <p>-Four électrique pouvant atteindre jusqu'à 1050 °C</p> <p>Papier filtre à filtration lente</p> <p>-Réactifs et produits utilisés :</p> <p>.Ammoniaque</p> <p>.Phosphate d'ammonium</p> <p>.Eau distillée</p>	<p>Le teneur en MgO, exprimé en %</p> $(P_1 - P_0) \times 2 \times 0,362 \times 100$ <p>P₀= poids du creuset vide en gramme</p> <p>P₁= poids du creuset + résidu calciné en gramme</p>

TABLEAU 28: DOSAGE DU SULFATE (SO₃²⁻)

Mode opératoire	Matériels utilisés	Formule
<p>-Prendre le filtrat obtenu par l'essai précédent (RI)</p> <p>-Porter à l'ébullition pendant 10mn</p> <p>-Ajouter 10ml de solution de BaCl₂ à 10 %</p> <p>-Continuer l'ébullition pendant 10mn</p> <p>-Laisser reposer pendant au moins 4 heures</p> <p>-Filtrer sur 2 papiers filtres lents</p> <p>-Laver le papier filtre et le bêcher avec de l'eau distillée chaude</p> <p>-Mettre le papier filtre dans un creuset en platine préalablement pesé</p> <p>-Calciner à 900 °C pendant 30mn le creuset avec son contenu</p> <p>-Laisser refroidir dans le dessiccateur pendant 10mn</p> <p>-Peser le creuset avec le résidu calciné</p>	<p>-Creuset platine</p> <p>-Balance de précision</p> <p>-Réchaud électrique muni d'un bac à sable</p> <p>-Dessiccateur</p> <p>-Matériel courant de laboratoire (verrerie)</p> <p>-Four électrique pouvant atteindre jusqu'à 1 050 °C</p> <p>-Papier filtre à filtration rapide</p> <p>-Réactifs et produits utilisés</p> <p>.Chlorure de baryum (BaCl₂)</p> <p>.Eau distillée</p>	<p>Le teneur en (SO₃²⁻), exprimé en % :</p> $(P_1 - P_0) \times 0,343 \times 100$ <p>P₀= poids du creuset vide en gramme</p> <p>P₁= poids du creuset + résidu calciné en gramme</p>

ANDRIAMANDIMBISON Charles Stéphan

E-mail : andrcharles92@gmail.com

☎ : 032 87 913 92

Nombre de pages : 61; nombre de figure : 25; nombre de tableaux : 28

TITRE : CONTRIBUTION À LA CONCEPTION D'UN CIMENT ACTIVÉ PAR DES DÉCHETS : VALORISATION DE DÉCHETS D'ANDRALANITRA



RÉSUMÉ

Ce travail se veut de rechercher la possibilité de valoriser les déchets d'Andralanitra pour la fabrication de ciment activé. Il se propose d'observer et d'étudier l'effet de leur ajout dans le clinker. Les échantillons sont préparés en ajoutant 4, 20, 35 et 50 % de ces déchets sur le ciment. Les mélanges sont hydratés et caractérisés par dosage volumétrique. Les mesures du temps de prise des mortiers (307.2, 420, 438 min), réalisées par l'appareil de Vicat, montrent que le début et la fin de prise sont proportionnels à l'ajout du déchet. La résistance à la compression des mortiers des différents mélanges, mesurée par l'appareil de compression montre des résultats prometteurs avec 4, 20, 35 % de déchets, les valeurs de résistance à 28 jours sont respectivement de 41.05, de 36.8, de 32.65 MPa comparables à celle du ciment portland type CPA

Mots clés : déchet (cendre) et ciment

ABSTRACT

This work concerns the ability to add value to the waste of Andralanitra for the production of cement. The addition effect of the waste on the clinker was studied. Samples were prepared by using 4%, 20%, 35% and 50% of waste content in the cement. The mixtures were hydrated and characterized by volumetric dosage. Vicat apparatus determined hardening time of the mortars (307.2; 420; 438 min). The hardening times depend on the amounts of waste, which were added. The compression apparatus measured compression resistances of the several. Acceptable results were found when 4, 20, 35% of waste content in the mixture was used, these values at 28 days were individual of 41.05, 36.8, 32.65 MPa, comparative of kind cement CPA.

Keywords: waste (ashes); cement

ENCADREUR: RAVELONANDRO Pierre Hervé, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo et Responsable du Parcours Génie de l'Eau et Génie de l'Environnement (2GE)