

# *Optimisation De La Valorisation Des Déchets De Chromite Pour Une Substitution Partielle Du CEM I Pur En Vue De La Production De Ciment Ecologique Et De Meilleures Performances Physique, Chimique Et Mécanique.*

Baofiza<sup>1</sup>, Rasoanaivoj.L<sup>2</sup>, Rabemanantsoaj.R<sup>3</sup>, Andriamiharimanana N<sup>4</sup>,  
Ranaivoniarivo V. G<sup>5</sup>, Andrianaivo L<sup>6</sup>

<sup>1,2,3</sup>Chercheur Enseignant, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

<sup>4</sup>Doctorante, EDSTII, Université Antananarivo

<sup>5,6</sup>Enseignant chercheur, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.



**Résumé –** De nos jours, les activités industrielles sont considérées comme étant parmi les plus grands consommateurs d'énergie et de ressource naturelle d'une part et producteurs de déchets et de rejets d'autre part. L'industrie cimentaire occupe une place importante avec une contribution à environ cinq pour cent des émissions mondiales de gaz carbonique, gaz à effet de serre d'origine anthropique et responsable du changement climatique et de la dégradation de l'environnement. La substitution d'une partie du ciment CEM I pur par d'autre matière première contribue à une réduction de l'émission de gaz carbonique. Ce travail de recherches a pour objet non seulement de valoriser les déchets de la laverie de la chromite d'Andriamena de la Société KRAOMA en les considérant comme étant une nouvelle matière première et un substitut probant d'une partie de clinker du ciment CEM I mais aussi de disposer un nouveau ciment écologique, à faible émission de gaz carbonique et de meilleures performances physique, chimique et mécanique.

Selon les différents essais, après préparation physique, mécanique et traitement thermique, les déchets de la laverie chromite présentent des propriétés pouzzolaniques. La composition optimale correspond à substituer 15% du ciment par du déchet activé thermiquement à 650°C.

**Mots clés –** Eco-ciment, ciment composés, déchets de chromite, Activation thermique, déchet activé, hydratation du ciment, activation pouzzolanique.

**Abstract –** Today, industrial activities are among the largest consumers of energy and natural resources on the one hand and producers of waste and emissions on the other. The cement industry plays an important role, contributing about five per cent of global emissions of carbon dioxide, a man-made greenhouse gas responsible for climate change and environmental degradation. Substituting a portion of pure CEM I cement with other raw materials contributes to a reduction in carbon dioxide emissions. The aim of this research work is not only to valorise the waste from the Andriamena chromite washing plant of the KRAOMA Company by considering it as a new raw material and a convincing substitute for part of the CEM I cement clinker, but also to provide a new ecological cement, with low carbon dioxide emissions and better physical, chemical and mechanical performances.

According to the different tests, after physical and mechanical preparation and heat treatment, the waste from the chromite washing plant has pozzolanic properties. The optimal composition corresponds to the substitution of 15% of the cement by waste thermally activated at 650°C.

**Keywords –** Eco-cement, compound cement, chromite waste, thermal activation, Activated waste, cement hydration, pozzolanic activation.

## I. INTRODUCTION

Le génie civil est un domaine incontournable dans le développement d'un pays. La présence des infrastructures construites dans les grandes villes détermine sa puissance économique. Le ciment reste un des matériaux de base dans la construction.

Cependant l'industrie cimentaire consomme une quantité massive d'énergie, et par conséquent produit une quantité importante de gaz à effet de serre ; Ce gaz résulte de la combustion des combustibles et de la décarbonatation du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) contenu dans la matière première, lors de la cuisson du mélange cru pour fabriquer le clinker.

Actuellement, les déchets industriels lors de l'exploitation et de la production posent aussi des graves problèmes environnementaux. La société KRAOMA ou « KRAOMITA MALAGASY » est une industrie minière sise à Madagascar exploitant le minerai de chrome ; ses rejets de traitement s'avèrent de plus en plus importants.

Ainsi, pour diminuer l'émission de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et pour réduire les déchets industriels, il est nécessaire de rechercher un nouveau ciment pour qu'il puisse acquérir de bonnes performances physiques et chimiques et en valorisant les déchets industriels pour substituer une partie du clinker.

Ce présent travail a pour objet de chercher un nouveau ciment écologique, à faible émission de gaz carbonique et de meilleures performances physique, chimique et mécanique en substituant une partie du clinker par la valorisation des déchets de traitement de la laverie de la chromite d'Andriamena.

## II. LOCALISATION DES MINES D'EXPLOITATION ET DU SITE MINIER DE LA SOCIETE KRAOMA

La région d'Andriamena est située dans la zone des hauts plateaux centraux de Madagascar. Elle se trouve à 160km à vol d'oiseau au nord d'Antananarivo, dans un vaste plateau très vallonné.



Figure 1 : Voie d'accès et Principaux cours d'eau de la zone d'étude

## III. METHODOLOGIE ET MATERIELS

Les matières premières utilisées pour la réalisation de ce nouveau ciment composé sont des matériaux locaux. Nous avons utilisé du ciment CEM I 42.5 N de la cimenterie d'Ibity de la société Holcim dont la dénomination commerciale est MANDA et les déchets de la laverie de la société KRAOMA d'Andriamena.



Photo 1 : Ciment CEM I



Photo 2 : Déchet de chromite

### III.1 Méthodologie

Notre travail consiste en premier lieu à prélever les échantillons de déchets de chromite, broyés et tamisés jusqu'à la granulométrie très fine comme le ciment. Ensuite ces matériaux ont subi de méthode d'activation thermique. Nous avons ensuite déterminé leurs caractéristiques chimique, physique et mécanique.



Photo 3 : Broyeur à boulets et série de tamis

Les résultats des essais ont été réalisés d'abord à partir d'un ciment témoin CEM I. Ensuite, on remplace progressivement une partie de ce ciment par du déchet de chromite. On obtient les résultats des ciments mélangés CEM I – Dc, où Dc est le déchet de chromite.

Cette étude concerne à l'évaluation de l'activité de la pouzzolane artificielle ainsi qu'à la détermination des conditions optimales de résistance mécaniques à la compression qui durcit à 28 jours pendant l'hydratation.

Notons que ce déchet de chromite minier est composé de latérite.

Partons d'abord à l'étude de ciment composé de déchet non activé pour que nous puissions comparer le résultat avec celle de déchet activé thermiquement.

Nous avons ensuite étudié l'influence de l'activation thermique des déchets de chromite

L'objectif de ce traitement thermique est d'avoir l'activité pouzzolanique ou la pouzzolanicité. Rappelons que l'activité pouzzolanique est l'aptitude de certains matériaux, dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment Portland.

L'activation thermique rend un matériau cristallisé en matériau amorphe pour avoir des propriétés pouzzolaniques.

#### **Traitement thermique du déchet**

Mode de calcination du déchet

La cuisson des déchets est effectuée dans un four électrique. Cette activation thermique suit une programmation de montée linéaire en température régularisée :

- Une montée en température (12°C/min) jusqu'à la température de traitement thermique isotherme ;
- Un maintien en palier isotherme à la température de cuisson pendant 1 heure ;
- Un refroidissement lent à la vitesse propre du four. On procède à l'ouverture du four lorsque la température atteint environ 150°C.

Les températures de traitement thermique sont : 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C.



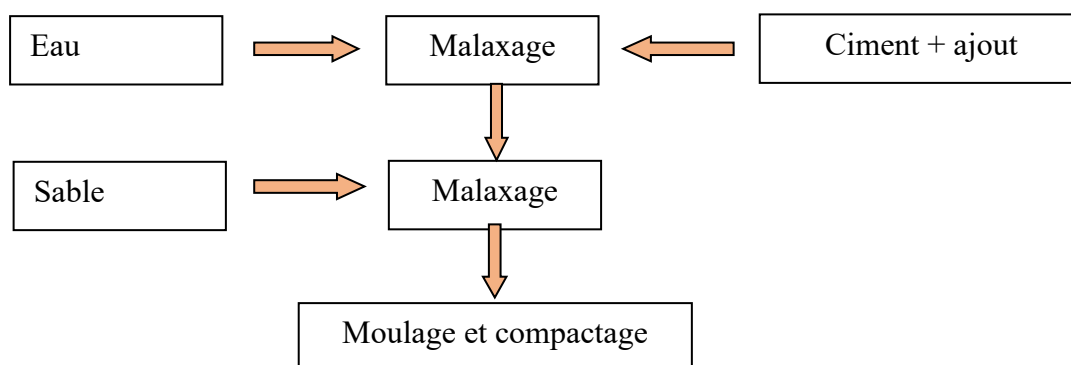
Photo 4 : Four électrique de calcination à température réglable

Ces expériences ont été réalisées dans des différents endroits tels que le laboratoire du Centre National de recherches industrielle et Technologique, le laboratoire du Génie-Chimique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo à Vontovorona, le Bloc technique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo à Ankatso, le Laboratoire National de Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) à Alarobia. Ces études ont été effectuées à l'aide des différents appareils cités ci-dessous.

Les matériels utilisés sont : La presse du type Testwell, malaxeur, appareil à choc, moule de dimension 4\*4\*16 cm, machine à écraser, chronomètre et balance. Les essais de compression ainsi que les essais en traction et en flexion ont été réalisés à partir des éprouvettes confectionnées sur des moules normalisés 4×4×16 cm.

Leur mode opératoire consiste à confectionner 1350g de sable normalisé ou sable de Leucate, 450g de ciment et 225g d'eau. Malaxer à petite vitesse le ciment et l'eau pendant 30s, verser le sable et malaxer à petite vitesse pendant 30s, malaxer encore mais à grande vitesse pendant 30s, laisser au repos pendant 90s et enfin malaxer à grande vitesse pendant 60 s. Donc on obtient ainsi un mortier normalisé qu'on porte sur l'appareil à choc dans un moule 4x4x16. Bien fixer et bien serrer le moule. On porte sur l'appareil à choc de 60 coups de 1 coup à la seconde. Le remplissage se fait en deux couches ; A l'aide d'une raclette, on obtient la hauteur et l'épaisseur de la couche, Bien raser et bien lisser l'éprouvette. Conserver dans la chambre froide pendant 24h avec le moule à 20°C. Après 24h, on conserve l'éprouvette dans le bain pendant 2 jours-7 jours-28 jours selon les essais à effectuer. On effectue l'écrasement de l'éprouvette sur la machine traction par flexion. On prend l'échantillon coupé en deux par traction pour l'essai de résistance en compression.

Les étapes ci-dessous sont de la norme NF EN 196-1 et valables pour la recherche de la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours.



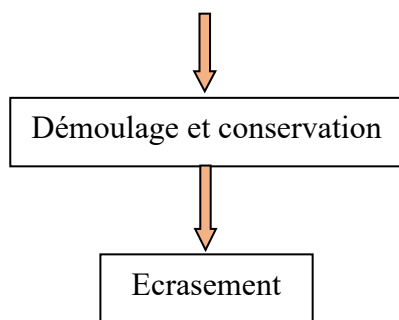


Figure 2 : Procédé de fabrication des éprouvettes



Photo 5 : Malaxeur



Photo 6 : Moule pour éprouvette 4\*4\*16[cm]



Photo 7 : Table à choc



Photo 8 : Conservation des éprouvettes



Photo 9 : Appareil d'essais de flexion



Photo 10 : Appareil de mesure de la résistance à la compression



Photo 11 : La presse du type Testwell

#### IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

##### IV.1. Résultats des caractéristiques chimique et physique du ciment MANDA CPA 42,5N et des déchets de laverie de chromite

Cette partie présente les résultats respectifs des caractéristiques chimique et physique du ciment CEM I CPA 42,5 N et des déchets de la laverie de la chromite d'Andriamena

##### IV.1.1. Caractéristiques chimique et physique du ciment

Lors de nos essais, nous avons utilisé le ciment CEM I CPA 42,5N MANDA. Le produit est livré sur le marché dans des sacs de 50 kg.

##### IV.1.1.1. Composition chimique du ciment

Tableau 1 : Composition chimique du ciment MANDA

Composition	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>L</sub>	CaO <sub>comb</sub>	P.F	Insolubles
Teneur (% massique)	20,10	62,8	6,92	5,67	0,53	2,66	0,99	0,61	3,2	1,3

Source : Auteur, 2011

Ce tableau présente les différents composants chimiques du ciment MANDA avec leur teneur massique respective. Par rapport aux différents composants du ciment MANDA, c'est la chaux (CaO) qui dispose une teneur significative avec 62,8%, et l'oxyde de Silicium avec 20,10%. CIMENT NORMAL compris dans la fourchette des normes relatives au ciment.

##### IV.1.1.2. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques du ciment MANDA utiliser sont données par le tableau suivant :

Tableau 2 : Caractéristiques physiques et mécanique du ciment MANDA

Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1,00
Masse spécifique [g/cm <sup>3</sup> ]	3,12

Eau de consistance normalisée [%]	28,2
Début de prise [mn]	196
Fin de prise [mn]	400
Surface spécifique Blaine SSB[cm <sup>2</sup> /g]	3384
Couleur	gris
RC 28j [MPa]	45,1
Rt 28j [MPa]	7,1

Source : Auteur, 2011

Le tableau 2 présente les caractéristiques physique et mécanique du ciment MANDA. Ce ciment a une couleur grise et dispose respectivement d'un temps de début de prise de 196 mn ou 3h 16mn et de fin de prise de 400 mn ou 6h 40mn. Il dispose aussi d'une Résistance à la compression à 28 jours de 45,1 MPa et d'une Résistance à la traction à 28 jours de 7,1 MPa. De plus, le ciment MANDA a une Surface spécifique Blaine SSB de l'ordre de 3384cm<sup>2</sup>/g en adéquation avec la caractéristique des ciments.

#### IV.1.2. Caractéristiques chimique et physique du Déchet Chromite

Le déchet de chromite a été obtenu à partir du déchet de la laverie de la société KRAOMA d'Andriamena.

##### IV.1.2.1. Composition chimique du déchet de chromite

Le tableau 3 présente la composition chimique du déchet de chromite d'Andriamena.

Tableau 3 : Composition chimique du déchet de chromite

Eléments	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	SiO <sub>2</sub> [%]	MnO [%]	Cr/Fe	FeO [%]	MgO [%]	P [ppm]
Teneurs	10,83	33,86	0,20	0,87	10,91	21,93	296

Source Auteur, 2011

Ce tableau montre la composition chimique des différents éléments constitutifs du déchet de chromite d'Andriamena avec leur teneur massique respective. Il importe de signaler que la teneur en chrome de l'ordre de 10,83% est normale et cela dépend de la nature du chrome.

Il met aussi en exergue la forte teneur en FeO et en SiO<sub>2</sub> due respectivement aux impuretés du gisement et la nature de la chromite ainsi que la présence de quartz dans l'oxyde de silicium.

##### IV.1.2.2. Caractéristiques physiques du déchet de chromite

Le tableau 4 suivant présente les caractéristiques physiques du déchet de chromite d'Andriamena.

Tableau 4 : Caractéristiques physiques du déchet de chromite

Masse spécifique [g/cm <sup>3</sup> ]	3,53
Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	0,59
Surface spécifique Blaine SSB [cm <sup>2</sup> /g]	2849
Porosité [%]	11,8
Teneur en eau [%]	3,54
Couleur	rouge

Source : Auteur, 2011

Ce tableau informe les caractéristiques physiques du déchet de chromite. Ce déchet de chromite a une couleur rouge avec une teneur en eau de 3,54% et d'une porosité de 11,8%. De plus, ce déchet de chromite a une surface spécifique Blaine SSB de l'ordre de 2849 cm<sup>2</sup>/g plus faible par rapport à celle du ciment MANDA où la Surface spécifique Blaine SSB est de 3255 cm<sup>2</sup>/g.

#### Analyse granulométrique par sédimentométrie

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un échantillon. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieurs à 0,080 mm.

#### ✚ Analyses granulométriques :

Le tableau 5 fournit le résultat d'analyses granulométriques du déchet de chromite.

Tableau 5 : Analyses granulométrique du déchet chromite

Diamètre équivalent [ $\mu\text{m}$ ]	1,4	3	6	8	12	16	22	34	47	64	80
Passants cumulés [%]	4	8	14	22	32	43	53	67	82	98	100

Source : Auteur

La figure 3 présente la courbe granulométrique du déchet de chromite par sédimentométrie.

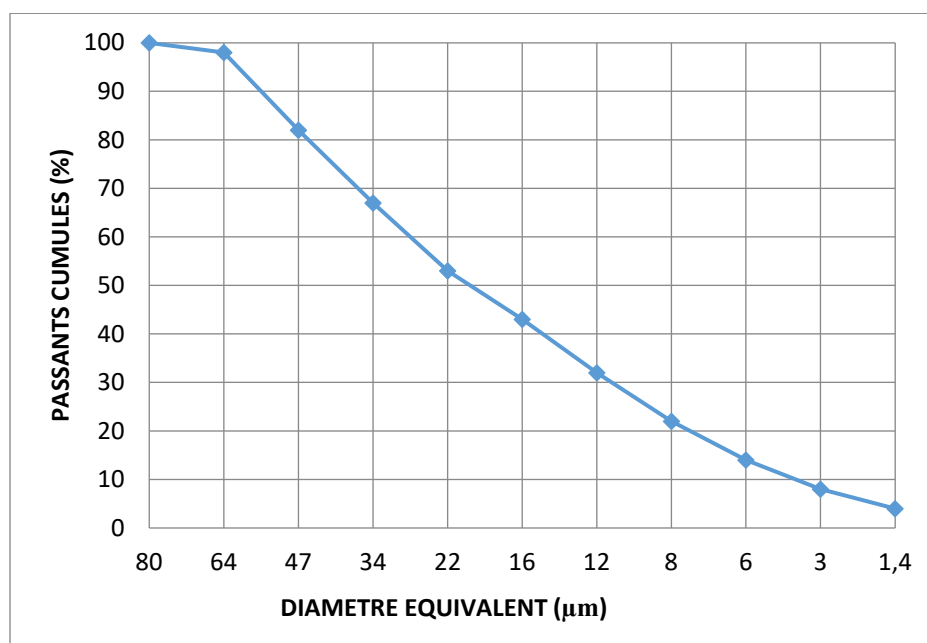


Figure 3 : courbe granulométrique du déchet chromite par sedimentométrie

Elle a une granulométrie fine et étalée.

- 6 % des éléments ont une taille à moins de 2 $\mu$  (microns)
- Diamètre médiane 19 $\mu$  (microns).

## IV.2. Résultats des essais de compression avec le ciment composé de déchet non activé activé thermiquement

### IV.2.1. Essais de compression avec le ciment composé non activé

Le tableau 5 informe les résultats obtenus lors des essais en compression du ciment composé de déchet non activé pour une substitution de 5% à 35% du déchet de chromite (Dc)



Tableau 5 : Moyenne des résultats des essais de compression obtenus avec le ciment composé de déchet non activé.

Echantillons	Composition [%]		Résistance à la compression		
	C	Dc	7jours	14jours	28jours
CEM I	100	0	<b>11,20</b>	<b>13,55</b>	<b>21,70</b>
Dc 05	95	5	10,16	17,06	19,27
Dc 10	90	10	9,46	11,96	<b>20,65</b>
Dc 15	85	15	8,62	11,41	15,38
Dc 20	80	20	9,02	14,13	16,21
Dc 25	75	25	6,48	13,08	15,31
Dc 30	70	30	8,30	9,68	10,95
Dc 35	65	35	4,36	8,38	9,06

Source : RABIALAHY N.A, 2011

Ce tableau montre la résistance à la compression à 7 j, 14 j et 28 jours du ciment CEM I et du ciment composé (CEM –Dc) où : Dc varie de 5% à 35%. Il informe que la composition 10% C et 90% Dc qui présente une meilleure résistance à la compression de 20,65 MPA pendant 28 jours par rapport au CEMI. Par rapport à la norme dans le domaine cimentaire, cette valeur de 20,65 MPA est très faible puisque l'ajout qui est le déchet de chromite est un peu réactif car il est à l'état naturel. Compte tenu de cette situation, le procédé devra être poursuivi jusqu'à son activation thermique avoisinant la température successive de 500°C, à 550°C, puis 600 à 650°C et 700°C puis 750°C. La figure 4 suivante confirme ces résultats.

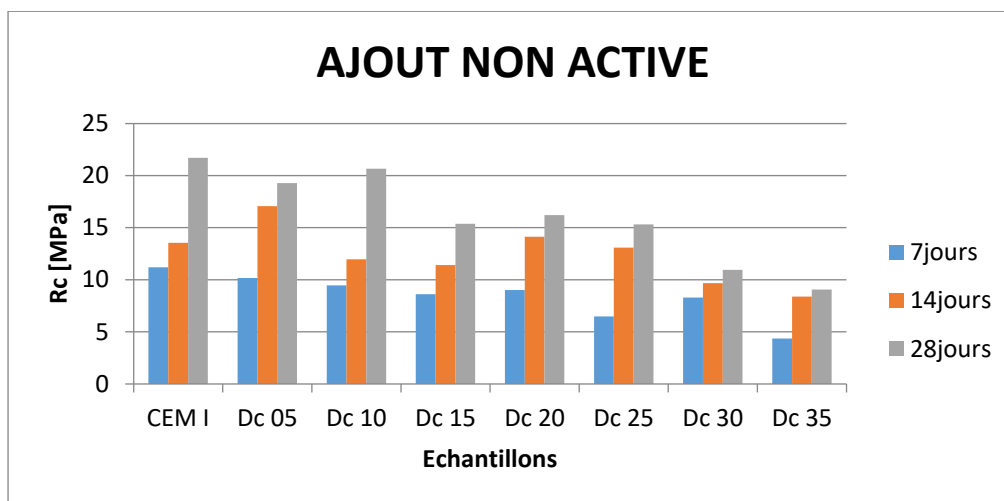


Figure 4 : Résistance à la compression des ciments composés de déchet non activé en fonction de la composition.

Ce graphe présente une comparaison de la résistance à la compression du ciment CEM I avec le ciment composé obtenu avec du déchet chromite non activé (Dc) de teneur 5% à 35%. Il montre qu'à part la résistance à la compression à 14 j pour un ajout de 5% (Dc 05) et 20% (Dc 20), la résistance à la compression du ciment CEM I est plus significative

## IV.2.2. Essais de compression par activation thermique du ciment composé

### IV.2.2.1. Essais de compression par activation thermique du ciment composé pour un palier d'une heure.

Plusieurs essais de compression après activation thermique du ciment composé allant de 500°C à 750°C ont été effectués. Ces essais de compression à différents teneurs en déchet chromite (Dc) allant de 5% à 35% permettent de faire une étude comparative afin de savoir la proportion optimale.

Le tableau 6 récapitule les résultats des différents essais réalisés

Tableau 6 : Résultats des essais de compression obtenus avec le ciment composé de déchet en fonction de la température d'activation

Echantillons	Température d'activation [°C]						
	0	500	550	600	650	700	750
Dc 5	19,27	16,37	18,26	17	18,34	22,97	21,67
Dc 10	20,65	18,04	18,8	23,4	19,36	23,33	22,42
Dc 15	15,38	13,6	17,18	21,13	<b>24,61</b>	21,94	16,98
Dc 20	16,21	14,19	18,61	16,4	22	16,64	17,15
Dc 25	15,31	15,07	18,86	16,71	18,03	18,88	16,13
Dc 30	10,95	10,49	14,73	13,22	13,28	18,68	16,16
Dc 35	9,06	11,19	16,94	14,84	14,4	15,87	17,36

Source RABIALAHY N. A, 2011

Commentaire

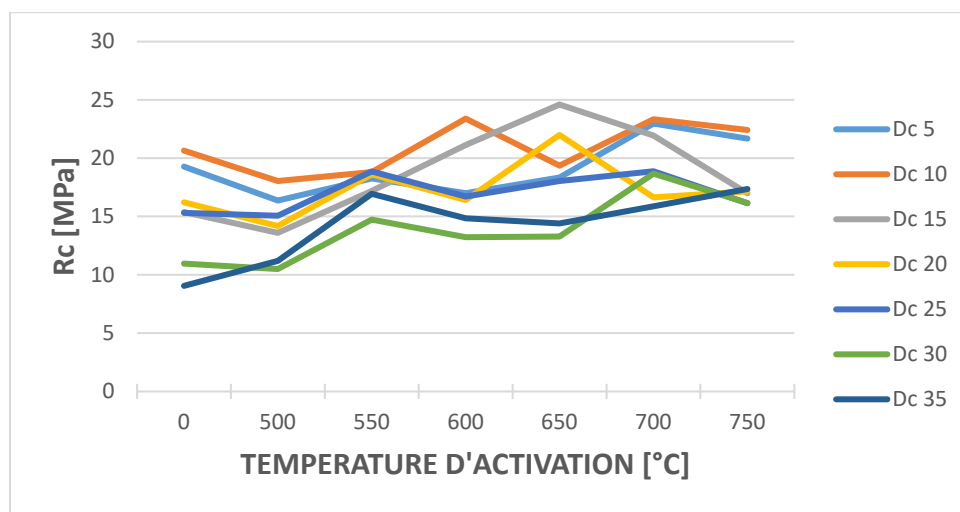


Figure 5 : Résistance à la compression à 28 jours en fonction de la température d'activation du déchet

Selon le tableau 6, la température optimale de traitement thermique est comprise entre 600°C et 750°C, c'est-à-dire qu'on peut remplacer une partie du ciment par du déchet de chromite activé à partir de 600°C à 750°C. A partir des résultats du tableau 6, on peut classer par ordre croissant les proportions les meilleures :

- Dc 15/650°C avec  $R_C = 24,61$  MPa
- Dc 10/600°C avec  $R_C = 23,4$  MPa

- Dc 5/700°C avec  $R_C = 22,97$  MPa
- Dc 10/750°C avec  $R_C = 22,42$  MPa

De ce classement par ordre croissant, le meilleur résultat correspond à une température de traitement thermique de 650°C avec une teneur en ajout de 15%. Il est à rappeler que pour tous les essais de compression réalisés, on a traité le déchet pour un palier d'une heure.

**IV.2.2.2. Essais de compression par activation thermique du ciment composé pour un palier allant jusqu'à cinq heures.**

Afin de connaître le palier de cuisson optimal, des essais de compression ont été effectués en variant le temps de cuisson de 2h à 5 h en maintenant la température à 650°C pour une teneur 15% en déchet chromite (Dc15/650°C).

**IV.2.2.2.1. Evaluation du palier optimal de traitement thermique isotherme du déchet de chromite**

Les essais ci-dessous permettent de connaître le palier optimal pour l'activation thermique isotherme de l'échantillon Dc 15/650°C. Le tableau 7 récapitule le résultat des différents essais de compression à 28 jours de traitement thermique isotherme de déchet de chromite.

Tableau 7 : Résultats des essais de compression à 28 jours en fonction du palier de traitement thermique isotherme du déchet chromite.

Température (heures)	Durée du palier isotherme				
	1	2	3	4	5
Rc [MPa]	24,61	25,12	26,19	23,43	22,17

Source : RABIALAHY N.A, 2011

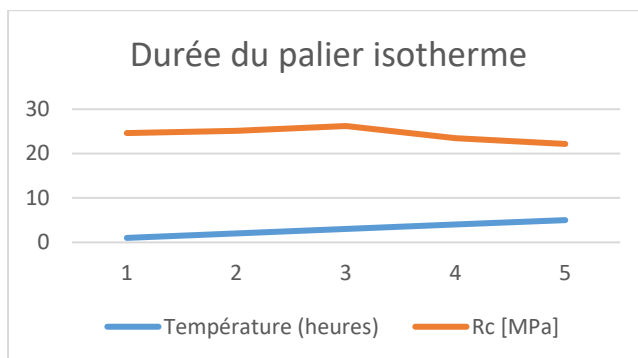


Figure 6 : Résistance à la compression en fonction du palier de traitement thermique isotherme du déchet.

On constate d'après la figure 6 que le meilleur palier de traitement thermique du déchet de chromite est de 3 heures.

**IV.2.3. Essais normalisés de la meilleure composition**

Des essais normalisés pour la meilleure composition choisie selon leurs résistances à la compression à 28 jours ont été effectués avec le ciment CEM I. La meilleure composition choisie étant l'échantillon Dc 15/ 650°C/3 h avec ajout de déchet de chromite activé à 650°C avec un palier de 3 heures.

**IV.2.3.1 Résultat des essais physiques**

Le tableau 8 récapitule le résultat des essais physiques réalisés avec l'échantillon Dc 15/650°C/3h et le CEM I.

Tableau 8 : Comparaison des résultats des essais physiques de l'échantillon Dc 15/650°C/3 h et du CEM I.

Propriétés	Dc 15/650°C/3h	CEM I
Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	0,96	1,00
Masse spécifique [g/cm <sup>3</sup> ]	3,11	3,10
Eau de gâchage [%]	27,6	27
Début de prise [mn]	140	160
Fin de prise [mn]	215	200
Surface spécifique Blaine SSB [cm <sup>2</sup> /g]	3317	3246
Couleur	Gris	gris
Expansion à chaud	Néant	Néant

Source : RABIALAHY N.A, 2011

Ce tableau montre la performance physique de l'échantillon Dc 15/650°C/ 3h par rapport à celle du ciment CEM I. La performance de l'échantillon Dc15/650°C/3 h situe respectivement au niveau du début de prise 140 mn au lieu de 160 mn pour le CEM I, et de la valeur de la surface spécifique Blaine SSB (3317 cm<sup>2</sup>/g) au lieu de 3246 cm<sup>2</sup>/g pour le CEM I. Par contre au niveau de la masse spécifique, de l'eau de gâchage ou de la masse volumique, les deux échantillons disposent presque les mêmes résultats.

#### IV.2.3.2. Résultat des essais mécaniques

Des essais mécaniques ont été effectués et les résultats issus de ces différents essais sont récapitulés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Comparaison des résultats des essais mécaniques de l'échantillon Dc 15/650°C/3 h et du CEM I.

Ages (jours)	Essais mécaniques			
	Dc 15/650°C/3h		CEM I	
	Rc [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Rt [MPa]
2	18,4	3,5	18,4	3,4
7	33,3	5,0	32,6	5,4
28	49,7	6,2	46,2	6,6

Source : RABIALAHY N.A, 2011

Ce tableau montre qu'on peut obtenir un nouveau ciment de bonne performance mécanique en remplaçant 15% du ciment CEM I par du déchet de chromite activé à 650°C avec un palier de 3 h.

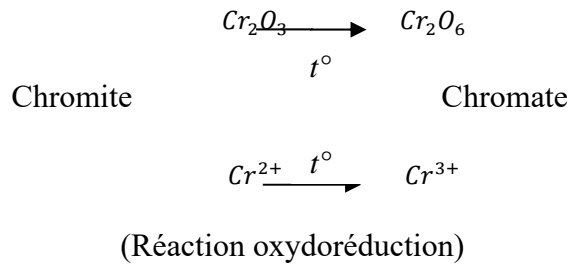
Cette étude présente l'influence de l'activité thermique des matériaux pour adapter un composé de bonne performance. D'après le tableau 5, la pouzzolane artificielle ou déchet chromite à l'état naturel n'est pas réactive, ce qui justifie l'activation thermique de la pouzzolane artificielle avant son utilisation comme ajout cimentaire. Donc ceci est porté à des différentes températures de 500°C à 750°C.

Selon les résultats des essais ci-dessus, la résistance à la compression est encore insuffisante 24,61 MPa, activé jusqu'à la température de 650°C avec 15% d'ajout et palier d'une heure. Cependant, pour bien approfondir, on a varié le temps de cuisson de 2h à 5h. D'après les essais ci-dessus de même composition, on en déduit que la cuisson à 650°C pendant 3 heures avec ajout 15% activé, la résistance à la compression est suffisante pour assurer une pouzzolanité notable du matériau, d'où la résistance à la compression à 28 jours est de 49,7 MPa. Elle est plus élevée que le ciment témoin sans ajout. La résistance à la compression croît

avec l'augmentation de la température de cuisson, présente un minimum vers 700-750°C parce que le matériau devient cristallin, il prend l'état amorphe. Il est inerte et la résistance à la compression diminue à 23,48 MPa.

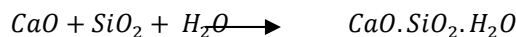
L'abaissement de la résistance pour la température de cuisson 700°C-750°C peut être dû à la présence de la silice SiO<sub>2</sub> qui dans le domaine de basse température 500-600°C, peut se trouver dans un état de désordre cristallin des impuretés du matériau. Notons que d'après l'analyse chimique du déchet chromite, la teneur en silice SiO<sub>2</sub> est très élevée 33,86%.

Au cours de l'activation thermique, la pouzzolane artificielle ou déchet chromite peut changer de couleur de gris ou de rouge brique si la température continue à augmenter. D'où l'augmentation de la température entraîne le nombre d'oxydation du déchet chromite en transformant l'oxyde chromite en oxyde chromate.



L'activité pouzzolanique est l'aptitude de certains matériaux, dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment.

De ces réactions, il en résulte essentiellement la réaction suivante :



Silicate de calcium hydraté (CSH)

Donc, l'oxydation qu'on a obtenu pendant ce traitement thermique peut se combiner lentement avec les éléments majeurs du ciment tels que : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et ainsi les constituants principaux du ciment tels que le Bélite (C<sub>2</sub>S), l'Alite (C<sub>3</sub>S), la Célite (C<sub>3</sub>A) et l'Alumino-ferrite tétracalcique (C<sub>4</sub>AF) qui font durcir le mortier ou éprouvette dans le mélange pendant 28 jours dans le bassin de la chambre froide. De ce fait, on obtient un ciment composé de bonne performance d'où la cémentation de liant.

### L'indice d'activité pouzzolanique de nouveaux ciments

#### Définition

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement de degré de réaction dans le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et le Ca(OH)<sub>2</sub> en présence d'eau. L'indice d'activité est déterminé à travers des essais mécaniques de compression sur des éprouvettes de mortier 40×40×160 mm<sup>3</sup>. Il est donné par le rapport entre la résistance à la compression d'un mortier avec p% d'ajout et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

$$i = \frac{R_p}{R_o}$$

Avec i : indice d'activité pouzzolanique

R<sub>p</sub> : résistance à la compression du mortier avec p% d'ajout en masse de ciment.

R<sub>o</sub> : résistance à la compression du mortier témoin avec 100% de ciment.

#### Indice d'activité (i)

$$i_{28} = \frac{R_{C28} (\text{mortier contenant } 75\% \text{ ciment} + 25\% \text{ addition})}{R_{C28} (\text{mortier contenant } 100\% \text{ de ciment})}$$

## V. CONCLUSION

Force est de constater que la substitution d'une partie du clinker pour disposer d'un nouveau ciment écologique à faible émission de gaz carbonique et de meilleure performance physique, chimique et mécanique est possible et faisable techniquement. L'activation thermique ou la pouzzolanité est la technologie appropriée pour y parvenir.

La méthodologie adoptée consiste à passer respectivement à travers l'ordre chronologique des différentes activités suivantes : la recherche bibliographique et webographie sur la détermination des caractéristiques des matières premières : le CEM I et les déchets de traitement de laverie du chromite d'Andriamena, la collecte de ces matières premières auprès de la quincaillerie et au niveau de la société Kraoma, l'étude de la composition du ciment CEM I composé avec du déchet de chromite (Dc) pour disposer du ciment mélangé CEM I- Dc, les travaux de laboratoire permettant d'évaluer la pouzzolanité des déchets de chromite, la détermination des conditions optimales de résistance mécanique à la compression, le suivi de l'activation thermique à travers une programmation de montée linéaire en température régularisée dont :

- la montée en température (12°C/min) jusqu'à la température de traitement thermique isotherme de : 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C ;
- le maintien en palier isotherme de la température de cuisson pendant 1 heure ;
- le refroidissement lent à la vitesse propre du four. On procède à l'ouverture du four lorsque la température atteint environ 150°C ;

Les résultats issus de ce travail de recherches sont probants entre autres :

- le matériau à l'état naturel ne présente aucune activité pouzzolanique ;
- le traitement thermique de déchet chromite à 500°C-750°C fait un matériau pouzzolanique en obtenant le ciment composé de bonne performance avec ajout cimentaire activé à 650°C palier pendant 3 heures et la résistance à la compression est de 49,7 MPa ;
- la température optimale de calcination est de 650°C d'où l'ajout présente une forte pouzzolanité et la consommation de la portlandite s'intensifie avec le temps de l'hydratation ;

L'utilisation de ces pouzzolanes artificielles produite par ces procédés de traitement thermique dans le ciment en substituant partiellement une partie de clinker constitue une solution écologique et contribue à la préservation de l'environnement par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la fabrication de clinker.

Beaucoup reste encore à faire dans plusieurs domaines tels que dans l'agriculture par la production d'engrais par la valorisation de la pouzzolane ou pour le remblayage dans le domaine routier ou pour la fabrication de béton léger.

## REFERENCES

- [1] : ANDRIANONY F.R Contribution à l'étude des ciments écologiques avec polyadditions minérales, Mémoire de fin d'études pour l'obtention de diplôme d'ingénieur Matériaux à l'ESPA, 2008
- [2] : A. Guidoum, « Matériaux de construction »
- [3] : BAOFIZA, « Contribution à l'élaboration de ciment écologique » Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme d'étude approfondie en Science des matériaux, 2010
- [4] : BERARD-BERGERY & al, La fabrication du ciment. Ciment français ; Eyrolles-1993
- [5] : BOGUE. R.H, chimie de ciments Portland, Eyrolles – 1976
- [6] : DAMIEN Demailly. Atelier changement climatique. Les enjeux du développement durable au sein de l'industrie du ciment : réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Rapport final Octobre 2005- Février 2006.
- [7] : HAJANIRINA V.B. Contribution à l'étude de la valorisation des déchets de la chromite d'Andriamena en matériaux de construction ? Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme d'ingénieur Matériaux à l'ESPA, 2009

- [8] : H. LAFUMA, Eléments de cristallographie minéralogique et spectrographie physico chimie des
- [9] : PIERRE Giraud, « Les roches basiques de la région d'Andriamena et leur minéralisation chromifère » Annale Géologique de Madagascar, 1960
- [10] : RAFETIARISON A. « Etudes de l'extraction de composés des chromes à partir de la chromite » Projet de fin d'étude, Génie chimique, 1987
- [11]: RAHELIARILALAO B. Cours en 5<sup>ème</sup> année « Analyse du cycle de vie (ACV) », 2010
- [12]: RAJOELISOA A. » Contribution à l'étude de pré concentration du platine et du Palladium à partir de la chromite d'Andriamena » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie chimique Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Université d'Antananarivo, 2002
- [13]: RANAIVONIARIVO V.G. Liants minéraux, cours de 3<sup>ème</sup> année Science et ingénierie des Matériaux, ESPA, 2008
- [14] RANAIVONIARIVO V. G. « Contribution à l'étude des liants pouzzolaniques de synthèse à base de matériaux thermiquement activés à moyennes température principalement les latérites calcinées » Thèse de Docteur Ingénieur à l'ESPA. Janvier 1992
- [15]: RANAIVONIARIVO V.G. Contribution à l'étude d'élaboration de ciment à haute résistance à Madagascar, action sur le mélange cru. Thèse de doctorat 2005.
- [16]: RAZAFITRIMO V. Contribution à l'amélioration de la qualité du ciment à Madagascar. Thèse de Doctorat Ingénieur, 2005
- [17] [https://www.google.com/cours en ligne/matériaux de construction/chapitre 2 : les ciments](https://www.google.com/cours%20en%20ligne/mat%C3%A9riaux%20de%20construction/chapitre%20%3A%20les%20ciments)
- [18] <https://www.infociments.fr/>
- [19] <https://www.elsevier.com/locate/jclepro>
- [20] <https://www.toutsurlebeton.fr>
- [21] <https://www.4geniecivil.com/2016/08/materiaux-de-construction-cours-pdf.html>