

Sous-thème 1 : les infrastructures, BTP et les équipements

“ DU BETON DE SABLE ORDINAIRE AU BETON DE SABLE A HAUTE PERFORMANCE PAR AJOUT DE METAKAOLIN.”

RAMANANARIVO Raymond¹ , RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely², Victor RAZAFINJATO^{2 3}

1 : Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

Correspondant : morebihf@yahoo.fr

2: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

3 : Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

Résumé

Les travaux de recherche effectuée sont consacrés à la confection d'un Béton de Sable à Haute Performance ou (BSHP) en utilisant les matériaux locaux. Trois types de sables : de dune, de rivière et de concassage ont été utilisés dans la fabrication de ce béton. Les résultats obtenus en termes de résistance à la compression montrent que le sable type concassé mélangé avec le ciment CEMI 42.5 est le plus performant par rapport aux autres de sable, car il permet de réduire le dosage en eau jusqu'à $E/L=0,3$ et il possède des résistances élevées. Par ailleurs ces résultats ont été obtenus grâce à l'ajout d'un superplastifiant (Plastiment BV40) obligatoire dans le cas des BSHP pour assurer une bonne mise en œuvre. D'autres paramètres ont été étudiés à savoir l'ajout de Métakaolin avec des pourcentages allant de 5% , 10%, 15% et de 20% conformément aux recommandations de la bibliographie. Ces types de béton BHP, BSHP et BTHP sont de plus en plus utilisés dans les nouvelles réalisations architecturales (gratte-ciel, ouvrage d'Art et autres) pour des raisons économique et esthétique des parements.

Mots clés : Béton de Sable a Haute Performance, Métakaolin, résistance, ouvrabilité, superplastifiant, compacité, indice de serrage

1. Introduction

L'évolution du béton dans le monde d'aujourd'hui – et vraisemblablement de demain – s'explique essentiellement par un ensemble unique et inégalé de qualités tout particulièrement recherchées par les professionnels de la construction. Ces dernières années ont vu un développement dans le domaine du béton, avec l'apparition de béton de sable, de bétons à hautes performances et ultra-hautes performances, plus ductiles, plus durables, plus résistants. Ces innovations n'auraient pu voir le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle microscopique des mécanismes de comportement du béton. Ces importantes avancées m'ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque là destiné. Deux voix de recherche sont à l'origine du développement spectaculaire des Béton de Sable à Hautes Performances :

- L'existence d'une nouvelle génération de superplastifiant hautement réducteur d'eau, à double actions, la dispersion et défloculation.

- L'amélioration du squelette granulaire par l'ajout d'additions minérales sous forme de fillers qui a un double rôle : celui d'augmenter la compacité par remplissage d'une partie du volume des vides et micro vides, d'une part, et d'autre part, et grâce à leur réactivité chimique, de participer à la formation d'hydrate secondaire et qui améliore la résistance et la durabilité. Madagascar connaît depuis une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30MPa, et qui ne dépassent pas 40 MPa dans les meilleures conditions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources des matériaux (aciers d'armature, ciment, ...) et des impacts importants sur la durabilité des constructions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable. Parmi les bétons innovants nous trouvons les Bétons de Sable à Hautes Performances (BSHP), dont l'utilisation à une double finalité: améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation de matériaux de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant le taux de ferrailage. La décision d'utiliser ou non du Metakaolin comme ajout dépend, évidemment de sa disponibilité à un prix économique et compétitif. A l'heure actuelle, l'utilisation des laitiers dans les BHP est relativement limitée. Alors que, chaque fois qu'ils ont été utilisés, les laitiers ont offert des performances aussi bonnes ainsi bien pour les bétons usuels que pour la formulation des BHP. Jusqu'à présent, les laitiers ont été utilisés en parallèle avec la fumée de silice pour fabriquer des BHP de classe I, II et III (50 à 125MPa). Selon la littérature, les Metakaolins ont été jusqu'à présent utilisés à des dosages variant entre 5 et 20 %. Ce dosage peut varier selon les conditions climatiques et environnementales. Cependant, dans le futur, on prévoit des dosages en Metakaolin plus élevés.

L'utilisation des Metakaolin dans la fabrication des bétons de sable à hautes performances constitue une nouvelle avancée pour une construction durable et offre des avantages d'ordre économique, technique et écologique.

2. Matériaux

Notre objectif est de rechercher une formulation de BSHP à base de Metakaolin en utilisant les trois types de sables et un type de ciments disponibles sur le marché. Nous avons étudié différentes formules permettant de valoriser le MK dans le cas du BSHP de la classe I.

2.1 Ciments

Dans notre étude, nous avons utilisé le ciment Portland CEM I 42,5 N de Holcim Madagascar ;

Leurs caractéristiques sont présentées par les deux tableaux ci-après :

Tableau 1: Compositions chimiques des ciments utilisés

	SiO ₂ (Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃ (PaF	Ins(CaO
CEM I	19,64	5,36	2,07	62,38	1,76	1,84	2,5	0,65	1,7

Tableau 2: Caractéristiques chimiques des ciments utilisés

Constituants	CaOI	C4AF	C3A	C3S	C2S
Pourcentage massiques CEM I 42.5	1.7	6.30	10.71	58.72	6.80

La figure ci-dessous présente les courbes granulométriques des deux ciments.

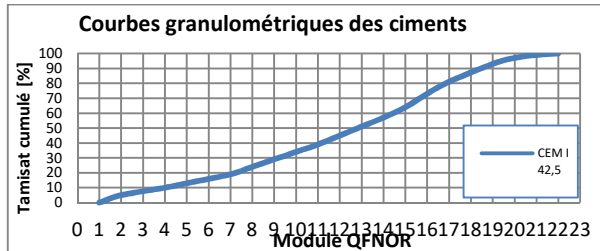
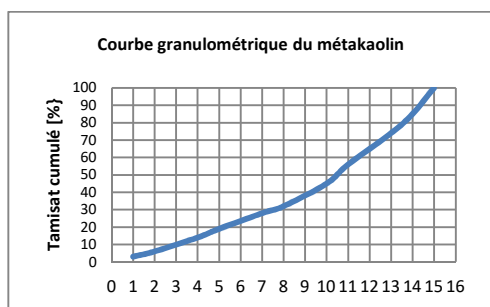


Figure 1: Courbes granulométriques des ciments utilisés

2.2 Metakaolin

Nous avons choisi comme ajout pouzzolanique de notre étude le Metakaolin. Ce produit n'existe pas sur le marché local. Nous transformons en Metakaolin le kaolin d'Analabe. La température de cuisson adoptée est environ de 650°C pendant de 5 heures. Les résultats de l'analyse granulométrique et ses caractéristiques physiques et chimiques de ce Métakaolin sont présentés par la figure et les tableaux suivant :

Tableau 3: Caractéristiques physiques du Metakaolin utilisé



Matériaux	Fillers
Type	Métakaolin
Densité apparente	1,5
Densité absolue	2,5
Finesse de Blaine	15
Couleur	blanche
Activité	Amorphe

Figure 2: Courbe granulométrique du Métakaolin

Tableau 4: Résultats des analyses chimiques

Echantillon	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
Echantillon1	13.96	44.98	38.02	01.21	00.82	00.08	00.10	00.12	00.10
Echantillon2	13.28	45.39	38.14	01.37	00.45	00.12	00.08	00.20	00.37

23 Sables

Dans notre étude, nous avons utilisés 3 types de sables à savoir: le sable de dune de Toamasina, le sable rivière d'Ikopa et le sable concassage d'Ambohimahitsy. Les figures et les tableaux suivants présentent leurs caractéristiques.

Tableau5: Caractéristiques physiques des sables

Sables	Sable de rivières S1	Sables de dunes S2	Sables de concassage S3
Densité sèche	2,561	2.46	2.70
Densité apparente	1.52	1.54	1.56
Absorption d'eau	0,8%	0,68%	0,5%
Compacité (K=9)	0,08/0,315 : 0,6700	0,08/0,315 : 0,6600	0,08/0,315 : 0,6800
	0,315/1,25 : 0,6582	0,315/1,25 : 0,6482	0,315/1,25 : 0,6782
Compacité virtuelle β_i	0,08/0,315 : 0,6668	0,08/0,315 : 0,6568	0,08/0,315 : 0,6768
	0,315/1,25 : 0,6622	0,315/1,25 : 0,6522	0,315/1,25 : 0,6722
Coefficient p (adhérence)	1,08	1,08	1,08

Coefficient q (effet plafond)	0,0058 MPa ⁻¹	0,0058 MPa ⁻¹	0,0058 MPa ⁻¹
Coefficient K_t	0,44	0,44	0,44
Equivalent d_e	84	62	72
Module de finesse	2,706	2,622	2,837

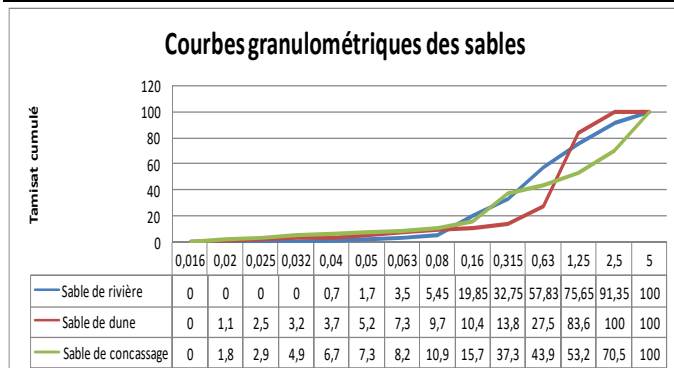


Figure 3: Courbes granulométriques des sables

24 Eau

L'eau utilisée est l'eau potable de la JIRAMA dont la température est de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, sa qualité est conforme aux prescriptions de la norme NFP 18-404.

25 Adjuvant

Dans la présente étude, nous avons employé un adjuvant. Il s'agit de l'adjuvant Plastiment BV 40 qui est un superplastifiant haut réducteur d'eau.

3. Formulations des mélanges hydrauliques

Nous avons opté pour l'approche associée au nouveau logiciel de formulation BétonlabFree du LCPC [BétonlabPro3, 2000]. Le BétonlabFree est une version restreinte et gratuit du BétonlabPro3. Elle consiste à caractériser les propriétés des constituants et de leur association dans le béton, de façon à prévoir les nombreuses propriétés des bétons à partir de modèles comportementiels. Des gâchées expérimentales sont ensuite réalisées afin de vérifier les différentes prévisions du logiciel.

Pour pouvoir mener cette étude, nous avons élaboré **un cahier des charges**.

- ✓ Dosage en ciment : 500kg/m³
- ✓ Dosage en MK varie de 5%,10% ,15%,20%
- ✓ Teneur en Eau=180L
- ✓ %SP=1.0 %
- ✓ E/L= variable
- ✓ Indice de serrage $K < 9$
- ✓ Environnement : X0

Les tableaux ci-après résument les différentes compositions de notre béton de sables.

Tableau6 : Composition du béton avec le sable de rivière (CEM I)

Gâchée n°	1	2	3	4	5
Sable de rivière (kg/m ³)	1562,6	1516,4	1497,9	1475,9	1447
Ciment Holcim (kg/m ³)	500	500	500	500	500
MK (kg/m ³)	0	25	50	75	100
SP1 (kg/m ³)	0	13,16	13,16	13,16	13,16
Eau (kg/m ³)	180	180	180	180	180

Tableau7 : Composition du béton avec le sable de dune (CEM I)

Gâchée n°	6	7	8	9	10
Sable de dune (kg/m ³)	1576,3	1536,6	1516,7	1493,9	1465,7
Ciment Holcim (kg/m ³)	500	500	500	500	500
MK (kg/m ³)	0	25	50	75	100
SP1 (kg/m ³)	0	13,16	13,16	13,16	13,16
Eau (kg/m ³)	180	180	180	180	180

Tableau8 : Composition du béton avec le sable de dune (CEM I)

Gâchée n°	11	12	13	14	15
Sable de concassage (kg/m ³)	1610	1570,6	1549,8	1523,1	1488,8
Ciment Holcim (kg/m ³)	500	500	500	500	500
MK (kg/m ³)	0	25	50	75	100
SP1 (kg/m ³)	0	13,16	13,16	13,16	13,16
Eau (kg/m ³)	180	180	180	180	180

4 Résultats

Les figures ci-après présentent les résultats à l'état frais et à l'état durcis du béton obtenu.

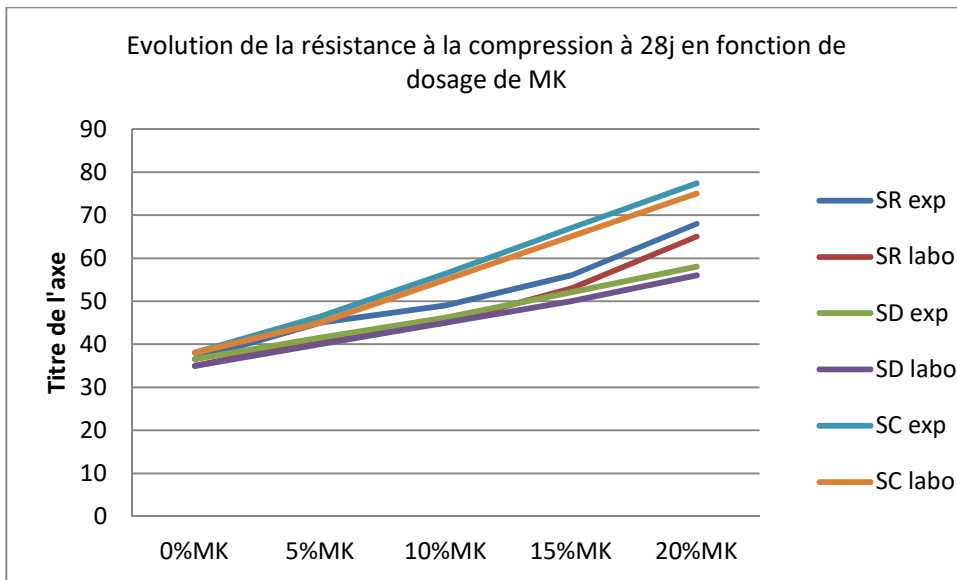


Figure 4 : Evolution de la compression à 28j en fonction du dosage en MK

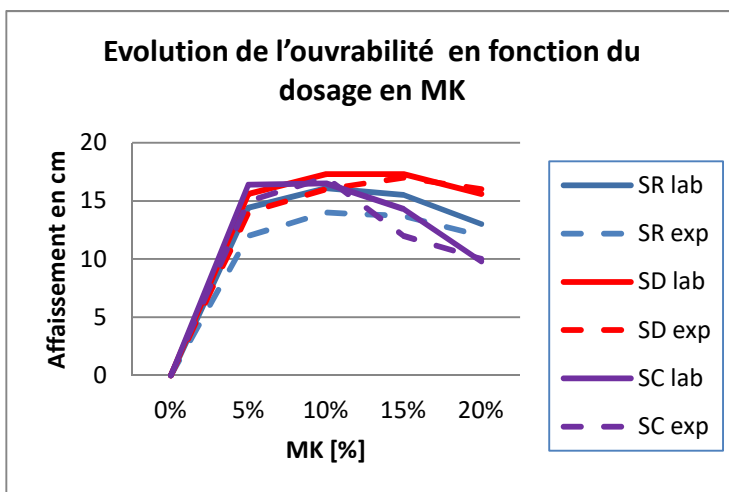


Figure5 : Evolution de l'ouvrabilité en fonction du dosage en MK

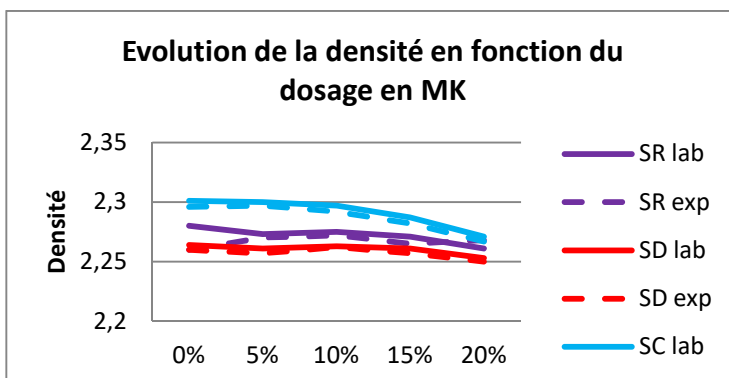


Figure6 : Evolution de la densité en fonction du dosage en MK

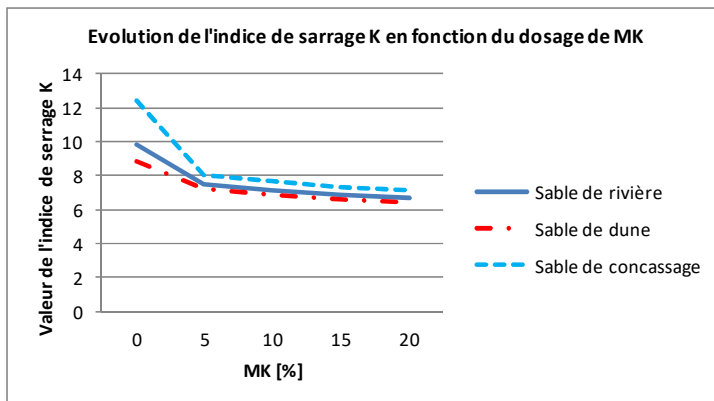


Figure7 : Evolution de l'indice de serrage en fonction du dosage en MK

5 Analyses des résultats

51 A l'état frais

511 L'ouvrabilité

On remarque que l'ouvrabilité des bétons avec des ajouts augmente sensiblement par rapport au béton de référence, par contre le taux de l'air occlus diminue. Cela est dû d'une part à la substitution de la partie fine de sable par l'ajout c'est à dire l'élimination de la partie argileuse qui absorbe beaucoup d'eau, et d'autre part les ajouts utilisés sont finement broyés donc ils remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée.

512 La densité

Concernant la densité, elle est relativement diminuée pour les bétons avec ajouts par rapport au béton de référence, ce qui s'explique par la diminution de la quantité de sable en fonction de dosage du MK et le rôle de remplissage de ces ajouts. En effet, ces derniers ayant des finesses plus grandes que celles du ciment utilisé, s'insèrent dans les vides et les pores capillaires. On densifie le squelette du béton et par conséquent, il en résulte une amélioration de la masse volumique du béton frais et une diminution du taux de l'air occlus.

52 A l'état durcis

521 Caractéristiques mécaniques « Résistance à la compression »

On peut dire que pour un rapport E/C égale à 0.3, les bétons fabriqués avec un ciment CEMI-42.5 et l'ajout de 20% du MK, présentent des propriétés performantes. La résistance des bétons de sable avec ajouts est plus élevée par rapport à celle du béton de sable sans ajout. Cette augmentation de résistance était prévisible et concorde parfaitement avec la littérature. (Djaknoun et al., 2005).

Les facteurs les plus responsables de cette augmentation sont bien sûr le choix des types de l'adjuvant, la grande finesse des ajouts utilisés et un autre très important c'est la diminution du

rapport E/C. Ce paramètre est favorisé par la formation des produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine et qui ressemblent beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe. Mais cette augmentation de résistance semble être presque linéaire, c'est à dire qu'en 28j, le processus d'hydratation a continué d'une manière presque aussi intense que les premiers jours. Ceci pourrait être une conséquence de la cure appliquée aux bétons.

522 Durabilité des bétons

5221 Absorption d'eau massive par immersion

On a choisi l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation de la porosité du béton étudié. Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction des taux de MK sont illustrées par les figures suivantes :

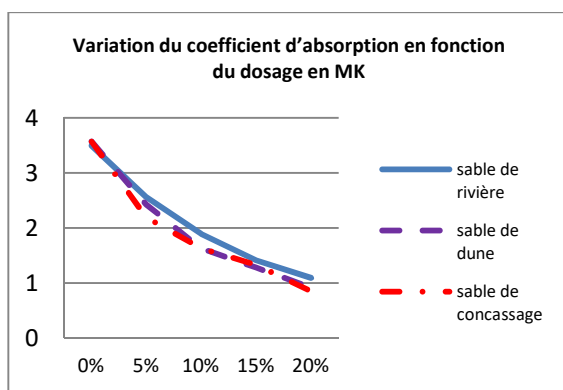


Figure 8 : Variation du coefficient d'absorption en fonction

Les coefficients d'absorptions obtenus sont inférieurs à 5% ; ce qui signifie que notre béton est un très bon béton selon la norme NBN B 15-211.

Il est nettement visible que les bétons à base de sable de concassage sont moins poreux que les bétons à base de sable de dune, notre BSHP présente des coefficients d'absorption réduits en raison de la porosité qui est réduite avec la composition de 10 à 15% de MK et qui améliore les performances du béton. Cela accroît considérablement la durabilité du béton qui conditionne la durée de vie des ouvrages.

5222 Le coefficient de ramollissement

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau (R_{csat}) à la résistance à la compression du matériau sec (R_{csec}). Les valeurs du coefficient de ramollissement en fonction des dosages en MK sont clairement exposées dans les figures ci-dessous :

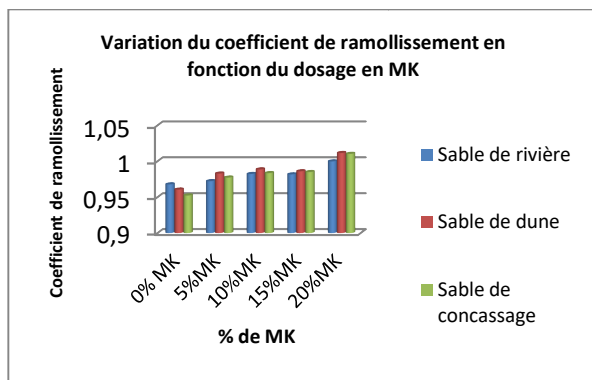


Figure 9 : Variation du coefficient de ramollissement en fonction

Le coefficient de ramollissement caractérise la résistance à l'eau des matériaux.

Nous constatons d'après les résultats obtenus, que les bétons à base ciment CEMI de dosage 20% en MK se comportent à l'eau. Cette situation est liée à la perméabilité réduite des bétons avec ajouts.

6 Conclusions

D'après ces résultats, on constate que, quel que soit le type des sables utilisés associé avec 20% de Metakaolin, le béton de sable obtenu vérifie la classe d'un béton de sable à haute Résistances. En effet, on peut dire que c'est possible de produire de Béton de Sable à Haute Résistance à Madagascar en exploitant nos matériaux locaux et plus précisément le Kaolin. A la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du Métakaolin est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone, améliorer les propriétés physiques et mécaniques de béton de sable.

REFERENCES

[1] **Aïtcin P.C.**, «*Bétons, Haute performance*» Edition, Eyrolles, Paris 683, 2001.

[2] **Aïtcin Pierre Claude** « L'interaction ciment/superplastifiant : cas des polysulfonates », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées juillet-Août 2001.

[3] **AMOURI Chahinez (2009)** « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (caractérisation, performance, durabilité) »

[4] **Batis et al.**, "The effect of metakaolin on the corrosion behaviour of cement mortars". Cement and concrete composites, vol. 27, pp. 125-130, 2005

[5] **BANTATA .A.**, «Etude expérimentale d'un béton avec sable de dune de la région de ouargla (Ain Elbaida) » Mémoire de Magister, Université de Ouragla , Année 2003 /2004

[6] DE LARRARD F., « Structures granulaires et formulation des bétons », traduit de l'anglais par André Lecomte, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 34, 414 p., Avril, 2000

[7] Gabriely RANAIVONIRIVO, (1992), « Contribution à l'étude des liants pouzzalaniques de synthèses à base de matériaux thermiquement actifs à moyennes températures, principalement les liants calcaires »

[8] Gabriely RANAIVONIRIVO, (2005), « Contribution à l'étude de l'élaboration de ciment à haute résistance à Madagascar », Thèse de doctorat, (2005)

[9] Gilles CHANVILLARD, « Méthode de formulation de béton de sable à maniabilité et résistance fixées », Bulletin des laboratoires des PONT et CHAUSSEES sept-oct (1996) pages 49-63

[10] RABE Christian, RATSIMBAZAFY Hery Mikaela (1987), « Etude de la production d'un ciment alternatif à partir de chaux et de cendres et de balles de paddy »

[11] RAMAROSON Jean De Dieu (1995) « Etudes sur la valorisation chimique de la kaolinite pour la production de sulfate d'aluminium, d'alun et de silicate de soude »

[12] RAZANAKOTO Ida Vololonjanahary (2008) « Contribution à l'étude de fabrication de ciment écologique par le procédé géopolymérique »

[13] Sabah Ben Messaoud *, Mezghiche Bouzidi (2011), « Formulation des bétons à hautes performances » Revue de génie industriel 2011, 6, 4-15

[14] Sabir B.B., Wild S., Bai J., Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement and Concrete Composite, vol. 23, 2001, p. 441-454