

Développement de l'écologie industrielle à Madagascar : valorisation de cendre volante dans la construction du béton

RANDRIAMALALA TIANA Richard

Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment, BP 1151 Alarobia, Antananarivo 101, Madagascar

TIANASOA RAMAMONJY Manoelson, RAHARISON MANDIMBY Tiandray

DCMCP - Faculté des Sciences BP 906 - Université d'Antananarivo, Antananarivo 101 - Madagascar

Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : rtianasoamanoelson@gmail.com

RESUME

La proximité des carrières d'agrégats sur la route nationale N° 5 et des dépôts de cendres volantes de la centrale thermique du projet Nickel de SHERITT dans la région de Toamasina, favorise une synergie éco-industrielle pour la production locale de béton avec du ciment en utilisant de la cendre volante. L'étude des matériaux ont montré d'une part, pour les agrégats de ces carrières, des bonnes caractéristiques physiques et mécaniques, selon la norme P18-541 et d'autre part, pour les cendres volantes, une forte teneur en SiO_2 , Fe_2O_3 et de faible teneur en CaO , ainsi qu'une surface spécifique Blaine élevée. Les tests mécaniques effectués ont montré que la résistance du béton en substitution avec 10% de cendre volante est plus élevée qu'avec du ciment CPA à partir de 28 jours. D'autre part, la cendre volante devient un bon adjuvant fluidifiant du béton par ajout sans aucun retrait et avec une amélioration de la maniabilité et la résistance à 28 jours. Des bétons ouvrables et de très bonnes résistances mécaniques peuvent être ainsi formulés avec des matériaux économiques pour applications réelles.

MOTS-CLÉS : Ecologie industrielle, cendres volantes, ciment, béton

ABSTRACT

The proximity of quarries on the National Highway N°5 and the Fly ash tailings of the SHERITT Nickel project coal power plant in the Toamasina region is favorably promoting an eco-industrial synergy for the local production of concrete using fly ash with cement. Material studies showed good physical and mechanical properties for the quarry aggregates according to the P18-541 standards while high SO_2 and Fe_2O_3 proportions and low proportion in CaO as well as a strong specific Blaine area were observed with the fly ash. Mechanical tests showed that the strength of the 10% fly ash-substituted concrete was higher than with 28 day age CPA cement. Moreover, by addition, fly ash is a good plasticizer agent for concrete without any drying shrinkage and with improved handling and strength at 28 days. Hence, workable concrete with excellent mechanical strength can be obtained from cheap materials for real applications.

KEYWORDS: Industrial ecology, FLY ASH, cement, concrete.

Développement de l'écologie industrielle à Madagascar : valorisation de cendre volante dans la construction du béton

RANDRIAMALALA TIANA Richard, TIANASOA RAMAMONJY Manoelson, RAHARISON MANDIMBY Tiandray

INTRODUCTION

L'industrie du bâtiment consomme annuellement 3 milliards de tonnes de matières premières (YUKSEL I et coll., 2007) et rejette environ 750 000 millions de cendres volantes pour la production d'énergie qui lui sont nécessaires à partir de la houille (BLISSETT R.S., ROWSON N.A., 2012). Sous la pression environnementale et la nécessité économique, des différents utilisations des ces cendres volantes ont ainsi vu le jour mais elles ne concernent que 25% du total y compris l'utilisation dans la construction. A Madagascar, l'importation du ciment s'est élevée à 864 600 tonnes contre une production locale de 1 167 600 de tonnes en 2008 (INSTAT, 2009). La centrale à houille du projet d'extraction de nickel et de cobalt du Projet SHERITT Madagascar génère environ 60 000 t/an de cendres volantes qui s'accumulent en tant que déchets, menaçant ainsi l'environnement. Or, la valorisation ces cendres volantes dans les bétons est une technologie déjà mature datant plus de cinquante ans. Elle vise non seulement à réduire la consommation des matières premières et de l'énergie mais aussi à améliorer les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton ainsi que sa durabilité (SAHMARAN M., and LIV.C., 2009). Les sites de dépôts de ces cendres volantes se trouvent à proximité des carrières d'agrégats de la RN5 Soanieranaivongo-Toamasina qui sont susceptibles d'utilisation à grande échelle et présentent ainsi un enjeu économique non négligeable. Cela est d'autant plus important que ces sites sont proches du port de Toamasina, ce qui facilitera grandement le va-et-vient des marchandises dans les perspectives d'une utilisation locale de béton basé sur la valorisation et des cendres volantes et des agrégats issus de ces carrières. La faisabilité technique du béton ainsi élaboré, dans le cadre de prévention

collective des déchets et de la valorisation des ressources locales selon les concepts de l'Ecologie industrielle (ADOUE C., 2007) ouvrira la voie à des possibilités de gains économiques, environnementaux et sociaux. Cet article propose une méthode basée sur l'emploi des cendres volantes en tant que substituant du ciment et comme filler d'ajout du béton ainsi que l'utilisation des agrégats obtenus localement pour définir une formulation optimale du béton avec ses caractéristiques.

I. Matériaux

I.1 Cendres volantes, agrégats et gravillons

Les cendres volantes produites par le Centrale thermique fonctionnant à partir de la houille importée d'Afrique du Sud ont été fournies en sac de 50 kg par le Projet Ambatovy à Toamasina. Les agrégats utilisés proviennent des quatre carrières sur la RN°5, reliant Soanieranivongo à Toamasina. Les matériaux secs de dimension supérieures à 80µm ont été tamisés par une colonne constituée par l'emboîtement des tamis ; les éléments inférieurs à 80µm par sédimentométrie effectuée dans une éprouvette de 2 litres, contenant de la solution en suspension où on a plongé le densimètre gradué de 1.030g/cm³ (Figure 1). Les caractérisations chimiques des cendres volantes ont été effectuées par de fluorescence X (EDXRF OXFORD) qui permet des micro-analyses (Tableau 1). La dureté des gravillons de classe 10/14 obtenus à partir de la dolérite et du basalte a été étudiée sur une machine Los Angeles avec une vitesse régulière entre 30 et 33 tr/mn et résistance à l'usure par essais Micro-Deval. Elles sont caractérisées par une forte teneur en oxyde ferrique (matière inerte) et par une faible teneur en chaux.

Tableau 1. Caractéristiques physiques et chimiques des cendres volantes

| Essais | % | Essais | % |
|--------------------------------|------|----------------------------|--------------------|
| Insolubles AFNOR | 7,37 | MgO | 0,2 |
| Perte au feu | 6,83 | Oxydes divers | 0,6 |
| SiO ₂ insoluble | 56,2 | Total | 100% |
| Fe ₂ O ₃ | 23 | M.V (KN/m ³) | 22.15 |
| Al ₂ O ₃ | 0,8 | SSB(cm ² /g) | Entre 3500 et 4430 |
| CaO | 5 | D.app (g/cm ³) | 0,78 |

La finesse Blaine de ces cendres volantes varie de 3500 à 4430 cm²/g. Ces cendres volantes sont probablement d'origine bitumineuse au vu de leur haute teneur ferrique (23%) et de silice insoluble (56%) ; la teneur moyenne en CaO (8%) ainsi que de perte au feu relativement élevée de 6,8% (AHMARHUZZAMAN M, 2010). Elles s'intègrent dans la classe F selon les normes de classe américaine ASTM et européenne EN450-1 et comme ferrisialique selon la méthode de Vassilev et Vassileva (VASSILEV and VASSILEVA, 2007).

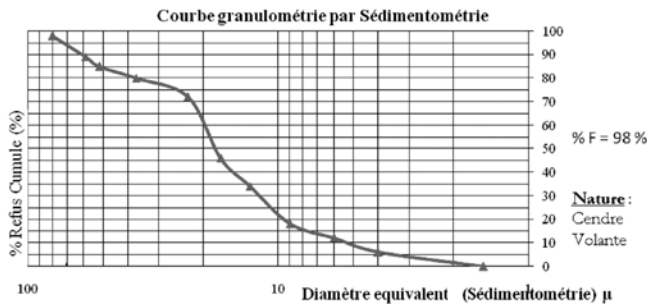


Figure 1. Courbe granulométrique du cendre volante par analyse sédimentométrique

Le Tableau 2 récapitule les caractéristiques des agrégats utilisés : La Figure 2 illustre l'étude de la granulométrie des agrégats provenant de ces carrières.

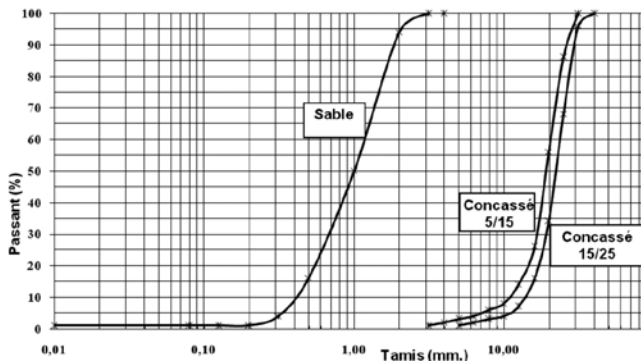


Figure 2. Courbes granulométriques des agrégats de la RN5

Tableau 2. Caractéristiques des agrégats utilisés

| Localisation | Pk 23+637 | | Pk 85 +020 | | Sable 0/3 |
|--------------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------------|
| Nature | Diorite | | Basalte | | Sable de rivière |
| LA (10/14) | 13 | | 14 | | - |
| MDE (10/14) | 11 | | 11 | | - |
| Classe | 5 /15 | 15/25 | 5 /15 | 15/25 | 0/3 |
| Densité app | 1,40 | 1,42 | 1,453 | 1,47 | 1,50 |
| Poids spéc (T/m ³) | 2,83 | 2,87 | 3,01 | 3,03 | 2,71 |
| Coefficient, Apllat (%) | 19 | | 20 | | - |
| Equivalent de sable (%) | - | | - | | 85 |
| Module de finesse | - | | - | | 2,43 |

1.2 Ciments

Deux types de ciments ont été utilisés pour l'étude : le ciment CEM I/A 42.5N HOLCIM, Manda et CEM I/A 42.5R, BINANI Cement Super Strong. Leurs caractérisations chimiques et minéralogiques sont obtenues par EDXRF OXFORD (Tableau 3) ; par diffraction X (Philips PW 3710, anticathode au cuivre, filtre au nickel et enregistrement pas à pas : Tableau 4). Les essais sont réalisés avec une presse hydraulique Germany, de capacité 600 à 1200 KN (Tableau 5). Ces résultats montrent que les ciments utilisés sont de ciment de classe 42,5 ; la résistance mécanique à 2 ; 7 et 28 jours correspond aux exigences de la norme EN 196-1.

Ces résultats montrent que les ciments utilisés sont conformes aux spécifications chimiques et minéralogiques de la classe 42,5.

1.3 Eau de gâchage et eau de mer

L'eau de gâchage provient de la rivière d'Ivoloina sur la RN5 et les échantillons d'eau de mer de Toamasina, Soanieranivongo et Fénériver Est. L'analyse chimique des échantillons d'eau a été réalisée au Laboratoire National du Travaux Publics et du Bâtiment, à Antananarivo Madagascar. Les valeurs pour l'eau de gâchage sont consignées dans le Tableau 6, selon la norme XP P 18-303. Le Tableau 7 résume la composition chimique d'eau de mer pour le test d'agressivité.

2. Procédures expérimentales

L'influence de la finesse des cendres volantes a été étudiée sur le ciment CEM I/A 42.5 R BINANI.

Les différentes éprouvettes de béton préparées ont été conservées en salle humide (20°C, 95HR) pendant 24h avant d'être mises dans le bain de conservation (eau de mer). La durée de conservation a été fixée à 7j, 28j, 3mois, et 1an.

Tableau 3. Composition chimique du ciment (%)

| Ciment | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | CaO libre | Na ₂ O | K ₂ O |
|----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-----------|-------------------|------------------|
| CEM I/A 42,5 N | 25,45 | 4,38 | 4,0 | 54,32 | 0,91 | 1,78 | 0,83 | 0,23 | 1,16 |
| CEM I/A 42,5 R | 28,48 | 4,15 | 3,73 | 56,23 | 0,83 | 1,51 | 0,57 | 0,20 | 0,39 |

Tableau 4. Concentration et composition minéralogique du ciment (%)

| Ciment | Concentration en équivalent (g/l) | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|----------------|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CEM I/A 42,5 N | 0,69 | 53,13 | 19,21 | 6,36 | 11,95 |
| CEM I/A 42,5 R | 0,14 | 55,04 | 21,0 | 5,53 | 12,35 |

Tableau 5. Caractéristiques mécaniques des ciments

| | CEM I/42,5 N | | CEM I/42,5 R | |
|--|----------------------------------|------|--------------|------|
| | Mv apparente (T/m ³) | 1,03 | | 1,02 |
| Poids spécifique (T/m ³) | 3,01 | | 3,03 | |
| Consistance (%) | 26 | | 26,6 | |
| Début de prise (mn) | 175 | | 152 | |
| S S Blaine (g/cm ²) | 3340 | | 3445 | |
| Résistance à la compression (MPa) | 2 jours | 18,5 | 21,5 | |
| | 7 jours | 37,3 | 38,45 | |
| | 28 jours | 46,7 | 50,3 | |
| Résistance à la traction par flexion (MPa) | 2 jours | 3,2 | 3,8 | |
| | 7 jours | 5,5 | 6,0 | |
| | 28 jours | 6,7 | 7,3 | |

Tableau 6. Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l)

| Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | CO ₃ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | pH | T (°C) |
|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----|--------|
| 33,4 | 25,6 | 15,0 | 3,3 | 72,8 | 32,4 | 451,3 | 37,8 | 7,8 | 18 |

Tableau 7. Composition chimique de l'eau de mer

| Ions | Na ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | K ⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|---------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Molarités (m mol/l) | 465 | 55 | 18,2 | 2,5 | 541,0 | 29,3 | 3,0 |

L'évolution des différentes phases cristallines présentes dans le béton ou nouvellement formées est suivie par un microscope électronique à balayage de marque Jeol JSM 6400, destiné à l'observation d'échantillons secs et conducteurs et à l'analyse par un spectromètre de dispersion d'énergie OXFORD Link Isis permettant d'effectuer des microanalyses ainsi que par diffraction de rayons X. Le diffractomètre utilisé est de type Philips PW3710, avec une anticathode au Cuivre et un filtre au Nickel, l'enregistrement est de type pas à pas.

Les essais de résistance en compression ont été conduits sur éprouvette de béton durci (diamètre 16 cm ; hauteur 32 cm), à l'aide d'une presse hydraulique Germany, de capacité 600 à 1200 KN. Les études de perméabilité ont été réalisées à l'aide

d'un perméamètre à charge variable type LCPC, en appliquant la méthode du tube de perméabilité, de diamètre intérieur égale à 50mm. Dans tout ce qui suit « les cendres volantes » se traduit par CV

3. Résultats et discussions

3.1 Étude de l'influence de la finesse sur la performance mécanique du mortier

Nous avons évalué l'influence de la finesse sur la performance mécanique du mortier avec le ciment CEM I/A 42.5 R BINA-NI, substitué de 10 % de cendre volante (Tableau 8)

Tableau 8. Composition du mortier

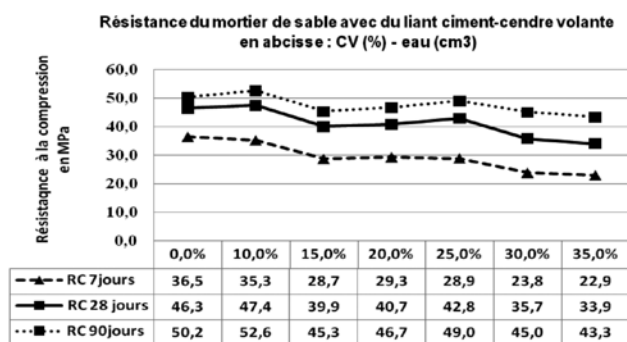
| Composant | Dosage Pondéral (g) | Dosage volumétrique (%) |
|------------------|---------------------|-------------------------|
| - Sable | 1350g | 58 |
| - Ciment (liant) | 450g | 16 |
| - Eau | 225g | 26 |
| - E/C | 0,5 | |

Les résultats de l'étude sont récapitulés dans le Tableau 9.

Tableau 9. Influence de la finesse de la cendre volante sur la résistance mécanique du mortier de ciment

| Finesse Blaine (cm ² /g) | Résistance à la compression (MPa) | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|
| | 28 jours | 90 jours | 180 jours |
| 3500 | 37,5 | 40,0 | 45,7 |
| 4000 | 48,0 | 55,0 | 60,0 |

Dès les premiers jours, on a constaté une baisse identique au pourcentage de cendre volante ajoutée. Avec 10% de cendre volante, on obtient les mêmes résistances à 28 jours que le CPA. Plus l'échantillon est fin, plus les performances mécaniques sont élevées. En effet, les éléments les plus fins rassemblent le plus de matière active et possèdent une plus grande vitesse de prise. Pour la suite de l'étude nous avons choisi la finesse Blaine inférieure à 4000cm²/g.

**Figure 3. Résistance du mortier de sable avec du liant ciment-cendre volante**

La Figure 3 montre que le maximum de résistance à la compression est 52,6 pour le béton à 90 jours avec 10 % de substitution en cendre volante et pas d'eau.

Tableau 10. Composition du béton

| Nature du gravillon | Gravillons + sable (kg/m ³) | Ciment (kg/m ³) | Eau (kg/m ³) |
|---------------------|---|-----------------------------|--------------------------|
| Diorite | 1770 | 350 | 200 |
| Basalte | 1802 | 400 | 210 |

3.2 Étude du béton avec liant mélangé ciment Binani et cendres volantes

Nous avons utilisée une composition optimale en liant, soit 10% de cendre volante en substitution du ciment (CYR M, 1999). Dans le cas de l'ajout, nous avons utilisé 10 % de la cendre volante par rapport au liant. La composition du béton (HUSSON S, 1991) est la suivante :

3.2.1 Cas du ciment Binani substitué par de la cendre volante

Les résistances mécaniques à 28 jours, le retrait et la dégradation du béton avec du ciment substitué de cendre volante (CV) 10 % du poids du ciment sont représentés dans le tableau 11. A partir de 28 jours, la résistance du béton avec du ciment BINANI substitué avec 10 % de cendre volante est plus élevée que celle du ciment CPA. La dégradation par la formation des sulfates due aux eaux de mer (eaux agressives) est très remarquable pour le béton de ciment CPA sans substitution ou ajout de cendre volante (Voir Tableau 11). La substitution partielle du ciment ou l'ajout de cendres volantes comme on le verra conduit pour un même rapport eau/liant (E/C), à une réduction de la perméabilité par un facteur de 3 à 5 fois après 28 jours par rapport au ciment CPA sans ajout (Figure 3).

3.2.2 Cas où les cendres volantes sont utilisées comme ajout du béton

Les résistances mécaniques à 28 jours, le retrait et la dégradation du béton avec du ciment BINANI ajouté du cendre volante (CV) 10 % de la masse du ciment sont représentés (Tableau 12). Par addition de 10 % de cendres volantes, la résistance à 28 jours est plus élevée que celle du ciment CPA sans ajout (Tableau 12). Et par rapport à ce dernier, on n'observe pas une augmentation de retrait même si les cendres volantes ajoutées sont très fines.

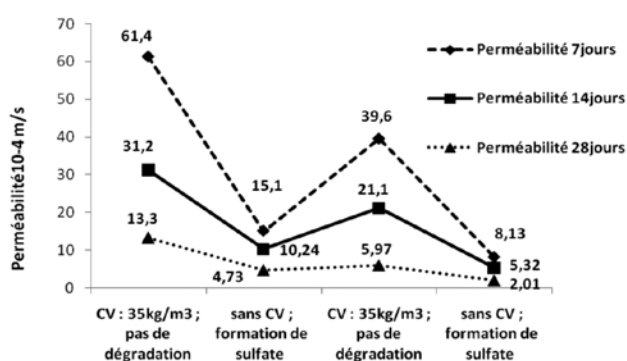
En effet, la majeure partie des CPA contiennent des alcalis solubles à 0,1 à 1,5 % d'oxyde de sodium et oxyde de potassium, qui accentuent le retrait. Or, les cendres volantes absorbent ces alcalis (ASTM C 289 -87, 1991), pour donner le silico-aluminate stable et insoluble, Cette réactivité de la cendre est très importante dans le cas de la présence des granulats d'éléments fortement alcalis. Les cendres volantes consomment tout ou une partie de la portlandite fournie par le clinker lors de l'hydratation.

Tableau 11. Comparaison des caractéristiques du béton avec ciment substitué à 10% de cendre volante (CV)

| Caractéristiques | | C=315kg/m ³ CV = 35kg/m ³ | C= 350kg/m ³ sans CV | C= 360kg/m ³ CV = 40kg/m ³ | C= 400kg/m ³ sans CV |
|--|---------|--|---------------------------------|---|------------------------------------|
| Résistance fc moyenne MPa | | 29,5, | 27,0 | 33,7 | 30,3 |
| Déviation σ (MPa) | | 1,32 | 1,54 | 1,75 | 1,95 |
| Retrait linéaire (mm/m) | | néant | 1,32 | néant | 1,02 |
| Perméabilité (10 ⁻¹⁴ m/s) E/C = 0,5 | 7jours | 12,3 | 61,4 | 8,20 | 42,3 |
| | 14jours | 7,35 | 31,2 | 5,33 | 21,4 |
| | 28jours | 4,53 | 13,3 | 2,31 | 6,91 |
| Dégradation | | NON | Sulfate formé | NON | Sulfate formé |

Tableau 12. Résistances mécaniques, retrait et dégradation de l'éprouvette (ajout de CV 10%)

| Caractéristiques | | C = 350kg/m ³ Sans CV | C = 350kg/m ³ CV = 35 kg/m ³ | C = 400kg/m ³ sans CV | C = 400kg/m ³ CV = 40 kg/m ³ |
|--|---------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| Eau (l) | | 200 | 190 | 210 | 200 |
| Slump-test (cm) | | 6,0 | 6,0 | 9,0 | 9,0 |
| Résistance fc moyenne (MPa) | | 28,75 | 30,3 | 32,5 | 35,0 |
| Déviation σ (MPa) | | 1,47 | 1,38 | 1,55 | 1,51 |
| Retrait linéaire (mm) | | 1,35 | néant | 1,13 | néant |
| Perméabilité (10-14 m/s) E/C = 0,5 | 7jours | 61,4 | 15,1 | 39,6 | 8,13 |
| | 14jours | 31,2 | 10,24 | 21,1 | 5,32 |
| | 28jours | 13,3 | 4,73 | 5,97 | 2,01 |
| Dégradation | | Sulfate formé | NON | Sulfate formé | NON |

**Figure 4. Comparaisons perméabilité (7, 14, 28j) entre bétons avec ajout CV 10% et sans ajout - dégradations**

On observe aussi l'amélioration de la tenue aux eaux de mer (eaux agressives, Figure 4). Cette amélioration observée est due à la finesse des cendres, au volume un peu plus important du liant ainsi qu'à la diminution du C3A du clinker qui sont à l'origine des dégradations par formation de sulfate.

CONCLUSION

La région Atsinanana avec ses carrières de roche dure et l'existence des dépôts de cendre volante, apparaît comme une région privilégiée pour utiliser la technique du béton par ajout direct de 10% de cendre volante ou du béton avec ciment substitué de cendre volante à 10%. Les agrégats des carrières sur la RN° 5 entre Soanieranivongo et Toamasina ont des bonnes caractéristiques physiques et mécaniques selon la norme P18-54. Les cendres volantes sont à forte teneur en SiO₂, Fe₂O₃ et de faible teneur en CaO, avec la surface spécifique Blaine élevée. Notre étude a montré que la maniabilité et la résistance à 28 jours du béton sont améliorées. Ainsi, à l'aide des matériaux économiques, avec les méthodes optimisées d'ajout ou de substitution avec 10% de cendre volante proposées, on peut donc obtenir du béton ouvrable avec d'excellentes propriétés mécaniques pour des applications réelles sur chantier.

Remerciements

Nos plus vifs remerciements à M. Stan Penttinen et son équipe du département de l'Environnement, du SHERITT à Toamasina pour l'autorisation de l'enlèvement des sacs de cendres volantes ainsi que les informations sur les cendres volantes.

Références bibliographiques

ADOUE Cyril, Mettre en œuvre l'écologie industrielle, Sciences et Ingénierie de l'Environnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2007, 106 p.

AHMARUZZAMAN M, A review on the utilization of fly ash, Prog Energy Combust Sci., 2010, 36(3), pp : 327–363.

ASTM C 289 -87 Standard test method for potential reactivity of aggregates, Annual book of ASTM Standards, 04-02 concrete and mineral Aggregates, ASTM, Philadelphia, 1991, pp : 177-184.

BAROGHEL- BOUNY V, Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons : Méthodes, analyses, interprétations Edition du LCPC, 1994.

BLISSETT R. S, and ROWSON N. A, A review of the multi-component utilisation of coal fly ash, Fuel, 2012, 97, pp : 1–23.

CHUNG C.W., Shon C.S., Kim Y.S., Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze–thaw cycles, Construct Build Mater., 2010, 24, pp : 1739–1745.

CYR M., Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires, Thèse de doctorat de INSA Toulouse et Université de Sherbrooke, 1999.

HUSSON S, Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment filler; Application aux mortiers Thèse de doctorat INP Grenoble et ENSM de St Etienne, 1991.

INSTAT. Institut National de la Statistique de Madagascar, 2009, Doc Instat-6083-.

SAHMARAN M, LIV. C., Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash, Cem. Concr. Res., 2009, 39, pp : 1033–43.

VASSILEV S.V, and VASSILEVA C.G, A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour; Fuel, 2007, 86(1011), pp : 1490–512.

YUKSEL I, BILIR T, OZKAN O. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. Build. Environ., 2007, 42(7), pp : 2651–2659.