

# « Effet De l'Incorporation Des Additions Minerales Cendre De Balle De Riz (RHA) Et Pouzzolane Dans Les Ciments De Madagascar »

## Effect Of Incorporation Of Mineral Additions Rice Husk Ash (Rha) And Pouzzolane In Cement From Madagascar

Veroniaina Razafitrimo<sup>1a</sup>, Gilles Escadeillas<sup>b</sup>, Feu Etienne Rakotomaria<sup>c</sup>, Roger Randrianja<sup>c</sup>

<sup>a</sup> : Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo (IST-T), Madagascar,

<sup>b</sup> : Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA Génie Civil, Université Paul Sabatier de Toulouse III - France

<sup>c</sup> : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA)

<sup>c</sup> : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA)



**Résumé** – La construction est le point essentiel au développement industriel et touristique d'un pays. Ce développement passe par la mise au point de nouveaux concepts comme les éco-matériaux, en l'occurrence le ciment avec additions minérales. Notre but est de permettre à tout malgache de pouvoir acheter un ciment de qualité et à un coût raisonnable.

Pour ce faire, nous proposons d'introduire dans des clinkers de qualité avérée des additions pouzzolaniques à forte valeur ajoutée telle que les cendres de balles de riz (RHA) ou la pouzzolane naturelle. Nous démontrons d'une part la possibilité de réaliser à Madagascar des liants équivalents performants à partir de produits locaux en remplacement d'une partie plus ou moins importante de ciment et, d'autre part, la potentialité de valorisation de cendres de balles de riz, résidu de combustion de balles de riz servant actuellement essentiellement à la cuisson des briques. Cette nouvelle approche permet d'optimiser le dosage en ciment, produit cher et difficile à produire, et de valoriser des ressources locales.

**Mots-clés** – Ciment, Pouzzolane, Addition, Cendre De Balle De Riz.

**Abstract** – Construction is the point essential with the industrial and tourist development of a country. In building, this development passes by the development of new concepts like environmental materials, in fact cement with mineral additions. Our aim is that any Malagasy can be able to buy cement of quality and at a reasonable cost. With this intention, we propose to introduce into good clinkers pozzolanic additions with strong added value. Thereafter, we show on the one hand the possibility to realize in Madagascar the powerful equivalent binders starting from local products to replace a more or less great part of cement and on the other one, the potentiality of valorisation of rice husk ash (R.H.A.),<sup>2</sup> residue of combustion of rice balls being used for cooking of bricks. This new approach makes it possible to optimize proportioning in cement, produces expensive and difficult to produce, and to develop local resources.

**Keywords** – Cement, Pozzolana, Addition, Rice Husk Ash.

<sup>1/</sup> Auteur correspondant :

Adresse mail : [razafitrimo.veroniaina@gmail.com](mailto:razafitrimo.veroniaina@gmail.com) (Veroniaina Razafitrimo)

URL : [www.ist-tana.mg](http://www.ist-tana.mg) (Veroniaina Razafitrimo)

## I. INTRODUCTION

Madagascar est classé parmi les plus gros consommateurs de riz au monde. La consommation annuelle de riz par habitant en milieu rural malgache est chiffrée à 138 kilos, et en milieu urbain à 118 kilos. Les ménages urbains prennent 85% de leur repas avec du riz<sup>[1]</sup>.

La culture du riz ou riziculture est pratiquée dans toute l'île, à l'exception de l'extrême-sud où le climat aride ne le permet pas. Sur les hautes terres, les rizicultures occupent près de 45% des surfaces cultivées de l'ensemble du pays, apportant deux à trois récoltes par an, selon les différentes variétés de riz, fort nombreuses à Madagascar.

Les saisons rizicoles sont déterminées par la période de récolte. En général, 70% de la moisson de riz de l'ensemble du territoire malgache se font entre les mois d'Avril et de Juin. Il y a 2 millions de petits producteurs de riz à Madagascar mais le niveau d'équipement des riziculteurs malgaches est très limité. En 2004, la production de « paddy » (riz non décortiqué) est de 3 600 000 tonnes<sup>[2]</sup>.

A chaque tonne de paddy usiné, on obtient 200 kilogrammes de balles de riz (enveloppe externe du riz), issues du décortiquage, qui ont un contenu énergétique équivalent à 60 litres de fuel<sup>[1]</sup> ! Cependant à Madagascar, les balles de riz sont généralement disponibles en petites quantités et réparties dans des dizaines de milliers de petites rizeries. Leur transport étant coûteux, elles sont souvent réutilisées sur place pour être essentiellement destinées pour la cuisson des briques de construction. Une fois la cuisson terminée, une infime quantité de ces cendres de balle de riz ou Rice Husk Ash (R.H.A.) est récupérée par les malgaches pour faire briller marmites et casseroles, mais la majorité est jetée dans la nature, contribuant à dégrader l'environnement. La valorisation de ces résidus de combustion est donc nécessaire et souhaitable.

L'étude de l'incorporation des cendres de balles de riz ou RHA dans le ciment a été déjà effectuée au Nigéria<sup>[3]</sup>, au Portugal<sup>[4]</sup> et bien d'autres pays du monde<sup>[5, 6, 7, 8]</sup> comme l'Inde, la Chine... Cette idée pourrait être bénéfique à Madagascar du fait qu'il n'y existe actuellement qu'une seule usine de cimenterie qui n'arrive pas à satisfaire le besoin de la Grande Ile, pourtant faible : la production nationale, qui ne concerne que le CEM II/B 22,5 (CPJ 35) et CEM II /A 32,5, est d'environ 160 000 tonnes par an, les besoins (tout type de ciment confondu) étant de 500 000 tonnes par an (soit 26 kg de ciment par habitant et par an). Par ailleurs la qualité du ciment produit et/ou importé est insuffisante et son coût monte exponentiellement.

Par ailleurs, à Madagascar, la pouzzolane naturelle existe en grande quantité et d'après notre revue bibliographique, elle peut être incorporée dans les éléments servant à la fabrication du ciment. Nous allons tester l'effet de son addition dans le ciment.

Pour ces raisons, il nous semble indispensable de mettre en place rapidement des solutions alternatives qui permettent à tout citoyen malgache de pouvoir acheter un ciment de qualité à un coût raisonnable. De plus, pour créer de la richesse dans le pays, il est souhaitable que ces solutions utilisent des ressources locales, aussi bien en matériau qu'en hommes. Enfin, compte tenu de la richesse de l'écosystème de Madagascar, il est aussi indispensable que ces solutions s'inscrivent dans une logique de développement durable, respectueuses de l'environnement.

Dans cet article, nous allons donc démontrer la pertinence de l'utilisation des RHA dans l'amélioration de la performance du ciment importé malgache qui est le CEMI-CPA 45. Nous le comparerons à l'effet de l'ajout de la pouzzolane (PZ) naturelle, solution retenue actuellement par les cimentiers pour fabriquer les CPJ ou CEM II.

## II. MATÉRIAUX ET MÉTHODOLOGIE

Les trois matériaux de base, à savoir le ciment, la pouzzolane (notée PZ) et les cendres de balle de riz ou Rice Husk Ash (notées RHA) sont disponibles en grande quantité à Madagascar, soit parce qu'ils sont importés (ciment), soit parce qu'ils représentent une ressource naturelle conséquente.

Le ciment est de type CEMI-CPA 45, produit d'importation vendu à Madagascar. Il est à noter que la seule usine qui fonctionne à Madagascar ne produit pas ce type de ciment qui est pourtant très utilisé pour le gros œuvre.

Les RHA ont été recueillies auprès des briquetiers. Les balles de riz sont brûlées à la température de cuisson des briques en terre cuite, soit vers 800-900°C. Les cendres obtenues ont ensuite été tamisées à 0,315mm. Puis, le passant est broyé dans un broyeur RETSCH dont la garniture est en carbure de tungstène. La pouzzolane a subi le même traitement. La Photo 1 nous montre ce matériel.

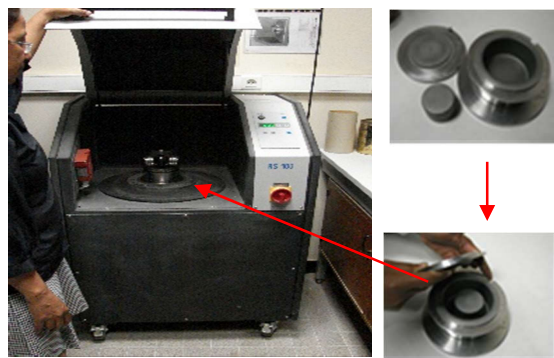


Photo 1 : Broyeur RETSCH RS100, (LMDC<sup>3</sup>)

A chaque séquence, environ 100g de poudre sont placés dans le bol de broyage à la vitesse de rotation 1400 tours par minutes pendant 30 secondes. La tamiseuse utilisée à cet effet est montrée sur la Photo 2.



Photo 2 : Tamiseuse électrique (COLAS Madagascar)

Le Tableau 1 suivant nous donne la granulométrie avant le broyage du RHA.

Tableau 1 : Granulométrie avant broyage du RHA

| OUVERTURE DU TAMIS à 0,315 mm/m | REFUS | PASSANT |
|---------------------------------|-------|---------|
| QUANTITE [%]                    | 2     | 98      |

Il est à remarquer que les RHA contiennent encore quelques petits morceaux de briques.

La pouzzolane naturelle (PZ) a été récupérée dans une carrière se trouvant en grande quantité à Ibity, région centrale de Madagascar allant vers le sud. Elle a été aussi broyée dans les mêmes conditions et avec le même broyeur utilisé pour le RHA. Ces pouzzolanes naturelles sont exploitées pour la production des ciments composés de l'usine locale.

<sup>3</sup> LMDC : Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (INSA Génie Civil, Université Paul Sabatier, Toulouse III)

## 1. Caractérisation des matériaux

### 1.1. Caractéristiques chimiques

La composition chimique des matériaux a été déterminée par ICP (Induction Conductivity Plasma). Une identification complémentaire des matériaux et leur perte au feu ont été réalisées par ATG (Analyse Thermogravimétrique) selon la norme NF EN 197-1. La teneur en  $\text{SO}_3$  est déterminée par gravimétrie.



Photo 3 : Induction Conductivity Plasma (LMDC)

La composition chimique de ces trois matériaux est donnée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Composition chimique des matériaux

| TYPE       | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | Perte au feu | $\text{SO}_3$ |
|------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|--------------|---------------|
| CEMI-CPA45 | 22,03          | 4,55                    | 2,85                    | 0,90         | 55,75        | 0,75                  | 1,02                 | 4,46         | 1,99          |
| RHA        | 85,67          | 2,03                    | 0,83                    | 0,53         | 0,70         | 0,16                  | 2,67                 | 4,51         | 0,18          |
| PZ         | 39,10          | 11,99                   | 11,68                   | 8,87         | 9,88         | 0,52                  | 0,47                 | 11,95        | 0,02          |

Le ciment CEM I-CPA45 entre bien dans les fourchettes classiques des cimentiers ( $\text{CaO}$  généralement entre 60 et 69% et  $\text{SiO}_2$  entre 18 et 22%) et que sa perte au feu révèle la présence de calcaire (3,4%).

Le RHA est riche en silice (plus de 85% en masse) et contient une quantité notable d'alcalin  $\text{K}_2\text{O}$  (2,67%). La perte au feu est associée à la présence de quelques imbrûlés résidus de la matière végétale.

Pour le ciment, la formule de Bogues a permis de calculer les compositions minéralogiques que nous pouvons voir dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Compositions minéralogiques du ciment

|            | $\text{C}_3\text{S}$ | $\text{C}_2\text{S}$ | $\text{C}_3\text{A}$ | $\text{C}_4\text{AF}$ |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| CEMI-CPA45 | 22,74                | 44,67                | 7,24                 | 8,67                  |

Nous voyons que ce ciment contient des teneurs normales en  $\text{C}_3\text{S}$  (teneur généralement comprise entre 60 et 75% <sup>[15]</sup>) et en  $\text{C}_2\text{S}$  (généralement comprise entre 7 à 30% <sup>[15]</sup>) par rapport aux ciments Portland classiques. Les teneurs en aluminates ( $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$ ) sont plutôt élevées tout en étant conformes.

### 1.2. Microstructure

#### ➤ Rayons X

La composition minéralogique des matériaux a été déterminée par DRX (diffraction des rayons X) selon la norme NF EN 12698-2 Avril 2008 avec l'appareil SIEMENS Röntgengenerator KRISTALLOFLEX 710D avec anticathode au cobalt (Photo 4).



Photo 4 : Diffractomètre à Rayons X (DRX) SIEMENS Röntgengenerator KRISTALLOFLEX 710D- avec passeur d'échantillon (LMDC)

Les diffractogrammes des 3 matériaux, réalisés sur poudre sont présentés sur la figure 1.

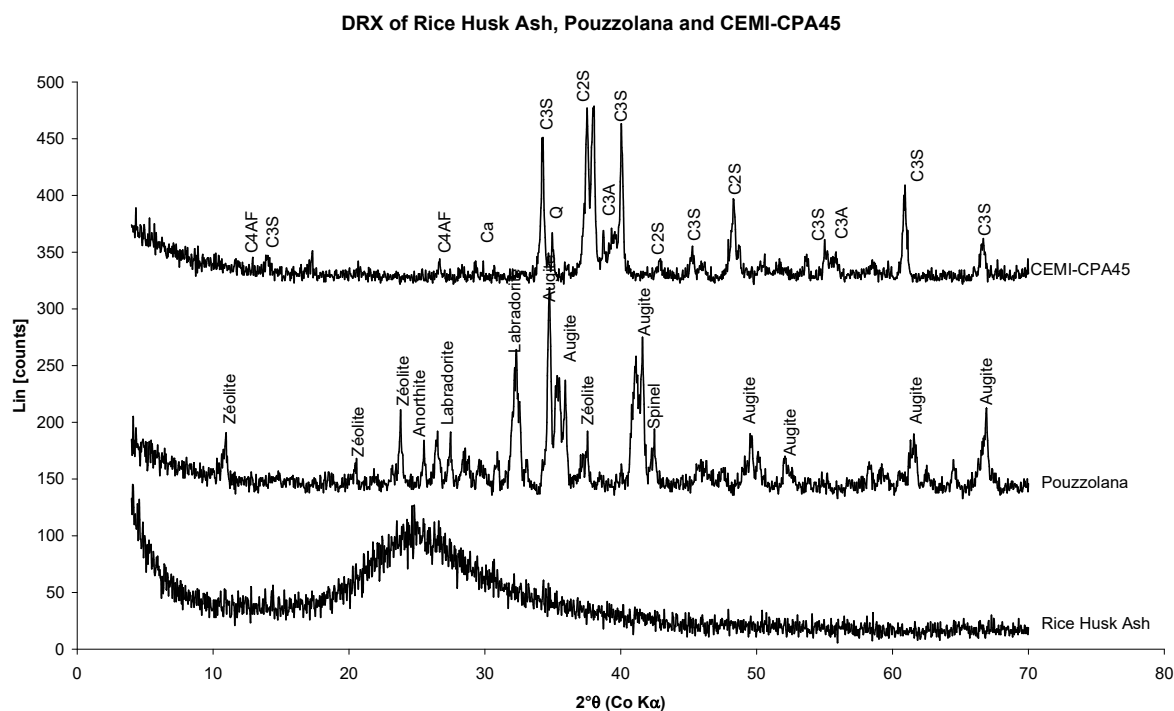


Figure 1 : Diffractogramme des matériaux

Ces diffractogrammes présentés à la figure 1 montrent que :

- le ciment CEMI-CPA 45 présente les pics classiques des constituants anhydres (présence de  $C_3S$ , de  $C_2S$ , de  $C_3A$  et de  $C_4AF$ ) mais renferment aussi un peu de quartz (Q) et des traces de calcite (Ca) ;

- le RHA ne présente aucun pic de diffraction mais seulement un « Halo » significatif d'un verre essentiellement siliceux ;
- la pouzzolane montre la présence classique des pics de minéraux silicatés comme les pyroxènes (augite), les olivines, les silicates (zéolites), les feldspaths (labradorites), et plus accessoirement de spinelles, minéraux naturellement présents dans ce type de roche volcanique.

➤ Microscopie Electronique à Balayage (M.E.B.)

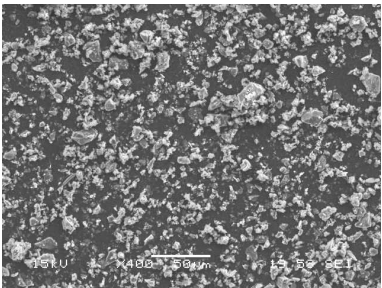
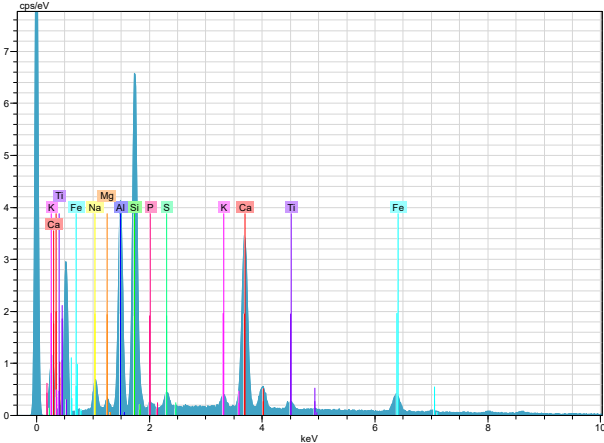
Les trois échantillons (en poudre), métallisés au préalable, ont été observés au MEB en mode électrons secondaires. La tension d'accélération est de 15 kV. Les observations ont été complétées ponctuellement par des analyses par EDS. L'appareil utilisé était un JEOL JSM-6380LV, le spectromètre de dispersion d'énergie, un EDAX PV 9100, et l'analyseur de signal RONTEC Signal Processing Unit (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA/UPS Toulouse Photo 5) selon la norme NF ISO 22309 Janvier 2012.



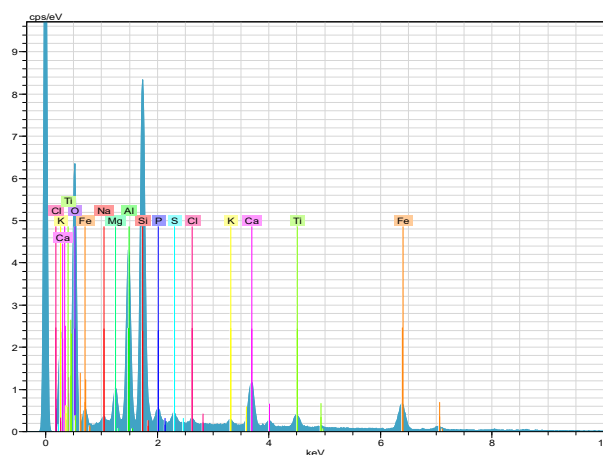
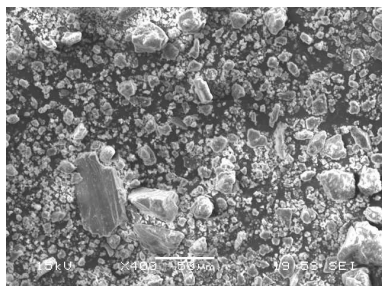
Photo 5 : Microscope à Balayage (MEB) Electronique JEOL JSM-6380LV + EDS RONTEC

Le Tableau 3 suivant nous donne les résultats de ces analyses.

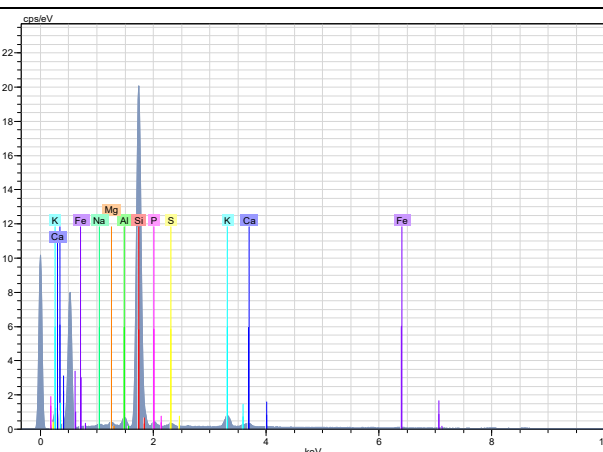
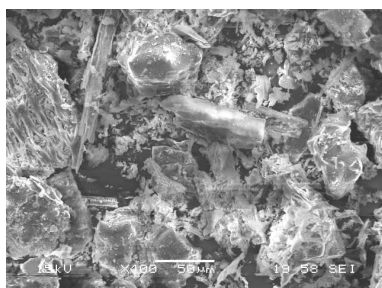
Tableau 4 : Observation au Scanning Electron Microscope JEOL JSM-6380LV

| ANALYSE AU M.E.B.<br>(Grossissement x 400)                                                            | ANALYSE ELECTRONIC DISPERSIVE SPECTROSCOPIE (E.D.S.)                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>CEMI-CPA45</p>  |  |

## POUZZOLANA



## RHA



L'observation au Microscope Electronique à Balayage permet de bien distinguer les formes des grains plates, arrondies ou allongées. Pour le RHA, on distingue bien la présence des fibres des écorces de riz.

L'analyse à l'EDS montre que :

- le ciment CPA45 contient du Si, Ca, Al, Fe et les alcalins comme le K, un peu plus de Na, un peu de Mg, S, très peu de Ti et de P.
- le RHA possède beaucoup de Si et un peu de Ca, Al, K, P, S, Mg, Na et de Fe. Le RHA est très siliceux et alcalin.
- la PZ contient du Si, Al, P, S, O, K, Ca, Mg, Ti et un peu de Cl et de Na.

### 1.3. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques étudiées sont la masse volumique réelle et la granulométrie des matériaux.

#### ➤ Granulométrie

la taille des matériaux a été déterminée par granulométrie laser (granulomètre CILAS 1090 en phase Liquide Photo 6) d'après la norme ISO 13320 / 2009.



Photo 6 : Finesse : Granulomètre laser CILAS 1090 Liquide

Les courbes obtenues sont montrées sur la Figure 2.

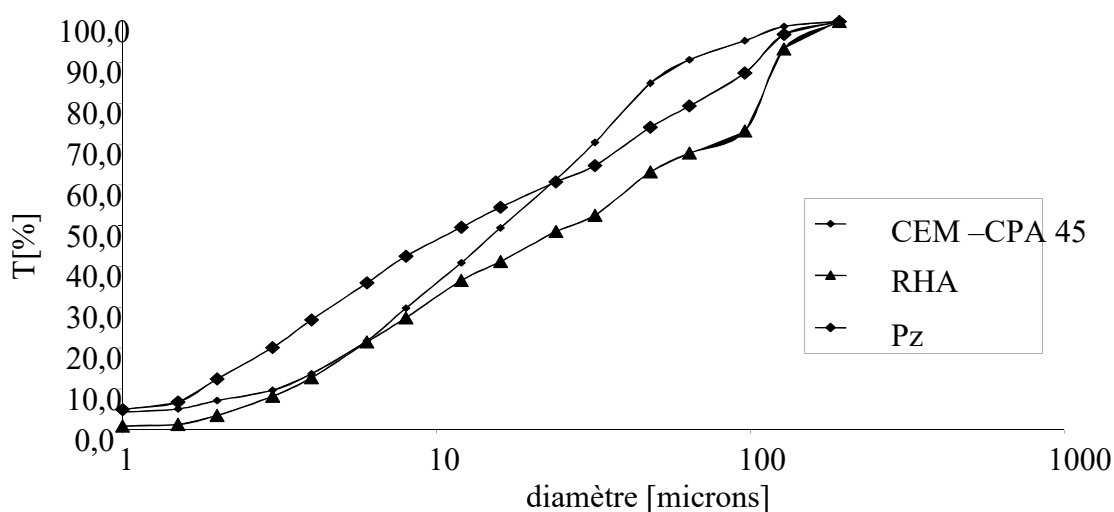


Figure 2 : Courbes granulométriques des matériaux par granulométrie laser

Les granulométries des trois matériaux constitutifs du liant ont été déterminées par granulométrie laser. Les résultats des analyses sont présentés sur la figure 2.

Les courbes granulométriques ont sensiblement la même allure, les diamètres médians de nos échantillons ayant comme valeur : 18 microns pour le CEM I – CPA 45 ; 13 microns pour la pouzzolane et 23 microns pour le RHA.

#### ➤ Masse volumique réelle

La détermination de la masse volumique réelle des trois échantillons a été réalisée par pesée hydrostatique suivant les normes ISO 5017 (novembre 1998) et ISO 1920-5 : 2004. La Photo 7 montre l'appareil pour bain d'immersion nécessaire à la mesure.



Photo 7 : Appareil pur bain d'immersion (LMDC)

Le tableau 5 donne les résultats de ces mesures.

Tableau 5 : Masse volumique des matériaux en  $\text{g/cm}^3$

| MATERIAU               | CEMI-CPA45 | PZ    | RHA   |
|------------------------|------------|-------|-------|
| MASSE VOLUMIQUE REELLE | 2,785      | 2,549 | 2,117 |

Le RHA est le plus léger des trois matériaux.

## 2. Compositions étudiées

L'étude a été réalisée sur mortier normal (norme EN 197-1).

Différentes compositions ont été effectuées en faisant varier la proportion d'ajout de RHA ou de PZ. Afin d'évaluer les avantages du remplacement partiel du ciment par le RHA ou le PZ, les propriétés des mortiers à l'état frais et à l'état durci ont été étudiés à savoir la demande en eau, la prise, la résistance à la compression et l'indice d'activité.

Les compositions étudiées étaient les suivantes :

- le ciment CEMI-CPA45 qui sert de témoin ;
- le ciment CEMI-CPA 45 avec substitution de 12,5% de RHA ;
- le ciment CEMI-CPA 45 avec substitution de 25% de RHA ;
- le ciment CEMI-CPA 45 avec substitution de 12,5% de PZ ;
- le ciment CEMI-CPA 45 avec substitution de 25% de PZ.

## II. RÉSULTATS SUR LES MORTIERS

### 1. Propriétés à l'état frais : consistance des mortiers

Pour les études sur mortier, la formulation du mortier normal 1/3 a été retenue. Il est composé en poids d'une partie de ciment (450 g), 3 parties de sable normalisé (1350 g) et une demi-partie d'eau (225 g). Pour les essais avec additions, une fraction massique du ciment a été remplacée par l'addition.

Le mortier est malaxé avec un malaxeur normalisé (norme NF EN 196-1). Sa consistance est ensuite mesurée sous vibration avec la détermination du temps d'écoulement (en s) au maniabilimètre LCL selon la norme NF EN 1097-6 Janvier 2014 (AFNOR 2014). Elle est aussi mesurée en statique par la mesure de l'affaissement au mini-cône (en mm).

Les photos des appareils utilisés pour la fabrication, la qualification et la mise en œuvre des mortiers à l'état frais sont montrées sur la Photo 8.



Malaxeur



Maniabilimètre



Appareil à chocs

Photo 8 : Malaxeur, maniabilimètre à mortier et appareil à chocs (LMDC)

Le test sur la maniabilité (NF P 18-452 et NF P 15-437) nous conduit aux résultats suivants :

Tableau 6 : Maniabilité des mortiers avec addition

|                  | CEMI-CPA45 | PZ | RHA |
|------------------|------------|----|-----|
| TEMPS [secondes] | 6          | 2  | 25  |

Durant la confection des éprouvettes, une demande en eau plus grande du ciment avec ajout de RHA a été constatée. En effet, la présence de fibres observées au MEB justifie cette demande en eau. Par contre, l'ajout de pouzzolane n'influe pas trop la consistance du mortier.

Durant le gâchage, les gros grains contenus dans le sable pour le mortier de ciment avec ajout de RHA sont bien visibles à l'œil nu. Plus on ajoute du RHA, plus le mortier est sec.

## 2. Propriétés à l'état durci

### 2.1. Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau

Les mesures de porosité accessible à l'eau et de masse volumique apparente ont été réalisées selon les normes ISO 5018 de novembre 1998 et ISO 1920-5 : 2004 : saturation en eau sous vide, pesée hydrostatique et séchage à  $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à « masse constante » (i.e. écart entre deux pesées consécutives, à 24 heures d'intervalles, inférieur à 0,05%). Notre corps d'épreuve est constitué par les morceaux de mortier récupéré des restes des essais de résistance à la flexion et à la compression. L'avantage est que toutes les compositions y sont représentées.

Les équipements nécessaires que nous avons utilisés au LMDC sont : une étuve, une balance hydrostatique d'une précision de  $\pm 0,01\text{g}$ , un liquide d'imbibition qui est l'eau du robinet, un dessiccateur, un appareillage à vide et un récipient de volume suffisant pour permettre l'immersion totale du corps d'épreuve. Ce récipient est placé sous la balance lors de la pesée hydrostatique. La durée de l'essai est de 24 heures. Nous pouvons voir, ci-après, les différents appareillages utilisés pour la manipulation relative au calcul de la masse volumique apparente de nos échantillons.

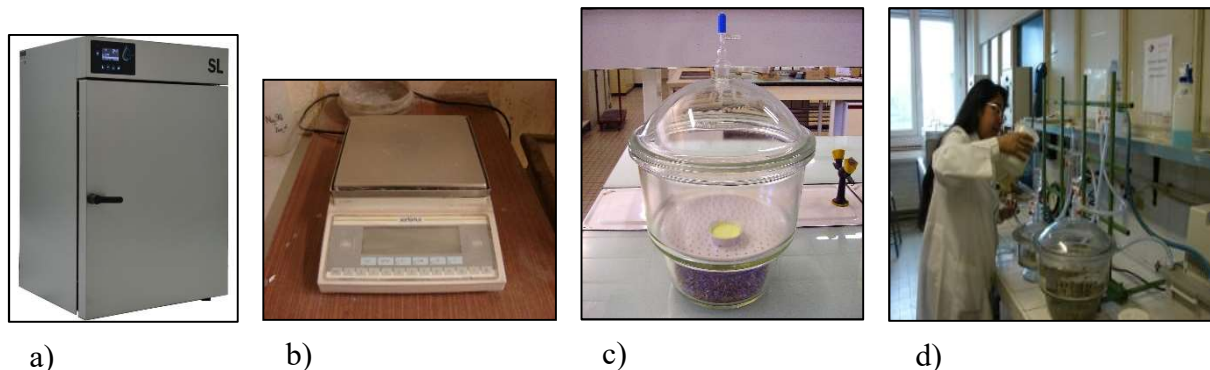


Photo 9 : a) Etuve ; b) Balance hydrostatique Sartorius LP 6200S ; c) Dessiccateur d) Appareillage à vide (LMDC)

Les résultats obtenus sur les mortiers sont les suivants :

Tableau 7 : Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau des compositions

|                                                 | CEMI-CPA45 | PZ | RHA   |
|-------------------------------------------------|------------|----|-------|
| MASSE VOLUMIQUE APPARENTE [g.cm <sup>-3</sup> ] | 2 066      |    | 1 987 |
| POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU [%]                 | 20,25      |    | 22,02 |

## 2.2. Résistance à la compression

Des éprouvettes normalisées ont été confectionnées selon les compositions prévues et la résistance à la compression des mortiers durcis provenant de ces compositions a été mesurée (NF EN 196-1) à plusieurs échéances : 2 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours et 150 jours.

La presse pour la mesure de la résistance à la flexion/compression est montrée sur la Photo 10 suivante:



Photo 10 : Mesure de la résistance à la flexion et à la compression (LMDC)

L'évolution de cette résistance est donnée à la Figure 3.

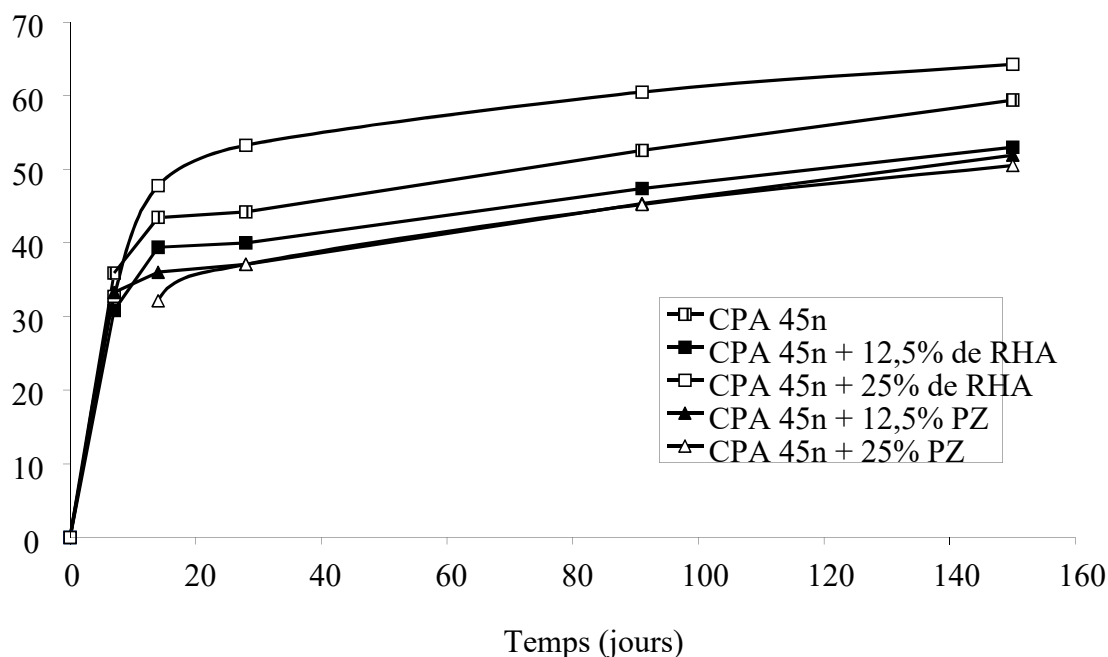


Figure 3 : Evolution de la résistance à la compression selon le liant

Cette figure montre que l'ajout de 25% de RHA dans le ciment CEMI-CPA45 améliore la qualité du mortier. Les gains de résistance sont notables. Ceci est confirmé par D.D. Bui [8].

L'ajout de pouzzolane n'améliore pas la résistance du liant équivalent. De plus, pour 25% de substitution, le retard de durcissement est important (résistance pratiquement nulle à 7 jours).

La résistance du liant équivalent formé avec 25% de RHA est nettement améliorée à toutes les échéances par rapport au ciment CEM II – CPA45 sans aucune addition. Si le pourcentage d'ajout de RHA est inférieur à 25%, la résistance ne dépasse pas celle du mortier témoin (les valeurs sont juste inférieures).

L'activité pouzzolanique est mise en évidence par la consommation de portlandite à 28 jours. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par certains auteurs [9].

### 2.3. Indice d'activité

L'indice d'activité, noté  $i$ , est défini comme le rapport des résistances mécaniques en compression d'éprouvettes confectionnées selon la norme NF EN 196-1 « Méthodes d'essais des ciments » de mortier au même âge (généralement 28 jours), préparées, dans notre cas, les unes avec le ciment d'essai, les autres en remplaçant une fraction  $p$  (12,5% et 25%) du ciment par une même masse de PZ ou RHA. L'indice d'activité quantifie l'influence de l'incorporation d'une addition minérale en remplacement d'une partie de ciment sur la résistance des mortiers. A partir des valeurs obtenues par le calcul de la résistance à la compression de chaque composition, l'indice d'activité de nos compositions a été calculé. La figure 4 nous donne son évolution.

En ce qui concerne l'indice d'activité, il apparaît que ce dernier est peu sensible à l'échéance d'essai, hormis à 7 jours. Ceci indique que la réaction pouzzolanique, responsable de l'activité, est assez rapide (entre 7 et 28 jours). Le RHA à 12,5% présente un indice d'activité équivalent à ceux mesurés sur de nombreuses cendres volantes ou laitiers de haut fourneau [6, 7]. Le RHA à 25 % présente une activité (relative) supérieure à celle du ciment ( $i > 1$ ).

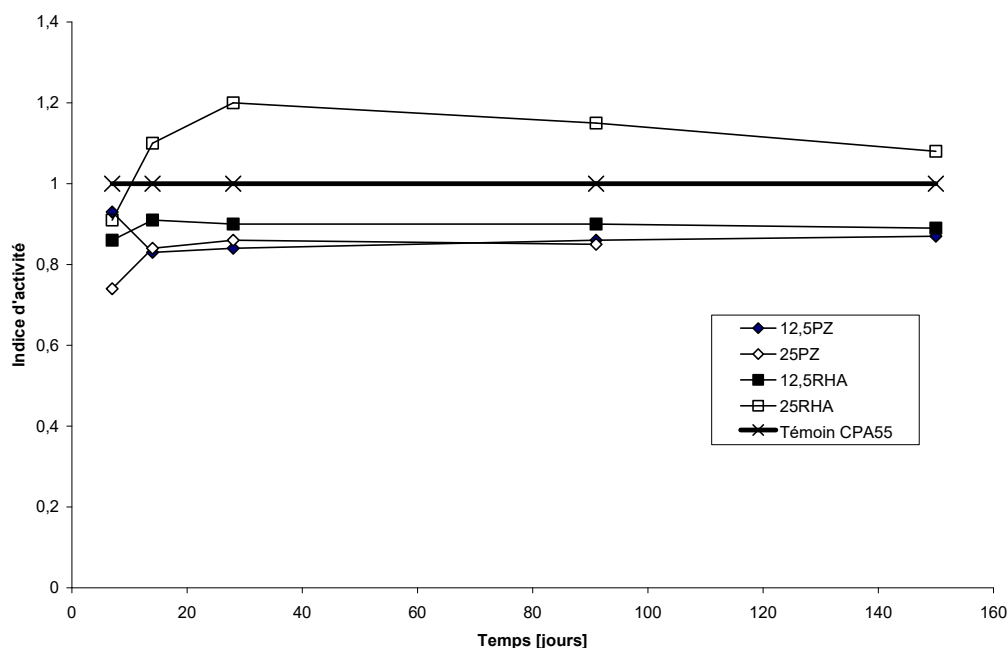


Figure 4 : Evolution de l'indice d'activité pour les compositions

## 2.4. Retrait

Il s'avère que la pouzzolane n'a aucun effet sur les retraits, c'est pourquoi nous n'avons étudié que le retrait sur des éprouvettes de mortier normal (ciment tout seul et ciment avec ajout de 25% de RHA).

Les mesures de retraits ont été effectuées selon la norme NF P 15-433. L'appareillage utilisé pour les mesures de retrait est montré sur la Photo 11 suivante.



Photo 11 : Mesure du retrait (LMDC)

Les courbes obtenues sont tracées dans la même figure 5 suivante.

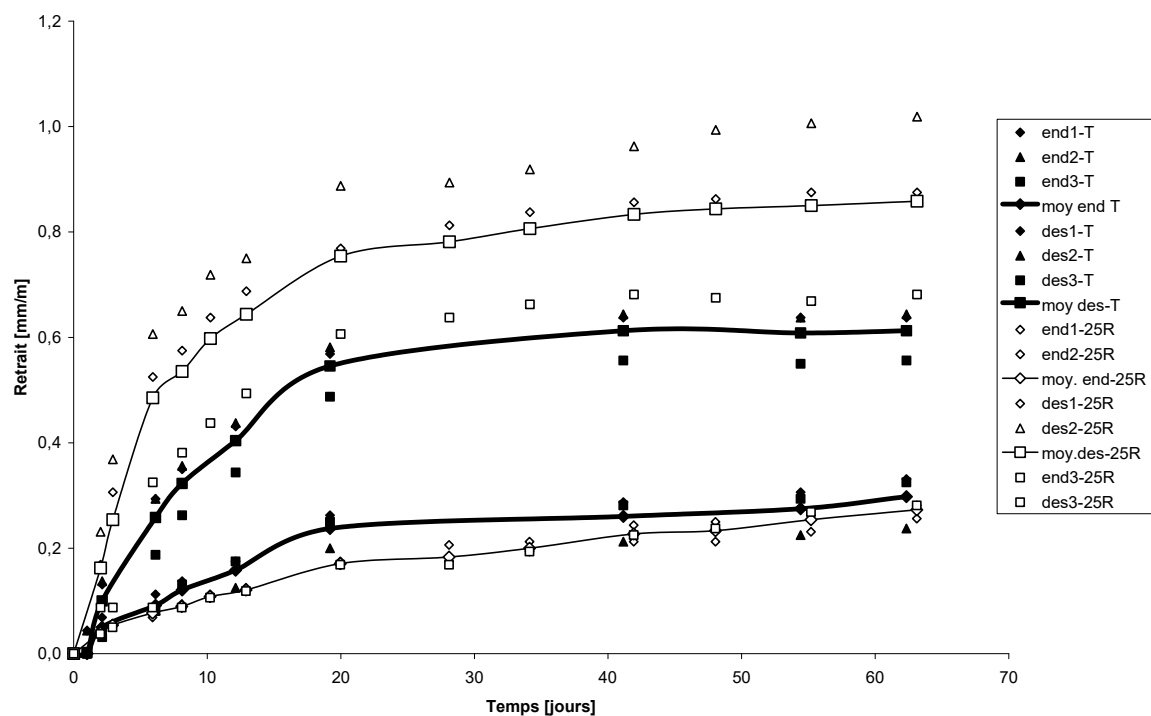


Figure 5 : Retrait des éprouvettes de mortier normal (ciment / ciment + 25%RHA)

### III. DISCUSSIONS : SUIVI DE L'HYDRATATION

La figure 6 montre les diffractogrammes des compositions étudiées, hydratées à 28 jours.

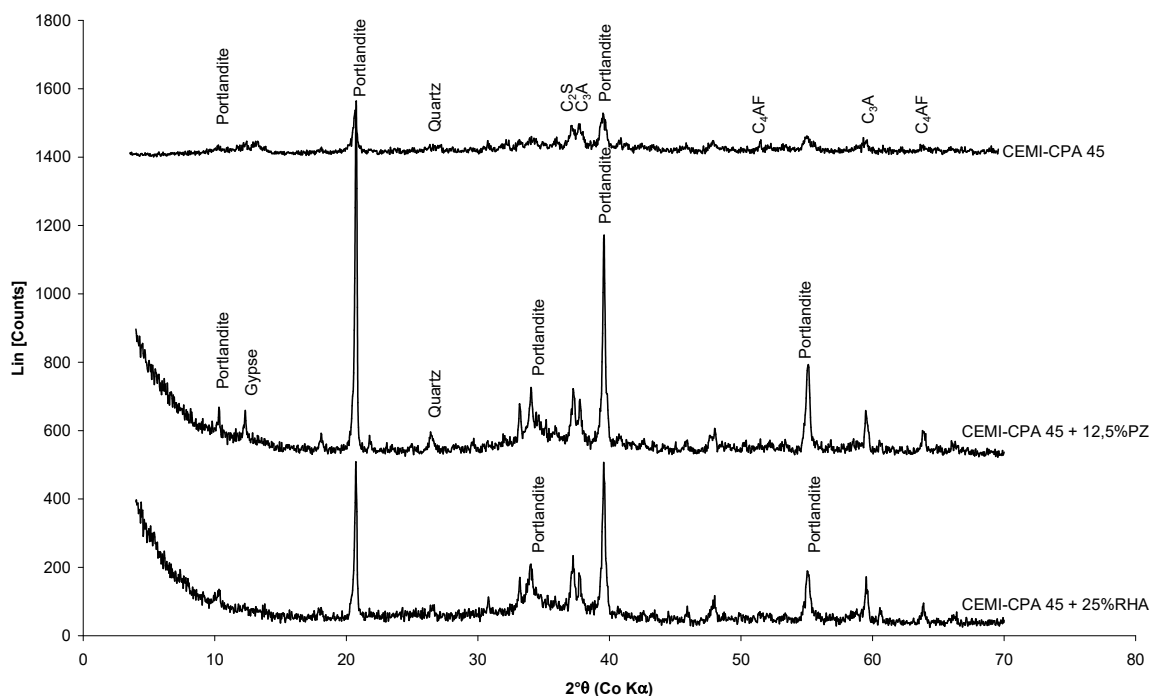


Figure 6 : Diffractogramme des compositions hydratées à 28 jours

Sur ces courbes, il apparaît que :

- Le ciment CEM-CPA 45 anhydre présente les pics classiques des constituants anhydres (présence de  $C_3S$ , de  $C_2S$ , de  $C_3A$  et de  $C_4AF$ ) mais renferment aussi un peu de quartz (Q) et de calcite (Ca). De plus, il se distingue par la présence d'un pic bien marqué de gypse. Au cours de l'hydratation également, l'ettringite, bien visible à 1 jour, disparaît au delà au profit du monosulfoaluminate hydraté.

- Sur le diagramme du CEMI-CPA-45 + RHA, on observe une diminution des constituants anhydres du ciment et une augmentation des phases hydratées (C-S-H et aluminates de calcium de type  $C_4AH_{13}$ ). L'incorporation de RHA dans le ciment se traduit par la disparition des pics de portlandite ce qui confirme les propriétés pouzzolaniques de ces RHA. Ces pics ayant disparus dès 7 jours, la réaction pouzzolanique est donc rapide.

- Sur le diagramme du CEMI-CPA45 + PZ, le pic de la portlandite est la plus annoncée.

La structure générale des mortiers de CEMI-CPA45 avec ou sans additions sur le MEB montrent que les additions ne modifiaient pas la microstructure des mortiers.

Les analyses chimiques élémentaires associées aux observations microscopiques, réalisées par EDS, nous ont confirmé la présence :

- dans le CEM I – CPA 45n, de Ca et Si, majoritaires, de K, S et Al, minoritaires.
- dans le RHA, de Si, majoritaire, d'un peu de Mg et Ca et très peu de K, Fe, Al.
- dans la pouzzolane de Si, Mg, Al, Ca, Fe, K, Ti.

Ainsi, on peut constater que les additions ne modifiaient pas la microstructure des mortiers.

Par ailleurs, la masse volumique diminue avec ajout de RHA. Par contre, le mortier reste poreux.

Ainsi, l'effet du RHA malgache en substitution dans le ciment de Madagascar est bénéfique. Cet effet bénéfique est démontré par plusieurs auteurs avec d'autres ciments ou bétons et autres RHA des autres pays [9], [10], [12], [13] [4]

Ayhan Demirbas [16] confirme que la taille des particules de RHA a une influence, entre autres, sur la résistance du ciment.

M. Anwara et al [17] sont même allés jusqu'à étudier le comportement du béton frais et du béton durci mélange avec du RHA. Ils ont pu conclure que l'insertion du RHA dans le béton améliore les caractéristiques du béton.

V.I.E. Ajiwe & al [18] recommande même l'utilisation du RHA dans la composition du ciment

V. Saraswathy & al. confirment que l'addition du RHA dans la composition du béton peut augmenter la résistance du béton contre la fissuration par la formation du gel de CSH autour des particules du ciment

D.D. Bui & al [20], affirment que la présence des cendres de balle de riz dans le béton diminue sa porosité. De même G.C. Isaia & al [22]

[23] Muhammad S.I. & al : maniabilité

En matière de résistance,  $C_3S$  est faible, par conséquent, comme c'est l'élément actif des ciments artificiels, la résistance de ce ciment doit être faible par rapport à la normale. Par ailleurs,  $C_2S$  est par contre très élevé, ce qui justifie la résistance à long terme de notre ciment.

#### IV. CONCLUSION

L'ajout de 25% de RHA dans la composition du mortier augmente de manière sensible la résistance et diminue la masse volumique. La maniabilité diminue toutefois mais de manière raisonnable, elle est nulle à l'ajout de 35% de RHA dans le mortier.

Ainsi, ces premiers essais montrent que le RHA, résidu de combustion de balles de riz servant essentiellement à la cuisson des briques, actuellement considéré comme déchet à Madagascar, peut être valorisé dans les mortiers et bétons après un tamisage et un broyage sommaire.

Les cendres de balles de riz s'avèrent avoir des propriétés pouzzolaniques bien supérieures à celles des pouzzolanes naturelles utilisées actuellement par la cimenterie locale. De plus, l'utilisation de ces cendres dans les ciments contribue à l'amélioration de l'environnement car jusqu'à présent elles sont le plus souvent rejetées dans la nature.

Sous réserve de validation sur bétons, et d'essais complémentaires de durabilité, les additions considérées pourraient être incorporées bénéfiquement dans les mortiers et bétons à Madagascar.

A partir de cette constatation, on peut donc envisager une valorisation locale de ces matériaux. On peut aussi imaginer une valorisation environnementale encore plus forte de ces produits en calcinant les balles de riz dans des conditions maîtrisées de manière à récupérer l'énergie, énergie utilisée pour activer ensuite les kaolins présents sur la Grande Ile. Les deux produits obtenus, cendres de balle de riz et métakaolin, pourraient ainsi être associés dans des liants ternaires à propriétés améliorées.

La pouzzolanité améliore la durabilité des matériaux cimentaires et réduit le coût financier et environnemental de la fabrication des ciments.

## REFERENCES

- [1] Revue d'Information Economique, Ministère de l'Economie, des Finances et du Budget, Le riz à Madagascar, 2 004
- [2] Henri de Laulanie, Le riz à Madagascar, 2003
- [3] V.I.E. Ajiwe, C.A. Okeke and F.C. Akigwe. A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash, 2000.
- [4] J. Sousa Coutinho, The combined benefits of CPF (Controlled Permeability Formwork) and RHA in improving the durability of concrete structures, 2 001
- [5] [Zhang M-H. And Malhotra V.-M], Characteristics of thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete, Cement and Concrete Research, vol.25, n°8, pp.1713-1725, 1995.
- [6] Les normes NF EN 450 « Cendres volantes pour béton »
- [7] Les normes NF P 18-508 « Additions calcaires »
- [8] D.D. Bui, J.Hu, P.Stroeven, Particule size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete, 2005
- [9] R.Jauberthie, F.Rendell, S.Tamba, I.Cisse, Origin of the pozzolanic effect of rice husk ash, 2000
- [10] Suwimol Asavapisit and Nittaya Ruengrit, The role of RHA-blended cement in stabilizing metal-containing wastes, 2005.
- [11] M.S. Ismail and A.M. Waliuddin, Effect of rice husk ash on high strength concrete, 1996.
- [12] M.H. Zhang, R. Lastra and V.M. Malhotra, Rice-husk ash paste and concrete, 1996.
- [13] J.S. Coutinho, The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures, 2003.
- [14] G.C. Isaia, A.L.G. Gastaldini, R. Moraes, Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete
- [15] Ali Salem and al, Les Ciments de Bizerte, 2001
- [16] Ayhan Demirbas, Department of Chemical Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey, 2004
- [16] Ayhan Demirbas, Department of Chemical Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey, 2004
- [17] M. Anwara, T. Miyagawab, M. Gaweeshc, Using rice husk ash as a cement replacement material in concret, 2007
- [18] V.I.E. Ajiwe, C.A. Okeke, F.C. Akigwe, A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash, 1999
- [19] V. Saraswathy, Ha-Won Song, Corrosion performance of rice husk ash blended concrete, 2006
- [20] D.D. Bui, J.Hu, P. Stroeven, Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete, 2004

[22] G.C. Isaia, A.L.G. Gastaldini<sup>1</sup>, R. Moraes, Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete, 2001

[23] Muhammad Shoaib Ismail and A. M. Waliuddint<sup>S</sup>, Effect of rice husk ash on high strength concrete, 1996