

**TITRE DE LA PUBLICATION :**

**VALORISATION DES MATERIAUX NATURELS LOCAUX DANS LES  
CIMENTS/BETONS POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE**

**Auteurs :**

**V. Razafitrimo<sup>1</sup>, G. Escadeillas<sup>2</sup>, F. Cassagnabere<sup>2</sup>, R.Randrianja<sup>3</sup>, E. Rakotomaria<sup>3</sup>**

**Affiliations des auteurs :**

*a- <sup>1</sup>Ecole du Génie Civil, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo*

*b- <sup>2</sup>Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université Paul Sabatier, Toulouse III*

*c- <sup>3</sup>Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo*

Correspondant : razafitrimo.veroniaina@gmail.com

## **Résumé :**

A Madagascar, comme dans de nombreux pays, la récurrence des catastrophes naturelles couplée à l'insuffisance du budget d'entretien conduit à la dégradation rapide voire la destruction de nombreuses constructions. Le besoin en structures neuves durables (ouvrages d'art, routes, bâtiments publics, logements, ...) est donc très important et cela dans un contexte économique très difficile. Parmi les matériaux performants utilisés dans la construction, le ciment Portland reste le plus prisé aussi bien dans les bâtiments que dans les travaux routiers. Cependant, ses coûts financiers et environnementaux sont importants et il conviendrait d'en diminuer son usage.

La présente étude, réalisée sur quatorze formulations, montre que les propriétés des mortiers et bétons pourraient être avantageusement améliorées en remplaçant une partie du ciment par des additions pouzzolaniques telles que les cendres de balle de riz (RHA pour Rice Husk Ash) et les kaolinites calcinées (MK pour Métakaolin), matériaux d'origine naturelle existants en grande quantité à Madagascar. A des taux de remplacement allant jusqu'à 35%, l'étude montre que le RHA et le MK sont des substituts efficaces capables de réduire la quantité de ciment pour l'obtention de mortiers ou de bétons à propriétés au moins équivalentes. L'incorporation de ces additions peut toutefois poser des problèmes de mise en œuvre facilement compensables par l'ajout de plastifiant réducteur d'eau.

Ces ressources locales à faible impact environnemental pourraient donc être exploitées afin d'aboutir à des infrastructures durables. Il conviendra toutefois de compléter l'étude de leur durabilité, dans le cadre d'une approche performantielle, et de faire évoluer la réglementation nationale.

Mots-clés : approche performantielle, ciment, cendres de balle de riz, développement durable, métakaolin.

**Abstract :**

In Madagascar, as it is the case in many countries, the recurrence of natural disasters linked with the lack of maintenance budget leads to the rapid degradation, and even to the destruction of a great number of buildings. The need in durable new structures (masterpieces, roads, public buildings, housings, ...) is then very important, and this in a harsh economic context. Among the high-performance materials used in construction, the Portland cement is the most popular as far as buildings and road works are concerned. Yet, it engenders an important financial but also environmental cost, and it would be more suitable to lessen its usage.

This study carried out in fourteen formulations shows that the proprieties of mortar and concrete would be advantageously improved by replacing a part of cement with pozzolanic additions such as Rice Husk Ash (RHA), and calcined kaolinite (MK for Metakaolin), natural materials existing in large quantities in Madagascar. With a replacement rate reaching 35%, the study shows that the RHA and MK are efficient substitutes to reduce the quantity of cement to get mortar and cement having at least equivalent propriety. Yet, the incorporation of these additions can pose implementation problems, but which can be easily compensated by adding water reducing plasticizer. Thus, those local resources with low environmental impact could be exploited in order to achieve sustainable infrastructures. Nevertheless, it would be suitable to add the study of their sustainability as part of a performance approach, and to get the national regulation progress.

Keywords : cement, performance approach, Metakaolin, Rice Husk Ash, sustainable development.

## **1 Introduction**

Depuis 2009, Madagascar traverse une période très difficile à cause de la crise politique qui l'a secoué. Beaucoup d'entreprises se sont mises en veille malgré la convention d'Istanbul, qui, avec la constitution de Madagascar, parle de la facilitation de l'accès à la propriété des citoyens. Pourtant, le marché du BTP a connu une croissance de 85,5% en 2018 et a baissé de 19,6% en 2019 comme le rapporte le Tableau de Bord Economique de Juin 2020 ("INSTAT Madagascar, janvier 2019") Et malgré l'effort déployé par les différents hommes politiques au pouvoir à Madagascar, l'état des infrastructures routières reste toujours déplorable. De plus, le pouvoir d'achat de la population est faible et elle n'arrive pas non plus à se payer la construction de logements décents.

Notre constat est parti du fait qu'en plus du problème économique la population malgache est confrontée à la non-qualité et à la non-durabilité des matériaux utilisés dans la construction, qui sont en général les briques en terre cuite et le béton. Les consommateurs semblent être livrés à eux-mêmes car, en dépit des lois qui existent, beaucoup de fabricants, qui négligent cette qualité et cette durabilité des matériaux, ne sont pas poursuivis.

La revue de la littérature nous a permis de tirer les avantages que procure le remplacement partiel du ciment par des matériaux pouzzolaniques. En effet, le liant ou le béton, qui utilise ces derniers, résiste mieux aux attaques chimiques ; de plus, leur résistance et leur durabilité sont renforcés. Les réactions alcalins agrégats et ainsi que le retrait au séchage sont réduits. Et surtout, ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment permettant ainsi d'avoir plus d'économie. Il est à noter que les ciments aux pouzzolanes qui, obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le ciment portland, sont réalisés au niveau de l'usine de cimenterie. Mais notre recherche sera surtout destinée aux utilisateurs qui vont acheter le ciment dans lequel seront rajoutés les matériaux pouzzolaniques. A cet effet, nous avons choisi le kaolin et la balle de riz qui sont les matériaux d'origine naturelle qui existent en grande quantité à Madagascar.

Ainsi, nous allons axer notre contribution sur la « valorisation des matériaux naturels locaux dans les ciments et/ou béton pour un développement durable ».

Dans ce travail, nous allons d'abord déterminer les propriétés de ces matériaux. Ensuite, nous proposerons quatorze combinaisons qui vont faire l'objet d'analyses physiques et mécaniques en référence des normes existantes.

## **2 Matériels et méthodes**

### **2.1 Matériaux**

#### **2.1.1 Ciment**

Pour cette étude, deux ciments ont été utilisés :

- un ciment témoin CEM 1 52,5, noté C1, en provenance de France,
- un ciment CPA55 (équivalent à du CEM I 42,5) acheté à Madagascar, noté C2, produit par la seule usine locale qui fonctionne.

#### **2.1.2 Matériaux d'addition**

La balle de riz et le kaolin ont été les deux matériaux naturels choisis. Ces matériaux ont été tous les deux calcinés, afin d'obtenir respectivement les cendres de balle de riz, ou Rice Husk Ash, notées RHA, et le Métakaolin, noté MK.

Les RHA ont été prélevées au hasard auprès d'un briquetier qui utilise la balle de riz comme combustible pour la cuisson de ses briques.

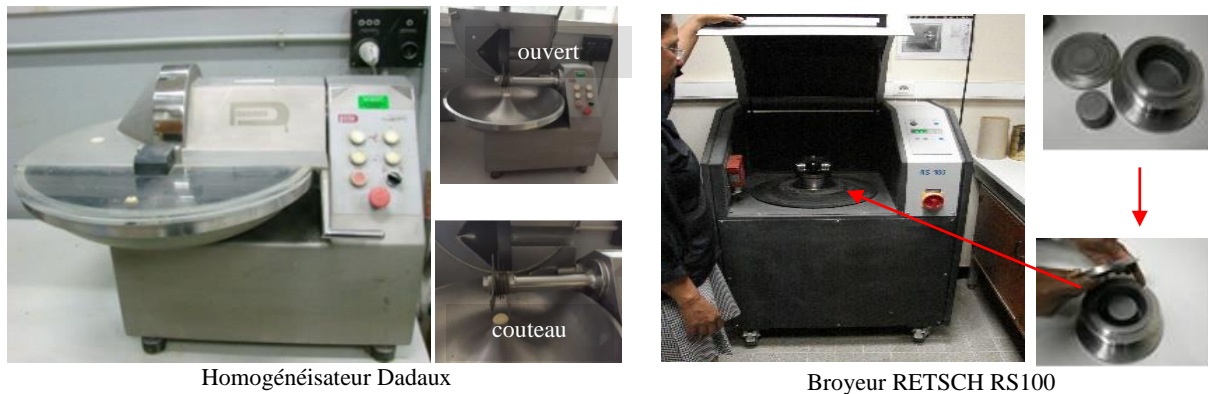
Les variétés de kaolin étant nombreuses à Madagascar, nous avons décidé d'en prélever sur deux endroits différents : à Antananarivo et à Moramanga. Le choix du site d'Antananarivo, ou Tanà, capitale de Madagascar, est lié à la grande consommation locale de ciment. Le choix de Moramanga est lié à la puissance du gisement de kaolin, ce dernier se trouvant à mi-chemin entre la capitale et le grenier de riz vers l'Est de Madagascar, Ambatondrazaka. Le Kaolin d'Antananarivo est de couleur saumon alors que celui de Moramanga est d'un blanc très pur.

## 2.2 Matériels

### 2.2.1 Préparation

Les RHA, prélevées chez les briquetiers, ont été tamisées à 315  $\mu\text{m}$  puis broyées (broyeur Retsch RS 100) pour passer au tamis de 80  $\mu\text{m}$ .

Les kaolins de Tanà et de Motamanga ont été séchés à l'étuve et les mottes ont été séparées dans un homogénéisateur Dadaux. Les kaolins ont ensuite été tamisés à 315  $\mu\text{m}$  avant leur passage au broyeur Retsch RS 100 pour passer également au tamis 80  $\mu\text{m}$ . Le passant a été ensuite calciné au calcinateur flash afin d'obtenir le métakaolin. La Photo 1 suivante montre les matériels utilisés pour la préparation des matériaux.



Homogénéisateur Dadaux

Broyeur RETSCH RS100

*Photo 1 : Préparation des matériaux*

Dans la suite, nous noterons KT et KM respectivement les kaolins de Tanà et de Moramanga et MKT et MKM respectivement les métakaolins de Tanà et de Moramanga.

### 2.2.2 Analyses physiques

La masse volumique réelle des matériaux a été déterminée par pesée hydrostatique dans un liquide d'immersion, le Garosolve D70, dont la masse volumique est connue. La norme utilisée est la ISO 5017 (novembre 1998) ou ISO 1920-5 : 2004.

La finesse des matériaux a été déterminée par la mesure de surface spécifique Blaine.

En complément de la finesse, la taille des matériaux a été déterminée par granulométrie laser (granulomètre CILAS 1090 en phase Liquide) d'après la norme ISO 13320 : 2009.

Les deux photos visualisées dans la Photo 2 suivante montrent les matériels pour ces mesures physiques.



Appareil pour bain d'immersion



Finesse : Granulomètre laser CILAS 1090 Liquide

*Photo 2 : Appareils de mesure de la masse volumique réelle et de la granulométrie*

La surface spécifique Blaine a été déterminée d'après la norme NF EN 196-6 (AFNOR 2012d). La finesse Blaine permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La Photo 3 suivante montre l'appareil servant à mesurer cette caractéristique.



*Photo 3 : Appareil Blaine servant à mesurer la surface spécifique Blaine*

### 2.2.3 Analyses chimique et minéralogique

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 composition minéralogique des matériaux a été déterminée par DRX (diffraction des rayons X) selon la norme NF EN 12698-2 : Avril 2008.

Un complément d'analyses morphologique et chimique a été réalisé par MEB (microscopie électronique à balayage) et EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) selon la norme NF ISO 22309 : janvier 2012.

Les appareils de mesure pour analyses chimique et minéralogique sont montrés sur les Photo 4 suivantes.



Induction Conductivity Plasma



ATD-ATG



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



Diffractionmètre à rayons X (DRX)  
SIEMENS Röntgengenerator KRISTALLOFLEX 710D-  
avec passeur d'échantillon

*Photo 4 : Appareils de mesures chimique et minéralogique*

#### 2.2.4 Analyses mécaniques : sur mortiers

##### Essais à l'état frais - Fabrication du mortier

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).

Pour la détermination ultérieure de la résistance mécanique ou des variations dimensionnelles, les mortiers ont été mis en place dans des moules normalisés (équipés de plots pour les éprouvettes destinées aux variations dimensionnelles) au moyen d'un appareil à chocs selon la norme (AFNOR 2009). Les moules ont ensuite été couverts et placés dans une salle à 20 °C sans échange hydrique.

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 5.



Malaxeur



Maniabilimètre



Appareil à chocs

*Photo 5 : Malaxeur, maniabilimètre à mortier et appareil à chocs*

Les éprouvettes sont démoulées à 24h, pesées et mises dans l'eau à 20 °C jusqu'aux échéances d'essai pour les essais mécaniques. Les éprouvettes destinées aux variations dimensionnelles sont conservées, après démoulage :

- dans l'air à 20 °C et 50% HR pour l'essai de retrait,
- dans l'eau à 20 °C pour l'essai de gonflement.

## Essais à l'état durci

### - Résistance mécanique

Les résistances à la flexion 3 points et à la compression ont été déterminées à 4 échéances (2 jours, 7 jours, 28 jours et 91 jours) sur les éprouvettes prismatiques de dimensions 40 x 40 x 160 mm.

### - Retrait

Les essais de retrait et gonflement des mortiers, qui consistent à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvettes prismatiques de mortier ont été conduits selon la norme NF P 15-433 (AFNOR 1994)

La presse pour la mesure de la résistance à la flexion/compression et l'appareillage utilisé pour les mesures de retrait sont montrés sur la Photo 6 suivante.



*Photo 6 : Mesures de la résistance à la compression et du retrait*

### - Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau

L'essai sur la détermination de la masse volumique apparente consiste à déterminer par pesée les éléments suivants : la masse d'un corps d'épreuve sec, sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique.

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 24heures. Nous pouvons voir dans la série de Photo 7 ci-après les différents appareillages utilisés pour la manipulation relative au calcul de la masse volumique apparente de nos échantillons.



a)



b)



c)



d)

*Photo 7 : a) Etuve ; b) Balance hydrostatique Sartorius LP 6200S ; c) Dessiccateur d) Appareillage à vide*

### Compositions étudiées

Le tableau suivant montre les 14 combinaisons suivantes réalisées permettant de connaître leur rhéologie et leur résistance à la compression.

*Tableau 1 : Compositions étudiées pour la détermination de la rhéologie et de la résistance à la compression*

	NOTATION	C1	C2	MKT	MKM	RHA	TOTAL
1	Témoin C1	100%	-	-	-	-	100%
2	90C1 + 10MKT	90%	-	10%	-	-	100%
3	90C1 + 10MKM	90%	-	-	10%	-	100%
4	90C1 + 10RHA	90%	-	-	-	10%	100%
5	75C1 + 25MKT	75%	-	25%	-	-	100%
6	75C1 + 25RHA	75%	-	-	-	25%	100%
7	75C1+17MKT+7,5RHA	75%	-	17,5%	-	7,5%	100%
8	75C1+17MKM+7,5RHA	75%	-	-	17,5%	7,5%	100%
9	65C1 + 35MKT	65%	-	35%	-	-	100%
10	65C1 + 35RHA	65%	-	-	-	35%	100%
11	Témoin C2	-	100%	-	-	-	100%
12	75C2 + 25MKT	-	75%	25%	-	-	100%
13	75C2 + 25RHA	-	75%	-	-	25%	100%
14	75C2+17MKT+7,5RHA	-	75%	17,5%	-	7,5%	100%

Les valeurs de retrait ont été déterminées uniquement sur les quatre compositions présentées tableau 2.

*Tableau 2 : Compositions étudiées pour la détermination du retrait*

	NOTATION	C1	C2	MKT	RHA	TOTAL
1	Témoin C1	100%	-	-	-	100%
2	75C1 + 25MKT	75%	-	25%	-	100%
3	75C1 + 25RHA	75%	-	-	25%	100%
4	75C1+17,5MKT+ 10RHA	75%	-	17,5%	10%	100%

### **3 Résultats et Discussion**

Les résultats des différents essais sont présentés ci-après.

#### **3.1 Caractérisations rhéologiques**

Pour chaque combinaison effectuée, quatre essais ont été effectués et les valeurs de la moyenne et des écarts types des valeurs obtenues pour le temps d'écoulement et l'affaissement sont donnés dans les Figure 1 et Figure 2 suivantes.

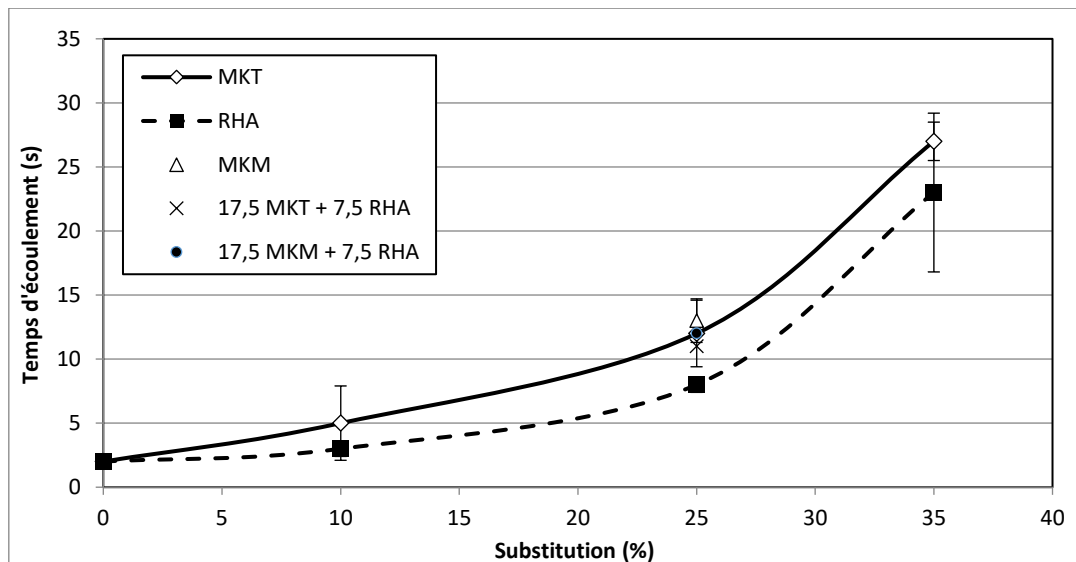


Figure 1 : Temps d'écoulement des différentes compositions

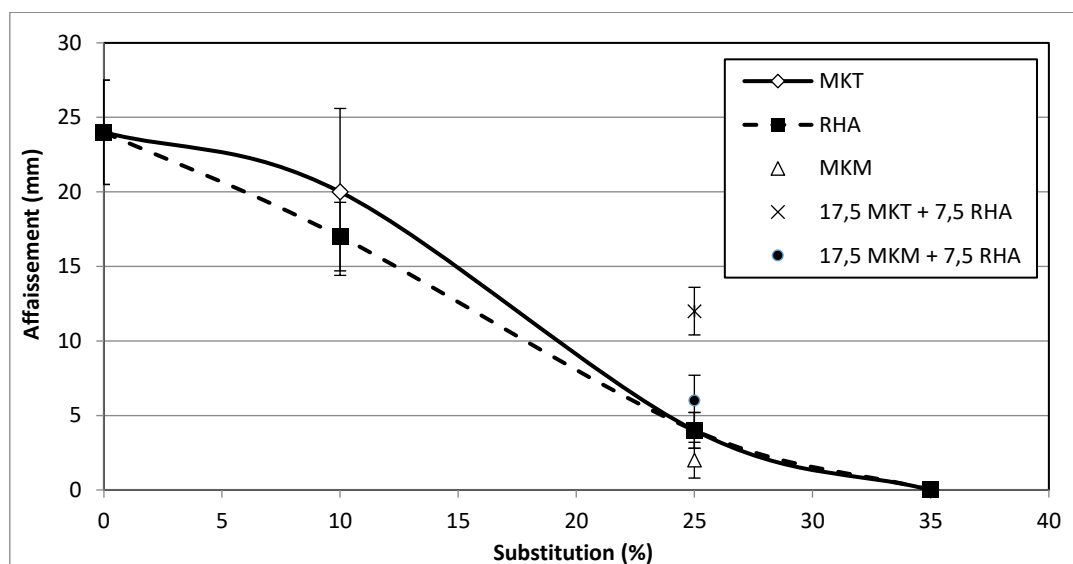


Figure 2 : Affaissement des différentes compositions

Sur la figure, nous voyons que :

- en ce qui concerne le temps d'écoulement, c'est le ciment témoin C1 qui possède la plus petite valeur : 2 secondes. Vient ensuite l'ajout de 10 RHA/MKT. Par contre, ce sont les compositions avec ajout de 35% de MKT /RHA, mettent le plus de temps à s'écouler, respectivement 27 et 23 secondes. Ce qui montre que plus on ajoute des additions, plus le temps d'écoulement est long. Sur la Figure

1, nous voyons qu'avec un même taux de substitution, avec l'ajout de RHA le temps d'écoulement est moins faible qu'avec ajout de MKT/MKM ;

- concernant l'affaissement, sa valeur est inversement proportionnelle avec celle de l'écoulement, c'est-à-dire, plus le temps d'écoulement est faible, plus l'affaissement est élevé ;
- l'ajout combiné de MKT/MKM et de RHA augmente la valeur de l'affaissement par rapport à l'ajout de MKT/MKM seul ou de RHA seul ;
- pour 25% de remplacement, on observe peu de différence entre MKT (12 s de temps d'écoulement et 4 mm d'affaissement) et MKM (13 s de temps d'écoulement et 2 mm d'affaissement) ;
- pour 25% de remplacement, le RHA (8 s de temps d'écoulement et 4 mm d'affaissement), les valeurs sont légèrement meilleures que pour le MK ;
- la combinaison des 2 additions (17,5% MKT ou MKM et 7,5% de RHA) permet de limiter les pertes d'affaissement et de temps d'écoulement.

Ces résultats peuvent être reliés à la plus grande finesse des additions par rapport au ciment et par conséquent à une plus forte demande en eau. Cet effet négatif pourrait être compensé par l'introduction de plastifiant ou super plastifiant réducteur d'eau.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Zhang et Han qui ont étudié l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et ont constaté que le seuil de cisaillement augmente avec la quantité d'addition ultrafine incorporée tandis que la viscosité de la pâte varie avec la nature et la quantité d'addition.

### **3.2 Caractérisations mécaniques**

Les évolutions des résultats de la résistance à la compression de nos différentes compositions (moyenne de 6 échantillons) sont présentées dans les figures suivantes.

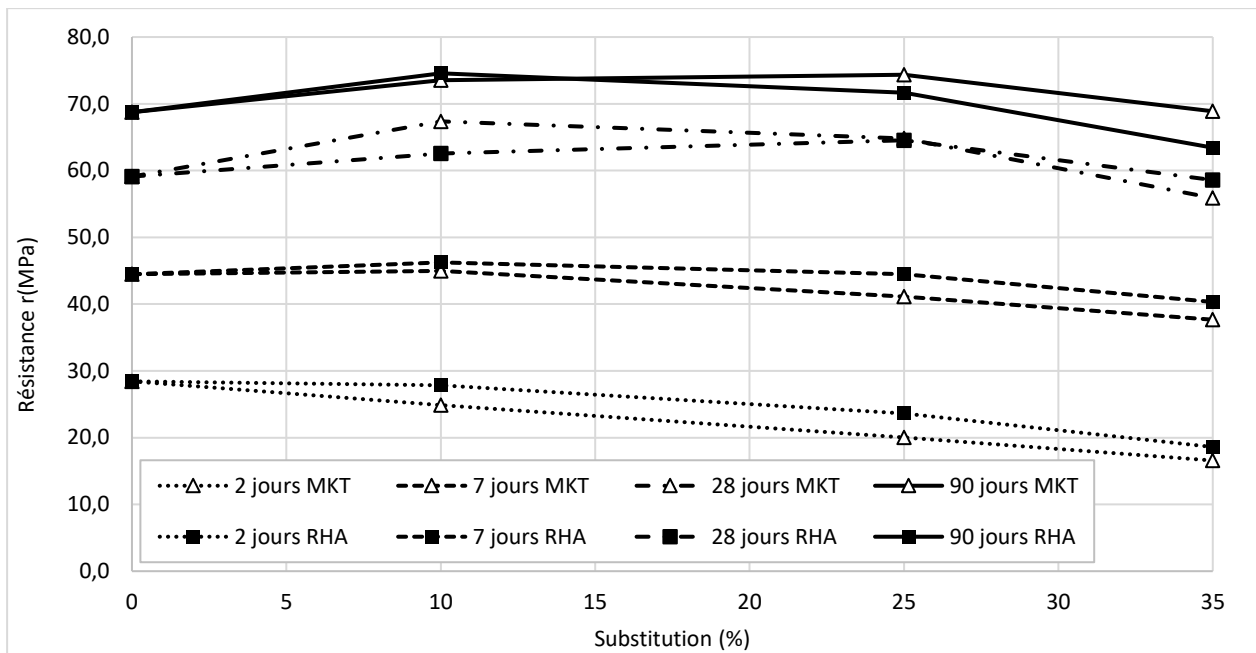


Figure 3 : Evolution de la résistance mécanique des différentes substitutions

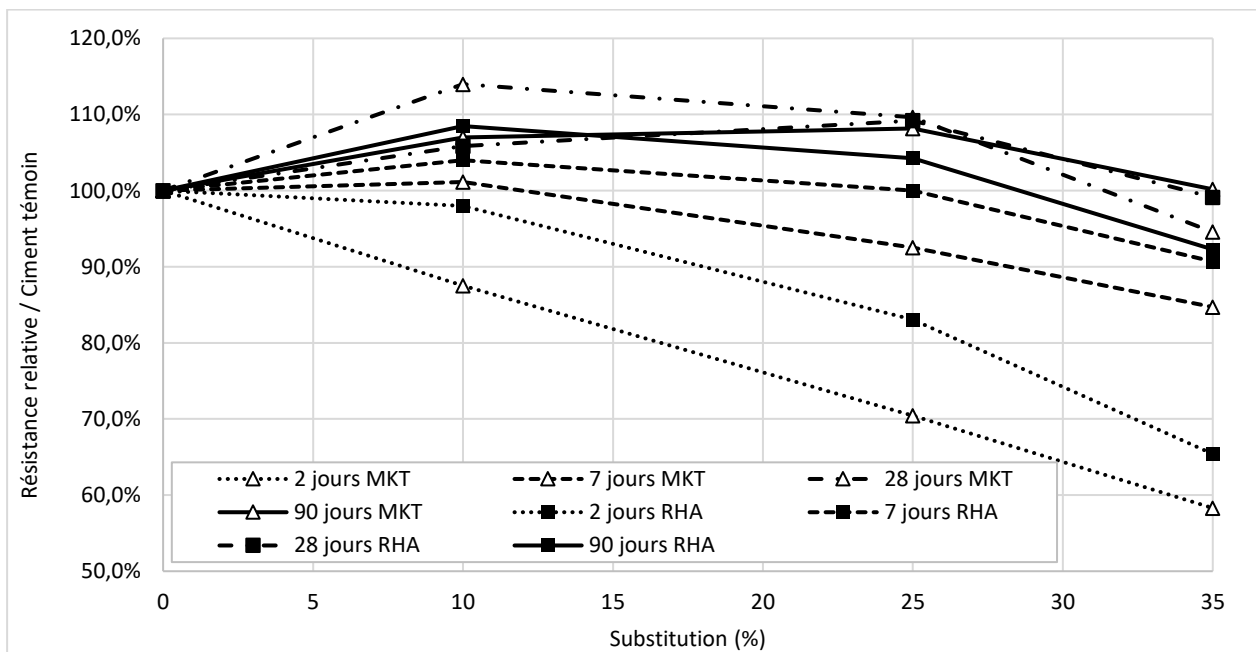


Figure 4 : Evolution de la résistance relative des différentes compositions par rapport au ciment témoin C1

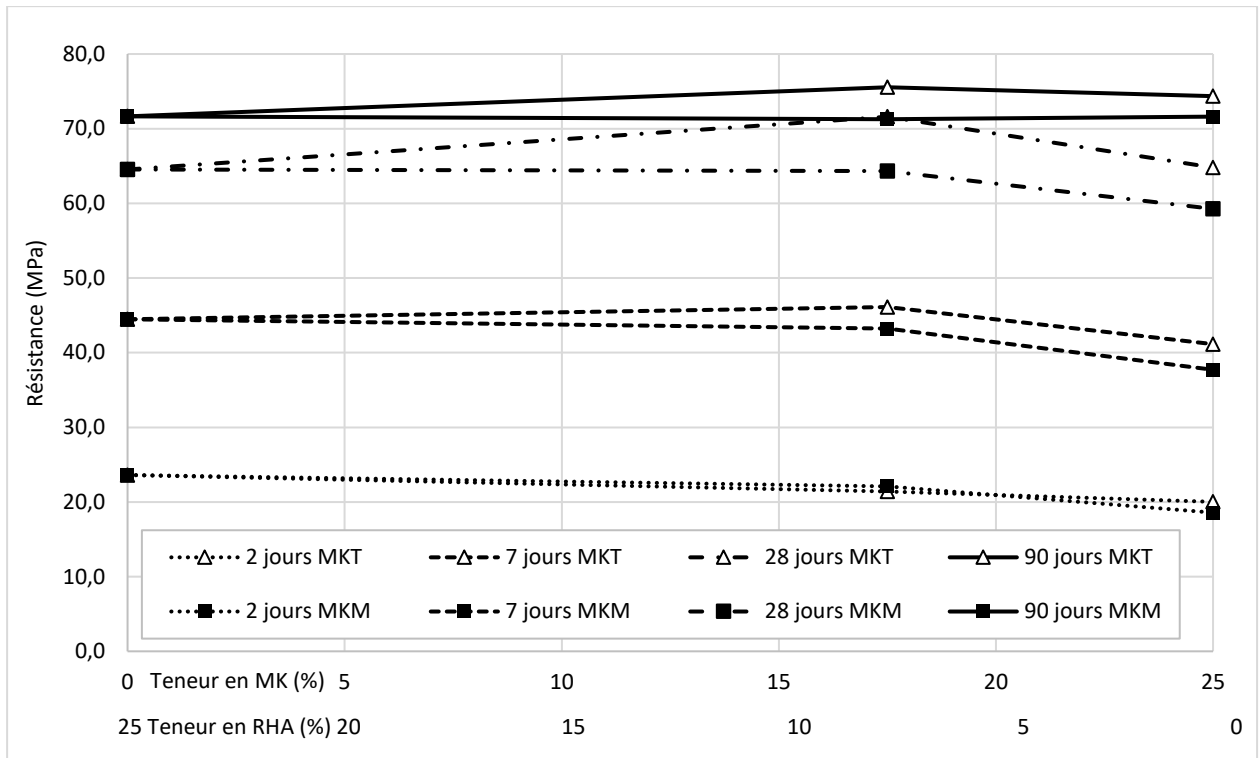


Figure 5 : Evolution de la résistance mécanique des différentes substitutions pour 25% de substitution

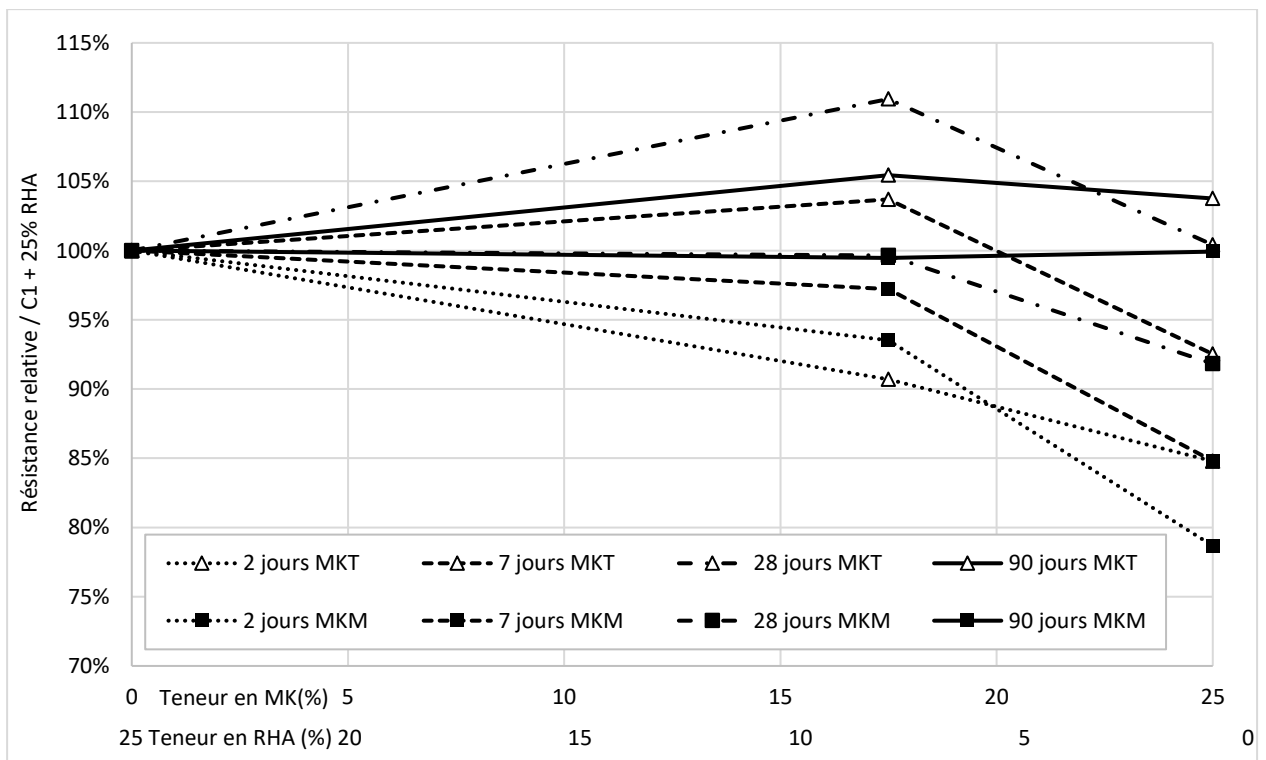


Figure 6 : Evolution de la résistance relative des différentes compositions par rapport au ciment témoin C1 + 25% RHA



Ces figures montrent que :

- la résistance au jeune âge de la composition avec ajout de MKT est inférieure qu'avec le RHA mais à 28 et 90 jours d'âge, l'ajout de MKT donne une résistance supérieure. A plus de 35% d'ajout de RHA /MKT, la résistance mécanique atteint presque la même valeur avec le MKT mais un peu moins avec le RHA.
- avec le ciment C1, l'effet bénéfique des additions est visible dès 7 jours pour 10% de substitution alors qu'il faut attendre 28 jours pour 25% de substitution ; avec 35% de substitution, les performances ne deviennent équivalentes à celles du témoin qu'à 90 jours. Lorsque les additions sont utilisées simultanément (17,5% de MK et 7,5% de RHA), leur effet bénéfique est observé à partir de 7 jours ;
- avec le ciment C2, l'effet bénéfique de l'incorporation des additions pouzzolaniques n'est visible qu'à compter du 28ème jour. Les différences entre additions restent très limitées.
- les Figure 5 et Figure 6, tracés pour 2% de remplacement, mettent en évidence à la fois la réactivité plus forte à court terme du RHA et l'intérêt de mélanger les deux produits

### 3.3 Variations dimensionnelles

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente l'évolution des retraits endogène et total et la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** la perte de masse associée au retrait total.

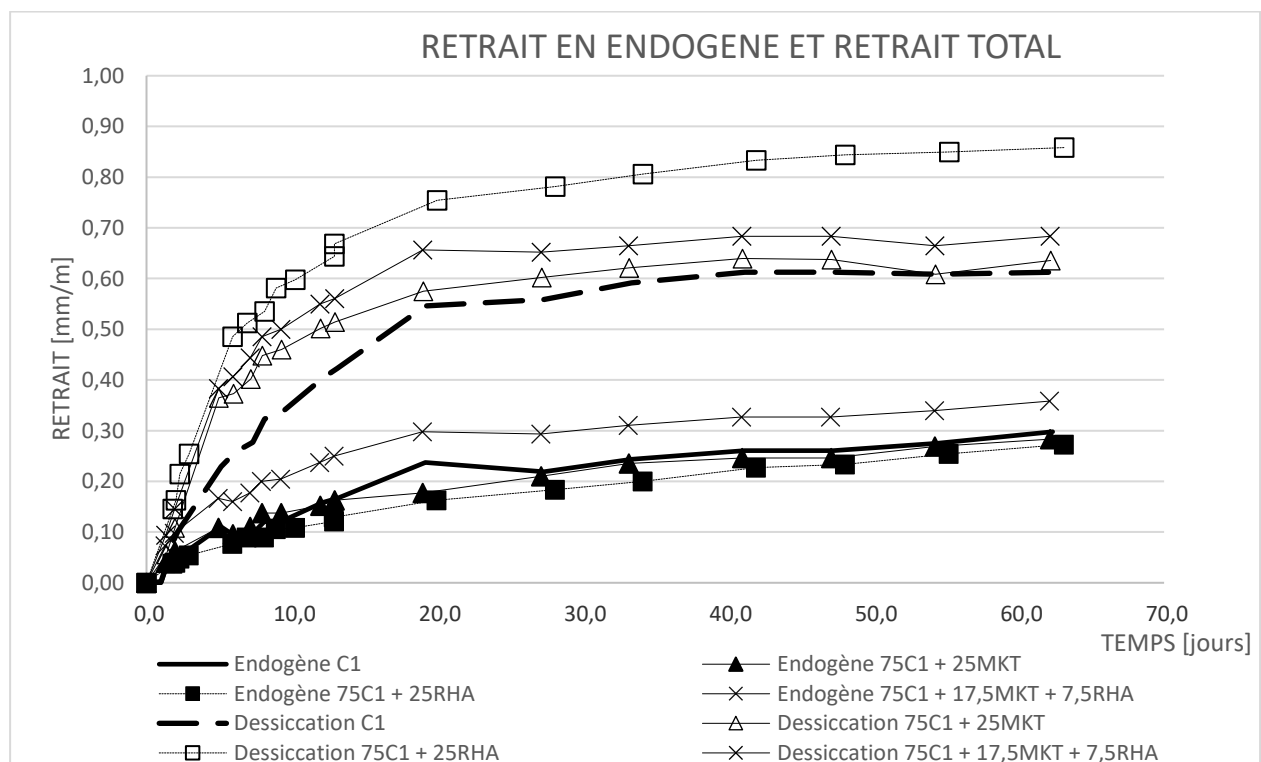
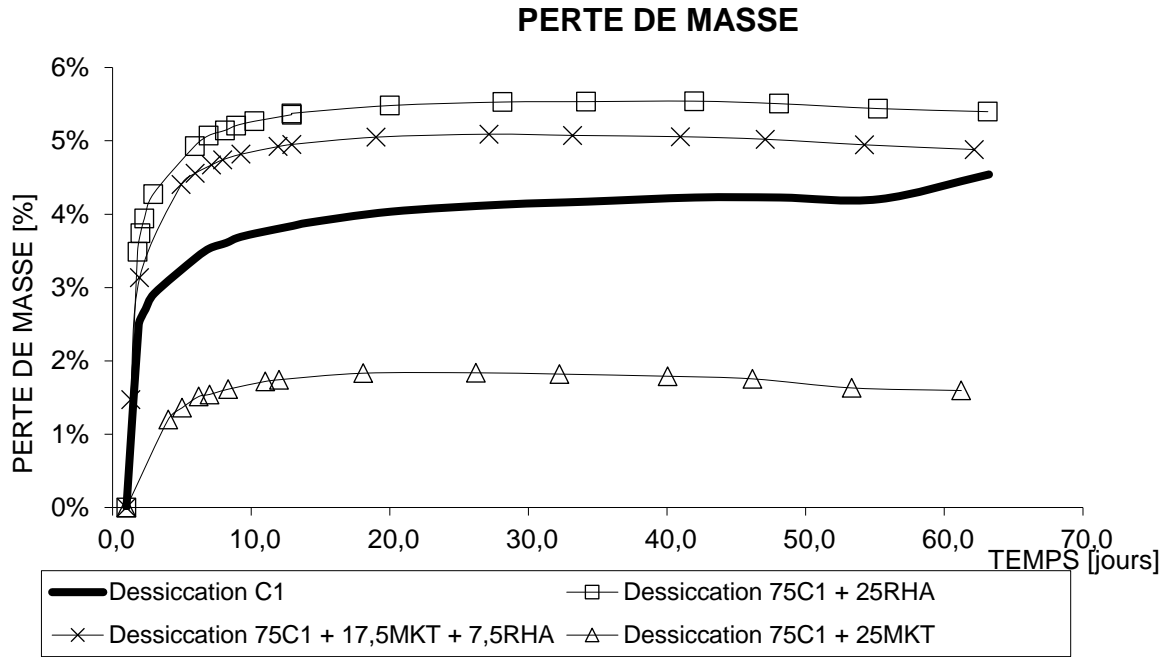


Figure 7 : Evolution des retraits endogène et total



*Figure 8 : Perte de masse associée au retrait total*

Ces figurent montrent :

- pour les matériaux en conditions endogène, seul le mélange 75% C1 + 7,5% RHA + 17,5% MKT présente un retrait légèrement plus élevé que le témoin, les autres mélanges étant équivalents au témoin ;
- pour les matériaux en dessiccation (20°C, 50% HR), le remplacement d'une partie du ciment par les additions conduit d'une manière générale à une augmentation du retrait. Elle est faible pour les mélanges 75% C1 + 25% MKT ou 75% + 7,5% RHA + 17,5% MKT. Elle est plus importante pour le mélange 75% C1 + 25% RHA ;
- les pertes de masse associées à ce retrait total sont plus élevées pour les mélanges 75% C1 + 25% RHA et 75% + 7,5% RHA + 17,5% MKT. Par contre, pour le mélange 75% C1 + 25% MKT on a une perte de masse beaucoup plus faible que pour le témoin (due essentiellement à une perte de masse initiale plus faible, non expliquée).

La Figure 9 présente l'évolution du gonflement dans l'eau des compositions étudiées.

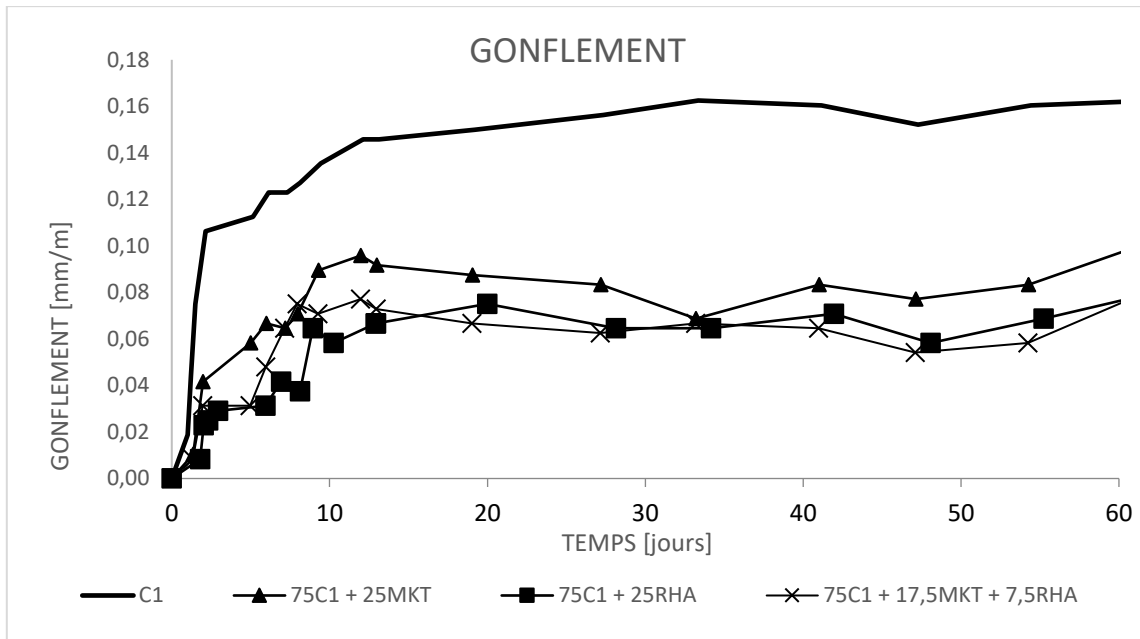


Figure 9 : Gonflement des compositions étudiées

Nous pouvons voir que les gonflements dans l'eau sont très faibles et que la substitution du ciment par les additions diminue ce gonflement.

### 3.4 Caractérisations physiques

Les résultats des masses volumiques apparentes et des porosités accessibles à l'eau sont présentés dans les deux figures ci-après.

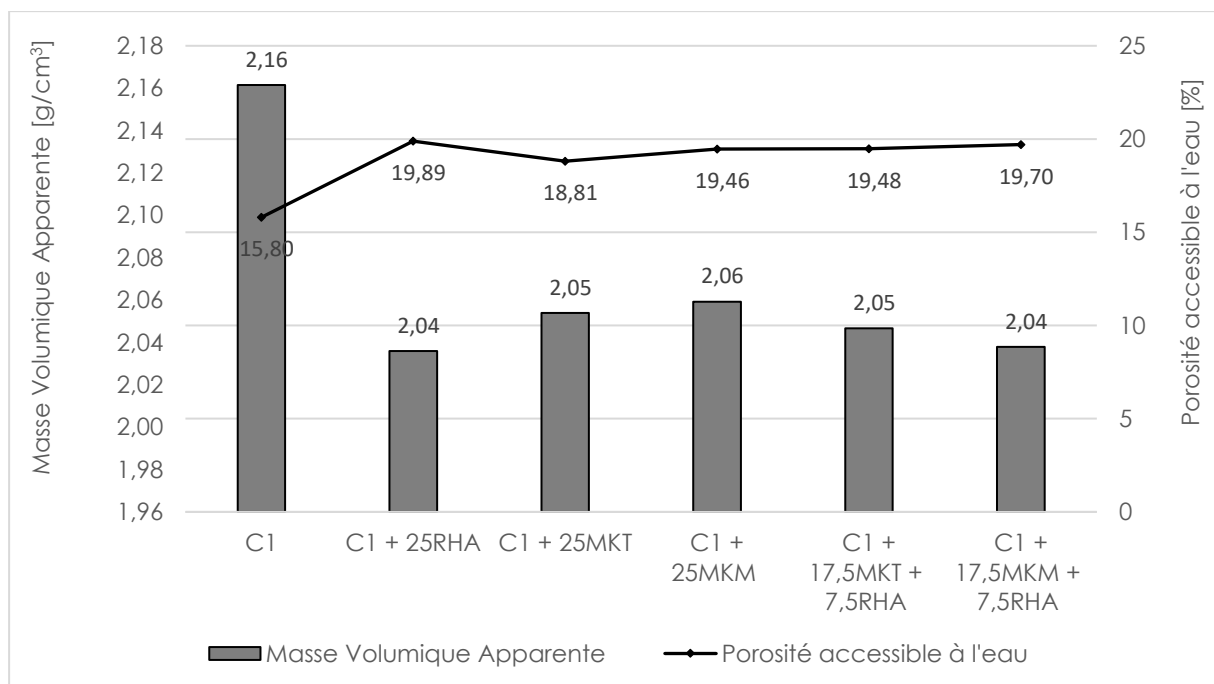


Figure 10 : Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau avec le ciment C1

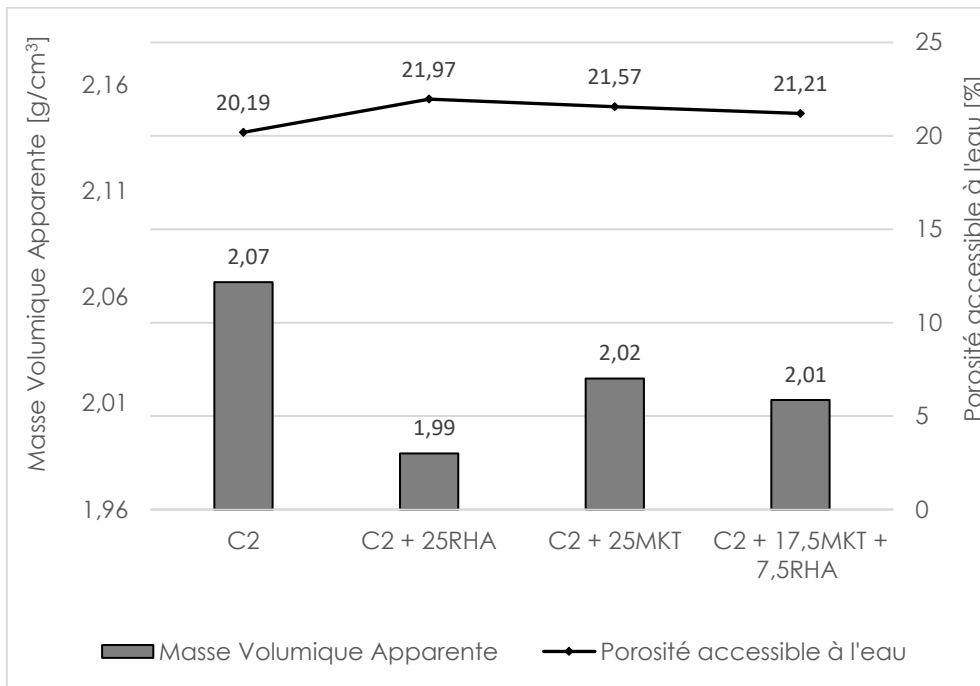


Figure 11 : Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau avec le ciment C2

Ces figures mettent en évidence les points suivants :

- la masse volumique des mortiers avec additions est notablement plus faible que celle des mortiers sans addition ;
- la porosité des mortiers avec additions est notablement plus élevée que celle des mortiers sans addition pour le ciment C1 mais sont du même ordre de grandeur pour le ciment C2.

Ainsi, la présence de RHA, MKT ou MKM contribue à la diminution de la masse volumique et à l'augmentation de la porosité des mortiers. En plus des différences de masses volumiques entre matériaux (les ciments présentent des masses volumiques supérieures à celles des additions), ces variations peuvent être corrélées à la perte de maniabilité des mortiers avec additions qui contribuent à la création d'une porosité supplémentaire. Cette porosité supplémentaire liée aux problématiques de maniabilité pourrait être limitée voire supprimée par incorporation d'adjuvants plastifiants.

#### **4 Interprétation**

Les RHA, ou cendres de balle de riz, possèdent une teneur élevée en silice amorphe, d'autant plus élevée que la combustion est complète et qu'elle se fait à haute température. Le taux de silice des RHA est le plus important en comparaison des autres cendres de végétaux (Ajiwe et al. 2000). Les RHA après broyage se présentent sous une forme très fine, ce qui les rend très actives (Bui et al. 2005 ; Jauberthie et al. 2003 ; Zhang and Han 2000). Lors de notre thèse (Razafitrimo V., 2005), il a été démontré que la substitution de RHA dans le ciment allant à 25% de sa masse conduit à une bonne résistance mécanique compte tenu de leurs bonnes propriétés pouzzolaniques.

Par contre, si les RHA sont obtenues par une combustion non contrôlée (CRH), elles possèdent de faibles propriétés pouzzolaniques et sont par conséquent moins intéressantes. De plus, elles se présentent sous la forme de « cristallite » pouvant poser des problèmes de santé (génération de poussières de silice cristalline pouvant conduire à la silicose).

En ce qui concerne le métakaolin, ou MK, Measson (Measson 1981) et Ambroise (Ambroise 1984) ont montré, dans les années 80, que parmi les argiles et latérites calcinées, c'est la kaolinite calcinée (métakaolinite) qui présente le meilleur caractère pouzzolanique. Chandrasekhar (Chandrasekhar 1996), lui, a mis en évidence une forte corrélation entre la réactivité pouzzolanique estimée à partir d'essais en compression sur des liants mixtes chaux-métakaolin et le « taux d'amorphisation » de la métakaolinite mesuré à l'aide du coefficient de désordre « Cd » calculé à partir du spectre infrarouge du métakaolin.

Ainsi, nous pouvons constater que l'ajout de MKT et/ou RHA accentue la demande en eau malgré que les résistances mécaniques soient améliorées. Ce qui justifie la nécessité de compenser la difficulté de mise en œuvre par l'ajout de plastifiant.

## 5 Conclusion

La substitution partielle du ciment par des additions est une pratique de plus en plus courante, aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi dans les pays développés, pour des raisons à la fois économiques (additions moins chères que le ciment) et environnementales (pas ou peu de dégagement direct de CO<sub>2</sub> pour ces additions). Les additions les plus utilisées sont les additions calcaires ou siliceuses, les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers. Le retour d'expérience des utilisateurs et les résultats de recherche permettent d'ores et déjà d'affirmer qu'une partie de ciment peut être remplacée par une quantité d'additions, sans que les propriétés mécaniques du béton soient foncièrement altérées.

Cette pratique n'étant pas développée à Madagascar, nous avons souhaité étudier la substitution de ciment par des matériaux locaux d'origine naturelle, à savoir les cendres de balle de riz, ou RHA et le métakaolin, ou MK, afin de proposer cette solution aux constructeurs.

Des analyses rhéologiques, mécaniques, physiques et minéralogiques ont été effectuées au niveau de ces matériaux d'addition ainsi qu'au niveau des 14 différentes combinaisons que nous avons réalisées. Elles confirment la pertinence de l'étude et démontrent la possibilité de remplacer 25% massique du ciment par ces additions, seules ou en combinaison. Ces résultats, sous réserve d'une évolution de la réglementation, pourraient être utilisés par les bétonniers ou les cimentiers en amont.

Ce remplacement, bon sur le plan technique, est aussi bon du point de vue environnemental puisque les deux additions testées ne contribuent pas aux dégagements de gaz à effet de serre comme le fait malheureusement le ciment.

Il convient maintenant d'étudier ce type de matériau sur le plan de la durabilité en prenant en compte les différences caractéristiques de la Grande Ile (milieu marin, milieu urbain, secteur minier, ...). La mise en place d'un laboratoire de recherche avec les matériels acquis par l'IST-T lors de sa participation à de récents projets internationaux devrait permettre de conduire ces recherches localement, en formant à la recherche les étudiants malgaches.

## **6 Remerciements (facultatif)**

Une pensée à Feu Professeur Etienne Rakotomaria pour sa contribution à tous mes travaux.

A Monsieur le Professeur Gilles Escadeillas, je tiens spécialement à lui exprimer mon entière gratitude pour sa patience, pour le partage sans faille de son savoir, de ses expériences et également pour sa douceur qui ont beaucoup contribué à mon développement personnel.

Un grand merci au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA Génie Civil de l'université Paul Sabatier, Toulouse qui m'a permis à l'accès des différents matériels très performants indispensables à la réalisation de mes recherches. Merci aux techniciens de Laboratoire pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans les manipulations, notamment Franck Cassagnabere pour les discussions scientifiques et amicales.

Mon entière reconnaissance à l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, particulièrement au Professeur Jean Lalaina Rakotomalala pour son soutien sans conditions à mes travaux.

Sans oublier l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour m'avoir formée et collaborée avec moi en matière de recherche et d'enseignement. Merci au Professeur Roger Randrianja d'avoir accepté à prendre la relève de Feu Etienne Rakotomaria dans la continuité de mes travaux.

## **7 Références**

AFNOR. (1994). *Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement.*

Normes & Recueils, Norme.

AFNOR. (2000). *Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique.* Normes & Recueils, Norme.

AFNOR. (2009). *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances.*

Normes & Recueils, Norme.

- AFNOR. (2010). Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique. Normes & Recueils, ST Norme.
- AFNOR. (2014). Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre. Normes & Recueils, Normes.
- Ajiwe V.I.E., Okeke C.A. and Akigwe F.C., A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash, 2000.
- A. K. Chakraborty, « Supplementary alkali extraction studies of 980° C-heated kaolinite by X-ray diffraction analysis », *J. Mater. Sci.*, vol. 27, n° 8, p. 2075-2082, 1992.
- Ambroise J., Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et étude de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques », 1984. Encyclopédie scientifique et technique Lidis, vol. 2. Lidis, 1970.
- Anjaramalala R., « Contribution à l'étude de quelques échantillons d'argile d'intérêt économique malagasy », Antananarivo EESciences, 1978.
- Billong N., Kinuthia J., Oti J., et Melo U.C., « Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin (MK) and Rice Husk Ash (RHA): Effect on tensile strength and microstructure », *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, p. 307-313, 2018.
- Billong N., Melo U.C., Kamseu E., Kinuthia J.M., et Njopwouo D., « Improving hydraulic properties of lime–rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK) », *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n° 4, p. 2157-2161, 2011.
- Buathier S., « Modélisation en régime dynamique d'un four tournant », Rapp. DEA Procédé Systèmes Matér. Univ. Paul Sabatier Toulouse Fr., 1998.
- Chandrasekhar S., Influence of metakaolinization temperature on the formation of zeolite 4A from kaolin, *Clay Minerals*, 1996 - Citeseer.
- Dabat M.-H., Razafimandimby S., et Bouteau B., « Atouts et perspectives de la riziculture périurbaine à Antananarivo (Madagascar) », *Cah. Agric.*, vol. 13, n° 1, p. 99-109 (1), 2004.



- FAO, « Suivi du marché du riz de la FAO », Organisation des Nations Unis, XVII, juill. 2014.
- « Glossaire : définition du terme Pouzzolane naturelle - Infociments », infociments.fr.
- Institut National de la Statistique. (2013). Tableau de bord économique. Etude Nationale, Institut National de la Statistique, Madagascar. janvier 2019 – INSTAT Madagascar.”.
- Jauberthie F., Rendell S., Tamba, et I. K. Cissé, Properties of cement—rice husk mixture, *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, n° 4, p. 239-243, 2003.
- Measson M., Etude de l’activité pouzzolanique de matériaux naturels traités thermiquement, en vue de la réalisation de liants hydrauliques, *Int. J. Coal Geol.*, 1981R.
- Olivier M., « Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en bloc sur terre », Lyon, INSA, 1994.
- Nicolas R.S., « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash », p. 341.
- Razafindrabe S.H., « Etude sur l’utilisation de la bauxite et du kaolin pour la fabrication de réfractaire », 2007.
- Radanielina T., « Diversité génétique du riz (*Oryza sativa* L.) dans la région de Vakinankaratra, Madagascar. Structuration, distribution éco-géographique & gestion in situ », 2010.
- Razafitrimo V., Contribution à l’amélioration des ciments à Madagascar, mai 2005
- Vénuat M., Ciments et bétons. FeniXX, 1978.
- Zhang X., Han I., The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cement and concrete research*, vol. 30(5), 2000, pp. 827–30.