



## Amélioration des propriétés du béton par Incorporation de deux cendres volantes (Improving the properties of concrete by Incorporation of two fly ashes)

S. Lamrani<sup>\*</sup>, L. Ben allal, M. Ammari, A. Azmani

Laboratoire des Matériaux et Valorisation des Ressources (LMVR), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger,  
Université Abdelmalek Essaadi, BP 416 – Tanger, Maroc

Received 3 June 2013, Revised 22 Oct 2013, Accepted 22 Oct 2013

\* Corresponding author: Email: [sanae.lam@gmail.com](mailto:sanae.lam@gmail.com)

### Abstract

The interest for the protection of the environment through an ecological management of waste became currently a preoccupying element. The civil engineering is concerned directly by this environmental problematic since it is one of the big producers of yard waste but also one of waste managers by their beneficial re-use in materials as: the cement, the concrete... An experimental study concerning the use of two fly ashes types in comparison with the silica fume showed an important improvement of properties of the concrete.

*Key words:* Waste management/ fly ashes/ cement/ concrete/ beneficial re-use

### Résumé

L'intérêt pour la protection de l'environnement à travers une gestion écologique des déchets est devenu actuellement un élément préoccupant. Le génie civil est directement concerné par cette problématique environnementale puisqu'il est l'un des grands producteurs de déchets de chantier mais aussi l'un des gestionnaires des déchets par leurs valorisation dans des matériaux tels que : le ciment, le béton... Une étude expérimentale concernant la valorisation de deux types de cendres volantes « CV1 » et « CV2 » en comparaison avec la fumée de silice a montré une amélioration importante des propriétés du béton.

*Mots- clés :* Gestion des déchets/ valorisation/ cendres volantes/ ciment/ béton.

### 1. Introduction :

La gestion des déchets solides n'a longtemps consisté qu'en leur évacuation du milieu urbain et leur déchargement dans un site non géré en périphérie des zones habitées. La situation est parfois pire : collecte irrégulière ou inexistante, multiples décharges sauvages. Les problèmes dus aux diverses pollutions causées par ces déchets se ressentent de plus en plus. Ils ont fait naître une véritable prise de conscience (autorités, associations, ...).

Le génie civil est directement concerné par cette problématique puisqu'il est l'un des grands producteurs de déchets de chantier mais aussi l'un des gestionnaires des déchets par leur valorisation [1][2] dans des matériaux tels que : le ciment, le béton .

Le présent article montre comment l'utilisation de deux types de cendres volantes « CV1 » et « CV2 » en comparaison avec la fumée de silice a pu améliorer certaines caractéristiques du béton.

### 2. Caractérisation physico-chimique de deux cendres volantes « CV1 » et « CV2 »

Les deux cendres volantes étudiées sont un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales thermiques. Des installations de dépoussiérage recueillent les fines particules résiduelles contenues dans les gaz de combustion avant leur rejet.

Les fumées de silice condensées sont un autre sous-produit du procédé de fusion utilisé dans la production du silicium et d'alliages de ferrosilicium.

Ces deux matériaux combinés au ciment contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois.

#### 2.1 Analyses chimiques quantitatives de la « CV1 » et de la « CV2 »

Les valeurs des différents constituants de chaque produit obtenus par spectrométrie d'absorption atomique sont données sur le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Composition chimique en éléments majeurs.

Oxydes	Composition chimique %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Perte au feu
CV1	72,6	21,2	2,1	1,0	0,0	0,1	0,4	2,2	0,0	0,7
CV2	35,0	27,1	24,1	6,9	2,9	0,1	0,1	3,5	0,0	0,7

A la lumière de ces résultats, il s'avère que la « CV2 » a une teneur en alcalis très faible ce qui par conséquent éliminera la réaction alcali-granulats au cas où ce matériau est incorporé à du béton. Comme la perte au feu est inférieure à 1%, on peut dire qu'on est en présence de deux cendres volantes très propres.

## 2.2 Analyses physiques

### 2.2.1 Densité et granulométrie

Cas de la « CV1 » : Il s'agit d'une poudre fine de couleur gris-clair en comparaison avec la fumée de silice qui est de couleur gris-foncé. Sa densité est de l'ordre 2,30. Elle a été déterminée selon la norme ASTM/C188 [3]. Sa granulométrie déterminée par sédimentométrie (figure 1) a montré une taille moyenne des particules de l'ordre de 5 µm.

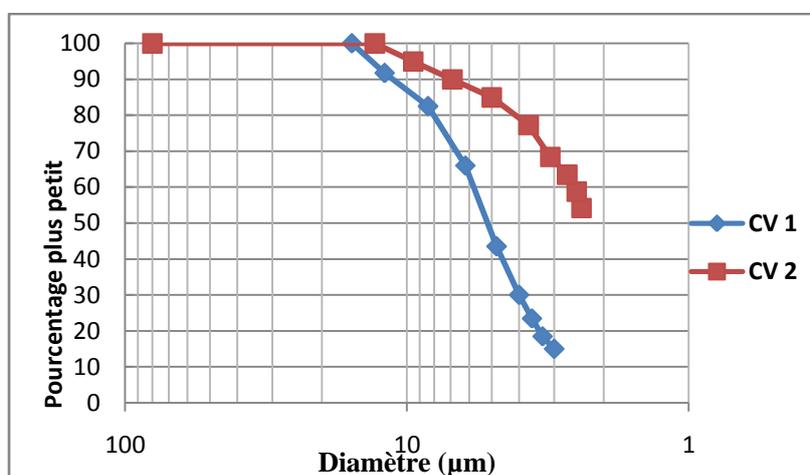


Figure 1 : Courbe granulométrique des deux cendres volantes

Cas de la « CV2 » : C'est une poudre très fine de couleur brune. Sa densité est de l'ordre de 2,65. Cette densité élevée peut s'expliquer par la présence d'une forte teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La taille moyenne de ses particules est de l'ordre de 2,5 µm (cf. figure 1). La « CV2 » est donc plus dense que la « CV1 ». Selon les données bibliographiques [4], la silice a une densité variant de 2,10 à 2,25 et une taille moyenne des particules comprise entre 0,1 et 0,2 µm. Il s'agit d'un matériau d'une très grande finesse.

### 2.1.2 Diffraction des rayons X

Cette méthode analytique nous a permis de connaître les différentes phases présentes dans les produits en question. La « CV1 » est un matériau cristallisé constitué principalement de quartz et de mullite.

La « CV2 » est plus amorphe. Elle contient peu de quartz mais plus de mullite et de magnétite.

La fumée de silice est constituée de silice amorphe ce qui lui confère une forte réactivité.

## 3. Etude de l'activité pouzzolanique des deux cendres volantes

### 3.1 Détermination de l'indice de pouzzolanité par mesure des résistances mécaniques sur mortiers

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

Comme les cendres volantes et la fumée de silice possèdent des propriétés pouzzolaniques, il est intéressant de calculer l'indice de pouzzolanité de chacun des trois produits en question et ceci par mesure de la résistance à la compression sur des cubes de mortier de 50 mm après 28 jours de cure humide dans une solution saturée de chaux.

Les mortiers ont été élaborés selon les normes ASTM C311 et C109/C109M [5][6].

L'indice de pouzzolanité ou indice d'activité de résistance (IAR) est défini par le rapport :  $A/B \times 100$ .

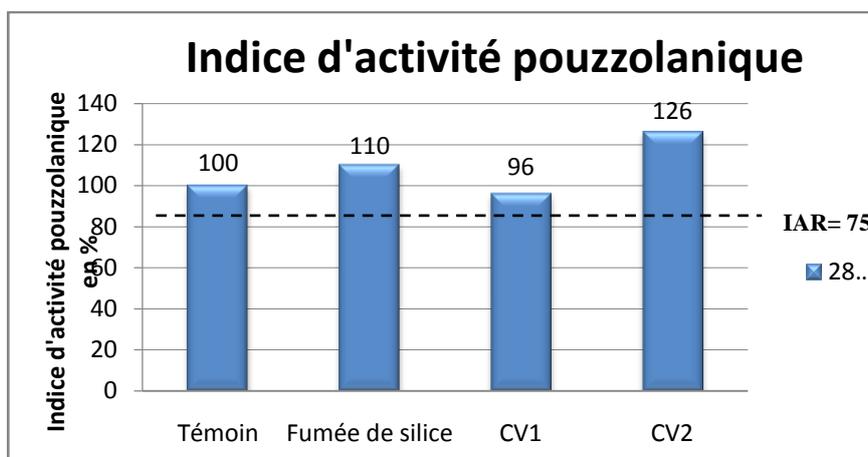
A : Résistance moyenne à la compression des cubes issus du mélange contenant la pouzzolane (MPa).

B : Résistance moyenne à la compression des cubes issus du mélange ne contenant que du ciment (MPa).

La norme ASTM C 618 [7] prévoit un minimum d'indice d'activité pouzzolanique de 75% à 28 jours avec le ciment portland artificiel.

**Tableau 2 :** Indice de pouzzolanité en pourcentage

	Résistance moyenne MPa (28 jours)	Indice de pouzzolanité en pourcentage
Témoin (ciment)	33,9	100
CV1	32,5	96
CV2	42,9	126
Fumée de silice	37,4	110



**Figure 2:** Indice d'activité pouzzolanique à 28 jours

L'examen des résultats (tableau 2) (cf. figure 2) montre que la « CV2 » est une cendre réactive dans les conditions de l'essai, puisque son incorporation au ciment fait augmenter la résistance à la compression du mortier au bout de 28 jours par comparaison avec le mélange témoin.

L'indice de pouzzolanité de la fumée de silice (cf. figure 2) est légèrement inférieur à celui de la « CV2 » à cause de l'augmentation du rapport eau/liant pour la fumée de silice (0,7 au lieu de 0,48) lors de la préparation des mortiers. Sa grande finesse augmente la demande en eau.

### 3.2 Détermination de l'activité pouzzolanique par analyse thermique

La capacité des deux cendres volantes « CV1 » et « CV2 » à fixer une certaine quantité de chaux libérée lors de l'hydratation du ciment Portland a été évaluée par analyse thermogravimétrique et analyse thermique différentielle en comparaison avec la fumée de silice au bout de 28 jours. 20% de ciment sans filler calcaire (95% clinker et 5% de gypse) ont été remplacés par la « CV1 », la « CV2 » et la fumée de silice.

Trois coulis ont été préparés avec un rapport eau/liant = 0,45 par substitution de 20% du ciment. Le coulis témoin ne contient que le ciment et l'eau. Les coulis ont été mis dans des petits cylindres en plastique et conservés dans un bac d'eau thermostaté. L'hydratation est arrêtée au bout de 28 jours en plongeant la pâte durcie dans l'isopropanol.

Les résultats sont reportés dans le tableau 3.

**Tableau 3 :** Pourcentage de la chaux fixée.

	Référence	CV1	CV2	Fumée de silice
Pourcentage de $\text{Ca(OH)}_2$ (%)	18.5	14.8	14.4	7.8

Les résultats obtenus (tableau 3) montrent que les deux cendres volantes ont pu fixer au bout de 28 jours une certaine quantité de chaux. La quantité de portlandite dans le coulis contenant la « CV1 » a diminué de 20 % par rapport au coulis de référence et de 22 % pour la « CV2 ».

La fumée de silice est la meilleure pouzzolane car la quantité de portlandite dans son coulis a diminué de 58% par rapport au coulis témoin.

#### 4. Etude sur béton

##### 4.1 Comportement rhéologique

Point de saturation : Il s'agit d'étudier le comportement des coulis ayant un rapport eau/liant = 0,35 fabriqués à partir d'un ciment type CPJ 45 (il convient à tous les usages) dont 10% a été remplacé par la « CV1 », la « CV2 » et la fumée de silice. On fait varier le dosage en superplastifiant PNS-Na (polynaphtalène sulfonate de sodium), et on mesure le temps d'écoulement de 1 litre de coulis au cône Marsh [8] après 5 min et 60 min. Les courbes obtenues sont représentés sur la figure 3. La figure 3 (60 min) montre que dans le cas de la substitution du ciment par 10 % de la fumée de silice, le dosage en superplastifiant au point de saturation est élevé (ce dosage au point de saturation peut être défini comme le dosage au delà duquel toute augmentation de la quantité de superplastifiant ne procure aucun gain de maniabilité). Par contre, on peut constater que la substitution de 10 % de ciment par la « CV2 » améliore de façon significative le comportement rhéologique du coulis, tandis que la substitution de 10% par la « CV1 » semble sans effet.

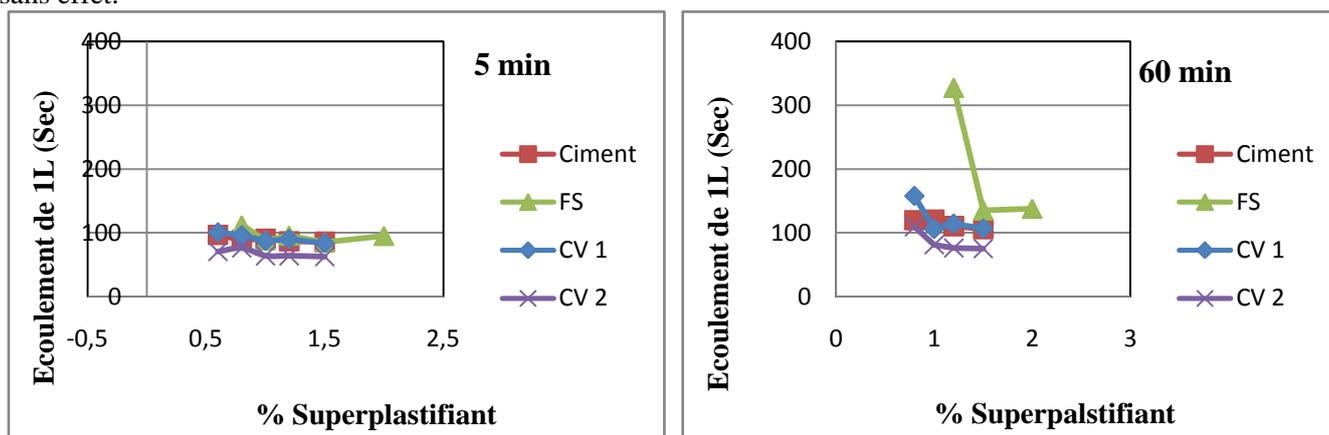


Figure 3 : Point de saturation du ciment avec ajouts.

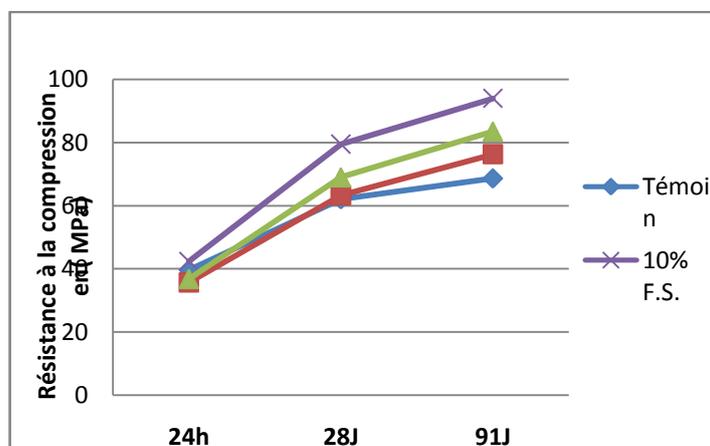


Figure 4 : Comparaison des évolutions de la résistance en compression des quatre bétons

##### 4.2 Comportement de la « CV1 » et de la « CV2 » dans un béton à haute performance

L'utilisation des Bétons à Hautes Performance (BHP) [9,10] est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art.

Il s'agit de suivre l'effet de l'incorporation des ajouts cimentaires « CV1 », « CV2 » et de la fumée de silice dans le béton sur sa résistance à la compression en fonction du temps et sur la perméabilité aux ions chlore.

##### 4.2.1 Composition du béton

Le ciment utilisé pour les quatre bétons est le ciment CPJ 45. Le rapport Eau/liant est de 0,30.

10% du ciment a été remplacé par chacun des ajouts cimentaires. Le sable utilisé est un sable siliceux ayant un module de finesse de 2,4, une densité de 2,65 et une absorption de 1,2%. Les gros granulats de diamètre 14mm ont une densité de 2,74 et une absorption de 0,3%. Le dosage en superplastifiant (Polynaphtalène sulfonate de sodium) est de 7,6 L/m<sup>3</sup> pour le ciment, 6,1 L/m<sup>3</sup> pour les deux cendres volantes et 9,2L/m<sup>3</sup> pour la fumée de silice.

#### 4.2.2 Performances mécaniques

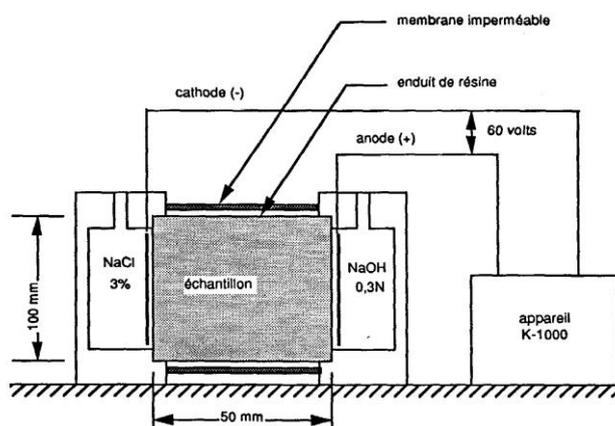
Pour les quatre types de béton, nous avons mesuré la résistance à la compression au bout de 24 heures, 28 jours et 91 jours sur des cylindres de 100mm de diamètre. Les résultats sont représentés sur la figure 4. Les résultats obtenus (cf. figure 4) indiquent que l'incorporation des cendres volantes et de la fumée de silice dans le béton contribue à l'augmentation de la résistance en compression au bout de 28 jours et à long terme (91jours). Il convient de noter que le béton aux fumées de silice est plus résistant que ceux qui contiennent les deux cendres volantes.

La « CV2 » est une très bonne pouzzolane. Sa performance nous permet de la classer entre la fumée de silice et une cendre volante.

La « CV1 » est un bon matériau pouzzolanique mais moins performant que la « CV2 » et la fumée de silice.

#### 4.2.3 Perméabilité aux ions chlore

Le terme perméabilité renvoie au déplacement de gaz, de vapeur et de liquide dans un matériau poreux. Dans le cadre de notre travail, la perméabilité aux ions chlore a été déterminée selon la norme ASTM C 1202 [11]. L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendrée par une différence de potentiel maintenue constante pendant 6 heures, entre les extrémités d'un échantillon de béton dont l'une des faces est immergée dans une solution de chlorure de sodium (3%) et l'autre dans une solution de soude (0,3N) comme le montre la figure 5. Il s'agit d'un test accéléré permettant d'évaluer le potentiel de pénétration des ions chlore dans un béton.



**Figure 5 :** Principe de fonctionnement de l'appareil de diffusion accélérée des ions chlore ASTM C1202 [11]

Le niveau de perméabilité peut être estimé en comparant la charge totale après 6 heures avec l'échelle de perméabilité proposée par Whiting [12] (tableau 4). Ces valeurs s'appliquent à des bétons conservés 28 jours dans l'eau.

**Tableau 4 :** Echelle de Whiting [12]

Charge totale en coulombs après 6 heures	Niveau de perméabilité
Supérieure à 4000	Forte
Entre 2000 et 4000	Modérée
Entre 1000 et 2000	Faible
Entre 100 et 1000	Très faible
Inférieure à 100	Négligeable

Les résultats obtenus sont rassemblés sur le tableau 5.

**Tableau 5 :** Perméabilité aux ions chlore.

	Référence	10% CV1	10% CV2	10% F.S.
Ions chlore 28j (coulombs)	2500	2300	2100	500

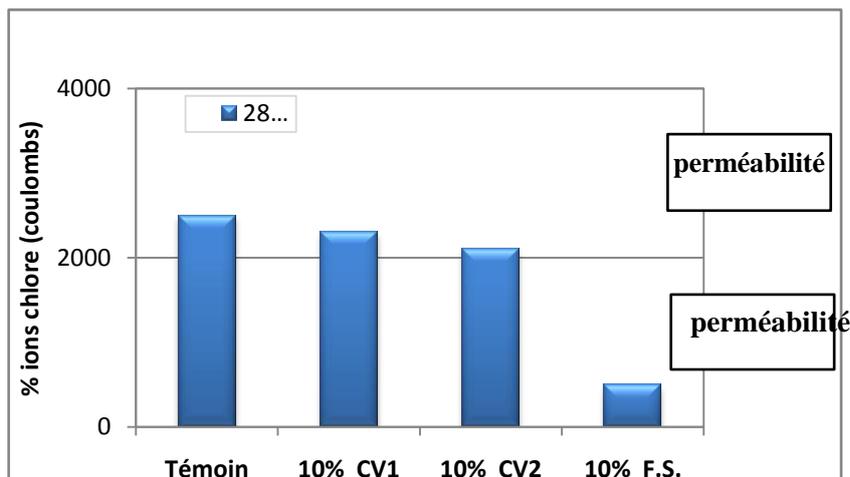


Figure 6 : Comparaison de l'évolution de la perméabilité aux ions chlore des quatre bétons

L'examen des résultats du tableau 6 et (figure 6) montre que la perméabilité aux ions chlore est légèrement réduite au bout de 28 jours pour les bétons contenant les deux cendres volantes en comparaison du béton seul. La fumée de silice diminue de façon beaucoup plus importante la perméabilité du béton aux ions chlore en comparaison avec les deux cendres volantes. L'affinage de la structure des pores résultant de l'effet pouzzolanique entre la pâte de ciment et les ajouts cimentaires [13] provoque une diminution considérable de la perméabilité des systèmes liants. On peut conclure que la fumée de silice est une pouzzolane très réactive.

### Conclusion

La « CV1 » est un bon matériau pouzzolanique mais un ajout cimentaire non prometteur à cause de son état cristallisé. Il faudrait qu'elle subisse un refroidissement rapide pour qu'elle soit amorphe et donc plus réactive. La « CV2 » s'avère un ajout cimentaire intéressant. C'est un produit qui possède des performances comparables à la fumée de silice. Elle pourrait remplacer la fumée de silice au cas où celle-ci se ferait rare sur le marché.

### Références

1. Braymand-Morel S., Clastres P., *Revue Française de Génie Civil*, 2-3 (2000) 209-220.
2. Ben allal L., Ammari M., Frar I., Azmani A., Clastres P., Jullien S., *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15 (2011) 293-302.
3. ASTM C188, Standard Test Methods for Density of Hydraulic Cement.
4. Aïtcin, P.C. Condensed Silica Fume, *les Editions de l'Université de Sherbrooke* (1983).
5. ASTM C311, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a mineral Admixture in Portland-Cement Concrete.
6. ASTM C109/C109M, Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
7. ASTM C618, Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
8. Roussel, N., Le Roy, R., *J. Cement and Concrete Research* 35 (2005) 823 – 830
9. Aïtcin, P.C. Bétons hautes performances, *Ed. Eyrolles, Paris* (2001) 683.
10. Zain M.F.M., Safiuddin Md., Mahmud H., *J. Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 1501-1505.
11. ASTM C 1202, Standard Test Methods for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
12. Whiting, D. Rapid determination of the chloride permeability of concrete. *Final Report No. FHWA/RD-81/119* (1981).
13. Siddiq R., *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (2011) 923.

(2014) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>