

# Réalisation d'éco-ciments grâce à la valorisation de cendres volantes de charbon non conventionnelles issues de centrales thermiques Spreader Stoker

SOW Moustapha<sup>1</sup>, TRIBOUT Christelle<sup>1</sup>, CYR Martin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC),  
135 avenue de Rangueil 31077 Toulouse Cedex 4  
E-mail: msow@insa-toulouse.fr  
Téléphone: +33 (0)5 61 55 67 07  
Fax: +33 (0)5 61 55 99 49

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

## RÉSUMÉ.

*Les centrales thermiques de type Spreader Stoker sont utilisées initialement pour brûler les biomasses comme la bagasse lors de la récolte de la canne à sucre. Cependant, lorsque la saison est terminée, ce type de four peut également être utilisé pour brûler du charbon. L'inconvénient est que les cendres volantes de charbon résultant de ce procédé contiennent beaucoup de particules non brûlées comparées aux cendres volantes de charbon pulvérisées normalisées.*

*Les cendres volantes de Spreader Stoker (CVSS) sont actuellement envoyées en centre d'enfouissement en dépit de leur potentiel de valorisation dans la construction, impliquant donc des enjeux économiques et environnementaux. L'objectif principal de cette étude a donc été d'évaluer le potentiel de fabrication de ciments composés avec CVSS, ainsi que de percevoir le rôle des imbrûlés en caractérisant les CVSS et en étudiant leur comportement dans les matrices cimentaires. L'exploitation numérique d'une base de donnée expérimentale à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNA) a aussi permis d'envisager la prédiction de caractéristiques de mortiers à l'état frais et durci sans avoir à les réaliser.*

## ABSTRACT.

*Spreader Stoker thermal power plant are initially used to burn biomasses like bagasse during the sugarcane harvest. When the season is over, this kind of furnace can also be used to burn coal. The inconvenient is that the coal fly ashes resulting of this process contains a lot of unburned particles compared to normalized pulverized coal fly ashes.*

*Spreader Stoker coal fly ash (CVSS) is currently sent to landfill despite its potential of valorization in construction, involving economic and environmental issues. The main objective of this study was to evaluate the potential for the manufacture of composite cements with CVSS, and also to perceive the role of unburned particles by characterizing CVSS and by studying their behavior in cementitious matrices. The numerical exploitation of an experimental database using Artificial Neural Networks (ANN) also allowed the prediction of mortar characteristics at fresh and hardened state without having to realize them.*

*MOTS-CLÉS: Cendres volantes, valorisation, combustion de charbon, Spreader Stoker, ciments composés, éco-ciments.*

*KEY WORDS: Fly ash, valorisation, coal combustion, Spreader Stoker, composite cements, eco-cement.*

---

L'utilisation de sous-produits dans la fabrication de ciments composés est connue depuis longtemps. Par exemple, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice sont utilisés partout dans le monde en remplacement partiel du clinker [MAS 04]. Cependant, l'utilisation de ces sous-produits est réglementée en Europe avec la norme [EN197-1, 2011], c'est pourquoi il n'est pas possible d'utiliser tout type de sous-produits et ceux autorisés doivent être conformes aux normes avec notamment des exigences physiques et chimiques [EN450-1, 2012].

D'un côté, il existe parfois des situations particulières locales où des sous-produits peuvent être utilisés malgré leur non-conformité aux normes. C'est le cas de l'île de La Réunion (2512 km<sup>2</sup>) qui produit quelques milliers de tonnes de cendres volantes dans ses centrales thermiques. Ces cendres (CVSS) sont actuellement envoyées aux sites d'enfouissement car elles ne sont pas conformes à la norme EN 450-1, norme qui ne couvre que les cendres volantes obtenues par la combustion du charbon pulvérisé. Une précédente étude a montré que les CVSS stabilisées par des matrices cimentaires relâchent de très petites quantités de métaux lourds par lixiviation [HOT 16].

De plus, la Réunion n'a pas de cimenterie. Le clinker importé d'autres pays est broyé localement et mélangé avec une pouzzolane naturelle pour fabriquer des ciments CEM II. L'utilisation des cendres produites localement pourrait signifier de réels progrès pour le développement durable de l'île, car leur valorisation rationnelle pourrait diminuer à la fois la quantité de clinker à importer, la pouzzolane exploitée et la CVSS envoyée aux décharges.

Le but de cet article est donc de présenter une étude de faisabilité sur la réutilisation des cendres volantes Spreader Stoker dans la fabrication de ciments composés. L'étude est composée des parties suivantes: une brève caractérisation des matériaux utilisés, une évaluation de la fabrication de ciments composés à l'échelle de laboratoire, puis une caractérisation à l'état frais, durcissant et durci sur les pâtes de ciments et les mortiers.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1. Matériaux

Les CVSS ont été produites dans une centrale thermique de l'île de la Réunion qui fonctionne avec une chaudière de type Spreader Stoker. La centrale brûle la bagasse pendant la saison de la canne à sucre et produit des cendres de bagasse qui sont déjà valorisées dans d'autres applications. Pendant le reste de l'année, du charbon importé est utilisé comme combustible, produisant des cendres volantes de charbon qui sont envoyés en installation de stockage pour déchets non dangereux (ISDND). Les CVSS ont été caractérisées lors d'une étude antérieure, montrant des similitudes avec les cendres volantes normalisées de charbon pulvérisé [SOW 15]. Afin de voir l'effet des particules imbrûlées dans les matrices cimentaires, des CVSS ont été traitées en les calcinant à 800 ° C, **ces cendres seront notées CVSS\***.

Le clinker, le gypse, le laitier et la pouzzolane naturelle sont actuellement utilisés pour la fabrication de ciments commerciaux à la Réunion. Pour cette étude, les mêmes matériaux locaux ont été utilisés pour fabriquer les ciments composés de laboratoire. Le sable utilisé dans la production de mortier était un sable de quartz normalisé conforme à [EN196-1, 2005].

### 2.2. Méthodes

Les caractéristiques principales des matériaux présentés sont les suivantes:

- perte au feu [EN196-2, 2005]
- composition chimique par ICP-OES, Optima 7000 DV
- masse volumique réelle par pesée hydrostatique
- surface spécifique Blaine [EN196-6, 2010]

La préparation des échantillons utilisés pour les analyses chimiques était basée sur la fusion du borate. Un mélange de cendres volantes, de tétraborate de lithium et de métaborate de lithium a été placé dans un four à moufle à 1100 ° C pendant 30 min. La masse fondue a ensuite été soigneusement dissoute dans de l'acide nitrique dilué avant des analyses à l'ICP-OES.

Les ciments de laboratoire ont été fabriqués à l'aide d'un broyeur planétaire à billes de porcelaine.

Les mortiers ont été réalisés dans les normes [NF P15-437, 1987] et [EN 196-1, 2005]. Les essais sur les pâtes et mortiers de ciment (EN 196-1) ont été les suivants:

- consistance normalisée sur pâte de ciment [EN196-3, 2005]
- temps de prise sur pâtes de ciment [EN196-3, 2005]
- temps d'écoulement au maniabilimètre LCL sur mortiers [NF P15-437, 1987]
- résistance à la compression sur mortiers [EN196-1, 2005]

Des essais de consistance normalisée et de temps de prise ont été réalisés sur des pâtes dont le rapport E/C est détaillé dans le tableau 5. La maniabilité du mortier a été évaluée sous vibration en utilisant un appareil LCL [NF P15-437, 1987]. La résistance à la compression a été mesurée à 7, 28 et 90 jours sur des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm (vitesse de chargement de 2 400 N / s ± 200 N / s) selon la norme [EN196-1, 2005].

### 2.3. Les ciments de laboratoire

Pour le choix des ciments à fabriquer, plusieurs possibilités étaient envisageables. Nous nous sommes donc basés sur le tableau de référence présentant les différentes familles de ciments courants issus de la norme [EN 197-1, 2012]. Les chiffres présentés dans le Tableau 1 correspondent à des plages de pourcentages massiques pour les constituants concernés; les additions disponibles pour cette étude sont symbolisées par les cadres vert, rouge et gris. Les lignes bleues correspondent aux types de ciments courants envisageables avec les différentes additions.

**Tableau 1 : Les 27 produits de la famille des ciments courants selon la norme [EN 197-1, 2011]**

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) <sup>a)</sup>										Constituants secondaires				
		Constituants principaux														
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire						
K	S	D <sup>b)</sup>	Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Siliceuse V	Calcaire W	T	L	LL							
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au laitier	CEM I/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM I/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM I/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM I/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM I/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM I/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM I/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
Ciment Portland composé <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-94	←	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	←	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	—	←	—	11-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	←	—	36-55	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	—	←	18-30	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	←	31-50	—	—	—	—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

**Tableau 2 : liste et composition des 5 ciments fabriqués 2017 composés en 500 (dosages) massiques)**

V\* = code pour les CVSS\* (sans imbrûlés)

Ciments	Clinker	Cendres volantes	Pouzzolane	Laitier	Gypse
	K	V	P	S	G
II/A-P15	83	-	13	-	4
II/A-V15	83	13	-	-	4
II/A-V*15	83	13	-	-	4
II/A-V20	78	18	-	-	4
II/A-M (P5-V15)	78	4	14	-	4
II/B-V25	73	23	-	-	4
II/A-M (P5-V20)	73	19	4	-	4
II/B-P30	68	-	28	-	4
II/B-V30	68	28	-	-	4
II/B-V*30	68	28	-	-	4
II/B-V35	63	33	-	-	4
II/A-M (P10-V25)	63	9	24	-	4
V/A-S20-V20	58	19	-	19	4
V/A-S20-P20	58	-	19	19	4

Les ciments commercialisés à la Réunion sont essentiellement des ciments composés avec pouzzolane naturelle, CEM II/A-P et CEMII/B-P. Il était alors essentiel de comparer les CVSS et la pouzzolane, mais aussi d'élargir le champ de recherche en proposant différents types de ciments composés à base de laitier, pouzzolanes et cendres volantes. Il convient de noter que les ciments de référence CEM II/A-P et CEMII/B-P ont été fabriqués en laboratoire afin d'avoir les mêmes conditions de production que les nouveaux ciments fabriqués avec CVSS.

### 3. Résultats

#### 3.1. Caractérisation

Pour la fabrication de ciments composés, le clinker et le laitier ont été broyés à une finesse Blaine suffisante pour avoir une bonne réactivité. La pouzzolane a été broyée pour atteindre une surface spécifique Blaine équivalente à celle des CVSS afin de pouvoir les comparer.

Après un broyage séparé des différents matériaux, le ciment composé final a été obtenu par un mélange pendant 2 minutes dans un broyeur planétaire pour une bonne homogénéisation. Le Tableau 3 donne la masse volumique réelle, la surface spécifique Blaine et le temps de broyage des composants utilisés.

**Tableau 3 : Masse volumique réelle, surface spécifique Blaine et temps de broyage des matériaux utilisés pour la fabrication des ciments composés de laboratoire**

Caractéristiques	Clinker	CVSS	CVSS*	Pouzzolane	Laitier	Gypse
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3.19	2.16	2.46	2.66	2.85	2.32
S. S. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3600	5500	7300	5700	4100	6100
Temps de broyage (mn)	70	0	0	10	70	5

Les compositions chimiques et la quantité de particules fines (PAF/1530) (au feu) de matériaux utilisés pour cette étude sont détaillées dans le Tableau 4. Il est montré que la CVSS a une composition approchant les cendres volantes silico-alumineuses des centrales thermiques à charbon pulvérisé, avec 80% en masse de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en excluant la perte au feu du calcul.

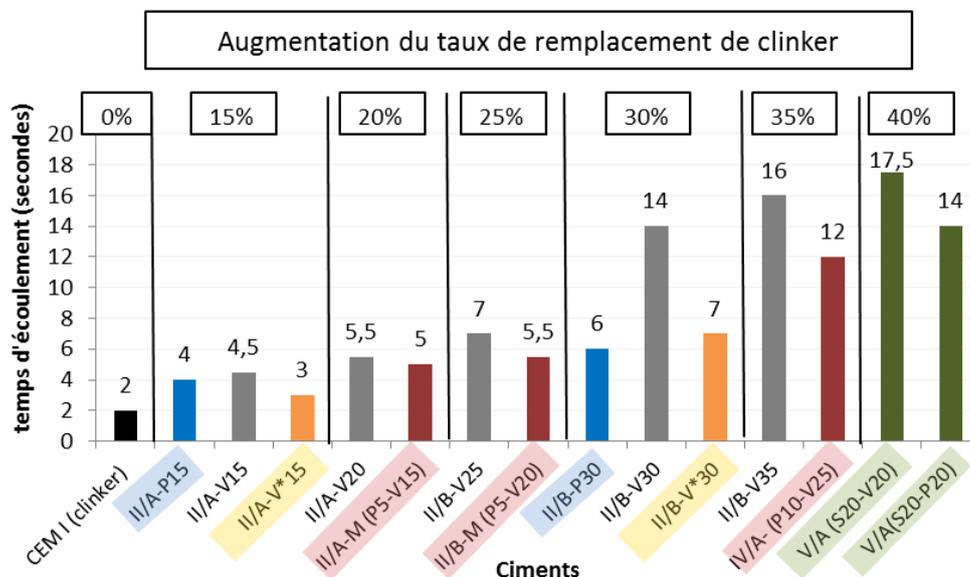
**Tableau 4 : Composition chimique en pourcentages massiques par ICP-OES des matériaux utilisés pour la fabrication des ciments composés**

Oxide en%	Clinker	CVSS	CVSS*	pouzzolane	Laitier	Gypse
SiO <sub>2</sub>	21.5	34.3	52.7	53.5	34.2	0.66
CaO	67.6	4.07	5.9	5.7	37.2	39.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.3	19.7	27.7	16.4	12.5	0.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6	3.2	4.5	11.3	0.77	0.11
Na <sub>2</sub> O	0.17	0.18	0.29	3.9	0.27	0.04
MgO	2.1	0.86	1.2	2.5	9.6	0.04
SO <sub>3</sub>	0.58	0.63	0.63	0.07	0.11	55.3
<b>PAF</b>	<b>1.3</b>	<b>29.7</b>	<b>0.7</b>	<b>4.3</b>	<b>2.1</b>	<b>7.7</b>

### 3.2. Résultats aux états frais, durcissant et durci

#### 3.2.1. Etat frais et durcissant

L'effet, sur la maniabilité de mortiers, des différents composants des ciments fabriqués a été évalué en mesurant le temps d'écoulement dans un maniabilimètre LCL [NF P15-437, 1987]. Les résultats des tests sont présentés dans la Figure 1 avec une augmentation de la quantité de remplacement du clinker de 0% à 40% afin d'observer l'évolution de l'incorporation des additions et aussi de comparer les pâtes de ciments avec une quantité équivalente d'ajouts.



**Figure 1 : Temps d'écoulement au maniabilimètre LCL de mortiers normalisés**

Les résultats présentés dans la Figure 1 montrent que:

- Le remplacement du clinker par les différentes additions augmente le temps d'écoulement, réduisant ainsi l'ouvrabilité du mortier associé. En effet, tous les temps d'écoulement mesurés sont supérieurs à celui du témoin CEM I (2 secondes).
- Une augmentation de 15 à 30% du remplacement de clinker par pouzzolane (en bleu sur la Figure 1), n'a pas augmenté le temps d'écoulement substantiellement. Pour les mélanges avec CVSS (en gris sur la Figure 1), on note une grosse augmentation du temps d'écoulement pour un taux de remplacement de 30%. En termes de maniabilité, on aurait donc une limite de 30% pour l'utilisation de CVSS à partir de laquelle l'usage d'adjuvants serait presque inévitable pour une bonne mise en place du matériau.
- En ce qui concerne l'effet des imbrûlés sur la maniabilité, un léger effet a été observé pour un taux de remplacement de 15%, cependant compte tenu de l'incertitude sur les valeurs expérimentales de ce type d'essai, on ne peut pas conclure sur une réelle baisse de maniabilité quand on remplace les CVSS par les CVSS\* (3s versus 4,5s). Néanmoins, pour un remplacement de 30%, la présence de CVSS\* induit une diminution assez importante de la maniabilité par rapport aux mélanges avec CVSS (14 s pour II/B-V\*30 versus 7 s pour II/B-V30). La tendance serait donc une augmentation croissante du temps d'écoulement suivant l'augmentation de la quantité d'imbrûlés.
- La présence de la pouzzolane dans des mélanges ternaires pouzzolane/CVSS (en rouge sur la Figure 1) confirme la tendance à améliorer la maniabilité vis-à-vis des CVSS que l'on a pu observer (confrontation des mélanges en rouge vs les mélanges en gris à 20, 25 et 35% de remplacement du clinker).
- L'incorporation de laitier semble nuisible pour la maniabilité. En effet, les temps d'écoulement des mortiers à base de ciments ternaire laitier/pouzzolane et laitier/CVSS (en vert sur la Figure 1) sont plutôt élevés (étant respectivement de 14 et 17,5 secondes). Sur ces mêmes mélanges, on remarque encore que la pouzzolane comparée aux CVSS, a un effet légèrement positif sur la maniabilité puisqu'elle permet de diminuer les valeurs du temps d'écoulement.

De ces observations, on peut tirer les conclusions suivantes:

- La pouzzolane a une meilleure maniabilité que le CVSS même dans les ciments composites avec du laitier.
- L'augmentation de la quantité de CVSS a considérablement accru le temps d'écoulement et donc réduit l'ouvrabilité. Cette tendance peut être expliquée par une demande d'eau plus élevée provenant de particules imbrûlées, comme le montre le temps d'écoulement obtenu avec la CVSS\*.
- En approchant une quantité de 30% de CVSS dans des ciments binaires, l'utilisation de plastifiants est nécessaire pour maintenir une maniabilité acceptable.

Dans le Tableau 5, on peut observer que des rapports E/C plus élevés sont nécessaires afin d'obtenir une consistance normalisée sur des pâtes de ciment. Ces résultats confirment aussi l'augmentation de la demande en eau induite par les CVSS.

**Tableau 5 : Consistance normalisée et temps de prise sur pâtes de ciments selon la norme EN 196-3**

Ciment	CEM I	II/A-P15	II/A-V15	II/A-V20	II/B-P30	II/B-V30	IV/A-S20-P20	IV/A-S20-V20
<b>Consistance normalisée (E/C)</b>	0.27	0.29	0.31	0.34	0.34	0.38	0.34	0.34
<b>Temps de prise (mn)</b>	88	110	130	140	225	225	280	260

On constate que les temps de prise des mortiers de ciment composés sont beaucoup plus longs que la référence. Ce résultat pourrait s'expliquer par divers mécanismes:

• un effet de dilution de l'ADPHS que les pâtes de ciment 2017mp15415/1580 (15.01) (15.01) ce qui entraîne une diminution de la quantité d'hydrates formée dans les premières heures [BER 86 ; RAM 14];

• une augmentation du rapport eau-liant due à la demande d'eau plus élevée, connue pour avoir un effet sur le temps de prise [BER 86 ; RAM 14];

• un effet nocif des cendres elles-mêmes, peut-être en raison de la présence d'éléments mineurs (par exemple Zn, P ...) perturbant l'hydratation du ciment [ARL 82].

Il reste encore beaucoup à faire pour expliquer les effets de la CVSS sur l'hydratation des ciments composites. Par exemple, il a été montré par des mesures de la chaleur d'hydratation, que les cendres volantes de charbon avaient un effet sur la quantité de chaleur libérée pendant le durcissement [BER 86 ; MAS 04 ; RAM 14]. Il est aussi probable que les petites particules jouent un rôle de germination des hydrates, ce qui contribue à augmenter l'hydratation globale des particules de ciment [COU 06].

### 3.2.2. Etat durci

La Figure 2 présente les résultats de résistance en compression des mortiers réalisés avec les ciments composés fabriqués en laboratoire. Ce mode de représentation ne permet pas de donner les écarts types obtenus cependant les observations faites en tiennent compte.

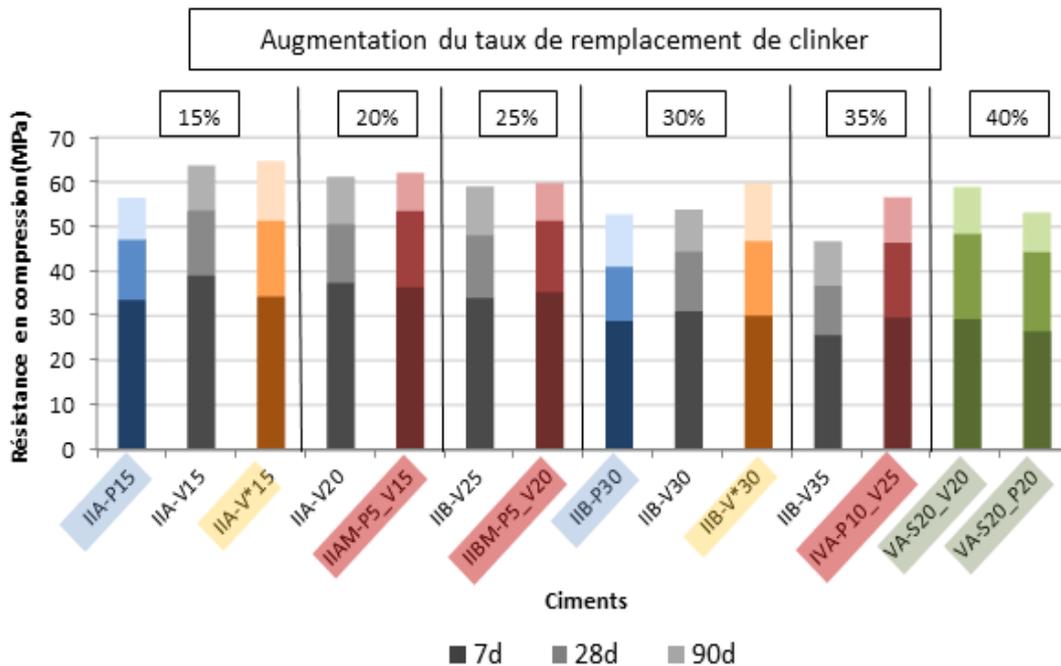


Figure 2 : Résistances en compression des ciments fabriqués après 7, 28 et 90 jours de cure humide

Au vu de ces résultats, les remarques suivantes peuvent être faites:

- Toutes les valeurs de résistance en compression (7, 28 et 90 jours) des mortiers avec CVSS (couleur grise) sont plus élevées que les mortiers avec pouzzolane (couleur bleue) lorsqu'on a une quantité équivalente de remplacement du clinker.

- Le remplacement de la pouzzolane par des CVSS est également meilleur dans les ciments ternaires (en vert).

- Une augmentation de la quantité de CVSS diminue significativement la résistance à la compression en dépassant un taux de remplacement de 30%.

- Le mélange de pouzzolane et de CVSS semble améliorer les valeurs de résistance en compression. En effet, pour 20%, 25% et 35% de remplacement du clinker, les ciments composés avec pouzzolane + CVSS (couleur rouge) présentent toujours une résistance en compression supérieure.

- Le traitement des CVSS a eu un effet positif sur la résistance en compression à long terme, l'évolution entre 28 jours et 90 jours est la meilleure pour les ciments composés avec la CVSS\*. Cependant, les particules imbrûlées

pour les ciments composés avec 15% de remplacement de clinker ne semble pas avoir d'effet à un jeune âge. Cela pourrait confirmer le fait que les petites particules jouent un rôle de germination des hydrates, ce qui contribue à augmenter l'hydratation globale des particules de ciment [COU 06].

- En observant la résistance des ciments avec une quantité de CVSS fixée à 20%, on peut noter que le remplacement de 20% de clinker par du laitier (II/A-S20-V20) ou 5% de clinker par la pouzzolane (II/P5-V20) conserve le même ordre de grandeur que le II/A-V20. Ainsi, l'utilisation du laitier semble être une bonne solution pour réduire la quantité de clinker tout en maintenant une bonne résistance mécanique.

- Le retard dans les temps de prise observés ne semble pas avoir d'effet significatif sur les résistances à des échéances plus tardives.

### 3.3. Exploitation numérique grâce aux réseaux de neurones artificiels (RNA)

Des résultats obtenus sur plusieurs autres formulations, en plus de celles présentées dans ce papier, ont permis de constituer une base de données suffisante pour être exploitée grâce à des réseaux de neurones artificiels (RNA). La constitution et le principe de calcul d'un RNA peuvent être trouvés dans la littérature [VIR 08, SBA 05]. Il est préconisé d'utiliser environ 40% de sa base de données pour la validation du RNA. La nôtre, constituée de 31 ciments s'est avérée suffisante pour les tests effectués : prédiction de résistances en compression (Rc) à 28 jours.

Afin d'homogénéiser des valeurs avec des ordres de grandeurs très différents et de prendre en compte l'effet de la finesse des constituants plutôt que l'effet de la finesse globale du ciment, les proportions de constituants des ciments ont été pondérées par leurs surfaces spécifiques Blaine respectives puis normalisées entre 0 et 1, ce qui a pour but d'optimiser l'approche. Le Tableau 6 donne les ciments utilisés pour constituer la base d'apprentissage et la base d'essais du RNA ainsi que les valeurs des paramètres retenus.

**Tableau 6 : Bases d'apprentissage et de validation du RNA avec les paramètres normés**

valeurs normées (intervalle 0-1)								
BASE D'APPRENTISSAGE (60%)								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Cible	Cible normalisée
<b>CEM I</b>	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	<b>52,5</b>	0,880
<b>P15</b>	0,723	0,433	0,000	0,000	1,000	0,341	<b>47,04</b>	0,612
<b>P30</b>	0,404	0,933	0,000	0,000	1,000	0,617	<b>41,04</b>	0,316
<b>V15</b>	0,723	0,000	0,371	0,000	1,000	0,422	<b>53,58</b>	0,933
<b>V30</b>	0,404	0,000	0,800	0,000	1,000	0,755	<b>44,44</b>	0,483
<b>V35</b>	0,298	0,000	0,943	0,000	1,000	0,887	<b>36,69</b>	0,102
<b>V*15</b>	0,723	0,000	0,371	0,000	1,000	0,690	<b>51,30</b>	0,821
<b>V*30</b>	0,404	0,000	0,800	0,000	1,000	0,821	<b>46,70</b>	0,595
<b>S20-V20</b>	0,191	0,000	0,543	1,000	1,000	0,504	<b>48,35</b>	0,676
<b>S20-P20</b>	0,191	0,633	0,000	1,000	1,000	0,312	<b>44,27</b>	0,475
<b>P5_V15</b>	0,617	0,133	0,400	0,000	1,000	0,763	<b>53,48</b>	0,928
<b>P10_V25</b>	0,298	0,300	0,686	0,000	1,000	1,000	<b>46,44</b>	0,582
<b>P10_V20_S20</b>	0,000	0,300	0,543	1,000	1,000	0,986	<b>42,00</b>	0,363
<b>P15</b>	0,766	0,500	0,000	0,000	0,571	0,379	<b>50,67</b>	0,790
<b>V15</b>	0,766	0,000	0,429	0,000	0,571	0,372	<b>50,56</b>	0,785
<b>V35</b>	0,340	0,000	1,000	0,000	0,000	0,822	<b>38,98</b>	0,215
<b>P15</b>	0,723	0,433	0,000	0,000	1,000	0,753	<b>54,38</b>	0,972
<b>V15</b>	0,723	0,000	0,371	0,000	1,000	0,734	<b>54,94</b>	1,000
<b>V35</b>	0,298	0,000	0,943	0,000	1,000	0,777	<b>34,61</b>	0,000
BASE DE VALIDATION (40%)								
<b>V20</b>	0,617	0,000	0,514	0,000	1,000	0,568	<b>51,77</b>	0,844
<b>V25</b>	0,511	0,000	0,657	0,000	1,000	0,649	<b>48,02</b>	0,660
<b>P5_V20</b>	0,511	0,133	0,543	0,000	1,000	0,912	<b>51,31</b>	0,822
<b>P10_V10_S20</b>	0,213	0,300	0,257	1,000	1,000	0,818	<b>50,31</b>	0,772
<b>V20</b>	0,660	0,000	0,571	0,000	0,429	0,521	<b>49,08</b>	0,712
<b>V25</b>	0,553	0,000	0,714	0,000	0,286	0,590	<b>47,46</b>	0,632
<b>V30</b>	0,447	0,000	0,857	0,000	0,143	0,711	<b>39,96</b>	0,263
<b>P30</b>	0,447	1,000	0,000	0,000	0,143	0,501	<b>40,02</b>	0,266
<b>V20</b>	0,617	0,000	0,514	0,000	1,000	0,731	<b>50,36</b>	0,775
<b>V25</b>	0,511	0,000	0,657	0,000	1,000	0,782	<b>49,47</b>	0,731
<b>V30</b>	0,404	0,000	0,800	0,000	1,000	0,813	<b>48,02</b>	0,660
<b>P30</b>	0,404	0,933	0,000	0,000	1,000	0,829	<b>44,83</b>	0,503
	clinker	pouzzo (P)	cendre (V)	Laitier (S)	GYPSE	<b>BLAINE (cm2/g)</b>		Rc 28 jours

Les résultats obtenus pour la prédiction de  $R_c$  à 28 jours sont présentés par la Figure 3 et Figure 4. Les paramètres d'entrée choisis (cf. Tableau 6) ont donc été les proportions de composants des ciments pondérés par leurs SSB respectives ainsi que la surface spécifique Blaine globale du ciment obtenu, soit 6 entrées (clinker, pouzzolane, cendres, laitier, gypse et SSB). On peut constater que les prédictions sont plutôt cohérentes avec des valeurs toutes comprises dans un fuseau de  $\pm 2$  MPa.

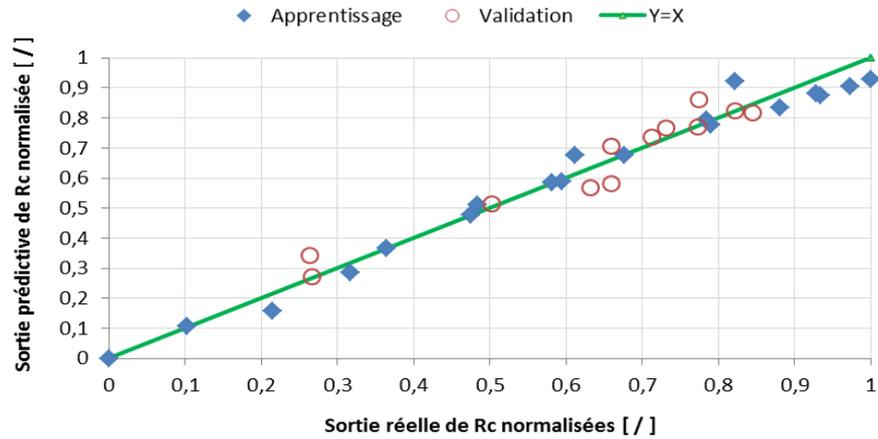


Figure 3 : Corrélation entre les données ciblées et les données obtenues de  $R_c$  à 28 jours

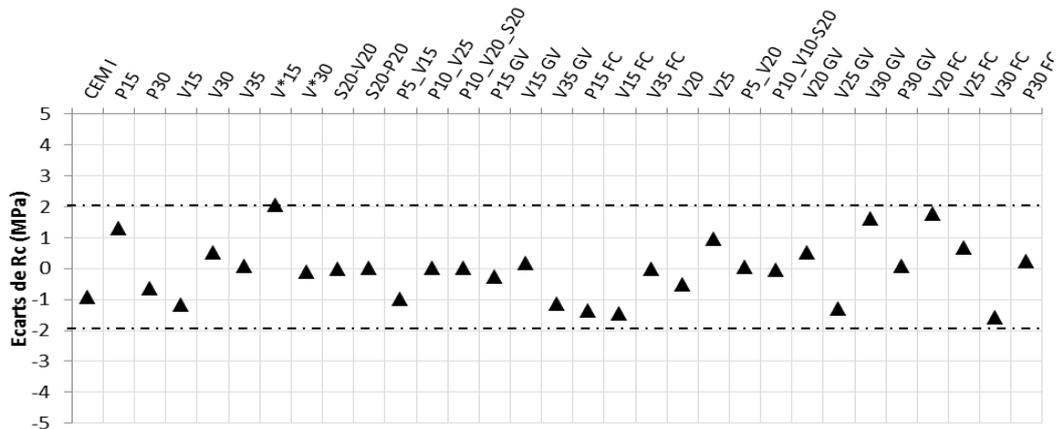


Figure 4 : Ecarts de  $R_c$  en MPa entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par le RNA

#### 4. Conclusion

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer la valorisation des CVSS dans la fabrication de ciment composite. Une étude antérieure montre que les CVSS ont des caractéristiques approchant les cendres volantes de charbon des chaudières à charbon pulvérisé [SOW 15].

L'étude a abouti aux conclusions suivantes:

- Plus le clinker est remplacé par le CVSS, plus les durées de prise sur les pâtes de ciment et les performances rhéologiques des mortiers sont principalement dégradées en raison de la forte demande en eau des particules non brûlées.
- Les performances mécaniques des ciments composites de laboratoire avec CVSS ont été supérieures à celles obtenues avec le pouzzolane habituellement trouvé à la Réunion.

- Le mélange pouzzolané et CVSS H a le meilleur effet retardateur de 20 jours de prise à 15 MPa (15 min)

• L'utilisation de scories en remplacement de 20% de clinker permet de maintenir des performances mécaniques presque équivalentes.

• La CVSS montre un meilleur effet pouzzolanique lorsque les particules non brûlées sont enlevées, mais elle conserve de bonnes performances lorsque la quantité de résidus de clinker reste inférieure à 30%

• Cette étude a permis une approche de calcul prédictif grâce à des réseaux de neurones artificiels (RNA). Bien que cette approche soit encore à approfondir, elle a permis d'obtenir des prédictions avec des écarts en absolu de +/- 2 MPa sur des résistances mécaniques à 28 jours de ciments fabriqués en laboratoire dont les compositions et les finesses de composants étaient connues.

La CVSS semble être un composant potentiel pour les cimenteries de la Réunion. Ainsi, afin de permettre une meilleure valorisation de ces cendres volantes dans la fabrication de ciments, des travaux futurs comprendront une évaluation de leur demande d'eau et de plastifiants. En outre, les effets des CVSS sur la durabilité des matrices cimentaires doivent être évalués, y compris une étude plus approfondie sur les interactions des CVSS avec la pouzzolane et le laitier dans les ciments composés.

## 5. Références

- [ARL 82] G ARLIGUIE, J P OLLIVIER, J GRANDET, Etude de l'effet retardateur du zinc sur l'hydratation de la pâte de ciment Portland, *Cement and Concrete Research*, 12, 79-86 (1982)
- [BER 86] E E BERRY, V M MALHOTRA, *Fly ash in concrete* (Energy, Mines and Resources Canada, 1986)
- [COU 06] M COUTAND, M CYR, P CLASTRES, Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars, *Construction Materials* 159, 153-162 (2006)
- [EN196-1, 2005] EN 196-1, Methods of testing cement. Determination of strength (2005)
- [EN196-2, 2005] EN 196-2, Methods of testing cement. Chemical analysis of cement (2005)
- [EN196-3, 2005] EN 196-3, Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness (2005)
- [EN196-6, 2010] EN 196-6, Methods of testing cement. Determination of fineness (2010)
- [EN197-1, 2011] EN 197-1, Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements (2011)
- [EN450-1, 2012] EN 450-1, Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria (2012)
- [HOT 16] HOT J., SOW M., TRIBOUT C., CYR M., An investigation of the leaching behavior of trace elements from Spreader Stoker Coal Fly Ashes-based systems, *Construction and Building Materials* 110 (2016) 218-226
- [MAS 04] F MASSAZZA, Pozzolana and pozzolanic cements, *LEA's Chemistry of Cement and Concrete* (4th Ed, Elsevier, 2004)
- [NF P15-437, 1987] NF P15-437, Liants hydrauliques - Technique des essais - Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des mortiers (1987)
- [RAM 14] RAMEZANIANPOUR A. A.: *Cement replacement material*. In: Springer Geochemistry/ Mineralogy (2014)
- [SBA 05] SBARTAÏ, Z.M., Caractérisation physique des bétons par radar approche neuromimétique de l'inversion, Doctoral thesis, Toulouse and Sherbrooke universities, 2005.
- [SOW 15] SOW M., HOT J., TRIBOUT C., CYR M., Characterization of Spreader Stoker Coal Fly Ashes (CVSS) for their use in cement-based applications ; *Fuel* 162 (2015) 224-233
- [VIR 08] VIRIYAMETANONT K., "Reconnaissance physique et géométrique d'éléments en béton armé par radar et réseaux de neurones artificiels", Doctoral thesis, Toulouse university, 2008