

Les cendres volantes sulfatées (désulfuration primaire)

Utilisation en technique routière

RÉSUMÉ

Les cendres volantes sulfatées sont représentatives des cendres de demain car obtenues à partir de la combustion de charbon par des chaudières équipées de systèmes de désulfuration primaire par injection de chaux éteinte dans le foyer. Ces produits se différencient des cendres habituellement produites par leur teneur en CaO et SO₃. Elles sont ainsi classées « hors normes » car ni silico-alumineuses, ni sulfo-calciques. Leur intérêt réside dans le fait qu'elles constituent, dès leur production, un véritable liant routier.

C'est à partir d'expérimentations de laboratoire sur éprouvettes de graves traitées que nous avons montré que les nouvelles cendres sulfatées ont un emploi tout indiqué dans le domaine des travaux routiers : en tant que liant pour assises de chaussées à faibles dosages (5 à 6 %) ou comme liant pour bétons compactés au rouleau pour des dosages plus élevés (10 à 15 %).

Ces premiers résultats satisfaisants pour un emploi routier ont été le point de départ d'une expérimentation sur planche d'essai. La collaboration entre différents organismes a donné lieu à la construction d'un parking dont la couche de fondation est constituée d'une grave traitée aux cendres silico-calciques de Loire/Rhône.

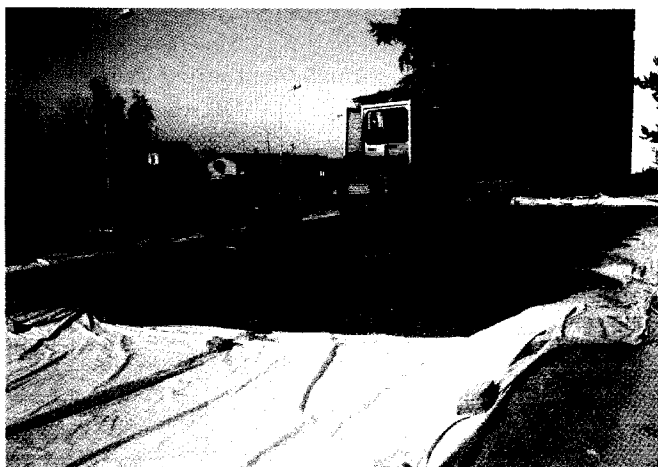
Les premières observations concernant ce chantier sont relatées dans cet article.

MOTS CLÉS : Cendres volantes - chaux - sulfates - liant routier - grave traitée - résistances à la compression - résistances à la traction directe - module - classification - planche d'essai.

Céline DELSOL
Ingénieur INSA-EDF/CNET
détachée au Laboratoire Matériaux
et durabilité des constructions
Toulouse

André CARLES-GIBERGUES
Professeur INSA
Laboratoire Matériaux et durabilité des constructions
Toulouse

Jean-Pierre BENABEN
Ingénieur ETP
Domaine Chaussées
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées
Toulouse



Compactage de la grave traitée aux cendres silico-calciques.

Dans un précédent article [1] nous avons montré que des cendres volantes produites par une centrale thermique d'Électricité de France équipée d'un système de désulfuration primaire possédaient des propriétés hydrauliques qui permettaient d'envisager leur emploi en technique routière. De fait, ces conclusions étaient basées sur les résultats des essais de caractérisation physico-chimique de ces matériaux et des mesures de réactivité vis-à-vis de la chaux suivant la procédure normalisée NF P 98-111.

Cet article vient étayer nos conclusions par les résultats des expérimentations menées sur éprouvettes de graves traitées. L'étude sur éprouvettes de graves a été effectuée pour sa majeure partie au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Toulouse.

Essais de laboratoire sur éprouvettes de graves traitées

Terminologie

Tout d'abord une précision terminologique : les cendres issues de la désulfuration primaire, et qui sont donc enrichies en sulfates, étaient, à ce titre, dénommées « cendres volantes sulfatées ». Désormais, il est recommandé de les appeler « cendres silico-calciques » pour les différencier des cendres de Gardanne, qualifiées de sulfo-calciques : c'est ainsi qu'elles sont dénommées dans le corps de cet article. Nous avons, par contre, gardé l'ancienne appellation de « cendres volantes sulfatées » dans le titre du présent article, qui apparaît ainsi clairement comme la suite du premier article [1].

Cadre de l'étude

La grave est constituée de matériaux alluvionnaires siliceux (Garonne) concassés et classés en quatre fractions : 0/2, 2/6, 6/10 et 10/14. Les caractéristiques intrinsèques de ces granulats sont regroupées dans le tableau I. Ces granulats correspondent à la catégorie B, par référence à la norme **NF P 18-101**.

Ce type de granulat est normalement utilisé pour les couches de roulement.

La chaux aérienne calcique éteinte répond à la norme **NF P 98-101**.

Les cendres volantes utilisées sont les cendres silico-calciques issues de la tranche 2 de la centrale de Loire/Rhône, prélevées le 22 novembre 1993 et le 21 avril 1994 sur site. Le premier lot de cendres a été produit pour une puissance de chaudière de 250 MW, alors que le second l'a été pour une puissance de 125 MW. Ces deux lots de cendres se différencient par leur composition chimique en termes de chaux et de sulfates. Le tableau II met en évidence ces différences, qui sont attribuables aux variations de puissance de la chaudière, mais aussi à des modifications apportées aux niveaux d'injection entre les deux périodes d'essais.

Seule la cendre 250 MW avait fait l'objet de l'étude décrite dans la publication précédente [1]. Les cendres silico-calciques prélevées le 22 novembre 93 et le 21 avril 94 seront respectivement notées CV 250 et CV 125.

Composition des graves traitées

Malgré des caractéristiques mécaniques, mesurées sur éprouvettes de sable, supérieures aux exigences définies par la norme **NF P 98-111**, les

cendres volantes silico-calciques de Loire/Rhône ne sont pas conformes aux normes actuelles définissant les cendres volantes silico-alumineuses (**NF P 98-110**) et les cendres volantes hydrauliques (**NF P 98-112**) en termes de caractéristiques physico-chimiques. Parmi ces exigences physico-chimiques non respectées, nous pouvons citer la teneur en sulfates (**NF P 98-110** et **NF P 98-112**), la masse volumique réelle (**NF P 98-112**) ainsi que la teneur en CaO total (**NF P 98-112**) pour les éléments les plus significatifs.

Ces cendres sont inclassables et donc « hors normes », bien que, par leur composition chimique, elles puissent constituer un liant routier à part entière. Prenant en considération le fait que ces cendres se situent à mi-chemin entre les cendres silico-alumineuses et les cendres hydrauliques, nous avons confectionné différents mélanges permettant de couvrir la plage définie par les deux extrêmes que sont les graves/cendres-volantes/chaux et graves/cendres hydrauliques.

Les pourcentages des diverses fractions de la grave ont dû être calculés pour que les différentes courbes granulaires entrent dans le fuseau imposé par la norme **NF P 98-119** (graves/cendres-volantes/chaux) pour les teneurs en liant de 10 et 15 % ainsi que dans le fuseau défini par la norme **NF P 98-120** (graves/cendres volantes hydrauliques) pour les teneurs en liant de 5 et 6 %.

Dans tous les cas, nous avons confectionné des graves traitées à squelettes granulaires identiques, ce qui entraîne des pourcentages de fines différents. Le détail des pourcentages pondéraux de chaque constituant est reporté dans le tableau III.

Essai Proctor

L'essai Proctor modifié (**NF P 98-231-1**) a été pratiqué en tenant compte de la présence de chaux vive dans la cendre silico-calcique : nous avons respecté la phase d'extinction fixée à 30 minutes. Le tableau IV rend compte des pertes d'eau dues, pour une grande part, à l'extinction de la chaux vive et, pour une part plus faible, au malaxage. C'est la différence que l'on peut observer entre les valeurs des teneurs en eau de malaxage et celles à l'optimum Proctor modifié (OPM).

Par ailleurs, nous avons considéré que l'ajout de chaux à la grave traitée à 5 % de cendres silico-calciques ne modifiait pas la courbe Proctor. Nous avons donc pris en compte celle de la grave traitée à 5 % de cendres silico-calciques.

Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées selon la procédure normalisée **NF P 98-230-1**, qui implique l'utilisation d'équipements adaptés à la vibro-compression d'éprouvettes de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur pour les essais de compression et de section centrale réduite pour les essais de traction directe ; le matériel de vibro-compression dénommé VCPC (Vibro-compression à paramètres contrôlés) a été utilisé pour cette étude. Nous avons tenu compte de l'extinction de la chaux vive : pour cela, nous avons, après chaque moulage, ensaché la grave traitée. Durant cette phase d'extinction, nous avons relevé des températures de l'ordre de 30 à 35 °C (température ambiante de 20 °C) dans le cas de la grave traitée à 15 % de cendres silico-calciques.

Pour la confection, nous avons pris les caractéristiques à l'OPM : densité sèche et teneur en eau. Or, la norme **NF P 98-230-1** définissant la procédure de fabrication des éprouvettes limite le temps de fermeture à 45 secondes. Ce dernier correspond au temps nécessaire au moulage d'une éprouvette, qui est atteint lorsque le niveau bas du piston entre en contact avec le niveau haut de l'éprouvette. Si les 45 s sont dépassées, la teneur en eau est imposée pour que le temps de fermeture soit respecté. Les valeurs de teneur en eau effectivement introduites pour les diverses compositions sont regroupées dans le tableau V.

Lorsque les valeurs de teneur en eau doivent être ajustées afin de respecter les temps de fermeture : les écarts entre les teneurs en eau de compactage et celles à l'OPM doivent respecter les fourchettes de valeurs définies par la norme **NF P 98-114-1** et précisées dans le tableau VI.

Nous constatons que, dans tous les cas, les écarts sont respectés. Les temps de fermeture obtenus varient de 15 à 45 s, toutes compositions confondues. Ils sont plus élevés que ceux obtenus pour les compositions étudiées par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Toulouse (généralement de l'ordre de 15 secondes). Ceci signifie donc que la mise en place de la grave traitée est plus longue à réaliser lorsque des cendres silico-calciques sont employées.

Une fois moulées, les éprouvettes sont conservées dans des salles de stockage régulées à 20 °C ± 1 °C et à au moins 90 % d'humidité relative pour les échéances supérieures à 90 jours. Pour les autres échéances, il n'y a pas de consigne sur l'hygrométrie et seule la température est régulée à 20 °C ± 1 °C.

TABLEAU I
Caractéristiques intrinsèques
des granulats constitutifs de la grave

MicroDeval en présence d'eau (M_{DE})	10
Los Angeles (L_A)	18
Coefficient de polissage accéléré (C_{PA})	0,55

TABLEAU II
Caractéristiques chimiques des cendres volantes étudiées

	CaO libre (%)	SO ₃ (%)
CV 250 MW (22/11/93)	20,7	3,4
CV 125 MW (21/04/94)	13,5	5,2

TABLEAU III
Pourcentages pondéraux de chaque constituant
des graves traitées

Grave				Cendres CV 250 et CV 125	Chaux
Fraction 10/14	Fraction 6/10	Fraction 2/6	Fraction 0/2		
23,8	19,0	19,0	33,2	5	0
23,5	18,8	18,8	32,9	5	1
12,0	12,0	34,0	32,0	10	0
13,6	13,6	32,3	25,5	15	0

TABLEAU IV
Caractéristiques des graves traitées
à l'optimum Proctor modifié

Teneurs en liant	5 % CV 250	10 % CV 250	15 % CV 250	5 % CV 250 / 1 % Ca(OH) ₂	5 % CV 125
Densité sèche	2,25	2,17	2,11	2,25	2,25
w_{OPM} (%)	5,7	6,0	6,5	5,7	5,7
$w_{introduit}$ (%)	6,5	6,9	8,0	6,5	6,5

TABLEAU V
Caractéristiques de confection des graves traitées

Teneurs en liant	5 % CV 250	10 % CV 250	15 % CV 250	5 % CV 250 / 1 % Ca(OH) ₂	5 % CV 125
Densité sèche	2,25	2,17	2,11	2,25	2,25
w_{OPM} (%)	5,5	6,0	7,5	5,3	5,0
$w_{introduit}$ en réalité (%)	6,2	6,9	8,9	6,0	5,5

TABLEAU VI
Limites normatives vis-à-vis des modifications
de teneurs en eau pour le moulage

Type de graves traitées	Fourchettes de teneur en eau
grave / cendres volantes hydrauliques	$w_{OPM-1,5}$ à w_{OPM}
grave / cendres volantes silico-alumineuses / chaux	w_{OPM-1} à w_{OPM+1}

Caractéristiques mécaniques

Des essais de compression simple et de traction directe ont été réalisés sur les différentes compositions de graves traitées [2]. Les éprouvettes confectionnées pour les essais en traction directe ont une section centrale réduite afin de provoquer la rupture dans cette zone. Ces essais nécessitent un nombre important d'éprouvettes, qui diffère selon l'échéance. Les échéances de 7 et 28 jours pour les essais de compression nécessitent trois éprouvettes chacune ; pour la traction directe, les échéances à 28, 60, 90 et 180 jours nécessitent trois éprouvettes chacune, et l'échéance de 360 jours en demande cinq.

Essais de compression

Celle-ci a été déterminée par écrasement selon la norme **NF P 98-232-1**.

On remarque sur la figure 1 une augmentation des résistances mécaniques avec le pourcentage de liant. Nous notons les excellentes valeurs obtenues par la grave traitée à 5 % de cendres CV 125 par rapport à son homologue traitée à 5 % de cendres CV 250 additionnée ou non de chaux. L'apport de chaux améliore faiblement les résistances mécaniques obtenues.

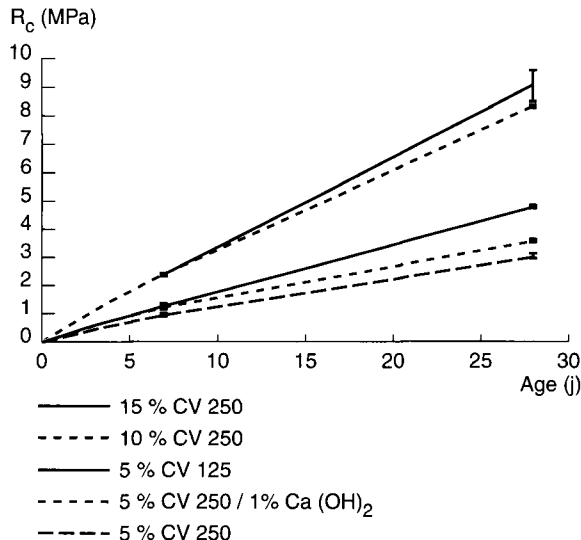


Fig. 1 - Évolution des résistances mécaniques à la compression des graves traitées en fonction du temps.

Essais de traction directe

L'essai de traction directe nécessite la préparation préalable des éprouvettes par collage de casques sur les extrémités de l'éprouvette. Lorsque la détermination de la résistance doit être réalisée à des âges élevés, il est alors indispensable d'effectuer un renforcement des parties inférieures et supérieures de manière à obtenir la rupture dans la section réduite centrale ; ce renforcement est réalisé en appliquant une résine durcissant à froid sur les bords haut et bas de l'éprouvette.

Le LRPC de Toulouse dispose d'un banc de traction directe raccordé à une chaîne de mesure qui permet le suivi de la résistance en traction en fonction de l'allongement ; le module d'élasticité sécant est déterminé à 30 % de la charge de rupture.

Avant toute chose, nous voulons formuler quelques remarques à l'égard de cet essai. La valeur obtenue pour l'essai réalisé sur une éprouvette n'est valable que dans le cas où la rupture se produit dans la zone de section réduite (limitée par les étriers supports des capteurs de déformation) ; cependant, il arrive que certaines éprouvettes présentent des défauts de remplissage, notamment au niveau du changement de section. Ce phénomène est dû à la vibration lors du malaxage de l'éprouvette : en effet, le vibreur étant placé à l'arrière du corps de l'éprouvette, il y a ségrégation et ceci se traduit par la présence de zones pauvres en liant (phénomène d'autant plus marqué que la teneur en liant est faible) qui seront, de ce fait, moins résistantes.

La rupture peut, dans ce cas, se produire au-dessus ou au-dessous des étriers. Deux solutions sont alors envisageables :

- l'essai est rejeté et il faut alors se satisfaire des deux autres résultats ;
- l'éprouvette est récupérée, sa partie centrale est sciée de manière à réaliser un essai de compression diamétrale ou fendage selon la norme **NF P 18-408**. La résistance à la traction en est déduite en prenant 80 % de la résistance à la compression diamétrale (**NF P 98-114-1**) (solution adoptée lorsque le cas se présentait).

Résistance à la traction directe

Cet essai a été réalisé selon la norme **NF P 98-232-2**.

Nous notons sur la figure 2 la même hiérarchie entre les compositions que celle qui a été observée pour les résistances à la compression : quelle que soit l'échéance considérée, les résistances augmentent avec la teneur en liant.

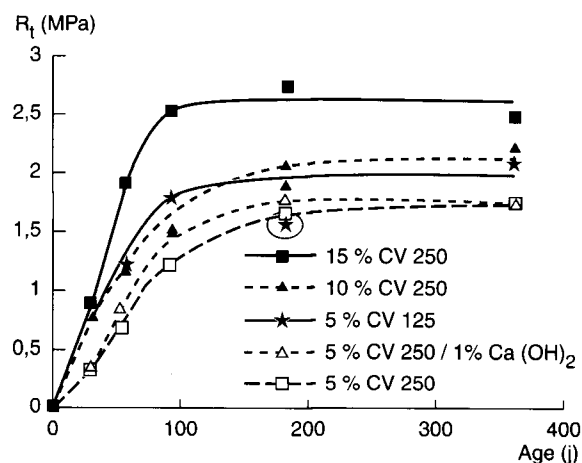


Fig. 2 - Évolution des résistances à la traction directe des graves traitées en fonction du temps.

Les courbes des résistances suivent une évolution pratiquement linéaire en fonction du temps jusqu'à 90 jours ; au-delà, les résistances ne croissent plus que très faiblement.

La valeur obtenue pour l'échéance de 90 jours dans le cas de la grave traitée à 15 % de cendres silico-calciques CV 250 est comparable, voire supérieure, à celles obtenues sur des mélanges grave/cendres volantes/ciment dans le cas d'une étude de formulation de bétons compactés au rouleau [3].

La grave traitée à 5 % de cendres CV 125 domine très largement celle qui est traitée par 5 % de cendres CV 250, ce qui attire l'attention sur le fait qu'on ne peut pas négliger l'influence de la variabilité des cendres sur leur pouvoir liant.

Module d'élasticité

Le module d'élasticité à la traction directe a été déterminé à 30 % de la charge de rupture.

La figure 3 montre que les valeurs atteintes à 180 jours sont pratiquement les mêmes, quelle que soit la composition, et demeurent stables à un an.

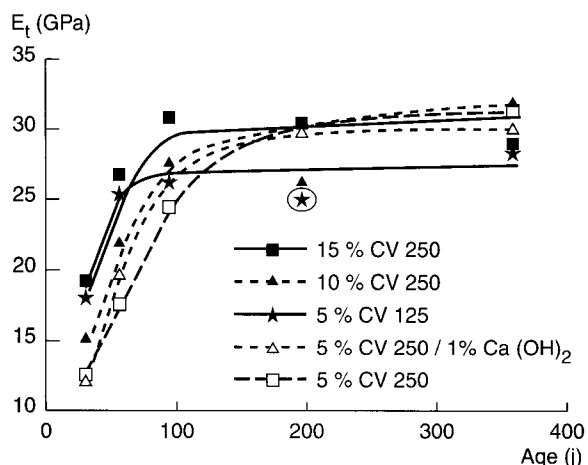


Fig. 3 - Évolution des modules d'élasticité à la traction des graves traitées en fonction du temps.

Avant 180 jours, ces modules progressent d'autant plus vite que la teneur en liant augmente. La grave traitée à 5 % de cendres CV 125 obtient des modules largement supérieurs à ceux obtenus par la grave traitée à 5 % de cendres CV 250 jusqu'à 90 jours. Au-delà de cette échéance, il semble y avoir stabilisation des valeurs qui plafonnent alors à un niveau inférieur à celui des graves traitées aux cendres CV 250.

De manière générale, la grave traitée à 5 % de cendres CV 125 permet d'acquérir de meilleurs résultats que celle traitée à 5 % de cendres CV 250.

Classification des graves traitées

Les normes NF P 98-119 et NF P 98-120, relatives respectivement aux graves/cendres volantes/chaux et graves/cendres hydrauliques, présentent un

abaque de classement des graves traitées. Ces abaques ont deux entrées : la résistance à la traction directe à 360 jours et le module d'élasticité à la traction à 360 jours. La position du point issu du couple (R_t, E) détermine la classe d'appartenance de la grave.

La norme NF P 98-128 relative aux Bétons compactés routiers (BCR) et Graves hydrauliques propose le même type d'abaque, mais ce dernier comporte une classe supplémentaire. L'abaque de la figure 4 est la synthèse de ces différents abaques.

Afin d'étayer notre propos, nous avons complété les présents résultats par ceux obtenus sur des graves traitées étudiées par le LRPC de Toulouse. Les liants utilisés sont de trois types :
 > cendres volantes silico-alumineuses d'Albi additionnées de chaux ;
 > cendres volantes hydrauliques de Gardanne ;
 > ciment CPA-CEM II/B(L) 32,5.

Les compositions des graves traitées par ces différents liants sont présentées dans le tableau VII.

TABLEAU VII
Composition des graves traitées étudiées par le LRPC de Toulouse

Grave (%)	Cendres ou ciment (%)	Chaux éteinte (%)
85,0	12 % Albi	3
96,5	3,5 % Gardanne	0
96,2	3,8 % CPA-CEM II / B(L) 32,5	0

On observe sur la figure 4 que toutes les graves traitées étudiées appartiennent à la classe G4, à l'exception de la grave à 15 % de cendres silico-calciques CV 250 qui se place dans la classe G5.

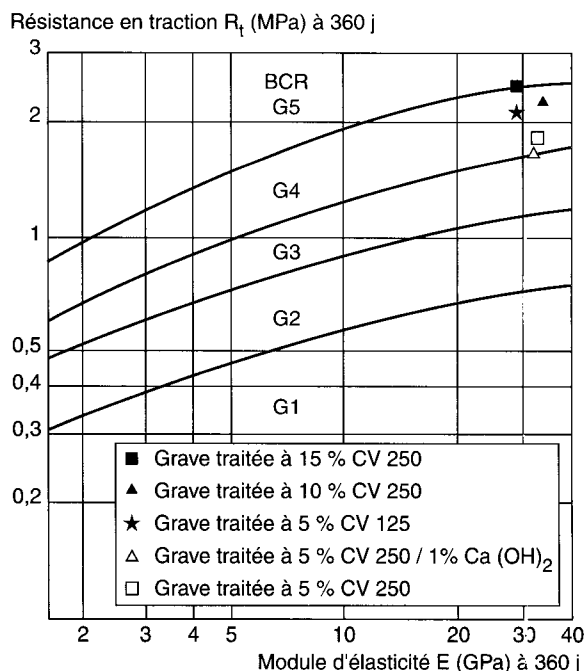


Fig. 4 - Classement des graves traitées.

Les teneurs en cendres silico-calciques n'auront plus qu'à être ajustées selon l'utilisation envisagée : ceci ne fait qu'élargir le domaine des possibilités de valorisation de ces cendres.

Par référence aux résultats mécaniques acquis lors des différents essais, nous pouvons d'ores et déjà constater que le traitement d'une grave avec seulement 5 % de cendres silico-calciques CV 125 ou CV 250 permet :

- de réaliser un gain de liant pour l'utilisateur par rapport à l'emploi d'une cendre silico-alumineuse additionnée de chaux ;
- de confectionner les graves avec les techniques classiques de dosage puisque la teneur en pulvérulents ne dépasse pas 5 à 6 %.

Conclusion

Cette étude apporte des éléments sur l'aptitude des cendres volantes produites par la centrale de Loire/Rhône équipée d'un système de désulfuration primaire à constituer un liant utilisable en

technique routière dès lors qu'elles ont été stockées à l'abri des intempéries. Ces cendres silico-calciques ne sont pas conformes aux normes françaises définissant actuellement les cendres volantes silico-alumineuses ou les cendres volantes hydrauliques utilisées comme liants en assises de chaussées : il convient donc de les considérer comme liant spécial.

Ceci étant, pour le niveau de performances qu'elles permettent, il peut être envisagé de les employer :

- soit à faible dosage (5 à 6 %) en tant que liant pour assises de chaussées,
- soit à dosages plus élevés (10 à 15 %) comme liant pour bétons compactés au rouleau.

L'observation des éprouvettes [4] largement surdosées (à 10 ou 15 %) n'a pas révélé de gonflement parasite : on peut donc en déduire qu'un surdosage accidentel de ces cendres silico-calciques ne provoquera pas les désordres observés à l'occasion, dans de telles circonstances, avec des cendres hydrauliques sulfo-calciques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CARLES-GIBERGUES A., DELSOL C. (1994), Les cendres volantes sulfatées (désulfuration primaire) : cendres volantes ou liant routier ?, *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, **193**, septembre-octobre, pp. 13-20.
- [2] DELSOL C., CARLES-GIBERGUES A., BENABEN J.-P. (1995), *Primary desulphurization fly ashes as a binder in aggregate base courses (and extensively in Roller Compacted Concretes)*, 2nd Int. Symposium on Advances in Concrete Technology, CANMET/ACI, Las Vegas, June, pp. 273-293.
- [3] PAPAYIANNI J. (1992), *Performance of a high-calcium fly ash in roller-compacted concrete*, 4th Int. Conf. fly ash, silica fume, slag, natural pozzolan in concrete, Istanbul, ACI SP-132, vol. 1, pp. 367-386.
- [4] DELSOL C. (1995), *Perspectives d'emploi en génie civil des cendres volantes de centrales thermiques équipées de systèmes de désulfuration primaire*, thèse de Doctorat, INSA Toulouse.

Remerciements

Nous tenons à remercier les personnes qui nous ont permis de progresser dans cette étude. Tout d'abord, M. Pellissier (EDF/CNET) qui est le principal animateur de cette recherche ainsi que MM. Benaben et Forchino du LRPC de Toulouse pour leur participation active à nos travaux.

ABSTRACT

The use of sulphatic fly-ash (primary desulphurization) in highway engineering

C. DELSOL - A. CARLES-GIBERGUES - J.-P. BENABEN

Sulphatic fly ash is typical of the fly ash produced when coal is burnt in furnaces fitted with primary desulphurization systems where slaked lime is introduced into the furnace. The CaO and SO₃ contents of this type of fly ash differ from those of usual fly ash. They are thus classified as "off spec" products, as they are neither silico-aluminous nor thio-calcic. They are of interest because immediately after production they are genuine road binders.

Laboratory experiments using samples of bound granular material have demonstrated that the new sulphatic fly ash is highly suitable for highway use, both in low proportions (5 - 6%) in pavement foundations and in higher proportions (10 - 15 %) as a binder in roller compacted concrete.

As these first results were satisfactory as regards a possible use in highways, trials were then conducted on a test structure. A number of organizations collaborated in constructing a car-park with a foundation made from granular material bound with Loire/Rhône silico-calcic fly ash.

This paper presents the first observations from this site.