

Les matériaux autocompactants essorables de structure (MACES)

Étude de faisabilité d'une nouvelle gamme de matériaux hydrauliques pour les assises de chaussées

Olivier HERR
Martin VACHON
CTG Italcementi, Guerville

Thierry SEDRAN
Ingénieur des Travaux publics de l'État
Section Élaboration des matériaux
Division Technologies du Génie Civil et Environnement

François DE LARRARD
Chef de la division Technologies du Génie Civil et Environnement

Jean-Maurice BALAY
Chef de la section Manège de fatigue des structures routières
Division Matériaux et structures de chaussées

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Note

technique

Introduction

La technologie des matériaux hydrauliques a accompli au cours de ces vingt dernières années des progrès importants, qui ont abouti à de nouvelles générations de produits : bétons à hautes performances, bétons autoplâcents, etc. Toutefois, les matériaux employés en construction routière ont peu bénéficié de ces développements. C'est pourquoi, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a lancé en collaboration avec différents partenaires publics et privés le thème de recherche « Matériaux hydrauliques pour la route » (MHyR) pour la période 1999-2002. Le but de ce thème est de donner un regain de compétitivité aux produits cimentaires dans la route, notamment par l'exploration de nouveaux matériaux.

Nous présentons ici les premiers résultats d'un des axes de ce thème de recherche visant à la mise au point de matériaux autocompactants essorables de structure (ou MACES), destinés à la réalisation d'assises de chaussées. L'étude montre la faisabilité technico-économique des MACES qui est, pour un tel matériau nouveau, le préliminaire au lancement d'études plus complètes (méthode de formulation, comportement à la fatigue, etc.). Avec une résistance au fendage comprise entre 1 et 2 MPa, ces matériaux devraient avoir un comportement mécanique proche de celui des graves traitées aux liants hydrauliques qu'ils ont vocation à remplacer. Ils s'en différencient par contre par leur

comportement à l'état frais. Les MACES sont très fluides à la mise en œuvre (autoplâcents), ne nécessitent pas de compactage mécanique (autocompactants) et peuvent supporter un trafic de chantier dans un délai très court (quelques heures).

Ils sont à la croisée de deux familles de produits de dernière génération : les bétons autoplâcents (BAP) et les produits fluides de remblayage de tranchées (PFR) de type « essorables ». Les bétons autoplâcents [1, 2] se mettent en œuvre par la seule gravité (sans vibration ni serrage) et atteignent à l'état durci les propriétés de bétons de structure (résistance à la compression comprise entre 20 et 100 MPa). Les PFR essorables [3] sont destinés aux travaux urbains, et ont une résistance à la compression très faible (0,5 à 2 MPa) afin qu'ils demeurent réexcavables avec des moyens mécaniques limités. Ils contiennent un faible dosage en liant et un dosage important en eau. Ils sont homogènes lors du malaxage mais une fois mis en œuvre, l'excès d'eau libre est drainé rapidement à travers le squelette granulaire, transformant le matériau en quelques minutes en un empilement compact et portant.

Première formulation et propriétés en laboratoire

Les premiers essais de formulation menés en laboratoire en 1999 ont permis de valider la faisabilité d'un MACES dont la résistance au fendage

R_{tb} avoisinait celle d'une grave-ciment (R_{tb} comprise entre 1 et 2 MPa à 360 jours). Par ailleurs, il a été établi qu'au dosage requis en ciment, le matériau était essorable et autocompactant.

La formulation de cette composition de MACES de référence était fondée sur les principes suivants.

Le squelette granulaire joue un rôle essentiel dans les propriétés mécaniques des matériaux essorables. L'acquisition de portance est accélérée lorsque le squelette granulaire favorise un drainage rapide de l'eau volontairement introduite en excès. Les travaux effectués au CTG Italcementi en 1996 [4] avaient permis d'optimiser la composition d'un mélange de sable 0/5 alluvionnaire de Seine et d'un gravillon 5/20 alluvionnaire silico-calcaire semi-concassé pour une formule de PFR. Nous avions alors établi des proportions granulaires optimales en ce qui concerne la portance, distinctes des proportions conduisant à la compacité maximale. Le rapport optimal entre la masse de gravillons et celle du sable était de 1,24. Cette composition granulaire a été adoptée pour la formule de référence de MACES.

Le dosage en eau efficace a été fixé à 200 l/m³ (soit environ 230 l/m³ d'eau totale) sur la base des formules de produits fluides de remblayage de tranchées essorables.

Le ciment rapide CPA-CEM I 52,5 R de l'usine de Couvrot des Ciments Calcia a été choisi afin d'obtenir un court délai de restitution à un trafic de type chantier et d'offrir une résistance élevée à court terme. Les résistances mécaniques visées ont été obtenues pour un dosage de 140 kg/m³.

La composition de MACES de référence finalement retenue (appelée MACES 140) est présentée dans le tableau I.

Le tableau II présente les performances mesurées du MACES 140.

Afin de simuler le drainage par le sol support, les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes moulées dans des cylindres en carton de Ø 16 × 32 cm, dont le fond était forfaitairement percé de 33 trous de 3 mm de diamètre uniformément répartis (fig. 1). De plus, pour être représentatives de la mise en œuvre sur chantier, les éprouvettes de MACES ne doivent pas être confectionnées par piquage ni par vibration. C'est pourquoi le protocole de fabrication suivant a été

TABLEAU I
Formule du MACES 140

Constituants secs	Dosage (en kg/m ³)
Sable 0/5 alluvionnaire	816
Gravillon 5/20 semi-concassé	1 015
CPA-CEM I 52,5 R	140
Eau efficace	200
Eau totale	230

TABLEAU II
Caractéristiques du MACES 140

Affaissement initial au cône d'Abra	21 cm
Pourcentage d'eau efficace drainée lors de l'essorage	16 %
Résistance à la traction par fendage R_{tb} à 28 jours	1,34 MPa
Résistance à la compression R_c à 28 jours	7,4 MPa
Module d'élasticité à 28 jours	21,7 GPa



Fig. 1 - Fond de moule carton Ø 16 x 32 cm percé en fond.

mis au point, permettant une mise en œuvre répétable et indépendante de l'opérateur :

- Un cône muni d'une trappe inférieure est installé de telle sorte que sa base soit à 20 cm au-dessus du sommet de l'éprouvette cylindrique (fig. 2). Il est possible d'utiliser par exemple un des cônes de l'appareil de Glanville (ou compacting factor apparatus) [5].
- Environ 7 litres de MACES sont prélevés du malaxeur et introduits dans le cône.
- La trappe est ouverte et le cylindre ainsi rempli est rapidement et délicatement arasé.

Dans les premières heures suivant leur mise en place, les MACES ont un

comportement mécanique intermédiaire entre celui d'un sol et d'un matériau lié. Leur portance à court terme, notée ici CBR*, a été évaluée par la mesure de l'Indice de portance immédiat IPI [6], mais en remplissant le moule CBR par simple déversement du produit et en effectuant le poinçonnement sur la partie supérieure de l'échantillon convenablement arasé. L'évolution dans le temps de l'indice CBR* du MACES 140 laisse envisager un délai de restitution à un trafic de chantier d'environ six heures (fig. 3). Toutefois, à cette échéance la prise du matériau a probablement démarré et le risque de fissuration en fond de couche devra être estimé à partir de mesures de résistance à la traction.

Aspects structurels et économiques

Après avoir démontré la faisabilité technique des MACES, il était important de vérifier la viabilité économique du matériau intégré dans une structure routière. Pour cela, une étude a été menée afin de comparer le coût global (incorporant le coût matériau ainsi que le coût de fabrication et de mise en œuvre) du MACES 140 par rapport à celui d'une grave-ciment de propriétés mécaniques voisines.

L'obtention de coûts unitaires fiables est difficile pour des calculs économiques à caractère général. Ces prix dépendent de la taille des chantiers ainsi que des pratiques locales, qui sont très variables d'une région à l'autre. Des informations ont été prises auprès des laboratoires régionaux de Saint-Brieuc et de Toulouse, de la division Sécurité et techniques routières du CETE de l'Ouest et de l'entreprise Eurovia [7, 8, 9, 10]. Les tableaux III et IV présentent les prix unitaires des matériaux utilisés et le bilan des fourchettes basses et hautes des réponses obtenues pour les différents postes. Les coûts de transport et de traitement (dispositif anti-fissuration, cure, contrôle, etc.) n'ont pas été pris en compte dans ces premiers calculs, car ils sont extrêmement dépendants des chantiers et ne devraient pas conduire à de forts écarts entre graves traitées et MACES. Le coût de fabrication des MACES a été pris égal à celui des graves dans la mesure où le matériel devrait être le même pour les deux techniques. En revanche, l'hypothèse a été faite que le coût de mise en œuvre des MACES était deux fois moins important que celui des graves traitées. Il est difficile de vraiment justifier ce chiffre dans l'état actuel du développement des MACES. Il est toutefois certain qu'une forte diminution du coût de mise en œuvre peut être attendue puisque les MACES se compactent sous le seul effet de la gravité, supprimant ainsi le coût de l'atelier de compactage. De plus, les MACES étant autocompactants, on peut *a priori* les mettre en œuvre en une seule couche épaisse, à l'inverse des couches de graves mises en œuvre par couches successives d'épaisseur maximale 0,32 m, limitée par le compactage mécanique. La mise en œuvre du produit pourrait se faire à l'aide de matériel déjà existant (finisseur).

L'étude a été poursuivie en procédant au dimensionnement théorique d'une structure de chaussée utilisant le MACES 140 en couche d'assise, pour



Fig. 2 - Adaptation de l'appareil de Glanville pour la fabrication d'éprouvettes $\varnothing 16 \times 32$ cm.

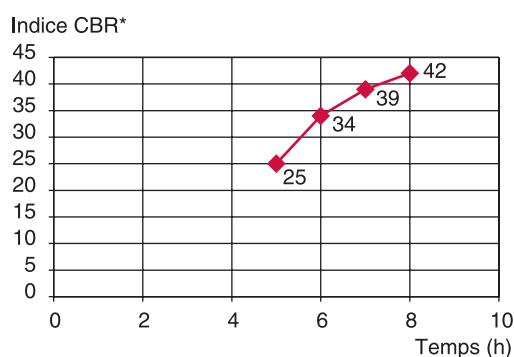


Fig. 3 - Évolution de l'indice CBR* du MACES 140 dans les premières heures.

trois conditions de sol-support et de trafic très différentes. Ces calculs supposent que le MACES est mis en place en une seule couche (fig. 4). Ils ont été réalisés suivant la démarche de dimensionnement rationnelle LCPC-SETRA [11] avec le logiciel Alizé, sur la base des performances

mécaniques mesurées du matériau. Les solutions obtenues ont ensuite été comparées d'un point de vue économique à la structure semi-rigide GC3/GC3 (couche de base et de fondation en grave-ciment de classe 3) du Catalogue des structures types de chaussées neuves [12].

Le module élastique caractéristique à 360 jours du MACES 140 est estimé à 22 GPa. La résistance moyenne au fendage R_{tb28} mesurée à 28 jours est égale à 1,34 MPa. Comme un ciment rapide a été utilisé, le gain potentiel à 360 jours est estimé à 0,2 MPa. En supposant un coefficient de variation de 15 % à 360 jours, on obtient une résistance caractéristique au fendage à 360 jours de 1,08 MPa. Par analogie avec les graves-ciment, on déduit une résistance à la traction directe R_{t360} caractéristique à 360 jours égale à 0,86 MPa, et la contrainte de rupture pour 1 million de cycles σ_0 est estimée à 0,80 MPa. Enfin, on suppose que la pente de la droite de fatigue des MACES est identique à celle des graves-ciment.

L'hypothèse a été faite qu'il n'y avait aucun collage entre le MACES et la plate-forme support de chaussée. Exceptées les valeurs $E = 22$ GPa (au lieu de 24 GPa pour la grave-ciment GC3) et $\sigma_0 = 0,80$ MPa (au lieu de 0,75 MPa pour la grave GC3), les mêmes valeurs numériques ont été adoptées pour les paramètres de dimensionnement des MACES 140 que celles adoptées dans [12] pour la GC3.

Cas ① : voie du réseau structurant (VRS), classe de portance de plate-forme PF2, classe de trafic TC5

Ce cas correspond à la structure de prédilection pour les graves-ciment dans la zone du CETE de l'Ouest [7]. Le calcul Alizé conduit à une couche de 36 cm de MACES, à comparer à la solution classique : deux couches de 20 cm de GC3.

Cas ② : voie du réseau structurant (VRS), classe de portance de plate-forme PF3, classe de trafic TC6

Ce cas correspond à un trafic très important. Le calcul Alizé conduit à une couche de 32 cm de MACES, contre deux couches de 19 cm d'épaisseur pour la grave-ciment GC3.

Cas ③ : voie du réseau non structurant (VNRS), classe de portance de plate-forme PF3, classe de trafic TC3

Ce cas correspond à un trafic relativement faible. Le calcul Alizé conduit à une couche de 27 cm de MACES, à comparer à une couche de 27 cm de GC3.

Le tableau V présente une comparaison des structures précédentes, et montre l'intérêt économique de l'utilisation du MACES 140 pour des trafics lourds, et

donc pour des structures épaisses. Dans ce cas, l'intérêt provient du fait que l'on remplace deux couches de grave-ciment GC3, avec une adhérence

limitée entre elles (hypothèse de semi-collage pour le dimensionnement), par une seule couche de MACES. Le comportement monolithique du

MACES permet alors de diminuer l'épaisseur de la structure, compensant ainsi le surcoût du mètre cube de matériau.

TABLEAU III
Prix unitaires des matériaux considérés pour la grave-ciment et le MACES 140

	Prix à la tonne FF (€)	Composition (kg/m ³)	
		Grave-ciment	MACES
Granulat	50 (7,6)	2 171	1 831
CPA	600 (91,5)		140
CPJ	500 (76,2)		
Liant routier	380 (57,9)	92	
Eau efficace	20 (3,0)	120	200
Densité		2,38	2,17
Coût matériau FF/m ³ (€/m ³)		146 (22,2)	180 (27,4)

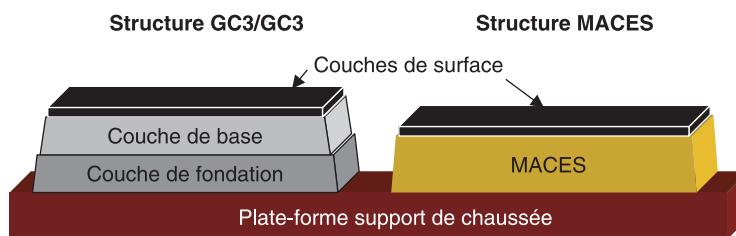


Fig. 4 - Exemple de structures types de chaussée utilisant le MACES.

Conclusions

Le concept de MACES apparaît très prometteur au stade actuel de son développement et pourrait initier un progrès dans les techniques de construction de corps de chaussées. Parce qu'ils sont fluides et autocompactants, les MACES sont d'une mise en œuvre aisée et permettent de s'affranchir en partie de la contrainte technique qu'est le compactage

TABLEAU IV
Fourchettes basse et haute des coûts de fabrication et mise en œuvre

	Fourchette basse		Fourchette haute	
	Grave-ciment	MACES	Grave-ciment	MACES
Coût fabrication seule FF/m ³ (€/m ³)	15 (2,3)	15 (2,3)	52 (7,9)	52 (7,9)
Coût mise en œuvre seule FF/m ³ (€/m ³)	16 (2,4)	8 (1,2)	48 (7,3)	24 (3,7)
Coût fabrication + mise en œuvre FF/m ³ (€/m ³)	31 (4,7)	23 (3,5)	100 (15,2)	76 (11,6)
Coût en place FF/m ³ (€/m ³)	177 (27)	203 (30,9)	246 (37,5)	256 (39)

TABLEAU V
Bilan économique pour les trois structures

Comparatif au mètre carré entre GC et MACES	Fourchette basse			Fourchette haute		
	Grave-ciment	MACES	Économie (%)	Grave-ciment	MACES	Économie (%)
Type de voie/classe de plate-forme/trafic	VRS4/PF2/TC5					
Épaisseur (cm)		42	36		42	36
Coût matériau en place FF/m ² (€/m ²)		74,31 (11,33)	72,92 (11,12)	2	103,29 (15,75)	92,00 (14,02)
Type de voie/classe de plate-forme/trafic	VRS4/PF3/TC6					
Épaisseur (cm)		37	32		37	32
Coût matériau en place FF/m ² (€/m ²)		65,46 (9,98)	64,82 (9,88)	1	90,99 (13,87)	81,78 (12,47)
Type de voie/classe de plate-forme/trafic	VRNS4/PF3/TC3					
Épaisseur (cm)		27	27		27	27
Coût matériau en place FF/m ² (€/m ²)		47,77 (7,28)	54,69 (8,34)	-14	66,40 (10,12)	69,00 (10,52)
						-4

mécanique de couches de graves traitées aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés. De plus, les MACES permettraient de construire rapidement des assises de chaussées présentant probablement une homogénéité de performance notable (pas de problème de densification en fond de couche, sans hétérogénéités de compactage horizontales). L'avènement des MACES formerait la première génération de matériaux fluides pour la construction d'assises de chaussées, dont l'épaisseur ne serait pas limitée par la puissance du compactage mécanique. Cette propriété ouvre la voie à de nouvelles techniques de construction, ainsi qu'à la possibilité de concevoir

des structures de chaussées avec un nombre de couches réduit.

Une première approche de la viabilité économique des MACES (sur la base d'une formule pas encore optimisée) par rapport à l'utilisation d'une grave-ciment GC3, démontre l'intérêt de la technique pour des trafics relativement élevés. La solution MACES présente *a priori* un intérêt technique pour la construction de chaussées en milieu urbain (diminution des nuisances lors de la mise en œuvre) ou sur de mauvais sols (épaisseurs importantes à mettre en place).

Finalement, ces perspectives doivent être confirmées par un programme de recherche dans le cadre du thème

« Matériaux Hydrauliques dans la Route » lancé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, avec la participation du CTG d'Italcementi, qui visera à :

- optimiser les MACES d'un point de vue technico-économique, et aboutir à une méthode de formulation du produit,
- vérifier le comportement des MACES vis-à-vis de la fatigue,
- concevoir et expérimenter les méthodes industrielles de fabrication et de mise en œuvre,
- étudier la tendance à la fissuration du matériau, et établir si nécessaire les dispositions constructives pour la réduire.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier G. Laurent (CETE de l'Ouest) pour ses précieux conseils.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SEDRAN T. (1999), *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants*, Thèse de doctorat de l'École nationale des Ponts et Chaussées, mars.
- [2] SEDRAN T. (1995), Les bétons autonivelants (BAN). Synthèse bibliographique, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **196**, pp. 53-60, mars-avril.
- [3] BONNET G., GAVALDA A., QUIBEL A. (1998), *Remblayage des tranchées. Utilisation de matériaux autocompactants*, Dos- sier du CERTU, **78**, 36 pages, avril.
- [4] HERR O. (1996), *Le béton de remblai*, Mémoire d'ingénieur de l'École supérieure de l'énergie et des matériaux, août.
- [5] Norme BS 1881 : Part 2 : 1970.
- [6] Norme NF P 94-078 : *Sols : Reconnaissance et essais : Indice Portant Immédiat*, décembre 1992.
- [7] Communication privée avec G. Laurent, CETE de l'Ouest, 2000.
- [8] Communication privée avec L. Hameury, Laboratoire régional de St-Brieuc, 2000.
- [9] Communication privée avec J.-P. Benaben, Laboratoire régional de Toulouse, 2000.
- [10] Communication privée avec J.-P. Marchand, Eurovia, 2000.
- [11] *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, Guide technique LCPC-SETRA, 1994.
- [12] *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, Guide technique SETRA-LCPC, 1998.