

Validation de la détermination en laboratoire des performances mécaniques de graves-laitier de fonte hématite

Bernard ROUSSEL

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Blois

RÉSUMÉ

Pour lever un doute sur les performances mécaniques en place des graves-laitier, une étude portant sur des chantiers réalisés avec des laitiers prébroyés de fonte hématite (Dunkerque, Fos, Lorraine) a été entreprise afin, d'une part de vérifier la procédure d'évaluation en laboratoire des performances à un an, et, d'autre part, d'obtenir des valeurs de performances sur carottes à plus long terme.

Cette étude montre que, lorsque toutes les caractéristiques de composition et de densité sont conformes, les performances issues de l'étude de laboratoire ne surévaluent pas celles obtenues sur chantier, bien au contraire. Elle confirme donc la validité de la méthode française fondée sur l'évaluation en laboratoire des performances mécaniques des graves traitées aux liants hydrauliques et la maîtrise du respect des paramètres de la formule de base retenue lors de leur fabrication et de leur mise en œuvre.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

VALIDATION OF A LABORATORY DETERMINATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF GRAVEL-SLAG MIXTURES MADE OF HEMATITE CAST IRON

In order to remove any doubt about the on-site mechanical performance of slag bound granular mixtures, a study focusing on projects in France using partially ground blast furnace slag from hematite cast iron (Dunkirk, Fos, Lorraine) was undertaken both to verify the laboratory evaluation procedure for 1-year performance levels and to obtain more long-term performance measures on boring samples.

This study has demonstrated that when all composition and density characteristics are in compliance, the performance readings stemming from the laboratory study do not exceed those obtained on site and moreover tend to reveal the opposite. The investigation confirmed not only the validity of the French method based on laboratory assessment of the mechanical performance of hydraulically bound granular mixtures, but also the assurance of respecting the parameters of the basic mix design selected at the time of fabrication and implementation.

FIELD: Roads.

Introduction

À la suite de la publication du catalogue des structures types de chaussées neuves SETRA-LCPC en 1998 [1], il est apparu comme nécessaire de mieux connaître les performances mécaniques en place des graves-laitier qui, à présent, sont élaborés uniquement avec des laitiers de fonte hématite [2], et ce depuis l'indisponibilité des laitiers de fonte Thomas de Lorraine.

En effet, quelques résultats obtenus antérieurement sur des chantiers réalisés avec du laitier granulé et prébroyé de Dunkerque avaient mis en évidence des performances mécaniques sur carottes (ou sur éprouvettes moulées en laboratoire à partir de prélèvements effectués en centrale de malaxage) significativement inférieures à celles mesurées sur un mélange préparé en laboratoire. Cet écart était en cohérence avec la moindre broyabilité des laitiers de fonte hématite et pouvait s'expliquer par un malaxage en laboratoire produisant plus de fines de laitier que le malaxage en centrale. Par précaution, et en l'absence de données plus nombreuses sur les performances en place, la méthode française [3, 4] repose sur la vérification des performances mécaniques en laboratoire d'une formule de base dont seuls les constituants et les paramètres de composition et de densité sont ensuite contrôlés sur chantier, les caractéristiques de dimensionnement avaient été réduites dans le nouveau catalogue des structures types de chaussées neuves SETRA-LCPC de 1998.

Cette étude, réalisée avec la participation des LRPC de Blois, Lille, Nancy, de l'Ouest parisien et de Saint-Quentin, comportait des programmes d'essais portant sur des chantiers utilisant ou ayant uti-

lisé des laitiers de fonte hématite (Dunkerque, Fos, Lorraine). Ses objectifs étaient de comparer, à une échéance d'un an, les performances mécaniques sur des éprouvettes moulées (après malaxage en laboratoire ou en centrale) et sur des carottes et de déterminer l'évolution des performances en place au cours du temps.

Les résultats de cette étude devaient contribuer à la définition des valeurs de résistance et de module à utiliser pour le dimensionnement des couches de chaussées en graves-laitier.

Réalisation de l'étude

Un groupe de travail réunissant des membres du réseau technique (LCPC, LRPC, SETRA) et de la profession (Laitier-France, CTPL, Mécaroute) a été constitué pour définir le programme de l'étude, en suivre le déroulement, proposer d'éventuelles adaptations du programme et valider les résultats. Le programme de l'étude comprenait deux types de programmes d'essais :

❶ programmes d'essais de type 1 : sur des chantiers à réaliser, comparaison des performances mécaniques d'éprouvettes moulées en laboratoire (avec malaxage en laboratoire et malaxage en centrale) et d'éprouvettes issues de carottes prélevées à un an. L'ensemble de ces programmes est destiné à vérifier la procédure d'évaluation en laboratoire des performances en place des graves-laitier à un an. Un chantier témoin utilisant un liant hydraulique routier à forte teneur en laitier est également prévu ;

❷ programmes d'essais de type 2 : sur des chantiers réalisés depuis plus d'un an, détermination des performances mécaniques à partir d'éprouvettes issues de carottes prélevées. Ces programmes sont destinés à connaître l'évolution des performances en place au cours du temps.

Les chantiers retenus pour l'étude devaient être choisis sur la base de deux critères :

1 - maîtrise de leur exécution ;

2 - représentativité à l'égard des formulations de graves-laitier utilisées, soit :

- laitier granulé prébroyé (LP) de Dunkerque, activé à la chaux, ou par un liant hydraulique routier* ou au gypsonat**,
- LP de Lorraine, activé par un liant hydraulique routier*,
- LP de Fos, activé au gypsonat**.

Programmes d'essais de type 1 (chantiers neufs)

Sur un chantier réalisé suivant les règles de l'art (avec épreuve de formulation validée et épreuves de convenance de la fabrication et de la mise en oeuvre) (fig. 1), on effectue les opérations suivantes :

- prélèvements sur stocks des différents constituants et identification (analyse granulométrique, propreté des sables) ; les zones de prélèvement doivent correspondre à celles utilisées pour l'approvisionnement de la centrale au moment de la fabrication du mélange sur lequel sera effectué le prélèvement décrit ci-après ;
- prélèvement du mélange au moment du répandage sur la zone retenue pour les carottages ultérieurs : analyse granulométrique et détermination de la teneur en eau ;
- mesure des masses volumiques apparentes (MVA) sèches après compactage au gammadensimètre GPV (suivant NF P 98-241-1 [5]) et, si possible, au gammadensimètre mobile GDM45 (Matériels LPC), avec la présence d'un technicien du Laboratoire régional sur le chantier pour s'assurer de la bonne réalisation de la mise en oeuvre et valider le choix de la zone retenue ;
- moulage en laboratoire par vibrocompression de trois éprouvettes cylindriques (\varnothing 16 cm, h 32 cm) selon chacune des modalités suivantes :

* Bien que ces produits soient destinés à une utilisation en tant que liant unique dans les matériaux traités aux liants hydrauliques, il existe une certaine pratique industrielle consistant, pour des raisons de commodité, à les utiliser comme activateurs.

** Activant sulfatocalcique commercial.

- à partir du prélèvement sur le mélange, sans remalaxage, à la MVA sèche de référence du chantier ;
- à partir des prélèvements sur les constituants, recomposés suivant la formule de base du chantier et malaxés en laboratoire à la même teneur en eau que celle du chantier et à la MVA sèche de référence du chantier ; analyse granulométrique après malaxage ;
- essais de fendage diamétral avec mesure du module élastique E à 360 jours après sciage de chaque éprouvette en deux, sur les deux séries de six éprouvettes ainsi obtenues ;
- carottages à un an sur la zone retenue afin d'extraire 12 éprouvettes (\varnothing 15 cm, h 15 cm) après élimination par sciage des parties inférieure et supérieure de la couche de graves-laitier. Essais de fendage diamétral dans les mêmes conditions que ci-dessus et mesures de la masse volumique apparente sèche des éprouvettes ;
- dans le cas de petits chantiers où il n'est pas fait d'étude de vérification, essais de traction directe avec mesure du module élastique ($R_t + E$) sur la formule de base à la densité de référence (4 éprouvettes fabriquées et moulées en laboratoire).

Les caractéristiques des chantiers retenus sont reportées dans le tableau I. Le choix des chantiers à l'époque du lancement de l'étude s'est révélé en fait très limité et des difficultés réelles ont été rencontrées dans certaines régions pour trouver des chantiers répondant aux critères demandés, en particulier pour le respect des règles d'exécution. Parmi les chantiers suivis, certains n'ont pas pu être retenus pour cette étude, compte tenu de leurs conditions de réalisation.

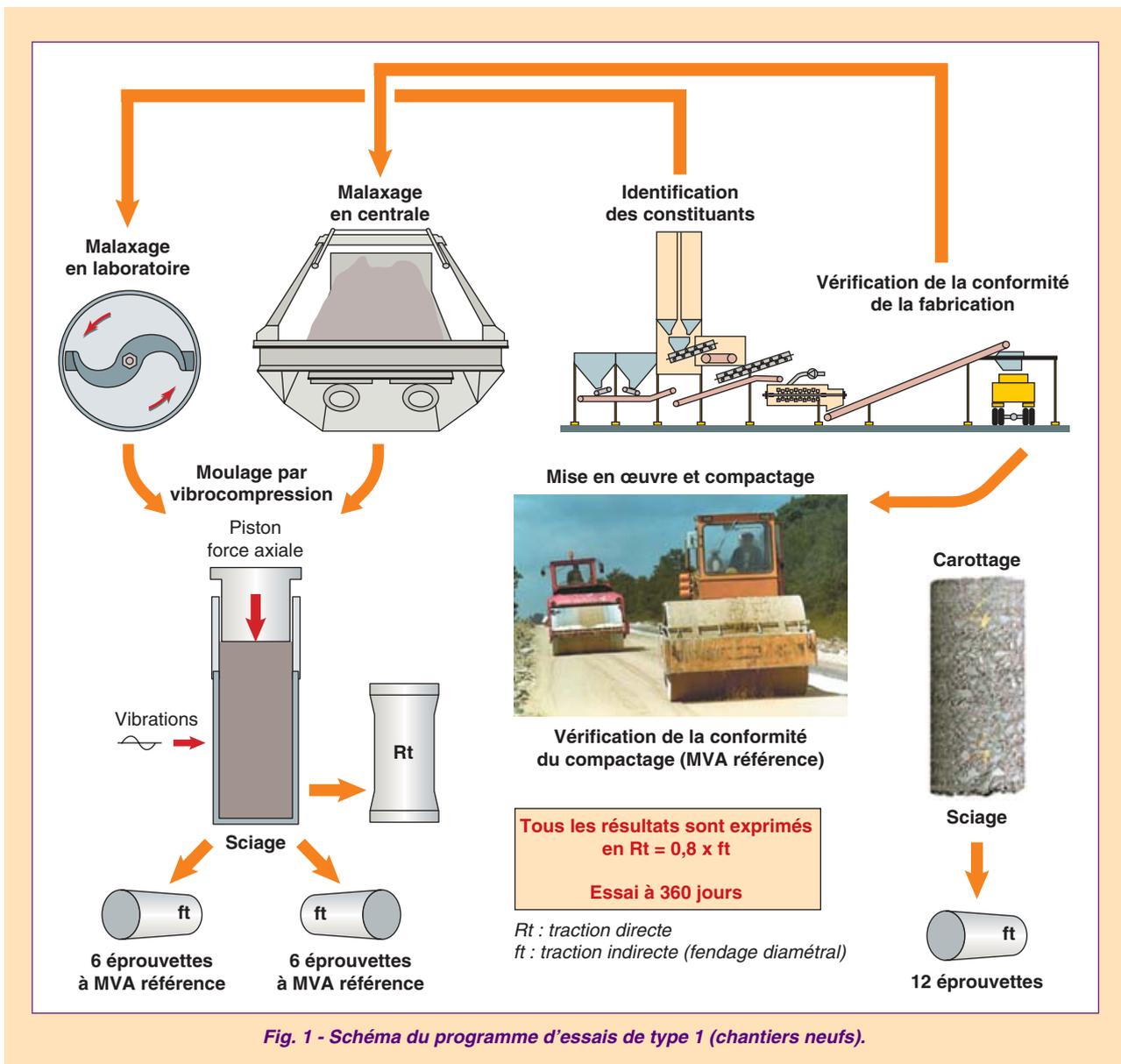


TABLEAU I
Caractéristiques des chantiers retenus (chaussées neuves)

N°	Liant	Activant	Chantier	Granulats	LR
I-1	7 % LP12 Dunkerque	2 % Ligex 2R*	Couche de base (RD)	Calcaire	LROP
I-2	8 % LP12 Dunkerque	1 % CV Gardanne**	Couche de fondation (RD)	Calcaire	LROP
I-3	8 % LP12 Fos	0,8 % gypsonat B	Couche de base de BAU (autoroute)	Leyptinite	LR Blois
I-4	3,5 % Ligex 2R*		Couche de base (RD)	Calcaire	LR Nancy

* Liant hydraulique routier commercial, dont le constituant principal est du laitier.

** Cendres volantes sulfatocalciques, présentant des propriétés liantes.

Programmes d'essais de type 2

Ces essais sont à réaliser sur des chantiers réalisés depuis plus de un an, suivant les règles de l'art, conformes aux spécifications et comportant une étude de formulation. Sur une zone homogène, définie à partir des contrôles de fabrication et de compactage : carottages et préparation de douze éprouvettes (Ø 15 cm, h 15 cm) après élimination par sciage des parties inférieure et supérieure de la couche de graves-laitier, essais de fendage diamétral (cf. programmes de type 1) et mesures de la masse volumique apparente sèche des éprouvettes. Les caractéristiques des chantiers retenus sont reportées dans le tableau II.

TABLEAU II
Caractéristiques des chantiers retenus (chaussées existantes)

N°	Liant	Activant	Couches de chaussée et type de chantier	Âge (ans)	Granulats	LRPC
II-1	15 % LP Dunkerque	1 % chaux	Base de renforcement (RD)	4	Laitier concassé	LR Lille
II-2	12 % LP Dunkerque	1 % gypsonat	Base et fondation de chaussée neuve (RD)	3	Laitier concassé	LR Lille
II-3	8 % LP12 Dunkerque	1 % CV Gardanne	Base de chaussée neuve (RD)	1,5	Calcaire	LROP
II-4	8 % LP12 Dunkerque	1 % gypsonat	Base de chaussée neuve (RD)	2	Calcaire	LROP
II-5	8 % LP12 Dunkerque	1 % CV Gardanne	Fondation de chaussée neuve (RD)	2	Calcaire	LROP
II-6	12 % LP8 Lorraine	1 % ARC3 *	Base de chaussée neuve (RN)	3	Roche massive (trapp)	LR Nancy
II-7	8 % LP12 Fos	0,8 % gypsonat A	Base de chaussée neuve (autoroute)	7,5	Roche massive	LR Blois
II-8	8 % LP12 Fos	1 % gypsonat A	Base et fondation de chaussée neuve (RN)	5	Siliceux + Calcaire	LR Blois

* Liant hydraulique routier commercial, dont le constituant principal est du laitier.

Résultats obtenus

Comparaison des performances mécaniques à un an (chaussées neuves)

Tous les résultats de résistance obtenus en traction par fendage diamétral (ft) sont convertis en résistance à la traction directe (Rt) par la relation conventionnelle : $Rt = 0,8 \times ft$.

La comparaison des performances mécaniques en fonction du mode de malaxage, d'une part, et entre éprouvettes et carottes, d'autre part, ne peut être faite valablement qu'après avoir vérifié que tous les autres paramètres influant sur les performances mécaniques (composition du mélange et densités après moulage des éprouvettes ou après compactage sur chantier) sont identiques.

Toutes ces conditions, fixées au préalable dans le programme de l'étude, n'ont pas toujours pu être respectées, ce qui a conduit à ne pas retenir certains résultats.

Le tableau III regroupe les résultats moyens validés obtenus par les laboratoires, avec rappel de l'objectif de compactage, afin de comparer la résistance en traction directe obtenue suivant les trois modalités (éprouvettes moulées en laboratoire après malaxage en laboratoire ou en centrale, carottes). Les essais ont été réalisés à 360 jours, sauf pour le témoin en liant hydraulique routier (chantier I-4) pour lequel le délai de l'étude a imposé de réaliser les essais à 100 jours.

TABLEAU III

Valeurs moyennes des Rt et MVA sèches suivant les modalités de préparation des éprouvettes

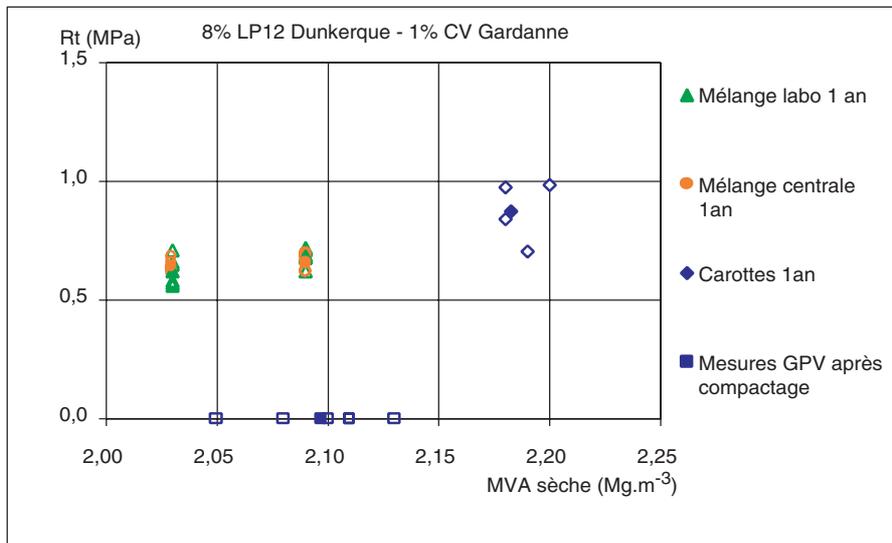
Chantier	Objectif de compactage (% MVA sèche OPM)	MVA sèche moyenne (Mg.m ⁻³)	Rt (MPa) moyenne	Modalités de préparation des éprouvettes
I-1	97	2,01	0,86	Malaxage en laboratoire
	97	2,01	0,97	Malaxage en centrale
	98	2,13	1,11	Carottes
I-2a	97	2,03	0,62	Malaxage en laboratoire
	97	2,03	0,64	Malaxage en centrale
I-2b	100	2,09	0,68	Malaxage en laboratoire
	100	2,09	0,66	Malaxage en centrale
	100	2,17	0,88	Carottes
I-3	100	2,18	1,03	Malaxage en laboratoire
	100	2,18	1,16	Malaxage en centrale
	100	2,25	1,46	Carottes
I-4	100	2,22	1,13	Malaxage en laboratoire
	100	2,22	1,10	Malaxage en centrale
	100	2,25	1,28	Carottes

Les différents graphiques présentés sur la figure 2 permettent de comparer dans le plan Rt – MVA sèche les résultats obtenus sur quelques-uns des chantiers. Lorsque les MVA sèches n'ont pas été mesurées sur les éprouvettes, la valeur prise en compte est celle qui était visée lors de leur moulage. Ces résultats sont complétés par l'indication des MVA sèches après compactage mesurées au gammadensimètre GPV : les valeurs sont reportées sur l'axe horizontal.

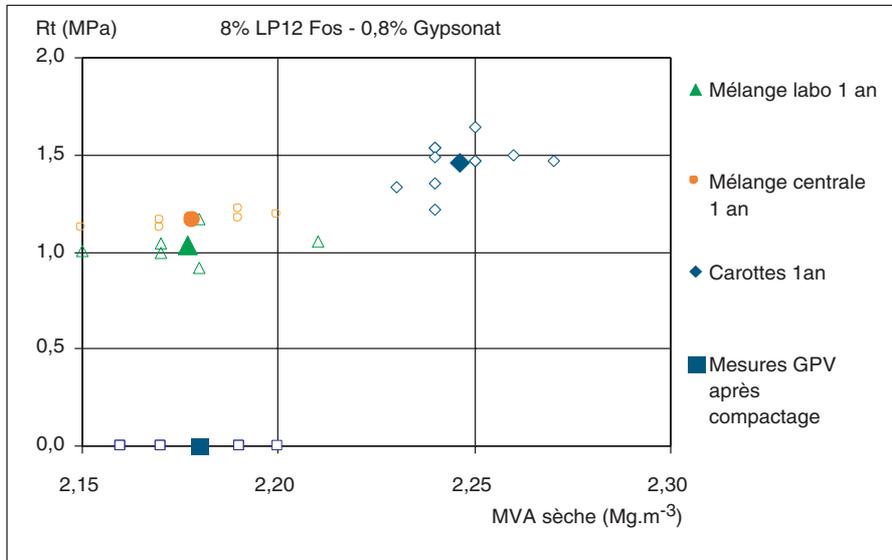
Dans ces graphiques, les motifs pleins correspondent aux valeurs moyennes obtenues et les motifs ajourés aux valeurs individuelles.

La figure 3 permet la comparaison sur un cas de chantier des performances mécaniques (Rt et E) obtenues suivant les différentes modalités, à même objectif de MVA sèche, dans le plan Rt – E utilisé pour le classement mécanique des graves hydrauliques suivant la norme NF P 98-116 [6]. Les points représentatifs correspondent aux valeurs individuelles.

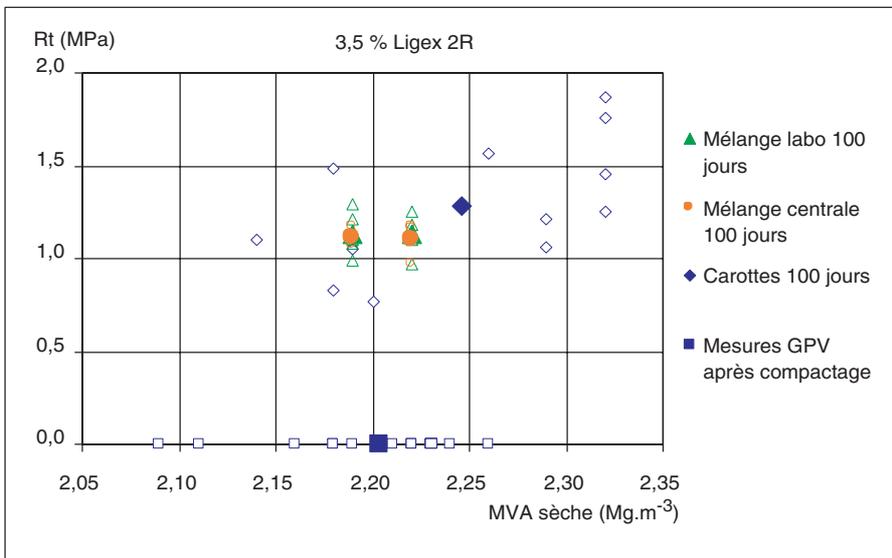
Fig. 2 - Comparaison des résistances à la traction directe.



a) Chantier I-1.



b) Chantier I-3.



c) Chantier I-4.

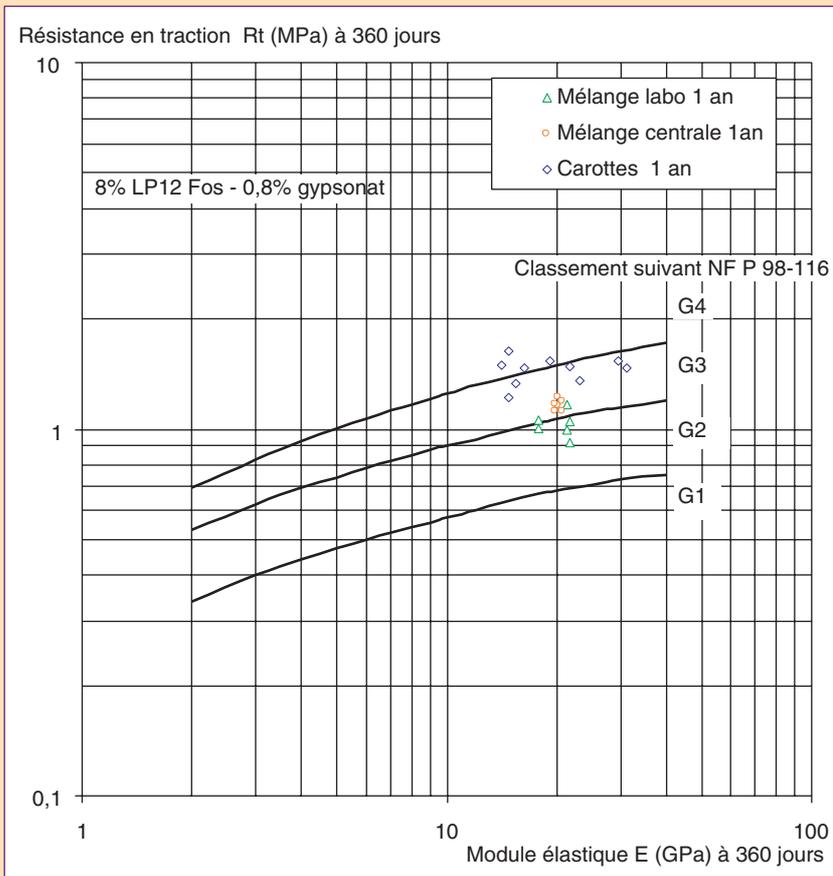


Fig. 3 - Comparaison des valeurs $R_t - E$ pour le chantier I-3.

Les écarts relatifs obtenus sur les valeurs moyennes de R_t , entre le malaxage en laboratoire et le malaxage en centrale d'une part, et entre les carottes et le malaxage en laboratoire, d'autre part, sont reportés dans le tableau IV et illustrés par la figure 4.

Ces résultats, qui ont été obtenus dans des conditions maîtrisées autorisant la comparaison des valeurs :

- ne confirment pas, bien au contraire, une surestimation des performances mécaniques obtenues dans les conditions de chantier par celles obtenues en laboratoire ;
- montrent une faible influence du mode de malaxage ;
- mettent en évidence un écart positif significatif entre les performances obtenues sur carottes et celles obtenues en laboratoire. Cet écart est lié à une forte augmentation de la MVA sèche sur carottes, que l'on ne constate pas sur les éprouvettes moulées en laboratoire, et qui ne peut être expliquée par un post-compactage de la grave-laitier au jeune âge ; sur le chantier I-3 en particulier, la grave-laitier est mise en œuvre sur la bande d'arrêt d'urgence et n'a donc pratiquement pas été circulée.

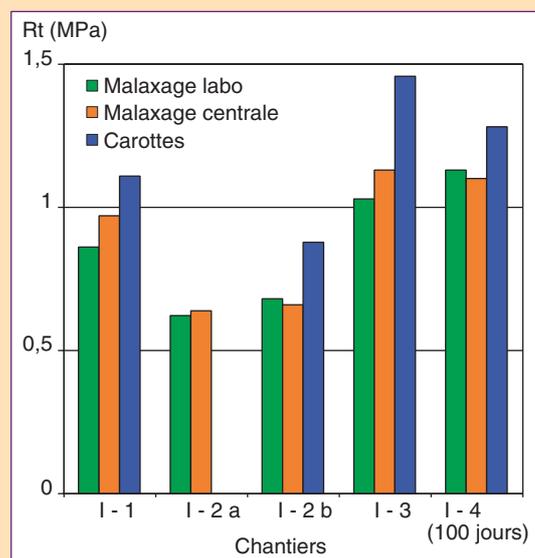


Fig. 4 - Comparaison des valeurs moyennes de R_t suivant les modalités de préparation des éprouvettes.

TABLEAU IV
Écart sur Rt moyennes liés aux modalités de préparation des éprouvettes

Chantier	(Rt centrale – Rt labo)/Rt labo	(Rt carottes – Rt labo)/Rt labo
I-1	+ 12,8 %	+ 29,0 %
I-2a	+ 3,2 %	
I-2b	– 2,9 %	+ 29,0 %
I-3	+ 12,6 %	+ 41,7 %
I-4 (témoin HRB)	– 2,7 %	+ 13,3 %

Performances mécaniques au-delà de un an (chaussées existantes)

Cette partie de l'étude avait pour but de compléter les données sur les performances mécaniques en place des graves-laitier de fonte hématite, en les mesurant sur plusieurs chantiers récents et anciens réalisés en respectant les règles de l'art, et sur lesquels les LRPC disposaient de renseignements fiables.

Comme précédemment, tous les résultats d'essais de traction par fendage diamétral sont exprimés en Rt par la relation conventionnelle $Rt = 0,8 \times ft$.

Le tableau V regroupe les résultats moyens validés obtenus avec rappel de l'objectif de compactage. Il est complété, lorsque ces résultats étaient disponibles, par les valeurs moyennes de Rt à un an

TABLEAU V
Valeurs moyennes des Rt et MVA sèches

Chantier	Objectif de compactage (MVA sèche Mg.m ⁻³)	MVA sèche moyenne sur carottes (Mg.m ⁻³)	Rt (MPa) moyenne	Âge	Modalités de préparation des éprouvettes
II-1	2,13	2,25	1,10	4 ans	Carottes
II-2	2,09		0,80	1 an	Malaxage en laboratoire
		2,16	0,85	3 ans	Carottes (couche de base)
		2,13	0,77	3 ans	Carottes (fondation)
II-3	2,04		1,20	1 an	Malaxage en laboratoire
	2,04	2,11	0,76	1,5 an	Carottes
II-4	2,06		1,43	1 an	Malaxage en laboratoire
	1,96		0,85	1 an	Malaxage en centrale
	2,04	2,14	1,46	2 ans	Carottes
II-5	1,97		0,86	1 an	Malaxage en laboratoire
	2,06		1,16	1 an	Malaxage en laboratoire
	1,96		0,85	1 an	Malaxage en centrale
	2,01	2,09	1,12	2 ans	Carottes
II-6	2,29		0,58	1 an	Malaxage en laboratoire
	2,29	2,39	0,77	3 ans	Carottes
II-7	2,29		1,07	1 an	Malaxage en laboratoire
	2,18	2,24	1,76	7,5 ans	Carottes
II-8 Base	2,02		0,81	1 an	Malaxage en laboratoire
	2,08	2,16	1,72	5 ans	Carottes
II-8 Fondation	1,99		0,75	1 an	malaxage en laboratoire
	1,99	2,09	1,20	5 ans	carottes

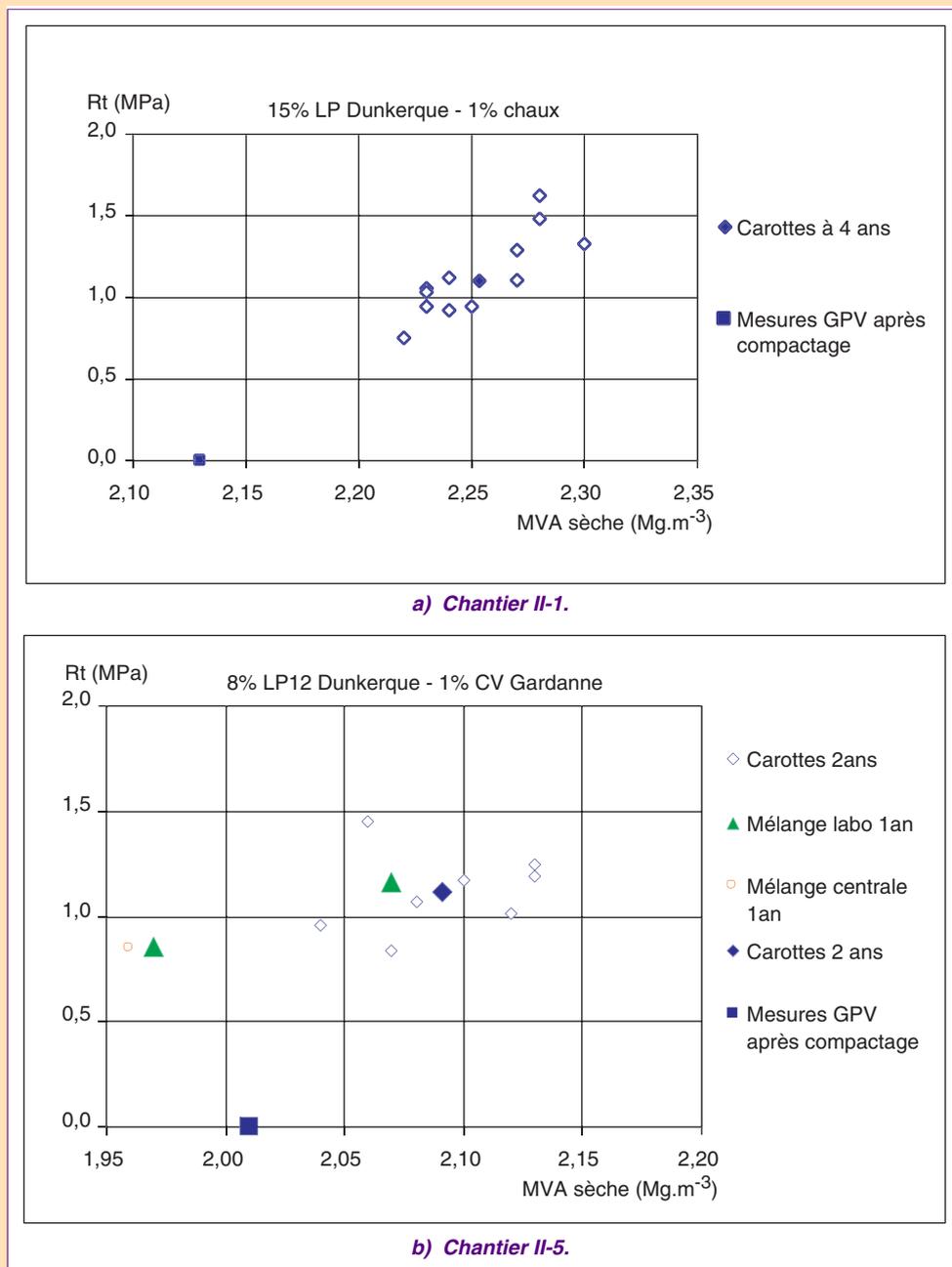
issues de l'étude de laboratoire et des éprouvettes moulées à partir de prélèvements de mélanges en centrale.

Les différents graphiques présentés sur la figure 5 permettent de comparer dans le plan $R_t - MVA$ sèche les résultats obtenus sur deux cas de chantier. Ils sont complétés par l'indication de la MVA sèche moyenne obtenue après compactage : la valeur est reportée sur l'axe horizontal.

Sur ces graphiques les motifs pleins correspondent aux valeurs moyennes obtenues et les motifs ajourés aux valeurs individuelles.

On observe que, là aussi, les MVA sèches moyennes sur carottes sont en général très supérieures à l'objectif de compactage visé. Cette observation n'est pas nouvelle, mais n'a, semble-t-il, jamais fait l'objet de recherche de cause. La préparation des carottes, en éliminant par sciage leurs parties supérieure et inférieure, peut conduire à ne retenir que la partie la plus densifiée de la carotte. Mais l'exa-

Fig. 5 - Valeurs de R_t au-delà de un an.



men des gradients de densité obtenus au banc gamma montre que la partie centrale de la couche retenue est en général assez bien représentative de la densité moyenne de la couche, référence de densité qui doit être retenue. On peut aussi se demander si la poursuite dans le temps de la création de matériaux secs par hydratation du laitier, qui s'effectue à volume contraint dans la chaussée (contrairement aux éprouvettes dans leurs étuis), peut expliquer cette densification ; cette différence de comportement entre chantier et éprouvettes devrait être plus sensible pour les niveaux de pourcentage de vides les plus bas puisque, dans ce cas, le volume interne disponible est plus faible. L'apport d'eau qui se poursuit dans la chaussée, contrairement aux éprouvettes conservées en étuis étanches, peut expliquer cette densification des graves hydrauliques, en particulier pour les graves-laitier dont on peut supposer que la partie granulée du laitier, compte tenu de son dosage et de sa granularité, n'est pas totalement hydratée avec la seule eau de fabrication. Le post-compactage apporté par la circulation, qui n'affecte en fait que la partie supérieure de la couche (surtout si le compactage final au compacteur à pneus n'a pas été réalisé ou insuffisamment réalisé), ne peut expliquer totalement cette densification (comme on l'a vu précédemment).

Si on restreint la comparaison des performances aux seuls cas où l'objectif de densité était comparable (II-3, II-4, II-5, II-6, II-7, II-8), seul un cas sur six (II-3) contredit l'observation générale selon laquelle les performances mécaniques des graves-laitier étudiées sont plutôt sous-évaluées par l'étude de laboratoire.

Conclusions

Malgré des difficultés de réalisation de l'ensemble du programme d'essais mis au point par le groupe de travail en charge de cette étude (difficultés pour trouver des chantiers neufs à une période peu favorable économiquement pour cette technique ; programme détaillé des essais pas toujours suivi ; non-conformités de fabrication et de mise en œuvre ; données pas assez fiables sur certains chantiers anciens), les résultats obtenus permettent cependant de dégager des conclusions par rapport à la question posée qui peut se résumer ainsi : la méthodologie française d'étude des performances mécaniques en laboratoire est-elle pertinente pour les graves-laitier élaborées avec des laitiers de fonte hématite, seuls disponibles maintenant et dont la broyabilité est inférieure à celle des anciens laitiers de fonte Thomas ? La surévaluation par les performances mécaniques mesurées en laboratoire qui a pu être constatée serait-elle due à un broyage du laitier, créateur d'éléments fins mobilisés pour les réactions d'hydratation, plus important avec le malaxage en laboratoire qu'avec le malaxage en centrale ?

Les résultats de cette étude élargie à l'ensemble des laitiers granulés prébroyés de fonte hématite disponibles en France (Dunkerque, Fos, Lorraine) et réalisée par les LRPC de Blois, Lille, Nancy, de l'Ouest parisien et de Saint-Quentin montrent que le mode de malaxage en laboratoire n'est pas plus favorable au développement des performances que celui réalisé en centrale. Cela est également vérifié pour le témoin constitué par une grave-liant hydraulique routier.

Lorsque les règles de l'art sont respectées, aussi bien pour la fabrication que pour la mise en œuvre, les performances mécaniques obtenues sur carottes à plus ou moins long terme sont supérieures à celles évaluées en laboratoire pour un même objectif de densité sèche au moment du compactage et pour la fabrication des éprouvettes de laboratoire. Cet accroissement est en liaison avec une masse volumique apparente sèche des éprouvettes issues des carottes en général nettement plus élevée (jusqu'à + 5 %) que la valeur moyenne sur l'épaisseur auscultée lors des mesures au gammadensimètre après compactage. On n'observe pas cette densification sur les éprouvettes moulées et conservées en laboratoire, sans échange d'eau.

Cette étude confirme la validité générale de la méthode française fondée sur l'évaluation des performances mécaniques des graves traitées aux liants hydrauliques en laboratoire et sur la maîtrise du respect des paramètres de la formule de base retenue lors de leur fabrication et de leur mise en œuvre. Cette méthode suppose bien sûr que tous les éléments concourant à la maîtrise de la qualité des couches d'assises de chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques, depuis la représentativité des échantillons prélevés pour l'étude de laboratoire jusqu'à la mise en œuvre des mélanges, sont conformes aux stipulations décrites dans les normes relatives à cette technique.

La détermination des performances mécaniques sur des éprouvettes moulées à partir de prélèvements à la sortie de la centrale de malaxage, ou sur carottes, ne peut être considérée que comme une épreuve d'information et ne doit surtout pas conduire à se désintéresser de la vérification de la conformité à tous les points clés du chantier.

Par ailleurs, les seuils retenus dans le catalogue des structures types de chaussées 98 pour les résistances minimales mesurées à un an en laboratoire (0,65 MPa pour les

GLp activées à la chaux – 0,9 MPa pour les GLp avec une autre activation) sont atteints sur les chantiers étudiés, sauf cas particuliers, pour l'essentiel des essais réalisés sur carottes (fig. 6). L'activation au gypsonat semble permettre de respecter plus systématiquement et plus largement ces seuils. Mais les valeurs faibles observées (même en considérant le seuil appliqué avant 1998 aux GLp avec activation autre qu'à la chaux : 0,8 MPa) révèlent un certain nombre de chantiers non conformes.

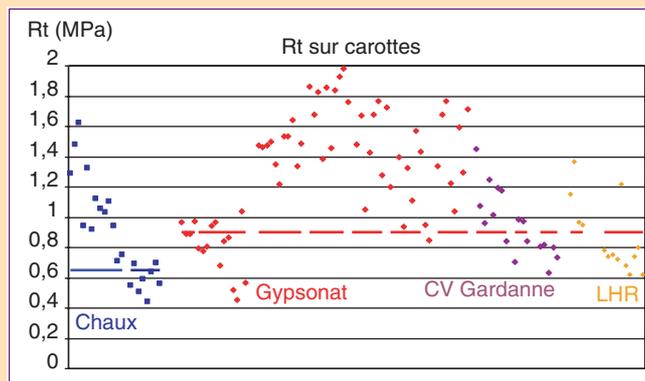


Fig. 6 - Ensemble des valeurs de Rt sur carottes et Rt minimales à un an du catalogue 98.

Remerciements. Ces travaux ont été réalisés avec la participation des LRPC de Lille, Nancy, de l'Ouest parisien et de Saint-Quentin dans le cadre d'une convention entre la Société Laitier-France, le LCPC et le SETRA.

Les acteurs de cette étude remercient le groupe technique de la Commission Nationale des Laitiers pour le suivi attentif de leurs travaux et le soutien qu'il leur a apporté.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, SETRA-LCPC, édition **1998**.
- [2] Norme française NF P 98-106, *Laitiers de haut-fourneau vitrifiés (granulés ou bouletés) Définitions, caractéristiques et classification*, AFNOR, juillet **1991**, 8 pages.
- [3] *Conception et dimensionnement des structures de chaussées*, Guide technique SETRA-LCPC, décembre **1994**.
- [4] Norme française NF P 98-115, *Exécution des corps de chaussées – Constituants - Composition des mélanges et formulation – Exécution et contrôle*, AFNOR, janvier **1992**, 89 pages.
- [5] Norme française NF P 98-241-1, *Essais relatifs aux chaussées, Mesure de la masse volumique des matériaux en place – Partie 1 : Mesure ponctuelle de la masse volumique moyenne apparente par gamma-densimètre à transmission directe*, août **1993**.
- [6] Norme française NF P 98-116, *Graves traitées aux liants hydrauliques – Définition – Composition – Classification*, AFNOR, février **2000**, 19 pages.