

**UTILISATION EN FRANCE DES
MATERIAUX TRAITES AUX
LIANTS HYDRAULIQUES
EN TECHNIQUE ROUTIERE
EXISTE-T-IL UNE APPLICATION
AU MAROC ?**

**Mr. NGUYEN DAC CHI
(LCPC)**

R E S U M E

Les matériaux traités aux liants hydrauliques (ciment, laitier, cendres volantes) sont utilisés couramment en France depuis 1960, à la différence de la plupart des autres pays, comme un matériau noble en couches de base et de couches de fondation des chaussées à grand trafics .

L'utilisation des sous produits industriels, laitiers et cendres volantes comme liants hydrauliques, présente des avantages très importantes: économie d'énergie et protection de l'environnement .

L'utilisation en France d'un matériau bien élaboré, donc noble, permet de l'utiliser dans des couches de base et des couches de fondation recouvertes d'une couche de surface peu épaisse d'enrobé, elle permet ainsi d'économiser la consommation de bitume .

Cette technique peut - elle être utilisée au Maroc ?

Au Maroc, l'existence des ciments, et surtout une production des cendres volantes (40.000 t/an) jusqu' ici rejetées à la mer, constitue un grand gaspillage d'énergie et de pollution de l'environnement . Quelques études sur la composition chimique de ce dernier montre qu'il est possible de l'utiliser dans la technique routière .

L'utilisation des matériaux traités aux liants hydrauliques en technique routière au Maroc pourrait se faire de deux façons: la façon rustique ou et la façon élaborée. Quelque soit le mode d'utilisation, une étude préalable doit être réalisée .

L'auteur exposera une synthèse des techniques utilisées en France et enchaînera sur la façon d'aborder les études pour l'application des traitements des matériaux aux liants hydrauliques au Maroc. Il insistera surtout sur les utilisations possibles des sous produits industriels, laitiers et cendres volantes .

INTRODUCTION

Les matériaux traités aux liants hydrauliques sont utilisés dans le monde entier dans les couches de chaussées. Les liants utilisés sont souvent le ciment ou la chaux. Ces matériaux sont malaxés en place, et quelquefois en centrale, mais les exigences demandées sont souvent peu rigoureuses et donnent ainsi un matériau peu noble. Il sont alors utilisés dans des couches de chaussées relativement profondes (14 à 16 cm au dessous de la surface), les couches situées au dessus étant souvent des matériaux traités au bitume .

Les matériaux traités aux liants hydrauliques français sont des matériaux qui répondent à des spécifications précises, ils sont toujours malaxés en centrale. Les exigences demandées permettent de les utiliser dans des couches de base et de fondation recouvertes d'une couche d'enrobés peu épaisse, de 7 à 12 cm pour le cas des trafics très lourds, et quelquefois seulement par un enduit superficiel bicouche pour les chaussées à trafic faible .

L'utilisation très répandue des matériaux traités aux liants hydrauliques fait de la France le pays qui utilise le moins de bitume par unité de surface de chaussée. Dans le réseau français de routes nationales, 40% de chaussées ont une couche de base en matériaux traités aux liants hydrauliques .

I - Les matériaux traités aux liants hydrauliques français

Les matériaux traités aux liants hydrauliques sont des mélanges de granulats, de liants hydrauliques et d'eau. Ils sont malaxés en centrale, répandus et compactés en couches de chaussées .

I-1 / Les granulats

Les granulats peuvent être soit de graves, de sables ou de limons

Ils doivent répondre aux spécifications bien précises selon la nature de la couche et le trafic, pour leur utilisation en chaussée neuve ou en renforcement (1). les graves doivent satisfaire à un fuseau de spécifications bien déterminé (2).

La figure 1 donne un exemple du fuseau de spécification liant compris pour les graves cendres volantes chaux .

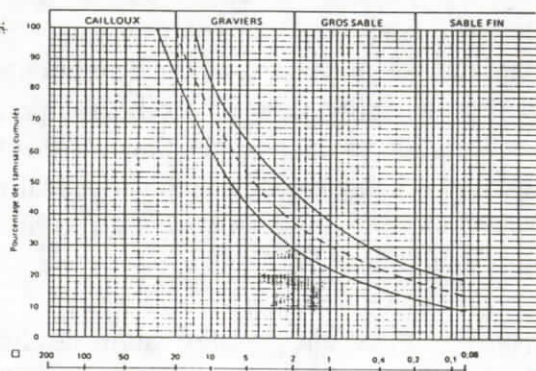


fig 1. Fuseau de spécifications liant compris pour les graves cendres volantes

Les sables doivent répondre à des spécifications de propreté, à une courbe granulométrique leur assurant une certaine stabilité pour faciliter le compactage de chantier (3) .

1- 2/ Les liants,

Les liants hydrauliques utilisés, sont les ciments, les laitiers granulés de hauts fourneaux, les cendres volantes des centrales thermiques et les pouzzolanes

. Le ciment

Le ciment utilisé est souvent du ciment CPA, dont la teneur en ciment est de 3,5 à 4% pour les graves et de 5 à 7% pour les sables et les sols fins. Cette faible teneur en ciment pour les graves a été choisie pour éviter la création de fissures importantes de retrait thermique, elle nécessite par contre un malaxage efficace en centrale. Par temps chaud, où la prise du ciment est rapide, il est utile d'introduire un retardateur de prise. La quantité de retardateur doit être ajustée pour que le délai de maniabilité soit de six heures pour la réalisation de chaussées neuves et de renforcement hors circulation et en pleine largeur, de dix heures pour la réalisation des chaussées en demi - largeur afin de faciliter la prise au niveau du raccordement entre les deux couches, et de douze heures pour les renforcements sous circulation .

Depuis cinq ans, on utilise une grande quantité de ciments dits "spéciaux routiers" qui comportent une grande quantité de laitier moulu (jusqu'à 90%) ou de cendres volantes. Ces ciments ont l'avantage d'avoir une prise lente facilitant ainsi l'exécution du chantier.

. Les laitiers de haut fourneau

Les laitiers sont des sous - produits de la production de la fonte . Jusqu'à une certaine période, ils n'étaient pas utilisés, mais ils étaient stockés en terril, ce qui constitue une nuisance pour l'environnement . Actuellement, le laitier est utilisé sous deux formes, le laitier cristallisé et le laitier vitrifié .

Le laitier cristallisé est obtenu par refroidissement lent dans des fosses à la sortie des hauts fourneaux puis après refroidissement, il est concassé et utilisé comme granulat .

Le laitier vitrifié est obtenu par refroidissement rapide à l'aide de jets d'eau ou par projection dans l'air. On obtient alors des laitiers dits granulés ou boulettes .

Sous forme vitreuse, le laitier est instable et doué d'une hydraulicité latente, c'est à dire qu'il est susceptible sous certaine conditions, après passage en solution d'évoluer vers une certaine forme cristallisée stable, en développant des résistances mécaniques comme le ferait un ciment .

Le laitier vitrifié est utilisé dans la fabrication du ciment et en technique routière.

En technique routière, l'activant du laitier peut être un activant calcique (1% de chaux par exemple) ou un activant sulfatique (1% de gypse sodé par exemple).

L'activité du laitier dépend du coefficient a qui est le produit de la surface spécifique S des fines naturellement présentes dans le laitier par le pourcentage de fines F produites par un broyage normalisé:

$$a = S.F/1000$$

L'activité du laitier peut être augmentée par un broyage qui augmente la teneur en fines du laitier. L'optimum économique est obtenu pour un broyage jusqu'à 10 à 12% de fines, le laitier est alors appelé laitier prébroyé .

. Les cendres volantes

En France, deux types de cendres volantes sont utilisés: les cendres volantes sillico- alumineuses (appelée cendre volante) et les cendres volantes hydrauliques.

La technique des cendres hydrauliques n'est pas développé ici car ces produits n'existent pas au Maroc .

Les cendres volantes sont utilisées comme liant avec comme activant la chaux. Les proportions de cendres volantes et de chaux sont présentées dans le tableau 1 .

2 - Composition des mélanges

La composition des mélanges et leurs caractéristiques de compacité, sont données dans le tableau III .

Tableau 3

	Grave ciment	Grave laitier	Grave CV	Grave pouzzo.
Teneur en liant	3 à 4 %	8 à 20%	10 à 15%	15 à 25%
Teneur en eau	WOPM - 1 à WOPM	WOPM - 2 à WOPM	WOPM à WOPM + 2	WOPM - 1,5 à WOPM + 1,5
Compacité à l'OPM	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$

3 - Propriétés mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques

Le comportement des matériaux traités aux liants hydrauliques se caractérise par l'évolution de la résistance en fonction de l'âge et les caractéristiques à long terme des matériaux . - Evolution des résistances des matériaux La figure 2 donne l'évolution de la résistance en traction en fonction de l'âge.

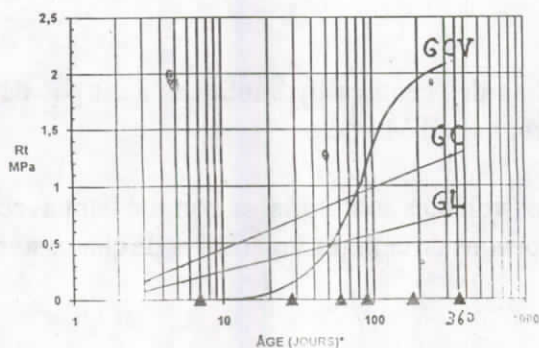


Tableau 1

	Cendres volantes	Chaux éteinte	Chaux vive
Liant 1	80 %	20 %	-
Liant 2	86 %	-	14 %

. Les pouzzolanes

On n'utilise, pour le traitement des graves, que les pouzzolanes naturelles broyées et criblées à 5 mm de granularité 0/4, provenant d'un gisement, dont la réactivité de la chaux a été vérifiée au préalable. La chaux est utilisée comme activant. Le tableau 2 donne les proportions de pouzzolanes - chaux dans le liant pouzzolane .

Tableau 2

Pouzzolanes		Liants reconstitués en centrale	
Teneur en fines ≤ μm (%)	Fraction 0,08-0,02 mm (%)	Pouzzolanes (%)	Chaux (%)
6 à 10	> 8	89	11
10 à 14	> 8	87	13
14 à 18	> 8	85	15

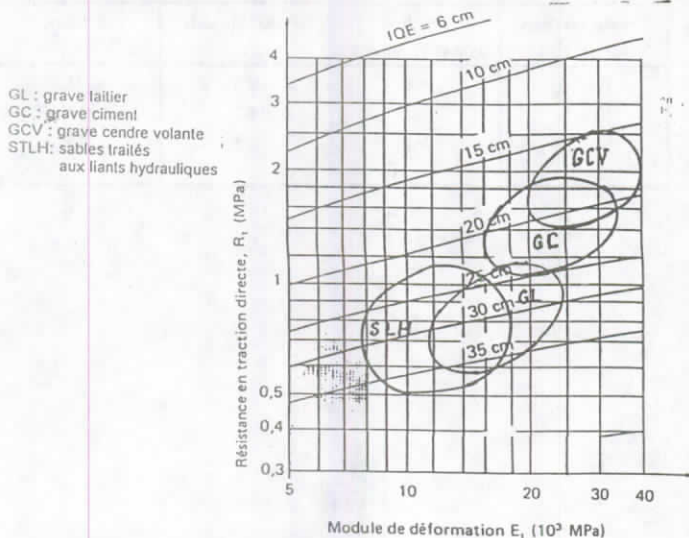
On voit que les graves laitiers font prise lentement et que les graves ciment font prise rapidement. Dès l'âge de 7 jours, la résistance des graves ciment peut atteindre 0,7 MPa soit 50% de la résistance finale à 360 jours qui est à 1,4 MPa.

Les graves cendres volantes font prise très lentement au début. Cette prise ne commence qu'à partir de 30 jours, croît rapidement à 60 jours pour atteindre à 360 jours des résistances très élevées de 2 MPa .

Les matériaux à prise rapide ont souvent l'inconvénient de présenter par la suite des fissures plus ouvertes de retrait thermique . Les prises lentes facilitent en général la mise en oeuvre grâce au délai important entre le malaxage et le compactage ainsi qu'à un post compactage possible par le trafic. Elles favorisent souvent les travaux de renforcement car elles permettent souvent la reprise rapide du trafic dès la fin de la réalisation du chantier .

- Caractéristiques mécaniques à long terme des matériaux

Les matériaux traités aux liants hydrauliques utilisés en couches d'assises de chaussées travaillent en flexion sous charge, la rupture est réalisée par excès de contrainte en traction à la base de la couche . La figure 3 donne les caractéristiques de module élastique et de résistance en traction à 360 jours pour les différents matériaux. Dans cette figure, les courbes notées IQE, correspondent aux épaisseurs nécessaires pour obtenir une durée de vie de matériaux répandus en une seule couche en fatigue donnée, sur un support de portance donnée .



On peut observer que les graves - laitiers ont les résistances les plus faibles ainsi que des modules relativement faibles. Ce matériau est le plus souple des graves traités aux liants hydrauliques .

Les graves cendres volantes ont des résistances et des modules très élevés. Les modules de 4000 MPa sont comparables à ceux du béton. Les résistances en traction peuvent atteindre jusqu'à 2,5 MPa, soit le double de celles des graves laitiers. Ces valeurs de résistances très élevées sont dues à la teneur en liant élevée dans le matériau. Cette valeur a été choisie au début du développement de cette technique pour consommer au maximum les cendres volantes, enfin les moyens de fabrication de cette époque ne permettaient pas de malaxer correctement les mélanges comportant des nodules .

Les graves ciment ont des performances mécaniques comprises entre celles des graves laitiers et celle cendres volantes .

On peut remarquer que les sables traités aux liants hydrauliques ont des résistances mécaniques très acceptables avec un module relativement faible (5000 à 10.000 MPa). Le comportement de ces chaussées est relativement souple . Le principal défaut des sables traités provient de l'engrènement insuffisant des lèvres des fissures pour les chaussées à fort trafic. Pour les chaussées à faible trafic, l'utilisation des sables traités pose peu de problèmes .

Les chaussées réelles sont soumises en fait à des chargements répétés. Les études réalisées sur des matériaux types montrent que selon le liant, on peut avoir les valeurs d'endurance (rapport de l'amplitude de la contrainte à un million de cycles de chargement à la résistance de rupture immédiate) suivantes:

- 0,53 pour les graves laitiers,
- 0,6 pour les graves ciment,
- 0,7 pour les graves cendres volantes .

On voit que les graves cendres - volantes, qui ont une bonne résistance à la rupture au premier chargement et un bon comportement en fatigue, ont vis à vis des autres matériaux le meilleur comportement mécanique .

Les caractéristiques de ces matériaux permettent de construire des chaussées ayant les dimensionnements suivants .

Par exemple pour un trafic T2 (compris entre 150 et 300 poids lourds par jour et sur la voie la plus chargée) et pour une plate forme de type PF2 (de portance moyenne) et pour une chaussée neuve, la structure pourra être l'une de celles résumée dans le tableau IV.

Tableau 4

6 cm de BB	6 cm de BB	6 cm de BB	6 cm de BB	6 cm de BB
20cm de graves laitiers ou de graves pouzzolanes - chaux	18 cm de graves cendres volantes	18 cm de graves cendres volantes	22 cm de graves ciment	12 cm de grave bitume
18 cm de grave laitiers ou graves pouzzolanes chaux	16 cm de graves cendres volantes	22 cm de cendres volantes chaux gypse	20 cm de graves ciment	20 de graves traitées aux liants hydrauliques .

4 - Quantité de matériaux traités aux liants hydrauliques en technique routière

Sans citer la consommation du ciment qui est un produit manufacturé, on peut dire qu'en 1993, en technique routière, 53 % de la production de laitier ont été consommés, ce qui représente 2,5 million de tonnes, de même, 23% de la production des cendres volantes sont utilisés, ce qui représente environ 500000 tonnes .

5 - Autres utilisations des cendres volantes

Les paragraphes précédents ont montré les possibilités d'utilisation des matériaux traités aux liants hydrauliques en assises de chaussées. Dans ce paragraphe, on développera les autres possibilités d'utilisation des cendres volantes en construction routière. Elles semblent pouvoir être appliquées rapidement au Maroc par suite de l'existence de centrales thermiques dans ce pays, et du fait que jusqu'ici les cendres volantes n'ont pas été toutes utilisées .

Bétons routiers: Les cendres volantes sont utilisées comme charges actives dans les bétons routiers classiques . Dans les bétons courants on ajoute généralement 40 à 80 kg de cendres par m³; le dosage du ciment peut alors être réduit .

Bétons compactés routiers: dans ce béton, on substitue jusqu'à environ 30% de cendres au ciment; on choisit alors un ciment riche en clinker dosé à environ 8 % en pondéral .

Remblais: Les cendre volantes sont utilisées comme matériau de remblais, leur faible densité (humide de 1,5 environ pour une teneur en eau du compactage 25%) permet de réaliser des remblais entraînant moins de tassement sur terrain compressible. Deux précautions doivent cependant être prises lors de cette utilisation:

- La partie inférieure du remblai, si la nappe est proche de ce niveau, doit être protégée par une couche anticapillaire .
- Les flancs du remblai doivent être protégés contre l'érosion, une méthode consiste à rapporter une couche de terre végétale et à l'engazonner rapidement . Les cendres se comportent comme des sols fins sensibles à l'eau .

Assises de chaussées: en dehors des graves cendres volantes qui sont le matériau le plus utilisé en assises de chaussées, on utilise aussi les cendres volantes chaux gypse, les cendres volantes ciment et les sables cendres volantes ciment. Le tableau V donne les différentes compositions en pourcentage en poids de ces matériaux .

Tableau 5

	CV	Chaux	Ciment	Gypse	Eau	yd	yh
CV chaux gypse	91	4		5	20	1,35	1,62
CV ciment	95		5		20	1,35	1,62
Sable fin	12	3	1		16	1,75	2,03
CV - chaux - ciment							
Sable fin	10		5		16	1,75	2,9
CV ciment							
Sable alluvionnaire CV - ciment	16	4			10	1,95	2,1

yd et yh sont respectivement les densités sèches et humides du matériau.

Les sables traités aux cendres volantes sont utilisés en couches de fondation des chaussées à fort trafic ou quelquefois en couche de base des chaussées à faible trafic .

Les cendres volantes chaux gypse et cendres volantes ciment sont utilisées uniquement en couches de fondation .

Les sables cendres volantes ont souvent de bonnes performances . Leurs résistances en traction sont souvent supérieures à 0,75 PMa .

Des liants routiers à base de cendres volantes peuvent être aussi élaborés en usine; ils se composent, par exemple, d'un mélange broyé de cendres volantes (75% à 80%), de gypse (5%), de chaux (10% à 20%) et sont utilisés comme les ciments mais avec des dosages légèrement supérieurs .

Ces matériaux permettent de concevoir par exemple des structures pour un trafic T2 (compris entre 150 et 300 poids lourds par jour et pour la voie la plus chargée), et T 3 (50 à 150 poids lourds) et pour une plate forme PF 2 de portance moyenne:

- Pour le trafic T2:

6 cm de béton bitumineux + 18cm de grave CV + 22 cm de CV - chaux

- Pour le trafic T3:

6 cm de béton bitumineux + 18 cm de grave cendres volantes + 18 cm de CV - chaux .

6 - Existe - t - il une possibilité d'application au Maroc ?

L'utilisation des liants hydrauliques en technique routière est toujours très intéressante pour les pays non producteurs de pétrole car elle permet:

- d'importer le moins possible de bitume,
- d'équilibrer le prix du bitume par l'utilisation d'une autre technique .

De plus l'utilisation des sous produits industriels, comme le laitier ou les cendres volantes, permet de sauvegarder l'environnement .

L'utilisation des laitiers ou des cendres volantes doit faire l'objet d'études préliminaires. On donne ci - après un exemple de proposition d'étude pour l'utilisation des cendres volantes .

Les compositions chimiques en pourcentage pondéral des cendres volantes françaises et marocaines sont présentées dans le tableau VI.

Tableau 6

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
CV français	43 à 54	22 à 32	4 à 15	1 à 8	1 à 3
CV marocain	50 à 53	25 à 28	12 à 15	1 à 1,5	2 à 2,5

Bien que pour comparer deux types de cendre volante il faille encore d'autres éléments tels que la surface spécifique, la courbe granulométrique, la réactivité à la chaux. . . , les éléments donnés dans le tableau VI montrent qu'il y a une

forte probabilité pour que les cendres volantes marocaines puissent être utilisées de façon similaire aux cendres volantes françaises .

On devra vérifier la réactivité de ces cendres volantes sur des éprouvettes de sables puis sur les graves, réaliser des chantiers expérimentaux, optimiser les formulations et les structures pour bien les adapter aux besoins du pays .

7- CONCLUSION

L'utilisation des matériaux traités aux liants hydrauliques présente de grands avantages pour le Maroc. Elle permet de diversifier la technique de construction routière. L'utilisation des sous produit comme les laitiers et les cendres volantes permet d'économiser les liants traditionnels comme le ciment et de sauvegarder l'environnement .

Bibliographie

- (1) Directive SETRA - LCPC. Spécifications relatives aux granulats .
(2) Directive SETRA - LCPC. Réalisation des chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques. Juin 1983 . (3) Directive SETRA - LCPC. Réalisation des chaussées en sables traités aux liants hydrauliques, Février 1985 .

- Normes AFNOR sur les matériaux traités aux liants hydrauliques en technique routière .

- P. Andrieux et J.H. colombel - Utilisation des cendres volantes en technique routière. Bull. Liaison Labo P. et C. Mai Juin 1976 . N° 83 Réf 1825

- J. Bonnot, Nguyen Dac Chi - Résultats des essais croisés sur cendres volantes sulfocalcique et laitiers granulés réalisés en France en Union soviétique. Bull. liaison labo .P et C. Jan 1990 .

- Nguyen Dac Chi - Nouvelles méthodes d'essais en laboratoire des graves traités aux liants hydrauliques. Bull. Liaison des P. et Ch. Sep 1977 N° 91 - Réf 2090

- Nguyen - Dac - Chi - Etude du comportement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques. Bulle. liaison Labo P. et Ch. Sept 1981. N° 115 - Réf 2586.