

LTCC* – les limons traités pour assises de chaussées à faible trafic

La raréfaction des ressources en granulats dans certaines régions et le renchérissement des transports ont incité maîtres d'œuvre, organismes techniques et entreprises à rechercher des solutions alternatives, notamment en faisant appel aux techniques permettant de valoriser les matériaux disponibles localement. Dans cette optique, le traitement des limons en place prend toute sa signification.



▲ Vue générale d'exécution d'une plate-forme industrielle. Assises en limon traité à la chaux et au ciment.

La construction routière nécessite des quantités importantes de granulats. En France, la consommation annuelle s'élève en effet à environ 200 millions de tonnes. Le caractère assez restrictif des spécifications routières fait que seules certaines catégories de matériaux sont couramment utilisées : ce sont essentiellement des alluvions et des matériaux provenant des roches massives. Les limons, des formations superficielles extrêmement répandues dans certaines régions, ont été trop longtemps considérés comme des matériaux de caractéristiques médiocres et d'importance secondaire en technique routière. Le traitement en place des limons pour l'exécution des remblais et des couches de forme s'est largement développé ces trente dernières années en France.

L'extension de son domaine d'emploi aux assises de chaussées s'est déroulée progressivement. Dans un premier temps, cette technique a été utilisée pour réaliser des chaussées à faible trafic (zones pavillonnaires, parkings, centres commerciaux, plates-formes industrielles, etc.). Actuellement, on évalue le tonnage annuel de limon traité en couches d'assises à faible trafic entre 3 et 5 millions de tonnes.

Ensuite, le champ d'application de cette technique a été élargi aux chaussées à trafic moyen à lourd, où son utilisation a dépassé aujourd'hui le stade expérimental. Elle se répand de plus en plus dans les chaussées des routes départementales, où elle est utilisée jusqu'au niveau de la couche de base (régions du nord de la France). Sur les routes nationales, elle va actuellement jusqu'au niveau de la fondation. À ce jour, on compte plus de 50 km de routes à fort trafic réalisées avec une assise en LTCC. Cet intérêt croissant pour la technique, nous le devons à la conjonction de deux phénomènes : une meilleure connaissance des performances mécaniques des limons traités et du comportement des structures, et une amélioration notable des performances et de la fiabilité des matériels de traitement en place.

L'objet de cette documentation technique est de présenter une synthèse des connaissances et des règles de l'art relatives à la technique du traitement en place des limons à la chaux et au ciment en vue de leur utilisation en assises de chaussées à faible trafic.

* *Limons traités à la chaux et/ou au ciment.*

Un béton à l'épreuve du temps

Pour résister aux fortes sollicitations, rien n'égale les performances du béton. C'est en tout cas l'opinion des responsables de la chambre de commerce et d'industrie chargés de gérer au quotidien l'exploitation de l'aéroport de Marseille-Provence. La preuve en est que pour faire face à l'extension du trafic aérien, plus de 36 000 m² de béton sont mis en œuvre en un semestre sur des taxiways et des parkings pour gros porteurs.

Depuis la libéralisation de l'espace aérien, les activités de trafic passagers et de fret de l'aéroport de Marseille-Provence sont en augmentation. Ces perspectives de développement encourageantes ont amené la chambre de commerce et d'industrie Marseille-Provence (CCIMP) à lancer un vaste programme d'extension et de rénovation de la plate-forme aéroportuaire. Sur les 370 millions de francs d'investissements prévus sur trois ans, 33 millions vont à la réfection ou à la création de voies d'accès et d'aires de stationnement pour avions gros porteurs, soit une surface totale de 36 500 m².



▲ Plus de 20 000 m³ de béton ont été mis en œuvre en l'espace de 7 mois sur la plate-forme aéroportuaire de Marseille-Provence. Ce chantier de grande envergure fait appel à des moyens humains et matériels importants.

DE FORTES SOLLICITATIONS

L'évolution du trafic aérien est marquée par l'augmentation du tonnage des avions, à l'image du Boeing 747. Cette tendance n'est pas sans conséquences, les structures des chaussées existantes ayant été dimensionnées à l'époque de leur construction pour supporter un trafic plus léger. Ce problème affecte davantage les aires de stationnement que les pistes, du fait de l'importance des sollicitations entraînées par les manœuvres. "Le maître d'ouvrage a décidé de démolir et de reconstruire plusieurs aires de stationnement datant des années cinquante et soixante, qui présentaient des cassures et des épaufrures importantes, explique

Henri Delhomme, chef de la subdivision Travaux au service spécial des Bases aériennes Sud-Est, maître d'œuvre des travaux. Ces trois parkings totalisent une surface de 12 500 m²."

UNE STRUCTURE À HAUTE RÉSISTANCE

L'ancienne structure était constituée d'une dalle en béton de 28 cm d'épaisseur, supportée par une couche d'enrobés de 4 cm. Pour éviter tout risque d'affaissement ou de cassure aux angles des dalles, elle a été remplacée par un système très performant constitué d'une dalle de béton de 38 cm d'épaisseur et d'une fondation de béton maigre de 20 cm, l'ensemble



▲ Le béton acheminé par camion est déversé à l'avant de la machine à coffrages glissants.

Ces travaux s'inscrivent dans une longue tradition d'utilisation de la technique de la dalle béton, qui remonte aux années cinquante. "Depuis 1991, environ 100 000 m² de parkings et de taxiways ont été réalisés à l'aide de cette technique, précise Alain Balduini, chef du département Travaux neufs à la direction technique de la CCIMP. Il était logique de continuer à faire appel à une solution qui donne entière satisfaction."



▲ Les flancs ondulés des dalles primaires solidarisent les dalles de béton entre elles afin d'assurer un transfert de charges parfait.

reposant sur une assise traitée de façon à offrir la portance requise (module EV2, déterminé à la plaque, supérieur à 50 MPa). "Lors des premières interventions menées en décembre 1996, nous avons dû excaver sur une profondeur de 58 cm puis traiter les zones les plus faibles du fond de forme en purgeant et en apportant des matériaux plus résistants", explique Pierre Curat, conducteur de travaux à l'entreprise CMR, alliée à Chantiers Modernes sous le statut d'une société en participation (SEP) pour faire face à l'ampleur du chantier. "Cette année, nous avons choisi de recharger sur 30 cm d'épaisseur avec les matériaux produits par le concassage des an-

Principaux intervenants

- **MAÎTRE D'OUVRAGE :**
chambre de commerce et d'industrie
Marseille-Provence
- **MAÎTRE D'ŒUVRE :** service spécial
des Bases aériennes Sud-Est
- **ENTREPRISE :** groupement
CMR-Chantiers Modernes
- **FOURNISSEUR DU CIMENT :**
cimenterie Lafarge Ciments de La Malle

ciennes dalles en béton. La réutilisation des matériaux du site est une technique écologique, car elle épargne les ressources des carrières et limite la mise en décharge de gravats, une pratique amenée à disparaître."

24 000 M² DE TRAVAUX NEUFS

Cette particularité mise à part, les techniques mises en œuvre pour la réhabilitation et la création de nouvelles structures en béton sont similaires. "La largeur d'exécution des bandes de béton, fixée à 5 m pour les zones rénovées, est portée à 7,50 m pour les travaux neufs, souligne Claude Mériaux, directeur des Travaux chez CMR. L'intérêt de travailler avec une plus grande largeur est d'offrir un meilleur rendement, nécessaire à la réalisation de l'ouvrage principal du projet : une nouvelle aire de stationnement d'une surface de 18 000 m²." Cette plate-forme dédiée au fret est reliée aux autres parkings par une bretelle d'accès d'une surface de 6 000 m², également en construction, constituée d'une dalle béton de 38 cm. "L'ensemble des ouvrages neufs en béton totalise 24 000 m²", précise Henri Delhomme.

CONCEPTION POUSSÉE DANS LE DÉTAIL

La première étape des opérations de mise en œuvre du béton consiste à tapisser le fond de forme par un géotextile, une disposition demandée par le maître d'œuvre pour écarter tout risque de contamination du sol et mieux répartir les charges. "Dosé à 160 kg de ciment par mètre cube, ce béton maigre est mis en œuvre avec une des deux machines à coffrages glissants affectées à ce chantier, à savoir une CMI SF 250 évoluant en 5 m de large et une CMI SF 450 montée en 7,50 m." L'engin suit avec des palpeurs les références de direction et de hauteur délivrées

COMPOSITION DU BÉTON DE ROULEMENT (POUR 1 M³)

Ciment CPI-CEM II/B 32,5 R (Lafarge)	350 kg
Sable 0, 1/4	680 kg
Gravillons 6/14	210 kg
Gravillons 14/20	330 kg
Gravillons 20/40	690 kg
Entraîneur d'air	0,045 %
Plastifiant 228	0,45 %
Eau	150 l
Affaissement au cône d'Abrahams	2 cm

COMPOSITION DU BÉTON MAIGRE (POUR 1 M³)

Ciment CPI-CEM II/B 32,5 R (Lafarge)	160 kg
Sable 0, 1/4	880 kg
Gravillons 6/14	210 kg
Gravillons 14/20	330 kg
Gravillons 20/40	700 kg
Entraîneur d'air	0,045 %
Plastifiant 228	0,6 %
Eau	140 l

par des fils tendus, positionnés avec précision sur toute la longueur des bandes à réaliser, soit 165 m. Cette fondation peut alors recevoir le béton de roulement, dosé à 350 kg, une valeur classique pour les bétons routiers. "Ce type d'application demande de travailler avec des bétons très fermes, afin de limiter la porosité du béton, reprend Pierre Curat. Outre les adjuvants plastifiants réducteurs d'eau et entraîneurs d'air, la formulation comprend un sable naturel, qui augmente la maniabilité du béton."

MISE EN ŒUVRE ÉLABORÉE

L'exécution de ce béton fait appel à un mode opératoire particulier. La machine



▲ Des goujons montés sur des paniers métalliques sont positionnés à l'aplomb du futur joint de dalle. Ce dispositif transfère les charges d'une dalle à l'autre sans entraver les mouvements de dilatation.



▲ Une pelle hydraulique déverse du béton sur les goujons afin de les immobiliser avant le passage de la machine à coffrages glissants.



▲ Une taloche automatique montée à l'arrière de la machine effectue dans un mouvement de va-et-vient un premier lissage de la surface du béton. L'opération est complétée par un lissage manuel à la taloche. Une toile de jute traînée à l'arrière de la passerelle complète la finition.

réalise lors d'une première phase les bandes impaires, puis vient combler les bandes intermédiaires. "Pour réaliser les bandes primaires, on équipe la machine à coffrages glissants de joues comportant un profil sinusoïdal, poursuit le conducteur de travaux. Cette ondulation imprimée sur les flancs du béton solidarise les bandes paires et impaires, et garantit ainsi la planéité de l'ensemble de la plate-forme." Un système de goujons assure la même fonction dans le sens transversal, au niveau des joints de dalles (trame de 7,50 m x 7,50 m). "Les goujons sont montés sur des paniers métalliques qui les positionnent à mi-



▲ Un produit de cure protège le béton de la dessiccation pendant les premières heures nécessaires à la montée en résistance.

GÉRER DES À-COUPS DE CHANTIER

Pour ne pas gêner l'activité aéroportuaire, l'entreprise est contrainte de mettre en œuvre des moyens importants pendant toute la durée des travaux de béton, soit entre décembre 1996 et juin 1997. Elle peut ainsi intervenir rapidement en tout point du site, au moment estimé le plus judicieux par la maîtrise d'ouvrage. "La capacité de réaction demandée est telle qu'il a fallu mobiliser deux machines à coffrages glissants, une centrale à béton de 350 m³/h capable de fonctionner par à-coups, et des effectifs atteignant 40 personnes, explique Xavier Batut, directeur de la section grands travaux en béton de CMR. Pour linéariser au mieux notre activité, nous nous servons de la grande aire de parking comme d'un 'chantier tampon' sur lequel nous pouvons travailler à n'importe quel moment sans gêner l'exploitation de l'aéroport."

Les sautes d'activité touchent également les livraisons de ciment. Bien que la capacité de stockage de la centrale soit conséquente (2 silos de 100 tonnes), elle ne correspond qu'à la moitié de la consommation quotidienne moyenne. "Nous travaillons quasiment en flux tendu, précise Gérard Benvenuto, responsable régional routes pour le Sud-Est chez Lafarge Ciments. Cette opération demande beaucoup de réactivité. En période de pointe, il nous est arrivé de livrer 1 000 tonnes de ciment par jour."

UN ENTRETIEN MINIME

Le béton présente plusieurs avantages par rapport aux chaussées en enrobés : "Ce matériau plus durable est insensible aux agressions chimiques du kérosène, et ne nécessite aucun entretien particulier, si ce n'est une réfection des joints tous les 10 ans, explique Henri Delhomme. En revanche, les zones en enrobés demandent des interventions régulières pour sceller les fissures, et un traitement au printemps et à l'automne pour éliminer les herbes qui poussent dans les interstices. En règle générale, l'exploitation de zones en béton demande beaucoup moins d'interventions."

Le mot de la fin revient à Alain Balduini, de la CCIMP : "Le béton est une technique éprouvée de longue date. Son coût est sensiblement équivalent à celui des autres procédés. Je ne vois pas pourquoi nous prendrions des risques en faisant appel à d'autres solutions." ■



▲ Quand elle progresse en clavage, la machine prend comme référence la hauteur des bandes existantes situées de part et d'autre. Le guidage en direction est donné par un fil.

épaisseur, soit 19 cm, précise Pierre Curat. Ces paniers sont placés à l'avancement de la machine à l'aplomb du futur joint. Quand le béton a fait prise, un trait de scie impose une fissuration nette à l'endroit désiré. Le trait est ensuite élargi pour permettre de combler le joint avec un système d'étanchéité à base d'élastomère."



▲ La centrale est configurée sur ce chantier pour fournir 150 à 180 m³/h de façon discontinue – alors qu'elle pourrait atteindre 350 m³/h avec une configuration légèrement différente par montage d'un pré-malaxeur –, gâchées de 7 m³, afin de répondre aux à-coups des travaux.

LES LIMONS

● DÉFINITION

Pour le géotechnicien, le limon désigne une fraction granulométrique intermédiaire entre argile et sable, c'est-à-dire la fraction granulométrique 2 µm-20 µm et, par extension, une famille de sols où cette fraction prédomine. Pour le géologue, la classification des limons se fait suivant un critère génétique. Il distingue :

- les limons éluviaux, résultant d'une altération sur place du substratum,
- les limons colluviaux, formés par entraînement d'éléments par l'eau courante ou par gravité,
- les limons alluviaux, les plus répandus, formés par accumulation d'éléments transportés par un fluide (air ou eau) en mouvement. Ils sont essentiellement représentés par les limons éoliens, comme les "loess".

● IMPORTANCE ET SITUATION DES LIMONS

Les limons sont des formations superficielles extrêmement répandues, souvent morcelées, si bien que la carte géologique ne les représente pas toujours et ne rend pas bien compte de leur grande étendue. Ils se rencontrent constamment dans les travaux de terrassement lors de la création de nouveaux équipements industriels ou urbains, et dans les chantiers de terrassements routiers et autoroutiers. Les nombreux travaux réalisés récemment, en particulier dans les régions Nord, Picardie, Normandie, Bretagne et Ile-de-France, ont dû s'accommoder de ces matériaux. Leur épaisseur excède souvent 5 mètres, et parfois même 10 mètres dans le nord de la France.

Malgré leur grande étendue et la diversité des roches dont ils émanent, les limons sont caractérisés globalement et classés du point de vue géotechnique, conformément à la classification des sols établie par le SETRA et le LCPC (norme NF P 11 300).

LES LIANTS

Deux types de liants sont successivement utilisés dans la technique de traitement en place des limons. Il s'agit de la chaux aérienne et du ciment.

● LA CHAUX AÉRIENNE

La chaux aérienne se présente sous les deux formes suivantes :

- la chaux vive, qui est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO, à plus de 80 %. Elle est obtenue par calcination du calcaire à 1 000 °C ;

b) la chaux éteinte, qui est obtenue par hydratation (ou extinction) de la chaux vive. Elle contient principalement de l'hydroxyde de calcium Ca (OH)₂.

Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau.

Les caractéristiques des chaux aériennes à usage routier sont définies dans la norme NF P 98 101.

● LES CIMENTS

En France, les ciments utilisés doivent être conformes à la norme NF P 15 301 et certifiés conformes par l'AFNOR.

ACTION DES LIANTS SUR LES LIMONS

● CAS DE LA CHAUX AÉRIENNE

Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des limons, grâce à trois types d'action distincts :

ACTION SUR LA TENUEUR EN EAU

Elle dépend du type de chaux utilisé, qui se détermine en fonction de la teneur en eau naturelle du limon à traiter.

● Cas des limons humides

On cherche à abaisser la teneur en eau pour se rapprocher des conditions optimales de réemploi. On fait alors appel à la chaux vive, qui permet de diminuer la teneur en eau sous l'action conjuguée de trois phénomènes :

- apport en produit sec,
- consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux vive,
- évaporation d'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage.

En moyenne, la diminution de la teneur en eau d'un limon traité à la chaux vive est de l'ordre de 2 % pour 1 % de chaux.

● Cas des limons secs

On peut utiliser soit la chaux vive, soit la chaux éteinte, soit le lait de chaux.

Pour des raisons pratiques, il est souvent fait appel au traitement à la chaux vive. Mais la diminution de la teneur en eau qui en résulte nécessite une humidification du matériau après traitement au ciment pour se rapprocher des conditions optimales de compactage.

MODIFICATIONS IMMÉDIATES DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES

Dès l'incorporation de la chaux dans le limon, les fines particules argileuses s'agglomèrent en éléments plus grossiers et friables. Ce phénomène, appelé floculation, s'explique par la formation de ponts Ca (OH)₂ entre les feuillettes d'argile.

Au laboratoire, on constate :

- une diminution de l'indice de plasticité I_p ou, ce qui revient au même, de la valeur de bleu VBS ;
- une augmentation de l'indice portant immédiat IPI ;
- un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité maximale et augmentation de la teneur en eau optimale.

Sur chantier, un limon humide perd immédiatement son caractère collant pour prendre un aspect sableux, homogène. Sa manipulation devient aisée, son comportement à la mise en œuvre et sa portance sont nettement améliorés. L'homogénéité qu'il acquiert le place dans des conditions idéales pour subir le traitement au ciment.

En général, un faible dosage en chaux, de l'ordre de 1 %, suffit pour déclencher ces modifications.

MODIFICATIONS À LONG TERME

La chaux, en tant que base forte, élève le pH du limon et favorise la mise en solution de l'alumine et de la silice. Il se forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre les grains. Les performances mécaniques s'en trouvent améliorées, mais pas suffisamment pour permettre d'utiliser le limon-chaux en assises de chaussées.

● CAS DU CIMENT

Les réactions du ciment avec un limon, préalablement traité à la chaux, consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : c'est la prise hydraulique.

C'est la croissance des microcristaux formés, leur enchevêtrement, leur feutrage progressif, qui enrobent et relient les grains du matériau entre eux, formant en quelque sorte des ponts de plus en plus nombreux et solides. Ce qui conduit rapidement au durcissement du mélange, à l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées et à sa stabilité à l'eau et au gel.

UTILISATION DES LIMONS TRAITÉS EN ASSISES DE CHAUSSÉES

L'utilisation des limons traités à la chaux et au ciment en assises de chaussées exige un soin particulier non seulement au niveau de la conception des ouvrages et de leur dimensionnement, mais aussi au niveau des études de traitement en laboratoire et de l'exécution sur chantier.

● CONCEPTION

La conception des chaussées à faible trafic en limons traités à la chaux et au ciment est définie dans le *Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic* (SETRA-LCPC/1981).

Ce manuel fixe les conditions d'utilisation de ces matériaux selon les critères suivants.

CRITÈRES DE DÉFORMABILITÉ DE LA PLATE-FORME

Le manuel prévoit des solutions d'amélioration (couche de forme) chaque fois que la portance du sol au moment des travaux est inférieure à $P = P_2$ ($6 < \text{CBR} < 10$).

Les améliorations nécessaires sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : choix des couches de forme en fonction des impératifs de chantier

Portance	Améliorations nécessaires			
	Portance prévisible de la plate-forme à court terme	Épaisseur de la couche traitée en place	Épaisseur de la couche de forme non traitée	Nouvelle portance
$P = P_0^*$ $\text{CBR} < 3$	35 cm	50 cm		P_2
$P = P_1$ $3 < \text{CBR} < 6$	20 cm	30 cm		P_2

* De plus, si ce niveau de portance nulle $P = P_0$ caractérise aussi la portance à long terme de la plate-forme, la solution d'une couche de forme sera associée à des travaux de drainage.

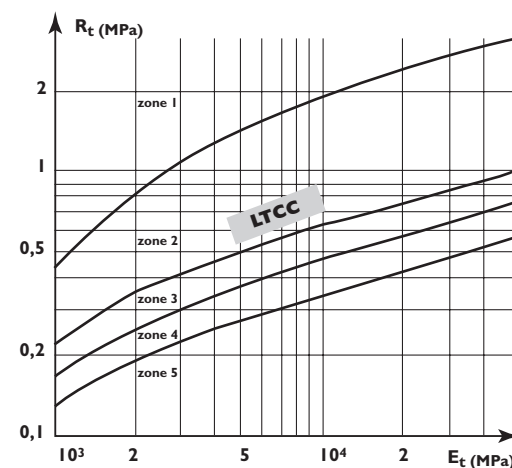
QUALITÉ DES LIMONS TRAITÉS

Le matériau limon-chaux-ciment doit posséder des caractéristiques mécaniques suffisantes pour être utilisé en assises de chaussées.

Le manuel de conception (SETRA-LCPC/1981) définit trois classes de résistance pour les limons-chaux-ciment en fonction de leur résistance à la traction directe R_t et de leur module de déformation E_t mesurés à 180 jours. Il est à souligner que ces matériaux sont déclassés de deux classes par rapport à une grave traitée ou un sable traité ayant les mêmes caractéristiques mécaniques (R_t , E_t).

La figure 1 – extraite du manuel – fournit les différentes classes de résistance correspondant aux matériaux d'assises traitées aux liants hydrauliques.

Figure 1 : Classes de résistance. E_t , R_t sont mesurés à 180 jours. (Extrait du Manuel de conception SETRA-LCPC.)



Classe de résistance selon la zone du graphique

Classe	GH, SH, CV	LTCC
1	Zone 1	
2	Zone 2	
3	Zone 3	Zone 1
4	Zone 4	Zone 2
5	Zone 5	Zone 3, 4, 5

Nota : l'utilisation des matériaux de classe 5 n'est pas envisagée dans ce document.

● DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement de la chaussée à assises en limons traités s'effectue en deux étapes :

- choix de la couche de surface,
- dimensionnement de l'assise.

CHOIX DE LA COUCHE DE SURFACE

Le manuel de conception SETRA-LCPC définit la couche de surface minimale requise par cette technique. L'épaisseur de cette couche est fonction de la classe du trafic à la mise en service. Le choix de l'épaisseur est donné dans le tableau 2 :

Tableau 2 : choix de la couche de surface	
Classe de trafic à la mise en service	Épaisseur de la couche de surface* en BB (cm)
t ₅	6 cm BB 0/10
t ₄	8 cm BB 0/14
t ₃₋	10 cm BB 0/14
t ₃₊	solution non prévue

*Pour certaines voiries de zones pavillonnaires ou des parkings à usage exclusif de véhicules légers, la couche de surface peut être ramenée à 3 cm d'épaisseur.

DIMENSIONNEMENT DE L'ASSISE

Le manuel de conception permet le dimensionnement de l'assise à partir d'abaques établies pour les limons traités de classe 3 et de classe 4.

Le dimensionnement est effectué :

- en lisant sur l'abaque l'épaisseur "h" qui dépend du trafic cumulé "N" et de la couche de surface choisie ;

- en lui rajoutant un terme correcteur "Δ h" qui est fonction de la portance de la plate-forme à long terme P.

Le tableau 3 constitue une fiche de structures types pour les limons traités à la chaux et au ciment. Elle est établie à partir de l'abaque du manuel correspondant aux matériaux de classe 4 par hypothèses suivantes : durée de service, 20 ans, et taux de croissance annuel du trafic, 4 %.

● LES ÉTUDES DE TRAITEMENT

La diversité des limons susceptibles d'être traités à la chaux et au ciment, tant en ce qui concerne leur nature qu'en ce qui concerne leur teneur en eau naturelle, ne permet pas de proposer une formulation générale. Dans chaque cas, une étude géotechnique est donc nécessaire.

L'objectif de cette étude consiste à déterminer les liants à employer et les dosages à appliquer en fonction :

- des caractéristiques des limons,
- des performances recherchées des limons traités,
- éventuellement des matériels utilisés.

Elle doit comporter deux phases : la qualification des limons à traiter, et la formulation des limons traités.

LA QUALIFICATION DES LIMONS À TRAITER

Elle a pour but de fournir, à partir de sondages de reconnaissance et d'essais en laboratoire, une description des terrains rencontrés avec principalement :

- leur regroupement en familles homogènes et représentatives, conformément à la "Classification des sols" établie par le SETRA et le LCPC – norme NF P 11 300,

Tableau 3 : planche de structures limons traités à la chaux et au ciment

		Portance à long terme p					
		p = P ₁ ou (3 < CBR ≤ 6)		p = P ₂ ou (6 < CBR ≤ 10)		p = P ₃ ou (10 < CBR ≤ 20)	
		Vérifier que la portance à court terme est au moins égale à P ₂					
Classe de trafic à la mise en service t	t ₆ 0 - 10 PL/j	cloutage + enduit 35 cm	3 cm BB 0/10 LTCC	cloutage + enduit 32 cm	3 cm BB 0/10 LTCC	cloutage + enduit 30 cm	3 cm BB 0/10 LTCC
	t ₅ 10 - 25 PL/j	cloutage + enduit 38 cm	6 cm BB 0/10 LTCC	cloutage + enduit 34 cm	6 cm BB 0/10 LTCC	cloutage + enduit 30 cm	6 cm BB 0/10 LTCC
	t ₄ 25 - 50 PL/j	cloutage + enduit 40 cm	8 cm BB 0/14 LTCC	cloutage + enduit 36 cm	8 cm BB 0/14 LTCC	cloutage + enduit 32 cm	8 cm BB 0/14 LTCC
	t ₃₋ 50 - 100 PL/j	cloutage + enduit 41 cm	10 cm BB 0/14 LTCC	cloutage + enduit 37 cm	10 cm BB 0/14 LTCC	cloutage + enduit 33 cm	10 cm BB 0/14 LTCC

Nota : pour les LTCC d'épaisseur > 35 cm, seuls des malaxeurs performants permettent de réaliser le traitement en une seule couche.

- la localisation dans l'espace (profils en long et en travers) ainsi que les volumes disponibles.

Cette étude permet, avec une garantie suffisante, de préjuger l'intérêt que peut présenter le traitement des limons en vue d'une utilisation en assises de chaussées, des problèmes qu'ils risquent de poser et donc des solutions qu'il conviendra d'apporter. Elle doit être réalisée et interprétée par un géotechnicien compétent et expérimenté. Il convient donc de caractériser ces limons au regard des paramètres significatifs vis-à-vis du traitement et de les classer du point de vue géotechnique conformément à la "Classification des sols" – norme NF P 11 300.

Celle-ci regroupe ces paramètres en deux grandes familles :

● Paramètres de nature

Ils caractérisent ce qui ne varie pas, ou peu, ni dans le temps ni au cours des manipulations que peut subir un sol lors de la mise en œuvre. Les paramètres de nature à considérer sont la granularité et l'argilosité.

La **granularité** est définie dans les normes NF P 94 056 et NF P 94 057. La connaissance de D_{max} (dimension du plus gros élément) et du tamisat à $80\ \mu\text{m}$ déterminent respectivement le choix des engins de malaxage et de la méthode de travail.

Du point de vue granularité, la "Classification des sols" (norme NF P 11 300) place les limons dans la catégorie des sols fins de classe A, caractérisée par :

- $D_{max} \leq 50\ \text{mm}$,
- tamisat à $80\ \mu\text{m} > 35\ \%$.

Ces caractéristiques sont adaptées à l'utilisation de malaxeurs performants du type "pulvérisateurs à arbre horizontal" permettant d'obtenir l'homogénéité requise pour des assises de chaussées.

L'**argilosité** caractérise à la fois la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. On peut la mesurer à l'aide de l'un ou l'autre des paramètres suivants :

- l'**indice de plasticité I_p** , défini par la norme NF P 94 051 ;
- la **valeur de bleu de méthylène VBS**, définie par la norme NF P 94 068.

Du point de vue argilosité, la "Classification des sols" (norme NF P 11 300) regroupe les limons en trois sous-classes :

- sous-classe A_1 , qui représente les limons peu plastiques, définie par :
 $I_p \leq 12$ ou $VBS \leq 2,5$;
- sous-classe A_2 , qui représente les limons moyennement plastiques, définie par :
 $12 < I_p \leq 25$ ou $2,5 < VBS \leq 6$;
- sous-classe A_3 , qui représente les limons très plastiques, définie par :
 $25 < I_p \leq 40$ ou $6 < VBS \leq 8$.

La connaissance de l'argilosité permet d'évaluer, en première approximation, le dosage en chaux à utiliser pour annihiler les argiles contenues dans le limon.

● Paramètres d'état

Ces paramètres ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Le paramètre d'état le plus déterminant est l'état hydrique du sol, qui s'exprime par le rapport $\frac{w_{NAT}}{w_{OPN}}$ entre la teneur en eau naturelle et la teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal du sol considéré.

Du point de vue "état hydrique", la "Classification des sols" (norme NF P 11 300) regroupe les limons de chacune des sous-classes A_1 , A_2 et A_3 en 5 sous-classes : ts (très sec), s (sec), m (moyen), h (humide) et th (très humide), dans l'ordre croissant de l'humidité.

Cette caractéristique est déterminante car elle conditionne à la fois le choix du type de chaux à utiliser (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux), le bon déroulement des réactions de prise et de durcissement, et la qualité de la mise en œuvre, du malaxage et du compactage.

LA FORMULATION DES LIMONS TRAITÉS

L'objectif est de déterminer les dosages en chaux et en ciment à incorporer successivement dans le limon à étudier pour satisfaire aux trois critères suivants :

- le premier critère est relatif à la vérification de l'aptitude du limon à être traité. Elle se fait à partir de "l'essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques", défini par la norme NF P 94 100. Si les résultats de cet essai sont négatifs, il est alors souvent justifié de procéder à des mesures des teneurs de certains constituants chimiques susceptibles d'avoir perturbé l'action des liants, tels que les matières organiques et les nitrates (effet inhibiteur), les sulfures et les sulfates (effet de gonflement) et les chlorures (effet accélérateur de prise et de durcissement avec risque de gonflement) ;
- le deuxième critère est relatif à l'exécution. On recherche le dosage en chaux capable de conférer au limon étudié une portance immédiate suffisante afin d'assurer sa mise en œuvre correcte : aptitude au compactage et à supporter la circulation des engins de chantier ;
- le troisième critère est relatif à la tenue dans la structure. On recherche le dosage en ciment à incorporer au mélange limon-chaux pour lui conférer les performances mécaniques exigées d'un matériau d'assises.

● Recherche de la portance immédiate

On étudie l'évolution de l'indice portant immédiat IPI (CBR sans surcharges) en fonction du dosage en chaux pour différentes teneurs en eau représentatives de l'état naturel.

Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau ou traduits en une abaque indiquant, pour une teneur en eau naturelle donnée, le dosage nécessaire à l'obtention du niveau de portance visé.

La valeur minimale recommandée de l'IPI à la teneur en eau du chantier peut être fixée à $IPI = 8$.

Dans le cas où la teneur en eau naturelle du limon est faible, le dosage minimal en chaux de 1 % sera retenu.

● Recherche des performances mécaniques exigées

L'objectif général est de déterminer le dosage en ciment à incorporer au mélange limon-chaux pour atteindre les performances mécaniques exigées pour un matériau d'assises.

Celles-ci sont appréciées par le couple résistance à la traction et module de déformation du matériau (R_t , E_t), paramètres indispensables au dimensionnement des chaussées.

La méthodologie de l'étude consiste donc à étudier l'évolution des paramètres R_t et E_t , à des âges bien définis (7 j, 28 j, 90 j et 180 j), en fonction des dosages en ciment, des plages de variation des teneurs en eau et des compacités prévisibles sur le chantier, et de l'éventualité d'apparition de gel ou d'immersion.

Les paramètres R_t et E_t sont mesurés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre $\varnothing = 5$ cm et de hauteur $H = 5$ cm.

La confection des éprouvettes et leur conservation doivent être conformes à la norme NF P 98 230-2.

La détermination du couple (R_t , E_t) se fait à partir de l'essai de compression diamétrale (essai brésilien) conformément à la norme NF P 98 232-3.

Le couple (R_t , E_t) permet de définir la classe de résistance du limon traité selon la classification définie à la figure 1.

EXÉCUTION

● TRAITEMENT TYPE

L'exécution des travaux de traitement des limons à la chaux et au ciment suit, en règle générale, le processus suivant :

- ouverture du limon au ripper, au scarificateur ou au malaxeur ;
- épandage de la chaux (vive ou éteinte, ou lait de chaux), poids au mètre carré indiqué par le laboratoire ;
- malaxage, nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier ;
- compactage partiel et réglage fin ;
- réouverture du matériau ;
- épandage du ciment, poids au mètre carré indiqué par le laboratoire ;
- malaxage , nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier ;
- arrosage éventuel suivi d'un malaxage ;
- compactage partiel, nombre de passages du compacteur à déterminer sur chantier ;
- réglage fin ;
- cloutage ;
- compactage final et protection superficielle.

● CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

Il est illusoire d'espérer gagner du temps et de la production en supprimant le prétraitement à la chaux ou en réunissant les deux liants. Chaque liant a un rôle bien spécifique :

- la chaux floccule les argiles et assèche les matériaux humides ;

- le ciment apporte ensuite une rigidification rapide.

Les conséquences d'un prétraitement à la chaux sont :

- facilité de manutention du sol ;
- amélioration des conditions de circulation des engins de chantier ;
- homogénéité accrue du mélange final.

En pratique, le traitement à la chaux se fait au déblai. Le matériau traité est alors :

- soit enlevé et mis en remblai ;
- soit laissé sur place dans l'attente du traitement au ciment.

Dans les deux cas, il subit un compactage et un réglage simple à la cote définitive plus une légère surépaisseur (10 % de l'épaisseur de la couche au maximum) pour juger de la bonne répartition du matériau.

Le traitement au ciment se fait alors de manière traditionnelle, en prenant soin de vérifier au préalable que les teneurs en eau sont correctes.

Le délai entre traitement à la chaux et traitement au ciment dépend de l'organisation du chantier. Les deux traitements sont souvent enchaînés dans la même journée.

ÉPANDAGE

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant, il est préférable de retenir un épandeur à contrôle pondéral, asservi à la vitesse d'avancement.



▲ Épandage du liant.



▲ Contrôle de l'épandage du liant.

La vérification de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisée par la méthode dite "à la bêche".

MALAXAGE

Pour assurer une bonne homogénéité du mélange et une profondeur homogène du malaxage, il est impératif de retenir un malaxeur à rotor horizontal.



▲ Malaxage.

Le malaxage doit conduire à une granularité apparente 0/20.

D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller – lorsqu'on traite par bandes jointives – à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordure des bandes.

La profondeur du malaxage se règle par un dispositif prévu sur les machines de malaxage. Des vérifications peuvent être faites sur le matériau traité par sondage.

COMPACTAGE

L'atelier de compactage ainsi que le nombre de passes nécessaires seront définis sur une planche d'essais de compactage.

Le compactage doit suivre sans tarder la fin du malaxage :

- d'une part, pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries (pluies, vent) ;
- d'autre part, parce que le délai de maniabilité autorisé par le ciment est relativement court (de 2 à 4 heures).



▲ Compactage.

Par ailleurs, certains rouleaux vibrants peuvent provoquer un feuilletage superficiel. Ce phénomène réduit la résistance de la couche traitée vis-à-vis des efforts générés par le trafic et crée une discontinuité verticale dans la chaussée.

On atténue le phénomène en limitant les interventions des cylindres vibrants à ces niveaux et surtout en veillant au maintien de l'humidité du matériau lors du compactage. Des mesures complémentaires doivent être prises lors du réglage.

RÉGLAGE

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrtage des bosses. Le rabotage permet, en outre, l'évacuation de la partie superficielle feuilletée, éventuellement produite lors du compactage au cylindre vibrant.

Cette opération doit s'intercaler entre le compactage partiel et le compactage final sous peine d'être très vite difficile à réaliser à cause de la rigidification rapide du matériau traité. Elle se fait le plus souvent à la niveleuse, éventuellement guidée (fil ou laser), ou bien, sur les chantiers importants, à la raboteuse guidée.

Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués.

L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm).

PROTECTION DU LIMON TRAITÉ

Elle est destinée à protéger la couche d'assise des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic de chantier.

Lorsque la chaussée comporte deux couches de limon traité exécutées à intervalles rapprochés (2 jours maximum), la

protection de la première couche peut être assurée par une simple pulvérisation d'eau.

Par contre, il est indispensable de prévoir sur la couche finale une protection particulière destinée à favoriser l'accrochage du béton bitumineux, et réalisée dans les plus brefs délais après la fin de la mise en œuvre du limon traité.

La formulation du produit de protection pourra être la suivante :

- cloutage par un gravillon 10/14 à raison de 10 l/m² légèrement compacté au cylindre lisse ;
- émulsion cationique (pH > 4) à 65 % de bitume, dosée à 1,2 kg/m² ;
- gravillonnage par un gravillon 4/6 à raison de 6 à 8 l/m² suivi d'un léger cylindrage.



▲ Protection de l'assise de limon traité.

CONCLUSION

L'utilisation des limons traités en place à la chaux et au ciment en assises de chaussées à faible trafic est une technique parfaitement au point.

Son développement est dû à plusieurs raisons : la raréfaction des matériaux d'assises de chaussées dans certaines régions, l'accroissement du prix du transport des granulats, et des problèmes d'environnement et d'ouverture de carrières et de balastières.

Ses avantages sont nombreux : la facilité d'extraction due au caractère meuble des limons, la valorisation d'un matériau excédentaire qui aurait été mis en décharge, l'économie en énergie de transport, le traitement se faisant sur place, le coût plus faible que celui des techniques d'assises classiques.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic SETRA LCPC/1981.
- 2 - Catalogue de structures des chaussées à faible trafic pour l'Île-de-France - LROP - Mai 1984.
- 3 - Guide technique "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques" - SETRA/LCPC, 1997.
- 4 - La chaux dans le traitement des sols - Fiches techniques. Chambre syndicale nationale des fabricants de chaux grasses et magnésiennes.
- 5 - Documentation technique CIMBÉTON.
- 6 - M. Boutonnet, J. Livet : Influence du traitement des limons sur leur comportement au gel - BLPC n° 133 - sept.-oct. 1984.
- 7 - G. Morel : Étude en laboratoire du traitement à la chaux et au ciment des sols fins - BLPC n° 133 - sept.-oct. 1984.
- 8 - Nguyen Dac Chi - J. Mulders : Comportement en fatigue des sols fins traités à la chaux et au ciment - BLPC n° 133 - sept.-oct. 1984.
- 9 - P. Perret : Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins à la chaux : étude globale du phénomène et applications. Thèse docteur-ingénieur - INSA de Rennes - 1977.
- 10 - J. Abdo : Étude expérimentale de la stabilisation des arènes granitiques à la chaux. Thèse docteur-ingénieur - École des Mines - Paris - INSA de Rennes - 1982.
- 11 - D. Puiatti : La chaux, un matériau d'avenir pour la route. Revue *Ciments, bétons, plâtres, chaux* n° 785 - 4/1990.
- 12 - D. Puiatti - J. Puig - M. Schaeffner : Traitement des sols à la chaux aérienne et aux ciments. Méthodologie des études en laboratoire. BLPC n° 124 - mars-avril 1983.
- 13 - A. Rigot : Comportement et dimensionnement des structures comprenant des couches en sols fins traités aux LH. Stage traitement des sols de l'ENPC - Lille, du 9 au 12 avril 1991.
- 14 - M. Schaeffner : Le traitement en place des sols à la chaux et aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Stage traitement des sols de l'ENPC - Lille, du 9 au 12 avril 1991.

CIM *Béton*

Tél. : 01 55 23 01 00 - Fax : 01 55 23 01 10

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS
7, place de la Défense - LA DÉFENSE 4
92974 Paris-la-Défense Cedex