

Guide technique

Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Application à la réalisation des assises de chaussées



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement
durables

pages laissée intentionnellement blanche

Guide technique

Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Application à la réalisation des assises de chaussées

Edité par le Sétra, réalisé par le Comité français pour les techniques routières (CFTR)

Le CFTR est une structure fédérative qui réunit les différentes composantes de la communauté routière française afin d'élaborer une expression de l'état de l'art partagée par tous et servant de référence aux professionnels routiers dans les domaines des chaussées, des terrassements et de l'assainissement routier.

Actions principales du CFTR

- établissement de documents exprimant l'état de l'art,
- élaboration d'avis techniques sur l'aptitude à l'emploi de procédés, produits et matériels, ainsi que de documents de qualification pour les matériels,
- délivrance d'agrément pour les laboratoires routiers,
- mise en œuvre de procédures de certification et de conformité aux normes.



Comité français pour les techniques routières

10 rue Washington 75008 Paris

téléphone : 33 (0)1 44 13 32 84 - télécopie : 33 (0)1 42 25 89 99

mél : cftr@usirf.com

internet : <http://www.cftr.asso.fr>

Ce guide a été rédigé, dans le cadre des activités du comité sectoriel «méthodologie» du Comité français pour les techniques routières (CFTR), par un groupe de travail constitué de représentants du Réseau scientifique et technique du ministère chargé de l'Équipement, des directions techniques des entreprises et des collectivités territoriales.

Son contenu a fait l'objet d'une enquête de validation auprès des différents adhérents du CFTR.

L'animation du groupe de travail a été assurée par Jean-Claude Auriol (LCPC Nantes), et Daniel Puiatti (Groupe Lhoist).

Comité de rédaction :

- Joseph Abdo (Cimbéton, centre professionnel)
- Georges Aussedat (UNPG)
- Jean-Michel Balay (LCPC)
- Jean-Pierre Benaben (CETE du Sud-Ouest – LRPC Toulouse)
- Pierre Bense (Entreprise SCREG)
- Joël Bosse (Entreprise Eurovia)
- Christian Boucheny (DREIF - LROP)
- Maurice Bufalo (Entreprise Valérian)
- Ludovic Casabiel (Cimbéton, centre professionnel)
- Jean-Hugues Colombel (CETE Normandie-Centre - LRPC Rouen)
- Alain Destombes (DREIF - LROP)
- Alain Fevre (CETE Normandie-Centre - LRPC Rouen)
- Daniel Gandille (Entreprise Guintoli)
- Honoré Goacolou (Entreprise Eurovia)
- Philippe Hauza (Entreprise Colas)
- René Hiernaux (CETE Nord-Picardie – LRPC Saint-Quentin)
- Yves Jolivel (Conseil Général de Seine-Maritime)
- Michel Kergoët (DREIF - LREP)
- Yves Lacot (Entreprise CE&RF)
- François Miersman (Société Surschiste)
- Pascal Oger (Société Rincent BTP)
- Daniel Pierron (CETE de l'Est - LRPC Nancy)
- Alain Quibel (CETE Normandie-Centre - CER Rouen)
- Bernard Roussel (CETE Normandie-Centre - LRPC Blois)
- Dominique Seigneur (CETE de l'Est - LRPC Nancy) † (*Décédé*)
- Jean-Claude Vautrin (Sétra)
- Jacques Vecoven (Holcim)
- François Verhee (Usirf)
- Yves Vincent (Entreprise Eurovia)



Sommaire

1 - Introduction	5
2 - Études	9
2.1 - Les types de sols objet du guide	9
2.2 - Progressivité des études	10
2.3 - Caractérisation du gisement	12
2.3.1 - Consistance minimale de la reconnaissance géotechnique	12
2.3.2 - Évaluation de l'homogénéité du gisement	12
2.3.3 - Critère de résistance mécanique de la fraction granulaire	14
2.4 - Études de formulation	14
2.4.1 - Objectifs de l'étude de formulation	14
2.4.2 - Nécessité d'un pré-traitement à la chaux	14
2.4.3 - Choix du liant pour l'étude de formulation	14
2.4.4 - Échantillon de sol soumis à l'étude	15
2.4.5 - Étude complète	15
2.4.6 - Étude réduite	16
2.4.7 - Identification des constituants	16
2.4.8 - Essais de référence pour le compactage	16
2.4.9 - Étude de la stabilité immédiate	16
2.4.10 - Éprouvettes	17
2.4.11 - Conservation	19
2.4.12 - Performances	20
2.4.13 - Étude de sensibilité des performances mécaniques	20
3 - Dimensionnement et conception	23
3.1 - Données trafic	24
3.1.1 - Classes de trafic T_i	24
3.1.2 - Classes de trafic cumulé TC_i	24
3.1.3 - Agressivité du trafic	25
3.2 - Classes de plates-formes	26
3.3 - Paramètres de dimensionnement	26
3.3.1 - Matériaux	26
3.3.2 - Conditions d'interface	30
3.4 - Conception de la chaussée	30
3.4.1 - Domaine d'emploi	30
3.4.2 - Qualités minimales	30
3.4.3 - Types de structures	31
3.4.4 - Couches de surface	31
3.4.5 - Dispositions constructives	31

3.5 - Vérification au gel	31
3.6 - Exemples de dimensionnement	32
3.6.1 - Premier exemple (tableau 26)	32
3.6.2 - Deuxième exemple (tableau 27)	34
4 - Réalisation	37
4.1 - Préambule	37
4.2 - Préparation des matériaux	38
4.2.3 - Pré-traitement à la chaux	38
4.2.4 - Constitution des stocks et reprise	38
4.2.5 - Humidification	39
4.2.6 - Convenance des méthodes retenues	39
4.3 - Fabrication	40
4.3.1 - Niveau de qualité des matériels de traitement pour assises de chaussées	40
4.3.2 - Traitement en place	44
4.3.3 - Traitement en centrale	45
4.4 - Transport et mise en œuvre	46
4.4.1 - Transport des mélanges	46
4.4.2 - Mise en œuvre	46
4.5 - Protection superficielle	47
4.5.1 - Particularités liées à la nature des sols traités	47
4.5.2 - Les sollicitations mécaniques	47
4.5.3 - Les sollicitations climatiques	47
4.5.4 - Les différents types de protection superficielle	48
4.5.5 - Choix du type de protection superficielle	50
4.6 - Le contrôle de la qualité	52
5 - Abréviations - symboles - définitions	59
6 - Références bibliographiques	63
7 - Annexes	67
7.1 - Annexe A	68
7.2 - Annexe B	69
7.3 - Annexe C	71
7.4 - Annexe D	72



1 - Introduction

Connue et pratiquée depuis plusieurs siècles – certaines voies romaines sont toujours là pour en témoigner – la technique du traitement des sols connaît un fort développement depuis les années 60. Parmi les pays qui se sont engagés dans cette voie, la France fait partie de ceux qui ont obtenu le plus d'avancées par la maîtrise successive du traitement des matériaux de remblais, puis de couches de forme, puis de chaussées. Ces avancées sont dues aux efforts conjugués de tous les acteurs concernés : donneurs d'ordres, prescripteurs, entrepreneurs, constructeurs de matériels et producteurs de liants qui ont cherché à valoriser au mieux les sols traités par une caractérisation rationnelle de leurs propriétés et une amélioration des procédés, des matériels et des produits. Le tableau 1 synthétise schématiquement le processus. Il met en évidence de manière très nette les influences réciproques, et surtout, il montre comment un document de prescription, aboutissement logique de toute une démarche de progrès, peut devenir à son tour l'initiateur d'une nouvelle étape.

C'est ainsi que la publication, en 1981, du "Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic" par le Sétra et le LCPC [2], et les nombreuses déclinaisons sous forme de catalogues de structures régionaux [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] qui ont suivi, ont donné le coup d'envoi à l'utilisation de sols fins traités en assises de chaussées. Depuis, cette application s'est développée, notamment dans les régions pauvres en granulats capables de répondre aux spécifications en usage. Une solide expérience a alors pu se constituer grâce à l'engagement de toute une profession, convaincue d'apporter une réponse économique à la question clé de la gestion optimisée des ressources

naturelles, préoccupation majeure de la problématique du « Développement Durable ».

Pour que le développement de cette application se poursuive dans les meilleures conditions, les partenaires de la construction routière ont ressenti le besoin de synthétiser leur expérience sous la forme du présent guide. Ce guide met particulièrement l'accent, pour un bon comportement des ouvrages, sur l'importance des études préalables, de la conception des projets et de la réalisation des travaux. Il a également pour ambition de réduire les risques inhérents au manque d'homogénéité des matériaux naturels en détaillant les exigences en matière de dispositions particulières et de savoir-faire spécifique, en complément des règles de l'art habituelles relatives aux techniques traditionnelles.

Le guide s'appuie sur les connaissances acquises sur les différentes phases de mise en oeuvre de la technique, par ailleurs publiées dans les divers documents ou normes auxquels il se réfère. Il se positionne plutôt comme un complément à ces documents et, à ce titre, peut être considéré comme une suite au guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » du Sétra et du LCPC (GTS) [4] publié en janvier 2000 et dont la structure deviendrait alors :

- Partie A : Notions générales
- Partie B : Traitement des sols en remblai
- Partie C : Traitement des sols en couche de forme
- Partie D (le présent guide) : Traitement des sols en assises de chaussées

A la différence du GTS toutefois, les catégories de sols prises en considération dans ce document ont été volontairement limitées, en écartant les matériaux pour lesquels :

- les références ou expériences existantes ne sont pas suffisamment étoffées ou probantes pour être retenues ;
- aucune référence d'application n'est connue.

Aussi le guide se limite-t-il dans un premier temps au cas de certains sols naturels.

C'est la raison pour laquelle il se présente comme un guide méthodologique qui doit être décliné localement par des documents d'application, par exemple sous forme de guides régionaux dont certains existent déjà (*cf.* bibliographie).

Afin de garantir une approche technique équivalente à celle utilisée pour les matériaux traditionnels à base de granulats (grave non traitée (GNT), grave traitée au liant hydraulique (GTLH), grave-bitume (GB), etc.), la démarche suivante a été adoptée :

- Après collecte des informations et documents disponibles sur le sujet, l'analyse a porté plus particulièrement sur les informations provenant des chantiers, depuis les études de sols et la formulation de leur traitement jusqu'à l'évaluation du comportement des chaussées dans le temps, sous trafic.
- Ce travail a montré la nécessité d'adapter le contenu de chacune des phases de réalisation d'un projet (étude du sol, étude de formulation, conception, réalisation, contrôles) en fonction :
 - de la nature, de la variabilité et de la connaissance antérieure du sol dont le traitement est envisagé ;
 - de l'application prévue (couche de fondation et/ou couche de base) ;
 - du type et de l'importance des sollicitations futures ;
 - des risques acceptés compte tenu des enjeux du projet.

En effet, il n'est pas inutile de rappeler qu'un parking pour véhicules légers ne présente pas du tout le même niveau de sollicitation et de risque qu'une route de transit.

- Un intérêt tout particulier a été accordé aux études préalables et au fait que la possibilité d'utiliser un sol est subordonnée à la nécessaire connaissance des résultats des études, réalisées avec le sol du projet, et à un minimum d'expériences locales.
- Enfin, les possibilités et limites d'emploi des sols traités en couches d'assises ont été définies à partir :
 - de l'existence ou non d'applications représentatives ;
 - du suivi du comportement de chaussées permettant de porter un avis sur leur pérennité et sur leur mode d'évolution.

C'est l'ensemble de cette démarche qui a permis de définir les caractéristiques à prendre en compte pour la conception et le dimensionnement des structures.

Il faut signaler que la publication du présent guide se produit simultanément avec l'achèvement d'une étape importante dans les travaux de normalisation européenne sur le même sujet. Il s'agit notamment de la publication des normes de la série NF EN 14227 parties 10 [71], 11 [72], 12 [73], 13 [74] et 14 [75], qui définissent les spécifications des sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques (voir les références précises dans la bibliographie). En parfaite cohérence avec ces normes, il précise les modalités des études, les paramètres de dimensionnement des structures, ainsi que les conditions de fabrication et de mise en œuvre des matériaux. Ainsi, le suivi des indications de ce guide ne pourra que faciliter la bonne application des normes en question.

	1965	1975	1985	1995	
Evolution du matériel	Matériel agricole	Malaxeur spécifique à rotor arrière Epandeur volumétrique non asservi	Malaxeur à rotor central Epandeur volumétrique asservi	Malaxeur nouvelle génération Epandeur pondéral à largeur variable Centrale de malaxage	Malaxeur de forte puissance Arroseuse enfouisseuse
Evolution des produits	Chaux et Ciments	Chaux et Ciments	Apparition des liants hydrauliques routiers	Développement des liants hydrauliques routiers	Liants à faible émission de poussière
Evolution de la codification		Recommandation sur le traitement à la chaux Sétra-LCPC (1972)	Recommandation pour la réalisation des Terrassements Routiers (RTR) Sétra-LCPC (1976) Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic Sétra-LCPC (1981) [2]	Guide Réalisation des Terrassements Routiers (GTR) Sétra-LCPC (première édition 1992) NF P 98-115 Exécution des corps de chaussées [33]	Guide Traitement des Sols à la chaux et liants hydrauliques pour remblais et couches de forme (GTS)- Sétra-LCPC (2000) [4] NF P 98-114-3 Méthodologie d'étude des sols traités utilisés en assises [32]
Étapes	Usage occasionnel	Début de la formulation	Connaissance du comportement Développement	Rationalisation de la démarche Optimisation du dimensionnement	Maîtrise des procédés
Application				Forme/fondation - Assises	
				Couches de forme	
				Remblais	

Tableau 1 : historique du développement et de la maîtrise du traitement des sols en France





2 - Études

2.1 - Les types de sols objet du guide

Les catégories de sols, suivant la NF P 11-300 [16], qui sont considérés dans ce guide, sans préjuger de leur caractère homogène ou non, sont listées ci-après :

- les sols fins ayant plus de 35 % de tamisat à 80 μm . Dans le cas d'un usage en assise de chaussée, il est appliqué une limitation de la taille des grains et de l'argilosité. Il ne sera donc retenu dans ce guide que les sols A_1 et A_2 ;
- les sols de type sable ($D \leq 6,3$ mm) présentant un tamisat à 80 μm inférieur à 35 % et une argilosité notable ($VBS > 0,2$). Ils peuvent être utilisés sur des routes du réseau local. Ils correspondent aux sols de type B_2 , B_5 et B_6 . Dans le cas d'un usage en assises de chaussées, une limite doit être appliquée sur l'argilosité maximum : par manque d'expérience,

on limitera la VBS maximum à 1 pour les B_2 et 2,5 pour les B_6 suivant le taux de fines du sable. Il ne sera donc retenu dans ce guide que les sols B_5 et certains sols B_2 et B_6 ;

- les sols de type grave ($D > 6,3$ mm) présentant moins de 35 % de tamisat à 80 μm et une $VBS > 0,1$. Ils correspondent à la catégorie B_i . Dans le cas d'un usage en assises de chaussées, une limite est appliquée à la taille maximum des grains et à l'argilosité. Il ne sera retenu dans ce guide que les sols B_3 , B_5 et certains sols B_4 et B_6 .

Ainsi les deux principaux critères limitant l'usage des sols en assises de chaussées sont la taille maximum des grains et l'argilosité. Sur cette base, les sols qui font l'objet de ce guide, sont résumés dans le tableau 2.

Types de sol concernés dans ce guide après élaboration éventuelle		Critères limitatifs		
		Argilosité	Granularité en mm	
			D_{max} (*)	D (**)
Sols fins	A_1, A_2	$VBS < 5$ ou $I_p < 20$	$\leq 31,5$	≤ 20
Sols sableux	B_5, B_6	$VBS < 2,5$	≤ 8	$\leq 6,3$
	B_2	$0,2 < VBS < 1$		
Sols graveleux	B_5, B_6	$VBS < 2,5$	$\leq 31,5$	≤ 20
	B_3, B_4	$0,1 < VBS < 1$		

(*) D_{max} : dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol (selon NF P 11-300) [16]

(**) D : dimension maximale de tamis pour laquelle le passant est compris entre 80% et 99%

Tableau 2 : critères d'argilosité et de taille granulaire des sols utilisables en assises

Le critère d'argilosité utilisé pour qualifier les sols est soit la VBS soit l' I_p (NF P 94-051) [22]. La VBS (NF P 94-068) [24] ou valeur de bleu de méthylène d'un sol, est différente de la MB (NF EN 933-9) [60] utilisée dans la norme granulats XP P 18-545 [76]. Elles mesurent la même propriété dans des conditions propres à chaque matériau et l'expriment différemment. On peut admettre une correspondance approchée entre ces 2 mesures du type :

$$VBS = 0,1 \times (MB) \times (\text{tamisat à } 2 \text{ mm}) / 100$$

La plupart des sols visés par la norme NF P 11-300 [16] nécessiteront une préparation pour leur donner une homogénéité minimale définie dans les paragraphes suivants en 2 niveaux H1 ou H2. Ce travail de préparation peut s'effectuer sur le site d'extraction du sol par diverses opérations de stockage, criblage ou mélange. Le guide demande alors l'évaluation du gisement pour qualifier la régularité du sol en place et la nécessité d'effectuer ou non des opérations de préparation rendant ces sols homogènes. La classification du sol en homogénéité, décrite au paragraphe 2.3.2, correspondra alors à son état final avant traitement pour un éventuel emploi en assise de chaussée.

2.2 - Progressivité des études

Pour éviter d'aboutir à des impasses (techniques, économiques, de délais, ...), la plus grande attention doit être portée à la pertinence des questions qu'il convient de formuler à chaque stade d'avancement du projet.

Les éléments habituellement considérés pour définir le contenu d'une étude de traitement pour assises de chaussées sont indiqués dans le tableau 3.

L'application complète de cette démarche d'étude est indispensable pour les chantiers présentant des enjeux techniques et économiques importants, et pour lesquels on envisage de retenir un traitement de sols en solution de base du dossier de consultation des entreprises (DCE).

Dans le cas où le marché est ouvert à variantes, le DCE doit préciser que l'entreprise doit fournir à l'appui de son offre les éléments de caractérisation du gisement et d'étude de formulation, tels qu'ils sont définis au stade projet du tableau 3.

Contenu de l'étude	Réponses attendues	Stade du projet habituellement concerné
<p>Collecte des données documentaires disponibles (cartes géologiques, fichiers d'éléments géotechniques et météorologiques, dossiers d'étude de chantiers comparables, etc.)</p> <p>Recueil de l'expertise locale, notamment concernant la présence possible d'éléments perturbateurs dans le sol. En l'absence d'expérience locale positive, évaluation de l'aptitude du sol au traitement à l'aide d'essais de gonflement accéléré selon la norme NF EN 13286-49 [68] complétés par des essais de résistance en traction indirecte selon la norme NF EN 13286-42 [65] sur une autre série d'éprouvettes confectionnées et conservées conformément à la norme NF EN 13286-49 [68]</p> <p>Analyse et synthèse de ces éléments dans la perspective du traitement de sol appliqué au projet de couche d'assise envisagé</p>	<p>Possibilité technique d'envisager l'utilisation du sol traité en assises de chaussées</p>	<p>Étude préliminaire</p>
<p>Caractérisation sommaire du gisement réservé à la couche d'assise de chaussée à partir des éléments de la reconnaissance géologique et géotechnique générale du tracé</p> <p>Si nécessaire, exécution de quelques sondages (tarière, pelle, etc.) complémentaires pour une caractérisation plus fine du gisement</p> <p>Etablissement d'une synthèse de l'ensemble de ces éléments</p>	<p>Confirmation de l'aptitude au traitement du sol situé dans le gisement réservé à la couche d'assise</p> <p>Evaluation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des volumes de sol utilisables ; - des techniques et des matériels d'exécution ; - du (ou des) produit(s) de traitement le(s) mieux adapté(s) et des quantités nécessaires probables, afin d'établir un pré-dimensionnement (technique, économique, délais d'exécution) de la solution 	<p>Avant-projet</p>
<p>Finalisation de la caractérisation du gisement, constitution d'échantillons représentatifs et exécution d'une étude de formulation afin de préciser les dosages à appliquer en fonction des performances recherchées et, le cas échéant, des états hydriques prévisibles (une partie plus ou moins importante de ces études de formulation peut être reportée au niveau des études d'exécution réalisées en cours de travaux si les délais de réponse de l'étude le permettent)</p>	<p>Établissement des règles régissant les dosages à appliquer en fonction de la nature et de l'état des sols et du niveau des performances mécaniques visé</p> <p>Caractérisation et localisation des gisements</p> <p>Eléments sur les matériels et les méthodes d'exécution les mieux adaptés techniquement</p>	<p>Projet (*)</p>

(*) La réalisation des études au stade « Projet » nécessite une durée de l'ordre de 3 mois au minimum à 1 an selon le niveau de connaissance préalable que l'on a du sol et des emplois régionaux de ce sol traité en assises de chaussées.

Tableau 3 : contenu des études et réponses attendues en fonction du stade du projet

2.3 - Caractérisation du gisement

Le gisement à caractériser peut être, selon le cas :

- un gisement de sols naturels en place : cas d'un matériau à extraire d'un déblai routier ou d'une zone d'emprunt. C'est ce cas qui est traité dans la suite du document ;
- un stock de matériau ayant fait l'objet d'une fiche technique sol (FTS, voir annexe A) ou d'un document similaire établi à partir d'essais d'identification réalisés au fur et à mesure de la constitution du stock (un essai au minimum par 500 m³). Dans ce cas, l'évaluation de l'homogénéité du stock est faite en appliquant les mêmes critères que ceux qui sont définis pour le premier cas ;
- un stock de matériau n'ayant pas fait l'objet d'essai d'identification lors de sa constitution. En l'état, ce stock ne peut être utilisé. Il est cependant possible de revenir au cas précédent en procédant à un déstockage et à une reconstitution d'un stock identifié.

L'identification des lots de sol homogène prêt à l'emploi est faite ensuite au moyen d'une fiche technique sol (annexes A et B). Elle distingue 2 niveaux d'homogénéité de sol, H1 et H2. Le niveau H3 caractérise la limite d'emploi.

2.3.1 - Consistance minimale de la reconnaissance géotechnique

Les sondages de reconnaissance et l'observation visuelle des matériaux prélevés permettent, dans un premier temps, de réaliser un regroupement en familles géologiques de matériaux visuellement similaires.

Chacune de ces familles est alors caractérisée par un nombre minimum d'essais d'identification géotechnique qui est fonction du volume de matériau à exploiter.

A défaut d'autres indications, on peut évaluer ce minimum à partir des éléments du tableau 4.

(V) volume de couche de chaussée à réaliser (m ³)	Nombre minimal d'essais pour caractériser chaque famille de sols	
	Nature du sol	État d'humidité
$V \leq 10^4$	9	16
$V > 10^4$	$9 V / 10^4$	$16 V / 10^4$

Tableau 4 : nombre minimal d'essais pour caractériser les familles de sols

2.3.2 - Évaluation de l'homogénéité du gisement

L'homogénéité des familles géologiques de sols est alors évaluée comme suit :

- cas des sols fins A1, A2 : l'identification de ces sols comporte systématiquement des essais de caractérisation de leur argilosité, VBS en principe pour les sols A1, Ip (ou VBS) pour les sols A2.

On considère que le matériau présente une argilosité homogène si les mesures de VBS ou d'Ip ont une étendue relative (e_r) ≤ 40 %. Si ce n'est pas le cas, il convient de juger (à ce stade de l'étude) si des dispositions particulières - de tri par exemple - à condition qu'elles soient réalistes, permettent de déterminer des sous-familles de sols du gisement respectant cette homogénéité.

Ce découpage éventuel étant fait, on réalise des essais « Proctor Normal » selon la norme NF P 94-093 [25] ou « Proctor non modifié » selon la norme NF EN 13286-2 [64], sur les échantillons extrêmes de ces familles ou sous-familles et l'on juge l'homogénéité du matériau comme indiqué dans le tableau 5 (ci-contre).

- Cas des sols sableux ou graveleux B2, B3, B4, B5, B6 :

pour ces sols, qui comportent une fraction granulaire et des fines argileuses, l'identification des échantillons comporte nécessairement des essais VBS et granulométriques (tamisat à 80 µm, tamisat à 2 mm, Dmax) réalisés sur les échantillons prélevés lors des sondages.

Si les matériaux prélevés présentent un Dmax incompatible avec un emploi en couche de chaussée (Dmax > 31,5 mm), les prélèvements sont écrêtés

à D = 31,5 mm (juger la faisabilité in situ d'un tel écrêtage).

Les résultats des essais VBS et granulométriques pratiqués sur les échantillons avant écrêtage sont alors recalculés pour caractériser le matériau écrêté.

On procède alors à une première analyse de l'homogénéité des résultats afin de juger si un tri, une préparation ou un découpage en zones facilement identifiables au moment des travaux est a priori nécessaire.

On juge alors l'homogénéité du gisement ou des zones ainsi déterminées selon le tableau 6.

Niveau d'homogénéité	Étendue relative des mesures de ρd OPN (e_r) (*)	Étendue relative des mesures de VBS ou I_p (e_r) (*)	Utilisation possible en assises de chaussées
H1	$e_r \leq 4 \%$	$e_r \leq 40 \%$	Fondation de chaussées de trafic $\leq T1$ Base de chaussées de trafic $\leq T3$
H2	$4 < e_r \leq 6 \%$	$e_r \leq 40 \%$	Fondation de chaussées de trafic $\leq T2$ Base de chaussées de trafic $\leq T4$
H3	$e_r > 6 \%$	$e_r \leq 40 \%$	Non utilisable en assises de chaussées

(*) e_r : rapport entre l'étendue des mesures et la moyenne de ces mesures.

Tableau 5 : classement et utilisation des sols fins traités A1 et A2 selon leur niveau d'homogénéité

Niveau d'homogénéité	Critères d'homogénéité retenus					Utilisation possible en assises de chaussées
	e_r^{**} de VBS ⁽¹⁾		Passant à 80 µm		e^* du passant à 2mm ^{***}	
			moyenne	e^*		
H1	$\leq 40 \%$	et	$\leq 15 \%$	$\leq 6 \%$	et	$\leq 20 \%$
			$> 15 \%$	$\leq 8 \%$		
H2	$\leq 40 \%$	et	$\leq 15 \%$	$\leq 8 \%$	et	$\leq 30 \%$
			$> 15 \%$	$\leq 12 \%$		
H3	$> 40 \%$	ou	$\leq 15 \%$	$> 8 \%$	ou	$> 30 \%$
			$> 15 \%$	$> 12 \%$		

* e étendue des mesures

** e_r , rapport entre l'étendue des mesures et la moyenne de ces mesures

*** uniquement dans le cas des sols graveleux et des sols sableux moyens ou grossiers

(1) ne s'applique pas lorsque le VBS est inférieur ou égal à 0,2 e_r .

Tableau 6 : classement et utilisation des sols sableux et graveleux traités selon leur homogénéité

2.3.3 - Critère de résistance mécanique de la fraction granulaire

La résistance mécanique des matériaux est déterminée :

- pour les sols sableux, par la friabilité des sables (Fs) mesurée selon la norme NF P 18-576 [18] ;
- pour les sols graveleux, par le Los Angeles (LA) mesuré selon la norme NF EN 1097-2 [62], et le Micro Deval (MDE) mesuré selon la norme NF EN 1097-1 [61].

On définit ensuite le domaine d'emploi des matériaux selon le tableau 7.

2.4 - Études de formulation

2.4.1 - Objectifs de l'étude de formulation

L'étude doit fixer le dosage en liant hydraulique et éventuellement le dosage en chaux lorsqu'un pré-traitement s'avère nécessaire, la masse volumique apparente et la teneur en eau de compactage à retenir pour l'exécution du chantier. Elle donne les caractéristiques mécaniques servant au dimensionnement, la tenue à l'eau du mélange ainsi qu'une estimation de sa tenue au gel. Si la sensibilité des performances du mélange aux dispersions des paramètres de formulation n'est pas connue par des études antérieures, l'étude doit comporter cette analyse.

La norme méthodologique applicable aux sols retenus par le présent guide est la norme NF P 98-114-3 [32].

Deux types d'étude sont définis par la norme NF P 98-114-3 [32] : l'étude complète et l'étude réduite qui ne s'applique qu'aux mélanges largement éprouvés. Néanmoins, à partir du trafic $\geq T3$, il est nécessaire de réaliser une étude complète pour les mélanges éprouvés si l'expérience est insuffisante pour prévoir leur comportement à ce niveau de trafic.

2.4.2 - Nécessité d'un pré-traitement à la chaux

Dans l'application d'un traitement de sol en couche de forme, mais plus encore dans le cas de couches d'assises de chaussées, pour lesquelles plus de performances sont demandées, le rôle de la chaux n'est pas limité à la simple régulation de l'état hydrique du sol à traiter. Cette phase de régulation, extrêmement importante, doit déjà être prise en compte lors de la constitution des stocks de matériaux homogènes exploitables.

Dans ce document, l'action exigée de la chaux consiste à préparer le sol argileux à être mélangé harmonieusement avec un liant hydraulique. Pour ce faire, il est recherché un degré optimal de floculation des colloïdes argileux, qui fait évoluer le sol d'un état ramassé (empilement de feuillets d'argiles) à un état aéré ou floculé (arrangement désordonné), largement plus compatible avec la recherche de l'homogénéité requise du mélange. On cherche donc surtout à traiter le sol argileux à la chaux le plus intimement possible et non à enrober des agrégats de sols, même si la mouture du sol avant pré-traitement paraît visuellement satisfaisante (dimension des agglomérats < 20 mm).

Le pré-traitement des sols à faible plasticité s'avère également nécessaire, sauf étude de laboratoire démontrant le contraire. Cependant, il convient souvent de définir un dosage optimal à respecter, sous peine d'effet modérateur des performances mécaniques, voire d'effet néfaste, en cas de dépassement.

2.4.3 - Choix du liant pour l'étude de formulation

Dans le cas général, l'étude de formulation doit être réalisée pendant l'étude du projet par le maître d'œuvre. Comme il est assez souvent impossible de prévoir le liant qui sera utilisé par l'entreprise pour réaliser le chantier, il est recommandé de retenir, pour cette étude, un ciment normalisé provenant d'une cimenterie locale. Dans le cas général, le liant retenu est un CEM II A ou B 32,5 selon la norme NF EN 197-1 [57]. Le choix d'un liant routier pour

Type de sol	Couche de l'assise	Classe de trafic			
		$\leq T4$	T3	T2	T1
Sols sableux	Fondation	Fs < 50		Fs < 50	
	Base				
Sols graveleux	Fondation	E	E	E	D
	Base	E	D		

Tableau 7 : caractéristiques intrinsèques (XP P 18-545) [76]

cette étude n'est pertinente que s'il existe une bonne expérience de son utilisation avec le sol considéré et que son usage est courant localement. Les résultats des études réalisées avec le ciment, ou, éventuellement, le liant routier choisi, permettent de vérifier que la classe mécanique retenue pour le calcul du dimensionnement peut être obtenue. En outre, cette classe mécanique de référence sera utilisée ultérieurement pour juger les variantes proposées par les entreprises, conformément au fascicule 25 du cahier des clauses techniques générales (CCTG) [1].

2.4.4 - Échantillon de sol soumis à l'étude

L'étude de formulation est réalisée sur un échantillon de sol ou de mélange de sols, représentatifs du ou des gisements dont on prévoit l'utilisation (cf. chapitre 2.3), identifiés et d'homogénéités connues.

Cet échantillon doit faire l'objet de l'essai d'aptitude au traitement à l'aide d'essais de gonflement accéléré selon la norme NF EN 13286-49 [68] complétés par des essais de résistance en traction indirecte selon la norme NF EN 13286-42 [65] sur une autre série d'éprouvettes confectionnées et conservées conformément à la norme NF EN 13286-49 [68]. Cet essai doit prendre place le plus tôt possible dans le déroulement du projet afin de détecter les risques de gonflement ou de défaut de prise. Il est souhaitable de le réaliser au cours des études préliminaires ou d'avant-projet selon la démarche indiquée dans le tableau 3 du chapitre 2.2. Les résultats obtenus sont interprétés selon les critères figurant dans le tableau 8.

Lorsque le jugement de l'essai est « adapté », la poursuite de l'étude demeure obligatoire. Lorsque les résultats sont jugés « douteux », la poursuite de l'étude dépend du contexte du chantier (l'étude du traitement peut être poursuivie s'il existe un espoir d'amélioration par une augmentation des dosages, le choix d'autres liants ou un traitement préalable du sol). Dans les cas où le traitement est « inadapté », la solution étudiée est abandonnée.

2.4.5 - Étude complète

La méthodologie d'étude est décrite dans la norme NF P 98-114-3 [32].

L'étude complète qui est requise pour tous les mélanges dont l'expérience est limitée comporte :

- l'identification de l'échantillon de sols soumis à l'étude et, le cas échéant, des autres constituants ;
- l'identification des liants, chaux et activants ;
- l'étude des références de compactage par l'essai Proctor modifié selon la norme NF EN 13286-2 [64] ou normal selon la norme NF P 94-093 [25] ;
- l'étude de la stabilité immédiate par la détermination de l'indice de portance immédiate (IPI) selon la norme NF EN 13286-47 [67] ;
- la détermination de l'âge auquel la circulation de chantier est autorisée ;
- la mesure du délai de maniabilité selon la norme NF EN 13286-45 [66] (Des études sont actuellement en cours pour définir un mode opératoire adapté aux sols fins) ;
- l'évaluation de la tenue à l'eau et de la tenue au gel ;
- l'étude des performances mécaniques à long terme ;
- l'étude de l'effet des dispersions de composition sur les performances mécaniques ;
- la détermination de la formule de base.

Précisions relatives aux opérations de prétraitement à la chaux : si les conditions du chantier (cf. § 4.2.3) laissent supposer une modification du dosage en chaux, il est impératif de compléter l'étude de formulation par une étude de sensibilité au dosage en chaux en y intégrant les bornes minimales et maximales du pré-traitement. L'étude peut dans ce cas être conduite selon la même méthode que celle décrite dans la Norme NF P 98-114-3 [32] ou dans le tableau 14 du présent guide.

	Gonflement volumique G_v (%) (NF EN 13286-49) [68]		R_{it} (MPa) à 7j conservé à 40°C en immersion (NF EN 13286-42) [65]
Adapté	$G_v < 5$	et	$R_{it} > 0,2$
Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$	ou	$0,1 \leq R_{it} \leq 0,2$
Inadapté	$G_v > 10$	ou	$R_{it} < 0,1$

Tableau 8 : critères pour l'interprétation de l'aptitude au traitement

2.4.6 - Étude réduite

L'étude réduite qui ne s'applique qu'aux mélanges éprouvés (au sens de la norme NF P 98-114-3 [32] ne comprend pas les déterminations de l'âge autorisant la circulation de chantier, du délai de maniabilité ni de la tenue au gel. Les essais n'étant réalisés que sur une formulation, il n'est pas possible de modifier les dosages pour définir une formule de base différente.

Bien que la détermination de la sensibilité à l'eau ne soit pas requise par la norme, il est préconisé de déterminer cette propriété lors des études réduites : c'est souvent le seul critère qui indique la nécessité d'un traitement préalable à la chaux, notamment dans le cas des sols A1, B5 et B6.

2.4.7 - Identification des constituants

Les sols

L'échantillon utilisé, conforme à la FTS du lot de sol qu'il représente (*cf.* § 2.3 et annexe A), doit être identifié notamment par son origine et sa classification selon la norme NF P 11-300 [16] et par tout autre essai nécessaire (analyse chimique ou minéralogique par exemple).

Les liants et les chaux

Ils sont identifiés et vérifiés selon les normes applicables (NF EN 459-1 [58] et NF EN 14227-11 [72] pour les chaux, NF EN 197-1 [57] pour les ciments et NF P 15-108 [17], dans l'attente de la publication de la norme européenne en préparation NF EN 13282 [63], pour les liants hydrauliques routiers) ou par rapport aux avis techniques du CFTR ou équivalent.

2.4.8 - Essais de référence pour le compactage

Les normes de référence sont la norme NF EN 13286 2 [64] pour l'essai Proctor modifié, et la norme NF P 94-093 [25] pour l'essai Proctor normal.

On appliquera l'énergie de compactage suivante selon le type de sol étudié :

- l'énergie Proctor modifié pour les sables contenant moins de 35 % d'éléments inférieurs à 80 µm. Pour certains sables il est difficile d'atteindre sur chantier le niveau de densification du Proctor modifié (feuilletage, cohésion insuffisante). Si l'on dispose de données chantier, les conditions de confection des éprouvettes en laboratoire peuvent être ajustées ;
- l'énergie Proctor non modifié pour la plupart des autres sols. Il est cependant possible d'utiliser l'essai Proctor Modifié pour certains sols graveleux peu argileux, sous réserve que l'expérience prouve que la masse volumique sèche pouvant être normalement atteinte sur chantier avec ces sols traités soit compatible avec cet essai.

2.4.9 - Étude de la stabilité immédiate

La détermination de l'indice de portance immédiate est réalisée selon la norme NF EN 13286-47. Les seuils de portance dans le tableau 9 s'appliquent aux matériaux traités pour la teneur en eau de la formule d'étude.

Type de sol	IPI minimum
A ₁ et A ₂	20
B sableux	30
B graveleux	50

Tableau 9 : valeurs minimales de l'indice de portance immédiate sur chantier pour les matériaux traités



2.4.10 - Éprouvettes

Préparation des mélanges

Elle est réalisée suivant la norme NF P 98-230-3 [43].

Dimensions des éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes sont choisies en fonction du D du sol ou du mélange de sols étudiés. La correspondance est donnée dans le tableau 10.

Les éprouvettes Ø 16 x h 16 cm, Ø 16 x h 32 cm et Ø 10 x h 20 cm sont confectionnées selon la norme NF EN 13286-52 [69] ou NF EN 13286-53 [70], les éprouvettes Ø 5 x h 5 cm ou Ø 5 x h 10 cm ou Ø 10 x h 10 cm, selon la norme NF EN 13286-53 [70], même si les dimensions indiquées dans le tableau 10 ne sont pas toutes prévues par ces normes.

Modalités de confection des éprouvettes

Deux cas sont prévus pour tenir compte des difficultés de compactage des couches de fortes épaisseurs.

Cas 1 : couche d'épaisseur ≤ 30 cm. Par homogénéité avec les normes relatives aux méthodologies d'études des graves et sables traités pour assises de chaussée, les éprouvettes destinées aux essais de compression simple ou aux essais de traction (directe ou par compression diamétrale) sont compactées à une masse volumique sèche de 98,5 % de ρ_{de} à l'OPN ou 97 % de ρ_{de} à l'OPM selon le sol soumis à l'étude (cf. § 2.4.7). Le tableau 11 indique les modalités de confection à retenir pour les éprouvettes.

Cas 2 : couche d'épaisseur > 30 cm ou couche unique forme-fondation. Les éprouvettes destinées aux essais de compression simple sont compactées à une masse volumique sèche de 98,5 % de ρ_{de} à l'OPN ou 97 % de ρ_{de} à l'OPM selon le sol soumis à l'étude. Les essais de traction (par traction directe ou par traction indirecte) sont réalisés sur des éprouvettes compactées à une masse volumique sèche de 96 % de l'OPN ou de 95 % de l'OPM selon le sol soumis à l'étude. Le tableau 12 donne les modalités de confection relatives à ces essais.

Type de sol	$D^{(1)} \leq 6,3 \text{ mm}$	$6,3 \text{ mm} < D \leq 20 \text{ mm}$
A ₁ et A ₂	Ø 5 × h 5 cm (**)	Ø 5 × h 5 cm (*)
	Ø 5 × h 10 cm (**)	Ø 5 × h 10 cm (*)
	Ø 10 × h 10 cm	Ø 10 × h 10 cm
	Ø 10 × h 20 cm	Ø 10 × h 20 cm
B graveleux		Ø 16 × h 16 cm
		Ø 16 × h 32 cm
B sableux	Ø 5 × h 5 cm (**)	
	Ø 5 × h 10 cm (**)	
	Ø 10 × h 10 cm	
	Ø 10 × h 20 cm	
	Ø 16 × h 16 cm	
	Ø 16 × h 32 cm	

(1) D dimension maximale du tamis pour lequel le passant est compris entre 80 % et 99 % (voir tableau 2 du chapitre 2)

(*) essais réalisés sur la fraction 0-6 mm

(**) uniquement pour la mesure de R_t

Tableau 10 : dimensions des éprouvettes

Type de sol	Type d'essai	Élancement	Masses volumiques sèches d'étude (ρ_{d_e}) et teneurs en eau d'étude (w_e)	Mode de compactage
A ₁ et A ₂	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 98,5$ % de l'OPN $w_e = \text{OPN}$	statique double effet
	Résistance en traction indirecte et module	1		
B sableux (cf. tableau 2 + § 2.4.7)	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 97$ % de l'OPM $w_e = \text{OPM}$	vibro compression
	Résistance en traction indirecte et module	1		statique double effet ou vibro compression
	Résistance en traction directe et module	2		vibro compression
B graveleux (cf. tableau 2 + § 2.4.7)	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 98,5$ % de l'OPN $w_e = \text{OPN}$	statique double effet ou vibro compression
	Résistance en traction indirecte et module	1		
	Résistance en traction directe et module	2		
B graveleux (peu argileux, dont le comportement est connu, cf. tableau 2 + § 2.4.7)	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 97$ % de l'OPM $w_e = \text{OPM}$	statique double effet ou vibro compression
	Résistance en traction indirecte et module	1		
	Résistance en traction directe et module	2		

Tableau 11 : modalités de confection d'éprouvettes en fonction du sol et du type d'essai
Couches d'épaisseur ≤ 30 cm

Type de sol	Type d'essai	Elancement	Masses volumiques sèches d'étude (ρ_{d_e}) et teneurs en eau d'étude (w_e)	Mode de compactage
A ₁ et A ₂	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 98,5$ % de l'OPN $w_e = \text{OPN}$	statique double effet
	Résistance en traction indirecte et module	1	$\rho_{d_e} = 96$ % de l'OPN $w_e = \text{OPN}$	
B sableux (cf. tableau 2 + § 2.4.7)	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 97$ % de l'OPM $w_e = \text{OPM}$	statique double effet ou vibro compression
	Résistance en traction indirecte et module	1	$\rho_{d_e} = 95$ % de l'OPM $w_e = \text{OPM}$	
	Résistance en traction directe et module	2		vibro compression
B graveleux (cf. tableau 2 + § 2.4.7)	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 98,5$ % de l'OPN $w_e = \text{OPN}$	statique double effet ou vibro compression
	Résistance en traction indirecte et module	1	$\rho_{d_e} = 96$ % de l'OPN $w_e = \text{OPN}$	
	Résistance en traction directe et module	2		
B graveleux (peu argileux, dont le comportement est connu, cf. tableau 2 + § 2.4.7)	Résistance en compression simple	2	$\rho_{d_e} = 97$ % de l'OPM $w_e = \text{OPM}$	statique double effet ou vibro compression
	Résistance en traction indirecte et module	1	$\rho_{d_e} = 95$ % de l'OPM $w_e = \text{OPM}$	
	Résistance en traction directe et module	2		

Tableau 12 : modalités de confection des éprouvettes en fonction du sol et du type d'essai
Couches d'épaisseur > 30 cm ou couche unique forme-fondation

2.4.11 - Conservation

Les conditions de conservation sont définies comme suit :

- la température de conservation est de 20°C ± 2°C ;
- les éprouvettes sont conservées dans leurs moules en atmosphère humide avec une humidité relative supérieure ou égale à 90 %, ou dans leurs moules placés dans un sac plastique fermé et imperméable.

2.4.12 - Performances

Les performances à atteindre après traitement sont indiquées dans le tableau 13.

	Critères de jugement	Seuils
Age autorisant la mise sous circulation de chantier	R_c à l'âge du sol traité lors de la mise sous circulation en fonction de son niveau d'agressivité (cf. tableau 34)	$R_c \geq 1,0$ MPa (*) pour un niveau d'agressivité A (***) $R_c \geq 1,2$ MPa (*) pour un niveau d'agressivité B (***) $R_c \geq 1,5$ MPa (*) pour un niveau d'agressivité C (***)
Sensibilité à l'eau	Rapport : $R_c (28j + 32 i) / R_c 60 j$	$\geq 0,80$ si $VBS \leq 0,5$ $\geq 0,70$ si $VBS > 0,5$
Résistance au gel	R_{it} à l'âge du sol lors de l'apparition probable du gel	$> 0,25$ MPa
Performances à long terme	R_t ou R_{it} et E à au moins 90 j (**)	Classification selon NF EN 14227-10 [71] ou NF EN 14227-13 [74]

(*) La température de conservation est normalement de 20°C. Toutefois, si l'on prévoit que le chantier se déroulera en arrière saison, la température pourra être celle que permettent de prévoir les conditions météorologiques locales moyennes. Le seuil de 1,2 MPa pourra être relevé dans certains cas.

(**) Et aussi éventuellement après 28 et/ou 60 jours notamment pour apprécier la résistance au gel.

(***) Voir tableau 34

Tableau 13 : performances mécaniques des sols traités

2.4.13 - Étude de sensibilité des performances mécaniques

Cette étude s'appuie sur :

- la mesure des résistances en traction directe ou en traction indirecte ;
- la mesure des modules sécants à 30 % de la charge de rupture.

Les éprouvettes soumises aux essais sont âgées de 90 jours en général. Cette durée de conservation pourra être augmentée (par exemple jusqu'à 180 jours) pour certains liants à prise lente.

Habituellement, les modalités d'étude sont celles de la norme NF P 98-114-3 [32] qui sont rappelées dans le tableau 14.

		0,8 l_e	l_e	1,2 l_e
95 % ρ_{de}	0,9 w_e			
	w_e		X	
	1,1 w_e			
ρ_{de}	0,9 w_e		X	
	w_e	X	X	X
	1,1 w_e		X	
102 % ρ_{de}	0,9 w_e			
	w_e		X	
	1,1 w_e			
Avec ρ_{de} , w_e et l_e : masse volumique apparente, teneur en eau et teneur en liant de la formule d'étude.				

Tableau 14 : modalités à retenir pour l'étude de l'effet de la dispersion des dosages

Si le gisement ou le mélange de sols qu'il est prévu d'utiliser présente une hétérogénéité de teneur en eau dépassant les extrêmes prévus dans le tableau 14 ci-contre (p. 20), les écarts de teneur en eau peuvent être élargis en fonction de l'expérience locale, sous réserve que les objectifs de portance et de densité soient atteints lors de la réalisation du chantier.

Les résultats obtenus sont portés dans l'abaque de la norme NF P 98-114-3 [32]. Leur exploitation, conformément à cette norme, permet de définir, par interpolation linéaire, la formule de base répondant à la classe de performance recherchée. Si aucun résultat n'atteint la classe recherchée, une nouvelle étude doit être réalisée. Les dosages de la nouvelle formule d'étude peuvent être définis à partir de l'extrapolation des résultats de l'étude de sensibilité.







3 - Dimensionnement et conception

Le dimensionnement des structures en sols traités est réalisé en utilisant le guide technique «Conception et le dimensionnement des structures de chaussées» Sétra-LCPC 1994 [3] (par la suite désigné par guide technique chaussées 1994). La méthode consiste à comparer la contrainte de traction (σ_t) en bas de la couche en sol traité, calculée à l'aide du modèle de Burmister, à la contrainte admissible du matériau (σ_{ad}), calculée à l'aide des formules suivantes :

$$\sigma_{ad} = \sigma_G \cdot (NE / 10^6)^b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_r \cdot k_s$$

$$k_r = 10^{-ub\delta} \text{ et } \delta = ((SN^2 + (Sh \cdot c/b)^2)^{1/2})$$

avec :

- σ_G = contrainte pour laquelle la rupture par traction sur éprouvette agée de 360 jours est obtenue pour 10^6 cycles (MPa) ;
- NE = nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds ;
- b = pente de la droite de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique ;
- k_c = coefficient de calage ;
- k_d = coefficient tenant compte des discontinuités des structures rigides, pris égal à 1 pour les structures retenues dans ce guide ;
- k_r = coefficient ajustant la valeur de déformation ou de contrainte admissible en fonction du risque de calcul et des facteurs de dispersion ;
- k_s = coefficient de prise en compte d'hétérogénéités locales de portance de la couche non liée sous-jacente ;

- SN = écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue ;
- Sh = écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mise en œuvre (m) ;
- c = coefficient associant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée (cm^{-1}) ;
- u = variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r (les valeurs de u en fonction du risque de calcul r_c sont indiquées dans l'aide mémoire annexé au guide technique chaussées 1994 [3]) ;
- r_c = risque de calcul.

Remarque

Les matériaux concernés par le présent document étant très sensibles à l'eau, un soin particulier devra être apporté dans la conception des chaussées afin d'éviter les infiltrations et les stagnations d'eau (cf. § 3.4.5).

Les hypothèses à retenir pour le dimensionnement sont celles du guide technique chaussées 1994, sous réserve des indications ci-après.

3.1 - Données trafic

Ces données diffèrent du guide technique chaussées 1994 [3] en raison de la nouvelle définition du poids lourd donnée par la norme NF P 98-082 [28] comme étant un véhicule dont le poids total est au moins égal à 3,5 tonnes (PTAC ≥ 35 kN).

Pour évaluer le trafic supporté par une route, deux classements sont envisagés :

- la classe de trafic T_i correspondant à un nombre de poids lourds (PL), de PTAC supérieure ou égale à 35 kN, par jour et par sens à la mise en service ;
- ce classement est utilisé pour le choix des caractéristiques géométriques de la route et des matériaux constituant les chaussées ;
- la classe de trafic TC_i correspondant à un nombre cumulé de poids lourds par sens sur la voie la plus chargée que devra supporter la chaussée pendant sa durée de vie de calcul.

Ce classement est utilisé pour dimensionner les chaussées.

3.1.1 - Classes de trafic T_i

Le tableau 15 donne les classes de trafic T_i à la mise en service, en fonction de la moyenne journalière annuelle (MJA) en poids lourds sur la voie la plus chargée.

Poids lourds de PTAC ≥ 35kN, par sens (MJA) à la mise en service	0	25	50	150	300	750	2000
Classe de trafic T_i à la mise en service	traficT5	traficT4	traficT3	traficT2	traficT1	traficT0	

Tableau 15 : classes de trafic T_i à la mise en service

3.1.2 - Classes de trafic cumulé TC_i

Pour le dimensionnement des chaussées, il est nécessaire d'évaluer le nombre total de PL que devra supporter la chaussée durant sa durée de service.

Le trafic cumulé TC est obtenu à partir de la relation suivante :

$$TC = 365 \times N \times \left[d + \frac{t \times d \times (d - 1)}{2} \right] \times r$$

Cette relation prend en compte une croissance linéaire du trafic.

N = nombre de PL de PTAC ≥ 35 kN par jour et par sens à la mise en service

t = taux de croissance linéaire annuel du trafic

d = durée de service (en année)

r = coefficient traduisant la répartition transversale des PL

- routes bidirectionnelles largeur ≥ 6 m : r = 1
- routes bidirectionnelles largeur 5 à 6 m : r = 1,5
- routes bidirectionnelles largeur < 5 m : r = 2
- routes unidirectionnelles : r = 1
- routes à 2 fois 2 voies : r = 0,9
- routes à 2 fois 3 voies : r = 0,8

En règle générale, pour les voies concernées par ces techniques, la durée de service peut être prise égale à 20 ans avec un taux de croissance de 0,02 par an.

Le tableau 16 indique alors les classes de trafic cumulé (TCi) retenues, correspondant à des routes bidirectionnelles de largeur supérieure à 6 mètres supportant des trafics Ti à la mise en service.

3.1.3 - Agressivité du trafic

Les types de poids lourds circulant peuvent être très différents d'une chaussée à une autre.

Pour traduire ces différences, il est déterminé, à partir du spectre de répartition des types de PL circulant sur la chaussée, un coefficient d'agressivité moyen (CAM).

Ce coefficient CAM permet de calculer le nombre d'essieux équivalents (NE) par la formule $NE = TCi \cdot CAM$.

Dans les cas où le type de trafic lourd est connu, le calcul du CAM est réalisé selon la méthode décrite dans le guide technique pour la conception et le dimensionnement des structures de chaussées de 1994 [3].

Dans le cas de routes en l'absence d'éléments précis sur la répartition des types de PL, on retiendra, pour les sols traités, les CAM indiqués dans le tableau 17.

Classe de trafic Ti à la mise en service	trafic T5	trafic T4	trafic T3	trafic T2	trafic T1	
Classe de trafic cumulé TCi	TC0 ^{(1) (2)}	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5 ⁽³⁾
Valeurs limites de trafic cumulé en poids lourds de PTAC ≥ 35 kN	10 ⁴ à 10 ⁵	10 ⁵ à 2 10 ⁵	2 10 ⁵ à 5 10 ⁵	5 10 ⁵ à 1,5 10 ⁶	1,5 10 ⁶ à 2,5 10 ⁶	2,5 10 ⁶ à 6,5 10 ⁶

(1) La classe TC0 a été introduite dans le cadre de ce document pour permettre la prise en compte de chaussées à très faible trafic

(2) Pour les trafics cumulés inférieurs à 10⁴ PL, la détermination des structures sera réalisée avec 10⁴ PL

(3) Pour les trafics cumulés supérieurs à la classe TC5, les sols traités ne sont pas admis en couche de chaussée

Tableau 16 : classes de trafic cumulé TCi pour une durée de vie de 20 ans et un taux de croissance de 0,02

Classe de trafic Ti à la mise en service	trafic T5	trafic T4	trafic T3	trafic T2	trafic T1
Equivalence en classe de trafic cumulé TCi ⁽¹⁾	TC0 - TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
CAM	0,4	0,5	0,7	0,8	0,8

(1) Avec une hypothèse de durée de vie de calcul de 20 ans et un taux de progression de 0,02

Tableau 17 : coefficients d'agressivité du trafic

3.2 - Classes de plates-formes

La réalisation des couches de chaussées est habituellement faite en rapportant des matériaux sur une plate-forme qui est réceptionnée.

Pour le dimensionnement des couches de chaussées en sol traité, les classes de portances minimales à long terme en fonction du trafic, sont les suivantes :

- trafic $T_i < \text{trafic } T_3$: portance plate-forme $\geq \text{PF1}$
- trafic $T_i \geq \text{trafic } T_3$: portance plate-forme $\geq \text{PF2}$

Nota

Le catalogue des structures types de chaussées neuves - Sétra LCPC 1998 [7], concernant le réseau routier national, impose au minimum une plate-forme PF2.

Dans le cas des PF1, la portance de la plate-forme au moment de la réalisation des couches de chaussées, doit être supérieure ou égale à 35 MPa pour permettre un compactage correct de la couche traitée.

Dans le cas où l'utilisation de sols traités en place en couches de chaussées ne permet pas toujours une réception de la plate-forme support de la chaussée, il est alors nécessaire d'estimer la portance de la plate-forme à partir des caractéristiques géotechniques des matériaux ou de mesurer la portance en partie supérieure de la couche à traiter avant toute opération de traitement.

3.3 - Paramètres de dimensionnement

3.3.1 - Matériaux

Le chapitre étudie dans le paragraphe 2.1 définit, suivant l'identification du matériau d'origine, deux types de sol :

- sols fins ou sableux,
- sols graveleux.

L'étude de traitement définit une classe de qualité du matériau (SOL T_i) à partir du couple E - R_t au sens des normes NF EN14227-10 [71] ou NF EN14227 13 [74].

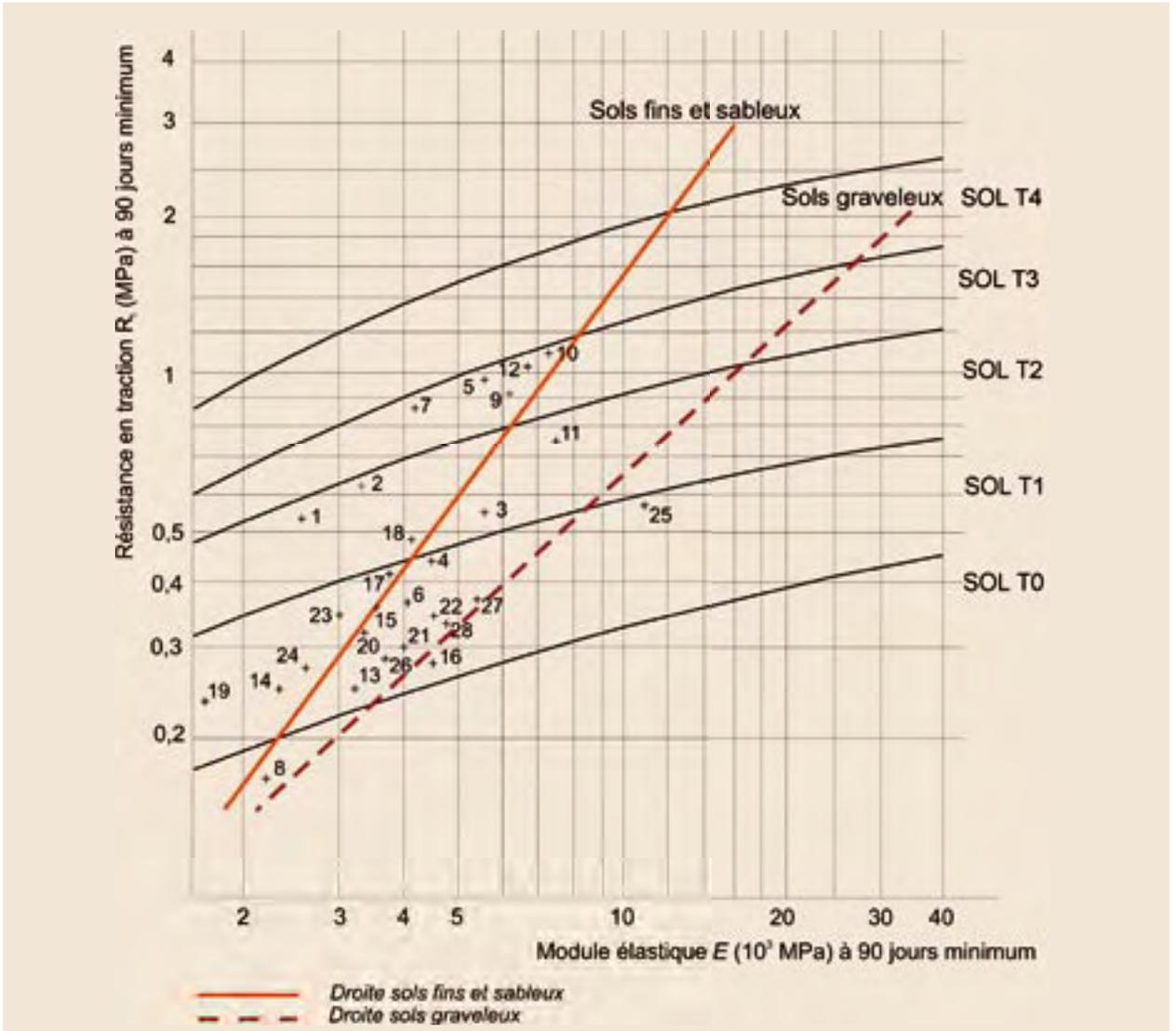
Le dimensionnement étant fait sur la base des caractéristiques à 360 jours, alors que les valeurs de R_t et modules sont souvent obtenues à 90 jours ou 180 jours, à défaut de résultats spécifiques les valeurs retenues seront celles mesurées à un âge minimum de 90 jours sans correction.

A titre indicatif les valeurs des couples E - R_t obtenues lors des différentes études réalisées ont été reportées dans le graphique de la norme définissant les classes de qualité des sols traités (cf. tableau 18 et graphique 1).



	Type matériaux	Rt en MPa à 90j	E en MPa
1	Limon Rouen	0,53	2600
2	Limon Rouen	0,61	3100
3	Limon Rouen	0,55	5600
4	Limon Rouen	0,43	4530
5	Limon Rouen	0,97 (360j)	5640
6	Limon Rouen	0,36	4010
7	Limon Rouen	0,86 (360j)	4070
8	Argile Autun	0,17	2200
9	Limon Lille	0,90	6100
10	Limon Lille	1,09 (360j)	7360
11	Arènes St-Brieuc	0,73	7400
12	Arènes St-Brieuc	1,03 (360j)	6890
13	Limon A ₁ St-Quentin	0,25	3100
14	Limon A ₁ St-Quentin	0,26	2650
15	Limon A ₁ St-Quentin	0,37	3400
16	Limon A ₁ St-Quentin	0,28	4500
17	Limon A ₁ A ₂ St-Quentin	0,41	3800
18	Limon A ₁ A ₂ St-Quentin	0,47	4100
19	Limon A ₂ IdF	0,24	1650
20	Limon A ₂ IdF	0,32	3374
21	Limon A ₂ Lille	0,30	4000
22	Limon A ₂ Lille	0,34	4500
23	Limon A ₂ Lille	0,34	3000
24	Limon A ₂ Lille	0,26	2700
25	Sable St-Quentin	0,57	10350
26	Grave B ₂ St-Quentin	0,26	3500
27	Grave B _{5j} B ₆ St-Quentin	0,36	5500
28	Grave B _{5j} B ₆ St-Quentin	0,34	4650

Tableau 18 : résultats d'études pris en compte



- chaque droite représente la tendance indicative pour le sol considéré

- les catégories de sol SOL T1 et SOL T2 sont les plus fréquemment utilisées pour les sols fins ou sableux

Graphique 1 : résultats d'études pour sols fins ou sableux et pour sols graveleux traités

Les valeurs seuils du tableau 19 sont utilisées pour les exemples donnés dans le paragraphe 3.6. Elles peuvent également servir pour l'élaboration d'un pré-dimensionnement pour l'établissement de catalogue de structures régionales.

Prise en compte de la fabrication

Les valeurs de E et Rt obtenues sur éprouvettes en laboratoire sont soumises à un abattement prenant en compte les différences de performances obtenues en laboratoire et sur chantier.

Pour cela, il est envisagé deux niveaux de qualité de traitement :

- traitement de qualité AC1 ;
- traitement de qualité AC2.

Ces deux niveaux de qualité AC1 et AC2 sont définis dans le chapitre « Réalisation » (cf. § 4.3.1 - page 40).

Le traitement en centrale ne peut être envisagé que si l'on est assuré que les matériaux peuvent s'écouler correctement dans les différents organes des centrales (sols de classe B et sols de classe A pré-traités à la chaux).

Le tableau 20 donne les abattements à appliquer en fonction de la qualité de traitement sur les modules E et résistance Rt mesurés en laboratoire.

Le passage de Rt à σ_6 utilisé pour le dimensionnement est obtenu par la relation $\sigma_6 = 0,95 R_t$.

Autres paramètres de dimensionnement

L'examen des résultats d'études de fatigue (cf. bulletins de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 133 et 134) conduit à retenir, pour les sols traités, les valeurs suivantes :

- Pente de la droite de fatigue 1/b
 $1/b = - 11$
- Écart type de la loi de fatigue SN

Sols fins	SN = 0,8
Sols type sable	SN = 0,8
Sols type grave	SN = 1,0

Ces valeurs sont identiques à celles prévues dans le guide technique chaussées 1994 [3].

- Écart type sur les épaisseurs Sh
- Sh dépend du type de traitement et du type de matériau. Le tableau 21 donne les valeurs à prendre en compte.

Type de sol	Limite SOL T0 / SOL T1	Limite SOL T1 / SOL T2	Limite SOL T2 / SOL T3
Sols fins et sableux	E = 2500 MPa Rt = 0,20 MPa (1)	E = 4000 MPa Rt = 0,44 MPa	E = 6200 MPa Rt = 0,8 MPa
Sols graveleux	E = 3300 MPa Rt = 0,24 MPa	E = 8200 MPa Rt = 0,54 MPa	E = 16200 MPa Rt = 1,02 MPa

(1) La valeur $R_t = 0,20 \text{ MPa}$ correspond au minimum nécessaire pour obtenir un matériau non gélif ($R_{it} \geq 0,25 \text{ MPa}$)

Tableau 19 : seuils résultant de l'exploitation du graphique 1

Paramètre	Qualité du traitement	AC1	AC2
	E	25 %	35 %
Rt	25 %	35 %	

Tableau 20 : abattements sur module E et résistance Rt en fonction du niveau de qualité AC

Type de matériaux	Type de traitement	Matériaux rapportés ⁽¹⁾	Matériaux traités en place
	Sols fins ou sableux		0,025 m
Sols graveleux		0,03 m	0,05 m

(1) valeurs issues du guide technique chaussées 1994

Tableau 21 : écart type sur les épaisseurs

- Coefficient de calage k_c
 $k_c = 1,4$

- Valeur de risque r_c

Le tableau 22 donne les valeurs de risque r_c prises en compte dans les calculs.

- Autres coefficients

Les autres coefficients intervenant dans le dimensionnement sont identiques à ceux définis dans le guide technique chaussées 1994 [3].

3.3.2 - Conditions d'interface

Les conditions d'interface à prendre en compte sont listées dans le tableau 23.

Dans tous les cas, un soin particulier doit être apporté pour assurer la protection de surface du sol traité et favoriser le collage avec la couche supérieure (cf. § 4.5).

3.4 - Conception de la chaussée

3.4.1 - Domaine d'emploi

Les sols traités concernés par ce guide peuvent être utilisés pour des trafics allant jusqu'au trafic T3 en couche de base et jusqu'au trafic T1 en couche de fondation.

3.4.2 - Qualités minimales

La classe de qualité minimale des sols traités diffère selon l'utilisation envisagée (couche de base ou couche de fondation) ainsi que le trafic supporté par la chaussée.

Dans le tableau 24 sont données les classes de qualités minimales nécessaires.

Classe de trafic cumulé TCi	Valeur de risque r_c				
	TC1 et TC0	TC2	TC3	TC4	TC5
Structures semi-rigides	20 %	12,5 %	10 %	7,5 %	5 %
Fondations Structures mixtes	50 %	50 %	35 %	20 %	10 %

Tableau 22 : valeurs de risque r_c

Type d'interface		Nature de l'interface
Fondation en sol traité sur arase ou plate-forme		collée
Base en sol traité sur fondation en sol traité		semi-collée
Couche de base en GH sur fondation en sol traité		semi-collée
Structure mixte	1 ^{ère} phase GB sur fondation en sol traité	semi-collée
	2 ^{ème} phase GB sur fondation en sol traité	décollée
BB ou GB sur couche en sol traité		semi-collée

Tableau 23 : conditions d'interface

Classe de trafic Ti	TraficT5	TraficT4	TraficT3	TraficT2	TraficT1
Couche de base	SOL T2	SOL T2 (*) ou SOL T3	SOL T3	(**)	(**)
Couche de fondation	SOL T1	SOL T1	SOL T2	SOL T2	SOL T3

(*) Une classe SOL T2 peut être acceptée uniquement pour les sols sableux et graveleux

(**) L'utilisation en couche de base pour un trafic T2 ou T1 peut être envisagée dans le cadre d'un chantier expérimentant des techniques améliorant la qualité de l'interface assise/couche de surface

Tableau 24 : classes de qualité minimales

3.4.3 - Types de structures

Lorsque les matériaux traités sont utilisés en couche de fondation, il est possible d'envisager différentes couches de base conduisant aux types de structures suivants :

- structures mixtes ;
- structures semi-rigides avec une couche de base rapportée en matériaux traités aux liants hydrauliques. Le cas où les sols traités sont rapportés en couche de base peut être assimilé à ce type de structure ;
- autre structure semi-rigide avec couche de base en matériaux bitumineux importante mais ne pouvant pas entrer dans la catégorie des structures mixtes ;
- structures inverses avec une couche en grave non traitée recouverte de matériaux bitumineux ;
- structures béton. Dans ce cas, il est nécessaire de réaliser sur le sol traité, une première couche en béton bitumineux en cas de trafic élevé, puis la couche de base roulement en béton.

3.4.4 - Couches de surface

1^{er} cas : sol traité utilisé en couche de base

Le tableau 25 donne l'épaisseur totale des couches bitumineuses à mettre en place au-dessus des couches de sol traité.

Dans tous les cas il est nécessaire d'utiliser une formulation de la couche bitumineuse conduisant au maximum d'imperméabilisation (béton bitumineux souple).

2^{ème} cas : sol traité utilisé en couche de fondation

Les règles habituelles de détermination des couches de surface en fonction du type de couche de base utilisé sont applicables.

3.4.5 - Dispositions constructives

Les matériaux concernés par le présent guide étant très sensibles à l'eau, un soin particulier doit être apporté dans la conception des chaussées afin d'éviter les infiltrations et les stagnations d'eau.

Tout ou partie des dispositions suivantes peut être envisagé :

- réalisation d'une sur largeur de la couche de sol traité de 0,5 m minimum par rapport aux dispositions constructives habituelles pouvant être le cas échéant imperméabilisée ;
- évacuation le plus rapidement possible des eaux pluviales vers les fossés et exutoires, ce qui peut conduire à augmenter la pente transversale des accotements en les imperméabilisant si nécessaire ;
- réalisation d'écrans de rive pour éliminer le plus rapidement possible les eaux internes surtout dans les zones climatiques humides.

3.5 - Vérification au gel

La vérification au gel est réalisée selon la méthode du guide technique chaussées 1994 [3].

Une simplification peut être apportée en ne prenant pas en compte la protection mécanique et en utilisant la méthode simplifiée pour la protection thermique apportée par la structure de la chaussée.

On considère que tout sol traité, conforme à ce guide, présentant une valeur de $R_{it} \geq 0,25$ MPa est non gélif.

Traffic cumulé TC _i	Traffic TC0	Traffic TC1	Traffic TC2	Traffic TC3
Type de sols				
Sols fins	6 cm	6 cm	10 cm	12 cm
Sols sableux	Enduit	6 cm	8 cm	10 cm
Sols graveleux	Enduit	Enduit	8 cm	10 cm

Pour une utilisation sur des aires de type parking, une couche de surface de 6 cm de béton bitumineux (BB) est nécessaire dans tous les cas même en l'absence de poids lourds.

Tableau 25 : épaisseur de la couche de surface

3.6 - Exemples de dimensionnement

Deux exemples de structures ont été l'objet d'un dimensionnement :

- le premier concerne une structure en sol fin ou sableux traité, rapporté sur une plate-forme PF2 ;
- le second concerne un sol fin ou sableux traité en place sur une plate-forme PF1 constituée par le sol en place.

3.6.1 - Premier exemple (tableau 26)

Ce premier exemple concerne une structure semi-rigide en matériau fin ou sableux traité selon une qualité AC1 rapporté sur une plate-forme PF2.

Il a été retenu trois matériaux correspondant respectivement aux classes SOL T3, SOL T2 et une classe intermédiaire correspondant aux hypothèses prises pour le sol traité du catalogue des structures pour l'Île-de-France (IdF).

Les performances mécaniques d'étude prises en compte pour ces matériaux sont les suivantes :

SOL T3	$E \geq 6200 \text{ MPa}$	$R_t \geq 0,80 \text{ MPa}$
SOL T2	$E \geq 4000 \text{ MPa}$	$R_t \geq 0,44 \text{ MPa}$
Sol Traité IdF	$E \geq 5333 \text{ MPa}$	$R_t \geq 0,56 \text{ MPa}$

Qualité de traitement AC1

Cela conduit aux paramètres de dimensionnement suivants :

SOL T3	$E = 6200 \text{ MPa} \times 0,75 = 4650 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,80 \times 0,75 \times 0,95 = 0,57 \text{ MPa}$
SOL T2	$E = 4000 \text{ MPa} \times 0,75 = 3000 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,44 \times 0,75 \times 0,95 = 0,31 \text{ MPa}$
Sol Traité IdF	$E = 5333 \text{ MPa} \times 0,75 = 4000 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,56 \times 0,75 \times 0,95 = 0,40 \text{ MPa}$

Ces hypothèses de performances mécaniques se situent en bas de classe pour les classes SOL T3 et SOL T2 et centre de classe pour le sol traité Idf.

Classe de trafic cumulé sur 20 ans TCi et nombre d'essieux équivalents NE retenu pour le calcul	SOL T3	SOL T2	Sol traité Idf
Trafic TC3 NE = 0,6 10 ⁶ Eq	12 cm BB 28 cm	Non retenu en couche de base	Non retenu en couche de base
Trafic TC2 NE = 0,2 10 ⁶ Eq	10 cm BB 26 cm	10 cm BB 43 cm En 2 couches	10 cm BB 30 cm
Trafic TC1 NE = 0,1 10 ⁶ Eq	6 cm BB 26 cm	6 cm BB 42 cm En 2 couches	6 cm BB 30 cm
Trafic TC0 NE = 0,05 10 ⁶ Eq	6 cm BB 25 cm	6 cm BB 35 cm	6 cm BB 28 cm

Tableau 26 : exemple de structures avec sol traité de qualité AC1. Rapporté sur plate-forme PF2

Autres hypothèses :

- Pente droite de fatigue $1/b = -11$
- Ecart type fatigue $SN = 0,8$
- Ecart type épaisseur $Sh = 0,025$
- Coefficient de calage $k_c = 1,4$
- Risque *cf.* § 3.3.1, tableau 22
- Hypothèses interfaces :
 - fondation sur plate-forme : collée
 - base en sol traité sur fondation en sol traité : semi-collée
 - matériaux bitumineux sur base : semi-collée.
- Trafic cumulé utilisé pour le calcul des structures :
 - trafic TC0
 - trafic TC1
 - trafic TC2
 - trafic TC3

A titre d'illustration, un détail du calcul est donné pour la configuration suivante :

- la classe de trafic TC2 (trafic cumulé de $0,2 \cdot 10^6$ essieux équivalents -Eq) ;
- la plate-forme PF2 ;
- le sol traité de classe SOL T3.

Pour un SOL T3, avec les paramètres décrits précédemment, la contrainte admissible à la base du sol traité est obtenue par la relation :

$$\sigma_{ad} = \sigma_6 \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \times k_c \times k_d \times k_r \times k_s$$

avec :

- $\sigma_6 = 0,57$ MPa
- $NE = 0,2 \cdot 10^6$
- $b = -1/11$
- $k_c = 1,4$
- $k_d = 1$
- $k_r = 10^{-ub\delta}$
- $k_s = 1/1,1$

avec, pour le risque de 12,5 % (trafic TC2), $u = -1,150$

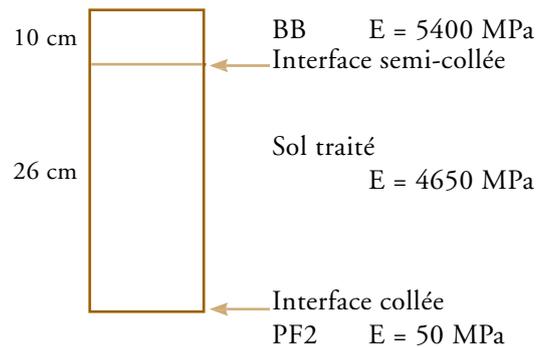
et

$$\delta = \sqrt{\left[SN^2 + \left(\frac{cSH}{b} \right)^2 \right]} \text{ soit } \delta = \sqrt{\left[0,8^2 + \left(\frac{0,02 \times 2,5}{-1/11} \right)^2 \right]} = 0,9708$$

ce qui donne $k_r = 0,792$, d'où :

$$\sigma_{ad} = 0,57 \times \left(\frac{0,210^6}{10^6} \right)^{-1/11} \times 1,4 \times 1 \times 0,792 \times \frac{1}{1,1} = 0,664 \text{ MPa}$$

Modélisation de la structure à l'aide du logiciel de calcul Alizé [79].



Cette modélisation conduit aux contraintes et déformations indiquées dans la matrice 1.

La structure avec 26 cm de sol traité de classe SOL T3 conduit avec une hypothèse semi-collée à un σ_t de 0,653 MPa, ce qui est légèrement inférieur à la valeur admissible, qui est de 0,664 MPa.

Les valeurs de ϵ_t à la base des matériaux bitumineux et de ϵ_z en surface de la plate-forme sont-elles aussi largement vérifiées.

Couche	Hypothèses	Hypothèse glissant	Hypothèse collée	Hypothèse semi-collée
ϵ_t	Bas du béton bitumineux	- 130,7	- 1	- 65,85
σ_t	Bas de la couche de sol traité (Mpa)	- 0,792	- 0,514	- 0,653
ϵ_z	Bas de la couche de sol traité	450,9	271,5	361,2

Matrice 1 : contraintes de déformations calculées à l'aide du logiciel Alizé [79]

3.6.2 - Deuxième exemple (tableau 27)

Il s'agit d'une structure semi-rigide en matériaux fin ou sableux traité en place selon une qualité AC2. Il est admis que le sol en place (avant traitement) constitue une plate-forme de portance PF1.

Il est retenu trois matériaux correspondant respectivement aux classes SOL T3, SOL T2 et une classe intermédiaire correspondant aux hypothèses prises pour le sol traité en place du catalogue des structures pour l'Ile-de-France (IdF).

Les performances mécaniques d'étude prises en compte pour ces matériaux sont les suivantes :

SOL T3	$E \geq 6200 \text{ MPa}$	$R_t \geq 0,80 \text{ MPa}$
SOL T2	$E \geq 4000 \text{ MPa}$	$R_t \geq 0,44 \text{ MPa}$
Sol Traité IdF	$E \geq 4615 \text{ MPa}$	$R_t \geq 0,49 \text{ MPa}$

Qualité de traitement AC2

Cela conduit aux paramètres de dimensionnement suivants :

SOL T3	$E = 6200 \text{ MPa} \times 0,65 = 4030 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,80 \times 0,65 \times 0,95 = 0,49 \text{ MPa}$
SOL T2	$E = 4000 \text{ MPa} \times 0,65 = 2600 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,44 \times 0,65 \times 0,95 = 0,27 \text{ MPa}$
Sol Traité IdF	$E = 4615 \text{ MPa} \times 0,65 = 3000 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,49 \times 0,65 \times 0,95 = 0,27 \text{ MPa}$

Ces hypothèses de performances mécaniques se situent en bas de classe pour les classes SOL T3 et SOL T2 et au tiers inférieur de la classe SOL T2 pour le sol traité IdF.

Autres hypothèses :

- Pente droite de fatigue $1/b = -11$
- Ecart type fatigue $SN = 0,8$
- Ecart type épaisseur $SH = 0,04$
- Coefficient calage $k_c = 1,4$
- Risque *cf.* § 3.3.1, tableau 22
- Hypothèses interfaces :
 - fondation sur plate-forme : collée
 - base en sol traité sur fondation en sol traité : semi-collée
 - matériaux bitumineux sur base : semi-collée.
- Trafic cumulé utilisé pour le calcul des structures :
 - trafic TC0
 - trafic TC1
 - trafic TC2
 - trafic TC3

Classe de trafic cumulé sur 20 ans TCi et nombre d'essieux équivalents NE retenu pour le calcul	SOL T3	SOL T2	Sol traité Idf
Trafic TC3 NE = 0,6 10 ⁶ Eq	12 cm BB 37 cm	Non retenu en couche de base	Non retenu en couche de base
Trafic TC2 NE = 0,2 10 ⁶ Eq	10 cm BB 35 cm	10 cm BB 48 cm En 2 couches	10 cm BB 45 cm En 2 couches
Trafic TC1 NE = 0,1 10 ⁶ Eq	6 cm BB 34 cm	6 cm BB 47 cm En 2 couches	6 cm BB 44 cm En 2 couches
Trafic TC0 NE = 0,05 10 ⁶ Eq	6 cm BB 33 cm	6 cm BB 45 cm En 2 couches	6 cm BB 42 cm En 2 couches

Tableau 27 : exemple de structures avec sol traité de qualité AC2. Traité en place sur plate-forme PFI.



4 - Réalisation

4.1 - Préambule

La généralisation de l'emploi des sols traités en couches de forme a contribué progressivement à des améliorations technologiques qui ont à leur tour permis d'envisager l'emploi de ce type de matériaux en assises de chaussées. Il s'ensuit que l'emploi de sols traités en assises de chaussées est d'abord l'application d'une technique de « terrassements » (même si aujourd'hui la frontière entre couche de forme et couche de fondation est parfois bien incertaine).

Il existe ainsi des différences notables entre la « chaîne » de fabrication et de mise en œuvre d'un chantier de sol traité pour assise de chaussée et celle d'un chantier classique de couche de chaussée, par exemple sur les points suivants :

- le matériau « brut » présente une homogénéité plus ou moins bonne ;
- il peut avoir été prétraité à la chaux, plus ou moins longtemps avant emploi ;
- il conserve en général une certaine sensibilité à l'eau ;
- il n'existe pas toujours de stock, contrairement aux matériaux granulaires ;
- la fabrication se fait généralement par malaxage en place et plus rarement en centrale, la teneur en eau et la granulométrie sont moins facilement maîtrisées.

La réussite d'une assise de chaussée en sol traité va en conséquence fortement dépendre de la qualité des opérations conduisant du gisement de matériau brut à la couche achevée de matériau traité.

Les points fondamentaux qui doivent retenir l'attention des acteurs de tels chantiers, sont, entre autres :

- parvenir à un matériau homogène en granulométrie, en teneur en eau, et de D_{max} limité à 31,5mm ;
- réaliser un apport de liant(s) juste, régulier et prenant en compte, par rapport à l'étude de performances en laboratoire, les aléas de fabrication et de mise en œuvre ;
- permettre, par la formulation du mélange, le déroulement du chantier dans des conditions climatiques normales malgré la sensibilité résiduelle du matériau ;
- assurer le respect des épaisseurs mises en œuvre et de la compacité requise à la suite des études ;
- faire en sorte que les interfaces permettent, par leur qualité, le meilleur collage possible des couches entre elles.

Enfin, il est nécessaire que les techniques mises en jeu permettent d'aboutir à ce résultat, que le chantier soit de grande ou petite taille.

Les chapitres qui suivent font le point de règles éprouvées sur des opérations de diverses natures où de multiples matériaux ont été utilisés : sables moyennement argileux, limons peu plastiques, arènes ...

En fin de la partie relative à la mise en œuvre, figure un ordigramme général du traitement des sols pour

assises de chaussées (figure 1) qui synthétise les différentes étapes à prévoir selon les divers scénarios abordés dans ce guide (traitement en place, en centrale, etc.).

Il reste que l'expérience acquise ne peut pas être considérée comme définitive ; divers aléas peuvent être rencontrés sur ces chantiers et il est nécessaire de procéder, avant toute opération, à une analyse complète de tous les paramètres susceptibles d'être influents.

Une analyse économique a été réalisée (cf. annexe C) afin de connaître l'importance de chaque poste dans le coût total d'un sol traité en assises de chaussées. Il ressort de cette analyse que le coût des postes étude et contrôle sont marginaux dans le coût total du traitement.

4.2 - Préparation des matériaux

La préparation des matériaux avant le traitement aux liants hydrauliques a pour objet de transformer le sol en un produit «semi-industriel» aux caractéristiques régulières et d'une homogénéité conforme aux exigences formulées dans le chapitre Etudes (cf. § 2.3.2).

Sont décrites ci-après quelques techniques de préparation des sols susceptibles de concourir à la qualité recherchée en assises de chaussées.

4.2.1 - Tri du matériau

Cette opération a pour but d'éliminer les matériaux indésirables susceptibles de se trouver mélangés au gisement de sol à traiter. Elle est exécutée selon les techniques habituelles de terrassements et nécessitera le recours à la mise en place d'un stockage intermédiaire.

4.2.2 - Ecrêtement du matériau

Comme cela a été indiqué dans le chapitre Etudes, les sols traités utilisés en corps de chaussées doivent présenter un Dmax conforme au tableau 2 du chapitre Etudes (cf. § 2.1).

Pour atteindre ces objectifs, l'une ou plusieurs des opérations suivantes, en fonction de la nature des sols à traiter, peuvent être nécessaires :

- traitement préalable à la chaux des matériaux argileux ;
- décohésion du sol à la charrue en vue de faire remonter en surface les éléments blocailleux suivi du regroupement, ramassage et concassage éventuel de ces blocs ;
- réduction en place à l'aide d'engins spécifiques ; si la réduction en place nécessite plusieurs passages d'engins, un compactage intermédiaire entre chaque passage améliorera l'efficacité de l'opération ;
- criblage des matériaux ;
- etc.

4.2.3 - Pré-traitement à la chaux

Cette opération peut être réalisée, suivant les cas :

- au déblai (par exemple, cas des sols blocailleux qui nécessitent un pré-criblage...),
- sur un dépôt provisoire (par exemple, cas des sols nécessitant une homogénéisation complémentaire, cas du traitement en centrale, cas d'un chantier sensible du point vu environnemental, cas d'un manque de place à l'extraction ou à la mise en œuvre...),
- à la mise en œuvre (par exemple, cas des sols homogènes ou de matériaux provenant d'un apport extérieur au chantier...).

Le dosage en chaux (minimum 1 %) doit correspondre au dosage retenu à l'issue de l'étude de traitement. Si le sol se trouve dans des conditions hydriques élevées, une adaptation des dosages selon l'état hydrique des sols peut être réalisée, sauf contre-indication précisée à l'étude. Si les conditions météorologiques (chaleur, sécheresse) conduisent à un apport d'eau, on peut envisager une solution alternative comme l'emploi de chaux éteinte, qui consomme moins d'eau, ou de lait de chaux, qui permet au contraire une légère humidification le cas échéant. La solution la plus courante consiste à humidifier davantage le sol avant les opérations de traitement de façon à prendre en compte l'assèchement du sol par la chaux. Le non-respect du dosage en chaux préconisé par l'étude est susceptible d'induire des variations :

- de référence Proctor ;
- de performances mécaniques.

Le matériel devra être un épandeur asservi, d'exactitude $e \leq 5 \%$ et de $C_v < 10$.

Le malaxage doit être réalisé avec un pulvérisateur à arbre horizontal. On notera que la vitesse d'avancement de ces matériels influe directement sur la mouture susceptible d'être obtenue. La mouture recherchée doit être la plus fine possible et au plus égale à un 0/20 mm.

Dans tous les cas, une fermeture par compactage de la surface traitée à l'avancement des travaux est indispensable.

Après un pré-traitement à la chaux, un délai d'au moins 12 heures est à respecter avant traitement aux liants hydrauliques.

4.2.4 - Constitution des stocks et reprise

La constitution d'un stock ou dépôt provisoire et sa reprise peuvent contribuer à améliorer l'homogénéité d'un sol grâce à un choix judicieux des méthodes et moyens d'exécution.

Les méthodes habituellement pratiquées pour la réalisation des stocks de matériaux sont applicables à l'exécution des dépôts provisoires de sols :

- préparation des supports de dépôts avec réalisation de pentes ou fossés, au pied des futurs talus, permettant d'évacuer les eaux vers l'extérieur et d'éviter toute stagnation ;
- pose d'un géotextile anti-contaminant en base de stock si nécessaire ;
- constitution du stock par couches élémentaires d'épaisseur variable selon la nature des matériaux et les matériels utilisés ;
- réalisation de pentes suffisantes avec réglage, si nécessaire, et compactage léger de manière à garantir la stabilité du dépôt et à limiter les entrées d'eau ;
- profilage soigné des talus ;
- création de risbermes pouvant servir de piste éventuelle ;
- pour les sols granulaires sensibles à la ségrégation, le déversement des matériaux doit se faire sur la couche en cours de mise en œuvre avec réglage au bouteur à l'avancement ;
- reprise des matériaux par une méthode en adéquation avec la procédure de constitution du stock. Si le stock est monté par couches de faible épaisseur (< 0,60 m) on lui associe préférentiellement une reprise frontale (chargeur, pelle) et, inversement, si le stock est monté par tas jointifs de tombereaux ou camions de forte épaisseur on choisit préférentiellement une reprise par couches de faible épaisseur (décapeuse) ;
- à la fin de la reprise, on conseille de laisser un talon afin d'éviter la contamination des matériaux stockés avec ceux constituant le sol support.

Ainsi réalisée, la reprise des matériaux stockés contribue à améliorer l'homogénéité des matériaux, tant du point de vue de la granulométrie que de la teneur en eau.

L'opération de dépôt-reprise peut également être mise à profit pour procéder à l'humidification des matériaux.

L'évaluation de l'homogénéité apportée par ces opérations est mesurée de la même façon que celle retenue pour qualifier l'homogénéité d'un gisement.

4.2.5 - Humidification

Cette opération a pour but d'amener le sol à une teneur en eau telle qu'après traitement au liant hydraulique le mélange atteint la teneur en eau spécifiée par l'étude de formulation à, au plus, 1 % près. Elle doit tenir compte de la teneur en eau des sols et des pertes susceptibles de se produire lors des opérations de traitement (évaporation, apport de matières sèches). L'eau libre retenue dans le sol doit être répartie de façon homogène dans les agglomérats de sol et à leur périphérie, ce qui impose le respect d'un délai d'imbibition lié à l'argilosité du sol.

Si la correction de la teneur en eau est inférieure à 1 %, elle peut être réalisée juste avant l'épandage du liant ou au cours du malaxage.

Si cette correction est supérieure à 1 %, on procède à une pré-humidification en une ou plusieurs opérations. En fonction de la nature des sols, les délais minimums définis dans le tableau 28, entre deux séquences d'humidification/malaxage sont à respecter :

Chaque opération d'humidification, limitée à 2 %, doit se faire sur le matériau scarifié sur au moins les deux tiers de l'épaisseur de la couche en vue de limiter les concentrations ou ruissellements d'eau. Chaque humidification doit être suivie d'un malaxage sur toute l'épaisseur de la couche.

L'apport d'eau doit être maîtrisé quantitativement, ce qui impose l'emploi :

- de pompes à débit asservi à la vitesse d'avancement du véhicule ;
- de débitmètres ;
- de systèmes permettant de disposer d'une bonne régularité transversale (rampes à eau, gicleurs, systèmes enfouisseurs).

Les arroseuses avec un dispositif de dispersion de type queue de carpe sont interdites.

La qualité de l'eau doit satisfaire les exigences de la norme NF P 98-100 / type 1 (ou éventuellement type 2 après vérification par une étude spécifique).

4.2.6 - Convenance des méthodes retenues

Toutes les procédures de préparation des sols doivent faire l'objet d'épreuves de convenance destinées à prouver que les objectifs d'homogénéité définis dans le chapitre Etudes (cf. § 2.3.2), en fonction du type de couche et du trafic attendu, sont atteints.

Sols	Délais
A ₁ , A ₂	4 heures
B ₅ , B ₆	2 heures
B ₂ , B ₄	30 minutes
B ₃	0

Tableau 28 : délais minimums entre deux séquences d'humidification/malaxage

4.3 - Fabrication

Les progrès technologiques des constructeurs de matériels, les spécifications techniques de l'administration et le savoir-faire des entreprises ont permis de mettre au point des matériels performants et de mieux en mieux adaptés au traitement des sols, qu'il s'agisse du traitement en place ou en centrale.

Afin d'aider au bon choix du matériel, le maître d'œuvre et l'entreprise disposent :

- de normes établissant la terminologie et les principales spécifications techniques ;
- d'avis techniques édités par le CFTR et, pour certains matériels, de certificats d'aptitude technique (CATM édités par le CFTR) donnant l'aptitude et le niveau de performances susceptible d'être atteint.

La fabrication des mélanges de sols traités fait appel aux opérations spécifiques suivantes :

L'apport de liant

Pour le traitement en place, la fonction apport de liant peut être réalisée par apport de liant pulvérulent, à la surface de la couche à traiter, à l'aide d'un épandeur.

Il existe éventuellement la possibilité d'introduire le liant sous forme de suspension (eau + liant hydraulique) préparée dans un mélangeur mobile et injectée directement dans la chambre de malaxage.

Pour le traitement en centrale, le liant est transporté par des extracteurs à vis du silo jusqu'à la bande transportant les matériaux ou directement dans le malaxeur.

La protection de l'environnement, vis-à-vis notamment des risques d'envol de liant, doit être prise en compte : dispositifs appropriés à chaque matériel et éventuellement utilisation de liants à faible taux d'émission de poussières.



Photo 1 : épandeur de liants – Source : Colas.SA

Le malaxage

Pour le traitement en place, la fonction malaxage est réalisée avec des pulvérisateurs de sols à arbre horizontal.

Elle permet de disperser le liant au sein du volume de matériau à traiter et d'atteindre la mouture recherchée.

La qualité du malaxage dépend du sens et de la vitesse de rotation du rotor, de la vitesse d'avancement de l'engin, de la forme des outils, de leur nombre, de leur disposition sur le rotor, de leur usure ainsi que du volume de matériau retenu dans la chambre de malaxage en fonction de la position des volets de réglage.

Pour le traitement en centrale, la fonction malaxage est assurée par un malaxeur à poste fixe.

La qualité du malaxage dépend de la vitesse linéaire des outils, de leur forme, de leur nombre, de leur disposition (palettes en retenue), de leur usure ainsi que du volume contenu dans la chambre de malaxage en fonction de la position de la trappe de retenue.

Le passage en centrale ne permettant pas généralement d'améliorer la mouture des sols fins argileux, il peut être nécessaire de préparer spécifiquement le sol (décohésion, prétraitement à la chaux). Le respect de la granularité du mélange fabriqué (D_{max}) pourra être obtenu en disposant sur les pré-doseurs des grilles d'écrêtement.

4.3.1 - Niveau de qualité des matériels de traitement pour assises de chaussées

Remarque générale : les seuls épandeurs autorisés pour le traitement des sols en assises de chaussées sont les épandeurs dont le dosage est asservi à la vitesse de déplacement. Ils pourront être équipés d'un système permettant de connaître la surface traitée par jour afin de vérifier le dosage journalier en fonction du tonnage de liant épandu.

La définition et l'acceptation des matériels spécifiques propres à un chantier de traitement en place avec un liant hydraulique peuvent être réalisées en fonction de deux critères pour les épandeurs de liant pulvérulent, un critère pour les arroseuses et quatre critères pour les pulvérisateurs de sols.

Ces critères permettent de caractériser la qualité des matériels.

Épandeurs de liant pulvérulent en place

- C : homogénéité d'épandage du liant (Coefficient de variation C_v exprimé en %) ;
- V : possibilité de faire varier la largeur d'épandage de liant.

Le tableau 29 précise comment sont notés ces différents critères :

Critère		Note des critères pour l'épandage des liants		
		3	2	1
C	Homogénéité d'épandage du liant (en %)	$C_v \leq 5$	$5 < C_v \leq 10$	$C_v > 10$
V	Possibilité de faire varier la Largeur d'épandage	OUI	NON	NON

Tableau 29 : notation des critères pour l'épandage des liants

Remarque

La norme NF P 98-115 [33] pour l'exécution des corps de chaussées précise que les matériels ayant un coefficient de variation longitudinale supérieur à 10 % ne sont pas autorisés (zone grisée du tableau 29).

Arroseuses

- W : qualité de l'arrosage

Le tableau 30 précise comment est noté ce critère.

Remarque

Pour le traitement des sols en assises de chaussées les arroseuses à queue de carpe ne sont pas autorisées (zone grisée du tableau 30).

Matériels de malaxage en place

- H : qualité d'homogénéisation du matériau avec le liant ;
- E : maîtrise de l'épaisseur de traitement ;
- I : présence d'un dispositif d'injection d'eau ;
- L : dosage de liant sous forme de suspension (eau + liant hydraulique).

Le tableau 31 précise comment sont notés ces différents critères.

Remarques

- la norme NF P 98-115 [33] pour l'exécution des corps de chaussées précise que les matériels doivent être à rotor horizontal et équipés d'un indicateur de profondeur. Les systèmes de dosage des liquides (eau ou coulis) doivent assurer une précision minimale de 2 % par exemple ;
- un coefficient de variation Cv supérieur à 5 % sur l'épaisseur (critère E) est équivalent, au niveau structurel, à un manque d'épaisseur d'environ 10 %.

Critère		note des critères pour l'arrosage		
		3	2	1
W	Type d'arroseuse	Enfouisseuse	Rampe à jets fins	Queue de carpe

Tableau 30 : notation des critères pour l'arrosage



Photo 2 : arrosage par enfouissement — Source : Lhoist



Photo 3 : malaxage du matériau traité en place — Source : Colas.SA

Centrale de fabrication

Selon les systèmes de dosage, de contrôle et d'automatisation qu'elles comportent, les centrales de fabrication peuvent être classées selon deux niveaux ; le niveau 2 correspond à une centrale plus performante que le niveau 1.

Le tableau 32, extrait de la norme NF P 98-732-1 [47], précise, pour chaque fonction, les exigences nécessaires pour atteindre chaque niveau.

Critères		Note des critères pour le malaxage en place		
		3	2	1
H	Homogénéisation du matériau avec le ou les liants	Homogénéisation verticale et transversale (malaxeur associé)	Homogénéisation verticale uniquement	Homogénéisation limitée
E	Maîtrise de l'épaisseur traitée	Réglage et contrôle de l'épaisseur avec fonction supplémentaire de maintien à la profondeur ⁽¹⁾	Réglage et contrôle de l'épaisseur	Réglage de l'épaisseur
I	Possibilité d'injecter l'eau dans la chambre de malaxage	Pompe à débit variable asservi à la translation et rampe de largeur variable	Pompe à débit variable asservi à la translation	Pas d'asservissement
L	Dosage du liant sous forme de suspension (eau + liant hydraulique)	Pompe à débit variable asservi à la vitesse de translation ou au poids de matériau traité + débitmètre (eau) et pesée (liant)	Pompe à débit variable asservi à la vitesse de translation ou au poids de matériau à traiter + compteur volumétrique	Pompe à débit variable non asservi

(1) La fonction de maintien à la profondeur de la chambre de malaxage empêche la remontée de celle-ci en cas d'augmentation trop importante du couple du rotor. La remontée du rotor ne peut se faire que manuellement par le conducteur

Tableau 31 : notation des critères pour le malaxage en place

Exigences à respecter en fonction du niveau des centrales		
Fonction	Niveau 1	Niveau 2
Dosage des gravillons à teneur maximale en éléments fins (< 80 µm) ≤ 2 %	Doseur continu à débit volumétrique	Doseur continu à débit volumétrique avec au minimum une mesure continue de la vitesse de défilement de la bande sur le tambour mené
Dosage des gravillons à teneur en éléments fins (< 80 µm) > 2 %, Sables, liants humides, pulvérulents	Doseur continu à débit volumétrique	Doseur continu à débit pondéral
Contrôle de la teneur en eau du mélange ou du sable		Continu ⁽¹⁾ avec prise en compte par l'automatisme d'acquisition
Acquisition de données		Module d'acquisition de données ⁽²⁾
Asservissement	Détecteur tout ou rien sur chaque doseur (granulats et pulvérulents)	Conformité aux fonctions décrites à l'article « asservissement » de NF P 98-732-1 [47]
Dosage de l'eau		Asservi à la formule et à la mesure en continu de la teneur en eau des constituants ⁽³⁾
Dosage des adjuvants		Asservi à la formule
Variation du débit global		Conjugateur agissant sur le débit de tous les constituants ⁽⁴⁾

(1) cette spécification sera appliquée dès lors que le matériel nécessaire sera au point

(2) un bornier ou une prise informatisée doit permettre de brancher un module additionnel d'acquisition de données conforme à la norme NF P 98-772-1 [47]

(3) la spécification relative à la prise en compte automatique de la teneur en eau des granulats sera appliquée dès lors que le matériel nécessaire sera mis au point

(4) la spécification concernant l'asservissement du conjugateur sur le débit d'eau sera appliquée dès lors que le matériel nécessaire sera mis au point

Tableau 32 : exigences à respecter en fonction du niveau des centrales

Niveaux de qualité de traitement

Deux niveaux de qualité du traitement (AC) sont envisagés pour l'utilisation de sols traités en assises de chaussées.

Le niveau de qualité AC1 (supérieur au niveau de qualité AC2) requiert l'utilisation de matériels présentant au moins les caractéristiques figurant dans le tableau 33 (zone claire du tableau).

Par exemple un matériel de coefficient CVHEW de 23233 est de niveau de qualité AC1.

Le niveau de qualité AC2 requiert l'utilisation de matériels présentant au moins les caractéristiques figurant dans le tableau 34 (zone claire du tableau).

4.3.2 - Traitement en place

Le traitement doit être réalisé sur l'assise de chaussée. Il doit se dérouler de la façon suivante:

- humidification préalable des matériaux conformément aux règles du § 4.2.5 ;
- détermination de la masse surfacique de liant à épandre (par exemple rapporté au m²), en fonction de la masse volumique du sol en place et du dosage visé ;

- épandage du liant à l'aide d'un épandeur dont les notes « C et V » conditionneront la qualité susceptible d'être atteinte (AC1 ou AC2) ;

- malaxage réalisé avec un matériel dont les notes conditionnent le classement en AC1 ou AC2. Le malaxage est poursuivi jusqu'à l'obtention d'un mélange sol/liant de teinte uniforme et présentant une mouture conforme aux exigences (< à 20 mm). Il peut intégrer un ajustement de la teneur en eau si nécessaire.

Remarque

Actuellement, le traitement aux liants hydrauliques à l'emprunt ou sur stock est en principe déconseillé sauf pour des applications particulières (notamment en cas de difficultés d'accès pour les engins de traitement telles que les zones exigües, les entourages de regards, poteaux, obstacles, etc.).

Définition du niveau de qualité de traitement AC1			
Note ou niveau	3	2	1
C ou L			
V			
H			
E			
W ou I			
Centrale de fabrication ⁽¹⁾			

(1) Il n'existe pas actuellement de centrale de fabrication de niveau 3

Tableau 33 : définition du niveau de qualité de traitement AC1

Définition du niveau de qualité de traitement AC2			
Note ou niveau	3	2	1
C ou L			
V			
H			
E			
I ou W			
Centrale de fabrication ⁽¹⁾			

(1) Il n'existe pas actuellement de centrale de fabrication de niveau 3

Tableau 34 : définition du niveau de qualité de traitement AC2

4.3.3 - Traitement en centrale

Reprise sur stocks des matériaux avant traitement en centrale

Dans la plupart des cas, le passage en centrale nécessite la réduction des éléments supérieurs à 31,5 mm (mottes, agglomérats...).

Les techniques d'écrasement des mottes et agglomérats varient selon la nature des matériaux :

- de la technique la plus simple consistant à les écraser sous les chenilles d'un bouteur ou le godet d'une pelle (chantiers à faible cadence) ;
- aux techniques les plus élaborées utilisant des matériels de malaxage (pulvérisateur de sols) ou d'émottage (émoteur).

Ce dernier cas concerne surtout les matériaux prétraités à la chaux : la densification en place, la perte en eau et la prise éventuelle peuvent en effet produire, à la reprise sur stock, des agglomérats qu'il faut réduire.

Dans tous les cas, les quelques éléments grossiers pouvant encore subsister sont éliminés par l'installation sur les trémies d'une grille pouvant être facilement décolmatée.

Lorsque le stock est éloigné, on constitue, sur le site de la centrale, un stock tampon nécessaire pour un ou deux jours de travail. Il doit être impérativement protégé pour éviter les variations de teneur en eau (pente, fermeture de surface, bâchage...).

Fabrication

La centrale de fabrication doit être aménagée pour tenir compte de la finesse et de la masse volumique apparente des matériaux à traiter afin de limiter les risques de colmatage, bourrage, etc.

Il faut malgré cela prévoir, dès l'étude de prix, une réduction du débit nominal de la centrale (usuellement déterminé pour le traitement de graves) de l'ordre de 30 à 50 %.

Les performances et la conduite de la centrale doivent permettre de répondre aux particularités suivantes :

- **Permettre un dosage en liant élevé**

La gamme de dosages en liant étant habituellement élevée par rapport aux dosages pratiqués avec les graves traitées, le nombre de silos doit être prévu en conséquence.

Il est indispensable que le liant soit réparti sur toute la largeur de la bande transportant le matériau au malaxeur.

- **Assurer un bon écoulement**

Même après pré-traitement à la chaux, certains sols (A1, A2, B5, B6...) conservent un caractère collant. Pour limiter d'éventuels problèmes d'écoulement, les aménagements suivants sont conseillés :

- adopter pour les trémies des formes à parois plus verticales, sans étranglement, revêtues de plaques de téflon ou d'acier inoxydable. Un dispositif anti-voûte et des vibreurs convenablement positionnés facilitent l'écoulement des matériaux ;
- installer des racleurs au niveau des bandes doseuses et transporteuses de façon à limiter leur encrassement.

Au début du chantier, l'étalonnage des doseurs doit être effectué à plusieurs reprises au cours d'une journée de fabrication afin de déterminer en régime de croisière le réglage moyen à appliquer.

- **Maîtriser le malaxage**

Compte tenu de la cohésion des sols fins, un temps de malaxage suffisant, en général plus long que celui nécessaire aux sables et graves traités, est requis.

Pour ces sols, les malaxeurs à arbres longs s'avèrent les plus efficaces. Avec des malaxeurs courants, il est nécessaire de régler la pente, la hauteur de la porte de retenue ou éventuellement d'installer certaines pales en rétro.

A ce jour, de nouveaux types de malaxeurs, spécialement adaptés au traitement des sols sont en cours de conception et d'étude.

L'ajustement de teneur en eau dans le malaxeur ne doit pas excéder 1%. Au-delà de cette quantité, une pré-humidification doit être prévue sur le stock, afin que l'eau ait le temps de bien pénétrer au cœur du matériau.

Pour prévenir l'encrassement, le malaxeur doit être nettoyé tous les jours.

Si l'emploi d'un retardateur de prise s'avère nécessaire, il peut être dosé avec la même installation que celle employée pour les graves hydrauliques.

4.4 - Transport et mise en œuvre

Toutes les prescriptions habituelles de la norme NF P 98-115 [33] relatives au transport et à la mise en œuvre des matériaux traités sont applicables (protection du support, respect du délai de maniabilité, protection des matériaux transportés vis-à-vis des intempéries, etc).

4.4.1 - Transport des mélanges

Pour écarter les risques de pollution par des matériaux ayant dépassé le délai de maniabilité et éviter ainsi une diminution de la capacité de transport voire des déséquilibres au levage, un raclage et un nettoyage des bennes doivent être effectués à chaque rotation.

Si les voies de circulation sont constituées par la couche support (couche de forme ou couche de fondation), il est là également important de veiller à la propreté des pneus pour éviter ultérieurement des problèmes en relation avec les conditions d'interfaces.

4.4.2 - Mise en œuvre

Régalage et préreglage

Cas d'un matériau préalablement traité

Le régalaage a pour objet de répartir le matériau après approvisionnement pour faciliter l'opération du préreglage.

Le préreglage consiste à la mise à une cote prenant en compte une surépaisseur de 10 % à 25 % de l'épaisseur foisonnée. Cette surépaisseur qui est éliminée au cours du réglage final, permet de minimiser le feuilleteage de surface et d'éviter les risques de zones en sous profil. La surépaisseur nécessaire est déterminée lors de l'exécution d'une planche d'essai ou suivant l'expérience de chantiers antérieurs.

Cas d'un matériau traité en place

Dans ce cas, à l'issue de l'approvisionnement, le sol doit impérativement être précompacté et préreglé avant traitement, afin de maîtriser l'épaisseur traitée. La cote de préreglage est définie lors d'une planche d'essai.

Après traitement, les opérations s'enchaînent conformément au paragraphe précédent.

Compactage partiel

Pour l'efficacité du réglage altimétrique final, il est recommandé d'appliquer pendant ce compactage partiel environ 80 % de l'énergie de compactage nécessaire pour atteindre l'objectif de densification finale, ou 100 % pour les matériaux susceptibles de feuilletter.

Les compacteurs vibrants V4 et V5 (selon la norme NF P 98-736 [48]) sont à déconseiller lorsque les épaisseurs à compacter sont faibles (pour éviter

les risques de feuilleteage) et permettent l'action de compacteurs de plus faible énergie.

Les compacteurs vibrants à pieds dameurs peuvent être utilisés dans le cas des sols ayant tendance à feuilletter. Néanmoins une planche d'essai préalable est effectuée afin de s'assurer de l'absence d'empreintes résiduelles en surface.

Maintien de l'état hydrique de surface

Cette opération consiste en une « pulvérisation » d'eau en surface (rampe à eau avec jets fins), pendant les phases de mise en œuvre ou en attente de la protection superficielle, en fonction des conditions météorologiques.

Elle ne permet pas d'allonger le délai de maniabilité ni de corriger la teneur en eau du mélange dans la masse.

Réglaage final

Cette opération consiste à enlever et à évacuer la surépaisseur laissée sur toute la surface de la couche après le compactage partiel.

Les produits issus du réglage final doivent être évacués, et non pas réutilisés en assises.

Les tolérances de nivellement (norme NF P 98-115 [33]) sont :

- couche de fondation : ± 3 cm
- couche de base : ± 2 cm

On note que, dans le cas de matériaux feuilletés, la méthode actuellement préconisée consiste, lors du réglage fin, à éliminer une partie de la zone feuilletée produite lors du compactage partiel, puis à fermer la surface avec des compacteurs à pneus.

Compactage final

Il a pour but d'apporter le complément de compactage nécessaire pour atteindre l'objectif de densification finale et/ou de re-densifier la partie supérieure qui a pu être désorganisée par le réglage final.



4.5 - Protection superficielle

Toutes les couches d'assises en sols traités doivent recevoir rapidement une protection superficielle, au plus tard en fin de journée. Celle-ci ne peut, en aucun cas, constituer une couche de roulement définitive.

La protection superficielle doit permettre d'assurer les rôles suivants :

- maintenir l'état hydrique du sol traité (pas d'évaporation, ni d'infiltration) pendant sa période de prise hydraulique ;
- favoriser l'accrochage avec la couche supérieure ;
- augmenter la résistance aux efforts tangentiels induits par le trafic chantier qu'elle aura à supporter,
- réduire la glissance en cas de pluie ;
- minimiser les émissions de poussières provoquées par le trafic chantier.

Le choix de la protection superficielle adaptée dépend des rôles qui lui sont dévolus, de la nature des sols traités, des sollicitations mécaniques et climatiques supportées.

4.5.1 - Particularités liées à la nature des sols traités

Dans le cas d'enduit superficiel bitumineux sur les sols fins et les sols sableux traités, un cloutage⁽¹⁾ est souvent indispensable pour assurer un bon ancrage de la protection superficielle dans le sol traité.

Pour les sols graveleux traités présentant, après compactage, une bonne mosaïque granulaire aucune disposition particulière n'est, en général, nécessaire pour favoriser l'accrochage de la protection superficielle.

Niveau d'exposition	Saison	Durée d'exposition
0	Indifférente	≤ une semaine
1	Printemps - été	≤ un mois
2	Printemps - été	≥ un mois
3	Arrière saison	> une semaine
4	Arrière saison et hiver	> une semaine

Tableau 36 : niveau d'exposition aux sollicitations climatiques de la protection superficielle

⁽¹⁾ Le cloutage consiste à épandre et à enchâsser dans la surface de la couche traitée, après compactage final, des gravillons entièrement concassés (code Ang 1 selon la norme XP P 18-545[76]), de bonne dureté (Los Angeles inférieur ou égal à 30), de gros calibre (14/20 mm, voire plus) à un dosage tel que 30 à 50 % environ de la surface soit couverte. L'enchâssement doit être exécuté avant la fin du délai de maniabilité par 2 à 3 passes de compacteur et peut être facilité par une pulvérisation d'eau sur la surface (environ 1 litre/m²). Les gravillons doivent être enchâssés sur environ la moitié de leur hauteur.

4.5.2 - Les sollicitations mécaniques

Les sollicitations mécaniques peuvent, en fonction du trafic cumulé supporté pendant la réalisation du chantier, être classées par ordre croissant d'agressivité selon le tableau 35.

Niveau d'agressivité	Nombre de PL cumulés par sens
A	moins de 20 PL
B	20 à 500 PL
C	supérieur à 500 PL

(Selon GTS - édition 2000 [4])

Tableau 35 : classes d'agressivité en fonction du trafic supporté par la couche traitée avant réalisation de la couche suivante

Le niveau d'agressivité dans les cas A et B est augmenté d'une classe si les vitesses sont supérieures à 60 km/h, ainsi que dans les zones de virage.

4.5.3 - Les sollicitations climatiques

Avant d'être recouverts par la couche de chaussée suivante, les sols traités et revêtus de la protection superficielle sont exposés à des sollicitations climatiques.

Comme pour le trafic, un classement des niveaux d'exposition par ordre croissant de sévérité est proposé dans le tableau 36.

4.5.4 - Les différents types de protection superficielle

Les types de protection superficielle envisageables sont en grande partie les mêmes que ceux décrits dans le GTS. Ils sont indiqués dans le tableau 37.

Appellation	Formulation (par m ²)	Commentaires
Enduit de scellement (ES)	0,8 à 1,1 kg d'émulsion* + petits gravillons à refus**	Plus efficace contre la dessiccation qu'un enduit de cure si la durée d'exposition est importante
Enduit monocouche (EM)	1,3 à 1,6 kg d'émulsion + 7 à 8 litres de gravillons 4/6** ou 9 à 10 litres de gravillons 6/10**	Le choix du gravillon dépend de l'agressivité du trafic. Le taux d'émulsion peut être augmenté de 5 à 10% suivant la rugosité du support
Enduit bicouche (EB)	1 ^{ère} couche : 1,1 à 1,3 kg d'émulsion* 10 à 11 litres de gravillons 10/14** 2 ^{ème} couche : 1,5 kg d'émulsion* 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	L'ajustement de la quantité d'émulsion de la première couche doit être réalisé en fonction de la rugosité du support
Enduit pré gravillonné (EP)	8 à 9 litres de gravillons 10/14** + 2 kg d'émulsion* + 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	Cette protection est comparable à celle obtenue par l'application d'un enduit monocouche sur une plate-forme préalablement cloutée

*Masse surfacique donnée pour une émulsion cationique à 65 % de bitume.

** Les gravillons doivent avoir un coefficient Los Angeles ≤ 30 et une propreté (tamis à 63 microns) ≤ 2 %

Tableau 37 : types de protection superficielle



Photo 4 : protection superficielle avec pré gravillonnage — Source : Lhoist



Photo 5 : gravillonnage — Source : Cimbéton

Les degrés d'efficacité de ces protections superficielles, en fonction des rôles qu'elles peuvent être amenées à remplir, sont récapitulés dans le tableau 38.

L'émission de poussière sur une couche de chaussée en sol traité traduit une dégradation de ce dernier ; elle doit faire l'objet d'une fiche de non-conformité.

Type de protection superficielle	Rôles					Réduction des émissions de poussières
	Protection contre l'évaporation	Protection contre l'infiltration	Accrochage de la couche supérieure		Protection mécanique	
			Assise hydraulique	GB ou BB		
Enduit de scellement ES	=	=	-	=	=	+
Enduit monocouche EM	=	=	-	+	=	+
Enduit bicouche EB	+	+	=	++	+	++
Enduit pré gravillonné EP	+	+	=	++	++	++

++ très efficace + efficace = moyennement efficace - peu efficace -- inefficace

Tableau 38 : fonctions et efficacité des différentes natures de protection superficielle

4.5.5 - Choix du type de protection superficielle

Pour assurer la durabilité de la protection pendant la période d'exposition de la couche, on retient les types de protection superficielle présentés dans les tableaux 39 et 40, en fonction des niveaux d'agressivité du trafic, de l'exposition climatique et de la nature de la couche (fondation ou base).

On notera qu'une pulvérisation d'eau est indispensable préalablement à toute application d'une protection superficielle à base d'émulsion de bitume et qu'il est nécessaire de respecter un certain délai avant toute mise en circulation de la couche traitée.

Couche de fondation	Niveau d'exposition climatique				
Niveau d'agressivité du trafic du chantier	0	1	2	3	4
A	ES				
B	ES	ES	EM	EM	EM
C	ES	EM	EM* ou EB	EB	EB ou EP**

* si sur sols graveleux

** si sur sols sableux non cloutés

Tableau 39 : choix du type de protection superficielle pour couche de fondation

Couche de base	Niveau d'exposition climatique				
Niveau d'agressivité du trafic du chantier	0	1	2	3	4
A	EM				
B	EM				
C	EM	EM	EB* ou EP**	EB* ou EP**	EB* ou EP**

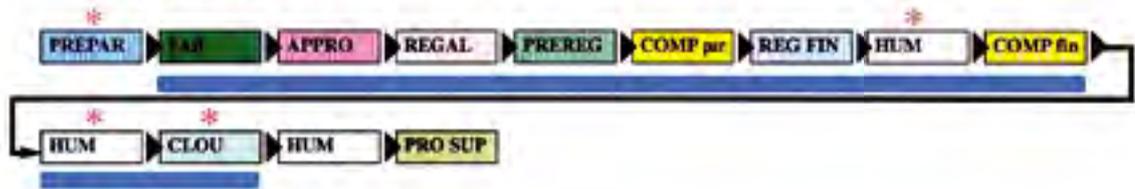
* favoriser EB pour l'étanchéité surtout sur sols fins

** si sols sableux non cloutés

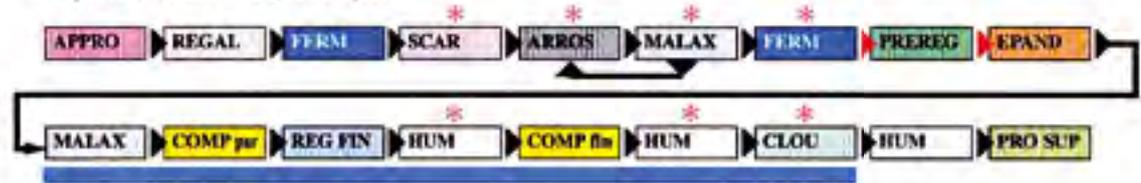
Tableau 40 : choix du type de protection superficielle pour couche de base

Ordinogramme de traitement des sols pour assises de chaussées

1^{er} cas *Traitement au liant hydraulique en central d'un sol naturel ou prétraité à la chaux puis mise en oeuvre.*



2^{ème} cas *Approvisionnement, après préparation éventuelle du sol naturel ou prétraité à la chaux pour traitement en place avec un liant hydraulique.*



3^{ème} cas *Double traitement en place à la chaux et au liant hydraulique.*



APPRO	Approvisionnement du matériau (sur le lieu de mise en oeuvre)
ARROS	Arrosage du mélange pour ajuster la teneur en eau
CLOU	Cloutage
COMP par	Compactage partiel (environ 80 % de l'énergie nécessaire)
COMP fin	Compactage final
EPAND	Epandage du produit de traitement (plusieurs passes si besoin)
FAB	Fabrication du mélange (en centrale ou au stock)
FERM	Fermeture de surface par compactage léger (2 passes)
HUM	Humidification pour maintien de la teneur en eau
MALAX	Malaxage du sol avec le produit de traitement et éventuellement humidification sous la cloche

PREPAR	Extraction et préparation du sol (homogénéisation en place ou sur stock, émottage éventuel...)
PREREG	Pré-réglage de la plate-forme (de 10 à 25 % au dessus de la cote finale)
PRO SUP	Protection superficielle
REGAL	Régilage du matériau approvisionné
REG FIN	Régilage fin
SCAR	Scarification

* L'exécution de cette opération n'est pas systématique et dépend des conditions de chantier

▶ Délai si besoin pour obtenir les effets souhaités

■ Opérations devant être exécutées pendant le délai de maniabilité du mélange

4.6 - Le contrôle de la qualité

La réalisation d'une assise de chaussée est toujours une opération fondamentale.

En effet, la qualité des couches d'assises, où se concentrent les sollicitations mécaniques les plus intenses (déformation verticale et contrainte de traction en base de couche traitée), conditionne la durée de vie de la chaussée.

C'est pourquoi, ce guide, tout en décrivant les orientations et les obligations techniques à appliquer, insiste autant sur la consistance minimale des contrôles dans le cadre des assurances qualité, de façon à encadrer le plus rigoureusement possible l'exécution des travaux.

Le management de la qualité intervient depuis la conception du projet jusqu'à la réception des travaux et notamment sur les points suivants :

- **Reconnaitances géotechniques** : elles doivent permettre de déterminer ou de confirmer :
 - la classification du sol (NF P 11-300 [16]),
 - sa classe d'homogénéité,
 - des états hydriques actualisés,
 - les quantités de sols homogènes réellement disponibles.
- **Produits de traitement** : ils doivent être normalisés ou disposer d'un avis technique (ou d'une procédure équivalente) ;
- **Etude de traitement** : elle a pour but de déterminer la formulation du mélange «sol + liants» qui permet d'obtenir les caractéristiques mécaniques à prendre en compte dans le dimensionnement ;
- **Dimensionnement** : les caractéristiques mécaniques des sols traités - résistance en traction (R_t) et module d'élasticité (E) - doivent être correctement appréhendées (et surtout ne pas être surestimées) ;
- **Les caractéristiques de fatigue et d'interface** à prendre en compte sont celles définies dans ce guide ;
- **Matériel d'exécution** : il doit être en adéquation avec les hypothèses de laboratoire et avec la qualité requise ;
- **Qualité des interfaces** : la qualité du collage dépend avant tout du soin apporté à l'exécution des travaux.

Le maintien de l'état hydrique en surface des couches traitées, l'absence de salissures, la réduction du feuilletage superficiel ainsi que le choix approprié de la protection superficielle concourent fortement à minimiser le risque de décollement dans le temps.

Le tableau 41 « Contrôles sur chantier » est destiné à guider le décideur et l'entrepreneur au travers d'actions concrètes de suivi, propres à chacune des étapes de la réalisation des couches de chaussées en sols traités.

Lorsque ces prescriptions sont identiques à celles décrites dans la norme NF P 98-115 [33] ou dans la partie C3 du guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » (GTS - janvier 2000) [4], elles ne sont pas reprises en détail dans ce tableau.

Son application rigoureuse aide grandement à garantir la qualité de l'ouvrage.



PHASE DU CHANTIER	ACTIONS			FRÉQUENCE MINIMUM (indicative)								
	NATURE	CONSISTANCE	COMMENTAIRES	CHANTIERS DE FAIBLE IMPORTANCE (volume de matériaux de chaussées $V_{chaussées} < 5000 \text{ m}^3$ environ)	AUTRES CHANTIERS							
AVANT REALISATION DES TRAVAUX - PREPARATION DU CHANTIER	<p>PLAN D'ASSURANCE QUALITÉ (PAQ) :</p> <p>Établissement et Présentation</p>	<p>Le PAQ est un document :</p> <ul style="list-style-type: none"> • établi en conformité avec les prescriptions du marché et le contenu du SOPAQ • évolutif : il peut être, si nécessaire, complété ou modifié au cours de l'avancement des travaux • visé par le maître d'œuvre (document initial et modifications ultérieures) 	<p>Le PAQ comprend notamment :</p> <ul style="list-style-type: none"> • une note d'organisation générale (organigramme du chantier, liste des intervenants, sous-traitants, fournisseurs, matériels, matériaux et liste des points sensibles et d'arrêt) • des procédures d'exécution • des fiches de contrôle • des fiches de non-conformité • des documents techniques (études de formulation...) 	1 PAQ par chantier								
	<p>MATÉRIAUX À TRAITER :</p> <p>Vérification de la nature et de l'état</p>	<p>Vérifier que les caractéristiques réelles sont identiques à celles définies dans l'étude de reconnaissance du marché et prises en compte dans les études de formulation</p> <p>Cette vérification est réalisée par l'entreprise dans le cadre de son « Etude de reconnaissance complémentaire » :</p> <ul style="list-style-type: none"> • identification selon GTR [5] et NF P 11-300 [16] • analyse granulométrique : NF P 94-056 [23] • valeur de bleu de méthylène (VBS) NF P 94-068 [24] • essai Proctor : NF P 94-093 [25] ou NF EN 13286-2 [64] • indice portant immédiat (IPI) : NF EN 13286-47 [67] • teneur en eau : NF P 94-049-1 [19], NF P 94-049-2 [20] et NF P 94-05 [21] 	<p>Le PAQ (ou une procédure) doit définir :</p> <ul style="list-style-type: none"> • fréquence des prélèvements, • type et fréquence des essais • mesures à prendre en cas de dérive par rapport aux hypothèses initiales (humidification, aération, traitement complémentaire, rejet ...) <p>Définition de la valeur moyenne et de la dispersion des caractéristiques de nature et d'état</p>	<p>Sols fins A</p> <ul style="list-style-type: none"> • VBS : 1 essai pour 1 000 m³ extraits • OPN & IPI sur les valeurs extrêmes de VBS : <table border="1"> <tr> <td>2 essais par chantier</td> <td>1 essai pour 5 000 m³</td> </tr> </table> <p>Sols sablo - graveleux B</p> <ul style="list-style-type: none"> • passants à 0,08 mm / 2 mm / 31,5 mm : <table border="1"> <tr> <td>1 essai par chantier</td> <td>1 essai pour 1000 m³</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • VBS : <table border="1"> <tr> <td>1 essai par chantier</td> <td>1 essai pour 1 000 m³</td> </tr> </table> <p>Sols A et B</p> <ul style="list-style-type: none"> • teneur en eau 1 essai pour 1000 m³ • IPI : <table border="1"> <tr> <td>1 essai par chantier</td> <td>1 essai pour 1000 m³</td> </tr> </table>		2 essais par chantier	1 essai pour 5 000 m ³	1 essai par chantier	1 essai pour 1000 m ³	1 essai par chantier	1 essai pour 1 000 m ³	1 essai par chantier
2 essais par chantier	1 essai pour 5 000 m ³											
1 essai par chantier	1 essai pour 1000 m ³											
1 essai par chantier	1 essai pour 1 000 m ³											
1 essai par chantier	1 essai pour 1000 m ³											

Tableau 41 : contrôles sur chantier



PHASE DU CHANTIER	ACTIONS			FRÉQUENCE MINIMUM (indicative)	
	NATURE	CONSISTANCE	COMMENTAIRES	CHANTIERS DE FAIBLE IMPORTANCE (volume de matériaux de chaussées $V_{chaussées} < 5000 \text{ m}^3$ environ)	AUTRES CHANTIERS
AVANT RÉALISATION DES TRAVAUX PRÉPARATION DU CHANTIER	AGRÈMENTS DES PRODUITS : LIANTS Chaux, Ciment Liant hydraulique	Décision du maître d'œuvre, à partir : <ul style="list-style-type: none"> des prescriptions du marché de la demande d'agrément proposée par l'entreprise (accompagnée des documents nécessaires à la décision) 	Documents principaux nécessaires à la décision : <ul style="list-style-type: none"> fiche technique (conformité de la ...) normes (marque NF éventuelle) études de formulation 	1 agrément par produit et par provenance	
	AUTRES PRODUITS Gravillon pour enduit, émulsion ou liant d'enduisage		<ul style="list-style-type: none"> fiche technique du produit normes fiche technique (par type d'émulsion) 		
	MATÉRIEL D'EXECUTION : ACCEPTATION DU CHOIX	Décision du maître d'œuvre, à partir : <ul style="list-style-type: none"> des prescriptions du marché des documents proposés par l'entreprise 	Éléments nécessaires à la décision : <ul style="list-style-type: none"> adéquation type de matériel / objectifs et technique d'exécution fiche technique du matériel dimensionnement des ateliers 	1 acceptation par machine (sous réserve de validation ultérieure après exécution de l'épreuve de convenance)	
PRÉPARATION DE L'EXECUTION DES TRAVAUX (CCTG - fascicule n° 25) [1]	PRODUITS LIVRÉS : CONFORMITÉ	Vérification de la conformité à la fiche d'agrément	Contrôles périodiques réalisés par le fournisseur (conformément à son PAQ) et transmis à l'entreprise	1 fiche de contrôle interne du fournisseur Contrôle systématique des bons de livraison des produits	
			Chaux vive : réactivité - NF EN 459-2 [59] $t_c > 60^\circ \text{ C}$ en moins de 25 min	1 essai par chantier	1 essai pour 100 tonnes livrées
			Pour tous les liants : prélèvement conservatoire en conteneurs hermétiques stockés à l'abri de l'humidité	1 prélèvement de 2 kg : par chantier et par produit	pour 250 tonnes (ciments, HRB) livrées pour 100 tonnes (chaux) livrées
	MATÉRIEL : CONVENANCE Épandeur de liant Malaxeur	Vérification de la conformité à la fiche d'acceptation : <ul style="list-style-type: none"> régularité et exactitude du débit d'épandage : - coefficients de variation C_v (Tolérance de la NF P 98-115 [33]) - exactitude : e - largeur d'épandage 	Les caractéristiques seront identiques à celles ayant permis l'acceptation La méthode de mesures peut s'inspirer de celle décrite dans l'annexe 6 du GTS [4] $C_v < 10 \%$ $e \leq 5 \%$ - à mesurer et à préciser si largeur variable	Les épandeurs et compacteurs utilisés doivent avoir été vérifiés une fois dans les trois mois précédant le chantier Pour les autres matériels la vérification doit avoir été effectuée dans les douze mois précédant les travaux	La vérification est réalisée avant ou pendant l'épreuve de convenance Elle doit être renouvelée en cas de changement de matériel (ou de réparations pouvant modifier les caractéristiques)
	- état des outils (dents, couteaux) - profondeur de malaxage	- vérification visuelle - mesure et calage (repère visible)			

Tableau 41 (suite)



PHASE DU CHANTIER	ACTIONS			FRÉQUENCE MINIMUM (indicative)	
	NATURE	CONSISTANCE	COMMENTAIRES	CHANTIERS DE FAIBLE IMPORTANCE (volume de matériaux de chaussées $V_{chaussées} < 5000 \text{ m}^3$ environ)	AUTRES CHANTIERS
PRÉPARATION DE L'EXÉCUTION DES TRAVAUX (CCTG - fascicule n° 25) [1]	Arroseuse	Régularité et exactitude du débit d'épandage (débitmètres et système d'asservissement dans le cas d'arroseuse-enfouisseuse)	La méthode de mesure peut s'inspirer de celle de décrite dans l'annexe 6 du GTS		
	Centrale	Réglage et contrôle des appareils : • NF P 98-115 [33] (article 8.2.1.3) • NF P 98-744-1 [49] à 744-5 [50 à 53]	Mesures de : • régularité et de précision des dosages • vitesse des tapis (matériaux, liants, eau)		
	Compacteur	Étalonnage, réglage et classification : • masse • moment d'excentrique et fréquence • pression de contact au sol	NF P 98-761 [55] NF P 98-760 [54]		
	Répandeuse à émulsion	Régularité du débit et de l'épandage	NF P 98-275-1 [44]		
	Gravillonneur	Régularité du débit et de l'épandage	NF P 98-276-1 [45] et 2 [46]		
	Matériel de réglage topographique asservi à la niveleuse	Précision et régularité des mesures altimétriques	Appareil topographique type GPS/DPS vérifié selon une méthodologie définie par le constructeur		
	COUCHE SUPPORT : VÉRIFICATION (Guide technique « Conception des structures de chaussées neuves »)	Vérifications avant mise en œuvre de la couche à traiter : • module support non traité (plaque, dynaplaque) • déflexion (poutre Benkelman, déflectographe ou curviamètre) • altimétrie de la couche support	• NF P 94-117-1 [26] et 2 [27] (plaque, dynaplaque) • NF P 98-200-1 [35] à 200-7 [36 à 42] (poutre Benkelman, déflectographe ou curviamètre) • levé topographique	1 essai pour 250 m ²	ou 1 passage par voie de circulation (déflectographe ou curviamètre)
				3 essais : axe + rives pour 250 m ²	pour 150 m ²

Tableau 41 (suite)



PHASE DU CHANTIER	ACTIONS			FRÉQUENCE MINIMUM (indicative)	
	NATURE	CONSISTANCE	COMMENTAIRES	CHANTIERS DE FAIBLE IMPORTANCE (volume de matériaux de chaussées $V_{chaussées} < 5000 \text{ m}^3$ environ)	AUTRES CHANTIERS
PRÉPARATION DE L'EXÉCUTION DES TRAVAUX (CCTG - fascicule n° 25) [1]	ÉPREUVE DE CONVENANCE	Vérifier que les moyens et méthodes décrits au PAQ et (éventuellement) testés par l'entreprise sur des planches d'essais répondent de façon satisfaisante aux exigences de qualité requise (marché) et au rendement prévu par l'entreprise	Cette opération doit faire l'objet d'une procédure particulière qui décrira notamment les méthodologies de : <ul style="list-style-type: none"> calage de la sur-épaisseur (épaisseur du pré-réglage) à enlever au cours du réglage fin (pour cause de feuilletage, correction de l'état de surface...) malaxage : obtention de la mouture et de l'homogénéité recherchées compactage : vitesse et nombre de passes permettant d'obtenir la compacité requise déroulement de l'ensemble des opérations (traitement - compactage) dans le délai de maniabilité 		1 épreuve (planche) par : - nature de matériau - modalité de traitement NB : la méthodologie précise est décrite dans le guide « Retraitement des chaussées »
		Traitement en place	<ul style="list-style-type: none"> épannage du liant humidification 		
		Traitement en centrale	<ul style="list-style-type: none"> précision et régularité des débits prise en compte des variations de teneurs en eau (en particulier dues au trajet centrale / chantier) 		
PENDANT L'EXÉCUTION DES TRAVAUX (CCTG - fascicule n° 25 et CCTP «type») [1]	TRAITEMENT : CONFORMITÉ	Vérification de la conformité de la réalisation par rapport aux spécifications (marché - étude) <ul style="list-style-type: none"> dosage en liants : masse de produit épanché au m^2 	Contrôles par pesée (et/ou) : <ul style="list-style-type: none"> sur bache ou bac (1,00 ou 0,50 m^2) ou lecture directe (épandeur équipé d'un système de pesée embarqué) avec enregistrement en continu de l'épandeur (rapportée à la surface traitée) 	2 séries (de 3 pesées) par jour	3 séries (de 3 pesées) par jour
	Traitement en place	<ul style="list-style-type: none"> épaisseur traitée 	<ul style="list-style-type: none"> pige ou relevage de la cloche du malaxeur (tolérance + ou - 2 cm ; cf. norme NF P 98-115) [1] lecture de la réglette du malaxeur ou lecture directe (malaxeur équipé d'un système de contrôle embarqué) 	1 pesée de l'épandeur par jour	3 pesées de l'épandeur par jour
				4 mesures par jour (sondages inopinés)	

Tableau 41 (suite)



PHASE DU CHANTIER	ACTIONS			FRÉQUENCE MINIMUM (indicative)	
	NATURE	CONSISTANCE	COMMENTAIRES	CHANTIERS DE FAIBLE IMPORTANCE (volume de matériaux de chaussées $V_{chaussées} < 5000 \text{ m}^3$ environ)	AUTRES CHANTIERS
PENDANT L'EXÉCUTION DES TRAVAUX (CCTG - fascicule n° 25 et CCTP « type ») [1]	Traitement en centrale	<ul style="list-style-type: none"> régularité de fabrication (matériau, liants, eau) 	<ul style="list-style-type: none"> méthodologie : NF P 98-115 [1] définition et contrôle des seuils d'alerte et d'arrêt : NF P 98-105 [30] 	rapport journalier de fonctionnement de la centrale	
	Traitement en place et en centrale	<ul style="list-style-type: none"> homogénéité du mélange 	<ul style="list-style-type: none"> dispersion du liant : couleur D de la mouture < 20 mm 	visuel en continu	
		<ul style="list-style-type: none"> état hydrique (W visée > WOPN -1) : mesures de la teneur en eau pendant les phases de traitement par essais à réponse rapide 	<ul style="list-style-type: none"> NF P 94-049-1, NF P 94-049-2 [20] NF P 94-050 [21] gammadensimètre - humidimètre (après calage avec mesures à l'étuve) autres méthodes (réchaud à gaz...) 	3 essais par phase de traitement	3 essais par phase de traitement et par 1000 m ³
	COMPACTAGE : CONFORMITÉ	Vérification du taux de compactage (masse volumique sèche en place par rapport à l'optimum Proctor de référence pris à l'étude)	<ul style="list-style-type: none"> mesure de la masse volumique moyenne en place au gammadensimètre 	1 mesure pour 250 m ² avec un minimum de 10 mesures	1 mesure pour 250 m ² par voie de circulation
			<ul style="list-style-type: none"> calcul d'un Q/S spécifique (éventuellement) 	1 par jour et par section	
	NIVELLEMENT ET ÉPAISSEUR DES COUCHES TRAITÉES : VÉRIFICATION	Vérification au niveau de : <ul style="list-style-type: none"> réglage altimétrique de la couche support épaisseur du pré-réglage de la couche avant traitement (couche rapportée et traitée sur place) réglage final après traitement et compactage 	<ul style="list-style-type: none"> moyens et méthodes topographiques classiques 	1 point par profil (axe)	2 points par profil (axe + rives en quinconce)
				2 points par profil (axe + rives en quinconce)	3 points par profil (axe + rives G et D)
	PROTECTION SUPERFICIELLE : VÉRIFICATION	Produits appliqués : granulats pour cloutage et émulsions de bitume : <ul style="list-style-type: none"> qualité quantités et dosage NF P 98-275-1 [44] et 98-276-1 [45] et 2 [46] 	voir «Agréments des produits»	1 série (de 3 mesures)	
<ul style="list-style-type: none"> répandage : mesure au bac pour les gravillons et l'émulsion NB : dans le cas d'une circulation de chantier les enduits seront contrôlés conformément au Guide technique « Enduits superficiels » et NF P 98-160 [34] (type ESU2)			par chantier	par semaine	

Tableau 41 (suite)



PHASE DU CHANTIER	ACTIONS			FRÉQUENCE MINIMUM (indicative)		
	NATURE	CONSISTANCE	COMMENTAIRES	CHANTIERS DE FAIBLE IMPORTANCE (volume de matériaux de chaussées $V_{chaussées} < 5000 \text{ m}^3$ environ)	AUTRES CHANTIERS	
APRÈS RÉALISATION DES TRAVAUX	RÉCEPTION (NF P 98-115) [33]	Géométrie : altimétrie - planimétrie	Moyens et méthodes topographiques classiques	3 points par profil (G, axe, D)		
		Uni longitudinal	Mesure à l'APL : • épreuve de réception si le marché le prévoit • épreuve d'information dans les autres cas		1 passage par voie de circulation	
	PERFORMANCES MÉCANIQUES	Déflexion (à au moins 28 jours)	Vérification de la qualité et de l'homogénéité de la couche traitée pour détection d'anomalies NB : des valeurs > 50/100 mm doivent être considérées comme correspondant à des anomalies	1 essai – poutre Benkelman - par profil	1 passage défectographe ou curviamètre - par voie de circulation	
		Résistances mécaniques sur carottes. Les valeurs mesurées sur des carottes prélevées en place (résistances, masse volumique, longueur) ne doivent pas être utilisées pour réceptionner une couche traitée. Ces essais ne peuvent être utilisés que comme « épreuve d'information »	La qualité globale d'une couche est la conséquence du respect de la chaîne de l'ensemble des contrôles pratiqués au cours du chantier			
	RECOLEMENT	Il est finalisé après les opérations de réception	Le dossier regroupe notamment : • les documents du PAQ (fiches de suivi et de contrôles, agréments, fiches d'adaptation, de non-conformité...) • des documents de synthèse (plans, profils en long, graphiques, photos...) • le traitement des non- conformités	1 dossier de récolement par chantier		

Tableau 41 (fin)



5 - Abréviations - symboles - définitions

AR	Arase des terrassements (c'est la plate-forme livrée au terme des travaux de terrassements et sur laquelle sera mise en œuvre, si nécessaire, une couche de forme)
ACi	Niveau de qualité de traitement de sol
b	Pente de la courbe de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique
BB	Béton Bitumineux
CAM	Coefficient d'agressivité moyenne du poids lourd par rapport à l'essieu de référence
CATM	Certificat d'aptitude technique des matériels routiers
CCTG	Cahier des clauses techniques générales (c'est le document qui fixe les dispositions techniques applicables à toutes les prestations de même nature. Le CCTG - Travaux (décret du 14 juin 1982 modifié) est applicable à tous les marchés de travaux. Il comporte plusieurs fascicules correspondant aux divers types de travaux ou corps d'état : terrassement, travaux en béton, menuiserie métallique, etc.). Le CCTG s'appuie sur des normes techniques, par exemple NF P 98-115 pour les travaux de sols traités
CCTP	Cahier des clauses techniques particulières (c'est le document contractuel, qui définit, pour le projet particulier considéré, l'ensemble des stipulations techniques particulières nécessaires au respect de la qualité requise recherchée par le maître d'œuvre, en complément du CCTG)
CFTR	Comité français pour les techniques routières
CU	Charge utile
Cv	Coefficient de variation
DCE	Dossier de consultation des entreprises (c'est l'ensemble des pièces envoyées aux entreprises en vue de l'établissement de leurs offres)

D	Dimension maximale de tamis pour laquelle le passant est compris entre 80 % et 99 %
D_{\max}	Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans un sol (selon NF P 11-300)
E	Module d'élasticité exprimé en MPa
e	Étendue des mesures
e_r	Étendue relative des mesures (rapport entre l'étendue des mesures e et la moyenne des mesures m)
EB	Enduit bicouche
Eq	Essieu équivalent
EM	Enduit monocouche
EP	Enduit prégravillonné
ES	Enduit de scellement
ESU	Enduit superficiel d'usure
FTS	Fiche technique sol
Fs	Friabilité des sables
GB	Grave bitume
GH	Grave traitée aux liants hydrauliques
GNT	Grave non traitée
GTLH	Grave traitée au liant hydraulique
GTR	Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme
GTS	Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme
Gv	Gonflement volumique exprimé en %
HRB	Liant hydraulique routier (LHR)
IdF	Ile-de-France
Ie	Teneur en liant de la formule d'étude
IPI	Indice portant immédiat ou indice de portance immédiate qui exprime en % la valeur du poinçonnement sur une éprouvette de sol compactée à l'énergie Proctor Normal
Ip	Indice de plasticité d'un sol qui caractérise l'argilosité d'un sol
k_c	Coefficient de calage
k_d	Coefficient tenant compte des discontinuités des structures de chaussées rigides
k_r	Coefficient ajustant la valeur de déformation ou de contrainte admissible en fonction du risque de calcul et des facteurs de dispersion
k_s	Coefficient de prise en compte d'hétérogénéités locales de portance de la couche non liée sous-jacente
Li	Limite inférieure des fuseaux de spécifications des granulats
LA	Coefficient Los Angeles exprimé en %

LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LTCC	Limon traité à la chaux et aux liants hydrauliques
MB	Propreté selon l'essai au bleu de méthylène
MDE	Coefficient micro Deval en présence d'eau exprimé en %
MJA	Moyenne journalière annuelle, utilisée pour le calcul du trafic T_i
MPa	Méga Pascal
MTLH	Matériaux traités aux liants hydrauliques
NE	Nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds
OPN	Optimum Proctor Normal
OPM	Optimum Proctor Modifié
PAQ	Plan d'assurance qualité
PFi	Classe i de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
PST	Partie supérieure des terrassements
PTAC	Poids total autorisé en charge
PL	Poids lourd considéré depuis la parution de la norme NF P 98-082, comme un véhicule dont le poids total est au moins égal à 3,5 tonnes (PTAC \geq 35 kN). L'ancienne définition du poids lourd était les véhicules de charge utile supérieure ou égale à 5 tonnes (CU \geq 50 kN)
Q/S	Quantité de matériau rapportée à la surface unitaire
r_c	Valeur de risque de calcul
R_c	Résistance en compression simple exprimée en MPa
R_t	Résistance en traction directe exprimée en MPa
R_{it}	Résistance à la traction indirecte exprimée en MPa
RTR	Recommandation pour les terrassements routiers
ρ_d	Masse volumique sèche exprimée en t/m^3
ρ_{de}	Masse volumique sèche d'étude du sol ou du matériau exprimée en t/m^3
ρ_{dOPN}	Masse volumique apparente sèche maximale Proctor Normal (c'est la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche mesurée lorsqu'on compacte un sol ou un matériau à l'énergie Proctor Normal, elle est obtenue lorsque la teneur en eau du sol est égale à W_{OPN}) exprimée en t/m^3
Sétra	Service d'études techniques des routes et autoroutes
Sh	Écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériaux mise en œuvre, exprimé en m
SN	Écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue (loi de fatigue)
SOPAQ	Schéma organisationnel du plan d'assurance de la qualité
SOL T_i	Classe de qualité du sol en fonction de R_t et E
t_{cC}	Réactivité de la chaux mesurée selon la norme NF EN 459-2
ε_t	Déformation en traction/compression maximale dans le plan horizontal

ε_z	Déformation verticale maximale
σ_{ad}	Contrainte admissible à la base d'une couche de matériaux, exprimée en MPa
σ_t	Contrainte en traction/compression maximale dans le plan horizontal, exprimée en MPa
σ_6	Contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360 jours est obtenue pour 10^6 cycles, exprimée en MPa
traficTi	Classe de trafic correspondant à un nombre de poids lourds par jour et par sens pour la voie la plus chargée, à l'année de mise en service, utilisée pour le choix des caractéristiques géométriques de la route et des matériaux constituant les chaussées
TCi	Classe de trafic cumulé correspondant à un nombre cumulé de poids lourds par sens sur la voie la plus chargée, que devra supporter la chaussée pendant sa durée de vie, utilisée pour le dimensionnement des chaussées
$V_{chaussée}$	Volume de matériau de chaussée
VBS	Valeur au bleu de méthylène d'un sol (elle s'exprime par la masse de bleu de méthylène pouvant s'absorber sur 100 g de sol ; sa valeur est d'autant plus grande que le sol est argileux) exprimée en g de bleu pour 100 g de sol
W	Teneur en eau
W_e	Teneur en eau d'étude du sol ou du matériau exprimée en %
W_{OPN}	Teneur en eau Optimum Proctor Normal du sol ou du matériau (c'est la teneur en eau permettant d'obtenir la pd_{OPN} lorsqu'on compacte un sol ou un matériau à l'énergie Proctor Normal), exprimée en %



6 - Références bibliographiques

Réglementation générale

- [1] Cahier des clauses techniques générales (CCTG) – fascicule 25 - Exécution des couches de chaussées.

Guides nationaux

- [2] Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic, guide technique, Sétra/LCPC, 1981.
- [3] Conception et dimensionnement des structures de chaussées, guide technique, Sétra/LCPC, 1994.
- [4] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique, Sétra/LCPC, 2000 (dit GTS).
- [5] Réalisation des remblais et des couches de forme (dit GTR), guide technique (fascicules 1 et 2), Sétra/LCPC, 2^{ème} édition, juillet 2000, réf. : D9233.
- [6] Retraitement en place à froid des anciennes chaussées, guide technique, Sétra/CFTR 2003, réf. : D0309.
- [7] Catalogue des structures types de chaussées neuves, guide technique, Sétra/LCPC 1998.

Guides régionaux

- [8] Utilisation des matériaux de Haute-Normandie, guides techniques et monographies, guides techniques « Les limons », « Les granulats marins », mars 2000, Région Haute-Normandie, Unicem Normandie, Préfecture Haute-Normandie, SPRIR Normandie, CETE Normandie-Centre, DRE de Haute-Normandie.
- [9] Utilisation des matériaux de Haute-Normandie, guides techniques et monographies, Monographies « Les sables albiens », mars 2000, Région Haute-Normandie, Unicem Normandie, Préfecture Haute-Normandie, SPRIR Normandie, CETE Normandie-Centre, DRE de Haute-Normandie.
- [10] Guides techniques pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France, guides techniques « Les limons », « Les sablons », décembre 1996, ARENE d'Ile-de-France, Préfecture d'Ile-de-France, Conseil régional d'Ile-de-France, UNICEM Ile-de-France, SPRIR Ile-de-France.
- [11] Guides techniques pour la réutilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France, catalogue des structures de chaussées de décembre 2003, ARENE d'Ile-de-France, Préfecture d'Ile-de-France, Conseil régional d'Ile-de-France, UNICEM Ile-de-France, SPRIR Ile-de-France.

- [12] Guide technique pour l'utilisation des matériaux Régionaux d'Ile-de-France : valorisation des Excédents de déblais de travaux publics – décembre 2003, Préfecture de la Région Ile-de-France, Unicem Ile-de-France, SPRIR Ile-de-France, Région Ile-de-France.
- [13] Guides techniques régionaux Nord-Pas-de-Calais relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels, « Les schistes houillers », « Les sables de fonderie », mai 2002 PREDIS Nord-Pas-de-Calais, Ecole des Mines de Douai, CETE Nord-Picardie.
- [14] Utilisation des matériaux en Picardie, guide technique « Les sablons », octobre 2000, Conseil Régional de Picardie, UNICEM Picardie, Ministère Industrie, Contrat de plan interrégional du bassin Parisien.
- [15] Guide pour l'emploi des matériaux locaux en Champagne-Ardenne, livret pour la technique routière « Utilisation des matériaux alluvionnaires de la vallée de l'Aisne », 1993, Cellule économique régionale de Champagne-Ardenne.
- [16] NFP 11-300 : Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière.
- [17] NFP 15-108 : Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité.
- [18] NFP 18-576 : Granulats. Mesure du coefficient de friabilité des sables.
- [19] NFP 94-049-1 : Sols - Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Partie 1 – Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.
- [20] NFP 94-049-2 : Sols - Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Partie 2 - méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.
- [21] NFP 94-050 : Sols - Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage.
- [22] NFP 94-051 : Sols - Reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- [23] NFP 94-056 : Sols - Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.
- [24] NFP 94-068 : Sols - Reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériaux rocheux par l'essai à la tâche.
- [25] NFP 94-093 : Sols - Reconnaissance et essai de compactage Proctor - Détermination des références de compactage d'un matériau- Essai Proctor modifié - Essai Proctor normal.
- [26] NFP 94-117-1 : Sols - Reconnaissance et essais - Portance des plates-formes - Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2).
- [27] NFP 94-114-2 : Sols - Reconnaissance et essais - Portance des plates-formes - Partie 2 : Module sous chargement dynamique.
- [28] NFP 98-082 : Chaussées - Terrassements - Dimensionnement des chaussées routières - Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées.
- [29] NFP 98-100 : Assises de chaussées - Eau pour assises - Classification.
- [30] NFP 98-105 : Assises de chaussées - Fabrication en continu des mélanges-contrôle de fabrication des graves et sables traités aux liants hydrauliques ou non traités en centrale de malaxage continu.
- [31] NFP 98-114 -2 : Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : Sables traités aux liants hydrauliques.
- [32] NFP 98-114 -3 : Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques associés à la chaux.
- [33] NFP 98-115 : Assises de chaussées - Exécution des corps de chaussées - Constituants - Composition des mélanges et formulation - Exécution et contrôle.
- [34] NFP 98-160 : Revêtement de chaussée - Enduit superficiel d'usure - Spécifications.
- [35] NFP 98-200 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion.

Normes

- [36] NFP 98-200-1: Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 1 : Définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques.
- [37] NFP 98-200-2 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 2 : Détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec le deflectomètre Benkelman modifié.
- [38] NFP 98-200-3 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 3 : Détermination de la déflexion avec le deflectographe 02.
- [39] NFP 98-200-4 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 4 : détermination de la déflexion avec le deflectographe 03.
- [40] NFP 98-200-5 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 5 : Détermination de la déflexion avec la deflectographe 04.
- [41] NFP 98-200-6 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 6 : Détermination de la déflexion avec le deflectographe béton.
- [42] NFP 98-200-7 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 7 : détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec un curviamètre.
- [43] NFP 98-230-3 : Essais relatifs aux chaussées - Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 3 : Fabrication en laboratoire de mélange de graves ou de sables pour la confection d'éprouvettes.
- [44] NFP 98-275-1 : Essais relatifs aux chaussées - Détermination du dosage en liant répandu - Partie 1 : Essai in situ de dosage moyen et de régularité transversale.
- [45] NFP 98-276-1 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure du dosage en granulats d'un enduit superficiel - Partie 1 : Essai à la boîte doseuse.
- [46] NFP 98-276-2 : Essais relatifs aux chaussées - Mesure du dosage en granulats d'un enduit superficiel - Partie 2 : Détermination de la régularité transversale.
- [47] NFP 98-732-1 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Fabrication des mélanges - Partie 1 : Centrale de malaxage pour matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités
- [48] NFP 98-736 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Matériel de compactage - Classification.
- [49] NFP 98-744-1 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Calibrage et vérification des réglages sur chantier des doseurs continus des centrales de production de matériaux - Partie 1 : Débitmètre de bande pour courroie transporteuse.
- [50] NFP 98-744-2 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Calibrage et vérification des réglages sur chantier, des doseurs continus des centrales de production de matériaux - Partie 2 : Doseur pondéral à granulats.
- [51] NFP 98-744-3 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Calibrage et vérification des réglages sur chantier, des doseurs continus des centrales de production de matériaux - Partie 3 : Doseur volumétrique à granulats.
- [52] NFP 98-744-4 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Calibrage et vérification des réglages sur chantier, des doseurs continus des centrales de production de matériaux - Partie 4 : Doseur pondéral à pulvérulent - Essai par prélèvement sur courroie.
- [53] NFP 98-744-5 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Calibrage et vérification des réglages sur chantier, des doseurs continus des centrales de production de matériaux - Partie 5 : Doseur pondéral à pulvérulent - Essai par pesée matière.
- [54] NFP 98-760 : Matériel de construction et d'entretien des routes - Compacteurs à pneumatiques - Évaluation de la pression de contact au sol.
- [55] NFP 98-761 : Matériels de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Évaluation du moment d'excentrique.
- [56] NFP 98-772-1 : Matériels de construction et d'entretien des routes. Module d'acquisition de données pour centrales de fabrication des mélanges granulaires - Description et spécifications fonctionnelles. Partie 1 : Module pour la fabrication en continu.
- [57] NFEN 197-1 : Ciment - Partie 1 : Composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.
- [58] NFEN 459-1 : Chaux de construction - Partie 1 : Définition, spécification et critères de conformité.

- [59] NF EN 459-2 : Chaux de construction - Partie 2 : Essais de laboratoire.
- [60] NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : Qualification des fines. Essai au bleu de méthylène.
- [61] NF EN 1097-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro-DEVAL).
- [62] NF EN 1097-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- [63] NF EN 13282 : Liants hydrauliques routiers (en préparation).
- [64] NF EN 13286-2 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités - Partie 2 : Méthode d'essai pour la détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor.
- [65] NF EN 13286-42 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 42 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- [66] NF EN 13286-45 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités - Partie 45 : Méthode d'essai pour la détermination du délai de maniabilité des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- [67] NF EN 13286-47 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités - Partie 47 : Méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement.
- [68] NF EN 13286-49 : Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités - Partie 49 : Essai de gonflement accéléré pour les sols traités à la chaux et / ou au liant hydraulique.
- [69] NF EN 13286-52 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 52 : Méthode de confection par vibrocompression des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.
- [70] NF EN 13286-53 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 53 : Méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.
- [71] NF EN 14227-10 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 10 : Sols traités au ciment.
- [72] NF EN 14227-11 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 11 : Sols traités à la chaux.
- [73] NF EN 14227-12 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 12 : Sols traités au laitier.
- [74] NF EN 14227-13 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 13 : Sols traités au liant hydraulique routier.
- [75] NF EN 14227-14 : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 14 : Sols traités à la cendre volante.
- [76] XP P 18-545 : Granulats - Eléments de définitions, conformité et codification.

Autres documents

- [77] Bulletin de Liaison des LPC n° 133. Traitement de sols fins en assises de chaussées : Parties 1, 2 et 3, septembre-octobre 1984.
- [78] Bulletin de Liaison des LPC n° 134. Traitement de sols fins en assises de chaussées - Parties 4 et 5, novembre-décembre 1984.
- [79] Logiciel ALIZÉ-LCPC. Routes de calcul des sollicitations créées par le trafic dans les structures de chaussées et d'aide au dimensionnement. LCPC.

7 - Annexes



7.1 - Annexe A

Fiche technique des sols utilisés en assises de chaussées

1- Identification et classification du sol :

Gisement/Lieu de stockage :

Identification du sol :

Sol fin Sol graveleux Sol sableux

Niveau Homogénéité : H1 H2

Volume du gisement ou du stock v (m³) :

Date de la classification :

2- Résultats des essais :

Sols fins	Argilosité		Passant (%) à		ρ_d OPN
	VBS	I_p	D(mm)=	Dmax(mm)=	
Max					
Moyenne m					
Min					
Etendue e					
Etendue relative ($e_r = 100 e/m$)					
Nombre d'essais n (9 ou $9v / 10^4$)					2 sur les argilosités extrêmes

Sols sableux	Argilosité		Passant (%) à			FS
	VBS	0,08 mm	2 mm*	D (mm) =	Dmax (mm) =	
Max						
Moyenne m						
Min						
Etendue e						
Etendue relative ($e_r = 100 e/m$)						
Nombre d'essais n (9 ou $9v / 10^4$)						

* si sol sableux moyen ou grossier

Sols graveleux	Argilosité		Passant (%) à			LA	MDE
	VBS	0,08 mm	2 mm*	D (mm) =	Dmax (mm) =		
Max							
Moyenne m						Code selon XP P 18-545	
Min							
Etendue e							
Etendue relative ($e_r = 100 e/m$)							
Nombre d'essais n (9 ou $9v / 10^4$)							

7.2 - Annexe B

Spécifications des sols utilisés en assises de chaussées

1- Homogénéité des sols fins, graveleux et sableux

Spécifications Communes		Sols fins	Sols graveleux	Sols sableux
Dmax	- Passant à : Li 95	≤ 31,5 mm		≤ 8 mm
D	- Passant à : Li 85	≤ 20 mm		≤ 6,3 mm
Fs				Ls = 50
Code des gravillons des graves		D ou E* selon XP P 18-545		
VBS	Li		0,1	0,4
	Ls	5	2,5**	
	e _r	≤ 40		
lp	Ls	20		
	e _r	≤ 40		
Passant à 0,08 mm	Li	35		
	Ls		35	

* usage possible de sols graveleux ayant des gravillons de code E

** si passant à 0,08 mm < 12 %, Ls = 1

Spécifications H1		Sols fins	Sols graveleux et Sols sableux
Passant à 0,08 mm	e, si m ≤ 15 %		≤ 6
	e, si m > 15 %		≤ 8
Passant à 2 mm	e		≤ 20
pdOPN	e _r	≤ 4	

Spécifications H2		Sols fins	Sols graveleux et Sols sableux
Passant à 0,08 mm	e, si m ≤ 15 %		≤ 8
	e, si m > 15 %		≤ 12
Passant à 2 mm *	e		≤ 30
pdOPN	e _r	≤ 6	

* si sols graveleux et sableux ou grossiers suivant l'avant-propos de NF EN 14227-1

2- Utilisation des sols en assises de chaussées

Classe de trafic	≤ T4	T3	T2	T1
Surface				
Base	H2*	H1		
Fondation	H2*	H2*	H2*	H1

* usage possible de sols graveleux ayant des gravillons de code E

Éléments économiques

Il est possible de réaliser une analyse économique afin de préciser l'importance de chaque poste dans le coût total d'un sol traité. Toutefois les coûts peuvent varier sensiblement selon les chantiers et la conjoncture.

Il a donc été retenu de donner un exemple de décomposition de coûts d'un sol traité, correspondant à un chantier présentant les caractéristiques suivantes :

- chantier de chaussée nécessitant 8 000 tonnes de sols traités ;
- épaisseur de la couche 30 cm ;
- traitement en place des matériaux du site, à raison de 1 500 tonnes par jour ;
- 1,5 % de chaux ;
- 7 % de liant hydraulique routier.

Les résultats sont traduits sous la forme des graphiques 1 et 2 qui indiquent d'une part, l'incidence de chaque poste dans le coût du sol traité considéré et d'autre part, l'incidence de chaque engin dans le coût de la fabrication et de la mise en œuvre du sol traité considéré.

Cette analyse montre clairement le faible coût relatif :

- des études préalables ;
- de chaque engin de fabrication et de mise en œuvre ;
- de la protection superficielle ;
- du contrôle.

Il serait donc illusoire de faire des économies sur un chantier, en négligeant ces postes, d'autant plus que l'examen des chantiers anciens indique que c'est en négligeant ces éléments que l'on a, à court et moyen terme, des dégradations importantes sur les structures en sols traités en assises.

Par conséquent, il est indispensable que le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre fassent respecter les prescriptions du présent guide et accordent une attention particulière à l'étude préalable et au contrôle extérieur.

La qualité de l'interface étant par ailleurs primordiale pour le bon comportement de la structure, il convient aussi de respecter strictement l'application des règles de l'art en ce qui concerne :

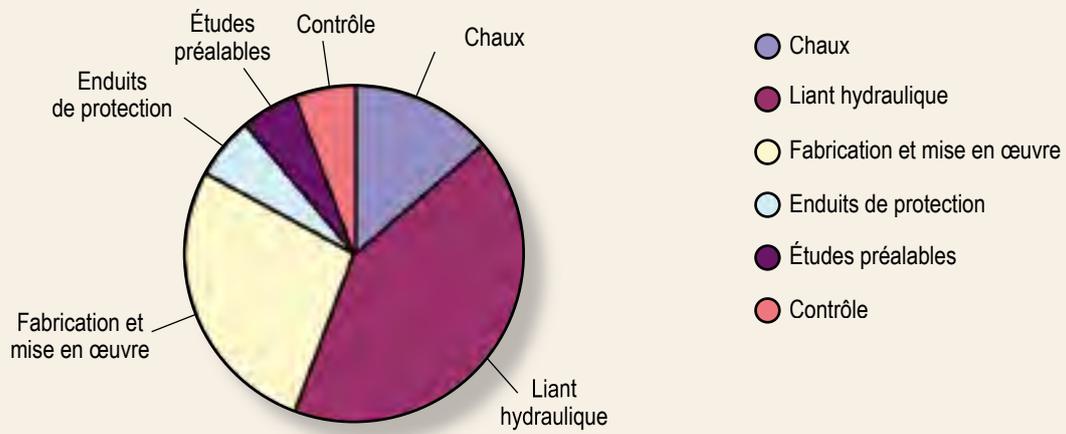
- le maintien de l'humidité à la surface du matériau ;
- l'absence de feuilletage ;
- le réglage fin sans apport de couches minces ;
- la réalisation en temps voulu d'une couche de protection adaptée.

Cela nécessite :

- la présence de tous les engins nécessaires et en bon état de fonctionnement ;
- la bonne utilisation de ces engins par un personnel suffisamment formé et ayant reçu les consignes précises relatives à ce type de chantier.

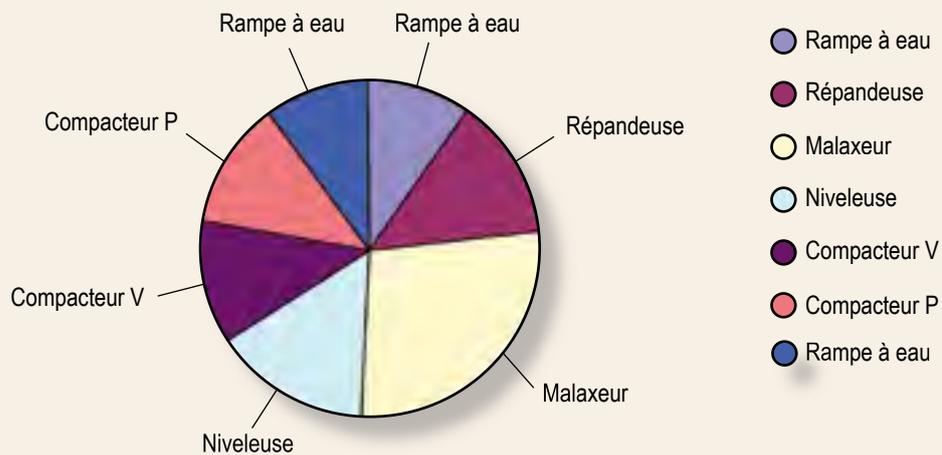
7.3 - Annexe C

Incidence de chaque poste dans le coût du sol traité considéré



Graphique 1

Incidence de chaque engin dans le coût de la fabrication et de la mise en œuvre du sol traité considéré



Graphique 2

7.4 - Annexe D

Sols traités en assises de chaussées

Conclusions des visites de chantiers

Réflexions sur la conception et la réalisation des chaussées en sols fins traités à la chaux et aux liants hydrauliques

Dans le cadre de l'élaboration de ce guide, des visites de chantiers ont été réalisées pour valider, préciser et compléter éventuellement les règles de l'art connues à ce jour sur l'emploi des sols traités en assises de chaussées.

La technique des sols fins traités à la chaux et aux liants hydrauliques ayant fait l'objet d'une utilisation importante en Picardie et Haute-Normandie, l'examen a porté sur des chantiers de ces régions.

Ainsi, les visites ont été effectuées sur douze chantiers de sols fins traités, en majorité des limons traités à la chaux et aux liants hydrauliques (LTCC) :

- utilisés en couche de fondation, parfois en couche de base ;
- sous des trafics moyens à forts (T3 à T0) ;
- ayant de 6 à 18 ans d'âge, la majorité ayant 10 à 12 ans ;
- ayant pour la plupart, fait l'objet d'un suivi de fabrication et de mise en œuvre, puis d'un ou plusieurs suivis de comportement dans le temps, fondés sur des mesures de déflexion, des mesures de résistance sur carottes ainsi que des essais d'ovalisation qui permettent, sous charge, de mesurer en place les déformations dans les couches.

Le linéaire concerné est de 140 km, les chantiers faisant de 0,5 à 51 km. Le linéaire observé est de 40 km environ.

Les caractéristiques de chacun des chantiers visités sont synthétisées dans les tableaux 1 à 3.

Les structures en place sont les suivantes, avec systématiquement une couche de forme en LTCC :

- 5 structures tout LTCC : base / fondation / forme (tableau n° 1) ;
- 4 structures avec couche de base en GB / fondation LTCC / forme LTCC (tableau n° 2) ;
- 2 structures avec couche de base en GH / fondation LTCC / forme LTCC (tableau n° 3).

Principales observations

L'épaisseur des structures tout LTCC est généralement comprise entre 60 à 90 cm, si on inclut la couche de forme. L'épaisseur de chaque couche d'assise varie de 20 à 40 cm, avec une valeur courante de 25 à 30 cm.

Les déflexions mesurées en surface de ces chaussées sont toujours très faibles : 15 à 25 1/100 mm, sauf en certains points particuliers où elles peuvent atteindre 100 1/100 mm (zones de faïençage).

Les structures de type GB / sols traités ne montrent pas de désordres particuliers.

Les structures GH / sols traités montrent des fissures transversales classiques qui ne sont pas attribuables à la seule couche de fondation en sol traité.

Les structures tout LTCC - fondation et base - se comportent de façon très satisfaisante, avec en des points particuliers, les observations suivantes :

• Aspect visuel

- Au-delà des classiques fissures transversales des assises hydrauliques (pas de 7 à 15 m), on observe sur certains chantiers des fissures en travers en cours de ramification, avec des amorces de flaches et nids de poule, dans les bandes de roulement.
- Sur quelques chantiers bien réalisés, on note du faïençage en bande de roulement de rive (RD 95 à Boos) ; le reste du corps de chaussée montrant par ailleurs de bonnes performances pour le LTCC. Il est probable que ce faïençage est lié à la présence d'eau en rive due à une mauvaise conception du drainage et de l'assainissement (pas de fossé, chaussée au niveau du TN, accotement herbeux peu large).
- On observe sur un chantier (RD 925 à St Valéry-en-Caux) quelques bourrelets transversaux qui semblent résulter de phénomènes de dilatation ou de glissement de la couche d'enrobés.

• Carottages

- Les carottages renseignent sur l'état de collage « physique » des interfaces et du feuilletage. La grande majorité des interfaces LTCC / LTCC sont décollées au sens physique et il nous semble que, vu la généralisation du phénomène, il soit difficile de l'attribuer à l'opération de carottage elle-même. Au niveau de l'interface BB / LTCC (structures tout LTCC), on observe en général le collage du BB sur l'enduit mais le LTCC se rompt 1 à 2 cm plus bas. Ceci paraît attester la qualité du collage par cloutage ; toutefois, cette qualité n'est pas totalement exploitée au plan mécanique (*cf.* commentaire sur les essais d'ovalisation ci-dessous).
- Les carottages montrent également que les couches de LTCC peuvent présenter des feuillets.

- Les carottages montrent en général que les performances des matériaux en place les situent dans les classes SOL 2 à SOL 3 en couche de base et SOL 1 à SOL 2 en couche de fondation (*cf.* § 3.3.1.) Il est également nettement apparu que la dispersion est bien moindre quand les chantiers sont bien réalisés et bien suivis.

• **Les essais d'ovalisation**

- Ils montrent que les déformations dans le LTCC sont généralement très faibles ; par ailleurs, il semble que, même lorsque l'interface LTCC / LTCC est décollée physiquement, il n'y a pas systématiquement travail en flexion. De ce point de vue, ce constat pourrait justifier l'hypothèse choisie de semi collage. En revanche, il faut s'interdire de considérer ces couches comme parfaitement collées à quelque stade de leur vie que ce soit.

Enseignements

Les structures LTCC présentent généralement des performances mécaniques durables, de classes SOL 1 à SOL 3.

Ce sont des matériaux semi-rigides qui présentent des fissures transversales rappelant celles des assises hydrauliques.

L'observation des carottes montre que le LTCC est presque toujours rompu 1 à 2 cm sous l'interface avec le BB. Les interfaces entre les couches de LTCC sont pratiquement toujours décollées.

Le fonctionnement mécanique des structures tout LTCC, pour autant que les règles minimales aient été observées lors de la mise en œuvre, ne correspond jamais au mode d'interface collée, mais il est probable que, même si l'interface est physiquement décollée, le comportement mécanique réel n'est pas aussi défavorable. On peut probablement conserver l'hypothèse semi-collée envisagée dans la version actuelle du guide.

L'imperméabilité de la couche de surface paraît très importante pour garantir au matériau le maintien de ses performances mécaniques. Il en résulte que la protection superficielle de la couche de base doit être renforcée. En outre, la couche de surface doit être épaisse (minimum 10 cm en deux couches) et régulièrement entretenue.

Les dispositions constructives doivent particulièrement prendre en compte la nécessité d'empêcher l'eau d'entrer dans la structure (assainissement - fossés plus profonds que la structure - voire écrans de rives) ou de minimiser ses effets néfastes en rives, par exemple par mise en œuvre de sur-largeurs du profil en travers accompagnées d'une imperméabilisation par un enduit superficiel. Il faut également conseiller de donner aux accotements une pente un peu plus forte (à concilier avec les impératifs de sécurité), par exemple 5 %.

5 structures tout LTCC - base / fondation / forme

Chantier	Longueur en km	Année	Trafic	Structure	Caractéristiques du traitement par niveau d'assise traitée	Performances en laboratoire	Performances mesurées sur carottes
RD 39/ RD 81 St Romain de Colbosc	4	1996	T 1 sur 3 km T3 sur le reste	10 BB 25 LTCC 25 LTCC 40 LTCC	Fondation : sol A1 1 % CaO + 7 % ROLAC 645 Base : sol A1 1 % CaO + 7% ROLAC 645	A 1 an : $R_t = 0,85$ MPa $E = 6000$ MPa	Après 2 ans Couple $R_t - E$ équivalent à des performances Sol 2
RD 925 St Valery en Caux	6	1990	T 2	10 BB 20 à 30 LTCC 20 à 25 LTCC 30 à 35 LTCC	Fondation : sol A1 1,5 % CaO + 7% Ciment normalisé Base : sol A1 1,5 % CaO + 7 % Ciment normalisé	Non disponible	Après 4 ans et 9 ans : Couple $R_t - E$ équivalent à des performances Sol 2
RD 95 Boos Saint Aubin Celloville	3	1991 / 92	T 3 à T 2	12 BB 25 LTCC 40 LTCC (forme/fond.)	Limons A1-A2	Non disponible	Baisse des performances sur carottes entre 3 et 7 ans, mais reste équivalent à des performances Sol 2 (couple $R_t - E$)
RN 29 / RN 27 RD 25 E Tôtes	1	1989	T 0 pendant 3 ans puis T 3	10 BB 30 LTCC 30 LTCC 30 LTCC	Fondation : sol A1 Base : sol A1	Non disponible	Performances faibles à 6 et 9 ans équivalent à des performances Sol 0
RD 930 St Quentin	0,4	1984	T 2 puis T 1	10 BB 20 LTCC 25 LTCC 35 LTCC	Fondation : sol A1, limite A2 1,5 % CaO + 7 % Cem III (ex CLK) Base : sol A1, limite A2 1,5 % CaO + 7 % Cem III (ex CLK)	A un an : $R_t = 0,63$ MPa $E = 6200$ MPa (éprouvettes moulées à 95 % de D_s opn)	Après 16 ans : Fondation : $R_t = 0,28$ MPa $E = 2600$ Base : $R_t = 0,49$ MPa $E = 3800$ MPa

Tableau n° 1 : synthèse des caractéristiques des chantiers visités (structures tout LTCC)

5 structures base en GB / fondation LTCC / forme LTCC							
Chantier	Longueur en km	Année	Trafic	Structure	Caractéristiques du traitement par niveau d'assise traitée	Performances en laboratoire	Performances mesurées sur carottes
RD 29 Oisemont	2	1995	T 2	4 BB 12 GB 30 LTCC 35 LTCC	Fondation : sol A1 1 % CaO + 8 % PRV A	A 90 jours : $R_t = 0,36$ MPa $E = 2500$ MPa (100 % de Ds opm)	A 1 mois : $R_t = 0,14$ MPa $E = 2400$ MPa A 5 ans : $R_t = 0,45$ MPa $E = 3800$ MPa
RN 27 Déviation de Tôtes	4	1990/91	T 1	12 BB 13 GB 25 LTCC 40 LTCC	Fondation : sol A1 2 % CaO + 7 % ciment normalisé	A 1 an : $R_t = 0,9$ MPa $E = 6000$ MPa	A 3 ans : $R_t = 0,68$ MPa $E = 4400$ MPa (valeurs moyennes)
A 29 Yvetôt - St Saëns	33	1997/98	T 1	7,5 BB 12 GB 35 LTCC arase 35 LTCC	Forme/Fondation : sol A1 1% CaO + 6% ROC-AS	Etude HOLCIM	Documents SCETAUROUTE
RN 1031 Compiègne	7	1991	T 0	8 BB 15 GB 32 sol A 1 traité 35 LTCC	Fondation : scalpage de carrière A1 6 % Cem III (ex CLK)	A 90 jours : $R_t = 0,52$ MPa $E = 6900$ MPa	Essais sur carottes A 90 jours : $R_t = 0,38$ MPa $E = 10700$ MPa

Tableau n° 2 : synthèse des caractéristiques des chantiers visités (structures avec base GB, fondation LTCC, forme LTCC)

2 structures avec couche de base en grave traitée / fondation LTCC / forme LTCC

Chantier	Longueur en km	Année	Trafic	Structure	Caractéristiques du traitement par niveau d'assise traitée	Performances en laboratoire	Performances mesurées sur carottes
RD 930 Nesle	8	1988/89	T 1	8 BB 30 GTLH 25 LTCC 35 LTCC	Fondation : sol A1 1 % CaO + 7 % Cem III (ex CLK)	A 1 an : $R_t = 0,68$ MPa $E = 3500$ MPa (100 % de D_s opn)	A 90 jours : $R_t = 0,49$ MPa A 12 ans : $R_t = 0,86$ MPa $E = 6000$ MPa
RN 27 Tôtes - Manéhouville	16	1995/96	T 1	10 BB 23 GCV 25 LTCC 35 LTCC	Fondation : sol A1 1 % CaO + 7 % Cem II 32.5	A 1 an : $R_t = 0,83$ MPa $E = 3600$ MPa	Pas d'information

Tableau n° 3 : synthèse des caractéristiques des chantiers visités (structures avec base GH, fondation LTCC, forme LTCC)



46 avenue
Aristide Briand
BP 100
92225 Bagneux Cedex
France
téléphone :
33 (0)1 46 11 31 31
télécopie :
33 (0)1 46 11 31 69
internet : www.setra.equipement.gouv.fr

Ce guide codifie la technique du traitement des sols aux liants hydrauliques, éventuellement en association avec la chaux, pour réaliser des assises de chaussées. Il complète le guide technique - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Terrassement et couche de forme (GTS – Sétra/LCPC, 2000) ainsi que les normes en vigueur.

La première partie du document précise les types de sols concernés ainsi que les spécifications d'homogénéité ; elle détaille le contenu des études ainsi que leur progressivité, depuis les reconnaissances géologiques jusqu'aux essais en laboratoire.

La deuxième partie décrit le dimensionnement et la conception des assises de chaussées en sols traités. Elle indique les classes de trafic pour lesquelles ces matériaux peuvent être utilisés en précisant, dans la méthode de dimensionnement, les paramètres spécifiques aux sols traités, en particulier, les caractéristiques mécaniques en laboratoire pondérées selon les conditions de réalisation ainsi que les conditions d'interface. Elle se termine par des exemples de dimensionnement avec des sols fins traités.

La troisième partie précise les conditions de réalisation des travaux et de contrôle des matériaux, les modalités de préparation des matériaux sur chantier. Elle définit les niveaux de qualité selon le matériel utilisé (en place et en centrale), les conditions de transport et de mise en œuvre, les protections superficielles à appliquer en fonction des sollicitations prévisibles et les procédures de contrôle qualité.

Le document se termine par une série d'annexes concernant la fiche technique et les spécifications des sols utilisés en assises de chaussées, certains éléments économiques, et enfin la synthèse de l'enquête faite sur les structures en sols traités réalisées en France.

Document disponible au bureau de vente du Sétra
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55
Référence : **0718** - Prix de vente : **16 €**

*Couverture, crédit photos : Colas.SA, Cimbéton, Lhoist
Conception graphique et mise en page : Domigraphic, 16 rue Diderot, ZAC Les Radars - 91353 Grigny
Impression : Caractère - 2, rue Monge - BP 224 - 15002 Aurillac Cedex
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document.
© 2007 Sétra - Dépôt légal : 3^{ème} trimestre 2007 - ISBN : 978-2-11-094649-2*



Ce document participe à la protection de l'environnement.
Il est imprimé avec des encres à base végétale sur du papier écolabellisé PEFC.
CTBA/06-00743



Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
de l'Équipement