

TERRASSEMENTS ET ASSISES DE CHAUSSÉES

Traitement des sols aux liants hydrauliques



TERRASSEMENTS ET ASSISES DE CHAUSSÉES

Traitement des sols
aux liants hydrauliques

Contributions à l'ouvrage

Ce guide a été rédigé par :

Joseph	Abdo	Cimbéton
Jean-Pierre	Serfass	Expert

Il a été validé par un groupe de travail constitué de :

Ludovic	Casabiel	Vicat
Frédéric	Didier	Holcim Ciments
Patrick	Dubois	Ciments Calcia
Antoine	Garrido	Ciments Calcia
Jean-Christophe	Redon	Lafarge Ciments

Avant-propos

- Pour construire et entretenir son réseau d'infrastructures, la France puise annuellement 200 millions de tonnes de granulats dans ses réserves naturelles. Ce phénomène n'est pas unique, on le retrouve dans tous les pays du monde. Les impacts sur le milieu naturel ne sont pas négligeables. Citons entre autres :
- la perturbation des écosystèmes sur les sites d'extraction des matériaux ;
 - la réduction des réserves en granulats ;
 - l'extraction, le transport et la mise en décharge des matériaux impropres à l'utilisation en technique routière ;
 - les nuisances générées par les transports et les risques induits par le trafic des véhicules ;
 - sans oublier le délicat problème de la gestion des rebuts issus de la déconstruction d'ouvrages ainsi que de l'exploitation des gisements.

Or, il est possible d'atténuer ces impacts tout en réalisant des économies substantielles, en considérant les matériaux des sites à aménager comme un gisement que l'on peut valoriser par un traitement aux ciments ou aux liants hydrauliques routiers. Aujourd'hui, l'une des principales filières de valorisation est le traitement des matériaux naturels en place ou en centrale.

Cette filière présente les avantages suivants :

- Avantages environnementaux : préservation des ressources naturelles en granulats nobles et par conséquent de la biodiversité dans les ballastières, réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz en raison de la réduction des transports de matériaux ;
- Avantages économiques : le plus souvent moins chère que les techniques traditionnelles ;
- Avantages techniques : performante, durable, sûre et codifiée (guides, normes, etc.).

La profession, dans son ensemble, a été très tôt sensible aux aspects environnementaux et a tout mis en œuvre pour optimiser l'exploitation des ressources naturelles (énergie, matière), limiter ses propres rejets dans l'environnement, etc.

En 2009, dans le cadre du Grenelle, la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), l'Union des Syndicats de l'Industrie Routière de France (USIRF) et le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France (SPTF) ont signé une convention d'engagement volontaire avec le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM), pour la mise en œuvre en plusieurs points des orientations du Grenelle de l'environnement afin de favoriser la compétitivité écologique à des conditions économiques acceptables. En particulier, les entreprises se sont engagées à :

- **Réemployer 100 % des matériaux géologiques naturels**

À l'horizon 2020, les entreprises de terrassement se fixent pour objectif de réemployer ou valoriser 100 % des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers. Elles s'engagent, en outre, à éviter de recourir à des emprunts ou carrières extérieurs aux projets : « zéro apport extérieur ».

- **Réduire les émissions de gaz à effet de serre**

- **Réduire la consommation d'eau**

- **Préserver la biodiversité**

Comme le traitement des sols en construction routière est une technique parfaitement au point, qui répond aux besoins actuels et futurs et qui respecte les principes du Développement durable, elle est donc appelée à se développer en travaux de terrassements et en assises de chaussées. D'où l'intérêt de disposer d'un seul guide rassemblant l'ensemble des connaissances acquises depuis une trentaine d'années. C'est l'objectif principal que nous nous sommes fixé.

Dans ce document, nous avons donc traité tous les aspects techniques relatifs à la technique de traitement des sols, de la conception et dimensionnement jusqu'à la mise en œuvre et contrôle, et ceci dans les domaines des terrassements et d'assises de chaussées. C'est une synthèse claire et précise de l'ensemble des ouvrages, publiés par le SETRA, le LCPC et le CFTR, qui sont référencés tout au long du guide par un symbole [i] renvoyant à l'annexe bibliographique.

Sommaire

● 1 - Les sols	11
1.1 - Définition(s)	12
1.2 - Classification des sols	13
1.3 - Les matériaux non couverts par ce guide	14
1.4 - Attention à certains constituants particuliers!	14
1.5 - Matériaux locaux	15
<hr/>	
● 2 - Les liants	17
2.1 - Les ciments	18
2.2 - Les liants hydrauliques routiers (LHR)	19
2.2.1 - Objectifs	20
2.2.2 - Types de LHR	20
2.2.3 - Codification et spécifications performantielles des LHR	21
2.2.4 - Identification des LHR	22
2.3 - Les chaux	23
2.3.1 - La chaux calcique aérienne vive	23
2.3.1.1 - Action immédiate d'abaissement de la teneur en eau	24
2.3.1.2 - Action immédiate sur les caractéristiques géotechniques	24
2.3.2 - La chaux calcique aérienne éteinte	25
2.3.3 - Actions à long terme des chaux calciques aériennes	25
2.3.4 - Les chaux hydrauliques	26
<hr/>	
● 3 - Les matériels	27
3.1 - Matériels de transport et de stockage des liants	28
3.1.1 - Cas général : liant pulvérulent en vrac	28
3.1.2 - Cas du double traitement	29
3.1.3 - Cas particulier de traitement en place : liant en suspension aqueuse	29
3.1.4 - Cas des (petits) chantiers « rustiques » : ciment en sacs	29
3.2 - Matériels d'épandage	30
3.2.1 - Types d'épandeurs	30
3.2.2 - Précision de l'épandage	31
3.3 - Matériels de préparation des sols	32
3.4 - Matériels de malaxage en place	32
3.4.1 - Malaxeurs à outils fixes	32

3.4.2 - Malaxeurs à outils animés (pulvimalaxeurs)	33
3.4.3 - Système de notation des matériels de malaxage en place	35
3.4.4 - Autres matériels à outils animés	36
3.5 - Centrales de malaxage	37
3.6 - Matériels d'arrosage	39
3.7 - Matériels de compactage	39
3.8 - Matériels de réglage	39
3.9 - Émissions de poussières – Les remèdes	40
3.9.1 - Prévention et précautions lors des opérations	41
3.9.2 - Emploi d'un liant à émissions de poussières limitées	41
3.9.3 - Utilisation de liant sous forme de suspension	41

● 4 - Traitement des sols pour remblais et fonds de déblais	43
4.1 - Objectifs des traitements de sol en terrassements	44
4.1.1 - Permettre le déroulement du chantier	44
4.1.2 - Réutiliser au maximum les sols rencontrés	45
4.1.3 - Améliorer les caractéristiques géotechniques du sol	45
4.1.4 - Améliorer les caractéristiques géomécaniques du sol	45
4.2 - Performances à obtenir après traitement	46
4.2.1 - À court terme (remblais)	46
4.2.2 - À court terme (PST)	48
4.2.3 - À long terme (PST)	48
4.2.4 - Cas particuliers	49
4.3 - Consistance des études	50
4.3.1 - (Ré)utilisation en remblai	50
4.3.1.1 - Reconnaissance et caractérisation des sols à (ré)utiliser	50
4.3.1.2 - Évaluation des probabilités météorologiques et de leurs conséquences possibles sur le chantier	52
4.3.1.3 - Étude de formulation	52
4.3.2 - (Ré)utilisation en PST	54
4.3.2.1 - Étude des performances à court terme	54
4.3.2.2 - Module élastique (E)	54
4.3.2.3 - Résistance au gel	55
4.3.2.4 - Détermination du (des) dosage(s)	56
4.3.3 - Cas particuliers	56
4.3.4 - Niveaux d'étude	56
4.4 - Commentaires sur quelques traitements	57
4.5 - Exécution du traitement	58

4.5.1 - Matériels	58
4.5.2 - Méthodes d'exécution du traitement	59
4.5.2.1 - Traitement en déblai (ou en emprunt)	59
4.5.2.2 - Traitement sur le remblai	60
4.5.3 - Compactage	60
4.5.4 - Importance de la maîtrise de la teneur en eau	61
4.5.5 - Importance du drainage	62
4.6 - Effet du traitement de la PST sur le dimensionnement	62
<hr/>	
● 5 - Traitement des sols pour couche de forme	63
5.1 - Plate-forme et couche de forme	64
5.1.1 - Exigences concernant la plate-forme	65
5.1.2 - Justifications et rôles d'une couche de forme	66
5.1.3 - Classes de portance à long terme des plates-formes	67
5.2 - Matériaux de couche de forme traitée	68
5.2.1 Critères de sélections <i>a priori</i>	68
5.2.2 - Distinction entre sols améliorés et sols stabilisés	69
5.2.3 - Performances à obtenir après traitement	69
5.2.3.1 - <i>Spécifications communes</i>	69
5.2.3.2 - <i>Performances à viser pour les sols améliorés</i>	70
5.2.3.3 - <i>Performances à viser pour les sols stabilisés</i>	71
5.3 - Consistance des études	74
5.3.1 - Reconnaissance et caractérisation des sols à (ré)utiliser en couche de forme	74
5.3.2 - Évaluation des conditions météorologiques probables	74
5.3.3 - Étude de formulation	75
5.3.3.1 - <i>Choix du ou des liant(s)</i>	75
5.3.3.2 - <i>Détermination des dosages à adopter</i>	75
5.3.4 - Niveaux d'étude	76
5.4 - Commentaires sur quelques traitements pour couche de forme	77
5.5 - Dimensionnement des couches de forme traitées	79
5.5.1 - Épaisseur fixée empiriquement par le GTR [1]	79
5.5.2 - Choix d'une épaisseur différente – Règles de surclassement de portance de la plate-forme	81
5.5.3 - Synthèse de la méthode	83
5.5.4 - Précisions et justifications concernant le dimensionnement	84
5.6 - Réalisation des couches de forme traitées	85
5.6.1 - Ordonnancement des opérations	85
5.6.2 - Préparation du sol	86

5.6.2.1 - Décohésion du sol en place	86
5.6.2.2 - Élimination des éléments trop gros	86
5.6.2.3 - Homogénéisation des matériaux	86
5.6.2.4 - Amélioration de l'état hydrique	86
5.6.3 - Épandage de liant	87
5.6.4 - Malaxage en place	87
5.6.5 - Fabrication en centrale	88
5.6.6 - Compactage	89
5.6.6.1 - Objectif de densification	89
5.6.6.2 - Dispositions nécessaires	89
5.6.7 - Réglages	90
5.6.8 - Cloutage	91
5.6.9 - Protection superficielle	91

● 6 - Traitement des sols en assises de chaussée	95
6.1 - Matériaux d'assises traités	97
6.1.1 - Types de sols envisageables	97
6.1.2 - Critères de résistance mécanique de la fraction granulaire	98
6.1.3 - Performances à obtenir après traitement	99
6.1.3.1 - Aptitude du sol au traitement	99
6.1.3.2 - Portance immédiate	100
6.1.3.3 - Âge autorisant la mise sous circulation de chantier	100
6.1.3.4 - Tenue à l'eau	100
6.1.3.5 - Au jeune âge : tenue au gel /dégel	101
6.1.3.6 - Performances mécaniques à long terme	101
6.2 - Consistance des études	101
6.2.1 - Niveaux d'étude	101
6.2.2 - Reconnaissance et caractérisation des gisements	102
6.2.3 - Étude de formulation	104
6.2.3.1 - Évaluation de la nécessité d'un prétraitement à la chaux	104
6.2.3.2 - Choix du liant – Aptitude du couple sol-liant	104
6.2.3.3 - Conduite de l'étude	105
6.2.4 - Détermination de la classe de qualité mécanique du sol traité	106
6.3 - Observations sur quelques cas de traitement en couche d'assises et premier bilan	107
6.4 - Conception et dimensionnement	108
6.4.1 - Conception de la chaussée	108
6.4.1.1 - Domaine d'emploi et qualités minimales	108
6.4.1.2 - Types de structure	108

6.4.1.3 - Interfaces	108
6.4.1.4 - Couches de surface	109
6.4.1.5 - Dispositions constructives	109
6.4.2 - Dimensionnement	110
6.4.2.1 - Méthode	110
6.4.2.2 - Données trafic	111
6.4.2.3 - Paramètres de dimensionnement	111
6.4.2.4 - Vérification au gel / dégel	112
6.4.2.5 - Exemples de dimensionnement	112
6.5 - Réalisation des assises	113
6.5.1 - Ordonnancement des opérations	113
6.5.2 - Préparation du sol	113
6.5.2.1 - Tri des matériaux	115
6.5.2.2 - Écrêtement du sol	115
6.5.2.3 - Prétraitement à la chaux	115
6.5.2.4 - Constitution des stocks et reprise	115
6.5.2.5 - Humidification	115
6.5.2.6 - Convenance des méthodes retenues	116
6.5.3 - Niveaux de matériels et de qualités de traitement	116
6.5.3.1 - Matériel d'apport de liant	116
6.5.3.2 - Matériel de malaxage	117
6.5.3.3 - Niveaux de qualité de traitement	118
6.5.4 - Malaxage en place	118
6.5.5 - Fabrication en centrale	119
6.5.6 - Mise en œuvre	119
6.5.7 - Compactage	119
6.5.8 - Cloutage	119
6.5.9 - Protection superficielle	120

● 7 - Exemple de dimensionnement **121**

7.1 - Évaluation du trafic cumulé « TC »	122
7.1.1 - Trafic à la mise en service « t »	122
7.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service	123
7.1.3 - Trafic « t » à la mise en service	123
7.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »	123
7.2 - La plate-forme support de chaussée	124
7.2.1 - Portance du sol à long terme	125
7.2.1.1 - Identification du sol	125
7.2.1.2 - Détermination de la PST	125

7.2.2 - Détermination de la classe de la plate-forme	125
7.3 - Détermination de la structure	126
7.3.1 - Données de trafic	126
7.3.2 - Spécification matériaux	126
7.3.2.1 - Sols fins traités en place	126
7.3.2.2 - Sols fins traités en centrale	127
7.3.2.3 - Matériaux bitumineux	127
7.3.3 - Hypothèses d'interface	128
7.3.4 - Dimensionnement de la structure	128
<hr/>	
● 8 - Assurance de la qualité	129
8.1 - Objectifs essentiels de l'assurance qualité	130
8.2 - Actions et documents d'assurance de la qualité (généralités)	131
8.2.1 - Variantes contractuelles	131
8.2.2 - Actions et documents	132
8.3 - Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour le traitement du sol pour terrassements (remblais et fond de déblais)	133
8.3.1 - Actions de contrôle	133
8.3.2 - Points sensibles	134
8.3.3 - Points d'arrêt	134
8.3.4 - Dispositions pour la PST	135
8.4 - Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour les couches de forme en sol traité	135
8.4.1 - Définition de la qualité requise	135
8.4.2 - Plan de contrôle	136
8.4.3 - Points sensibles	136
8.4.4 - Points d'arrêt	136
8.5 - Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour les couches d'assises en sol traité	138
8.5.1 - Plan de contrôle	138
8.5.2 - Points sensibles et point d'arrêt	139
<hr/>	
● 9 - Conclusion	141
<hr/>	
● 10 - Annexes	145
10.1 - Bibliographie	146
10.2 - Normes	147
<hr/>	



Chapitre

1

Les sols

1.1 Définition(s)

1.2 Classification des sols

**1.3 Les matériaux non couverts
par le présent guide**

**1.4 Attention à certains constituants
particuliers!**

1.5 Matériaux locaux

Le traitement de sol est apparu dès le début des années 1950, dans plusieurs pays tropicaux, comme technique économique pour constituer des assises de chaussée dans des zones dépourvues de granulats (et de moyens financiers). En France, le traitement à la chaux de limons très humides s'est développé à partir du milieu des années 1960, dans le cadre des terrassements de grands ouvrages. La technique s'est progressivement étendue à la réalisation de couches de forme et, plus récemment, d'assises de chaussée.

Un traitement de sol peut être la réponse à divers problèmes : nécessité de passer dans les sols excessivement humides, besoin d'améliorer les caractéristiques géotechniques (portance, tenue à l'eau, résistance au gel-dégel, etc.). D'une manière générale, cette technique permet l'utilisation maximale des matériaux du site. Elle amène donc d'importants bénéfices en termes d'économie des ressources naturelles, de minimisation des transports et donc de réduction de l'impact vis-à-vis de l'environnement.

1.1 Définition(s)

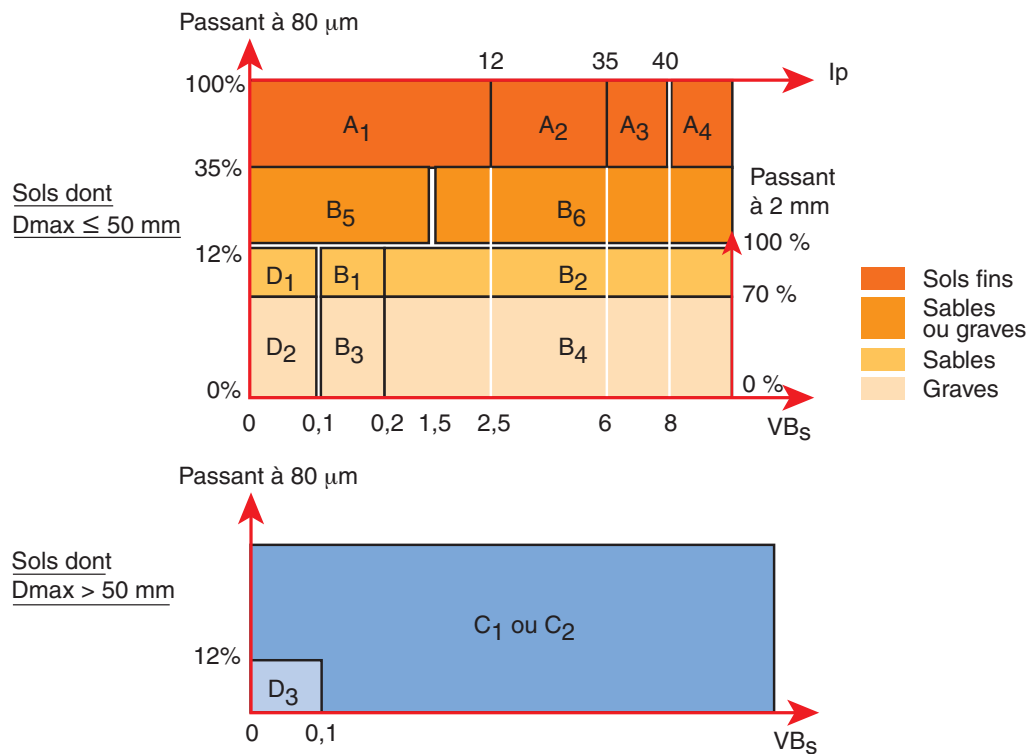
Le terme « sol » a différentes significations selon le contexte et selon la profession qui l'utilise. Les agronomes ont leur définition, les pédologues une autre, etc. De leur côté, les géologues ne parlent pas de sols, mais de « roches meubles ». Pour les ingénieurs routiers et les géotechniciens, les « sols » sont des matériaux naturels, constitués de grains faciles à séparer par simple trituration ou par l'action d'un courant d'eau. Ces grains, ou éléments, peuvent être de dimensions extrêmement variables, allant des particules d'argile aux blocs rocheux.

Les natures et les compositions minéralogiques des sols sont très diverses. On peut distinguer plusieurs types de sols selon le processus qui a abouti à leur formation :

- les alluvions ;
- les sédiments meubles ;
- les dépôts éoliens ;
- les dépôts glaciaires ;
- les résidus d'altération *in situ* de roches-mères.

1.2 Classification des sols

Divers systèmes de classification coexistent à travers le monde. La classification ASTM (American Society for Testing and Materials) continue d'être utilisée ici et là, mais elle est très sommaire. Le système français du Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme », couramment appelé GTR [1], comporte une classification précise et complète d'une grande variété de matériaux (figure 1). Les particularités de certains (craies, sables de dune, etc.) ont conduit à la mise au point de produits ou de techniques de traitement très spécifiques.



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅	
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Figure 1 : tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, selon la norme NF P 11-300.

1.3 Les matériaux non couverts par ce guide

On peut considérer que la classification GTR ci-dessus couvre la grande majorité des sols rencontrés dans l'ensemble des pays à climat tempéré et que, moyennant évidemment des adaptations au cas par cas, les principes de traitement décrits dans ce guide leur sont applicables. En revanche, il n'en va pas de même de beaucoup de sols des pays tropicaux, où les processus d'altération des roches sont radicalement différents. Ainsi, les sols latéritiques, qui couvrent d'immenses étendues, ont des propriétés géotechniques bien spécifiques. De plus, les contraintes liées au climat sont moins sévères (absence de gel). Bien qu'ayant de nombreux points communs, les techniques de traitement en pays tropicaux ne sont pas identiques à celles décrites ici.

Par ailleurs, existent des sols très particuliers comme les argiles gonflantes pour lesquels le traitement au liant pouzzolanique ou hydraulique constitue un remède efficace, répondant à des critères bien particuliers. Ceci sans parler, par exemple, des matériaux coralliens, dont le traitement donne d'excellents résultats...

Enfin, les sous-produits industriels et urbains (cendres volantes, laitiers divers, mâchefers d'incinération, sables de fonderie, schistes miniers, phosphogypse, etc.) ne sont pas considérés ici. Ces matériaux se caractérisent par une grande diversité et, pour certains, une composition si particulière que c'est elle qui dicte la solution optimale de traitement.

1.4 Attention à certains constituants particuliers !

Certains constituants chimiques particuliers peuvent avoir une influence notable sur le développement de la prise dans le matériau traité.

Les matières organiques génèrent de l'acidité, dont la neutralisation va consommer une partie du liant. Au-delà d'une certaine teneur, le sol devient impropre au traitement.

Les chlorures accélèrent généralement la prise (cas de certains sédiments, et aussi cas de l'utilisation d'eau de mer). Une étude spécifique est indispensable pour bien cerner le comportement du sol traité.

Les sulfures et surtout les sulfates peuvent s'avérer très nocifs pour le comportement à terme, avec risque de gonflements ettringitiques. Si la présence de sulfates a été décelée, ou est suspectée, leur teneur devra être évaluée avec précision, afin de décider si un traitement est envisageable ou non. Dans l'affirmative, une étude avec évaluation des effets à long terme devra être effectuée. Ceci concerne, entre autres, les sols contenant du gypse ou des pyrites.

1.5 Matériaux locaux

Diverses études et applications, réalisées à l'échelle régionale, ont abouti à l'édition de guides ou de catalogues de structures de chaussée. Pour la plupart, ces catalogues de structures régionaux font une large place aux sols traités. Ils constituent des prolongements et adaptations des directives et recommandations existant à l'échelle nationale et prennent en compte les particularités des matériaux locaux.





Chapitre

2

Les liants

2.1 Les ciments

**2.2 Les liants hydrauliques
routiers (LHR)**

2.3 Les chaux

2.1 Les ciments

L'importance de la quantité de liant nécessaire à un chantier de traitement, les sujétions liées au stockage et à la manutention du liant font que, en pratique, seuls sont utilisés les ciments « courants », c'est-à-dire ceux couverts par la norme européenne NF EN 197-1.

Les actions d'un ciment peuvent se résumer de la manière suivante.

- **Immédiatement**

L'abaissement de teneur en eau résulte uniquement de l'apport de matière sèche. Il est donc très limité. Le traitement au ciment seul ne convient pas pour des sols très humides. Une solution est de les prétraiter à la chaux.

- **À moyen et long terme**

La première phase est celle du démarrage de la prise. Elle correspond au délai de maniabilité du mélange. Celui-ci dépend de la nature des constituants principaux du ciment et de leur finesse de mouture, ainsi que de la nature des constituants secondaires et des additifs (retardateurs ou accélérateurs).

La deuxième phase concerne la prise hydraulique, dont la durée dépend principalement de la qualité et de la finesse du ciment.

La troisième phase est celle du durcissement progressif qui s'étale d'un à plusieurs mois.



La prise hydraulique s'interrompt quand la température du matériau tombe en dessous de 5 °C environ. La période de traitement et le type de ciment doivent donc être choisis de manière à garantir que le sol traité aura atteint un niveau de résistance mécanique et de tenue au gel suffisants avant l'arrivée des premiers froids néfastes.

Par ailleurs, plus le sol est argileux, plus le ciment aura du mal à enrober et à lier ses particules. En conséquence, le traitement au ciment seul n'est efficace qu'avec des sols peu argileux. Il faut alors soit prétraiter à la chaux, soit recourir à un liant hydraulique spécifique (voir 2.3).

Le tableau 1 résume les possibilités d'emploi des ciments courants avec différents types de sols [2].

Tableau 1 : possibilités d'emploi des ciments courants avec différents types de sols

Types de sols	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
Sols pas ou peu argileux (classes A1-B1-B2-B3-B4-B5-D1-D2)	+ ⁽¹⁾	+	+	?	+
Sols argileux prétraités à la chaux (classes A2-A3-B6)	+ ⁽¹⁾	+	?	?	?
Craies (classe R1)	+ ⁽¹⁾	?	?	?	?
Sols calcaires et marno-calcaires (classe R2)	+ ⁽¹⁾	+	+	?	+

+ : a priori adapté

+⁽¹⁾ : a priori adapté - Usage à privilégier pour les travaux d'arrière-saison (ces ciments donnent un faible délai de maniabilité), sauf ajout d'un retardateur

? : étude spécifique nécessaire

Bien entendu, l'aspect économique peut influencer sur le choix du ciment. À cet égard, le coût de son transport est un facteur essentiel, qui peut conduire à sélectionner un ciment produit par une usine proche du chantier.

2.2 Les liants hydrauliques routiers (LHR)

Dès la fin des années quatre-vingt, les cimentiers français ont commencé à concevoir et à mettre au point des liants hydrauliques distincts des ciments classiques normalisés et dédiés à la construction routière. Ces produits appelés liants hydrauliques routiers (LHR) se sont, depuis, beaucoup développés.

2.2.1 - Objectifs

La démarche répond à deux objectifs, l'un technique, l'autre économique.

*** Au plan technique**

Un but est de mettre à disposition de la construction routière des liants spécialement formulés pour donner les meilleurs résultats pour certaines opérations de terrassements ou de construction d'assises, tant en termes de facilité d'usage (délai de maniabilité, en particulier) que de niveau de performances du mélange final. En outre, certains LHR ont été spécifiquement conçus pour le traitement de matériaux particuliers (sols régionaux) ou pour atteindre des objectifs de performance à court terme (liant à portance rapide).

*** Au plan économique**

Les formulations de certains LHR font largement appel à des coproduits d'industries. Dans certains cas, le producteur joue également sur la finesse de mouture. Par conséquent, les prix des LHR sont en général moins élevés que ceux des ciments.

2.2.2 - Types de LHR

Certains LHR ont été mis au point pour des graves ou des sables traités, utilisés en assises de chaussée. D'autres l'ont été pour des traitements de sol. Ces derniers peuvent, très schématiquement, être classés en fonction de leur destination principale. On peut ainsi citer :

- LHR pour traitement de sols fins (limons, loess, etc.) ;
- LHR pour travaux en arrière-saison ;
- LHR pour traitement de matériaux argileux (y compris en substitution du double traitement chaux puis ciment) ;
- LHR pour traitement de craies ;
- LHR pour traitement de calcaires subnormaux ;
- LHR pour travaux de terrassements ;
- LHR à portance rapide.

Des informations précises sur les divers liants hydrauliques routiers disponibles peuvent être obtenues auprès des sociétés cimentières qui les produisent.



2.2.3 - Codification et spécifications performantielles des LHR

Dans une première phase, les LHR (français) ont fait l'objet d'Avis Techniques. Ils ont ensuite donné lieu à une norme française : NF P 15-108 « Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité ».

Ils seront couverts, à partir de 2012, par la norme NF EN 13282 (parties 1 et 2). La première partie de cette norme correspond aux LHR dits « à durcissement rapide » dont les résistances à la compression sont mesurées à 28 jours. Quatre classes sont définies sur la base des niveaux de résistance mécanique à atteindre (tableau 2).

Tableau 2 : résistances mécaniques requises pour les LHR « à durcissement rapide »

Classe	Résistance à la compression (MPa)		
	à 7 jours	à 28 jours	
E2	≥ 5,0	≥ 12,5	< 32,5
E3	≥ 10,0	≥ 22,5	< 42,5
E4	≥ 16,0	≥ 32,5	< 52,5
E4 RS	≥ 16,0	≥ 32,5	–

On notera au passage que les exigences de résistance mécanique de la classe E4 sont identiques à celles de la classe 32,5 N des ciments courants. Par contre, le temps de début de prise doit être d'au moins 90 minutes pour les LHR des classes E2, E3 et E4, à comparer au minimum de 75 minutes pour les ciments de classe 32,5 N. À l'inverse, pour les LHR de classe E4 RS, le temps de début de prise ne doit pas excéder 90 minutes.

La deuxième partie de la norme couvre les LHR dits « à durcissement normal ». Le tableau 3 indique les exigences mécaniques des quatre classes.

Tableau 3 : résistances mécaniques requises pour les LHR « à durcissement normal »

Classe	Résistance à la compression à 56 jours (MPa)	
N1	≥ 5,0	≤ 22,5
N2	≥ 12,5	≤ 32,5
N3	≥ 22,5	≤ 42,5
N4	≥ 32,5	≤ 52,5

Pour les 4 classes, le temps de début de prise doit être d'au moins 150 minutes. Ces spécifications – on notera en particulier que les résistances à la compression sont mesurées à 56 jours, et non à 28 jours - correspondent bien à des liants moins « nerveux » que les LHR dits « à durcissement rapide » et a fortiori que les ciments courants. En outre, certains liants développent des cinétiques de durcissement sur le très long terme (1 an).

Des informations détaillées figurent dans les fiches techniques des différents LHR disponibles sur le marché ou peuvent être obtenues auprès des sociétés cimentières qui les fabriquent.

2.2.4 - Identification des LHR

Conformément à la future norme NF EN 13282 (parties 1 et 2), les liants hydrauliques routiers sont identifiés ainsi :

- HRB (pour Hydraulic Road Binder) ;
- sa classe (Ei ou Nj) ;
- sa composition nominale en constituants principaux (des tolérances de pourcentages sont définies) ;
- la présence éventuelle de sulfate de calcium ;
- la présence éventuelle d'additifs (maximum 1 %).

Les constituants sont codés comme suit :

- clinker Portland : K
- laitier granulé de haut-fourneau : S
- laitier d'aciérie à l'oxygène : S_b
- pouzzolane naturelle : P
- pouzzolane naturelle calcinée : Q
- cendres volantes siliceuses : V
- cendres volantes siliceuses de lit fluidisé : V_a

- cendres volantes calciques : W
- cendres volantes calciques non éteintes : W_a
- schiste calciné : T
- calcaire : avec teneur en carbone organique < 0,5 % : L
avec teneur en carbone organique < 0,2 % : LL
- chaux aérienne calcique vive : CL-Q
- chaux aérienne calcique éteinte : CL-S
- chaux hydraulique naturelle : NHL
- sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) : C_s

Voici deux exemples d'identification de liant hydraulique routier utilisable en traitement de sol selon ce système :

HRB	N 2	S 55	V 25	CL 15	C _s
HRB	E 4	K 80	V 10	CL 10	C _s

2.3 Les chaux

On distingue plusieurs natures de chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine (calcique et/ou dolomitique) et sa teneur en argile. On parle de chaux aérienne si la roche de base est un carbonate quasiment pur et de chaux hydraulique si elle contient de l'argile (jusqu'à 20 %). Les chaux résultant directement de la calcination d'un carbonate sont des chaux vives, celles ayant ensuite subi une hydratation sont des chaux éteintes.

Les chaux dolomitiques, disponibles en bien moindres quantités, ne sont, en pratique, pas utilisées, car ayant une réactivité lente et pouvant créer un risque de gonflement dû aux composés magnésiens.

2.3.1 - La chaux calcique aérienne vive

Ce type de chaux (dénommé « chaux vive » tout court dans la suite) est le premier liant à avoir été utilisé en traitement de sols. Les premières réalisations d'envergure ont eu lieu dans le Nord de la France à partir du milieu des années 1960.

Il s'agissait essentiellement de rendre possibles les terrassements de grands chantiers dans des limons argileux très humides.

■ 2.3.1.1 - Action immédiate d'abaissement de la teneur en eau

La chaux vive a une action bénéfique immédiate sur les sols très humides : l'abaissement de la teneur en eau. Trois phénomènes concourent à cette modification de l'état hydrique :

– absorption d'eau par hydratation de la chaux vive, selon la réaction



- vaporisation d'une partie de l'eau sous l'effet de la chaleur dégagée par la réaction ci-dessus ;
- apport de matière sèche, diminuant arithmétiquement la teneur en eau du mélange sol + chaux.

On retiendra que, globalement, l'incorporation de 1 % de chaux vive provoque un abaissement de la teneur en eau de 1 point (1 %).

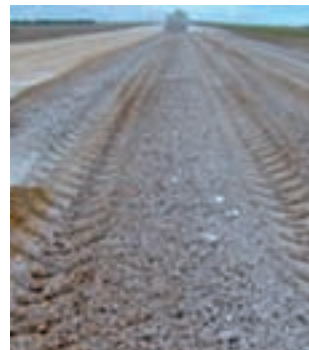
■ 2.3.1.2 - Action immédiate sur les caractéristiques géotechniques

L'ion calcium Ca^{++} de la chaux interagit avec les particules argileuses du sol, provoquant leur floculation. Celle-ci se traduit par d'importantes améliorations géotechniques :

- la limite de plasticité augmente fortement, alors que la limite de liquidité varie très peu : l'indice de plasticité est donc nettement diminué, ce qui peut faire passer d'un sol plastique, déformable, collant, à un mélange « solide », apte aux opérations de terrassements ;



Sol avant traitement



Sol après traitement

- la portance du sol s'élève, ce qui le rend circulaire par les engins de chantier et facilite le compactage des couches sus-jacentes ;
- les caractéristiques de compactage sont modifiées, avec en particulier une augmentation de la teneur en eau optimale (et une diminution de la densité maximale Proctor). Le traitement à la chaux améliore également les niveaux de portance (IPI et CBR). L'augmentation de la teneur en eau optimale et l'aplatissement de la courbe Proctor indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité et rendu moins sensible aux variations de teneur en eau. La figure 2 illustre ces effets.

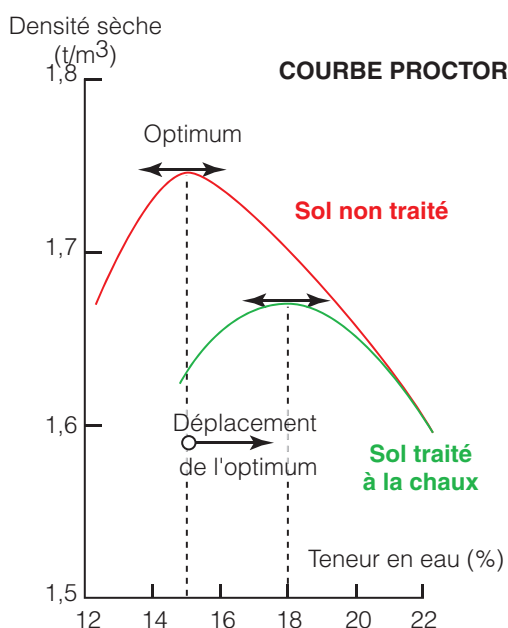


Figure 2: influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol.

2.3.2 - La chaux calcique aérienne éteinte

La chaux éteinte est moins utilisée que la chaux vive. Sa densité foisonnée est sensiblement inférieure à celle de la chaux vive, ce qui rend son transport et sa manutention plus coûteux. De plus, son seul effet d'assèchement est son apport en tant que matière sèche ; il est donc très limité.

Les actions immédiates de la chaux éteinte sur les caractéristiques géotechniques sont semblables à celles de la chaux vive. Elles sont simplement moins marquées, car la chaux éteinte n'est pas utilisée avec des sols très humides.

2.3.3 - Actions à long terme des chaux calciques aériennes

Une fois mise en présence de l'eau, la chaux vive se transforme en chaux éteinte. Les effets à long terme sont donc identiques pour les deux types de chaux.

En présence de particules d'argile(s), se développe une action pouzzolanique qui aboutit à la formation de silico-aluminates de calcium insolubles, qui cristallisent en créant des liaisons analogues à celles obtenues avec un liant hydraulique.

Toutefois, ces réactions sont lentes. Leur vitesse dépend, en outre, de la température. Ceci a d'importantes conséquences.

Dans les pays tempérés, et a fortiori dans les pays froids, la prise due à la chaux prend de nombreux mois pour aboutir à un niveau suffisant de résistances mécaniques et de tenue au gel-dégel (elle s'arrête quand la température du matériau descend aux alentours de 5 °C). C'est pourquoi il faut, en règle générale, éviter le traitement à la seule chaux pour des couches pouvant être exposées directement à du gel sévère (couches de forme en particulier). Le double traitement chaux + liant hydraulique est nécessaire dans de tels cas.

En revanche, dans les pays chauds (tropicaux, sahéliens, etc.), les réactions sont rapides et un bon niveau de résistances mécaniques est vite atteint. Le traitement à la chaux seule peut être pratiqué même pour la constitution d'assises de chaussée. La disponibilité d'une quantité suffisante de chaux industrielle, de qualité régulière, n'est toutefois pas toujours assurée.

Par ailleurs, quel que soit le climat, la présence d'une quantité suffisante de particules argileuses est nécessaire pour alimenter les réactions de prise. Avec des sols non ou peu argileux, la chaux aérienne ne conduit à un durcissement que par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air, phénomène extrêmement lent et n'aboutissant qu'à un niveau modeste de résistances mécaniques. De tels sols ne se prêtent donc pas au traitement à la chaux.

Il convient aussi de signaler que les argiles à forte teneur en mica ne réagissent que faiblement, voire pas du tout, avec la chaux aérienne.

2.3.4 - Les chaux hydrauliques

Il n'y a pas, *a priori*, de contre-indication d'ordre technique à l'utilisation de chaux hydraulique pour le traitement de sols. En pratique, les chaux hydrauliques sont destinées essentiellement au bâtiment et les quantités fabriquées ne sont pas à la hauteur des besoins en matière de traitement de sol.

Les matériels

**3.1 Matériels de transport
et de stockage des liants**

3.2 Matériels d'épandage

3.3 Matériels de préparation des sols

3.4 Matériels de malaxage en place

3.5 Centrales de malaxage

3.6 Matériels d'arrosage

3.7 Matériels de compactage

3.8 Matériels de réglage

3.9 Émissions de poussières – Les remèdes

La liste des matériels n'est, à l'évidence, pas la même selon que le traitement s'effectue en place ou en centrale. Certains matériels sont toutefois requis dans les deux cas. Les différents équipements susceptibles d'opérer sont passés en revue ci-après.

3.1 Matériels de transport et de stockage des liants

3.1.1 - Cas général: liant pulvérulent en vrac

Dans leur grande majorité, les chantiers sont approvisionnés avec des liants pulvérulents en vrac, amenés par camion-citerne pneumatique. Les matériels de transport spécialisés permettent le chargement et le déchargement du liant hydraulique dans les meilleures conditions (pas d'émission de poussières, pas de risque de pollution).



Le liant est alors stocké dans un ou plusieurs silos. Pour un traitement en place, le ou les silo(s) sont généralement mobiles, leur disposition est normalement légèrement inclinée (subhorizontale). Pour un traitement en centrale, les silos sont normalement de type « fixe » et vertical.



Le stockage doit avoir une capacité suffisante pour que le traitement puisse se dérouler sans interruption. Cette exigence conduit à installer au moins deux silos pour tout chantier dont l'importance nécessite la certitude de rendements journaliers importants. L'existence d'au moins deux silos permet un fonctionnement optimal, un silo étant utilisé pour le soutirage du liant pendant que l'autre est en cours de remplissage. Cette disposition a, de plus, l'avantage de laisser refroidir le liant fraîchement fabriqué et se neutraliser électriquement, conditions nécessaires pour son écoulement régulier et donc son dosage précis.

3.1.2 - Cas du double traitement

Le recours à la technique du double traitement oblige évidemment à dimensionner et à gérer deux stockages : un pour la chaux, un pour le ciment. Lorsqu'elle est techniquement possible, l'utilisation d'un LHR spécifique a l'avantage de simplifier les opérations de transport et de stockage.

3.1.3 - Cas particulier de traitement en place : liant en suspension aqueuse

Certains traitements en place sont effectués avec une machine multifonctions recevant le liant sous forme de suspension aqueuse (voir plus loin). La suspension est préparée sur chantier ou à proximité, approvisionnée dans un matériel dédié, qui en assure l'homogénéisation et injectée directement dans la chambre de malaxage de la machine multifonctions.

3.1.4 - Cas des (petits) chantiers « rustiques » : ciment en sacs

Aujourd'hui, la livraison d'un liant en vrac constitue la règle. Pour certains chantiers, de petites tailles ou d'accès difficiles, il peut s'avérer nécessaire de livrer le liant en sacs, lesquels doivent évidemment être stockés à l'abri de l'eau.

Cette méthode est devenue exceptionnelle dans les pays développés, où elle ne concerne plus que des petites réalisations, pour lesquelles il n'est pas exigé un dosage du liant nécessairement très précis. Par contre, elle demeure courante dans beaucoup de pays dits en développement, voire « émergents ».



3.2 Matériels d'épandage

Sur les petits chantiers où le liant est approvisionné en sacs, on ne fait appel à aucun engin d'épandage dédié. Les sacs sont disposés selon une grille géométrique prédéterminée, vidés en tas et le liant est ensuite étalé à la niveleuse.

Dans le cas « normal » de liant(s) pulvérulent(s) en vrac et de traitement en place, on utilise des engins d'épandage spécifiques.

3.2.1 - Types d'épandeurs

Les épandeurs à dosage volumétrique sans asservissement à la vitesse ne sont plus guère utilisés que sur des petits chantiers où la précision du dosage n'est pas une préoccupation majeure.

Les épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse, très courants, comportent un tambour alvéolaire ou un tapis extracteur dont le débit est lié à la vitesse de translation de l'engin.

Les épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse et calés par un système pondéral sont d'apparition plus récente. Le pesage du liant à l'avancement permet de connaître précisément la quantité épandue par unité de surface, ce qui allège considérablement les opérations de contrôle et de réglage.



On notera aussi l'existence, récente, de matériels à largeur d'épandage variable.

3.2.2 - Précision de l'épandage

La quantité de liant à épandre par unité de surface Q (en kg/m^2) est donnée par la relation suivante :

$$Q = e \cdot \rho_d \frac{d}{100 - d}$$

où d est le dosage en liant visé (masse de liant sur masse de sol sec, en %),
 e est l'épaisseur de la couche de sol en place à traiter,
 ρ_d est la masse volumique sèche au sol en place juste avant traitement (en kg/m^3).

La précision de l'épandage se détermine à partir de deux facteurs : son exactitude et sa variation. L'exactitude correspond à l'écart observé entre le poids moyen de liant effectivement épandu et le poids visé par unité de surface. Le coefficient de variation C_v s'exprime ainsi (en %) :

$$C_v = 100 \frac{s}{m}$$

et s étant l'écart-type calculé sur une population de mesures représentatives et m la moyenne.

Le niveau de précision des épandeurs fait l'objet d'une ébauche de classification [3], résumée par le tableau 4.

Tableau 4 : notation des critères pour l'épandage des liants

Critères	Notes		
	3	2	1
C : homogénéité d'épandage du liant (%)	$C_v \leq 5$	$5 < C_v \leq 10$	$C_v > 10$
V : possibilité de faire varier la largeur d'épandage	Oui	Non	Non

Bien entendu, d'autres facteurs influent sur la qualité de l'épandage : conception générale de l'engin (y compris son aptitude à se déplacer régulièrement sur un terrain pas forcément idéal), conception et performances du système de dosage, aides à la conduite, ergonomie du poste de conduite, systèmes d'asservissement, de repérage.



3.3 Matériels de préparation des sols

Certains matériaux peuvent nécessiter un conditionnement particulier avant l'opération de malaxage avec le liant. Les principaux cas pouvant se présenter sont les suivants :

- sols extrêmement cohésifs, nécessitant une scarification préalable ;
- sols contenant des blocs dépassant 100 mm en D_{\max} , nécessitant un criblage, voire ensuite un concassage (ceci essentiellement pour les couches de forme) ;
- sols hétérogènes, justifiant une méthode de reprise atténuant leur hétérogénéité (couches de forme) ;
- sols trop secs, nécessitant un arrosage préalable.

Les machines nécessaires sont des matériels non dédiés, dont l'utilisation éventuelle est décrite dans les chapitres suivants.

3.4 Matériels de malaxage en place

3.4.1 - Malaxeurs à outils fixes

Ces matériels sont utilisés essentiellement pour :

- des traitements relativement « grossiers » de sols pour corps de remblais ;
- des prétraitements à la chaux de sols argileux très humides.

Les différents types d'engins adaptés à ces opérations sont les suivants.

• Charrues à disques

Ces matériels tractés comportent deux rangées de disques et sont capables de travailler des matériaux contenant des blocs jusqu'à 250 mm. Leur profondeur d'action est toutefois limitée et n'excède guère 20 cm. Leur rendement est essentiellement fonction de la puissance de leur tracteur (il s'agit généralement d'un bouteur); il peut atteindre plusieurs milliers de m³ par jour. Ce matériel est de moins en moins utilisé.

• Charrues à socs

Ces matériels, également tractés, atteignent une profondeur de malaxage bien plus importante, jusqu'à 50 cm. Ces charrues peuvent opérer dans des « sols » renfermant des blocs jusqu'à 350 mm environ. Bien entendu, plus la profondeur de travail est grande, plus le tracteur doit être puissant: une profondeur de passe de 50 cm exige une puissance d'au moins 400 kW. Le nombre de passes nécessaires pour aboutir à un malaxage acceptable est élevé (minimum 6).



• Bouteurs et niveleuses

Un malaxage sommaire est parfois effectué avec ce genre d'engin. L'emploi d'une lame munie de dents donne un meilleur résultat que celui d'une lame simple. Ces engins conviennent surtout pour la préparation de matériaux très grenus (présence de gros blocs).

3.4.2 - Malaxeurs à outils animés (pulvimalaxeurs)

Les engins de ce type sont parfois appelés « pulvérisateurs de sols », parfois « stabilisateurs de sols », parfois « malaxeurs en place ». Le terme le plus exact nous semble être « pulvimalaxeur », qui correspond à celui retenu par les Anglo-Saxons à savoir « pulvimixer ».

Les premières machines étaient apparues vers la fin des années 1950 et leurs performances étaient limitées. Elles se sont, au fil du temps, énormément améliorées, avec en particulier une course à la puissance et un recours maintenant généralisé aux dispositifs d'asservissement et de contrôle.



Schématiquement, un pulvimalaxeur est constitué d'un ensemble tracteur monté sur roues et d'un malaxeur constitué d'un rotor à axe horizontal perpendiculaire au sens d'avancement de l'engin, tournant à l'intérieur d'une chambre de confinement. Les engins les plus anciens avaient la chambre de malaxage montée derrière les roues. Les modèles sortis à partir de la fin des années 1980 ont la chambre de malaxage située entre les deux essieux, vers le centre de l'engin. Cette disposition assure une meilleure pénétration du rotor dans le sol et une meilleure régularité de fonctionnement (épaisseur, vitesse, dosage).

Parallèlement à cette évolution de la conception, la puissance des engins a considérablement augmenté au fil du temps. Les modestes machines des débuts ne disposaient que de 200 chevaux (135 kW) ; les plus gros pulvimalaxeurs actuels développent jusqu'à 700 chevaux (500 kW).

Plus la puissance est grande, plus la profondeur de traitement peut être importante. Ainsi, les premiers modèles atteignaient – parfois difficilement – une épaisseur de couche malaxée de 30 cm maximum (épaisseur après compactage). Aujourd'hui, les machines de grande puissance peuvent garantir une épaisseur de traitement jusqu'à 50 cm (après compactage).

La puissance disponible est, par ailleurs, un facteur primordial quant à la finesse de mouture obtenue. Les autres facteurs favorisant la finesse de mouture du sol sont la vitesse du rotor (qui tourne toujours en « relevage »), la conception de la chambre de malaxage et le nombre d'outils montés sur le rotor. Le rotor est composé d'un tambour sur lequel divers types d'outils peuvent être fixés. Aujourd'hui, les outils équipant le rotor sont interchangeables, avec des temps de démon-

tage/montage réduits. Les différents types d'outils utilisables sont :

- les couteaux en L, bien adaptés pour le malaxage des sols fins et cohésifs ;
- les bêches, qui conviennent pour de nombreux types de sols ;
- les pics, pour le malaxage des matériaux durs (rocheux, très cohésifs ou durcis par un prétraitement).



Par ailleurs, la chambre de malaxage des pulvimalaxeurs modernes est munie d'un dispositif d'injection d'eau permettant d'optimiser l'humidité du mélange en vue de son compactage. Quelques-uns sont en outre équipés d'un système d'injection de suspension de liant hydraulique, ce qui évite l'opération d'épannage préalable du liant pulvérulent.

Enfin, il convient de noter que, depuis plusieurs années déjà, les machines de malaxage en place peuvent être équipées de systèmes électroniques permettant de régler finement les paramètres de fonctionnement (vitesses, profondeur, dosages, etc.) et de les enregistrer. Des moyens de repérage très précis (laser, GPS, etc.) sont disponibles, qui garantissent la juxtaposition exacte des passes (pas de manques, ni de recouvrements) et sont, de plus, une précieuse aide à la conduite.

3.4.3 - Système de notation des matériels de malaxage en place

Une grille de notation existe pour les matériels de malaxage en place [3]. Elle est basée sur l'attribution d'une note allant de 1 (moins bon) à 3 (meilleur) pour 5 critères :

- H = homogénéisation du matériau avec le ou les liant(s),
- E = maîtrise de l'épaisseur du traitement,
- P = puissance,
- I = possibilité d'injecter de l'eau dans la chambre de malaxage,
- L = dosage du liant sous forme de suspension (L ne figure pas dans la notation d'ensemble si l'engin n'est pas équipé d'un système idoine).

L'évaluation des notes est donnée dans le tableau 5.

Tableau 5 : notation des critères pour les pulvimalaxeurs

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	Réglage et contrôle de l'épaisseur	Réglage de l'épaisseur
P	Puissance moteur disponible	≥ 70 kW/ml	35 < P < 70	≤ 35 kW/ml
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

Les améliorations et les innovations successives font qu'aujourd'hui les meilleurs pulvimalaxeurs, qui sont aussi les plus puissants, sont à même de fournir une haute qualité de malaxage. Celle-ci reste certes inférieure à celle des centrales, mais l'écart est bien moindre qu'il ne le fut dans le passé, en tout cas pour de nombreux types de sols.

3.4.4 - Autres matériels à outils animés

Ce sont essentiellement les rotobèches, matériels tractés, dont la profondeur de malaxage se situe entre 25 et 35 cm. Ces matériels conviennent plus particulièrement pour le traitement des sols très cohésifs et humides, ainsi que pour les chantiers exigus (élargissement par exemple).



3.5 Centrales de malaxage

La majorité des traitements de sols s'effectue par malaxage en place. Cependant, depuis les années 1990, certains traitements sont réalisés en centrale.

Le malaxage en centrale n'est valable, en règle générale, que pour des grands chantiers (volume minimum de l'ordre de 50 000 m³). Il correspond le plus souvent à un traitement de sol « haut de gamme » (assises de chaussée, couche de forme autoroutière ou aéroportuaire), pour lequel on exige un mélange homogène avec un dosage en liant précis et pour lequel le surcoût du passage en centrale se justifie.

Les centrales utilisées sont des centrales continues, couramment employées pour la fabrication de matériaux pour assises de chaussées.

Les sols non ou peu cohésifs se prêtent aisément au passage en centrale. Par contre, les sols possédant une argilosité élevée posent problème car ils sont collants. On admet généralement que les sols répondant aux spécifications ci-après peuvent être traités en centrale sans qu'il soit nécessaire d'apporter des modifications à la centrale :

$$D_{\max} \leq 50 \text{ mm} \quad I_p \leq 12 \quad \text{ou} \quad VB_s \leq 2,5 \text{ g}$$



Des sols plus plastiques peuvent être traités en centrale :

- soit après prétraitement en place à la chaux ;
- soit à condition de procéder à divers aménagements de la centrale.

Les aménagements utiles pour éviter les colmatages et assurer un écoulement régulier d'un sol argileux sont les suivants :

- utilisation de trémies avec parois à très fortes pentes ;
- revêtement des parois de trémie avec un matériau « glissant » (téflon en particulier) ;
- installation de dispositifs anti-voûte (chapeau pointu par exemple) ;
- installation de vibreurs aux endroits où du bourrage a des chances de se produire ;
- suppression des étranglements éventuels.

Par ailleurs, dès que la teneur en fines est notable (plus de 5 % environ) et/ou l'argilosité sensible, il est très fortement recommandé de choisir une centrale à dosage pondéral, car les écoulements sont toujours quelque peu irréguliers en volume.

En tout état de cause, la centrale doit être choisie et réglée de manière à pratiquer un dosage en liant élevé, notablement supérieur à celui des matériaux hydrauliques pour assises classiques (voir chapitres 4 et 5). Cet impératif, combiné avec les problèmes éventuels d'écoulement d'un sol collant, conduit à tableur *a priori* sur un débit effectif sensiblement inférieur (de 30 à 50 %) à celui qu'aurait la même centrale fabriquant une grave traitée.

Il faut souligner que l'option du traitement de sol en centrale présente des avantages techniques certains :

- la constitution obligatoire de stocks de sol en amont de la centrale fournit l'occasion de procéder, dans les meilleures conditions, à des opérations d'homogénéisation (à la mise en tas et à la reprise) ;
- elle permet aussi, si nécessaire, d'éliminer les trop gros éléments (cailloux ou blocs) par criblage avant introduction en trémie ;
- de même, si le sol se présente sous forme de mottes, on a la possibilité, préalablement au malaxage, de les émietter par simple écrasement sous un engin, voire par pulvérisation au pulvimalaxeur, ou encore par passage dans un émotteur ;
- par ailleurs, la teneur en eau du sol peut être mieux ajustée que lors d'un malaxage en place, à la fois avant et dans la centrale ;
- le mélange est plus homogène et les dosages en liant et en eau mieux maîtrisés, donc plus précis, qu'au cours d'un malaxage en place.

L'inconvénient essentiel est celui des distances de transport entre les lieux d'emprunt, la centrale, et les zones d'application.

3.6 Matériels d'arrosage

Certaines précautions sont à prendre pour ce poste qui paraît *a priori* extrêmement simple. Tout d'abord, il faut éviter les matériels trop rustiques, ne maîtrisant pas convenablement le volume d'eau appliqué par unité de surface. Un système d'asservissement du débit de pompe à la vitesse d'avancement est une garantie pour un travail de qualité (nécessaire pour les couches de forme et les assises).

Ensuite, il est de bonne pratique de scarifier, avant arrosage les sols imperméables, ceci pour favoriser la pénétration de l'eau dans la masse à traiter et pour éviter les ruissellements superficiels.

L'existence de dispositifs d'arrosage avec enfouissement mérite d'être signalée. Cette méthode est en effet très efficace pour une humidification régulière et en profondeur. Elle est appelée à se développer.



3.7 Matériels de compactage

Le compactage des sols traités ne fait pas appel à des engins spécialisés. Les différents compacteurs à utiliser sont précisés dans les chapitres qui suivent.

3.8 Matériels de réglage

Les niveleuses sont employées pour :

- le pré-réglage sur tous les types de chantiers ;
- le réglage final sur les chantiers courants (qui représentent la majorité des cas).

Ces machines sont très fréquemment guidées électroniquement, par fil et capteurs ou par référence laser.

Sur les grands chantiers (autoroutes, pistes d'aviation) où les tolérances de nivellement sont très serrées, le réglage final est généralement effectué à l'autograde, guidé sur fil ou, de plus en plus souvent électriquement. Les raboteuses sont également employées, surtout pour des surfaces moins importantes; elles sont guidées par laser ou par GPS différentiel.



3.9 Émissions de poussières – Les remèdes

Au cours des phases d'épandage d'un liant pulvérulent et de malaxage en place (accessoirement de celle de remplissage de silo), des émissions de poussières de liant peuvent se produire, créant des nuisances pour l'environnement et les riverains. Le problème est évidemment plus aigu en zone urbaine ou péri-urbaine. Afin de réduire sensiblement ces nuisances, plusieurs mesures sont applicables.

3.9.1 - Prévention et précautions lors des opérations

Elles sont essentiellement guidées par le bon sens, par exemple :

- veiller au bon état des raccords, mise en place de filtres, éviter les débordements au remplissage, etc. ;
- caréner la zone de chute des épandeurs par des jupes jusqu’au sol ;
- ne pas épandre, ni malaxer par grand vent ;
- installer un système autonome ou directement intégré à l’épandeur permettant de réduire l’émission de poussières lors de l’approvisionnement du liant dans l’épandeur.



3.9.2 - Emploi d’un liant à émissions de poussières limitées



Les fabricants ont mis au point des liants hydrauliques routiers et des chaux n’émettant que très peu de poussières lorsqu’ils sont épandus et malaxés. Cette propriété est obtenue par incorporation d’ajout(s) spécifique(s) dans le liant lors de sa fabrication. Les produits correspondants font l’objet de notices techniques des fabricants.

3.9.3 - Utilisation de liant sous forme de suspension

Le liant est mis en suspension dans l’eau par un matériel spécial présent sur le chantier. Il est ensuite injecté directement dans la chambre de malaxage. Seuls quelques pulvimalaxeurs offrent cette possibilité.

Traitement des sols pour remblais et fonds de déblais

**4.1 Objectifs des traitements de sol
en terrassements**

**4.2 Performances à obtenir après
traitement**

4.3 Consistance des études

**4.4 Commentaires sur quelques
traitements**

4.5 Exécution du traitement

**4.6 Effet du traitement de la PST
sur le dimensionnement**

4.1 Objectifs des traitements de sol en terrassements

Le recours au traitement avec un liant hydraulique est fréquent dans le cadre de travaux de terrassements. Il est prépondérant dès lors que l'on a affaire à des sols fins et argileux. Le traitement peut correspondre à différents objectifs.

4.1.1 - Permettre le déroulement du chantier

Dans certains cas, il s'agit tout simplement de rendre possible le passage des engins et camions dans des sols plastiques détrempés n'offrant plus aucune portance. Plus souvent, le traitement vise essentiellement à permettre la mise en œuvre des remblais.

Un autre objectif – majeur – du traitement est de réduire l'incidence d'aléas météorologiques pendant les terrassements, et en particulier d'allonger la saison de travail.



4.1.2 - Réutiliser au maximum les sols rencontrés

La réutilisation au maximum possible des sols provenant des déblais réduit le mouvement des terres et limite, voire supprime, le recours à des emprunts situés en dehors de l'emprise de l'ouvrage, ainsi que les mises en dépôt. Le bilan économique en est généralement amélioré. Le bilan environnemental l'est toujours, avec la réduction des distances de transport et la sauvegarde des superficies d'emprunt et de dépôt.

4.1.3 - Améliorer les caractéristiques géotechniques du sol

Les améliorations visées concernent une ou plusieurs des propriétés ci-après :

- augmentation de la portance de la partie supérieure des terrassements (PST), avec des effets bénéfiques pour la mise en œuvre de la couche de forme ou de fondation et pour la portance de la plate-forme (Pfi) (figure 3) ;

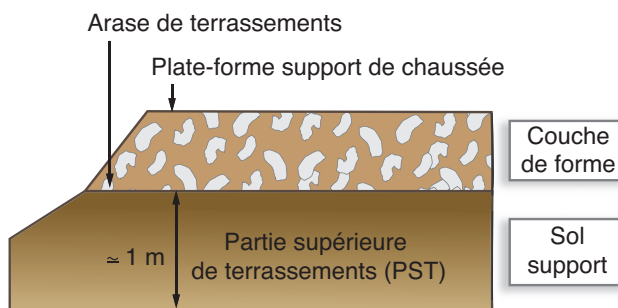


Figure 3: coupe type d'une plate-forme support de chaussée

- diminution de la perméabilité et/ou de la sensibilité à l'eau du sol, d'où :
 - diminution, voire annulation de la sensibilité au gel de la PST ;
 - protection des parties basses de remblai en zones inondables.

4.1.4 - Améliorer les caractéristiques géomécaniques du sol

Plusieurs cas « particuliers » peuvent justifier un traitement de sol, avec des objectifs divers :

- diminution, voire suppression des tassements dans un remblai de grande hauteur ;
- raidissement des pentes de talus du remblai, afin de réduire l'emprise de l'ouvrage ;
- amélioration de la stabilité de zones exigües difficiles à compacter, telles que remblais derrière culées d'ouvrage d'art, remblais de calage des buses, etc., via l'augmentation de la cohésion du sol amenée par le liant hydraulique.

4.2 Performances à obtenir après traitement

4.2.1 - À court terme (remblais)

Le critère décisif est la portance, que l'on caractérise par l'Indice Portant Immédiat (IPI). En règle générale, l'IPI est mesuré sur éprouvette à la teneur en eau naturelle, compactée avec l'énergie « Proctor Normal ». La prévision de ce que sera la teneur en eau *in situ* au moment du chantier est évidemment un point critique.

Le tableau 6 indique, pour les diverses classes de sol pouvant *a priori* se prêter à un traitement, les valeurs d'IPI en dessous desquelles un traitement est nécessaire et les niveaux d'IPI à obtenir [2].

Tableau 6 : niveaux de portance décisifs pour le traitement des sols à utiliser en remblais

Classes de sols	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁	A ₂ B ₆ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ C ₁ B ₆ C ₂ B ₆ R ₃₄	A ₃ C ₁ A ₃ C ₂ A ₃	B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄	B ₂ B ₅ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ C ₁ B ₅ C ₂ B ₅	R ₁₂	R ₁₃
Valeurs d'IPI en dessous desquelles un traitement est à envisager	8	5	3	15	12	15	10
Valeurs à obtenir sur le matériau traité	10 à 20	7 à 15	5 à 10	20 à 40	15 à 30	15 à 30	10 à 20
Valeurs au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)	15 à 25	10 à 20	8 à 15	30 à 50	20 à 40	25 à 35	15 à 25

• Sols fins (classe A)

Les sols A₁, A₂ et A₃ constituent la cible principale des traitements en terrassements. Les argiles très plastiques A₄ sont quasiment impossibles à manipuler et, sauf exception, la seule solution est de les mettre en dépôt.

• Sols sableux ou graveleux avec fines (classe B)

Les sables limoneux B₁, de même que les graves limoneuses B₃ ne nécessitent pas de traitement. Par contre, les sables légèrement argileux B₂, les graves légèrement

argileuses B₄ les sables et graves très limoneux B₅, les sables et graves moyennement à fortement argileux B₆ peuvent nécessiter un traitement pour pouvoir être réutilisés, selon leur teneur en eau in situ et, pour certains, leur argilosité.

• **Sols comportant des fines et des gros éléments (classe C)**

Les matériaux C₁ B₁, C₁ B₃, C₂ B₁ et C₂ B₃ sont généralement très peu sensibles à l'eau et sont utilisables sans traitement.

Les matériaux de classe C₂ contiennent une forte proportion d'éléments supérieurs à 20 mm, ce qui fait que la mesure d'IPI (qui s'effectue sur la fraction 0/20) est souvent peu représentative. Pour évaluer leur portance, il convient de pratiquer des essais à la plaque.

• **Sols insensibles à l'eau (classe D)**

Ces sols, sables et graves alluvionnaires propres, sont utilisables à l'état naturel. Il faut toutefois signaler que les sables fins et homométriques, tels que les sables de dunes, posent des problèmes de traficabilité et d'érodabilité. Il faut les recouvrir immédiatement après mise en œuvre pour éviter les désordres.

• **Matériaux rocheux (classe R)**

À l'intérieur de cette classe qui regroupe des matériaux très différents, seuls deux types de roches sont passibles d'un traitement au liant hydraulique pour utilisation en remblai.

– **Craies (R₁)**

La craie dense (R₁₁) est utilisable sans traitement. Les craies de densité moyenne (R₁₂) ou peu denses (R₁₃) demandent à être traitées dès qu'elles sont humides (état hydrique h).

– **Roches argileuses (R₃)**

Cette classe comprend des roches de nature et de stabilité très diverses (marnes, marnocalcaires, schistes non métamorphiques, argilites, pélites). Un critère essentiel vis-à-vis du besoin de traitement est leur fragmentabilité. Les roches argileuses classées « fragmentables » (R₃₄) peuvent nécessiter un traitement.



4.2.2 - À court terme (PST)

Rappelons que la PST (Partie Supérieure des Terrassements) correspond à l'épaisseur d'environ 1 m directement située sous la couche de forme ou de fondation. On attend de la PST :

- une portance suffisante et durable, y compris en présence de l'humidité ;
- un minimum d'homogénéité dans le profil en long ;
- de plus dans les régions où les hivers peuvent être rigoureux, une résistance aux cycles gel-dégel.

Là encore, l'objectif est un niveau de portance suffisant, avec deux indicateurs pris en compte. Le premier est l'IPI, pour lequel il faut obtenir environ 10 à 20 % de plus de ce qui est visé pour les remblais (cf. tableau 6) et, en tout cas, pas moins de 10 avec les plus mauvais sols. Le second est le *California Bearing Ratio* (CBR), traditionnellement mesuré sur la fraction 0/20 mm après 4 jours d'imbibition, pour lequel on exige :

$$\text{CBR}_{4j} \geq \text{IPI}$$

Le fait de satisfaire à cette condition constitue une garantie de tenue à l'eau correcte du sol traité formant la PST.



4.2.3 - À long terme (PST)

Le critère essentiel sera, *in fine*, le module de déformation élastique *in situ*. Celui-ci peut-être mesuré par des essais à la plaque ou à la Dynaplaque, ou bien déduit de mesures de déflexions à condition que les mesures soient effectuées sur un matériau dont l'état hydrique est représentatif. Sinon, il faut se référer à des résultats d'essais de laboratoire. En laboratoire, le module peut être évalué, au moins approximativement, à partir de divers essais (CBR ou compression simple, ce dernier sur matériau traité uniquement). Le tableau 7 indique les classes de portance au niveau de l'arase de terrassements (AR), c'est-à-dire de la surface de la PST.

Tableau 7: classes de portance à long terme au niveau de l'arase de terrassements (surface de la PST)

Module (MPa)	20	50	120	200	
Classe de l'arase	AR0	AR1	AR2	AR3	AR4

Nota

La classe AR0 n'est pas acceptable. Elle correspond à des sols A, B₂, B₄, B₅, B₆ ou C₁ très humides (zones marécageuses ou inondables). Il est indispensable soit de purger les mauvais sols et de les remplacer par des matériaux insensibles à l'eau, soit d'éliminer l'eau par drainage ou rabattement de nappe. L'objectif étant d'aboutir au minimum à la classe AR1.

Pour les chantiers autoroutiers, SCETAUROUTE (EGIS) a créé deux classes d'arases intermédiaires: AR12 (40-80 MPa) et AR23 (100-120 MPa). Ces classes correspondent à des cas fréquemment rencontrés et donnent lieu à des spécifications visant à obtenir une classe de plate-forme plus élevée [4] [5].

Dans les régions froides, la protection de l'ouvrage vis-à-vis du gel peut être un facteur déterminant et justifier un traitement aux liants hydrauliques.

4.2.4 - Cas particuliers

Dans le cas où l'on recherche essentiellement une bonne tenue à l'eau (zones inondables par exemple), l'indicateur pourra être soit un niveau d'imperméabilité (par exemple $k < 10^{-5}$ cm/s), soit un rapport résistance après immersion sur résistance à sec. Le traitement aux liants hydrauliques est, de ce point de vue, très bénéfique car un de ses effets est l'obturation des capillaires.

Pour les autres cas, où l'on vise à augmenter la cohésion du sol, afin de pallier une insuffisance de compactage en zone d'accès difficile et/ou à diminuer la poussée contre un ouvrage, ou encore de raidir la pente de talus, l'objectif est généralement une résistance à la compression R_c du sol traité. Voici quelques valeurs cibles à titre d'exemple :

- remblaiement de zones difficiles d'accès :
 $R_c > 0,5$ MPa après 14 jours à l'air + 14 jours dans l'eau ;
- remblai de grande hauteur, partie basse baignant dans l'eau :
 $R_c > 1$ MPa après 14 jours à l'air + 14 jours dans l'eau ;
- raidissement de pente de talus (x et y fonctions de la géométrie de l'ouvrage) :
 $(R_c)_{2j} > x$ (pour se dispenser de tout coffrage) ;
 $(R_c)_{28j} > y$ (pour stabilité à terme).

4.3 Consistance des études

4.3.1 - (Ré)utilisation en remblai

La finalisation d'un projet de terrassements avec traitement de sols passe par plusieurs phases d'étude : étude préliminaire, avant-projet, projet, étape finale d'ajustement (cette dernière pouvant comporter des expérimentations de chantier). Ce déroulement comprend un volet géotechnique d'une part, un volet économique d'autre part. L'impact environnemental est, de plus, évalué systématiquement dans les grands projets.

L'étude économique consiste à affiner progressivement l'évaluation des coûts, au fur et à mesure que la définition technique des solutions possibles se précise. Elle comprend, dans certains cas, la comparaison entre la solution « traitement » et une ou plusieurs solutions alternatives.

L'étude géotechnique comporte les étapes ci-après.

■ 4.3.1.1 - Reconnaissance et caractérisation des sols à (ré)utiliser

Sur le terrain, il s'agit de déterminer par sondages ou tranchées et reconnaissance

visuelle le positionnement des divers types de sols en place (en déblais ou emprunts). Les échantillons de sols représentatifs sont identifiés de manière complète.

a) Sols proprement dits :

- granulométrie ;
- argilosité (valeur au bleu, limites d'Atterberg ou équivalent de sable) ;
- caractéristiques de compactage Proctor Normal ;
- état hydrique: teneur en eau naturelle w_n ;
 - que l'on rapporte à l'Optimum Proctor Normal w_{OPN} pour caractériser les états secs (s) et très secs (ts),
 - que l'on positionne par rapport aux limites d'Atterberg dans le cas des sols fins plastiques par le biais de l'indice de consistance $I_c = \frac{(w_l - w_n)}{I_p}$ pour les 5 états (th), (h), (m), (s) et (ts) ;
- indice portant immédiat (IPI), c'est-à-dire indice CBR immédiat mesuré sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal et à sa teneur en eau naturelle ;
- de plus, si le sol contient une forte proportion d'éléments grossiers : Los Angeles (LA) et Micro-Deval en présence d'eau (MDE) ;
- s'il contient une fraction sableuse importante : coefficient de friabilité des sables (FS).

b) Matériaux rocheux (classe R)

- Craies :
 - masse volumique sèche ρ_d ;
 - teneur en eau naturelle w_n ;
 - caractéristique de compactage Proctor Normal ;
 - IPI.
- Roches argileuses :
 - masse volumique ρ_d ;
 - coefficient de fragmentabilité FR ;
 - coefficient de dégradabilité DG ;
 - teneur en eau naturelle (si très fragmentable) ;
 - paramètres de compactage (laboratoire ou chantier expérimental).
- Autres matériaux rocheux :
 - LA, MDE,
 - si fragmentable : coefficient FR (cas des roches altérées ou mal cimentées),
 - si très fragmentable : paramètres de compactage.

c) Tous matériaux

Si la présence de sels solubles est avérée ou soupçonnée, ils sont identifiés et dosés. On rappelle que les sels solubles ont généralement une forte influence sur la cinétique et le développement de la prise d'un liant hydraulique. Dans certaines régions, le plus grand danger est représenté par les sulfates, susceptibles de provoquer des gonflements.

Il convient également de vérifier que le sol ne contient pas de matières organiques en quantité pouvant perturber son traitement.

d) Vérification de l'aptitude du sol au traitement

Sauf si la solution prévue est déjà éprouvée, il convient de vérifier l'aptitude du sol au traitement avec le liant *a priori* choisi. Cette aptitude peut être établie simplement par l'essai de gonflement volumique accéléré, le maximum admissible étant de 10 %.

■ 4.3.1.2 - Évaluation des probabilités météorologiques et de leurs conséquences possibles sur le chantier

En se basant sur les données météorologiques connues pour la région et la période prévue pour le chantier, il est indispensable de prendre en compte les différents épisodes plausibles (pluies, gel/dégel, périodes sèches, etc.).

Cette démarche doit permettre :

- de caler au mieux les dates des différentes phases du chantier ;
- d'estimer les variations probables de l'état hydrique du ou des sols.

Bien entendu, on n'est pas ici dans le cas d'une science exacte et il peut y avoir des surprises, bonnes ou mauvaises. En tout état de cause, l'expérience locale en matière de terrassements et de traitement sera précieuse pour optimiser les prévisions et définir les mesures à prendre, y compris si le pire venait à se produire.

■ 4.3.1.3 - Étude de formulation

• Choix du (ou des) liant(s)

Deux considérations guident *a priori* ce choix. La première est la prédiction, par l'expérience antérieure et par les tests sur échantillons de sol, des états hydriques que le sol va présenter et de la consistance qu'il aura. L'humidité maximale à laquelle on peut s'attendre influe beaucoup sur le choix du type de traitement (simple ou double).

Le deuxième facteur déterminant est d'ordre économique. Il s'agit de minimiser la distance de transport du liant. D'autant plus que les LHR ont été mis au point pour convenir au mieux avec les matériaux locaux.

• Détermination des dosages en liant à appliquer

L'étude consiste à mesurer l'indice portant immédiat (IPI) sur des mélanges à différents dosages en liant, ceci pour plusieurs teneurs en eau possibles au moment du chantier. Il est commode de présenter les résultats sous forme d'abaques, dont un exemple est illustré par la figure 4. Si nécessaire, l'étude se base également sur des essais CBR (cf. 4.2.2).

Évolution de l'indice portant immédiat (IPI) en fonction du dosage en LHR pour différentes teneurs en eau du sol

Dosages en LHR nécessaires pour obtenir un indice portant immédiat (IPI) de 5, 10, ou 15 en fonction des teneurs en eau du sol (sans tenir compte de l'évaporation produite au malaxage)

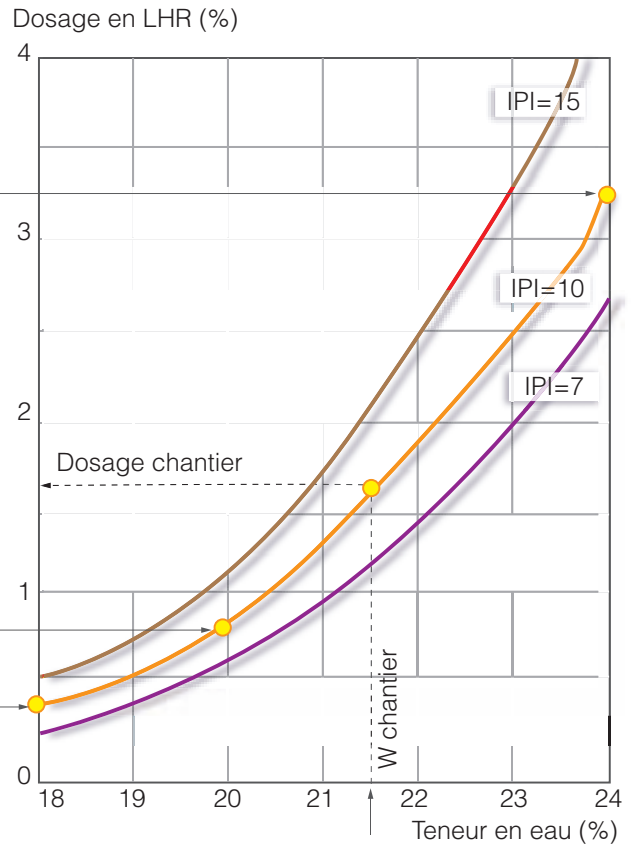
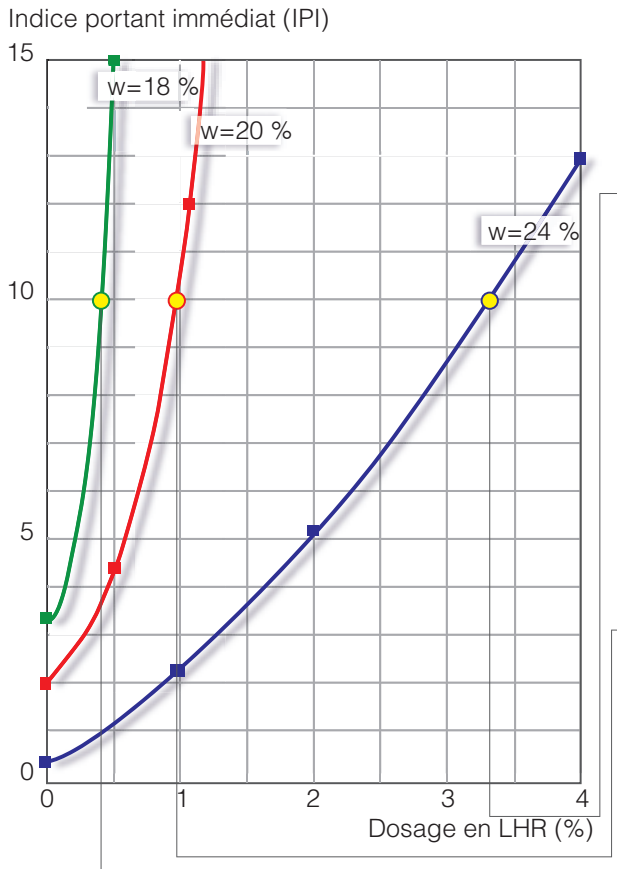


Figure 4: exemple de présentation des résultats d'une étude de formulation de traitement d'un sol pour réutilisation en remblai.

En se basant sur ces résultats, il est possible de choisir un dosage en liant nominal, correspondant à l'état hydrique escompté au moment du chantier et garantissant une portance suffisante. Si la teneur en eau réellement constatée est différente, le dosage en liant est modifié conformément aux abaques.

Un point important dont il faut tenir compte est la dispersion des caractéristiques du sol. Si certains sols sont homogènes (par exemple limons de plateau, craies), d'autres sont franchement hétérogènes. Il importe donc de disposer d'échantillons représentatifs de la formation à traiter, de manière à obtenir un minimum de portance partout, y compris dans les zones les moins bonnes.

On tiendra compte aussi de la dispersion du dosage en liants inhérente aux méthodes et matériels d'épandage et de malaxage.

4.3.2 - (Ré)utilisation en PST

Les étapes « Reconnaissance et caractérisation des sols » (cf. 4.3.1.1) et « Évaluation des probabilités météorologiques » (cf. 4.3.1.2) concernent évidemment aussi les sols destinés à la PST.

Dans toute la mesure du possible, on s'efforcera de sélectionner les sols de PST et, si nécessaire, de réduire leur hétérogénéité. Dans certains cas cela se fait par mise en dépôt provisoire. Pour certains fonds de déblais, on peut être conduit à enlever le sol en place et à lui substituer un meilleur sol. En pratique, ces opérations ne sont pas souvent réalisables économiquement et la solution est fréquemment le traitement en place.

■ 4.3.2.1 - Étude des performances à court terme

L'étude est avant tout basée sur des mesures d'IPI, comme décrit ci-dessus au 4.3.1.3. Comme indiqué précédemment, la valeur minimale d'IPI à obtenir est de 10, afin d'assurer une traficabilité correcte pour la suite du chantier.

Les évaluations d'IPI sont complétées par des mesures de CBR après immersion pour s'assurer de la résistance à l'eau du sol traité.

■ 4.3.2.2 - Module élastique (E)

Le module à la surface de l'arase de terrassements (cf. tableau 7) est un impératif supplémentaire guidant la formulation.

Le projeteur peut se trouver en face de cas divers.

a) Le sol traité est un matériau déjà connu, dont le module a été mesuré *in situ*. On peut se borner à des vérifications succinctes.

b) Le traitement étudié n'a pas été testé en place. Le module du matériau traité doit alors être soit mesuré, soit estimé à partir d'essais de laboratoires. Diverses méthodes existent par exemple :

- mesure d'un module dynamique par transmission d'impulsion ;
- calcul du module tangent à partir de la pente contrainte-déformation d'essais mécaniques (compression, fendage, éventuellement traction).

Pour les chantiers de faible importance, on se contente parfois d'une évaluation de **l'ordre de grandeur** du module à l'aide de relations empiriques à partir de la résistance de compression simple R_c , voire même du CBR (sont citées des relations du style $E_{\text{statique}} \text{ (MPa)} \approx 5 \text{ CBR}$ pour des sols fins).

En tout état de cause, tant les mesures en laboratoire que les estimations à partir d'une autre caractéristique nécessitent *in fine* un calage avec la mesure en place. Il faut, de plus, réaliser les essais de laboratoire sur des éprouvettes suffisamment âgées pour que le ou les liant(s) ai(en)t produit l'essentiel de leur effet de rigidification (idem pour les essais *in situ*).

■ 4.3.2.3 - Résistance au gel

Selon le climat régional, le type et l'épaisseur de la chaussée à venir, la période de terrassements, l'exposition locale de l'ouvrage, etc., la résistance du sol traité aux cycles gel-dégel peut devenir un facteur clé de la formulation (figure 5). L'essai de référence est celui de gonflement au gel (norme NF P 98-234.2). En utilisant la pente P de la courbe gonflement (exprimée en mm) en fonction de l'indice de gel [exprimé en $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{h})^{1/2}$], on visera :

- $P < 0,05$ (matériau non gélif SG_n) pour un site extrêmement exposé ;
- $0,05 < P < 0,40$ (matériau peu gélif) pour un site exposé.

Toutefois, l'essai de gonflement au gel étant relativement lourd et long, on se contente le plus souvent de mesurer la résistance en compression simple R_c que l'on situe par rapport au minimum empirique de 2,5 MPa.

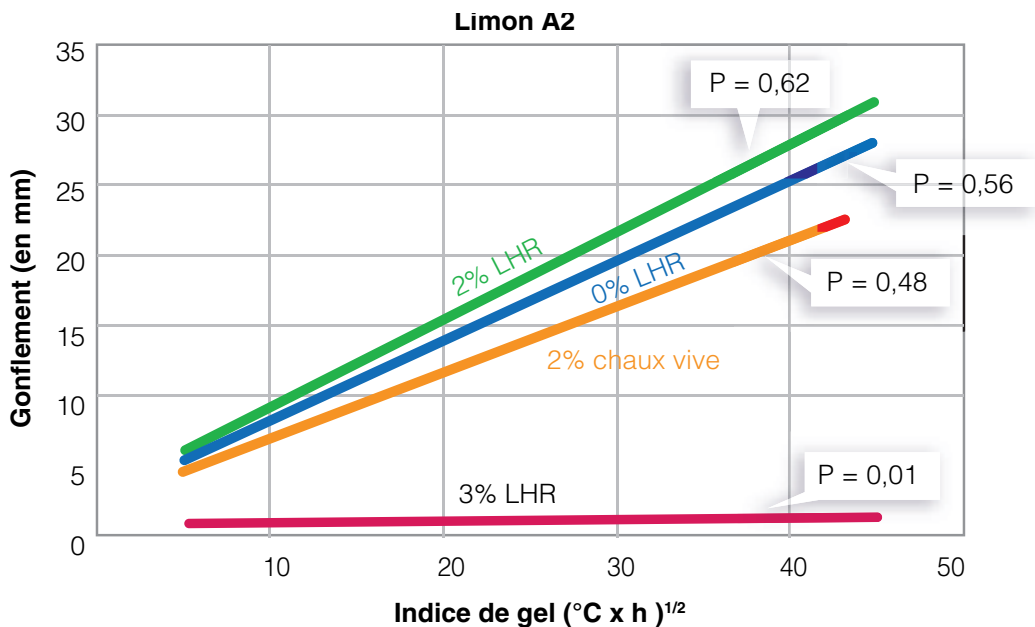


Figure 5: exemple d'amélioration du comportement au gel d'un limon traité au LHR.

■ 4.3.2.4 - Détermination du (des) dosage(s)

Au final, l'ensemble des études ci-dessus conduit à fixer le dosage en liant nécessaire et suffisant. Comme indiqué au 4.3.1.3, ce dosage « nominal » est assorti de possibilités de variations permettant de coller au mieux aux conditions réelles du chantier, état hydrique en particulier.

4.3.3 - Cas particuliers

Outre les phases incontournables de reconnaissance et d'identification des sols, on se fonde essentiellement sur le niveau de résistance mécanique à moyen terme pour déterminer le(s) dosage(s) en liant(s), l'indicateur fréquemment retenu étant la résistance à la compression simple R_c (cf. 4.2.4). Pour le cas particulier où l'on veut éviter l'imbibition et couper les entrées capillaires, l'étude est basée sur la réalisation d'essais au perméamètre.

4.3.4 - Niveaux d'étude

Pour les petits chantiers dans un environnement connu, l'étude du traitement peut s'effectuer en une seule étape. Par contre, pour les grands chantiers, l'établissement du projet final passe par plusieurs phases que le ou les études de traitement(s) accompagnent en s'affinant progressivement. Le tableau BII du GTS [2] décrit les différents niveaux d'étude.

4.4 Commentaires sur quelques traitements

Vu la très grande diversité des sols que l'on peut rencontrer, il n'est pas possible de donner des règles générales de dosage en liant. Voici simplement quelques exemples concernant des sols bien définis, abondants régionalement.

• **Limons argileux (A₂)**

En remblai, le dosage en chaux vive va de 1 à 3 %, selon l'état hydrique. Alternativement, les limons de cette classe peuvent être rendus utilisables avec 1 à 3 % de LHR pour travaux de terrassements, moins cher que la chaux.

En PST, si l'on veut atteindre un haut niveau de portance ou si la protection vis-à-vis du gel l'exige, ces sols peuvent recevoir un double traitement : 1 à 2 % de chaux, puis 3 à 4 % de ciment ou LHR. Un simple traitement au LHR spécifique constitue une alternative intéressante, simplificatrice et économique.



• **Craies (R₁)**

Les craies R₁₂ (h) sont couramment traitées aux environs de 2 % de chaux en construction de remblai. Le traitement de craie à la chaux mobilise la réaction dite de « syntaxie » [2]. Ces mêmes craies sont de plus en plus souvent traitées à peu près aux mêmes dosages avec un LHR adapté, moins cher que la chaux et conduisant à des performances mécaniques plus élevées.

En PST, ce même type de craies traité avec 3 à 4 % de LHR adapté procure une arase de terrassements parfois AR1, souvent AR2.

4.5 Exécution du traitement

Le traitement de sol pour remblais et PST s'effectue en place.

4.5.1 - Matériels

Pour les corps de remblai, les charrues à disques ou à socs sont largement employées. À cela deux raisons principales :

- attelées à un puissant tracteur sur chenilles, elles sont à même d'opérer dans des sols très peu portants ;
- elles sont capables de malaxer des sols contenant des blocs, de dimensions allant jusqu'à 250 mm pour les charrues à disques, 350 mm (voire 400) pour les charrues à socs.

Pour la partie supérieure des terrassements, l'emploi de pulvimalaxeurs puissants s'impose. En effet, ces engins assurent une mouture plus fine et une répartition du liant plus homogène que les charrues, ainsi qu'un meilleur contrôle de l'épaisseur traitée. Toutefois, les pulvimalaxeurs ne peuvent guère travailler dans des matériaux contenant des gros éléments dépassant 100-120 mm, auquel cas il faut s'en tenir aux charrues.



4.5.2 - Méthodes d'exécution du traitement

■ 4.5.2.1 - Traitement en déblai (ou en emprunt)

Le traitement ou prétraitement en déblai présente l'avantage d'améliorer la trafiquabilité dans le déblai.

Le traitement, ou au moins sa première phase, est effectué sur place ; le matériau traité ou prétraité est ensuite repris, transporté et épandu en couches régulières pour constituer le remblai. Cette méthode permet d'optimiser les opérations, en combinant :

- en déblai ou emprunt, scarification/évaporation(ou arrosage), prétraitement à la chaux ou traitement complet ;
- en remblai, éventuellement la deuxième phase de traitement, réglage et compactage.



Le prétraitement est parfois réalisé directement à la décapeuse-autochargeuse, en particulier avec un matériau graveleux limoneux.

Une méthode de reprise bien choisie améliore la qualité du malaxage. C'est le cas de la reprise à la décapeuse-autochargeuse après passage de charrue(s).

Par ailleurs, on a parfois recours à la méthode du dépôt-reprise pour le traitement de sols contenant des gros éléments (jusqu'à 350 mm environ). Le liant (chaux ou LHR) est épandu au dosage visé sur le sol à excaver, qui est enlevé à la pelle et

mis en dépôt provisoire en formant un tas constitué par couches horizontales. Le tas est souvent repris par extraction frontale ce qui assure une certaine homogénéisation avant la construction du remblai.

Signalons au passage que des méthodes de terrassements et traitement spécifiques ont été mises au point pour certains matériaux, la craie par exemple [6].

■ 4.5.2.2 - Traitement sur le remblai

Cette méthode offre l'intérêt de pouvoir limiter le volume de sol à traiter. En effet, l'ensemble des opérations d'excavation, chargement, transport et épandage est susceptible d'assécher quelque peu un sol légèrement trop humide et, parfois, de réaliser un mélange de sol bénéfique. Au vu du comportement en remblai (profondeur d'ornières), du comportement sous charge (matelassage ou non) ou de mesures *in situ* (teneur en eau, IPI, module), on peut délimiter avec précision les zones nécessitant un traitement et ne traiter qu'elles.

4.5.3 - Compactage

Les engins et les règles de compactage sont codifiés de manière très détaillée dans le Guide technique GTR et ses annexes [1]. Seuls quelques commentaires sont donc présentés ici.

Rappelons que l'objectif de densification exigé normalement pour les remblais (et fonds de déblai) est q4, à savoir :

- **masse volumique apparente sèche moyenne $(\rho_d)_m$ pour l'ensemble de la couche supérieure ou égale à 95 % de la masse volumique apparente sèche maximale OPN : $(\rho_d)_m \geq 95 \% (\rho_d)_{OPN}$;**
- **masse volumique apparente sèche en fond de couche $(\rho_d)_{fc}$ supérieure ou égale à 92 % de la masse volumique apparente sèche maximale OPN : $(\rho_d)_{fc} \geq 92 \% (\rho_d)_{OPN}$.**

On considère que le « fond de couche » correspond aux 8-10 cm inférieurs.

Le précompactage avant malaxage en place est une opération indispensable, qui permet à l'épandeur et à l'engin de malaxage de rouler sur une surface régulière, donc de maîtriser dosage et épaisseur traitée.



Le feuilletage des sols fins plus ou moins cohésifs (sables, limons, argiles, craies, etc.) est un phénomène très préjudiciable à la tenue finale. Pour s'en affranchir, on se résout parfois à venir enlever la croûte superficielle désolidarisée de la masse du sol. On peut aussi l'éviter lors du compactage en utilisant des rouleaux à pieds dameurs, statiques ou vibrants, puis en limitant l'utilisation des compacteurs vibrants et en privilégiant les compacteurs à pneus.

Toujours avec les sols fins cohésifs, les compacteurs à pneus ont un effet de pétrissage bénéfique. Accessoirement, ils sont utiles pour détecter les zones de maelassage (à purger, aérer ou traiter).

4.5.4 - Importance de la maîtrise de la teneur en eau

L'excès d'humidité dans un sol est un souci majeur et c'est une des raisons conduisant à son traitement. À l'inverse, il faut prendre toutes les mesures nécessaires pour éviter un déficit d'eau dans un sol traité, d'abord pour favoriser son compactage, ensuite pour permettre aux réactions hydrauliques de se développer complètement afin que la couche traitée atteigne les performances visées.

À cet égard, il faut être conscient de la difficulté d'assurer une humidification complète et homogène dans un matériau très peu perméable, comme un sol argileux ou très limoneux. Un simple arrosage sur la surface fermée d'un sol fin aboutira à beaucoup de ruissellement superficiel et à une faible pénétration dans les fissures ou ornières. Il est donc impératif soit de bien scarifier le sol avant l'arrosage, soit, mieux, d'arroser par enfouissement. Soulignons au passage qu'il faut aussi disposer d'un stockage d'eau et de matériels d'arrosage de capacité suffisante.

4.5.5 - Importance du drainage

Qu'il y ait traitement ou non, la mise en place d'un bon drainage est une mesure nécessaire et efficace pour combattre les excès d'eau. Les dispositions constructives ressortent largement du bon sens: aménagement de cunettes ou fossés, exutoires aux points bas, etc.

4.6 Effet du traitement de la PST sur le dimensionnement

Le module de la PST influe directement sur le niveau de portance non seulement de l'arase de terrassements, mais aussi de la plate-forme supportant la chaussée. La réflexion concernant le dimensionnement de l'ouvrage doit donc démarrer dès le stade des terrassements. Un supplément de performance mécanique à long terme pour la PST ne représente pas nécessairement un supplément de coût important, mais il peut amener une économie substantielle pour les couches de formes ou d'assises. Un dosage de liant un peu plus élevé peut ainsi s'avérer globalement bénéfique pour l'économie du projet.

Traitement des sols pour couche de forme

5.1 Plate-forme et couche de forme

5.2 Matériaux de couche de forme traitée

5.3 Consistance des études

5.4 Commentaires sur quelques traitements pour couche de forme

5.5 Dimensionnement des couches de forme traitées

5.6 Réalisation des couches de forme traitées

5.1 Plate-forme et couche de forme

Rappelons qu'une chaussée est construite sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussées (« plate-forme » en abrégé) qui comprend (figure 6) :

- le sol support (déblai ou remblai), appelé partie supérieure des terrassements (PST) sur environ 1 m et dont la surface constitue l'arase de terrassements,
- une couche de forme (CdF) éventuelle.

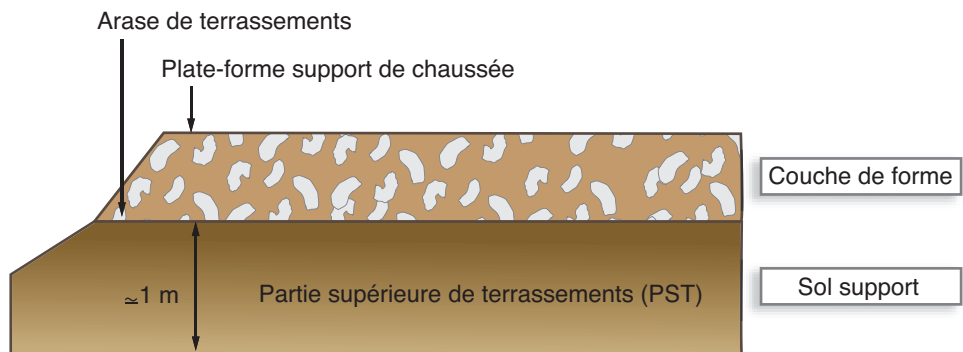


Figure 6 : coupe type d'une plate-forme support de chaussée



5.1.1 - Exigences concernant la plate-forme

À court terme (au cours du chantier), la plate-forme doit satisfaire aux exigences de :

- **traficabilité** pour la circulation des engins construisant la chaussée ;
- **nivellement**, pour assurer la régularité des couches de chaussée et l'uni final ;
- **portance** pour un compactage satisfaisant des couches d'assises (module ou déflexion) ;
- **tenue au gel**, si nécessaire.



Les chiffres spécifiés dépendent de l'importance de l'ouvrage à construire, des types de matériaux (traités ou non) et, dans une certaine mesure, des conditions d'exécution. Ainsi les spécifications **a minima** sont fréquemment :

- Petits chantiers (faible trafic) :
 - module EV_2 à la plaque ou équivalent Dynaplaque ≥ 30 MPa ;
 - ou déflexion sous essieu de $130 \text{ kN} \leq 400 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$.
- Chantiers courants :
 - tolérance de nivellement de la plate-forme : +/- 3 cm par rapport à la ligne rouge des terrassements ;
 - module $EV_2 \geq 50$ MPa ou
 - déflexion $\leq 200 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ avec matériaux non traités ;
 - déflexion $\leq 100 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ avec matériaux traités.

- Grands chantiers (autoroutes, pistes aéronautiques, etc.):
 - tolérance de nivellement : +/- 2 cm
 - modules EV2 ≥ 80 MPa
 - déflexion $\leq 150 \cdot 10^{-2}$ mm avec matériaux non traités
 - déflexion $\leq 70 \cdot 10^{-2}$ mm avec matériaux traités

À long terme, la plate-forme est caractérisée par une classe de portance, dont les caractéristiques mécaniques résultent de la combinaison de celles de la PST et de l'éventuelle couche de forme. La résistance au gel est également prise en compte pour le comportement à long terme.

5.1.2 - Justifications et rôles d'une couche de forme

Les objectifs d'une couche de forme sont de deux ordres : ceux correspondant à la phase de construction de la chaussée (donc à court terme) et ceux liés au comportement de l'ouvrage en service (donc à long terme).

À court terme, on demande à une couche de forme d'assurer :

- **un nivellement** convenable de la plate-forme, permettant de mettre en œuvre la couche d'assises sus-jacente conformément aux tolérances d'épaisseurs spécifiées ;
- la protection du sol support (PST) vis-à-vis des intempéries, **gel précoce inclus** ;
- une traficabilité satisfaisante pour les engins et camions lors de la construction de la couche d'assises sus-jacente.

À long terme, les rôles d'une couche de forme sont :

- l'homogénéisation de la portance du support ;
- une amélioration de la portance de la plate-forme, contribuant à minimiser le coût de l'ensemble couche de forme-structure de chaussée ;
- dans le cas de sols sensibles à l'eau, le maintien de cette portance en toutes saisons ;
- la protection du sol-support vis-à-vis du gel, si nécessaire.

Parfois, la couche de forme peut aussi être conçue de manière à participer au drainage d'ensemble de la chaussée.

5.1.3 - Classes de portance à long terme des plates-formes

Le critère de classement est le module de déformation réversible (module d'Young) caractérisant l'ensemble PST + couche de forme éventuelle, assimilée à un massif unique. Ce paramètre sera utilisé dans la modélisation et le dimensionnement. On distingue 4 classes de plate-forme (tableau 8).

Tableau 8 : classes de portance à long terme des plates-formes

Module élastique (MPa)	20	50	120	200
Classe de plate-forme	PF1	PF2	PF3	PF4

Le module à long terme ci-dessus peut être assimilé au module à court terme, EV2 mesuré par essais de plaque ou équivalent à la Dynaplaque ou par déflexion, à la condition express que les mesures *in situ* soient effectuées sur des matériaux dont l'état est analogue (ou très voisin) à leur état à long terme, sous chaussée. Cette condition concerne deux aspects.

- **L'état hydrique du sol :** si les mesures ne peuvent être réalisées sur matériaux ayant l'état hydrique escompté à long terme, on extrapole le module à long terme à partir d'essais de laboratoire pratiqués à différentes teneurs en eau (CBR par exemple). Ceci ne concerne que les sols sensibles à l'eau.
- **Le degré de rigidification apporté par le liant :** si le sol a été traité à la chaux seule, pour raison d'humidité excessive, les mesures de module à court terme peuvent constituer une évaluation *a minima* du niveau de module à long terme. En revanche, si le sol a été traité avec un liant hydraulique produisant une nette rigidification à terme, il est indispensable de s'appuyer sur une étude de laboratoire donnant l'allure de l'accroissement du module en fonction du temps (voir en particulier 5.3.3).



5.2 Matériaux de couche de forme traitée

5.2.1 Critères de sélections *a priori*

Quel que soit le type de couche de forme, traitée ou non, les sols la constituant doivent présenter :

- une faible dispersion de leurs caractéristiques afin d’aboutir à une plate-forme assez homogène ;
- une dimension maximale des plus gros éléments compatible avec les exigences de nivellement et de mise en œuvre.

Pour une couche de forme traitée, l’homogénéité du gisement de sol potentiel s’évalue par la dispersion de la densité maximale Proctor Normale $(\rho_d)_{OPN}$. Le tableau 9 (extrait du GTS [2]) précise les utilisations possibles en fonction de la dispersion observée.

Tableau 9 : utilisation possible des sols traités en couche de forme en fonction de leur homogénéité	
Dispersion* de la densité sèche $(\rho_d)_{OPN}$	Utilisation possible du matériau traité
$\leq 4 \%$	Niveau d’homogénéité excellent mais qu’il n’est pas justifié, sauf exception, d’exiger pour une couche de forme.
$\leq 6 \%$	Matériau homogène pouvant être utilisé après traitement dans tous types de couches de forme et notamment dans les structures « couches de forme – assises de chaussées »
$\leq 8 \%$	Matériau moyennement homogène pouvant être utilisé dans la majorité des couches de forme en sol traité, à l’exception du cas évoqué ci-dessus.
$\leq 10 \%$	Matériau relativement hétérogène dont l’emploi en couche de forme traitée est à réserver aux chantiers moyens et petits dans lesquels la classe de plate-forme est limitée à PF ₃ .

* La dispersion est exprimée par :

- le rapport entre l’étendue des mesures et la moyenne de ces mesures si leur nombre $N \leq 10$;
- le rapport entre deux fois l’écart type et la moyenne de ces mesures si leur nombre $N > 10$.

La dimension maximale admissible dépend du mode de malaxage :

- maximum 100 mm (de préférence 80 mm) pour un malaxage en place au pulvimalaxeur ;
- 50 mm pour un malaxage en centrale.

Si la proportion d’éléments plus grossiers n’est pas trop élevée, le matériau peut être préparé par criblage préalable, surtout pour un malaxage en centrale.

5.2.2 - Distinction entre sols améliorés et sols stabilisés

Il est fondamental de faire la distinction entre deux types, ou plutôt niveaux, de traitement.

Le premier correspond à une simple **amélioration** des caractéristiques géotechniques du sol (diminution de la teneur en eau, augmentation de la portance, diminution de la sensibilité à l'eau, etc.) sans transformer radicalement le comportement qui reste celui d'un sol. L'amélioration n'aboutit pas à créer un matériau de type semi-rigide, même s'il peut y avoir à long terme un accroissement non négligeable du module. Les critères de dimensionnement applicables à un sol amélioré par traitement restent ceux applicables à un sol non traité (voir 5.6).

Le second, que l'on peut dénommer **stabilisation**, confère au sol traité un module élastique d'un niveau tel qu'il se comporte, à long terme, comme un matériau semi-rigide, auquel il convient dès lors d'appliquer les critères correspondants (voir 5.6).

Schématiquement, les améliorations correspondent à des traitements à la chaux seule visant essentiellement à l'utilisation de sols trop humides et à l'accroissement de la portance immédiate. Les stabilisations correspondent à la plupart des traitements au ciment ou au LHR, qui produisent une élévation sensible du module à long terme.

Les doubles traitements (chaux puis ciment ou LHR) conduisent le plus souvent au niveau « stabilisation » et parfois au niveau « amélioration ». Le traitement aux LHR spécifiques au double traitement, dont certains sont à base de clinker et de chaux, conduit à l'un ou l'autre niveau de traitement. Le résultat est donné par l'étude spécifique des propriétés à long terme.

Nota

Cette distinction entre amélioration et stabilisation est pratiquée depuis des décennies pour les chaussées dans les pays tropicaux et désertiques aussi bien dans les pays anglophones que dans les pays francophones [7]

5.2.3 - Performances à obtenir après traitement

■ 5.2.3.1 - Spécifications communes

• Aptitude du sol au traitement

Le mélange sol + liant(s) sélectionné(s) doit satisfaire aux critères du tableau 10 lorsque soumis à l'essai d'aptitude selon la norme NF P 94-100.

Tableau 10: critères pour décider de l'aptitude d'un sol au traitement au ciment ou à la chaux

Type de traitement	Aptitude du sol	Gonflement volumique G_v (%)	Résistance à la compression diamétrale R_{tb} (MPa) après 7 J d'immersion à 40 °C
Liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Apte	≤ 5	≥ 0,2
	Douteux	5 à 10	0,1 à 0,2
	Inapte	≥ 10	≤ 0,1
Chaux seule	Apte	≤ 5	Paramètre non pertinent (lenteur de la prise pouzzolanique)
	Douteux	5 à 10	
	Inapte	≥ 10	

Les critères de résistance ci-dessus sont valables pour les ciments. Avec certains LHR, le seuil de 0,2 MPa peut ne pas être atteint à 7 jours, alors que le sol traité est satisfaisant. Une étude spécifique est alors nécessaire.

• **Portance immédiate**

La portance à obtenir à la mise en œuvre est logiquement plus élevée que celle que l'on demande en PST (tableau 11).

Tableau 11: indice portant immédiat (IPI) minimum à obtenir à la mise en œuvre d'une couche de forme traitée

Classes de sols	A_1 $C_1 A_1$ B_5 $C_1 B_5$	A_2 $C_1 A_2$ B_6 $C_1 B_6$	A_3 $C_1 A_3$	Autres classes
IPI minimum	20	15	10	Selon expérience ou étude spécifique

Les essais de poinçonnement sont conduits sur éprouvettes compactées avec l'énergie Proctor Normal et à la teneur en eau maximale prévisible.

■ **5.2.3.2 - Performances à viser pour les sols améliorés**

• **À court terme: tenue à l'immersion**

Le test de référence est le CBR après 4 jours d'immersion, sur éprouvettes compactées à l'énergie Proctor Normal et aux 2 valeurs de teneur en eau délimitant la plage autorisant une mise en œuvre convenable. Deux conditions doivent être satisfaites:

$$CBR_{4J} \geq 20 \quad \text{et} \quad \frac{CBR_{4J}}{IPI} \geq 1$$

Nota

L'essai CBR est pertinent pour les sols améliorés (traitement à la chaux seule ou avec certains LHR). Il peut perdre toute signification pour un sol stabilisé ayant développé une rigidité appréciable à l'échéance des 4 jours.

• **Au jeune âge: tenue au gel**

S'il y a risque de pénétration du gel dans la couche de forme, on se réfère généralement au critère de la résistance en compression simple R_c du sol traité. La condition à respecter est :

$$R_c \geq 2,5 \text{ MPa}$$

à l'âge correspondant à la date probable du premier épisode de gel sur le chantier.

Nota

L'essai de compression simple est nettement plus facile et plus rapide que l'étude de gonflement au gel avec essais selon NF P 98-234-2. Toutefois, en cas de résultats limites ou de comportement atypique, c'est ce dernier essai qu'il convient de pratiquer pour s'assurer que le sol traité est non gélif (SG_n).

■ **5.2.3.3 - Performances à viser pour les sols stabilisés**

• **Délai de maniabilité**

Le délai, dans lequel l'ensemble des opérations de mise en œuvre (compactage compris) doit être terminé, est **couramment de 4 à 6 heures. Un délai de maniabilité nettement plus long est obtenu avec certains LHR**, le maximum annoncé étant de 16 heures à 20 °C, ce qui procure de la souplesse au chantier.

Nota

En laboratoire, deux méthodes de mesure du temps de maniabilité coexistent, l'une par suivi de l'évaluation de la densité maximale Proctor Normal, l'autre par propagation d'ondes soniques. Quelle que soit la méthode, il est nécessaire d'évaluer le délai à la température maximale prévisible du sol au cours des travaux. Il est intéressant de le connaître aussi à la température minimale probable.

• **Âge autorisant la circulation sur la couche traitée**

On admet généralement qu'une couche de forme stabilisée peut être circulée sans dommage dès que sa résistance en compression simple R_c atteint 1 MPa. En laboratoire, on mesure R_c à différents âges et on interpole pour déterminer le délai de mise en circulation, ce dernier pouvant être modulé en fonction de la température.

• **Au jeune âge: tenue à l'immersion**

Là encore, l'indicateur est la résistance en compression simple R_c . Ainsi, on mesure :

- R_{c60} après 60 jours de cure normale à 20 °C,
- R_{ci} après 28 jours de cure normale, puis 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C.

Généralement, la tenue à l'immersion est jugée satisfaisante si :

$$\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,80 \text{ avec un sol de } VB_s \leq 0,5$$

$$\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,60 \text{ avec un sol de } VB_s \geq 0,5$$

On pourra être amené à renforcer ces exigences si l'ouvrage est particulièrement exposé à des entrées d'eau (zone inondable, nappe phréatique très proche, etc.).

• **Au jeune âge: tenue au gel**

Là encore, il s'agit de garantir que le matériau aura développé une résistance suffisante au moment où le premier gel risque de se produire. L'indicateur est la résistance en traction directe R_t ou la résistance par fendage (essai « brésilien ») R_{tb} . En règle générale, la condition à satisfaire est :

$$R_t \geq 0,20 \text{ MPa} \quad \text{ou} \quad R_{tb} \geq 0,25 \text{ MPa}$$

Des cas particuliers (climat très rude, certains matériaux comme la craie) sont passibles de spécifications plus sévères.

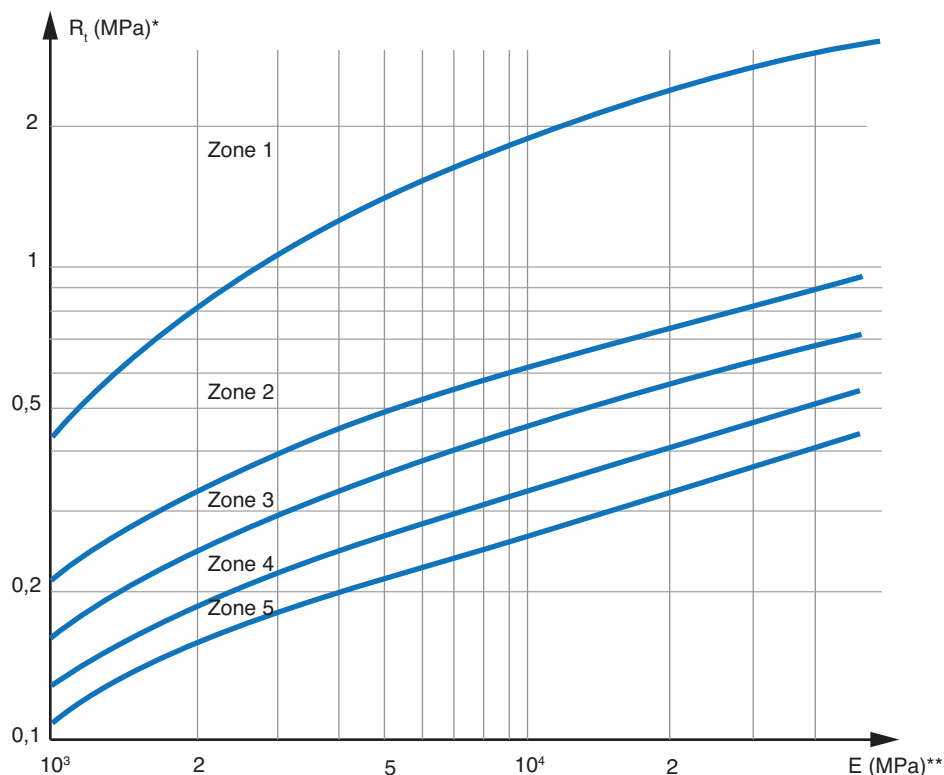
• **Performances mécaniques à long terme**

Les caractéristiques mécaniques à utiliser pour le dimensionnement sont le module de rigidité (ou module d'Young) E et la résistance en traction directe R_t . Celle-ci est, soit mesurée directement, soit déduite à partir de l'essai de fendage (compression diamétrale) par la relation :

$$R_t \sim 0,8 R_{tb}$$

Ces caractéristiques sont mesurées à 28 et 90 jours avec les ciments et LHR « à durcissement rapide », à 180 jours avec les LHR « à durcissement normal ».

Le couple E - R_t , mesuré à 90 ou 180 jours, est la base de la définition de la classe mécanique du matériau traité. Il permet de le situer dans l'abaque de la figure 7.



* Lorsque l'étude a été réalisée à partir d'essais de compression diamétrale, R_t est évalué à partir de la relation : $R_t = 0,8 R_{tb}$ (la valeur du coefficient (0,8) a été modifiée par rapport à celle figurant dans le GTR (0,9) pour être en cohérence avec le Guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées, SETRA-LCPC, 1994 »).

** Le module E est déterminé soit à partir d'un essai de traction directe (norme NF P 98 232-2), soit à partir d'un essai de compression diamétrale (norme NF P 98 232-3) en utilisant dans toute la mesure du possible le dispositif de mesure de la déformation diamétrale décrit dans l'article référencé [22].

Figure 7 : abaque de situation des matériaux de couche de forme traités aux liants hydrauliques (stabilisés)

La classe mécanique du sol traité est ensuite déterminée comme indiqué dans le tableau 12, en distinguant traitement en centrale (plus précis, donc plus performant) et traitement en place.

Tableau 12 : détermination de la classe mécanique d'un sol traité en fonction de ses caractéristiques mécaniques et de son mode de fabrication.		
Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique
Zone 1	-	1
Zone 2	Zone 1	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zones 4 et 5	5

Pour une couche de forme, il faut parvenir au moins à la classe mécanique 5.

5.3 Consistance des études

La finalisation d'un projet routier ou autoroutier avec traitement de sol passe par plusieurs stades: avant-projet, projet, ajustement final avec d'éventuelles planches d'essai. La démarche comporte trois volets: économique, technique, environnemental. L'étude technique comporte les étapes ci-après.

5.3.1 - Reconnaissance et caractérisation des sols à (ré)utiliser en couche de forme

Qu'il s'agisse d'emprunt(s) ou de déblai(s), le gisement de sol envisagé fait l'objet d'une reconnaissance, d'un échantillonnage et d'une caractérisation complets et précis. Le ou les sol(s) sont identifiés et caractérisés avec la gamme d'essais listés en 4.3.1.1.

L'aptitude du sol au traitement est évaluée comme indiqué en 5.2.3.1. L'homogénéité du gisement est déterminée d'après la dispersion de la densité maximale Proctor Normal (cf. 5.2.1 tableau 9). Si la proportion de gros éléments est importante, il convient d'étudier tout de suite si les éléments de trop grande taille pourront être éliminés par criblage, ou non. Les critères de décision sont la proportion d'éléments inacceptables pour le malaxage et le caractère plus ou moins collant (argileux) de la fraction fine.

Dans la perspective d'un traitement au liant hydraulique, il faut être particulièrement vigilant quant à l'éventuelle présence d'éléments nocifs pour la prise du liant. On s'attachera donc à la recherche d'inhibiteurs et autres perturbateurs tels que matières organiques, nitrates, chlorures et, surtout, sulfates.

5.3.2 - Évaluation des conditions météorologiques probables

Comme dans les cas des terrassements, on s'efforce, en fonction de la période de travail prévue, de prédire la météo la plus probable et d'en évaluer les consé-

quences quant à l'état hydrique du sol au cours des opérations successives. Le cas échéant, la date possible d'un premier épisode de gel doit aussi être prise en compte.

5.3.3 - Étude de formulation

■ 5.3.3.1 Choix du ou des liant(s)

Plusieurs considérations orientent dès le départ ce choix : les caractéristiques géotechniques du sol pressenti, son état hydrique probable et, pour une large part, la classe de plate-forme visée. Dans ce cadre, le rôle que l'on entend faire jouer à la couche de forme dans la conception d'ensemble du projet est un facteur fondamental.

Ces données techniques, en conjonction avec les évaluations économiques, conduisent à un premier choix du type de traitement, soit amélioration, soit stabilisation. À partir de là, la proximité, la disponibilité et, bien sûr, le prix de tel ou tel liant sont des facteurs décisifs. Là encore, les LHR se révèlent souvent avantageux, car économiquement compétitifs et techniquement conçus pour les matériaux locaux.

■ 5.3.3.2 - Détermination des dosages à adopter

• Cas des améliorations

L'étude est menée suivant les principes et la méthodologie exposés précédemment pour les remblais (cf. 4.3.1.3) et surtout des PST (cf. 4.3.2). L'ensemble de ces études aboutit à fixer le(s) dosage(s) en liant(s) nécessaire(s) et suffisant(s). Pour tenir compte des variations inhérentes au chantier (compacité, humidité), on définit une plage de variation possible autour du dosage de base.

• Cas des stabilisations

Le dosage en liant hydraulique est déterminé à partir d'une étude de type matériau semi-rigide, avec un objectif de classe mécanique située dans l'abaque E-R_t de la figure 7. Au niveau d'étude 2 et 3 (voir ci-après), la démarche inclut l'étude de la sensibilité des caractéristiques mécaniques aux dispersions de dosage, de compacité et d'état hydrique prévisibles au cours du chantier.

Si nécessaire, la résistance au gel est prise en compte pour la détermination du dosage, comme indiqué en 4.3.2.3 et 5.2.3.3.

5.3.4 - Niveaux d'étude

Pour les chantiers de petite taille dans un contexte bien connu, l'étude peut être relativement sommaire et ne comporter qu'une seule étape.

Pour les grands chantiers, la finalisation du projet se fait en plusieurs phases. Les choix concernant la couche de forme (rôle dans la structure, type de traitement, dosage) revêtent une grande importance, avec trois niveaux d'étude. Le niveau d'étude est fonction :

- du mode de prise en compte de la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée ;
- du niveau d'expérience acquis sur des chantiers similaires ;
- de l'intérêt économique d'une optimisation du dosage.

Le tableau C 1-1 du GTS [2] précise la teneur des études de chaque niveau. On notera qu'il comprend un niveau 0 correspondant à la collecte préalable des données et de l'expertise disponibles. La logique de cette approche est illustrée par la figure 8.

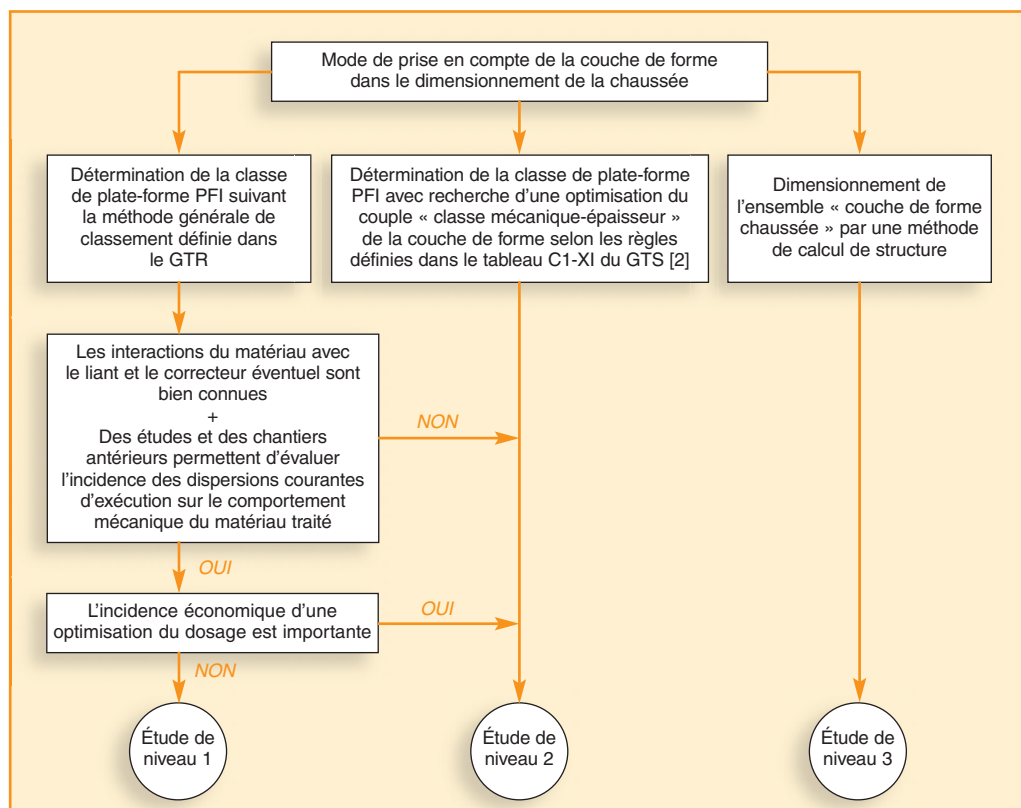


Figure 8: logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager.

5.4 Commentaires sur quelques traitements pour couche de forme

En raison de la grande diversité des sols utilisables, il n'y a pas de règles générales pour les dosages en liants. On notera simplement que pour un même sol, le dosage en liant hydraulique est (fort logiquement) supérieur en couche de forme à ce qu'il serait en PST.

Si le matériau à utiliser présente une argilosité élevée, la solution est soit un pré-traitement à la chaux vive, soit un traitement unique avec un LHR adapté. Voici quelques exemples typiques (et non exhaustifs) de traitements en couche de forme.

- **Limons peu plastiques (A₁)**

Ces sols – sélectionnés – peuvent parfois être traités directement au ciment ou au LHR. Des ordres de grandeur courants sont: 1 % de chaux vive (si nécessaire) + 6 % environ de CEM II 32,5 ou 6 à 7 % de LHR.

- **Limons argileux (A₂)**

1 à 2 % de chaux vive (selon état hydrique) + 4 à 6 % de CEM II 32,5 ou LHR, ou (selon état hydrique) 6 à 7 % de LHR adapté. Il est ainsi souvent possible d'atteindre la zone 4 de l'abaque de classement (figure 6).

- **Limons très argileux – Argiles**

Les sols de classe A₃ ne seront utilisés en couche de forme qu'en dernier ressort, faute d'autre matériau disponible. Ils requièrent de forts dosages en liant(s). Les sols A₄ (argiles plastiques) sont, en l'état actuel des connaissances, inutilisables.

- **Sols sableux et graveleux à teneur modérée en fines (B₁, B₂, B₃, B₄, D₁)**

Les sols peuvent être traités directement au ciment (généralement CEM II 32,5) ou au LHR, avec un dosage allant généralement de 4 à 6 %. Si le sol est naturellement mal gradué, l'ajout d'un correcteur granulaire peut s'avérer être une option intéressante pour compléter le traitement.

- **Sols sableux et graveleux à forte teneur en fines (B₅, B₆)**

Leur granulométrie permet, le plus souvent, d'éviter un pré-traitement à la chaux. Toutefois, en fonction de leur argilosité et de leur état hydrique, ces sols peuvent nécessiter un pré-traitement à la chaux suivi d'un traitement aux liants hydrauliques (ciment ou LHR), soit d'un traitement direct au LHR adapté.



• **Sols contenant des fines et des gros éléments (C_1 , C_2)**

Deux paramètres gouvernent le choix du mode de traitement :

- la proportion d'éléments trop gros vis-à-vis du mode de malaxage envisagé ;
- la nature et l'argilosité de la matrice.

À supposer que la proportion d'éléments trop gros ne conduise pas à rejeter le gisement, le choix du ou des liants s'effectue selon les mêmes principes que ci-dessus.

• **Craies (R_1)**

Un LHR adapté constitue souvent la meilleure option, techniquement et économiquement. Avec les craies R_{12} , un dosage de 5 à 7 % donne couramment les zones 4 et 5 de l'abaque. Dans les régions crayeuses, c'est fréquemment la tenue au gel qui dicte le dosage minimal à retenir. Avec une craie R_{11} , un dosage de 5 % est généralement suffisant.

Nota : amélioration ou stabilisation ?

Les sols sableux et graveleux des classes B, D_1 , D_2 , les matériaux de classe C dont la fraction 0/50 est constituée des sols précédents, certains matériaux rocheux, par exemple les craies (R_1) ou les calcaires tendres (R_{23}) traités au liant hydraulique donnent des matériaux semi-rigides (« stabilisés »).

Les sols fins A_1 , A_2 , et A_3 traités à la chaux seule correspondent au mode « amélioration ». Les sols A_1 , et A_2 , traités au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, peuvent tomber dans l'un ou l'autre, selon le dosage en liant hydraulique et le niveau de rigidification qu'il leur confère. Ce sont les résultats d'étude en laboratoire qui permettent de trancher. Il en va de même des matériaux C_1A_1 , C_1A_2 , C_2A_1 et C_2A_2 .

Pour les autres classes de sol, une étude spécifique est nécessaire pour se prononcer.

5.5 Dimensionnement des couches de forme traitées

5.5.1 - Épaisseur fixée empiriquement par le GTR [1]

Le GTR préconise l'épaisseur de couche de forme h_p nécessaire pour supporter, par tous les temps, la circulation du chantier, permettre une mise en œuvre correcte des couches de chaussée et garantir à long terme une portance minimale de la plate-forme.

Pour une classe de sol donnée, un état hydrique et des conditions météorologiques définies, le GTR précise les conditions d'utilisation permettant d'obtenir une classe de plate-forme PFi à partir d'une arase de terrassements ARj.

Les conditions d'utilisation sont définies par rapport au code GWTS :

G: action sur la granularité,

W: actions sur l'état hydrique,

T: traitement,

S: protection superficielle.

Un extrait des préconisations du GTR (fascicule II – annexe 3) est donné dans le tableau 13.

En pratique, si l'arase de terrassements est de classe AR3 ou AR4, aucune couche de forme n'est nécessaire. Simplement, si le nivellement de l'arase n'est pas totalement satisfaisant, on procède au fin réglage en appliquant une couche de matériau de quelques centimètres.

L'exercice se résume donc au passage de AR1 ou AR2 à respectivement PF2 ou PF3. Pour cela, les épaisseurs « empiriques » préconisées par le GTR sont:

- 35 cm pour les couches de forme traitées avec un liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux;**
- 50 cm pour les couches de forme traitées uniquement à la chaux.**

Tableau 13 : exemples de conditions d'utilisation et épaisseurs de couche de forme préconisées par le GTR (sol...)

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Épaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée								
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4				
						AR1	AR1	AR1	AR2	AR2				
A_{3h}	La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sols de cette classe impliquent un traitement associant chaux et liant hydraulique pour pouvoir les utiliser en couche de forme. Pour les plus plastiques d'entre eux, un traitement à la chaux seule peut être envisagé, notamment s'il n'y a pas de risques d'apparition de gel peu après la réalisation. Ces sols se traitent exclusivement en place. Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec, leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)								
											= ou -	pas de pluie	Solution 1 : T: Traitement mixte: chaux + liant hydraulique S: Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 3 2
		Solution 2 : T: Traitement à la chaux seule S: Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 4 2	(2) E = 0,5 PF2	(2) E = 0,5 PF2								(3)	(3)
A_{3m}	Ces sols se traitent exclusivement en place. Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec, leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	++	pluie forte	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)								
											+ ou =	faible pluie ou faible évaporation	Solution 1 : W: Arrosage pour maintien de l'état hydrique T: Traitement mixte: chaux + liant hydraulique S: Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement	clouté 0 1 3 2
		Solution 2 : W: Arrosage pour maintien de l'état hydrique T: Traitement à la chaux seule S: Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement	clouté 0 1 4 2	(2) E = 0,5 PF2	(2) E = 0,5 PF2								(3)	(3)
		-	Évaporation importante	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON									
A_{3s}	Sols normalement inutilisables en couche de forme													
A₄	Sols normalement inutilisables en couche de forme													

1. Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité « couche de forme » n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique « remblai » et se rapporter alors au cas de PST n° 4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n° 2 ou 3 s'il ne l'est pas.

2. Mise en œuvre en 2 couches.

3. Solution de couche de forme peu appropriée, sauf à vouloir rechercher un surclassement en PF3 ou PF4, auquel cas on appliquera les règles de surclassement définies au § 3.4.2 du fascicule I « Principes généraux » du GTR.

5.5.2 - Choix d'une épaisseur différente – Règles de surclassement de portance de la plate-forme

D'autres considérations que celles conduisant aux épaisseurs ci-dessus peuvent jouer. L'optimisation technico-économiques globale du projet peut amener à retenir une épaisseur de couche de forme h_{cdf} différente de l'épaisseur h_p ci-dessus. Assez rarement, la recherche d'économies peut faire choisir une épaisseur moindre (par exemple si on dispose de matériaux de chaussée peu coûteux, dont il est avantageux d'augmenter l'épaisseur). Toutefois, le cas de loin le plus fréquent est celui où l'on veut augmenter la portance de la plate-forme afin de gagner sur le dimensionnement de la chaussée.

L'épaisseur de couche de forme nécessaire pour un surclassement de portance de la plate-forme par rapport aux indications du GTR (cf. 5.5.1) se calcule :

- en examinant l'incidence de l'épaisseur et des propriétés de la couche de forme sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée ;
- en vérifiant que les contraintes de traction restent admissibles dans la couche de forme en sol traité.

Les effets, dans la chaussée, d'une variation d'épaisseur de la couche de forme dépendent des caractéristiques propres de la chaussée. Néanmoins, par souci de simplification, des règles de surclassement identiques sont préconisées pour les différents types de chaussée (souples, bitumineuses, semi-rigides ou mixtes).

Les épaisseurs indiquées dans les deux tableaux ci-après découlent de la combinaison de calculs de mécanique des chaussées et de constatations sur les performances en place.

• Couches de forme en sols limoneux et argileux traités en place

Le type de traitement est à choisir en fonction de l'argilosité et de l'état hydrique (tableau 14). Il s'agit le plus souvent d'« améliorations ».

Tableau 14 : conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en sol fin traité en place			
Classe de l'arase	Matériau de la couche de forme	Épaisseur matériau de couche de forme	Classe de la plate-forme obtenue
AR1*	A ₃ traité à la chaux seule	50 cm (en 2 couches)	PF2
	A ₁ , A ₂ , A ₃ traités à la chaux + ciment ou LHR seul	35 cm	
	A ₃ traité à la chaux seule	70 cm (en 2 couches)	PF3
	A ₁ , A ₂ , A ₃ traités à la chaux + ciment ou LHR seul	50 cm (en 2 couches)	
AR2	A ₃ traité à la chaux seule	50 cm (en 2 couches)	PF3
	A ₁ , A ₂ , A ₃ traités à la chaux + ciment ou LHR seul	35 cm	

* Sur une PST n° 1, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité de couche de forme n'est pas réalisable. Il faut d'abord procéder à un traitement de l'arase selon une technique « remblai », ce qui renvoie alors à un cas de PST 2,3 ou 4 selon le traitement.

• Couches de forme aux matériaux grenus traités aux liants hydrauliques

Les matériaux concernés sont essentiellement ceux des classes B, D₁, D₂, ceux de classe C dont la fraction 0/50 mm est constituée des sols précédents, de certains matériaux rocheux, dont les craies (R₁), les calcaires tendres (R₂). Le liant hydraulique peut être un ciment ou un LHR. Un prétraitement à la chaux est parfois efficace.

Le matériau traité doit être au minimum conforme aux exigences de la classe mécanique 5 (tableau 12). Le couple E, R_t le caractérisant doit donc se situer au minimum dans la zone 5 de la figure 7 (on est dans le cas de « stabilisation »). Avec ces matériaux, le choix d'un liant adéquat et un dosage suffisant, il est pratiquement toujours possible d'atteindre la classe PF3, et parfois PF4 (tableau 15).

Tableau 15: conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en matériau grenu traité au liant hydraulique.

Classe de l'arase	Épaisseur de matériau de couche de forme (en cm)			Classe de la plate-forme obtenue
	Classe mécanique du matériau de couche de forme			
	3	4	5	
AR1*	**	30	35	PF2
	30	35	50***	PF3
	40	45***	55	PF4
AR2	25	30	35	PF3
	30	35	45***	PF4

* Pour les chantiers autoroutiers, Scétauroute (EGIS) retient une épaisseur majorée de 5 cm dans les cas d'AR1.
 ** L'épaisseur minimale de 30 cm permet un reclassement en PF3.
 *** L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement à une mise en œuvre en 2 couches.

• Autres cas

D'autres cas peuvent se présenter, qui ne correspondent pas strictement à ceux faisant l'objet des tableaux 14 et 15. Il peut s'agir, par exemple, de sols pour lesquels on n'a pas encore d'expérience *in situ*, ou bien de sols fins traités avec un fort dosage de liant hydraulique. Ce sont les résultats d'étude spécifique, éventuellement complétés par l'observation d'une planche expérimentale, qui guideront le dimensionnement.

5.5.3 - Synthèse de la méthode

Le déroulement de la démarche de dimensionnement de la couche de forme et de détermination de la classe de portance de la plate-forme est résumé par la figure 9.

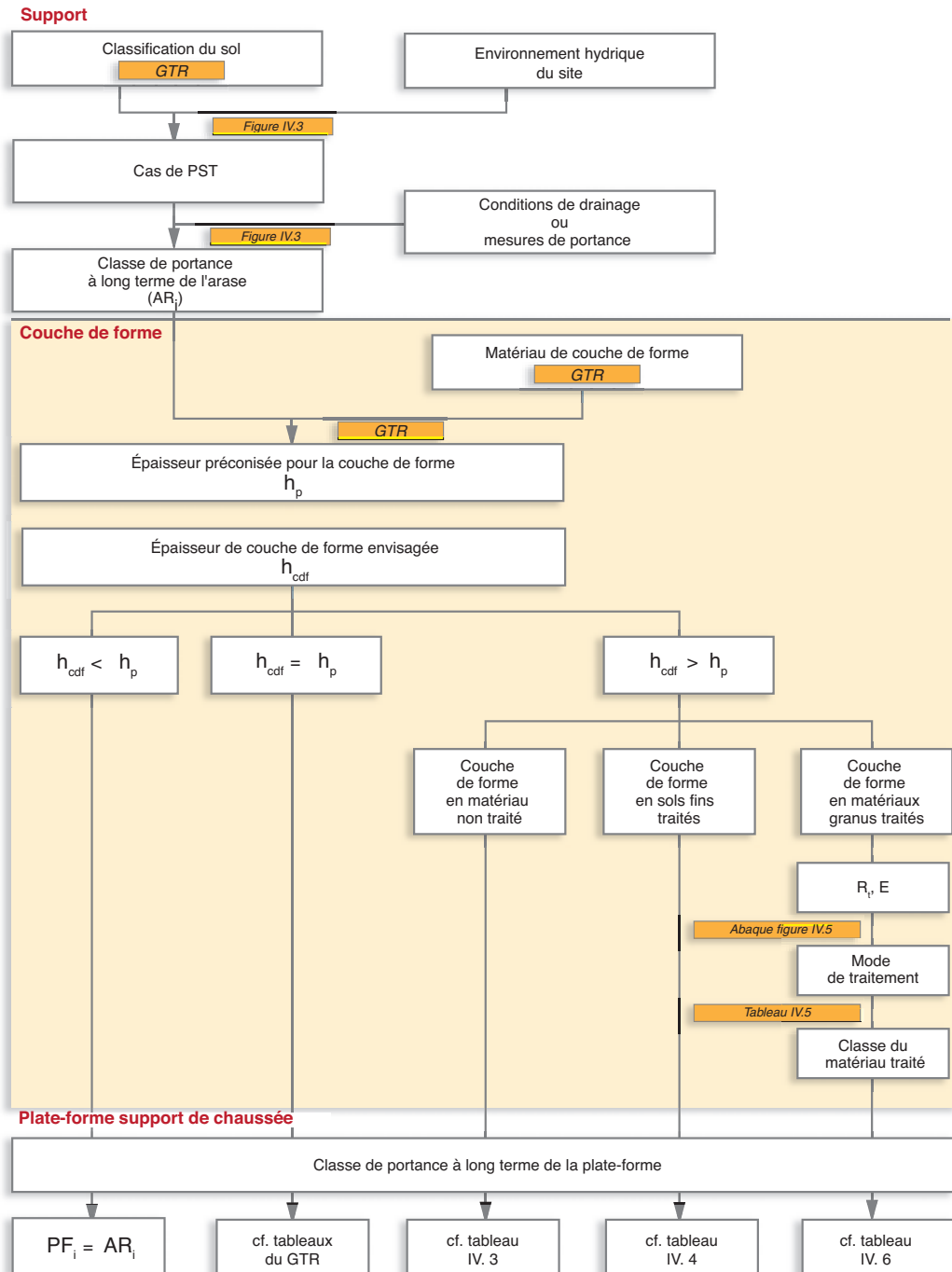


Figure 9 : logigramme de détermination de la portance à long terme de la plate-forme

5.5.4 - Précisions et justifications concernant le dimensionnement

La tenue au gel/dégel reste un critère décisif dans certains cas, qui peut justifier à lui seul l'épaisseur à donner à la couche de forme.

Au cours du dimensionnement, on vérifie toujours que la déformation verticale à la surface de la PST reste admissible.

Le dimensionnement de la couche de forme traitée est justifié comme pour une couche d'assises traitée au liant hydraulique dans deux situations :

- avant construction de la chaussée, sous le trafic de chantier, si la couche de forme est circulée ;
- sous la chaussée.

Dans la première situation, on vérifie l'absence de rupture sous les charges maximales des engins à l'âge auquel la couche de forme sera circulée. L'endommagement de la couche de forme par fatigue pendant le chantier n'est pas pris en compte dans le dimensionnement de la chaussée. Si l'auscultation effectuée pour la réception de la couche de forme révèle qu'elle a été détériorée pendant les travaux, les zones concernées doivent être reprises ou le dimensionnement de la structure devra être revu.

Dans la seconde situation, le calcul est classique avec prise en compte des caractéristiques mécaniques à 360 jours, généralement extrapolées à partir de mesures à 28, 90, voire 180 jours selon la vitesse de durcissement.

Les interfaces assises/couche de forme et couche de forme/sol support sont prises décollées avec glissement ; de même pour l'interface interne d'une couche de forme si elle est mise en œuvre en deux couches.

Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,35 pour les sols, à 0,25 pour les matériaux de couche de forme stabilisés.

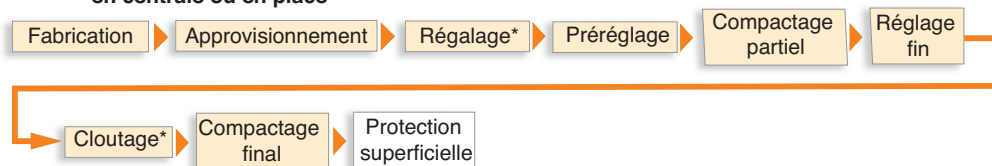
Enfin, en cas de traitement en place, l'épaisseur issue du calcul doit, sauf disposition particulière, être majorée de 5 cm pour tenir compte des irrégularités de l'arase de terrassements et des mouvements du rotor de malaxage.

5.6 Réalisation des couches de forme traitées

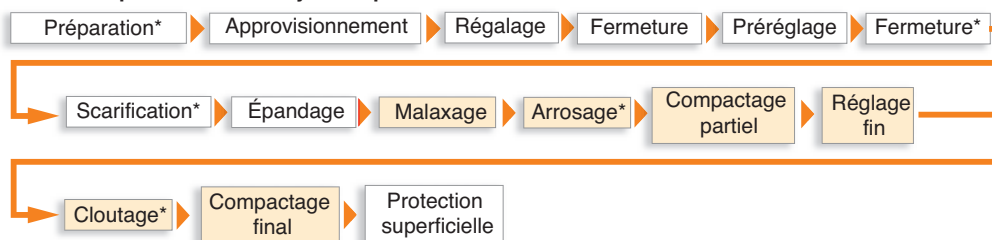
5.6.1 - Ordonnancement des opérations

La nature des tâches élémentaires, et l'ordre dans lequel elles se succèdent, varient quelque peu selon que l'on traite avant ou après approvisionnement, que l'on se trouve en remblai ou en déblai, etc. L'ordonnancement des opérations est schématisé par la figure 10.

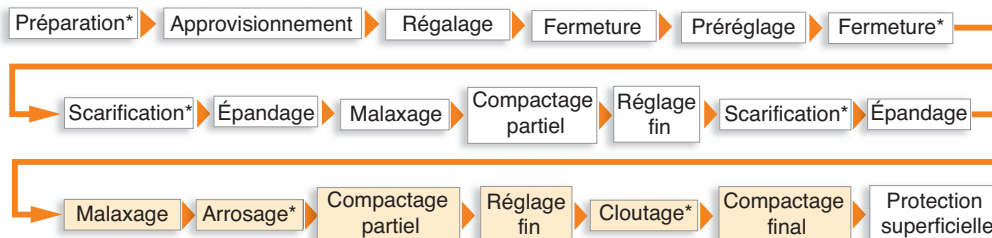
1^{er} cas : approvisionnement à l'emplacement de la couche de forme d'un sol préalablement traité en centrale ou en place



2^e cas : approvisionnement d'un sol non traité à l'emplacement de la couche de forme et traitement en place avec liant hydraulique ou à la chaux seule



3^e cas : idem 2^e cas mais le sol est soumis à un traitement mixte chaux + liant hydraulique



* L'exclusion de cette opération ne doit pas être systématique. Elle dépend des conditions de chantier

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

Figure 10: ordonnancement des opérations pour quatre cas de chantiers de couche de forme (extrait [2])

5.6.2 - Préparation du sol

L'état du sol peut nécessiter tout ou partie des actions ci-après.

■ 5.6.2.1 - *Décohésion du sol en place*

Si nécessaire, cette opération foisonne le sol, favorisant soit son séchage par évaporation, soit son humidification par arrosage. Elle facilite le travail des malaxeurs, augmentant ainsi leur rendement. Le cas échéant, elle contribue à l'élimination des blocs gênants. Elle s'effectue à la défonceuse à dents, montée sur bouteur ou niveleuse.

■ 5.6.2.2 - *Élimination des éléments trop gros*

Rappelons que les dimensions maximales admissibles sont d'environ 100 mm pour un malaxage en place, 50 mm pour un malaxage en centrale. L'élimination de la fraction grossière s'effectue surtout par criblage, parfois par ramassage mécanisé, voire, pour les petits chantiers, manuellement.

■ 5.6.2.3 - *Homogénéisation des matériaux*

Elle s'effectue au cours de l'extraction et du chargement, avec parfois mise en dépôt provisoire et reprise.

■ 5.6.2.4 - *Amélioration de l'état hydrique*

Si le sol en place est trop humide et les conditions météorologiques favorables, on le laisse quelque peu sécher après scarification.

Si, au contraire, il est trop sec, on l'arrose une fois scarifié. L'arrosage avec enfouissement est efficace (garantie d'homogénéité de la teneur en eau) et respectueux de l'environnement (préservation des ressources en eau). Les volumes d'eau nécessaires peuvent être très importants pour certains sols argileux ou silteux secs. Si nécessaire, la teneur en eau est ajustée en cours de malaxage.



5.6.3 - Épandage de liant

L'épandage manuel (sacs répartis) est proscrit, hormis sur des petits chantiers difficilement accessibles aux engins.

Les épandeurs à utiliser doivent disposer d'un système de dosage asservi à la vitesse. Sur les chantiers les plus « pointus », il est souhaitable d'avoir un (ou des) épandeur(s) disposant en plus d'un système de réglage pondéral.

Afin d'obtenir une précision satisfaisante de l'épandage, la note minimale exigée pour l'épandeur est 2 (coefficient de variation C_v maximum = 10 % – cf. tableau 4 § 3.2.2). Pour les chantiers les plus importants, un C_v maximum de 5 % pourra être requis. Quant à l'exactitude (écart entre la valeur visée et la moyenne effectivement épandue), elle doit être de 5 % au plus.

L'épandeur choisi doit être capable d'épandre le dosage surfacique de liant prévu en une seule passe. L'exécution de l'épandage doit être très soignée, en opérant par bandes adjacentes jointives. Bien évidemment, les systèmes d'aide à la conduite (GPS, systèmes d'alertes automatisés, enregistrements et affichages des données, etc.) améliorent la qualité de l'épandage.



5.6.4 - Malaxage en place

Le malaxage doit s'effectuer au pulvimalaxeur par bandes parallèles avec un léger recouvrement.

L'obtention de la profondeur de malaxage visée et sa régularité sont des facteurs essentiels de réussite. La configuration des pulvimalaxeurs actuels, avec la chambre de malaxage située au centre de l'engin, entre les essieux, permet de les maîtriser. Un léger compactage entre deux passes de malaxage aide à obtenir et réguler la profondeur de travail.

La finesse de mouture est un autre paramètre important, dont dépendent l'homogénéité et l'efficacité du mélange. La puissance de l'engin, la vitesse de rotation du tambour, le type d'outils, etc., sont, de ce point de vue, des éléments essentiels.

D'une manière générale, seuls les pulvimalaxeurs notés 2 ou 3 conviennent pour les couches de forme (cf. tableau 5 § 3.4.3). Ces matériels comportent en particulier un dispositif d'injection d'eau dans la chambre de malaxage dont le débit est asservi à la vitesse de déplacement, permettant un ajustement de la teneur en eau.



5.6.5 - Fabrication en centrale

La réalisation d'une couche de forme « haut de gamme » et un chantier de taille suffisante (au moins 50 000 m³) peuvent conduire à fabriquer le matériau en centrale. Celles-ci sont décrites, dans leurs grandes lignes, en 3.5 ; des indications plus détaillées sont données dans le chapitre 6.

Ce mode d'élaboration permet de bien préparer et d'homogénéiser le sol avant le malaxage avec le liant. Rappelons que le sol ne doit pas comporter d'éléments de dimension dépassant 50 mm. S'il est plastique ($I_p > 12$ ou $VB_s > 2,5$ g), on est amené soit à le prétraiter en place à la chaux, soit, plus rarement, à aménager spécialement la centrale.



Toutefois, les possibilités offertes par ce deuxième choix ne permettent pas d'aller très loin en terme de plasticité, sous peine de trop diminuer le rendement de la centrale.

5.6.6 - Compactage

L'obtention de compacités élevées est une nécessité pour mobiliser pleinement les performances mécaniques du matériau. En particulier, dès lors que le sol traité présente une certaine rigidité, le fond de couche travaille en fatigue par flexion. Or, la résistance à la fatigue augmente nettement avec la compacité. La densification atteinte en fond de couche est donc un critère fondamental.



■ 5.6.6.1 - Objectif de densification

L'objectif de densification pour le compactage des couches de forme est la qualité q3, à savoir :

- **masse volumique apparente sèche moyenne (ρ_d)_m pour l'ensemble de la couche :** $(\rho_d)_m \geq 98,5 \% (\rho_d)_{OPN}$;
- **masse volumique apparente sèche pour le fond de couche (ρ_d)_{fc} :**
 $(\rho_d)_{fc} \geq 96 \% (\rho_d)_{OPN}$.

On considère que le « fond de couche » correspond aux 8-10 cm inférieurs.

■ 5.6.6.2 - Dispositions nécessaires

• Besoin de compacteurs puissants

L'Annexe 4 du GTS [2] détaille les types de compacteurs adaptés aux différentes classes de sol. Les engins le plus fréquemment préconisés sont les compacteurs à pneus lourds P2, P3 et les vibrants de moyenne à forte puissance V3, V4 et V5.

• Limitation de l'épaisseur à compacter

L'impératif d'une compacité suffisante en fond de couche conduit à limiter l'épaisseur compactable à 40 cm. Les couches de forme plus épaisses sont donc mises en œuvre et compactées en 2 couches.

• Compactage en deux étapes

Un compactage partiel, correspondant à 70 - 80 % de l'énergie nécessaire pour atteindre q3, soit environ 95 % de la compacité finale, est exécuté après régalaage, préreglage et malaxage. Le compactage final intervient immédiatement après le réglage fin.

• Nécessité d'achever le compactage dans le délai de maniabilité

L'ensemble du compactage doit impérativement être terminé avant l'expiration du délai de maniabilité.

• Lutte contre le feuilletage

Le feuilletage affecte fréquemment les sols fins, sur la partie supérieure (2 à 6 cm) de la couche. Pour l'éviter, il convient, avec les sols fins, dans une première phase, d'utiliser des rouleaux à pieds dameurs VP3, VP4 ou VP5, plutôt que des vibrants lourds V4 ou V5 qui, eux, créent beaucoup de feuilletage. Si nécessaire, on élimine ensuite la partie supérieure lors du réglage fin et on exécute le compactage final avec des compacteurs à pneus.

5.6.7 - Réglages

Le pré-réglage s'effectue généralement à la niveleuse, de plus en plus souvent guidée par laser. Le réglage fin est une phase-clé de la mise en œuvre des couches de forme, au cours de laquelle on réalise le nivellement précis et, si nécessaire, on enlève la partie feuilletée. Il s'exécute à la niveleuse pour les petits chantiers, à la raboteuse ou à l'autograde sur les plus grands. Là encore, le guidage sans contact s'est généralisé.

Le réglage doit être exécuté avec soin et précision, avec une **tolérance de ± 3 cm** par rapport au profil théorique. On est parfois amené à adapter la couche de forme en épaisseur et/ou en formulation pour compenser un léger écart de nivellement de l'arase de terrassements.



Les liants hydrauliques routiers (LHR) à prise très lente sont particulièrement intéressants dans ce cadre. Sur un chantier bien mené, ils peuvent permettre d'achever réglage fin et compactage final avant l'expiration du délai de maniabilité, autorisant ainsi la réutilisation du matériau recoupé.

5.6.8 - Cloutage

L'opération consiste à épandre et enchâsser sur la plate-forme des gravillons de roche dure concassée, de gros calibre (typiquement 14/20 mm). Le cloutage doit être terminé après réglage fin et compactage final, dans le délai de maniabilité. Le taux d'épandage est de 5 à 7 kg/m². L'enchâssement est exécuté au rouleau lisse ou au compacteur à pneus, de façon à enfoncer les « clous » sur environ la moitié de leur hauteur.

Le cloutage permet l'accrochage de la protection superficielle (voir § 5.6.9) et améliore le fonctionnement de l'interface avec la couche supérieure. **Il est indispensable sur les sols fins traités.**

5.6.9 - Protection superficielle

La protection de la surface d'une couche de sol traitée est indispensable, pour empêcher, d'une part l'évaporation de l'eau (très préjudiciable à la prise du liant) et d'autre part la pénétration d'eau dans la couche traitée (qui risque d'affecter sa portance). En outre, la



surface de la couche doit être protégée contre les agressions du trafic de chantier. La protection a aussi pour rôle d'éviter les émissions de poussières sous ce trafic. Divers types de protection superficielle sont envisageables (figure 11).







Appellation - Schéma	Formulation (par m ²)	Commentaires
<p>Pulvérisation d'eau (P)</p> 	1 à 2 litres d'eau éventuellement additionnée d'un produit hydrophile (Cl ₂ Ca)	Nécessité de répandre l'eau sous forme finement pulvérisée. Opération à renouveler dès que la surface s'est asséchée et qu'il y a à nouveau formation de poussières.
<p>Enduit de cure par voile d'émulsion (EC)</p> 	0,5 à 0,8 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Le sable peut être utilisé uniquement en l'absence de trafic lourd sur la couche de forme (cf. tableau C2-VII).
<p>Enduit de scellement (ES)</p> 	0,8 à 1,1 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Protection similaire à (EC) mais plus efficace contre la dessiccation si la durée d'exposition est importante (cf. tableau C2-VI).
<p>Enduit monocouche (EM)</p> 	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.
<p>Enduit bicouche (EB)</p> 	1^{ère} couche : 1,1 à 1,3 kg d'émulsion* 10 à 11 litres de gravillons 10/14** 2^e 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.
<p>Enduit prégravillonné (EP)</p> 	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.
<p>* Masse surfacique donnée pour une émulsion cationique à 65 % de bitume ** Les gravillons doivent avoir un coefficient Los-Angeles ≤ 35 et une propreté (% ≤ 0,08 mm) ≤ 2 %</p>		

Figure 11 : types de protection superficielle applicables sur couche de forme traitée

Pour choisir la protection minimale nécessaire, deux données sont à prendre en compte : le niveau d'agressivité du trafic (tableau 16) et le niveau d'exposition climatique (tableau 17), tels qu'ils sont proposés dans le GTS [2].

Tableau 16: niveaux d'agressivité du trafic de chantier

Niveau d'agressivité du trafic	Type de trafic correspondant
A	Trafic léger, limité aux voitures
B	Trafic léger et trafic lourd nécessité par les travaux annexes (trafic lourd ≤ à 500 passages de poids lourds)
C	Trafic d'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation ou trafic d'approvisionnement des matériaux de la couche de forme
D	Trafic d'approvisionnement des matériaux de la couche de forme et des matériaux de la couche de fondation + sujétions exceptionnelles (telle que piste de chantier pour engins de terrassements)

Tableau 17: niveaux d'exposition climatique affectant une couche de sol traité avant son recouvrement par la couche sus-jacente

Niveau d'exposition climatique	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

La protection est choisie en fonction de ces deux paramètres comme indiqué dans le tableau 18.

Tableau 18: types de protection superficielle à appliquer sur une couche de forme en sol traité

Niveau d'agressivité du trafic	Niveau d'exposition climatique				
	0	1	2	3	4
A	P ou EC *	EC avec sablage	EC avec sablage	ES avec sablage	ES avec sablage
B	P ou EC *	EC avec gravillonnage	ES avec gravillonnage	ES avec gravillonnage	ES avec gravillonnage
C	EC	ES	EM	EM	EM
D	ES	EM	EM	EM ou EP **	EB ou EP **

P: Pulvérisation d'eau
 EC: Enduit de cure
 ES: Enduit de scellement
 EM: Enduit monocouche
 EB: Enduit bicouche
 EP: Enduit prégravillonné

* Un enduit de cure est appliqué si la couche de fondation est traitée au bitume et/ou si la tenue à l'immersion au jeune âge du mélange est limitée.

** Lorsque le support est hétérogène.

Traitement des sols en assises de chaussée

6.1 Matériaux d'assises traités

6.2 Consistance des études

6.3 Observations sur quelques cas de traitement en couche d'assises et premier bilan

6.4 Conception et dimensionnement

6.5 Réalisation des assises en sol traité



Plusieurs expérimentations d'assises de chaussée en sol traité au ciment furent conduites dans les années 1960-1970. Elles se soldèrent par un bilan mitigé, qui mit en évidence les limites à ne pas dépasser. Il faut dire que certaines réalisations étaient très audacieuses. La technique continua à progresser, au point que le « Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic » [8] publié en 1981 retient, parmi les matériaux utilisables en assises, les limons traités à la chaux et au ciment (LTCC). Parallèlement se multipliaient les réalisations d'ouvrages pour le secteur privé (plates-formes industrielles, parkings, voiries diverses) comportant des assises en sol traité, dont le bon comportement a pu être observé au fil du temps. La technique s'est ainsi suffisamment affirmée pour qu'elle fasse l'objet du Guide Technique CFTR « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussée » [3], publié en 2007.

Au niveau régional, plusieurs catalogues des structures de chaussées ou guides techniques pour l'utilisation des matériaux locaux intègrent les sols traités dans leur panoplie.

En outre, on peut noter que des sols traités sont employés depuis des décennies en assises de chaussée dans nombre de pays tropicaux, généralement avec succès.

6.1 Matériaux d'assises traités

6.1.1 - Types de sols envisageables

Les types de sols dont l'emploi est envisageable pour constituer des assises traitées sont divers. Toutefois, l'expérience acquise est variable d'un type à l'autre. Pour certains, la faisabilité reste dépendante des caractéristiques particulières du gisement considéré. Pour d'autres, le comportement est suffisamment connu pour édicter des spécifications précises.

En tout état de cause, l'homogénéité du gisement est un critère décisif quant à la possibilité d'utiliser le sol en assises (cf. § 6.2.2).

Un autre critère de sélection est la dimension des plus gros éléments du sol, qui doit être limitée pour garantir l'efficacité du malaxage, l'homogénéité du matériau traité et la régularité géométrique de la couche. En pratique, il est nécessaire que la dimension des plus gros éléments ne dépasse pas 30 mm, avec au moins 80 % passant à 20 mm.

- Sols fins (classe A)

Seuls les sols peu plastiques (A_1 et A_2) sont envisageables, avec pour les A_2 , limitation de l' I_p à 20 ou de la VB_s à 5.

- Sols sableux et graveleux (classe B)

L'ensemble des sols de cette classe est *a priori* utilisable. Les sables silteux B_1 peuvent poser des problèmes de traficabilité.

- Sols insensibles à l'eau (classe D)

Les graves D_3 sont trop grossières. Les sables D_1 sont utilisables, mais posent de gros problèmes de traficabilité. Ils requièrent un fort dosage en liant, si bien que l'on arrive très vite à une rigidité élevée (matériau de type STLH). Les graves propres D_2 sont utilisables après écrépage à 31,5 mm. Si elles sont mal graduées, la problématique est analogue à celle des D_1 , en moins marqué.

- Craies (R_1)

Les craies denses sont *a priori* utilisables. Les craies moyennement denses (R_{12}) doivent être utilisées avec précaution : leur porosité les rend sensibles à l'eau, leur faible dureté aux contraintes sous trafic. Leur emploi après traitement doit être limité aux couches de fondation, avec un bon drainage et une couverture les protégeant des entrées d'eau. Les craies peu denses (R_{13}) ne doivent pas être utilisées, même en fondation.

- Calcaires « subnormaux » (R_2) – Roches siliceuses (R_4)

La plupart de ces matériaux sont utilisables pour la constitution d'assises. Toutefois, les opérations nécessaires à l'élaboration d'une granulométrie convenable (écrétagage, voire concassage, etc.) correspondent à des graves « subnormales » plutôt qu'à des sols traités.

- Roches argileuses (R_3)

Ces matériaux sont à écarter en raison de leur dégradabilité et/ou de leur fragmentabilité.

Le guide technique CFTR « Traitement de sols pour assises de chaussée » [3] précise les critères limitatifs pour les sols des classes A et B (tableau 19). « Par manque d'expérience », ce guide limite l'argilosité des sols de classe B.

Tableau 19: critères d'argilosité et de taille granulaire des sols de classe A et B pour assises de chaussée d'après [3]

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	$VB_5 < 5$ ou $I_p < 20$	$\leq 31,5$	≤ 20
Sols sableux	B_5, B_6	$VB_5 < 2,5$	≤ 8	$\leq 6,3$
	B_2	$0,2 < VB_5 < 1$		
Sols graveleux	B_5, B_6	$VB_5 < 2,5$	$\leq 31,5$	≤ 20
	B_3, B_4	$0,1 < VB_5 < 1$		

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

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

6.1.2 - Critères de résistance mécanique de la fraction granulaire

Le squelette granulaire des sols sableux ou graveleux participe à la résistance mécanique du matériau traité. Il est donc essentiel qu'il puisse supporter les contraintes sous trafic. Les critères sont :

- pour les sols sableux, la friabilité des sables FS ;
- pour les sols graveleux, les coefficients Los Angeles (LA) et Micro-Deval en présence d'eau (MDE).

Les limites applicables sont évidemment fonction du trafic. Le tableau 20 est extrait du Guide CFTR [3].

Tableau 20 : critères de caractéristiques intrinsèques du squelette granulaire en fonction du trafic, d'après [3]					
Type de sol	Couche de l'assises	Classe de trafic			
		≤ T4	T3	T2	T1
Sols sableux	Fondation	FS < 50		FS < 50	
	Base			Utilisation non autorisée	
Sols graveleux	Fondation	E	E	E	D
	Base	E	D	Utilisation non autorisée	

6.1.3 - Performances à obtenir après traitement

■ 6.1.3.1 - Aptitude du sol au traitement

L'aptitude du sol au traitement avec le liant prévu est appréciée, comme pour les couches de forme, à partir des résultats des essais de gonflement volumique accéléré et de traction indirecte selon la norme NF P 94-100. L'aptitude au traitement avec un ciment peut être évaluée selon le tableau 21, extrait du Guide CFTR [3].

Tableau 21 : critères pour l'interprétation de l'aptitude au traitement au ciment			
	Gonflement volumique G_v (%) (NF EN 13286-49) [68]		R_{ti} (MPa) à 7 j conservé à 40 °C en immersion (NF EN 13286-42) [65]
Adapté	G _v < 5	et	R _{ti} > 0,2
Douteux	5 ≤ G _v ≤ 10	ou	0,1 ≤ R _{ti} ≤ 0,2
Inadapté	G _v > 10	ou	R _{ti} < 0,1

Les critères de résistance R_{ti} (ou R_{tb}) ci-dessus ont été établis avec des ciments. Certains liants hydrauliques routiers, à prise lente, peuvent conduire à une R_{ti} à 7 jours inférieure au seuil de 0,2 ou 0,1 MPa, mais convenir néanmoins pour un matériau d'assises. Une étude spécifique, avec prise en compte de résistance à plus long terme, doit alors être menée.

■ 6.1.3.2 - Portance immédiate

La portance à obtenir à la mise en œuvre ne doit en aucun cas être inférieure à 20 d'IPI, de manière à garantir une mise en œuvre sans déformation de la couche. Les valeurs minimales d'IPI à obtenir sont précisées dans le tableau 22.

Tableau 22 : indice portant immédiat (IPI) à obtenir avec les matériaux traités pour assises

Type de sol	A ₁ - A ₂	B sableux	B graveleux	Autre
IPI minimum	20	30	50	selon expérience ou étude spécifique

Les essais de poinçonnement sont conduits sur éprouvettes à la teneur en eau de la formule d'étude, compactées avec l'énergie Proctor Modifié pour les sols sableux et pour les sols graveleux peu argileux, à l'énergie Proctor Normal pour les autres.

■ 6.1.3.3 - Âge autorisant la mise sous circulation de chantier

Le critère est la résistance en compression simple après conservation :

- normalement à 20 °C,
- à une température inférieure, fonction des conditions locales, pour un chantier en arrière-saison (mais toujours supérieure à 5 °C).

Les minima à obtenir au moment de la mise en circulation sont :

**R_c ≥ 1,0 MPa pour un trafic chantier d'agressivité A
(cf. tableau 16, page 93)**

R_c ≥ 1,2 MPa pour un trafic B (cf. tableau 16, page 93)

R_c ≥ 1,5 MPa pour un trafic C (cf. tableau 16, page 93)

■ 6.1.3.4 - Tenue à l'eau

La sensibilité à l'eau du sol traité est appréciée comme suit :

- mesure de R_{c60} après 60 jours de cure normale à 20 °C,
- mesure de R_{ci} après 28 jours de cure normale, puis 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C.

Les minima exigés pour le rapport $\frac{R_{ci}}{R_{c60}}$ sont :

$$\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,80 \text{ si } VB_s \leq 0,5$$

$$\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,70 \text{ si } VB_s > 0,5$$

■ 6.1.3.5 - Au jeune âge : tenue au gel /dégel

L'indicateur est la résistance en traction directe R_t ou indirecte R_{ti} (aussi dénommée « par fendage » R_{tb}). La condition à satisfaire à l'âge probable du premier épisode de gel est :

$$R_t \geq 0,20 \text{ MPa} \quad \text{ou} \quad R_{ti} \geq 0,25 \text{ MPa}$$

Des cas particuliers (climat très rude avec risque de fort gel précoce, matériau sensible) sont passibles de spécifications plus sévères.

■ 6.1.3.6 - Performances mécaniques à long terme

Les caractéristiques à utiliser pour le dimensionnement sont le module de rigidité E et la résistance en traction directe R_t . S'il n'est pas possible de mesurer la résistance en traction directe, on peut l'estimer à partir d'essais de traction indirecte (par fendage), comme indiqué en 5.2.3.3.

Ces caractéristiques sont mesurées après un délai qui dépend du type de liant utilisé. Ce délai est au minimum de 90 jours pour les sols traités au ciment ou avec certains LHR à durcissement rapide. Il est de 180 jours minimum avec les LHR à durcissement normal.

D'après les résultats obtenus, le sol traité est classé dans une catégorie T_1 selon la norme NF EN 14227-10 ou NF EN 14227-13.

6.2 Consistance des études

Les études comprennent trois volets (technique, économique, environnemental) interdépendants.

6.2.1 - Niveaux d'étude

Les décisions concernant le choix (ou non), la formulation, l'évaluation et le dimensionnement des assises en sol traité se prennent et s'affinent progressivement au fil des phases d'étude. Le tableau 23 résume les étapes possibles.

Bien entendu, pour un petit chantier avec un matériau déjà connu, on se limite à une étude réduite avec un gisement présélectionné et une formulation préétablie.

Tableau 23 : étapes successives d'une étude de traitement pour assises de chaussée (extrait [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.). 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 selon la norme NF P 94-100 ou 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]. Analyse et synthèse de ces éléments dans la perspective du traitement de sol appliqué au projet de couche d'assises 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'assises de chaussée à partir des éléments de la reconnaissance géologique et géotechnique générale du tracé. Si nécessaire, exécution de quelques sondages (tarière, pelle, etc.) complémentaires pour une caractérisation plus fine du gisement. Établissement 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'assises. Évaluation : – 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 prédimensionnement (technique, économique, délais d'exécution) de la solution.</p>	<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. Caractérisation et localisation des gisements Éléments 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 3 mois (minimum) à un 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.

6.2.2 - Reconnaissance et caractérisation des gisements

Le gisement peut être un déblai à extraire, une zone d'emprunt ou un stock de sol déjà constitué lors de travaux préalables.

Dans tous les cas, un nombre minimal de sondages et d'échantillonnages est nécessaire pour évaluer si le gisement contient un ou plusieurs types de sols significativement différents et pour en évaluer l'homogénéité. Le minimum d'essais nécessaires pour caractériser chaque famille de sols est indiqué dans le tableau 24.

Tableau 24 : nombre minimal d'essais nécessaires pour caractériser une famille de sols (extrait [3])

(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 ≤ 10 ⁴	9	16
V > 10 ⁴	9 V / 10 ⁴	16 V / 10 ⁴

Les échantillons prélevés sont soumis aux essais d'identification, de compactage et de caractérisation mécanique listés en 6.3.1.1, à l'exception de l'IPI.

Sur la base des critères exposés en 6.1.1 :

- dimensions des plus gros éléments (cf. tableau 19, page 94) ;
- argilosité (cf. tableau 19, page 94) ;
- caractéristiques intrinsèques du squelette granulaire (cf. tableau 20, page 95), le gisement sera rejeté ou son évaluation sera poursuivie, en particulier sous l'aspect homogénéité.

Pour les sols fins A₁ et A₂, l'homogénéité s'apprécie par les dispersions de la densité sèche maximale Proctor Normal et de l'argilosité (tableau 25).

Tableau 25 : niveau d'homogénéité d'un gisement de sol fin (A₁ et A₂) et utilisations possibles en assises.

Niveau d'homogénéité	Étendue relative des mesures (e _r) [*] de (ρ _d) _{OPN}	Étendue relative des mesures (e _r) [*] de VB ₅ ou I _p	Utilisation possible en assises de chaussées
H1	e _r ≤ 4 %	e _r ≤ 40%	Fondation de chaussées de trafic ≤ T1 Base de chaussées de trafic ≤ T3
H2	4 < e _r ≤ 6 %	e _r ≤ 40%	Fondation de chaussées de trafic ≤ T2 Base de chaussées de trafic ≤ T4
H3	e _r > 6 %	e _r ≤ 40%	Non utilisable en assises de chaussées

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

Pour les sols sableux ou graveleux (classe B), l'homogénéité est codifiée à partir des dispersions de la valeur au bleu VB₅ et des passants à 2 et 0,08 mm (tableau 26).

Tableau 26 : niveau d'homogénéité d'un gisement de sol sableux ou graveleux (classe B) et utilisations possibles en assises.

Niveau d'homogénéité	Critères d'homogénéité retenus					Utilisation possible en assises de chaussées
	e _r ^{**} de VB ₅ (1)		Passant à 80 μm		e [*] du passant à 2 mm ^{***}	
			Moyenne	e [*]		
H1	≤ 40 %	et	≤ 15 %	≤ 6 %	et	≤ 20 %
			> 15 %	≤ 8 %		
H2	≤ 40 %	et	≤ 15 %	≤ 8 %	et	≤ 30 %
			> 15 %	≤ 12 %		
H3	> 40 %	ou	≤ 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 la VB₅ est inférieure ou égale à 0,2 e_r.

Pour d'autres matériaux, l'homogénéité s'apprécie de manière spécifique, en utilisant, si nécessaire, d'autres caractéristiques plus pertinentes. Par exemple, pour la craie et certains calcaires tendres, la dispersion de la masse volumique sèche peut être un indicateur préférable à la granulométrie, qui est très évolutive.

6.2.3 - Étude de formulation

■ 6.2.3.1 - Évaluation de la nécessité d'un prétraitement à la chaux

Afin de garantir les performances demandées en couche d'assises, le prétraitement à la chaux peut s'avérer utile, parfois indispensable. Il ne s'agit pas seulement d'améliorer l'état hydrique, mais aussi de modifier la structure des éléments argileux afin de rendre le sol apte à un mélange plus intime avec le ciment ou le LHR et de favoriser les réactions de prise hydraulique.

Le recours à un liant hydraulique routier spécialement conçu pour les sols ayant une certaine argilosité est une autre solution, évitant le prétraitement, donc plus simple à mettre en œuvre.

■ 6.2.3.2 - Choix du liant – Aptitude du couple sol-liant

Une présélection du liant hydraulique (ciment ou LHR) se fait à partir de l'expérience éventuellement déjà acquise et de la proximité des cimenteries.

Il faut alors vérifier l'aptitude du couple sol – liant à former un mélange stable et structuré par la prise du liant. Comme indiqué en 6.1.3.1, cette vérification s'appuie sur les essais de gonflement accéléré et de résistance en traction indirecte (par fendage) après 7 jours d'immersion dans l'eau à 40 °C, selon la norme NF P 94-100.

Rappelons que, si les valeurs limites de R_{ti} indiquées dans le tableau 21, page 95, sont valables avec un ciment, il n'en va pas nécessairement de même avec certains LHR à prise lente. La non-obtention d'une R_{ti} de 0,2 ou 0,1 MPa avec de tels liants ne signifie pas nécessairement que le mélange n'atteindra pas le niveau de rigidification souhaité. La procédure d'essai doit alors être modifiée, avec en particulier des temps de conservation plus longs, afin de pouvoir juger avec certitude de l'adéquation sol-liant.

■ 6.2.3.3 - Conduite de l'étude

Les essais sont menés sur un échantillon représentatif du gisement dont l'utilisation est projetée. La méthodologie d'étude est décrite dans la norme NF P 98-114-3. Une étude complète comprend :

- identification complète de l'échantillon de sol,
- identification du ou des liants,
- détermination des références de compactage (Proctor Normal ou Modifié),
- détermination de l'IPI,
- détermination de l'âge autorisant la circulation,
- mesure du délai de maniabilité,
- évaluation de la tenue à l'eau,
- évaluation de la tenue au gel,
- détermination des performances mécaniques à long terme.

Cette dernière partie intègre l'évaluation de la sensibilité des performances mécaniques aux variations de trois paramètres de la formule objet de l'étude : la masse volumique apparente ρ_{de} , la teneur en eau w_e et la teneur en liant I_e . Les performances considérées sont le module sécant à 30 % de la charge de rupture et la résistance en traction (directe ou indirecte). Les mesures sont effectuées à 90 jours avec un ciment ou un LHR « rapide », à 180 jours avec un LHR à prise lente. Les variations paramétriques couramment pratiquées sont indiquées dans le tableau 27.

Tableau 27 : modalités pour l'évaluation des effets de la dispersion des dosages et de la compacité

		$0,8 I_e^{***}$	I_e^{***}	$1,2 I_e^{***}$
$95 \% \rho_{de}^*$	$0,9 w_e^{**}$			
	w_e^{**}		X	
	$1,1 w_e^{**}$			
ρ_{de}^*	$0,9 w_e^{**}$		X	
	w_e^{**}	X	X	X
	$1,1 w_e^{**}$		X	
$102 \% \rho_{de}^*$	$0,9 w_e^{**}$			
	w_e^{**}		X	
	$1,1 w_e^{**}$			

* ρ_{de} : masse volumique apparente.

** w_e : teneur en eau.

*** I_e : teneur en liant de la formule d'étude.

La formule finale est décidée en situant les résultats ci-dessus dans l'abaque délimitant les zones servant de base à la définition de la classe mécanique.

6.2.4 - Détermination de la classe de qualité mécanique du sol traité

L'étude de traitement permet d'attribuer à la formule retenue un couple de caractéristiques mécaniques $E-R_t$ à 360 jours.

Les valeurs E et R_t obtenues en laboratoire subissent un abattement pour tenir compte des dispersions inhérentes aux matériaux naturels et au mode de fabrication. En liaison avec ce dernier, deux niveaux de qualité de traitement, AC1 et AC2, sont définis (voir 6.5.3.3). Le tableau 28 indique les abattements à appliquer.

Tableau 28 : abattements sur module E et résistance R_t en fonction du niveau de qualité de traitement AC		
Qualité du traitement / Paramètre	AC1	AC2
E	25 %	35 %
R_t	25 %	35 %

Le couple de valeurs $E-R_t$ après abattement situe le matériau dans une zone définie par l'abaque de la figure 12, déterminant ainsi sa classe de qualité mécanique SOL Ti.

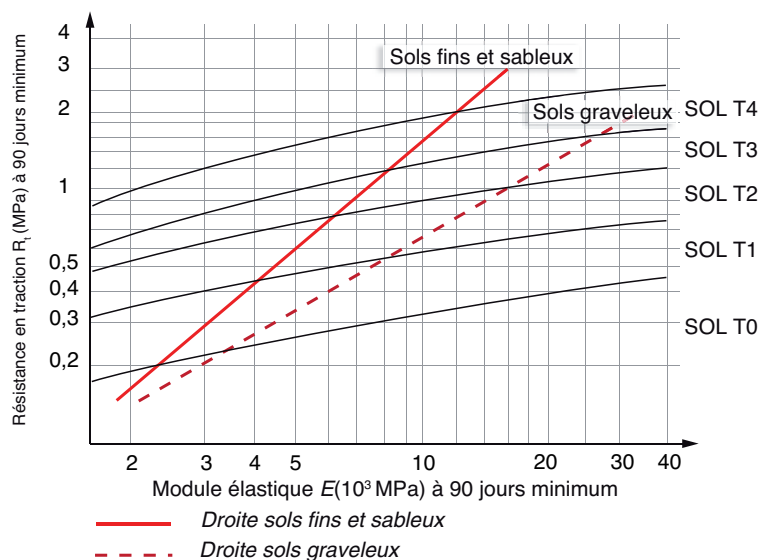


Figure 12 : abaque de classification des sols traités pour couche d'assises

6.3 Observations sur quelques cas de traitement en couche d'assises et premier bilan

L'expérience acquise dans le domaine des sols traités en assises de chaussée est encore limitée. Il est donc prématuré de donner des règles générales en matière de formulation. Une chose est néanmoins certaine : les dosages en liant hydraulique nécessaires sont élevés, et sensiblement supérieurs à ceux habituellement pratiqués en couche de forme.

Par exemple, avec les limons du Bassin Parisien (Ile-de-France, Normandie, Picardie) et du Nord, dont l'emploi est fréquent, il faut compter 1 à 2 % de chaux suivie de 6 à 8 % de ciment CEM II ou III 32,5 ou de LHR pour obtenir la classe SOL T2.

L'observation du comportement de structures relativement âgées (10 à 20 ans) sous des trafics allant de T3 à T0 fait ressortir les points principaux suivants.

- Les sols traités, de classes SOL T1 à SOL T3, conservent leurs performances mécaniques au fil du temps. Ils se comportent en matériaux semi-rigides et présentent des fissures transversales. Les déflexions sont très faibles.

- **Le fonctionnement de l'interface sol traité – couche supérieure (bitumineuse) est un point critique. Si le collage superficiel semble assuré (par l'intermédiaire d'un enduit et, si nécessaire, d'un cloutage), on observe quelquefois une rupture par cisaillement dans le sol traité, quelques centimètres sous l'interface.**

- Les sols traités ayant une certaine argilosité (limons A₁, parfois A₂, en particulier) font preuve d'une réelle sensibilité à l'eau, donnant lieu à des désordres dès lors que le revêtement n'est pas imperméable ou que le drainage latéral est insuffisant.

6.4 Conception et dimensionnement

6.4.1 - Conception de la chaussée

6.4.1.1 - Domaine d'emploi et qualités minimales

Les sols traités répondant aux exigences détaillées en 6.1 peuvent être utilisés jusqu'aux trafics T3 en couche de base et jusqu'au trafic T1 en couche de fondation. Le tableau 29 indique la classe minimale de qualité mécanique exigée selon le trafic et la position dans la structure.

Tableau 29 : classe de qualité mécanique minimale en fonction du trafic et de la position dans la structure

Classe de trafic T_i	Trafic T5	Trafic T4	Trafic T3	Trafic T2	Trafic T1
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 assises/couche de surface.

6.4.1.2 - Types de structure

L'utilisation de sol traité en couche de fondation est envisageable pour les structures suivantes :

- mixte (base en grave-bitume)
- semi-rigide (base en grave ou sable traité au liant hydraulique),
- inverse (grave-bitume ou BB sur grave non traitée sur fondation),
- béton (béton, sur GB ou BB, sur fondation).

Si le sol traité est mis en couche de base, la structure est considérée comme semi-rigide.

6.4.1.3 - Interfaces

Les hypothèses du Guide Sols traités en assises [3] concernant le fonctionnement des interfaces sont résumées dans le tableau 30.

Tableau 30 : hypothèses de conditions d'interface, d'après le GTS [3]

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 GH sur fondation en sol traité		semi-collée
Structure mixte	1 ^{re} phase GB sur fondation en sol traité	semi-collée
	2 ^e phase GB sur fondation en sol traité	décollée
BB ou GB sur couche en sol traité		semi-collée

Le retour d'expérience montre que certaines hypothèses relatives à l'interface sont probablement trop optimistes. En effet, on a constaté sur un certain nombre de chantiers correctement réalisés, un cisaillement du sol traité dans sa partie supérieure, sous l'enrobé bitumineux. Ceci est un point important, pour l'amélioration duquel des recherches et des expérimentations seraient nécessaires.

■ 6.4.1.4 - Couches de surface

Une excellente imperméabilité de la couche de roulement est impérative. On retiendra selon le cas, une formulation dense et riche (béton bitumineux souple) et/ou une couche d'accrochage fortement dosée, ou un enduit superficiel bicouche, voire tricouche. Le tableau 31 indique les épaisseurs à prévoir sur couche de base en sol traité.

Tableau 31 : épaisseur de couche(s) de surface à appliquer sur couche de base en sol traité

Trafic cumulé TCi Type de sols	Trafic TC0	Trafic TC1	Trafic TC2	Trafic TC3
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

Nota : pour une utilisation sur les 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.

■ 6.4.1.5 - Dispositions constructives

Les sols traités conservent une sensibilité à l'eau prononcée dès lors qu'ils ont une certaine argilosité. La conception et la construction de la chaussée doivent donc être menées en veillant très soigneusement à prévenir les entrées d'eau. Dans ce but, les dispositions suivantes seront retenues :

– couche de surface imperméable (cf. 6.4.1.4),

- protection des rives de chaussée par fossés bien dimensionnés (à bien entretenir), voire par écrans de rive en zones très humides,
- si nécessaire, augmentation de la pente transversale et imperméabilisation des accotements, combinées éventuellement avec une surlargeur minimale de 50 cm de la couche de sol traité.

6.4.2 - Dimensionnement

■ 6.4.2.1 - Méthode

Le dimensionnement d'une structure comprenant une couche d'assises en sol traité s'effectue conformément au Guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » [9]. La démarche est basée sur deux critères :

- la déformation verticale en surface du sol support,
- la contrainte de traction σ_t à la base de la couche traitée.

Cette dernière (σ_t) est comparée à la contrainte admissible du matériau σ_{ad} , déterminée ainsi :

$$\sigma_{ad} = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_r \cdot K_s$$

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

avec :

- σ_6 : contrainte pour laquelle la rupture par traction sur éprouvette âgée 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.

■ 6.4.2.2 - Données trafic

Elles diffèrent de celles du Guide conception et dimensionnement de 1994 en raison de la nouvelle définition du poids lourd, défini par la norme NF P98-082 comme étant un véhicule de poids total en charge supérieur ou égal à 3,5 tonnes. Le coefficient d'agressivité CAM est soit calculé à partir du spectre de trafic enregistré, soit, en l'absence de ces données, estimé comme indiqué dans le tableau 32.

Tableau 32 : coefficients d'agressivité du trafic à utiliser en l'absence de données spécifiques

Classe de trafic T_i à la mise en service	Trafic T5	Trafic T4	Trafic T3	Trafic T2	Trafic T1
Équivalence en classe de trafic cumulé T_{Ci} (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 20 ans et un taux de croissance du trafic de 2 %.

■ 6.4.2.3 - Paramètres de dimensionnement

En tant que matériaux naturels, les sols présentent une dispersion de leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques plus forte que les produits industriels que sont les matériaux d'assises classiques. Une certaine prudence s'impose donc pour leur dimensionnement, qui se concrétise par des abattements sur les performances mécaniques mesurées en laboratoire.

Les valeurs à prendre spécifiquement pour les sols traités sont les suivantes :

- relation pour passer de R_t à σ_6 : $\sigma_6 = 0,95 R_t$;
- pente de la droite de fatigue : $\frac{1}{b} = - 11$;
- 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 ;
- écart-type sur les épaisseurs S_h : indiqué dans le tableau 33 ;

Tableau 33 : écarts types sur les épaisseurs S_h

Type de traitement Type de matériaux	Matériaux rapportés	Matériaux traités en place
Sols fins ou sableux	2,5 cm	4 cm
Sols graveleux	3 cm	5 cm

- coefficient de calage, dans l'état actuel des connaissances : $K_c = 1,4$;
- risque de calcul : indiqué dans le tableau 34.

Tableau 34 : valeurs de risque en fonction du trafic cumulé et du type de structure

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 %

6.4.2.4 - Vérification au gel / dégel

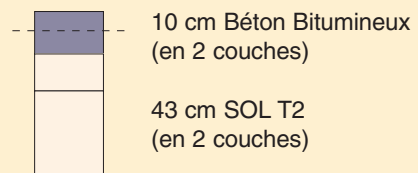
La démarche est effectuée conformément au Guide « Conception et dimensionnement » [9], en comparant l'indice de gel atmosphérique caractérisant l'hiver de référence et l'indice de gel admissible de la chaussée.

La non-gélivité du sol traité est en principe acquise dès lors que sa résistance en traction directe dépasse 0,20 MPa.

6.4.2.5 - Exemples de dimensionnement

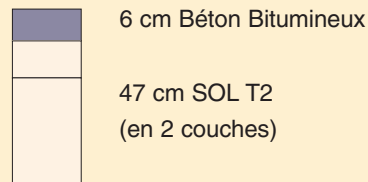
• Exemple n°1

- Plate forme PF2
- Trafic TC2 (NE = $0,2 \cdot 10^6$ Eq)
- Couche base et fondation en sol fin classe SOL T2
- Qualité du traitement AC1
- Performances :
 $E = 4\,000 \text{ MPa} \times 0,75 = 3\,000 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,44 \times 0,75 \times 0,95 = 0,31 \text{ MPa}$
- Pente droite fatigue : $1/b = -11$ Écart type fatigue : SN = 0,8
- Écart type épaisseur Sh = 0,025
- Coefficient de calage : Kc = 1,4
- Risque : 12,5 %
- Interfaces : fondation / plate forme : collée
base / fondation : semi-collée
couche de surface / base : semi-collée
- Dimensionnement par Alizé



• Exemple n° 2

- Plate forme PF1
- Trafic TC1 ($NE = 0,1 \cdot 10^6$ Eq)
- Base et de fondation en sol fin classe SOL T2
- Qualité du traitement AC2
- Performances :
 $E = 4\,000 \text{ MPa} \times 0,65 = 2\,600 \text{ MPa}$ $\sigma_6 = 0,44 \times 0,65 \times 0,95 = 0,27 \text{ MPa}$
- Pente droite fatigue, écart type fatigue, coefficient de calage, hypothèses d'interfaces : identiques à l'exemple n°1
- Écart type épaisseur : $Sh = 0,04$
- Coefficient de calage : $Kc = 1,4$
- Risque : 20 %
- Dimensionnement par Alizé



6.5 Réalisation des assises en sol traité

Qu'il s'agisse de couches d'assises ou de couche de forme, les opérations de fabrication et de mise en œuvre sont très semblables. Les différences proviennent essentiellement d'exigences plus sévères pour les assises, en matière d'homogénéité, de précision de dosage et de compacité.

6.5.1 - Ordonnancement des opérations

La succession des tâches élémentaires dans trois cas de chantier est schématisée par la figure 13, page 110.

6.5.2 - Préparation du sol

Cette phase du chantier est fondamentale, pour améliorer l'homogénéité du matériau et l'amener à un état facilitant son malaxage.

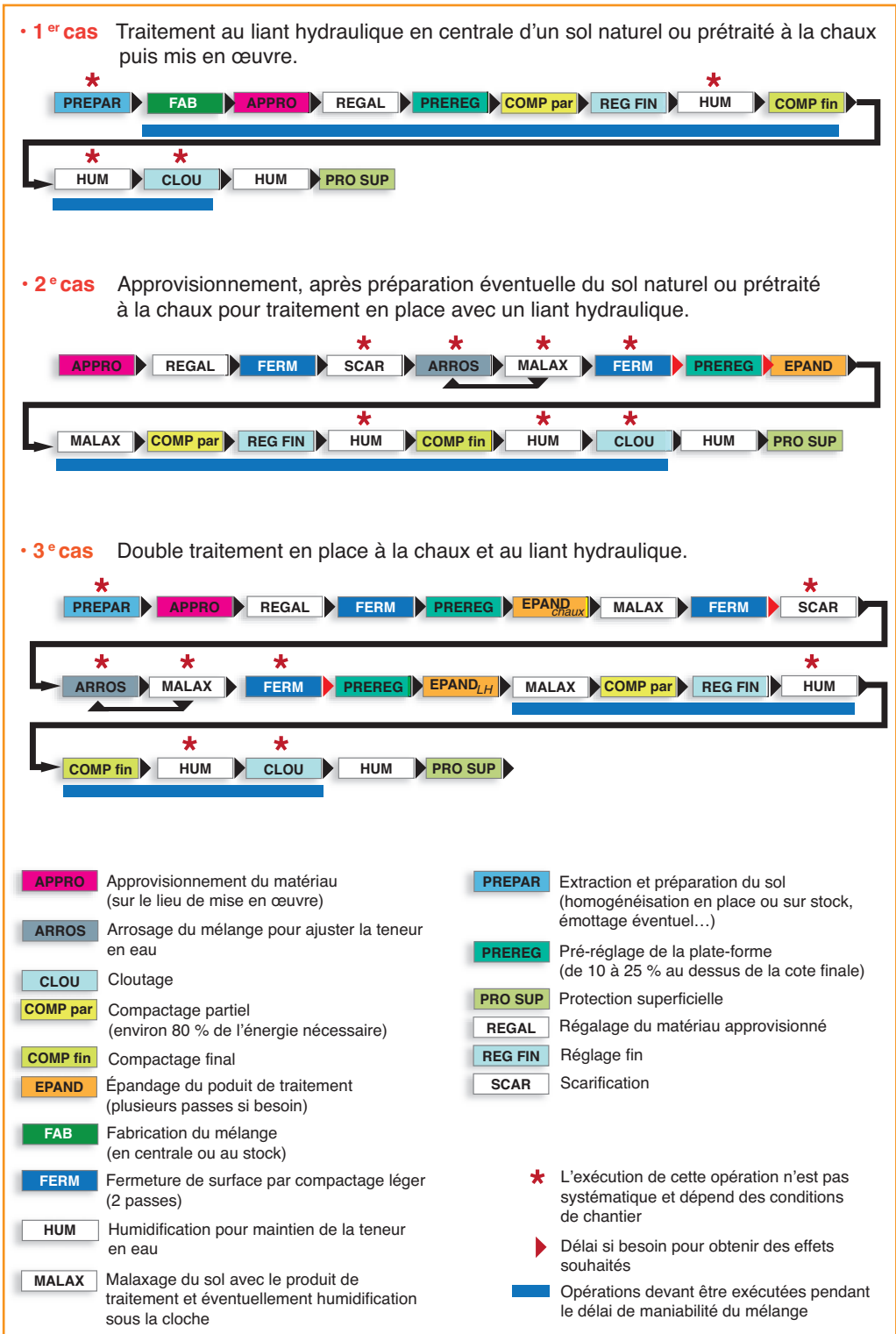


Figure 13: ordonnancement des opérations pour trois cas de chantier d'assises [3]

■ 6.5.2.1 - Tri des matériaux

Il s'agit d'éliminer toutes les inclusions gênantes qui pourraient exister dans le gisement. Un stockage intermédiaire pourra s'avérer nécessaire.

■ 6.5.2.2 - Écrêtement du sol

Les critères de granularité maximale sont, rappelons-le, 100 % passant à 31,5 mm et 80 % à 20 mm (cf. §6.1.1). Selon la nature du sol, on aura recours à une ou plusieurs des méthodes ci-dessous :

- criblage,
- décohesion à la charrue, afin de faire remonter les blocs et gros cailloux, qui sont ensuite ramassés, puis éventuellement concassés et réincorporés,
- réduction *in situ* à l'aide de matériels spécifiques.

■ 6.5.2.3 - Prétraitement à la chaux

Le prétraitement peut avoir lieu soit au déblai, soit sur dépôt provisoire, soit à la mise en œuvre. Il s'effectue au pulvimalaxeur, en visant la mouture la plus fine possible (20 mm au plus pour les mottes résiduelles). L'épandeur doit être asservi, avec une exactitude $e \leq 5\%$ et un coefficient de variation $C_v \leq 10\%$.

La teneur en eau est, si nécessaire, ajustée au cours du prétraitement. Le sol prétraité voit sa surface fermée par compactage. Après prétraitement, un délai minimum de 12 heures doit être respecté avant traitement au liant hydraulique.

■ 6.5.2.4 - Constitution des stocks et reprise

Ces opérations sont susceptibles d'améliorer notablement l'homogénéité d'un sol. La méthode de reprise est à adapter au type de stockage. Si le stock a été monté par couches peu épaisses (≤ 60 cm), on pratique une reprise frontale à la pelle ou au chargeur. Inversement, si le stock a été formé par tas jointifs de forte épaisseur, la reprise s'effectue préférentiellement par passes horizontales de faible épaisseur, par exemple à la décapeuse. Il faut veiller, dans tous les cas à protéger le stock de toute pollution par les éléments extérieurs, à drainer les aires de stockage et à éviter toute ségrégation des matériaux granulaires (forme, hauteur des tas, méthode de déversement).

■ 6.5.2.5 - Humidification

L'objectif est d'amener la teneur en eau **dans toute la masse du sol** à une valeur uniforme ne s'écartant pas de plus de 1 % de la teneur en eau retenue par l'étude.

L'opération peut s'effectuer au cours du stockage-reprise, avant malaxage (et éventuellement en cours de malaxage en place).

Chaque passe d'humidification doit avoir lieu sur matériau préalablement scarifié. On introduit au maximum 2 points de teneur en eau par passe. Le matériau humidifié doit ensuite être malaxé sur toute son épaisseur. L'apport d'eau doit être précisément maîtrisé, ce qui impose l'emploi de pompes à débit asservi à la vitesse d'avancement, débitmètres et systèmes de régulation transversale de l'arrosage. Le meilleur système est celui de l'arrosage par enfouissement. Les arroseuses avec dispositif de type « queue de carpe » sont interdites.

Les critères de notation pour les arroseuses sont indiqués dans le tableau 35.

Tableau 35: notation des critères pour les arroseuses				
Critère		Note des critères pour l'arrosage		
		3	2	1
W	Type d'arroseuse	Enfouisseuse	Rampe à jets fins	Queue de carpe

Le délai minimum entre deux séquences d'humidification / malaxage est de 4 heures pour les sols A₁-A₂, 2 heures pour les B₅-B₆, 30 minutes pour les B₂, B₄, afin de garantir la diffusion uniforme de l'eau.

■ 6.5.2.6 - Convenance des méthodes retenues

Toutes les procédures de préparation des sols doivent faire l'objet d'épreuves de convenance, afin de prouver que les objectifs d'homogénéité sont atteints.

6.5.3 - Niveaux de matériels et de qualités de traitement

■ 6.5.3.1 - Matériel d'apport de liant

Pour le traitement en place, ainsi que pour le prétraitement à la chaux, le liant peut être soit épandu sous forme pulvérulente, soit injecté dans la chambre de malaxage sous forme de suspension aqueuse. **L'épandage de liant pulvérulent s'effectue exclusivement à l'aide**



d'épandeurs dont le dosage est asservi à la vitesse d'avancement. Seuls les épandeurs notés 3 ou 2 (cf. tableau 4, page 27) sont autorisés.

Pour la fabrication en centrale, l'apport de liant se fait, à partir du silo, par extracteur à vis **avec contrôle pondéral**.

■ 6.5.3.2 - Matériel de malaxage

Le malaxage en place est réalisé uniquement avec des pulvimalaxeurs ayant reçu la note 2 ou 3 (voir tableau 5, page 32) et une exactitude $e \leq 5\%$.

Selon les systèmes de dosage, de contrôle et d'asservissement qu'elles comportent, les centrales de fabrication peuvent être classées selon deux niveaux, comme indiqué dans le tableau 36, le niveau 2 étant plus performant que le niveau 1.



Tableau 36: 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 98-732-1 [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.

6.5.3.3 - Niveaux de qualité de traitement

Selon les performances (notations) des matériels utilisés, deux niveaux de qualité de traitement (AC) sont définis. Le niveau AC1 (supérieur à AC2) impose l'emploi de matériels ayant au moins les caractéristiques données dans le tableau 37 ; le niveau AC2 correspond à celles du tableau 38.

Tableau 37: 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.

■ Niveau exigé

■ Niveau non autorisé

Tableau 38: définition du niveau de qualité de traitement AC2

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.

■ Niveau exigé

■ Niveau non autorisé

6.5.4 - Malaxage en place

Sauf exception, il est réalisé à l'emplacement définitif du matériau, plutôt qu'en emprunt ou sur stock, cette façon de faire produisant une meilleure régularité de travail. Si nécessaire, la teneur en eau fait l'objet d'un ajustement final en cours de malaxage.

6.5.5 - Fabrication en centrale

Le cas échéant, les mottes ou agglomérats pouvant subsister sont éliminés juste avant mise en trémie par écrasement, passage à l'émetteur et/ou criblage. L'installation de cribles sur trémies est un moyen efficace d'éliminer en même temps les cailloux trop grossiers. Comme souligné en 3.5, la centrale doit être aménagée pour assurer le bon écoulement des sols gardant un caractère collant. Elle doit aussi être réglée pour une teneur en liant très élevée et, généralement, une densité relativement faible du matériau.

6.5.6 - Mise en œuvre

Les différentes opérations sont globalement semblables à celles concernant les couches de forme (cf. 5.6.7). Les tolérances de nivellement sont :

- **couche de fondation : ± 3 cm ;**
- **couche de base : ± 2 cm.**

6.5.7 - Compactage

Les indications données en 5.6.6 restent valables pour les couches d'assises. Toutefois, il n'existe pas, au moment de la présente rédaction, de spécification générale pour la qualité de compactage à exiger pour les assises en sol traité.

On notera néanmoins que :

- **l'objectif de densification ne saurait être inférieur à q3 ;**
- **il est fortement recommandé de viser un objectif plus élevé, par exemple :
masse volumique apparente sèche moyenne pour l'ensemble de la couche**

$$\rho_{dm} \geq 100 \% (\rho_d)_{OPN}$$

En cas d'incertitude, l'objectif de densification sera précisé à l'issue de planches d'essai réalisées avant ou en début de chantier.



6.5.8 - Cloutage

On se référera au 5.6.8 concernant les couches de forme.

6.5.9 - Protection superficielle

Les différents types de protection superficielle possibles sont :

- l’enduit de scellement (ES) ;
- l’enduit monocouche (EM) ;
- l’enduit bicouche (EB) ;
- l’enduit prégravillonné (EP) ;

dont les formulations sont données en figure 11, page 88.

La protection minimale nécessaire est déterminée en fonction de deux paramètres :

- le niveau d’agressivité du trafic (tableau 16, page 89) ;
- le niveau d’exposition climatique (tableau 17, page 89).

Les protections à appliquer respectivement sur couche de fondation et sur couche de base sont indiquées dans les tableaux 39 et 40.

Tableau 39: types de protection superficielle à appliquer sur une couche de fondation en sol traité

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**

* Sur sols graveleux

** Sur sols sableux non cloutés

Tableau 40: types de protection superficielle à appliquer sur une couche de base en sol traité

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

** Sur sols sableux non cloutés

Il est rappelé qu’une pulvérisation d’eau est indispensable préalablement à tout épandage d’émulsion de bitume. Par ailleurs, la circulation ne doit pas être admise avant que le matériau traité ait atteint une résistance minimale (voir 6.1.3.3).

Chapitre

7

Exemple de dimensionnement

7.1 Évaluation du trafic cumulé « TC »

7.2 La plate-forme support de chaussée

7.3 Détermination de la structure

Ce chapitre est destiné à familiariser le lecteur avec l'utilisation de la méthode de dimensionnement des structures de chaussées en sols traités exposés dans le présent guide. Ce chapitre présente donc un projet fictif, mais aussi réaliste que possible, qui constitue ainsi un cas d'école. Ce projet est rédigé avec le souci d'être le plus complet possible et d'illustrer les cas extrêmes quant aux choix à opérer sur les différents paramètres d'entrée.

Une commune rurale, d'environ 7000 habitants, dispose sur son territoire d'une carrière produisant annuellement cinq cent mille tonnes de granulats. Le développement constant de cette activité contribue certes au dynamisme de l'économie locale, mais il entraîne aussi une importante circulation de poids lourds sur la route départementale traversant la commune. Ce qui génère une nuisance sonore jugée insupportable par les riverains. La création d'une nouvelle route de 5 km de longueur et de 7,50 m de largeur, pour détourner le trafic poids lourds vers une voie express existante, s'imposait donc. Regroupant cinq communes, le district urbain finance ces travaux avec l'aide du Conseil général, de l'État et de l'Union européenne. On se propose donc, en suivant la démarche indiquée au chapitre 6 du présent guide, de définir la structure de la chaussée à construire.

7.1 Évaluation du trafic cumulé « TC »

On recherche d'abord le trafic à la mise en service « t », puis le trafic cumulé « TC ».

7.1.1 - Trafic à la mise en service « t »

Les comptages réalisés sur la route départementale traversant la commune donnent une estimation du nombre de poids lourds d'un poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t qui vont circuler sur la future déviation. Ces comptages ont été effectués durant le mois de mars pendant quinze jours consécutifs, sur un sens de circulation, donnant un chiffre de 95 poids lourds par jour et par sens.

7.1.2 - Trafic moyen journalier annuel (MJA) à la mise en service

Il s'agit d'apporter ici les corrections au trafic obtenu par comptage. On estime que pendant les mois de décembre, janvier et février, le trafic lourd généré par la carrière diminue de 50 % par rapport à celui de mars pris pour référence. Par ailleurs, le transport lié à l'activité agricole, qui se concentre sur les mois d'octobre et novembre, engendre durant cette période un trafic poids lourds trois fois supérieur à celui du mois de mars. Le trafic moyen journalier annuel (MJA) de l'année de comptage est alors :

$$\text{MJA} = 95 \text{ PL} (7 \text{ mois} \times 1 + 2 \text{ mois} \times 3 + 3 \text{ mois} \times 0,50) \times 30/365$$

$$\text{MJA} = 113,22 \text{ PL soit } 114 \text{ PL/j/sens}$$

$$\text{D'où MJA} = 114 \text{ PL/j/sens.}$$

On prévoit que la mise en service de la route aura lieu au printemps de l'année suivant celle du comptage. On estime, d'autre part, que la croissance du trafic liée à l'activité de la carrière et à l'activité agricole est de l'ordre de 2 % par an. Le trafic MJA à la mise en service sera donc :

$$\text{MJA} = 114 \times 1,02$$

$$\text{MJA} = 116 \text{ PL/j/sens}$$

$$\text{Soit MJA} = 116 \text{ PL/j/sens.}$$

7.1.3 - Trafic « t » à la mise en service

L'expression du trafic à la mise en service est :

$$t = \text{MJA} \times R$$

où R est un coefficient de pondération lié à la largeur utile de la route. Il prend en compte le recouvrement des bandes de roulement dans le cas des chaussées bidirectionnelles à largeur réduite. Or, dans le présent projet, la chaussée est bidirectionnelle mais sa largeur est égale à 7,50 m. Donc, il n'y a pas normalement de recouvrement des bandes de roulement, et par suite :

$$R = 1$$

$$\text{D'où : } t = \text{MJA}$$

$$t = 116 \text{ PL/j/sens}$$

7.1.4 - Détermination du trafic cumulé « TC »

L'expression du trafic cumulé s'écrit :

$$\text{TC} = 365 \times t \times C$$

où t est le trafic journalier à la mise en service

et C est le facteur de cumul développé et qui s'exprime par :

$$C = \frac{[(1 + r_1)^{n_1} - 1]}{r_1} + (1 + r_1)^{n_1} \frac{[(1 + r_2)^{n_2} - 1]}{r_2}$$

En ce qui concerne la période de service, on a retenu pour ce projet une durée de 20 ans.

En matière de taux annuel de croissance du trafic, on a pris les hypothèses suivantes :

- un taux de 2 % pendant les 10 premières années ;
- un taux de 3 % pour la période s'étalant entre la 11^e et la 20^e année.

En appliquant l'expression du facteur de cumul « C », on obtient :

$$C (1 \rightarrow 20 \text{ ans}) = C_1 (1 \rightarrow 10 \text{ ans}) + 1,02^{10} \times C_2 (11 \rightarrow 20 \text{ ans})$$

$$C = \frac{[(1 + 0,02)^{10} - 1]}{0,02} + (1,02)^{10} \frac{[(1 + 0,03)^{10} - 1]}{0,03}$$

$$C = 24,90$$

Le trafic cumulé sur 20 ans est alors :

$$TC = 365 \times t \times C$$

$$TC = 365 \times 116 \times 24,90$$

$$\text{Soit : } 1\,054\,266 \text{ PL/sens}$$

avec PL est un poids lourd de poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 t.

Le trafic cumulé peut aussi être exprimé en nombre d'essieux standards :

$$NE = TC (\text{PL}) \times \text{CAM}$$

Pour les structures en sols traités et pour des routes dont le trafic est inférieur à 150 PL/jour, le CAM est égal à 0,7. D'où :

$$NE = 1\,054\,266 \times 0,7$$

$$\text{NE} = \mathbf{737\,987 \text{ Essieux Standards.}}$$

7.2 La plate-forme support de chaussée

Le tracé projeté a une longueur de 5 km, la ligne rouge est située au niveau du terrain naturel. On recherche, tout d'abord, la portance à long terme des sols qui seront mis à nu par les terrassements, puis la portance de la plate-forme en tenant compte des améliorations projetées (traitement des sols en place ou couche de forme).

7.2.1 - Portance du sol à long terme

■ 7.2.1.1 - Identification du sol

Une reconnaissance sommaire sur le terrain a permis de constater l'existence de matériaux hétérogènes : sols fins et sable avec des fines plastiques. Les essais d'identification réalisés sur des échantillons de ces sols ont montré qu'il s'agit de sols de types A_2 et B_6 , selon la classification géotechnique du GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme).

■ 7.2.1.2 - Détermination de la PST

Le fascicule 1 du GTR permet de déterminer la classe de la PST (partie supérieure de terrassements) et la classe de l'arase (AR). La PST en sols A_2 – matériaux sensibles à l'eau et de mauvaise portance – se situe à plusieurs mètres au-dessus du niveau de la nappe. Il n'y a donc pas de risque de remontée d'eau. Mais des infiltrations sont toutefois possibles. Le fascicule 1 du GTR permet de définir cette PST par : (PST 1 - AR 1).

Cette PST risque de présenter une portance insuffisante au moment de l'exécution de la couche de forme qui aura lieu probablement en automne. Il a été donc décidé d'améliorer le sol A_2 sur 0,5 m d'épaisseur par un traitement à la chaux vive et selon une technique remblai. Dans ces conditions, la PST en sols A_2 traités devient : (PST 3 - AR 1).

La PST en sols B_6 – matériaux sensibles à l'eau et de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme – est définie par le fascicule 1 du GTR par : (PST 2 - AR 1).

Cette PST se situe à moins d'un mètre au-dessus du niveau de la nappe. Il y a donc un risque important de voir la portance de cette PST chuter à long terme sous l'action de la remontée de la nappe et des infiltrations d'eaux pluviales. Il a donc été décidé de réaliser un rabattement de la nappe à une profondeur de plusieurs mètres. Dans ces conditions, la PST en sols B_6 devient : (PST 3 - AR 1).

7.2.2 - Détermination de la classe de la plate-forme

Pour tout l'itinéraire, nous nous sommes placés dans le cas de (PST 3 - AR 3). Le GTR précise que, dans de telles conditions, il est presque toujours nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme. Celle-ci est envisagée sous forme de

traitement des sols A_2 et B_6 avec un liant hydraulique routier afin d'atteindre une plate-forme de classe PF3.

L'épaisseur de la couche de forme traitée est de 50 cm. Elle sera réalisée en deux couches.

7.3 Détermination de la structure

7.3.1 - Données de trafic

Pour le projet étudié, nous avons évalué le trafic cumulé qui s'élève à :
TC3 = 1 054 266 poids lourds ou 737 987 essieux standards.

7.3.2 - Spécification matériaux

■ 7.3.2.1 - Sols fins traités en place

Les caractéristiques mécaniques prises en compte dans le dimensionnement pour les sols fins traités sont celles du catalogue des structures pour l'Île-de-France.

L'étude de laboratoire a donné :

$$\text{Module } E = 4\,615 \text{ MPa}$$

$$\sigma_6 = 0,46 \text{ MPa}$$

Après abattement de 35 %, prenant en compte les différences de performances entre l'étude de laboratoire et les performances chantiers, conformément au guide CFTR [3], cela donne les paramètres de dimensionnement suivants :

$$\text{Module } E = 3\,000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_6 = 0,30 \text{ MPa}$$

■ 7.3.2.2 - Sols fins traités en centrale

Pour le traitement des sols fins traités en centrale, le catalogue de structures de chaussées pour l'Ile-de-France indique :

$$\text{Module } E = 4000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_6 = 0,40 \text{ MPa}$$

Le coefficient de Poisson sera pris à 0,25 pour les sols traités en place ou en centrale.

	Sols traités en place	Sols traités en centrale
Pente inverse 1/b	-11	-11
Écart type fatigue Sh	0,8	0,8
Écart type épaisseur SN	0,04	0,025
Coefficient du catalogue 1/Kd	1,4	1,4

Les autres paramètres de dimensionnement sont les suivants :

- la structure de chaussée est assimilée à une structure semi-rigide ;
- le niveau de risque choisi est celui du Guide 2007 « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » [2] ;
- le risque « r » correspond au taux de dégradation calculé de la chaussée pour la durée de service retenue, si aucun entretien ni renforcement ne sont réalisés sur cette période :

$$r = 10 \% \text{ pour TC}_3$$

■ 7.3.2.3 - Matériaux bitumineux

Les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux prises pour le dimensionnement sont conformes aux normes en vigueur pour :

- BBSG: NFP 98.130 / NF EN 13108-1
- GB: NFP 98.138 / NF EN 13108-1

Soit :

- E (BBSG) = 5 400 MPa
- E (GB) : 9 300 MPa

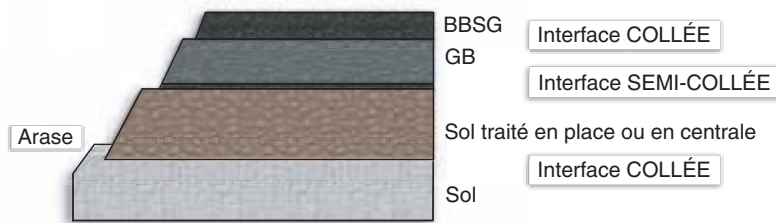
Les structures sont optimisées par rapport aux épaisseurs minimums, respectivement 6 cm pour les GB et 5 cm pour les BBSG.

7.3.3 - Hypothèses d'interface

Les conditions d'interface prises pour ces dimensionnements sont conformes aux exigences du GTS [2]:

- interface GB/BB considérée comme collée;
- interface GB ou BBSG sur assises traitées considérée comme semi-collée;
- interface couche de fondation en sol traité sur arase considérée comme collée.

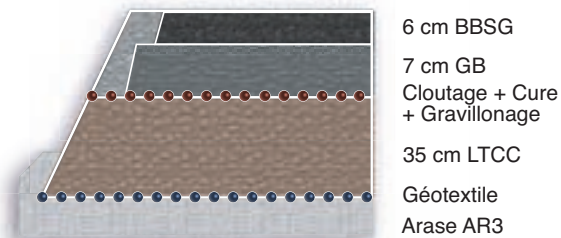
Les structures de chaussées peuvent alors être modélisées de la manière suivante:



7.3.4 - Dimensionnement de la structure

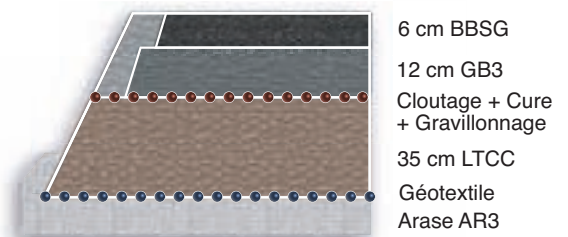
SOLS TRAITÉS EN CENTRALE
TC₃-RD

σ_t admissible	0,46 MPa
-----------------------	----------



SOLS TRAITÉS EN PLACE
TC₃-RD

σ_t admissible	0,30 MPa
-----------------------	----------



Assurance de la qualité

- 8.1 Objectifs essentiels de l'assurance qualité**
- 8.2 Actions et documents d'assurance de la qualité (généralités)**
- 8.3 Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour le traitement du sol pour terrassements (remblais et fond de déblais)**
- 8.4 Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour les couches de forme en sol traité**
- 8.5 Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour les couches d'assises en sol traité**

Pour un traitement de sol, comme pour toute opération de construction, l'obtention de la qualité requise est un impératif. La mise en place d'un système d'assurance de la qualité est d'autant plus nécessaire qu'un traitement de sol est – normalement – confronté à quelques aléas qu'il s'agit de maîtriser. **Ces aléas** tiennent d'abord au fait que le matériau de départ est un **matériau naturel**, dont les caractéristiques sont au mieux dispersées, au pire variables. Un autre type d'aléa provient des **conditions météorologiques** régnant au cours du chantier. En outre, **si le traitement est réalisé avec malaxage en place**, certains paramètres (finesse, dosages, épaisseurs) présentent une dispersion relativement élevée dans certains cas. Bien entendu, les aléas les plus élevés correspondent aux opérations de construction de remblais et les plus modérés aux couches d'assises.

Par ailleurs, il faut souligner que le management de la qualité doit démarrer bien avant le démarrage du chantier, dès les campagnes de reconnaissance et la conception du projet.

8.1 Objectifs essentiels de l'assurance qualité

Les principaux buts de l'assurance qualité en matière de traitement du sol peuvent être résumés comme suit.

a) Garantir partout l'obtention des performances minimales visées

Selon les cas, les caractéristiques concernées sont la portance immédiate, le module à court ou long terme, la résistance à la compression ou à la traction, etc. Le jugement du résultat s'appuie sur l'évaluation statistique des mesures de contrôle, prenant ainsi en compte leur dispersion (attendue). Les performances géométriques (épaisseurs, nivellement, pentes) entrent également en ligne de compte.

b) Aider à gérer au mieux les aléas

L'objectif est de réagir en temps réel et de manière optimale à des variations de l'état du sol et à des événements météorologiques, de sorte à :

- maîtriser les délais d'exécution ;
- optimiser la consommation de liant(s).

b) Contribuer à la préservation de l'environnement

Plusieurs actions peuvent concourir à atteindre ce but : réduction ou élimination des mises en décharges, optimisation de la consommation de liant, adaptation des procédures de malaxage et de compactage, réduction ou suppression des émissions de poussière.

8.2 Actions et documents d'assurance de la qualité (généralités)

8.2.1 - Variantes contractuelles

La nature du marché conditionne l'architecture du système qualité du projet. Selon le type de marché donné (appel d'offres classique, ouverture aux variantes, concours, concession, partenariat public-privé), les dispositions contractuelles réservent une place plus ou moins étendue aux choix techniques faits par l'entreprise. Cette liberté est quasi-nulle dans le cadre de certains marchés, dans lesquels toutes les stipulations sont du ressort du maître d'œuvre, l'entreprise étant alors réduite à un simple rôle d'exécutant. À l'inverse, d'autres types de marché accordent une grande place aux initiatives de l'entreprise, les cas extrêmes étant ceux de la concession ou du partenariat dans lesquels l'entrepreneur est concepteur, et maître de ses options techniques avec obligation de résultats en termes de niveaux de service de l'ouvrage. Depuis des années, la tendance est clairement à une ouverture aux initiatives – et à la responsabilisation – de l'entreprise. **Le système d'assurance de la qualité est bâti en fonction du cadre contractuel dans lequel il doit s'appliquer.**

8.2.2 - Actions et documents

Les premiers documents sur lesquels se fonde le système d'assurance qualité du chantier sont les **Manuels Qualité** des différents intervenants : **entreprise, sous-traitants, fournisseurs** et aussi – il faut le souligner – **maître d'œuvre**, ainsi que, le cas échéant, le ou les contrôleurs extérieurs. Pour obtenir une qualité totale, il est essentiel que tous les acteurs soient impliqués, et ceci dès le début même de la conception.

La démarche qualité se concrétise, pour le projet considéré, par le **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ)** qui, comme souligné plus haut, doit impliquer tous les intervenants sans exception. Les PAQ décrivent avec précision les méthodes et procédures à appliquer, par exemple :

- la manière d'organiser les épreuves de convenance ;
- l'organisation de chantier (organigrammes, ordonnancement des tâches, etc.) ;
- les modalités d'exécution des différentes tâches, y compris la définition des matériels nécessaires ;
- les procédures de détection et de corrections des anomalies ;
- la traçabilité des différentes informations.

Le Schéma Directeur de la Qualité (SDQ) coiffe l'ensemble des PAQ, en mettant en cohérence les diverses actions prévues. L'ensemble de la démarche aboutit, de manière non exhaustive, à la production :

- du Plan de contrôle ;
- de la liste des situations considérées comme des points sensibles pour le déroulement du chantier ;
- de la liste des points d'arrêt ;
- de la définition éventuelle de la façon de traiter certains problèmes ou situations spécifiques au chantier considéré.

La synthèse des actions qualité est incluse dans le dossier de récolement du chantier.

8.3 Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour le traitement du sol pour terrassements (remblais et fond de déblais)

Il s'agit là d'opérations à fort potentiel d'aléas, vis-à-vis desquels il faut être à même de réagir instantanément et efficacement. La gestion des aléas et la rémunération des opérations permettant de les surmonter font l'objet de clauses contractuelles spécifiques. Trois types de contrat sont possibles à cet égard :

- a) l'entrepreneur fait son affaire des mesures à prendre et est payé en fonction du volume mis en œuvre, toutes sujétions comprises,
- b) l'entrepreneur étudie les opérations spécifiques à réaliser et les soumet à l'approbation du maître d'œuvre. Il est ensuite rémunéré selon les quantités mises en œuvre (sols et liants),
- c) le maître d'œuvre détermine les mesures à prendre et les quantités correspondantes ; l'entreprise est rémunérée selon le bordereau de prix préétabli.

La consistance des actions d'assurance qualité et la rédaction des documents correspondants dépendent du mode de gestion/rémunération choisi.

8.3.1 - Actions de contrôle

Celles-ci sont décrites dans le paragraphe 1.6.2, page 76, du Guide GTS [2]. Certaines de ces actions sont détaillées dans les tableaux B - V, B - VI et B - VII de ce document.

8.3.2 - Points sensibles

Dans le cadre des terrassements, les points sensibles sont assez nombreux. Au niveau du traitement du sol, les principaux sont les suivants :

- caractéristiques du ou des liant(s) ;
- disponibilité de ces liants ;
- capacité de stockage du ou des liant(s) ;
- adéquation et performances du ou des épandeur(s) : débit, exactitude et précision du dosage, etc. ;
- adéquation et performances du ou des pulvimalaxeur(s) : puissance, maîtrise de l'épaisseur, finesse de mouture, exactitude et précision du dosage, etc. ;
- adéquation et performances des compacteurs : rendement, efficacité ;
- teneur en eau naturelle trop élevée ;
- teneur en eau naturelle trop basse ;
- argilosité excessive.

8.3.3 - Points d'arrêt

Les principaux points d'arrêt et les actions susceptibles de les lever sont listés ci-après :

- Vérification de la compacité
 - > si elle est insuffisante :
 - passes de compactage supplémentaires (dans le délai de maniabilité) ;
 - ajustement de la teneur en eau ;
 - éventuellement modification de l'atelier de compactage.
- Vérification de la portance immédiate
 - > si elle est insuffisante :
 - si possible remalaxage, retraitement et recompactage ;
 - sinon enlèvement et substitution.
- Prévision d'apparition de gel dangereux :
 - augmentation du dosage en liant et/ou emploi d'un liant à prise plus rapide ;
 - au pire, arrêt du chantier.
- Prévision d'un épisode de vent très fort : arrêt momentané du chantier.

8.3.4 - Dispositions pour la PST

Toutes les dispositions décrites plus haut sont applicables à la partie supérieure des terrassements. Viennent en plus :

- comme points sensibles, la tenue à l'eau du sol traité et la protection de la PST contre les effets du trafic de chantier ;
- comme point d'arrêt, la vérification du nivellement de la PST.

Si le nivellement n'est pas convenable, il faudra :

- soit retravailler le matériau (dans son délai de maniabilité) ;
- soit l'enlever et le remplacer ;
- soit revoir le dimensionnement des couches supérieures.

8.4 Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour les couches de forme en sol traité

Les exigences tant géotechniques que géométriques, sont à l'évidence plus sévères que dans les remblais et fond de déblais. Très schématiquement, trois aspects requièrent une attention supplémentaire : l'homogénéité du sol à traiter, les réglages topographiques (nivellement et épaisseur) et les performances mécaniques à long terme.

8.4.1 - Définition de la qualité requise

La qualité visée est formalisée par l'ensemble des spécifications (générales et particulières) définissant les résultats à obtenir. Selon le type de marché, cet ensemble peut éventuellement être accompagné de prescriptions portant sur les méthodes et moyens à utiliser. Un inventaire de stipulations applicables est indiqué dans les tableaux C 3-I, C3-II, et C 3-III, pages 148 à 155, du Manuel GTS [2].

8.4.2 - Plan de contrôle

Les différentes actions de contrôles et leurs méthodologies sont détaillées dans le volumineux tableau C 3-IV, pages 158 à 160 du Guide GTS [2].

8.4.3 Points sensibles

Compte tenu des rôles importants que joue la couche de forme, les exigences en matière de qualité sont sévères. Les points sensibles sont relativement nombreux.

- **Homogénéité du gisement de sol à traiter :** la reconnaissance du sol (sur le tracé ou en emprunt) doit être effectuée le plus tôt possible, afin de pouvoir boucler l'étude bien avant le début des travaux et, éventuellement, se retourner vers un autre gisement.
- **Caractéristiques du sol à traiter :** outre les propriétés géotechniques habituelles, l'aptitude du sol au traitement doit être soigneusement évaluée (ce qui constitue une étape-clé dans le choix du ou des liant(s)). La taille des plus gros éléments du sol doit, rappelons-le, être limitée en fonction du matériel de malaxage prévu (cf. § 5.6.2.2). La plage des teneurs en eau probables doit aussi être estimée.
- **Performances et disponibilité du ou des liant(s) :** en plus de l'évaluation des performances, il faut s'assurer que les quantités de liant(s) pouvant être nécessaires dans le cas le plus défavorable pourront être livrées dans les temps,
- **Capacité de stockage de ces liants.**

8.4.4 - Points d'arrêt

L'assurance de la qualité va de pair avec la gestion d'assez nombreux points d'arrêt. Les principaux sont décrits ci-après, avec les mesures pour les lever.



- Acceptation du ou des liant(s) fournis.
 - Évaluation du PAQ du ou des fournisseurs.
 - Essais de vérification de la conformité du ou des liant(s) approvisionnés sur le chantier : sur liant et sur mélange sol + liant.

- Acceptation des matériels (données constructeurs, état d'entretien, réglages, etc.), notamment :
 - du ou des épandeurs (débit, exactitude et précision des dosages) ;
 - du ou des pulvimalaxeurs (puissance, maîtrise de l'épaisseur, finesse de mouture, précision et exactitude des dosages en eau et en liant, etc.) ;
 - de la centrale (aptitude à passer le sol sans à coups, finesse de mouture, précision et exactitude des dosages, rendement, etc.) ;
 - des compacteurs (rendement, efficacité, etc.) ;
 - des autres engins (arroseuses, niveleuses, matériels d'enduisage, etc.).
 L'acceptation et les éventuelles modifications des matériels sont souvent décidées à l'issue d'une épreuve de convenance, pour les grands chantiers ou pour les traitements inédits.

- Acceptation des méthodes d'exécution.
Comme pour les matériels, l'acceptation des méthodes peut être décidée après épreuve(s) de convenance.

- Vérification de la compacité cf. § 8.3.3 ;

- Vérification de la portance immédiate cf. § 8.3.3 ;

- Prévision d'apparition de gel dangereux cf. § 8.3.3 ;

- Prévision d'un épisode de vent très fort (cas du malaxage en place) cf. § 8.3.3 ;

- Vérification du nivellement et de l'épaisseur. Si l'un des deux n'est pas conforme, on appliquera une des mesures citées au § 8.3.4 ;

- Vérification des performances mécaniques (mesures à la plaque ou déflexions + mesures de caractéristiques mécaniques sur prélèvements obtenus par carottage).

Ces vérifications ont lieu bien après la fin du délai de maniabilité. Si elles démontrent un niveau de performances insuffisant, le problème est épineux. On devra alors soit enlever le matériau non conforme et le remplacer, soit revoir à la hausse le dimensionnement des couches de chaussée.

- Vérification de la protection superficielle

Le trafic de chantier ne pourra être autorisé sur la couche de forme qu'à la double condition qu'elle ait reçu la protection superficielle prévue (et soigneusement appliquée) et que le sol traité ait atteint un niveau de résistance suffisant (cf. § 5.2.3.3 et 5.6.9). Rappel : la tenue de l'interface est un point critique.

8.5 Aspects spécifiques de l'assurance qualité pour les couches d'assises en sol traité

La démarche est, tant dans ses principes que dans son déroulement, la même que pour les couches de forme. Toutefois, les spécifications plus sévères en matière d'homogénéité du sol à traiter, de niveau de performances mécaniques, de faible dispersion des caractéristiques et de finesse du réglage conduisent à des exigences renforcées pour le système d'assurance de la qualité.

8.5.1 - Plan de contrôle

Les nombreuses actions de contrôle sont détaillées dans le très volumineux tableau 41 (pages 53 à 58) du Guide CFTR « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des assises de chaussée » [3].

8.5.2 - Points sensibles et point d'arrêt

Ils sont globalement les mêmes que pour une couche de forme, à deux exceptions près.

Le premier point concerne l'homogénéité du gisement de sol à traiter. La reconnaissance géotechnique de ce gisement doit s'effectuer bien avant le démarrage du traitement. De plus, les caractéristiques du sol doivent être vérifiées à l'avancement avant malaxage avec le liant. Il s'agit de s'assurer en permanence (et à temps) de la classification du sol, de sa classe d'homogénéité, de son état hydrique effectif et des volumes de matériau homogène disponibles. L'ensemble de ces vérifications peut être considéré comme point d'arrêt.

Le second a trait à la réalisation de la partie supérieure de la couche. Afin d'améliorer la tenue future de l'interface avec la couche supérieure (fondation ou base), il faut s'assurer que toutes les mesures sont prises pour :

- obtenir une compacité élevée, mais éviter (ou éliminer) le feuilletage : choix des compacteurs, plan de compactage, recoupe éventuelle ;
- régler et maintenir la teneur en eau dans la plage optimale, afin que la prise se développe correctement (arrosage, couche de cure) ;
- interdire la circulation du trafic de chantier tant que le matériau n'a pas suffisamment durci et que la couche de protection n'a pas été appliquée.



Chapitre

9

Conclusion

Les traitements de sols se sont considérablement développés lors des dernières décennies. Des améliorations marquantes ont accompagné – et favorisé – ce développement. Les premières concernent les matériels, et tout particulièrement les matériels de malaxage en place, qui ont considérablement progressé en termes de puissance et de précision. Les secondes résultent de la mise au point de liants hydrauliques routiers (LHR) spécialement adaptés.

En matière de terrassements, le recul est maintenant très important et le traitement de sol est devenu un réflexe dès lors qu'il faut passer dans des sols trop humides ou aux caractéristiques géotechniques insuffisantes.

Pour les couches de forme, le traitement de sol s'est imposé dans toutes les régions pauvres en matériaux graveleux de bonne qualité. Afin de tirer le meilleur parti des sols locaux, il est essentiel d'intégrer, dès le début de l'étude, la couche de forme dans la conception et le dimensionnement de l'ensemble de l'ouvrage.

Le retour d'expérience concernant les assises de chaussée en sols traités est encore limité. Le bilan à ce jour est généralement positif, mais certains points s'avèrent sensibles : tenue à l'eau, résistance au gel-dégel et, surtout, tenue des interfaces. Des progrès sont nécessaires pour garantir leur bon comportement. En tout état de cause, il convient de respecter strictement les limites d'emploi préconisées, en particulier, en terme de trafic admissible et d'épaisseur minimale pour la couverture en enrobés bitumineux.

Globalement, le traitement de sol est économiquement compétitif dans de nombreux cas. Il présente, de plus, de grands avantages vis-à-vis du développement durable : préservation des ressources et d'espaces naturels, diminution des transports et économie d'énergie. L'analyse du cycle de vie est de nature à étayer ce constat avec des évaluations quantifiées.



Chapitre

10 Annexes

10.1 Bibliographie

10.2 Normes

10.1 Bibliographie

- [1] *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)*, guide technique SETRA-LCPC, 2^e édition, 1992.
- [2] *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS)*, guide technique SETRA-LCPC, janvier 2000.
- [3] *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des assises de chaussées*, guide technique CFTR, septembre 2007.
- [4] *Manuel de conception des plates-formes autoroutières*, SCETAUROUTE, 1998.
- [5] *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes*, SCETAUROUTE, 2005.
- [6] « HOLE – Techniques particulières de terrassement pour la craie » *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées* n° 195, janvier-février 1995.
- [7] *Les routes en zones tropicales et désertiques - Tome II: Études techniques et construction*, BCEOM-CEBTP, 1991.
- [8] *Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic*, LCPC-SETRA, juillet 1981.
- [9] *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, Guide technique SETRA-LCPC, décembre 1994.

10.2 Normes

- NF P 11-300** Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d’infrastructures routière.
- NF P 15-108** Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité.
- NF P 18-576** Granulats. Mesure du coefficient de friabilité des sables.
- NF P 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.
- NF P 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.
- NF P 94-050** Sols – Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage.
- NF P 94-051** Sols – Reconnaissance et essais – Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- NF P 94-055** Sols – Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d’un sol – Méthode chimique.
- NF P 94-056** Sols – Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage.
- NF P 94-066** Sols – Reconnaissance et essais – Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.
- NF P 94-067** Sols – Reconnaissance et essais – Dégradabilité.
- NF P 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 matériau rocheux par l’essai à la tache.
- NF P 94-078** Sols – Reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Partant immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- NF P 94-093** Sols – Reconnaissance et essai de compactage Proctor – Détermination des références de compactage d’un matériau – Essai Proctor modifié – Essai Proctor normal.
- NF P 94-117-1** Sols – Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2).
- NF P 94-117-2** Sols – Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 2 : Module sous chargement dynamique.

- NF P 94-118 Chaussée – Terrassements – Exécution des terrassements – Caractérisation des sols en place – Essai à la dynaplaque.
- NF P 98-080 Chaussée – Terrassements – Dimensionnement – Partie 1 : Terminologie générale.
- NF P 98-082 Chaussée – Terrassements – Dimensionnement des chaussées routières – Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées.
- NF P 98-100 Assises de chaussées – Eau pour assises – Classification.
- NF P 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.
- NF P 98-114-1 Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 : Graves traités en liants hydrauliques.
- NF P 98-114-2 Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 2 : Sables traités en liants hydrauliques.
- NF P 98-114-3 Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 3 : Sols traités en liants hydrauliques associés à la chaux.
- NF P 98-115 Assises de chaussées – Exécution des corps de chaussées – Constituants – Composition des mélanges et formulation – Exécution et contrôle.
- NF P 98-200 Essais relatifs aux chaussées – Mesure de la déflexion.
- NF P 98-200-1 Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 1 : Définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques.
- NF P 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 déflectomètre Benkelman modifié.
- NF P 98-200-3 Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 3 : Détermination de la déflexion avec le déflectographe 02.
- NF P 98-200-4 Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 4 : Détermination de la déflexion avec le déflectographe 03.
- NF P 98-200-5 Essais relatifs aux chaussées. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 5 : Détermination de la déflexion avec le déflectographe 04.

- NF P 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.
- NF P 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.
- NF P 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.
- NF P 98-234-1** Essais relatifs aux chaussées – Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1: essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités.
- NF P 98-234-2** Essais relatifs aux chaussées – Comportement au gel – Partie 2: essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal 20 mm.
- NF P 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.
- NF P 98-276-2** Essais relatifs aux chaussées – Mesure du dosage en granulats d'un enduit superficiel – Partie 2: Détermination de la régularité transversale.
- NF P 98-701** Matériels pour la construction des routes – Centrales de traitement de matériaux – Terminologie et performances.
- NF P 98-705** Matériels de construction et d'entretien des routes – Compacteurs – Terminologies et spécifications commerciales.
- NF P 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.
- NF P 98-736** Matériels de construction et d'entretien des routes – Matériel de compactage – Classification.
- NF P 98-737** Matériels de construction et d'entretien des routes – Matériel de compactage – Évaluation.
- NF P 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.
- NF P 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.
- NF P 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.

- NF P 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.
- NF P 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.
- NF P 98-760 Matériels de construction et d'entretien des routes – Compacteurs à pneumatiques – Évaluation de la pression de contact au sol.
- NF P 98-761 Matériels de construction et d'entretien des routes – Compacteurs – Évaluation du moment d'excentrique.
- NF P 98-768 Chaussée – Terrassements – Qualification du matériel routier – Terminologie des matériels de compactage.
- NF P 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 spécification fonctionnelles. Partie 1 : Module pour la fabrication en continu.
- NF EN 197-1 Ciment – Partie 1 : Composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.
- NF EN 459-1 Chaux de construction – Partie 1 : Composition, spécification et critères de conformité.
- NF EN 459-2 Chaux de construction – Partie 2 : Essais de laboratoire.
- NF EN 933-9 Essais pour déterminer les caractéristiques géotechniques des granulats – Partie 9 : Qualification des fines. Essai au bleu de méthylène.
- 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)
- 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 (Los Angeles)
- NF EN 12271 Enduits superficiels – Spécifications.
- NF EN 13282-1 Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement rapide.
- NF EN 13282-2 Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement normal.

- 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.
- NF EN 13286-40** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 40 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-41** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 41 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-42** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 42 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-43** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 43 : Méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- 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.
- NF EN 13286-47** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 47 : Méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement.
- 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 aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-52** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 52 : Méthode de confection par vibrocompression des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 13286-53** Mélanges traités aux liants hydrauliques et non traités – Partie 53 : Méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.
- NF EN 14227-10** Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 10 : Sols traités au ciment.
- NF EN 14227-11** Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 11 : Sols traités à la chaux.
- NF EN 14227-13** Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 13 : Sols traités au liant hydraulique routier.
- XP P 18-545** Granulats – Éléments de définitions, conformité et codifications.

Illustration de la couverture

David Lozach

Crédit photographique

Colas, Eurovia, Quintoli, Razel,
Wirtgen... Tous droits réservés

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris

R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression

Gibert Clarey S.A.



CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10

E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr