

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir
LE DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Construction, Aménagement

OPTION : Aménagement

par

Isis BRABET

**LE TRAITEMENT DES SOLS POUR LA COUCHE DE FORME,
PLATEFORME DE CHAUSSEE**

Application à des projets de terrassement dans le département de l'Hérault

Soutenu le 21 JUIN 2012

JURY

PRESIDENT :	Francis GUILLEMARD	Professeur CNAM, Directeur ICENER
MEMBRES :	Denis FABRE	Professeur des Universités, CNAM
	Jean Sébastien VILLEFORT	Professeur agrégé CNAM
	Thierry GOSSELIN	Enseignant CNAM, Société INEXIA
	Ignace MISTRETTA	Société RAZEL-BEC
	Christian JOSSINET	Société EGSA BTP
	Camille BARRAL	Maître de conférences géotechniques CNAM

REMERCIEMENTS

Après un dur labeur de près de 5 ans, c'est avec une certaine émotion que j'évoque avec reconnaissance tous ceux qui ont accompagné, guidé, encouragé mes efforts de leur compétence bienveillante.

En réalité sans eux, sans leur rencontre, cette tâche aurait été stérile car dénuée de l'humanité nécessaire à tout apprentissage, ce qui l'aurait rendue extrêmement rude, voire impossible, mais surtout austère, privée de liens de travail chaleureux.

Merci à M. le professeur Denis FABRE, pour son investissement patient et appliqué afin de me guider au mieux dans la rédaction de ce mémoire.

Merci à M. GUILLEMARD, Directeur de l'ICENER, M. VILLEFORT, professeur au CEP et M. GOSCELIN de la société INEXIA, d'avoir accepté de s'intéresser à ce travail et de le juger.

Merci à M. MISTRETTA, directeur du laboratoire géotechnique de RAZEL-BEC, et M. JOSSINET, directeur général d'EGSA BTP, de m'apporter le regard et jugement d'hommes de terrains, et d'avoir bien voulu accepter la tâche de rapporteur de ce mémoire.

Je me permets une mention particulière pour M. Ignace MISTRETTA, aîné dans les promotions d'ingénieur CNAM, dont la rencontre fut décisive car le concours de son professionnalisme m'insuffla un élan supplémentaire, une motivation qui m'aida à terminer ce travail de mémoire.

Merci aux entreprises de TP qui m'ont fourni les informations nécessaires pour établir ce mémoire, sans lesquelles d'ailleurs, il ne serait pas. Je ne peux les nommer car j'ai promis la confidentialité des sources mais je leurs suis sincèrement reconnaissante.

Je remercie également mon employeur, ingénieur conseil DETP, M. CARTIER, sans qui tout cela n'aurait été possible car il a eu l'élégance de m'accueillir au sein de son cabinet tout en me permettant de me former à sa profession d'ingénieur.

Je remercie Bernard BRABET, mon oncle, ingénieur diplômé de l'école Centrale et PDG de l'entreprise de téléunion ADUNO, qui a recadré ma réflexion au moment où je m'égarais dans les limbes de mes recherches.

Merci également à Jean-Paul et Antoinette ESCANDE pour leur accueil familial lors de mes passages à Paris tout au long de mes études d'ingénierie.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents pour leur soutien, leur patience et leurs encouragements.

LISTE DES ABREVIATIONS

SETRA : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

CFTR : Comité français pour les techniques routières

CETE : Centre d'études techniques de l'Équipement

GTR : Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de forme

GTS : Guide technique du traitement de sol des remblais et couches de forme

PST : Partie supérieure des terrassements

CDF : Couche de forme

AR : Arase

PF : Plateforme

LH : liant hydraulique

LHR : liant hydraulique routier

LSR : liants spéciaux routiers

GNT : grave non traitée

GB : grave bitume

GC : grave ciment

GLR : grave liant routier

GCH : grave cendres hydrauliques

GLp : grave laitier prébroyé

GLg : grave laitier granulé

GCV : grave cendres volantes

SL : sable laitier

SC : sable ciment

MTLH : matériau traité au liant hydraulique

EME : enrobé à module élevé

BB : béton bitumineux

BBSG : béton bitumineux semi grenu

BBME : béton bitumineux module élevé

BBM : béton bitumineux mince

BBTM : béton bitumineux très mince

BBUM : béton bitumineux ultra mince

BBD_r : béton bitumineux drainant

ES : enduit superficiel

PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES

IP → indice de plasticité

IC → indice de consistance

IPI → indice portant immédiat

OPN → Optimum Proctor Normal

OPM → Optimum Proctor Modifié

CBR → indice portant californien (California Bearing Ratio)

w_{nat} → teneur en eau naturelle du sol

w_P → teneur en eau à la limite de plasticité du sol

w_L → teneur eau à la limite de liquidité du sol

VBS → valeur au bleu de méthylène

ES → équivalent de sable (ancien paramètre de la RTR, conservé pour référence)

LA → coefficient de Los Angeles

MDE → coefficient micro Deval en présence d'eau

FS → coefficient de friabilité des sables

FR → coefficient de fragmentabilité

DG → coefficient de dégradabilité

φ' → angle de frottement interne du sol (conditions drainées)

ρ_d → masse volumique sèche

γ_d → poids volumique sec

E → module de déformation du matériau

ε → déformation

σ → contrainte

σ_6 → contrainte entraînant la rupture par fatigue pour 10^6 cycles de chargements

ε_t → allongement relatif horizontal

ε_6 → déformation entraînant la rupture par fatigue pour 10^6 cycles de chargements

ε_z → déformation verticale relative

σ_t → contrainte de traction

σ_z → contrainte sur le sol support, massif semi-infini

1/b → pente de la droite de fatigue

EV2 → module de déformation réversible mesuré avec l'essai de plaque

q3 → objectif de densification pour le compactage de la CDF

R_c → résistance en compression simple

R_t → résistance en traction directe

R_{tb} → résistance en compression diamétrale

} résistance mécanique

GLOSSAIRE

▪ **Gélifraction** : dégradation des granulats saturés d'eau par fragmentation, fissuration du grain. (roche poreuse)

Remarque : Cas des matériaux traités à la chaux et/ou liants hydrauliques, le gel provoque une rupture des liaisons intergranulaires de la prise hydraulique (gonflement de l'eau, se trouvant dans les interstices du sol, lors de sa solidification).

▪ **Cryosuccion** : gonflement du sol induisant une réduction importante de portance au moment du dégel.

▪ **Floculation** : phénomène physico-chimique au cours duquel les matières en suspension forment des flocons et s'agrègent ce qui provoque leur sédimentation.

Remarque : la chaux agit sur les charges électriques des particules fines de la fraction argileuse entraînant leur floculation.

▪ **Syntaxie** : phénomène qui se produit entre substances de compositions chimiques différentes, ayant des affinités structurales, conduisant à la répétition régulière de motifs structuraux.

L'action de syntaxie de la chaux se traduit par un pralinage des grains qui augmente leur résistance par obstruction des pores.

▪ **Action pouzzolanique** : solubilisation des constituants de la fraction argileuse aboutissant à une cristallisation (édifices cristallins de minéraux argileux). Phénomène de cimentation.

▪ **Prise hydraulique** : durcissement en présence d'eau.

▪ **Attrition** : dégradation par frottement des gros éléments de sols entre eux provoquant l'usure des angles des grains et la production de fines.

▪ **Pralinage** : enrobage des grains de sols par la chaux.

Cette action s'effectue de la même manière que le pralinage réalisé en cuisine pour constituer le pralin ou les pralines ; en effet dans ces cas culinaires, l'enrobage du grain (noisette) se fait grâce à un matériau en poudre qui se solidifie autour de la graine par la chaleur. La température transforme la poudre en coque étanche.

La chaux est réactive à la température.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABREVIATIONS	4
PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES	5
GLOSSAIRE	6
TABLE DES MATIERES	7
INTRODUCTION	11
I. Contexte général de l'étude	12
I.1. Rappel sur les constituants de la chaussée et rôle des couches	12
I.2. Rappel sur les paramètres géotechniques des sols et le compactage.....	13
I.2.1. Classification : GTR 92 et norme NF P 11-300	13
I.2.1.1. Les paramètres de nature	13
I.2.1.2. Les paramètres de comportement mécanique.....	16
I.2.1.3. Les paramètres d'état.....	16
I.2.2. Compactage	17
I.2.3. Portance.....	19
I.2.3.1. L'indice CBR	19
I.2.3.2. Le module EV2.....	20
I.2.4. Performances mécaniques des matériaux traités	21
I.2.4.1. L'essai de compression simple (norme NF P 98-232-1).....	21
I.2.4.2. L'essai de traction directe (norme NF P 98-232-.....	21
I.2.4.3. L'essai de traction indirecte (norme NF P 98-232-3).....	21
I.2.4.4. L'essai de traction par flexion	22
I.2.4.5. Détermination du module E (norme NF EN 13286-43).....	22
I.3. La CDF et son dimensionnement (GTR 92)	24
I.3.1. Objectifs et techniques de préparation	24
I.3.2. Dimensionnement de la CDF	26
I.3.3. Règle de surclassement de portance des PF.....	26
I.3.4. Classement mécanique de la CDF traitée.....	27
I.4. Le traitement de sol : une technique porteuse (GTS 2000)	29
I.4.1. Les produits de traitements.....	29
I.4.1.1. La chaux	29
I.4.1.2. Les liants hydrauliques	30
I.4.2. Actions des liants	31
I.4.2.1. La chaux	31
a. Actions immédiates	31
b. Actions à long terme.....	31
I.4.2.2. Les liants hydrauliques	31
a. Actions immédiates	31

b.	Actions à long terme.....	31
I.4.3.	Les grandes étapes du traitement de sol	34
I.4.3.1.	Identification du sol.....	34
I.4.3.2.	Etude de formulation	34
I.4.3.3.	Mise en œuvre : les opérations courantes principales.....	35
I.4.3.4.	Contrôle.....	35
I.4.4.	Traitement de sol de la CDF.....	36
I.4.4.1.	Evaluation de l'aptitude du sol au traitement (norme NF P94-100).....	36
I.4.4.2.	Méthodologie générale de l'étude de formulation.....	37
I.4.4.3.	Niveaux d'étude	38
a.	Etude de niveau 1	38
b.	Etude de niveau 2	38
c.	Etude de niveau 3	39
I.4.4.4.	Cas des chantiers de faible importance	39
I.5.	Le calcul du complexe de chaussée et le logiciel ALIZE.....	40
I.5.1.	Les différents types de chaussée et leur fonctionnement	41
I.5.1.1.	Les familles de structures de chaussée	41
a.	Les chaussées souples	41
b.	Les chaussées bitumineuses épaisses.....	41
c.	Les chaussées mixtes	41
d.	Les chaussées semi-rigides	41
e.	Les chaussées à structure inverse.....	41
f.	Les chaussées en béton de ciment	41
I.5.1.2.	Le fonctionnement mécanique des structures	42
I.5.2.	Les modèles de la mécanique des chaussées	46
I.5.2.1.	Le modèle de Boussinesq.....	46
I.5.2.2.	Les modèles bicouches	47
I.5.2.3.	Les modèles multicouches.....	47
I.5.3.	La méthode française de dimensionnement.....	49
I.5.3.1.	Les étapes de la démarche	49
I.5.3.2.	Les données du calcul	50
I.5.3.3.	Le calcul.....	55
a.	Sollicitations induites dans la structure par la charge de référence.....	55
b.	Sollicitations admissibles	55
c.	Vérification au gel/dégel.....	56
I.5.4.	Les Abaques Bicouches ALIZE 3.....	58
I.5.5.	Les méthodes pratiques de dimensionnement.....	59
I.5.5.1.	Le Catalogue des structures types de chaussées neuves (1998).....	59
I.5.5.2.	Les manuels de conception de chaussées et des PF d'autoroutes	59
a.	Le manuel de conception des chaussées d'autoroutes du SCETAUROUTE	59
b.	Le manuel de conception des plates-formes autoroutières du SCETAUROUTE .	64

I.5.6.	L'impact du traitement de sol sur les paramètres de dimensionnement	67
II.	Analyse bibliographique de traitement de sol	68
II.1.	Résultats des traitements de sol présentés dans le magazine "Routes"	68
II.1.1.	Exemple 1 : Traitement au liant hydraulique routier de plateforme logistique....	68
II.1.2.	Exemple 2 : Traitement au ciment d'une déviation de route nationale	69
II.1.3.	Exemple 3 : Traitement au ciment d'une déviation de route départementale.....	70
II.1.4.	Exemple 4 : Traitement au liant hydraulique routier pour une rocade.....	71
II.1.5.	Récapitulatif et commentaires de ces traitements.....	72
II.2.	Exemples de traitement selon le type de sol tirés d'après de CIM Béton - 2009	73
III.	Présentation des cas étudiés dans le département de l'Hérault	74
III.1.	La géologie de l'Hérault.....	74
III.1.1	Histoire géologique de l'Hérault	74
III.1.2	Les grandes zones géologiques de l'Hérault	76
III.2.	Présentation des cas.....	77
III.2.1.	Cas 1 : voirie d'un lotissement, Abeilhan, 34.....	78
III.2.4.1.	Contexte géologique.....	78
III.2.4.2.	Projet de traitement	79
III.2.4.3.	Sol et produit de traitement	80
III.2.4.4.	Intérêt du traitement	81
III.2.2.	Cas 2 : parking zone commerciale, Oppidum, Colombiers, 34.....	82
III.2.2.1.	Contexte géologique.....	82
III.2.2.2.	Projet de traitement	83
III.2.2.3.	Sol et produit de traitement	84
III.2.2.4.	Intérêt du traitement	85
III.2.3.	Cas 3 : bretelle de raccordement de la RD à la ZAC Bastit, Béziers, 34	87
III.2.3.1.	Contexte géologique.....	87
III.2.3.2.	Projet de traitement	88
III.2.3.3.	Sol et produit de traitement	88
III.2.3.4.	Intérêt du traitement	88
III.2.4.	Cas 4 : voie de liaison, Caux, 34.....	89
III.2.4.1.	Contexte géologique.....	89
III.2.4.2.	Projet de traitement	90
III.2.4.3.	Sol et produit de traitement	90
III.2.4.4.	Intérêt du traitement	91
III.2.5.	Cas 5 : Raccordement de l'autoroute A75 à l'autoroute A9.....	92
III.2.5.1.	Contexte géologique.....	92
III.2.5.2.	Projet de traitement	93
III.2.5.3.	Sol et produit de traitement	93
III.2.5.4.	Intérêt du traitement	95
III.2.6.	Cas 6 : Autoroute A 75, Section Pézenas-Béziers, 34	96
III.2.6.1.	Contexte géologique.....	96

III.2.6.2.	Projet de traitement	98
III.2.6.3.	Sol et produit de traitement	100
III.2.6.4.	Intérêt du traitement	102
IV.	Etude comparative et synthèse des calculs de chaussée, de coût, et des traitements .	104
IV.1.	Comparaison des calculs de structure de chaussée.....	104
IV.1.1.	L'apport structurel de la couche traitée dans la rigidité de la chaussée.....	105
IV.1.2.	Bilan structurel global et comparatif des cas entre eux.....	110
IV.2.	Calculs comparatifs des coûts.....	112
IV.3.	Synthèse comparative des traitements	113
CONCLUSION	.....	115
LISTE DES ANNEXES	.....	117
BIBLIOGRAPHIE	.....	118
LISTE DES FIGURES	.....	121
LISTE DES TABLEAUX	.....	123
RESUME	.....	127

INTRODUCTION

Le traitement de sol est une technique qui s'applique à 3 niveaux différents de couches constituantes de la chaussée : la partie supérieure des terrassements (PST), la couche de forme (CDF) et les assises (couche de fondation et couche de base).

D'ailleurs, l'évolution de la technique suit l'ordre des couches car elle fut successivement appliquée à chacune d'elle, en partant du sol avec la PST/remblais (application depuis 1965, avant usage occasionnel) puis la CDF (application depuis 1975) et les couches d'assise (application depuis 1985). La publication de guides suit le développement des méthodes de traitement de sol et permet d'encadrer l'utilisation de la technique : RTR de 1976 remplacé par la GTR 92 (actualisé 2000), GTS 2000, GTS assises 2007. Ces ouvrages sont les références utilisées par les professionnels des travaux de terrassement et de voirie. Ils constituent également la base sur laquelle s'appuie la présente étude.

Une distinction doit être clairement établie entre le traitement des matériaux des couches d'assise (base + fondation) faisant partie de la structure de chaussée, et le traitement de la CDF et de la PST constituant le sol support, plate-forme support de chaussée car il s'agit du sol naturel terrassé.

Les techniques du traitement de sol permettent de conférer à des matériaux qui ne seraient même pas utilisables en remblai, des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme.

Cette élévation des performances constitue une optimisation du dimensionnement du projet.

L'intérêt porte sur la manière dont le traitement de sol va influencer sur le dimensionnement de chaussée dont il change les paramètres de calcul.

La première partie est consacrée au contexte général de l'étude : la technique du traitement de sol, son application à la CDF et les paramètres de sol impactés, ainsi que la chaussée, sa structure et son dimensionnement.

La deuxième partie est une transition des concepts exposés précédemment vers leur application et relate brièvement quelques cas réalisés et publiés dans la presse permettant d'établir un état des lieux des résultats apportés par les différentes techniques de traitement de sol.

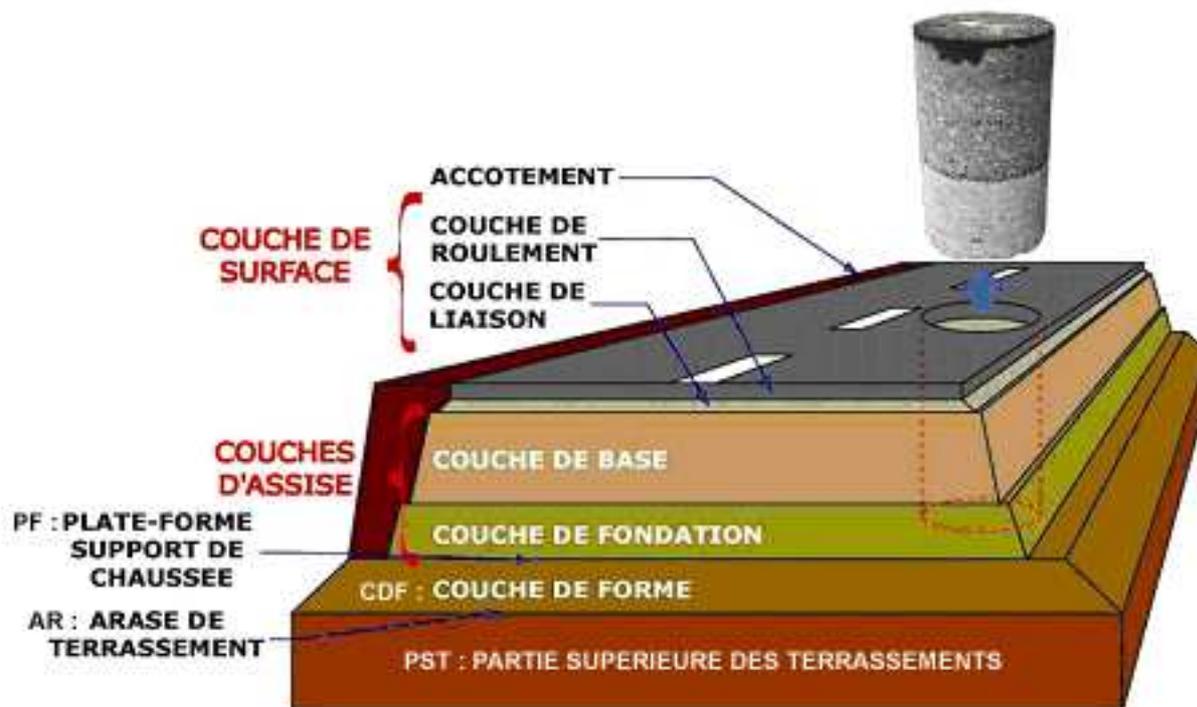
La troisième partie présente les cas d'études, divers projets de voirie où la CDF fait l'objet d'un traitement, et notamment leur contexte géologique général. Les résultats obtenus sur ces chantiers sont récapitulés avec une mise en évidence des paramètres de base du sol et des données issues de l'étude de formulation et des mesures de réception de chaque projet de traitement.

La quatrième partie s'articule autour des calculs de structure de chaussée et des calculs du coût de chacun des cas, afin d'établir un comparatif des solutions traditionnelles par rapport aux variantes de traitement. Une comparaison des traitements des cas entre eux conclut l'analyse.

La démonstration de l'efficacité du traitement de sol pour la CDF est ainsi clôturée par une synthèse de tous les résultats.

I. Contexte général de l'étude

I.1. Rappel sur les constituants de la chaussée et rôle des couches



- Figure 1 - Coupe type d'une structure de chaussée - d'après le cours de Routes de M.VANISCOTE

La chaussée est une structure multicouche mise en œuvre sur une plate-forme support de sol terrassé. Elle supporte plusieurs types de sollicitations : répartition de la contrainte des charges verticales (référence : essieu standard de 130KN), sollicitations tangentielles dues au passage des véhicules (mouvement entraînant des efforts horizontaux), sollicitations climatiques (eaux infiltrés, gel).

La partie supérieure des terrassements (PST) désigne la zone supérieure des terrains en place ou rapportés et fait environ 1m d'épaisseur. La plate-forme de la PST est l'arase de terrassement dit AR.

La couche de forme (CDF) ne fait pas partie intégrante de la chaussée mais bien de son sol support. Son rôle à court terme est d'assurer la traficabilité et à long terme de garantir un certain niveau de portance. Elle constitue la plate-forme support de chaussée appelée PF.

Les couches d'assises sont la couche de fondation et la couche de base. Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur le support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

La couche de surface est constituée d'une couche de roulement sur laquelle s'exerce directement les agressions du trafic et du climat, et d'une couche de liaison permettant l'accrochage aux couches d'assise. La couche de surface doit garantir le confort et la sécurité des usagers grâce à l'uni, l'adhérence et l'évacuation des eaux de ruissellement. Elle maintient l'intégrité de la structure et protège les autres couches des infiltrations d'eau par son étanchéité.

I.2. Rappel sur les paramètres géotechniques des sols et le compactage

I.2.1. Classification : GTR 92 et norme NF P 11-300

La classification géotechnique des matériaux identifie les sols en 6 classes : A, B, C, D, R et F.
Tableau IV, fascicule 1 du GTR (Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature)
(voir également annexe 1)

- Tableau I - Classes principales du GTR -

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A ₁ à A ₄ selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	B ₁ à B ₆ selon VBS ou IP et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS ou IP et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D ₁ à D ₃
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NF P 11-300)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimiques (Norme NF P 11-300)	

Les caractéristiques permettant la classification sont regroupées selon trois catégories : les paramètres de nature, les paramètres de comportement mécanique, et les paramètres d'état. Tous les essais permettant d'obtenir ces caractéristiques sont répertoriés en Annexe 2.

I.2.1.1. Les paramètres de nature

Ils ne varient pas ou peu dans le temps, ce sont des caractéristiques intrinsèques.

▪ La granulométrie (normes NF P 94-056 et NF P 94-057)

La granularité est un paramètre qui permet de distinguer les sols grâce à la dimension de leurs grains.

Une première analyse consiste à mesurer la répartition des quantités selon la dimension des grains. Les deux méthodes complémentaires sont le tamisage pour les sols grossiers (ou grenus) et la sédimentométrie pour les sols fins. Il s'agit de mesurer le pourcentage des grains de sol passant au travers d'un tamis donné (passant ou tamisat).

L'expression classique de cette analyse est la courbe granulométrique caractérisée par les indices suivants (d_{60} est le diamètre correspondant à un passant de 60%) :

- le coefficient d'uniformité (de Hazen) : $C_U = d_{60} / d_{10}$ ($C_U < 2$ uniforme, $C_U > 2$ étalée)
- le coefficient de courbure : $C_C = d_{30}^2 / d_{60} \times d_{10}$ (bien gradué si C_C entre 1 et 3)

▫ **Dmax** : Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

Il détermine l'atelier de terrassement (c'est-à-dire le matériel employé), l'épaisseur des couches et les conditions de malaxage.

Le seuil retenu est **50mm**, car cela permet de distinguer les sols fins, sableux ou graveleux des sols blocailleux. C'est aussi la valeur limite courante pour le malaxage des sols avec un liant pour une CDF de qualité.

▫ **Tamiset 80µm** : Pourcentage en fines du sol.

Les fines sont sensibles à l'eau, selon leur proportion elles vont donc influencer le comportement du sol.

Seuils retenus (par le GTR):

> **35%** : comportement du sol totalement régi par la fraction fine

< **12%** : seuil conventionnel pour dire si un sol est pauvre ou riche en fines

▫ **Tamiset 2mm** : distinction entre sols sableux et sols graveleux

Seuil retenu (par le GTR): **70%**

> 70% : sol tendance sableuse

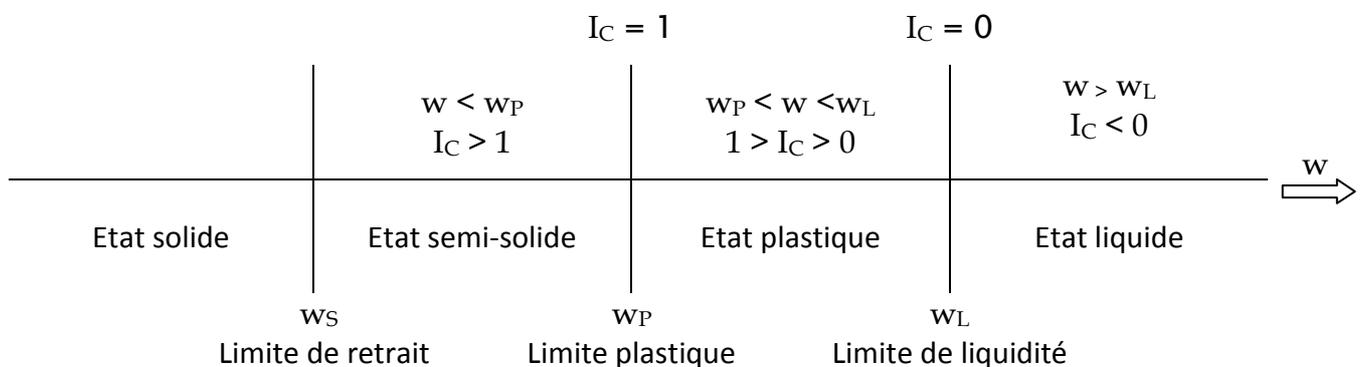
< 70 % : sol tendance graveleuse

▪ L'argilosité

Etats de consistance - Limites d'Atterberg (norme NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (<400µm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et à en observer la consistance.

Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide.



- Figure 2 - Etats de consistance d'un sol – Limites d'Atterberg - d'après le cours de mécanique des sols de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement -

▫ **L'indice de plasticité IP** : caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$IP = w_L - w_P$$

w_P → teneur en eau à limite de plasticité du sol (%)

w_L → teneur eau à limite de liquidité du sol (%)

Seuil retenus (par le GTR):

- 12 : Limite supérieure des sols faiblement argileux
- 25 : Limite supérieure des sols moyennement argileux
- 40 : Limite supérieure entre sols argileux et très argileux

▫ **La valeur au bleu de méthylène VBS** (norme P 94-068) : paramètre représentant l'absorption de la surface spécifique du sol. La VBS s'exprime en g de bleu absorbé pour 100 g de sol. La surface spécifique du sol est déterminée par la surface des particules de la fraction argileuse, une évaluation indirecte de la quantité et de la nature de l'argile contenue dans le sol

Seuil retenus (par le GTR):

- 0,1 : sol insensible à l'eau
- 0,2 : apparition d'une légère sensibilité à l'eau (sols sableux)
- 1,5 : distinction sols sablo-limoneux et sols sablo-argileux
- 2,5 : distinction sols limoneux peu plastique à plasticité moyenne
- 6 : distinction sols limoneux et sols argileux
- 8 : distinction sols argileux et sols très argileux

▫ **L'équivalent de sable ES** : ancien paramètre de la RTR de 1976 conservé pour référence.

Cet essai caractérise la pollution d'un sable par de l'argile ou du limon en mesurant la quantité des particules colloïdales que l'on fait flocculer. L'essai permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu.

L'équivalent de sable s'exprime en pourcentage, cela correspond à la proportion du flocculat de sol fin (h_2) par rapport au dépôt solide (h_1), les deux étant mesurés sur éprouvette contenant l'échantillon de sol et une solution normalisée pour disperser les particules de sol.

$$Es = [h_1 / (h_1 + h_2)] \times 100$$

- ES = 0 Argile pure
- ES = 20 Sol plastique
- ES = 40 Sol non plastique
- ES = 100 Sable pur et propre

▫ Certains minéraux ont une influence particulière sur le traitement de sol car, comme les argiles, ils sont sensibles à la présence d'eau.

Des constituants chimiques particuliers (matières organiques, phosphates et nitrates, chlorures, sulfates et sulfures) interfèrent également sur la prise hydraulique.

Dans sa Thèse (voir bibliographie), Tangi Le Borgne, explique que la technique du traitement de sol est limitée par la réaction du sol au liant à cause d'éléments perturbateurs de prise. Il souligne l'influence de la chimie du sol et de sa composition minéralogique qui peuvent modifier considérablement la suite de réactions attendues, et, par conséquent, la performance finale du sol traité. Il établit une revue exhaustive des éléments chimiques susceptibles de perturber le traitement, détermine un seuil d'action selon la concentration d'un élément chimique dans un sol. La thèse de Nicolas Cabane est un travail de recherche sur la perturbation de la stabilisation lors du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques, afin de proposer des essais simples et fiables de caractérisation démontrant rapidement la présence de ces agents perturbateurs au sein des sols.

I.2.1.2. Les paramètres de comportement mécanique

Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et sont donc utilisables en CDF, et les matériaux qui risquent de se fragmenter et nécessiteront des dispositions particulières de traitement.

Les paramètres suivants sont retenus pour la classification des matériaux rocheux.

- Coefficient de **Los Angeles LA** (norme P 18-573)
- Coefficient **micro Deval en présence d'eau MDE** (norme P 18-572)

LA et MDE concernent les roches dures comme le granit, le gneiss, le calcaire et le grès et leur possibilité de réemploi en CDF ou couche de chaussée.

- Coefficient de **friabilité des sables FS** (norme P 18-576)

Seuils retenus par le GTR pour la classification géotechnique des sols :

- 45 pour LA et MDE
- 60 pour FS

Par ailleurs les paramètres suivants sont utiles pour le traitement de sol car ils permettent de définir les conditions de malaxage :

- Coefficient de **fragmentabilité FR** (éléments grossiers >50mm) (norme NF P 94-066)
 - Coefficient de **dégradabilité DG** (abrasivité fraction grenu >0,08mm) (norme XP P 18-579)
- DG concerne surtout les remblais en matériaux issus de roches argileuses (marnes, schistes..).

I.2.1.3. Les paramètres d'état

Ils sont fonction de l'environnement.

- **L'état hydrique** est particulièrement important pour les sols meubles sensibles à l'eau.

On distingue 5 états hydriques différents :

- très humide **th**
- humide **h**
- humidité moyenne **hm** (optimum)
- sec **s**
- très sec **ts**

L'état hydrique d'un matériau permet de définir son classement de PST, car la portance du sol est fortement liée cet état. Le *tableau IX : différents cas possibles de PST*, du GTR, fascicule 1, p. 65, établit un classement des sols selon la sensibilité des matériaux à l'eau ; dans chaque cas il s'agit des mêmes matériaux mais l'état hydrique est différent (sauf PST 5 et PST 6).

Il y a des paramètres pour caractériser l'état hydrique.

- La teneur en eau naturelle w_{nat} (norme NF P 94-050) par rapport à l'Optimum Proctor Normal W_{OPN} .

$$\frac{w_{nat}}{W_{OPN}}$$

- **L'indice de consistance I_c** : comparaison de la teneur en eau naturelle w d'un sol et des limites d'Atterberg; cela permet de se faire une idée de l'état d'une argile. Cet indice renseigne sur la traficabilité du matériau et permet de définir les moyens de transport et d'extraction.

$$I_c = \frac{W_L - w_{nat}}{W_L - W_P}$$

▫ **Masse volumique sèche ρ_d et Poids volumique sec γ_d ($\gamma_d = \rho_d \times g$)**

L'état de compacité en place se détermine par la mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol déshydraté. Elle constitue une des caractéristiques du compactage, l'autre étant la teneur en eau. Sa valeur est un paramètre de vérification de la qualité du compactage et du traitement de sol.

La masse volumique sèche des craies et calcaires est étroitement liée à leur fragmentabilité, elle informe donc sur les conditions de malaxage. En effet, dans ce cas, moins le matériau est dense plus il se désagrège facilement. Le malaxage peut engendrer un phénomène d'attrition pour les craies et calcaires, car lors du mélange, le matériau se frotte et s'effrite.

I.2.2. Compactage

Le compactage est une réduction de volume du sol presque instantanée due à la réduction des vides remplis d'air. Plus les grains seront resserrés les uns contre les autres, meilleure sera la résistance du sol au cisaillement et meilleur sera le comportement des remblais et couches de chaussées; on recherche donc l'indice des vides le plus petit possible (correspondant au pic de la courbe Proctor).

Le compactage améliore les propriétés mécaniques du sol remanié.

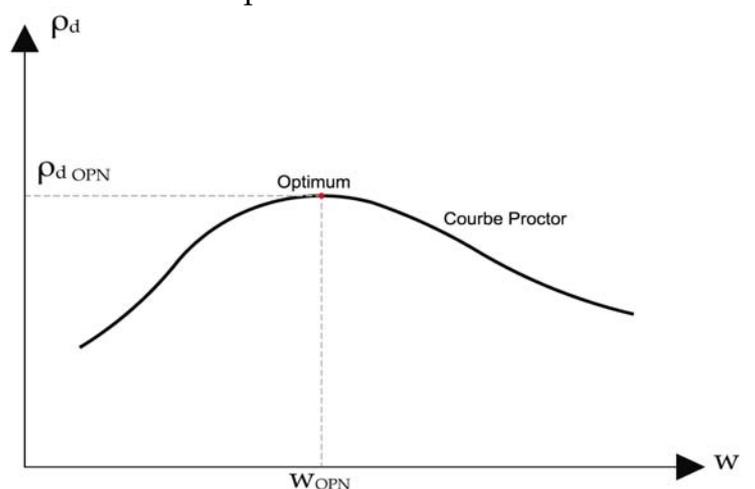
Il complète l'effet de stabilisation par remplissage des vides par le liant. Le liant augmente la rigidité (répartition des charges) et diminue l'attrition des gros éléments.

Le compactage se distingue de la consolidation car il s'agit de tassement du matériau sous un effet dynamique, alors que la consolidation s'effectue sous poids propre du matériau. Pour le compactage, il n'y a pas de variation de la teneur en eau lors du phénomène de tassement.

La teneur en eau a un effet notoire sur le compactage des sols fins. En effet il existe une valeur maximale du poids volumique sec γ_d pour une teneur en eau dite à l'optimum w_{OPN} , **Optimum Proctor Normal** déterminée par l'essai Proctor (norme NF P 94- 093).

Cet essai consiste à compacter le sol dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame, à énergie constante, et à déterminer la densité sèche ρ_d selon la teneur en eau w . L'optimum représente le sommet de la courbe γ_d / w obtenue par l'essai. (Voir figure 3, avec ρ_d au lieu de γ_d)

Pour les terrassements, on utilise en général l'essai Proctor Normal ; le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs. Pour une couche de chaussée on utilise l'essai Proctor Modifié; le compactage effectué avec une énergie supérieure de celle Proctor normale vise une augmentation de la résistance mécanique de la couche.



- Figure 3 - Courbe Proctor

La résistance des remblais et couches de chaussée aux déformations est fonction de la bonne portance en surface du sol et de l'absence de tassement ultérieur.

Les objectifs de densification pour le compactage prescrits par le GTR sont : q4 pour les remblais (tassement et stabilité) et q3 pour la CDF (raideur et résistance).

Les objectifs de densification q1 pour une couche de fondation et q2 pour une couche de base, ne sont pas considérés par le GTR, parce qu'ils concernent les couches d'assise de chaussée. Ils sont définis dans la norme NF P 98-115. (q signifiant qualité du compactage)

Pour déterminer le taux de compactage moyen permettant de qualifier la densification de la couche, on calcule le rapport de la masse volumique sèche mesurée ρ_d et la masse volumique sèche de référence ρ_d OPN. Le résultat est en pourcentage.

$$(\rho_d / \rho_d \text{ OPN}) \times 100$$

Si l'on appelle $\rho_d m$ la valeur moyenne, et $\rho_d fc$ la valeur en fond de couche, on doit avoir :

- le taux de compactage permettant de qualifier la densification du matériau des CDF :

$$\rho_d m \geq 98,5 \% \rho_d \text{ OPN} \text{ et } \rho_d fc \geq 96 \% \rho_d \text{ OPN}$$

- le taux de compactage permettant de qualifier la densification du matériau des remblais:

$$\rho_d m \geq 95 \% \rho_d \text{ OPN} \text{ et } \rho_d fc \geq 92 \% \rho_d \text{ OPN}$$

Ces valeurs sont des repères donnés par le GTR.

Les modalités de compactage (dont l'énergie à mettre en œuvre) sont définies dans les tableaux de compactage du GTR, fascicule 2 annexe 4 selon les paramètres suivants : classe du terrain, Q/S, type de compacteur, e l'épaisseur de la couche, V la vitesse de translation du véhicule. (Q est le volume de sol compacté et S la surface compactée)

I.2.3. Portance

Dans le cadre de travaux routiers, de faibles déformations du sol sont admises.

Par exemple, le critère de réception d'une PF4 d'autoroute est de 20/100e de mm.

La portance est plus représentative pour les CDF traitée par une mesure faite in-situ à l'aide d'un déflectographe pour une mesure en continue et avec la poutre Benkelman pour une mesure ponctuelle, car la couche est assimilable à une structure semi-rigide.

Cependant la portance d'une PF est couramment déterminée par l'indice CBR ou IPI, ou par le module à la plaque EV2.

I.2.3.1. L'indice CBR

La portance du sol est sa résistance à la rupture déterminée par l'essai CBR, le Californien Bearing Ratio (norme NF P 94-078). Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport à un sol type de référence. Il permet d'observer le comportement du matériau vis-à-vis sa densification ainsi qu'une idée de sa résistance à l'eau.

L'indice de portance CBR immergé (= I_{CBR} après 4 jours d'immersion), **et indice portant immédiat IPI**, se calculent ainsi par le rapport entre la pression d'enfoncement du sol et celle d'un matériau type référencé (en %) :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\text{Pression à 2,5 mm d'enfoncement}}{70} \\ \frac{\text{Pression à 5 mm d'enfoncement}}{1,05} \end{array} \right\} \text{C'est la plus grande des 2 valeurs qui est retenue}$$

Le pouvoir portant du sol est d'autant meilleur que le CBR est grand.

L'essai est empirique et ne peut en aucun cas traduire la résistance intrinsèque du sol, mais il est un moyen d'apprécier sa rigidité (résistance au cisaillement).

Le CBR immergé se distingue de l'IPI par l'immersion du moule pendant 4 jours.

En général, on réalise la mesure de l'IPI avant celle du CBR immergé à cause de l'imbibition du moule.

Le rapport CBR/IPI > 1 permet de constater que le matériau expérimenté est dit insensible à l'eau et qu'il y a même une amélioration de ces caractéristiques mécaniques par l'effet d'apport d'eau.

Le traitement de sol de la CDF améliore les niveaux de portance (IPI et CBR).

Le GTS précise les valeurs minimales à obtenir après traitement du matériau (voir tableau II)

- Tableau II - Indice portant immédiat minimal à obtenir à la mise en œuvre - GTS

Classes de matériaux	IPI minimal
A ₃ - C ₁ A ₃	10
A ₂ - C ₁ A ₂ - B ₆ - C ₁ B ₆	15
A ₁ - B ₅ - C ₁ A ₁ - C ₁ B ₅	20
Autres classes	À fixer d'après expérience ou étude spécifique

Une valeur de module de Young directement utilisable dans un schéma rationnel de dimensionnement peut être déduite de la valeur retenue du CBR.

Plusieurs approches ont été proposées :

- Formule de GEOFFROY et BACHELEZ : $E = 6,5 \text{ CBR}^{0,65}$
- Formule proposé par SHELL : $E = 10 \text{ CBR}$
- Formule retenue par LCPC : $E = 5 \text{ CBR}$

I.2.3.2. Le module EV2

La mesure à la plaque du **module EV2** donne la portance du support et indique si le compactage est correct. Cela permet de vérifier si les objectifs de performance mécanique prévus sont atteints.

L'essai de plaque consiste à mesurer l'enfoncement d'une plaque circulaire de diamètre 60 cm sous l'action d'une charge croissante. (Voir également annexe 3)

Le module de déformation du sol (Boussinesq ; en MPa) est déduit en interprétant la valeur du déplacement vertical (z en mm), mesuré en fonction de la charge appliquée (en KN).

Les charges définies conventionnellement par le LCPC sont de 20 KN pour le 1^{er} chargement de plaque et 25 KN pour le 2^d chargement.

EV2 est le module de déformation du sol à la plaque au second cycle de chargement, EV1 est le module de déformation du sol au premier chargement.

$$EV2 = 90/z$$
$$k = EV2/EV1 \leq 2$$

La portance de la couche de forme est déterminée par son module de déformation réversible mesuré avec l'essai de plaque (norme NF P 94-117-1), **module EV2**.

L'essai de plaque permet d'apprécier directement le module d'un sol par une mesure sur le terrain.

$k = EV2/EV1$ est le rapport des modules à la plaque de deux chargements successifs pour déterminer si le compactage est suffisant.

Le compactage est d'autant meilleur que le rapport $EV2/EV1$ est faible ; en général la spécification conventionnelle admet une valeur du rapport $k < 2$.

I.2.4. Performances mécaniques des matériaux traités

Il s'agit de résistances prises à différentes âges du matériau pour en suivre les conditions de traficabilité, de résistance au gel ou à l'immersion, et surtout les performances à long terme.

La résistance en compression permet de déterminer l'âge autorisant la circulation sur la couche traitée (R_c à 7 et 28 jours) et la résistance à l'immersion au jeune âge (R_c à 60 jours et R_{ci} à 28 et 32 jours, R_{ci} / R_{c60}).

La résistance au gel (R_{tb} ou R_t à date apparition probable du gel) et les performances à long terme (couple R_t et E à 28 et 90 jours) se déterminent à partir de la résistance en traction directe ou indirecte.

La résistance en flexion permet de déterminer la courbe de fatigue d'un matériau et sa contrainte de rupture. Cela renseigne sur la durée de vie du matériau. La résistance à la fatigue est un paramètre essentiel pour le dimensionnement des chaussées car elle sert à établir une référence de l'admissibilité limite des contraintes supportées par un matériau ; et donc comparer les sollicitations calculées de la structure vis-à-vis des sollicitations admissibles. Ces résistances font l'objet d'essais relatés ci-après et font également l'objet de l'annexe 3.

L'essai CBR a déjà été défini précédemment (I.2.3.1 l'indice CBR) car, il y a un double usage de ces résultats.

De la même manière que l'EV2 constitue une mesure de portance mais donne également une indication sur la qualité du compactage, le CBR et l'IPI permettent d'élaborer des références sur la portance d'un sol et l'influence de sa sensibilité à l'eau avant et après traitement ainsi que l'évaluation du comportement sous trafic d'un sol traité.

La mesure de l' I_{CBR} indique la résistance lors de l'immersion du moule de matériau compacté. Le rapport I_{CBR} / IPI renseigne sur le comportement du sol en milieu sensible et l'amélioration des caractéristiques mécaniques.

I.2.4.1. L'essai de compression simple (norme NF P 98-232-1)

Il s'agit de la compression d'un cylindre entre deux plateaux ; la carotte de matériau traité est soumise à une sollicitation en compression par l'intermédiaire d'une presse jusqu'à rupture.

La contrainte appliquée et la déformation observée servent à déterminer la résistance et le module élastique. La résistance en compression, notée R_c , est égale à la contrainte atteinte au moment de la rupture, et s'effectue à plusieurs âges du matériau (7, 28, 32, 60, 90 jours).

I.2.4.2. L'essai de traction directe (norme NF P 98-232-2)

La contrainte de traction est directement exercée sur deux faces planes d'une éprouvette cylindrique calibrée par la norme. Elle détermine la résistance en traction directe notée R_t .

I.2.4.3. L'essai de traction indirecte (norme NF P 98-232-3)

Aussi appelé essai de compression diamétrale ou essai brésilien.

La contrainte de traction est obtenue en écrasant une éprouvette cylindrique normalisée entre deux plateaux parallèles. Les efforts sont donc exercés selon deux génératrices diamétralement opposées. La résistance en traction indirecte se note R_t .

Il y a une correspondance entre la résistance en traction directe et indirecte :

$$R_t = 0,8 \text{ (ou } 0,9) R_{tb}$$

I.2.4.4. L'essai de traction par flexion

Divers processus conduisant à exercer une contrainte par flexion peuvent être envisagés.

Il s'agit de l'observation du phénomène de fatigue ; c'est-à-dire la rupture du matériau après application d'un grand nombre de sollicitations inférieure à la rupture instantanée.

En effet les matériaux ne résistent pas aussi bien aux efforts répétés qu'à une sollicitation unique.

Les premières études du phénomène de fatigue furent réalisées par WOHLER en 1852.

L'expérience de base, permettent de mettre en évidence le comportement à la fatigue d'un matériau, consiste à soumettre une éprouvette du matériau à des sollicitations répétées, toutes identiques (périodiques), et à déterminer le nombre de répétitions de ces sollicitations entraînant la rupture.

Puis en répétant cet essai sur des éprouvettes identiques du matériau, on cherche à établir une relation entre l'amplitude de la sollicitation appliquée et le nombre de répétitions de ces sollicitations entraînant la rupture ;

La courbe représentative du nombre de répétitions de charges jusqu'à la rupture, en fonction de l'amplitude de la contrainte (ou déformation) appliquée est appelée courbe de WOHLER.

On appelle résistance à la fatigue pour N cycles la valeur de la sollicitation pour laquelle l'éprouvette supporterait N cycles avant de se rompre. Le nombre de cycles de chargement est souvent appelé durée de vie.

Les essais de fatigue sont effectués sur des éprouvettes prismatiques trapézoïdales encastrées à leur base, en répétant un niveau de contrainte jusqu'à la rupture.

La courbe de fatigue reliant la contrainte au nombre de cycles de chargement est déduit de cet essai. La pente de cette courbe usuellement nommée "1/b" est un paramètre d'entrée des calculs de chaussée, tout comme la contrainte σ_6 (ou déformation ϵ_6) qui est la contrainte de rupture en fatigue par flexion pour $N=10^6$ nombre de cycles de chargement.

En fait, pour le dimensionnement des chaussées, on caractérise le comportement à la fatigue des matériaux avec les notions de ϵ_6 pour les matériaux bitumineux et de σ_6 pour les matériaux hydrauliques.

Le manège de fatigue du LCPC comporte 4 bras appliquant des charges comprises entre 4,5 et 7,5 tonnes à différentes vitesses (maxi 100 km/h) sur une piste expérimentale simulant la chaussée. Ces systèmes d'installation sont des simulateurs de trafic pour observer l'usure de la chaussée et de ses matériaux.

Un essai de flexion "3 points" est utilisé pour l'étude du béton de ciment.

I.2.4.5. Détermination du module E (norme NF EN 13286-43)

La rigidité des matériaux est caractérisée par son module d'élasticité, module de Young.

$$E = \sigma / \epsilon$$

Ce principe de calcul est le même pour tous les matériaux cependant la méthode d'obtention de la contrainte et de la déformation font appel à des essais différents selon le matériau.

Pour les sols et matériaux granulaires (non traité) on peut retenir le module EV2 pris lors de l'essai de plaque, ou le déterminer à partir de l'essai CBR avec la relation suivante $E = 5 \text{ CBR}$ (corrélation expérimentale retenue par le LCPC, décrit précédemment à la page 19).

L'essai triaxial permet, entre autre, de définir un module réversible utilisable.

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, on définit le module sécant à 30% de la charge de rupture à partir de l'essai de traction directe. A l'issue de l'essai, les effets de sollicitation du matériau, sont reportés sur la courbe de variation de la contrainte en fonction de la déformation ; c'est de la partie linéaire de la courbe que le module est déduit, à 0,3 R_t correspond le module sécant E_{t30} .

Pour les matériaux bitumineux, le module de déformation est déterminé par l'essai du module complexe, essai de flexion dynamique. La flexion est exercée en 2 points sur éprouvette trapézoïdale, encastrée à la base. Les sollicitations sont effectuées à différentes fréquences de chargement pour différentes températures. En effet, le caractère visco-élastique du bitume rend les matériaux bitumineux sensibles à la température et au temps de charges.

Les normes retiennent 15°C et 10 Hz pour la caractérisation du module (et 10°C et 25 Hz pour la fatigue).

I.3. La CDF et son dimensionnement (GTR 92)

Définition : « *La couche de forme est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée.* » GTR

I.3.1. Objectifs et techniques de préparation

A court terme, la CDF assure la traficabilité, permet le compactage de la couche d'assise, garantit le nivellement uniforme des couches de chaussée, et assure la protection du sol support (AR) contre les intempéries, notamment le gel.

A long terme, elle assure les fonctions d'homogénéisation, de maintien et d'amélioration de la portance, offre une protection thermique du sol support (solution à moindre coût) et des possibilités de drainage.

Le guide précise que l'effet mécanique de la CDF n'est pas pris en compte pour le dimensionnement de la chaussée dans les cas de petits chantiers où seuls les objectifs à court terme sont nécessaires.

A la différence d'une CDF en matériaux granulaires qui peut être exécutée sur une arase de Module 15 à 20 MPa, la CDF en matériaux traités nécessite une valeur du module à la plaque de l'arase AE : $EV2 \geq 35$ MPa.

La portance de la PF, sommet de la CDF, retenue pour la mise en œuvre des couches de chaussée suppose un module $EV2 \geq 50$ MPa. Cette valeur est un seuil minimum qui peut être largement dépassé pour des grands chantiers ($EV2 \geq 80$ MPa).

Pour être employé en couche de forme, un matériau doit satisfaire aux critères suivants :

- Insensibilité à l'eau * (dépendance des caractéristiques mécaniques à l'état hydrique)
- Insensibilité au gel (gélifraction, cryosuccion)
- Dimension des plus gros éléments (nivellement, malaxage)
- Résistance sous circulation des engins de chantier (fragmentation, attrition)

* La notion de sensibilité à l'eau est prise au sens restrictif définissant seulement la variance de portance du sol sous l'effet de variation de la teneur en eau.

L'objectif de compactage de la CDF est nommé par le GTR q3 (q4 pour les remblais).

Le GTR prévoit 4 rubriques de technique de préparation des matériaux pour la CDF :

- G : Actions sur la granularité (élimination de la fraction sensible à l'eau ou de la fraction grossière, ou ajout d'un correcteur granulométrique) ;
- W : Actions sur l'état hydrique (par traitement, arrosage ou humidification) ;
- T : Traitement (assure la pérennité des liaisons entre grains, dépend de l'état et de la nature du matériau) ;
- S : Protection superficielle (avec enduit de cure gravillonné ou clouté, fin réglage) .

- Tableau III - Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour l'emploi en CDF -
(tableau VII du fascicule 1 du GTR, p.60)

Rubrique	Code	Technique de préparation des matériaux
G Actions sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un malaxage correct de la plate-forme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour obtention d'éléments plus fins
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
	2	Humidification pour changer d'état hydrique
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	6	Traitement avec un correcteur granulométrique
S Protection superficielle	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement cloué
	3	Couche de fin réglage

I.3.2. Dimensionnement de la CDF

Le principe de la démarche consiste à déterminer une classe de PST en fonction de sa classification géotechnique et de son état hydrique puis d'y associer une classe d'AR choisie en fonction de l'objectif de portance à long terme afin d'obtenir un couple PST/AR.

Le couple PST/AR et la nature du matériau de CDF permettent de définir l'épaisseur de CDF et le classe de la PF grâce aux tableaux du GTR (*Annexe 3 du fascicule 2, p.55 à 73*).

- *Tableau IV – Tableau des modules de calcul descriptifs du sol support - (tableau XI du fascicule 1 du GTR ,p.68)*

Module de calcul (MPa)	20	50	120	150
Classe de l'AR	AR1	AR2	AR3	AR4

- *Tableau V – Tableau des modules de calcul de la PF support de chaussée - (tableau XII du fascicule 1 du GTR ,p.69)*

Module de calcul (MPa)	20	50	120	200
Classe de PF	PF1	PF2	PF3	PF4

Notons que les valeurs pour l'application de la méthode ALIZE pour le calcul des structures de chaussée correspondent à la limite basse des classes définies par le tableau X du fascicule 1 du GTR, p. 67. Ce tableau donne un découpage des plages de valeurs du module de déformation réversible selon la classe de portance de PF.

I.3.3. Règle de surclassement de portance des PF

C'est une mesure de simplification pour couvrir les situations courantes de chaussées souples et semi-rigides. Il y a 3 cas de CDF considérés auxquels doit correspondre une classe de PF de portance définie.

- *Tableau VI - Classe de PF en fonction du cas de CDF - d'après le Catalogue des structures types de chaussée*

Cas de CDF (matériaux)	Classe de PF
Matériaux granulaires non traités	PF3
Sols argileux et limoneux traités en place à la chaux seule, chaux+ciment ou ciment seul	PF3
Matériaux traités au liant hydraulique MTLH	PF3/PF4

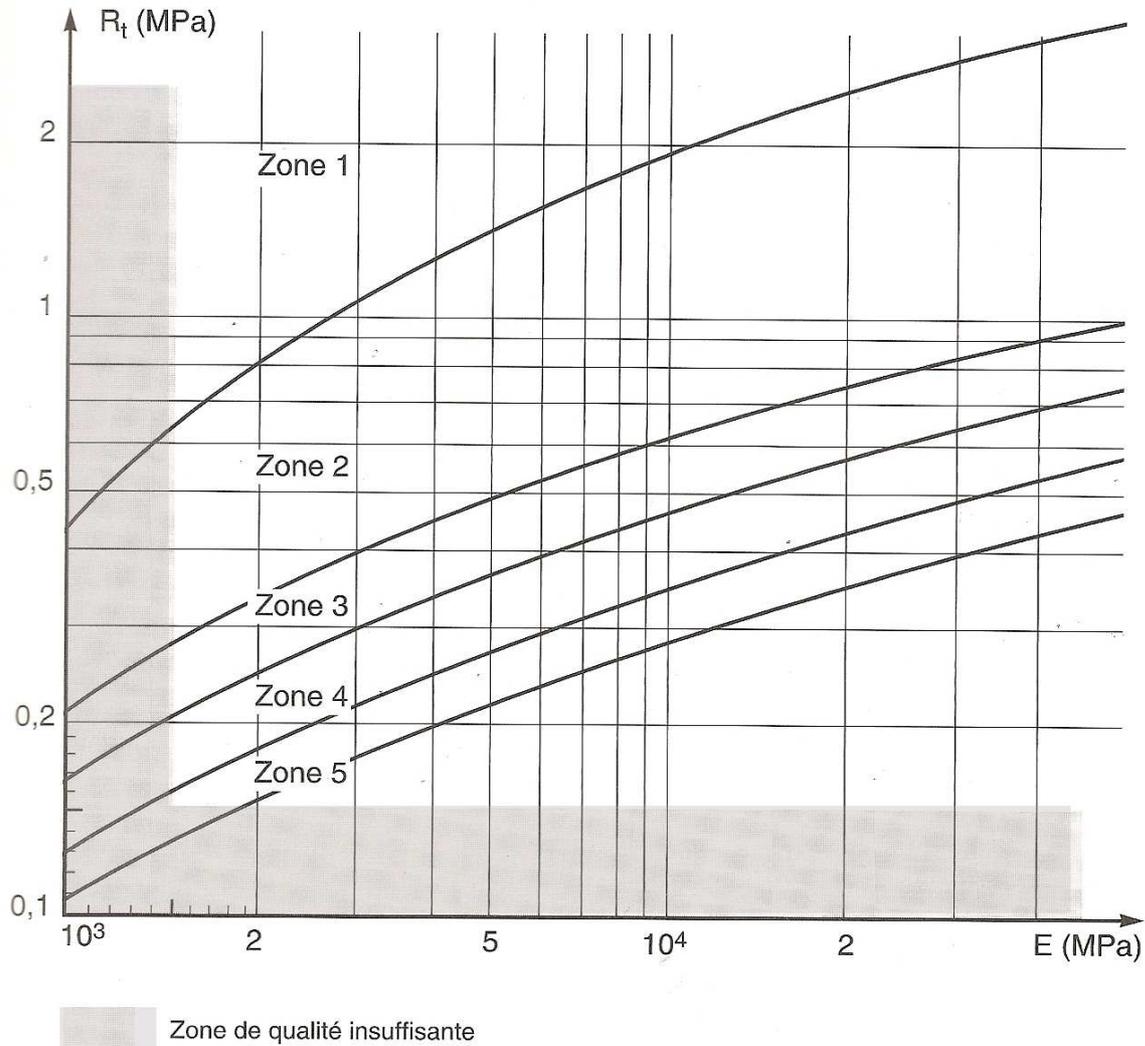
L'intérêt du surclassement est l'optimisation du dimensionnement de l'ensemble CDF-chaussée.

L'augmentation de la classe de PF permet de réduire l'épaisseur des couches de chaussée.

I.3.4. Classement mécanique de la CDF traitée

Quel que soit le niveau de plateforme envisagée, il est nécessaire de caractériser une CDF traitée par son classement mécanique.

le classement se base sur le module élastique E (module sécant, pris à 1/3 de la charge de rupture lors de l'essai de traction directe) et la résistance en traction directe R_t à 90 jours.



- Figure 4 - Zone de classe mécanique de CDF selon R_t et E - Manuel SCETAUROUTE -

La caractérisation de la zone sert à distinguer le mode de fabrication du matériau traité, à savoir en centrale ou en place car la qualité obtenue en est différente.

- Tableau VII - Classe mécanique du matériau traité - GTS

Classe mécanique	Traitement en centrale	Traitement en place
1	Zone 1	
2	Zone 2	Zone 1
3	Zone 3	Zone 2
4	Zone 4	Zone 3
5	Zone 5	Zone 4

La classe mécanique et l'épaisseur de CDF permettent de définir une classe de PF à partir de la classe d'AR.

- Tableau VII - Classe de PF selon la classe d'AR, la classe du matériau et l'épaisseur de CDF - GTS

Classe mécanique du matériau de CDF	Epaisseur de la CDF (en cm)				
	AR1			AR2	
Classe 3		30	40	25	30
Classe 4	30	35	45	30	35
Classe 5	35	50	55	35	45
Classe de PF obtenue	PF2	PF3	PF4	PF3	PF4

I.4. Le traitement de sol : une technique porteuse (GTS 2000)

Le traitement de sol est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas.

La technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du Développement Durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Pas de transport de matériaux, ni de dépôt, donc diminution du coût! En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres.

Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux.

La technique est d'abord utilisée pour des remblais de sol sensible à l'eau et humides, puis elle est étendue à la CDF, et pour finir aux couches d'assise (GTS 2007).

Son application a concerné d'abord les sols fins, notamment le traitement mixte des limons, puis les graves argileuses ou propres et enfin les mélanges sols fins et éléments blocailleux.

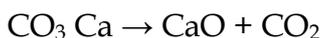
Le GTR est un premier document qui relate de la technique, en proposant une démarche empirique de la prise en compte des CDF en sols traités dans la structure de chaussée, ainsi que les matériaux devant subir un traitement pour être employés en CDF.

Le GTS vient ensuite préciser l'application de la technique : l'étude, la réalisation et l'assurance qualité de ces CDF en matériaux traités; le guide fut élaboré à partir d'une compilation des expériences de divers praticiens dont l'analyse aboutit à une méthodologie bien définie.

I.4.1. Les produits de traitements

I.4.1.1. La chaux

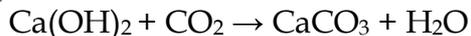
La chaux vive est obtenue par décarbonatation du calcaire (CO_3Ca) à une température d'environ 900°C .



La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur et se transforme en chaux éteinte.



La réaction est réversible car l'hydratation par l'humidité ambiante et le CO_2 de l'atmosphère vont permettre à la chaux une prise à l'air, d'où le terme de chaux aérienne.



La chaux aérienne peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux.

Les caractéristiques des chaux aériennes prises en compte sont : la forme (vive, éteinte ou lait), la teneur en chaux libre, la granularité (tamisat 2 mm, 0,2 mm et 0,08 mm), la réactivité (essai de réactivité à l'eau, la vitesse d'hydratation de la chaux, le test global de qualité de la chaux).

La chaux est couramment symbolisée par sa formule chimique : CaO .

Il existe divers matériaux appelés chaux qui se différencient entre eux par leur teneur en impuretés. (normes NF P 15-310 et NF P 15-312). Les chaux sont codifiées ainsi :

- chaux aérienne calcique vive: CL-Q
- chaux aérienne calcique éteinte: CL-S
- chaux hydraulique naturelle: NHL

I.4.1.2. Les liants hydrauliques

Un liant hydraulique est un produit qui durcit par hydratation et conserve ensuite sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Ce phénomène d'agglomération des éléments granulaires du sol est appelé "prise hydraulique" et confère au sol une cohésion permanente.

La qualité de la réaction dépend de la nature du matériau, du type et de la quantité de liant, de la compacité à la mise en oeuvre, de la température du milieu et de l'âge du mélange.

Il y a d'une part les ciments classiques et d'autre part les liants spéciaux routiers (LSR).

Les ciments sont normalisés dans leur constitution et leur utilisation (norme NF P 15-301).

Le ciment est constitué en majeure partie de clinker (produit de la cuisson du mélange nommé "cru" : 80% calcaire + 20% argile).

Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon, des fumées de silice, ainsi qu'une proportion de l'ordre de 3 % de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique.

Le produit final entre en réaction quasi instantanément avec l'eau et forme un gel qui, en s'hydratant progressivement, se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol.

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition :

- CEM I : ciment Portland ;
- CEM II : ciment Portland composé ;
- CEM III : ciment de haut-fourneau ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique ;
- CEM V : ciment composé.

Les liants spéciaux routiers sont des liants hydrauliques routiers (LHR) spécialement formulés pour certaines opérations de terrassement ou de construction d'assises, tant en terme de facilité d'usage que de performances. Les LHR sont utilisés pour traitement de sols fins, travaux en arrière saison, matériaux argileux, craies, calcaires sablonneux, portance rapide.

Ils sont classés en fonction de leur utilisation (norme NF P15-108):

Les constituants des ciments sont codés comme suit :

- clinker Portland: K
- laitier granulé de haut-fourneau: S
- laitier d'aciérie à l'oxygène: Sb
- pouzzolane naturelle: P
- pouzzolane naturelle calcinée: Q
- cendres volantes siliceuses : V
- cendres volantes siliceuses de lit fluidisé: Va à durcissement normal »
- cendres volantes calciques : W
- cendres volantes calciques non éteintes : Wa
- 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) : Cs

Le ROLAC 645 S PN est un liant hydraulique routier de l'entreprise LAFARGE Ciment, produit provenant de l'usine de Port-la-Nouvelle. Il est utilisé dans les cas étudiés présentés en partie II. (voir également fiche produit en annexe 4)

I.4.2. Actions des liants

I.4.2.1. La chaux

a. Actions immédiates

- Modification de l'état hydrique : la chaux vive et la chaux éteinte abaissent la teneur en eau alors que le lait de chaux permet une élévation de la teneur en eau.

Il faut noter que l'abaissement de la teneur en eau peut être supérieur à celui provoqué par la chaux à cause de conditions atmosphériques évaporantes. L'assèchement qui se produit lors du malaxage peut être préjudiciable pour le traitement de la CDF, mais il peut être compensé par un arrosage complémentaire.

- Modification de la fraction argileuse

Réduction de l'argilosité par floculation : actions sur les charges électriques des particules fines. Le phénomène se traduit par une réduction de l'indice de plasticité (sol rigide, frottant), une augmentation de la résistance au cisaillement du sol (élévation de l'IPI → rigidité), et une modification des caractéristiques de compactage.

L'énergie de compactage nécessaire est réduite avec la réduction de ρ_d . Un matériau moins dense est plus facile à compacter qu'un matériau qui a une densité plus importante et donc qui va offrir une plus grande résistance au coup asséné par le compacteur. La figure 3 représente l'influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage et exprime bien cette relation entre les paramètres de densité, de teneur en eau et le compactage, car on peut y visualiser le déplacement du point de l'optimum ; optimum signifiant la condition idéale pour un compactage optimal.

b. Actions à long terme

- Action pouzzolanique : phénomène de cimentation (cristallisation de la fraction argileuse)
- Action de syntaxie (pralinage des grains) : augmentation de la résistance des grains par obturation des pores.

I.4.2.2. Les liants hydrauliques

a. Actions immédiates

- Modification de l'état hydrique : assèchement par apport de matière sèche.
- Modification fraction argileuse : floculation des minéraux argileux.

b. Actions à long terme

La prise hydraulique confère au matériau traité une résistance en traction prédominante dans

leur comportement. En effet le matériau traité au liant hydraulique (MTLH) est assimilable au béton de ciment, employé dans la construction des bâtiments ; ce dernier a une forte résistance en compression et une faible résistance en traction. Les effets de sollicitation du MTLH au sein de la structure de chaussée sont considérés vis-à-vis du fluage, or c'est précisément la résistance en traction qui va clairement limiter cet allongement de la couche.

La prise hydraulique se déroule en 3 étapes :

1) démarrage de la prise (phase dormante*) : mise en solution puis gel

* c'est le temps du délai de maniabilité pour la mise en oeuvre (de 2h à 24h voir 48h)

2) développement de la cristallisation du gel (rigidification)

3) durcissement (poursuite de la croissance de la résistance)

"En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d'une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier) et, d'autre part, les délais d'étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue." (GTS)

Les liants hydrauliques permettent de fabriquer des matériaux dont le niveau de performances (défini généralement par une résistance en traction et un module) peut varier en jouant sur le type de liant et le dosage.

- Tableau IX - Récapitulatif des actions des liants -

	CHAUX	LH
Actions immédiates	- abaissement teneur en eau - rigidité par flocuation (résistance au cisaillement)	- assèchement par apport matière sèche - flocuation
Actions à long terme	- prise pouzzolanique (cimentation) - syntaxie (pralinage)	- prise hydraulique (résistance en traction)

Il faut noter que les effets de la prise pouzzolanique et de la prise hydraulique s'interrompent dès que la température du mélange descend en dessous de 5 ° C.

La température est un facteur important de la cinétique de prise.

Le risque de gel est significatif au regard de la résistance du sol traité à l'âge correspondant à son apparition probable.

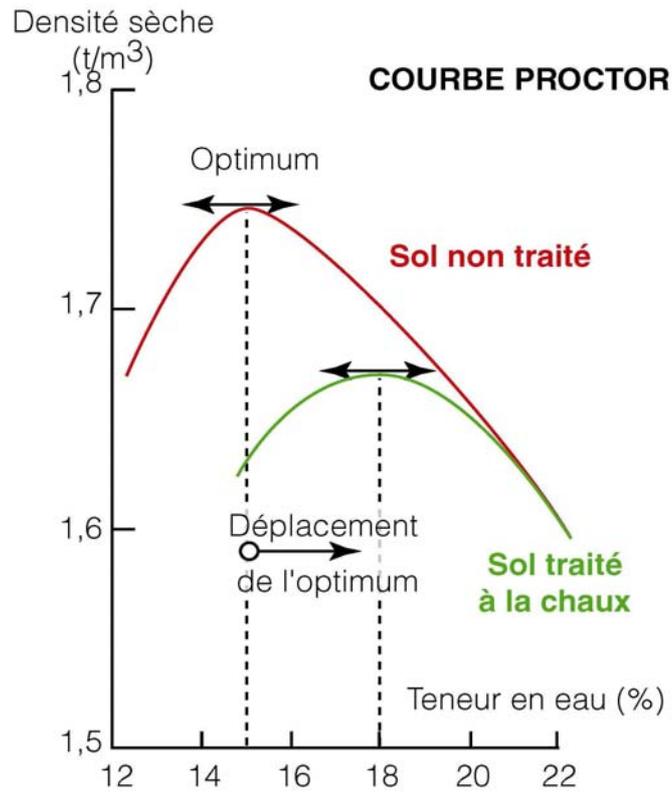
La prise en compte de cet aspect est très importante dans le cas du traitement appliqué à la réalisation de couche de forme qui n'est pas recommandé dans les régions pouvant être soumises à une période de gel significative.

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

La figure 5 représente l'action de la chaux sur les caractéristiques de compactage, déterminées par l'essai Proctor et modifiées après traitement. On peut constater une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité maximale Proctor.

La figure comporte des valeurs qui permettent de mesurer la réduction effective de la teneur en

eau pour un dosage de chaux.



- Figure 5 - Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol - CIM Béton -

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. Ceci contrebalance largement la relative perte de densité du mélange.

I.4.3. Les grandes étapes du traitement de sol

I.4.3.1. Identification du sol

Les études géotechniques permettant la classification des matériaux et leur réutilisation s'appuient sur une reconnaissance générale des sols destinés à être traités et sur la formulation des mélanges.

L'étude de qualification des matériaux comprend l'identification à partir des paramètres de sol (décrits précédemment dans le paragraphe I.2. *Rappel sur les paramètres de sol et le compactage*), leur localisation dans le profil géotechnique, et l'estimation de leur quantité.

Les éléments considérés pour définir le contenu d'une étude de traitement pour la CDF sont : la collecte des données (cartes géologiques, sondages de reconnaissance..), le recueil d'expertise locale (notamment la présence d'éléments perturbateurs), la caractérisation du gisement et la constitution d'échantillons représentatifs (mélanges), l'identification du produit de traitement, et enfin, le cas échéant, l'organisation et la conduite d'un chantier expérimental.

La caractérisation du gisement a pour objectif de fournir un échantillon représentatif du matériau. Un zonage (repérage) de chaque formation est défini sur le profil géotechnique ainsi que les plages de variation des paramètres de nature et d'état des sols.

La dispersion des caractéristiques du matériau de chaque zone donne une indication de l'hétérogénéité des sols de la zone. Des valeurs limites de dispersion de la masse volumique sèche ρ_{dOPN} sont fixées par le GTS dans le *tableau C1-III : utilisations possibles des sols traités en CDF en fonction de leur homogénéité*, p.96. L'homogénéité du matériau est ainsi définie par son pourcentage de dispersion (%). La plage de dispersion de la ρ_{dOPN} observée doit être inférieure à ces valeurs pour considérer l'homogénéité du gisement comme satisfaisante. Le mélange des prélèvements réalisés sur l'ensemble du gisement constitue alors un échantillon représentatif.

I.4.3.2. Etude de formulation

Ce sont les études qui déterminent la nature du produit de traitement et son dosage.

Le dosage se calcule notamment en fonction des performances visées.

▪ **Dosage** (en %) :

$$d = [Q / (M_{sol} + Q + m_{cg})] \times 100$$

Q : masse produit de traitement

M_{sol} : masse sol à traité

m_{cg} : masse correcteur granulométrique (éventuellement)

▪ Calcul du besoin en liant (en tonnes de liant) :

$$\text{épaisseur traitée} \times \text{surface} \times \rho_d \times (d/100-d)$$

(d est le dosage en liant exprimé en pourcentage)

Les études comprennent l'**essai d'aptitude du sol au traitement**, exposé ci-après (I.4.4.2) :

▫ Gonflement volumique G_v

▫ Résistance en compression diamétrale R_{td}

Selon le résultat et les valeurs de référence, le produit est dit : adapté, douteux, inadapté.

Dans le cas de grands chantier, lorsqu'il subsiste des incertitudes quant au choix de la solution, des **planches d'essai et chantiers expérimentaux** sont réalisés pour confirmer les performances

mécaniques, étudier la faisabilité du malaxage, définir les conditions de mise en oeuvre, moyens et autres. Cependant, un chantier expérimental reste une charge financière importante.

I.4.3.3. Mise en œuvre : les opérations courantes principales

Les opérations courantes et principales concernent la préparation du sol (scarification, humidification), l'épandage du produit, le malaxage, l'ajustement de l'état hydrique (arrosage), le réglage, et enfin le compactage.

▫ Préparation du sol :

- décohésion du matériau par foisonnement
- élimination de la fraction grossière : scarification, criblage, concassage
- homogénéisation du matériau par tri (chargement et dépôt)
- humidification (changement état hydrique)

▫ Epandage produit (épandeur pondéral ou volumétrique)

▫ Malaxage : mélange sol et produit pour obtention mouture

▫ Ajustement de l'état hydrique : arrosage si après malaxage le mélange est trop sec pour être compacté de manière conforme. En effet, cet état a une incidence sur les exigences de compacité.

Notons que le traitement de la CDF nécessite un arrosage presque systématique du fait de l'apport important de matières sèches issu de dosage élevé conféré par les exigences de performances.

L'augmentation de teneur en eau doit cependant rester limitée, en général à 1 à 2 %.

▫ Réglage : il s'agit du nivellement du matériau traité à l'épaisseur conforme.

▫ Compactage : opération visant à atteindre l'objectif de densification exprimé par la masse volumique sèche à obtenir pour une teneur en eau à l'optimum OPN. La qualité de la CDF est liée à son compactage, notamment pour sa résistance à la fatigue qui varie selon la densité en fond de couche.

I.4.3.4. Contrôle

La mesure du module EV2 n'est pas appropriée aux sols traités au liant hydraulique du fait de leur rigidité, cette mesure ponctuelle de l'enfoncement d'une plaque de diamètre 60 cm n'est pas représentative pour une couche dont le comportement se rapproche d'une dalle. Il peut toutefois suffire pour avoir une idée de la portance de la couche traitée de petits chantiers.

En revanche pour s'assurer de la portance et compacité d'une CDF traitée, il faut faire la mesure de sa déflexion, soit avec un déflectographe qui enregistre les mesures de manière continue, soit avec une poutre de Benkelman qui enregistre les mesures de manière ponctuelle.

La vérification de l'état hydrique de la mouture est importante avant le compactage, pour éviter la fissuration du support. Pour un sol en matériaux argileux ou limoneux, un simple test de consistance à la main permet de vérifier l'état de plasticité du mélange et donc la teneur en eau.

La mesure de l'épandage du liant à la bêche ou au bac permet de vérifier ponctuellement la masse épandue et de contrôler la régularité de l'épandage par rapport au dosage prévu.

Un plan de contrôle, s'inscrivant dans le cadre de l'assurance qualité, définit le programme des actions de vérifications au cours de l'exécution.

I.4.4. Traitement de sol de la CDF

Le traitement d'un sol en vue de sa réutilisation en CDF fait l'objet d'étude de formulation précise et complète dont la méthodologie est décrit précédemment.

Il y a différents niveaux d'étude de formulation selon la prise en compte de la CDF dans le dimensionnement.

L'essai d'aptitude du sol au traitement qui fait parti de ces études, est systématique pour la CDF. Il est décrit à part car il peut suffire dans certain cas (petits chantiers) et constitue une première étape décisive pour la suite des études (notamment si il est nécessaire de poursuivre).

I.4.4.1. Evaluation de l'aptitude du sol au traitement (norme NF P94-100)

Les valeurs de références pour qualifier l'aptitude d'un sol au traitement sont présentées dans le tableau VII et sont d'une part le gonflement volumique G_V et d'autre part la résistance en compression diamétrale R_{tb} .

L'essai est une vérification de la compatibilité du traitement avec le sol et permet de voir notamment si le matériau ne comporte pas d'éléments perturbateurs à la réaction de prise.

- Tableau X - Valeurs de référence pour qualifier l'aptitude d'un sol au traitement - GTS

Produit Traitement	Aptitude du sol	Gonflement volumique G_V	Résistance en compression diamétrale R_{tb}
Liant Hydraulique (+ Chaux éventuellement)	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq G_V \leq 10$	$0,1 \leq R_{tb} \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$
Chaux (seule)	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement (lenteur prise pouzzolanique)
	Douteux	$5 \leq G_V \leq 10$	
	Inadapté	≥ 10	

Notons qu'il est opportun à l'occasion de cet essai d'aptitude du sol de déterminer également le module élastique E du matériau traité, afin de le coupler à la résistance en traction directe R_t pour obtenir sa classe mécanique. La résistance en traction directe R_t est calculée à partir de la résistance en traction brésilienne R_{tb} selon le rapport suivant :

$$R_t = 0,9 \text{ (ou } 0,8) R_{tb}$$

La résistance en traction et le module du matériau traité permet de définir une zone de classement (voir figure 4, paragraphe I.3.4 *Classe mécanique de la CDF traitée*), ensuite la zone et le mode de fabrication (en place ou en centrale) donne la classe mécanique.

L'étude des performances mécaniques fait cependant partie de l'étude de formulation à proprement dit.

I.4.4.2. Méthodologie générale de l'étude de formulation

Voici les actions que comporte une étude, nous verrons ensuite selon les niveaux.

- Identification des composants du mélange :
 - matériau sol : paramètre de nature et état hydrique (+ fragmentabilité et abrasivité si justifié)
 - produit : chaux et ciment selon norme et LSR selon avis technique
- Conditions de mise en œuvre : courbe Proctor Normal du sol avant et après traitement + courbe IPI sol traité; Valeurs minimales de l'IPI (de 10 à 20) et Teneur en eau finale $> 0,9 w_{OPN}$.
- Détermination du délai de maniabilité selon le type de produit.

▪ Etude des performances mécaniques :

Elles s'étudient par le biais des essais suivants :

- L'essai CBR, avec mesure de l'IPI avant immersion du moule pour l' I_{CBR} ;
- L'essai de compression pour R_c ;
- L'essai de traction directe pour R_t ;
- L'essai de traction indirecte (essai de compression diamétrale, ou essai brésilien) R_{tb}

Pour un traitement à la chaux, il faudra étudier le comportement sous trafic et le comportement au gel.

Les critères de jugements sont :

Pour vérification de la teneur en eau et du dosage, le respect simultanée des 2 conditions suivantes :

$$I_{CBR} \geq 20 \text{ et } (I_{CBR} / IPI) \geq 1$$

Si il y a risque d'apparition du gel dans la CDF, il faut s'assurer de la résistance en compression du sol traité à l'âge correspondant à cette apparition probable du gel sur le chantier avec :

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

Pour un traitement aux LH (éventuellement associé à la chaux) l'étude du comportement est plus complète. On étudie :

- L'âge autorisant la circulation sur la couche traitée : R_c à 7 et 28 jours ;
- La résistance à l'immersion au jeune âge : R_c à 60 jours et R_{ci} à 28 et 32 jours, R_{ci} / R_{c60} ;
- La résistance au gel : R_{tb} à date apparition probable du gel ;
- Les performances escomptables à long terme : E et R_t à 28 et 90 jours

Les critères de jugement sont les suivants :

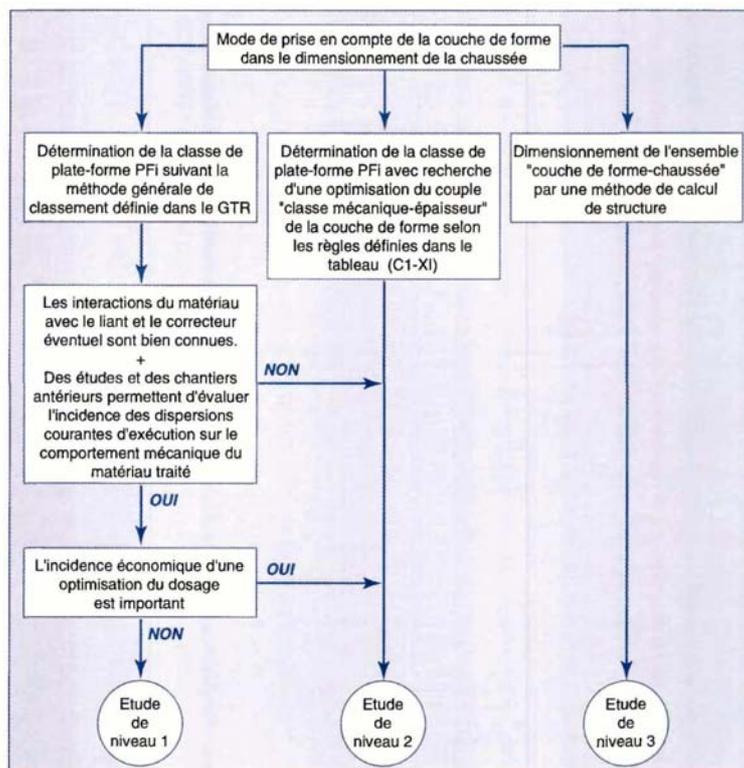
- La CDF peut être circulée dès que $R_c \geq 1 \text{ MPa}$
- La résistance à l'immersion est satisfaisante si :
$$(R_{ci} / R_{c60}) \geq 0,8 \text{ pour } VBS \leq 0,5$$
$$\text{ou } (R_{ci} / R_{c60}) \geq 0,6 \text{ pour } VBS > 0,5$$
- La résistance lors de l'apparition du gel : $R_{tb} > 0,25 \text{ MPa}$
- Les performances escomptables à long terme sont caractérisées par le couple R_t et E , qui, comme vu précédemment (I.3.4 *Classe mécanique de la CDF traitée*), permettent d'obtenir un classement mécanique du matériau de type classe 5.

▪ Incidence des dispersions d'exécution sur les caractéristiques mécaniques du matériau traité. On regarde si les valeurs E et R_t restent correctes pour obtenir la classe mécanique du matériau

souhaitée, et ce malgré des disparités sur le dosage du liant liées à l'épandage du produit dans le cadre d'un traitement en place ou à l'homogénéité du mélange pour un traitement en centrale.

I.4.4.3. Niveaux d'étude

La figure 6 précise le niveau d'étude de formulation à engager selon la méthode de dimensionnement de la CDF; il y a 3 niveaux d'étude différents.



- Figure 6 - Logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager - GTS

Les étapes de l'étude sont sensiblement les mêmes à chaque niveau car il y a des paramètres incontournables à définir cependant leur précision est différente.

a. Etude de niveau 1

L'objectif est la vérification de la formule choisie d'après expérience, c'est à dire de la "formule de base". Elle suppose :

- Identification des composants du mélange + choix produit
- Conditions de mise en œuvre et délai de maniabilité
- Comportement immersion au jeune âge et résistance au gel

b. Etude de niveau 2

Elle vise à déterminer le dosage en produit selon la classe d'AR et l'épaisseur de CDF pour atteindre une classe de PF et optimisation du dosage en produit. L'étude signifie :

- Identification des composants du mélange + choix produit
- Conditions de mise en œuvre et délai de maniabilité
- Performances mécaniques en fonction du dosage (E et R_{tb})

- Comportement au jeune âge immersion au jeune âge et résistance au gel
- Incidence des dispersions d'exécution (dosage, compacité, état hydrique) sur les caractéristiques mécaniques du matériau traité et modalités d'ajustement du dosage selon le diagramme E-R_t.

c. Etude de niveau 3

Son but est le dimensionnement de l'ensemble "CDF - structure de chaussée" utilisant une méthode de calcul (de type ALIZE par exemple). Détermination des caractéristiques mécaniques E et R_{tb} à introduire dans le modèle de calcul pour une optimisation technique et économique de la chaussée. Elle se traduit par :

- Identification des composants du mélange + choix produit
- Conditions de mise en oeuvre et délai de maniabilité
- Comportement immersion au jeune âge et résistance au gel
- Incidence des dispersions d'exécution (dosage, compacité, état hydrique) sur les caractéristiques mécaniques du matériau traité et valeur du couple E-R_{tb} à introduire dans le modèle de calcul.
- Planches d'essais et chantier expérimental

I.4.4.4. Cas des chantiers de faible importance

Pour les chantiers de faible importance, le coût et le délai d'étude est prohibitif. Le type de produit et le dosage sont fixés empiriquement d'après d'autres projets similaires.

Les cas de chantier concernés se définissent alors par les conditions suivantes :

- un volume de CDF < 5 000 m³ ;
- pas d'utilisation de Liant Spécial Routier (LSR) ;
- pas de trafic de chantier autre que l'approvisionnement de la voirie ;
- pas de surclassement de la PF ;
- pas d'états hydriques th ou ts.

Le tableau C1-V du GTS présente les modalités de traitement envisageables pour ce genre de chantier. Ces modalités respectent les conditions suivantes : coefficient de sécurité sur le dosage, liants normalisés (chaux vive et ciment de la classe CPJ CEM II 32,5), épaisseur de CDF du GTR, pas de risque gel ou immersion.

- Tableau XI - Modalités de traitement envisageables pour les chantiers de faible importance - GTS

Classes de sols	Modalités de traitement
A ₁ - B ₅ C ₁ A ₁ - C ₁ B ₅ C ₂ A ₁ - C ₂ B ₅	1 % Chaux + 7 % Ciment * pour les matériaux peu argileux (VBS<0,5) la chaux n'est pas indispensable
A ₂ - B ₆ C ₁ A ₂ - C ₁ B ₆ C ₂ A ₂ - C ₂ B ₆	1,5 % Chaux + 7 % Ciment
A ₃ - C ₁ A ₃ - C ₂ A ₃	2 % Chaux + 7 % Ciment ou 6 % Chaux
B ₁ - B ₂ - D ₁ C ₁ B ₁ - C ₁ B ₂	6% Ciment (+ correcteur éventuel)
B ₃ - B ₄ - D ₂ - D ₃ C ₁ B ₃ - C ₁ B ₄ C ₂ B ₃ - C ₂ B ₄	5% Ciment

I.5. Le calcul du complexe de chaussée et le logiciel ALIZE

Le dimensionnement des chaussées a généré plusieurs méthodes de calcul dont le principe est avant tout la comparaison des sollicitation calculées de la structure de chaussée sous trafic et des sollicitations admissibles des matériaux qui la composent.

Le calcul des contraintes et déformations dans les matériaux s'appuie sur les notions de mécanique de chaussée développées par différents modèles qui permettent de comprendre le fonctionnement des structures et d'en évaluer les sollicitations.

Ces approches théoriques font appel à des calculs mathématiques complexes et trop fastidieux pour être effectués manuellement d'où l'emploi de calculateurs numériques tel que le logiciel ALIZE, ou le recours aux abaques simplifiant la démarche de dimensionnement.

Enfin des compilations de cas de figure de chaussée selon le type de structure facilitent le dimensionnement car il offre directement les résultats de calculs selon les paramètres retenus lors du pré-dimensionnement, configuration initiale choisie de la chaussée. Ce sont les méthodes pratiques de dimensionnement.

Avant de présenter ces différentes méthodes de dimensionnement, une présentation de différents types de structure de chaussée et de leur fonctionnement s'impose.

I.5.1. Les différents types de chaussée et leur fonctionnement

I.5.1.1. Les familles de structures de chaussée

a. Les chaussées souples

Ce sont les structures dites traditionnelles composées d'une couche bitumineuse (BB) mince (< 15 cm) pour la couche de roulement, et d'un corps de chaussée, assise, constitué d'une ou plusieurs couches de grave non traité (GNT). L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm.

b. Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou plusieurs couches. L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

c. Les chaussées mixtes

Elles sont composées d'une couche de roulement et d'une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.

Le rapport K de l'épaisseur des matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de l'ordre de $\frac{1}{2}$ (0,4 et 0,5).

Ces structures allient le comportement des deux types de matériaux et limite la vitesse de remontée des fissures.

d. Les chaussées semi-rigides

Ce sont les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques. Elles comportent une couche de surface bitumineuse et une ou deux couches d'assise en matériaux traités au liant hydraulique (MTLH) dont l'épaisseur est de 20 à 50 cm.

e. Les chaussées à structure inverse

Leur structure est composée de couches bitumineuses (surface et une couche d'assise) sur une couche de GNT (de 10 à 12 cm d'épaisseur) reposant sur une couche de fondation en MTLH.

L'interposition d'une couche granulaire (absente de la structure mixte comportant également une couche de matériaux traités au liant hydrocarboné et une couche de MTLH) permet de réduire efficacement la vitesse de remontée des fissures. Cette structure est une configuration utilisée pour les chaussées autoroutières.

f. Les chaussées en béton de ciment

Ces chaussées comportent une couche de base-roulement en béton de ciment de plus de 12 cm. La couche de béton repose sur une couche de fondation qui est soit en MTLH, soit en béton maigre, soit une couche drainant (GNT ou autre) ; soit elle repose directement sur le support de chaussée avec interposition d'une couche bitumineuse d'assise (environ 5 cm).

La structure est constituée de dalles goujonnées (prise en compte des joints et bords de dalles dans le dimensionnement), ou de béton armé continu (calcul des armatures).

I.5.1.2. Le fonctionnement mécanique des structures

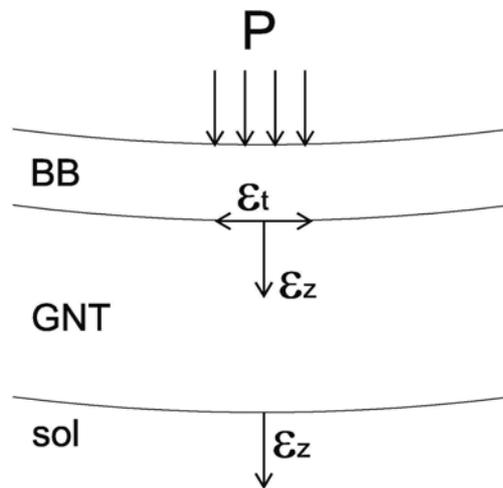
Les schémas de répartition des contraintes selon le type de structure de chaussée (souple ou semi-rigide) permettent de visualiser clairement la différence fondamentale de fonctionnement des chaussées selon les matériaux qui les composent.

Les matériaux les plus souples vont générer une déformation horizontale ou verticale sous sollicitations alors que les matériaux les plus rigides génèrent une contrainte de traction car ils ne peuvent s'allonger ou se courber.

Le sol et les matériaux granulaires non traités ont une déformation verticale ϵ_z .

Le bitume influence le comportement des matériaux bitumineux qui réagissent en flexion et ont une déformation horizontale ϵ_t .

Les matériaux traités au liant hydraulique ont un comportement qui se rapproche d'une dalle béton par leur rigidité. Ils n'ont pas de souplesse sous l'action verticale des charges, ils ne vont pas fléchir d'où la génération d'une contrainte de traction σ_t .



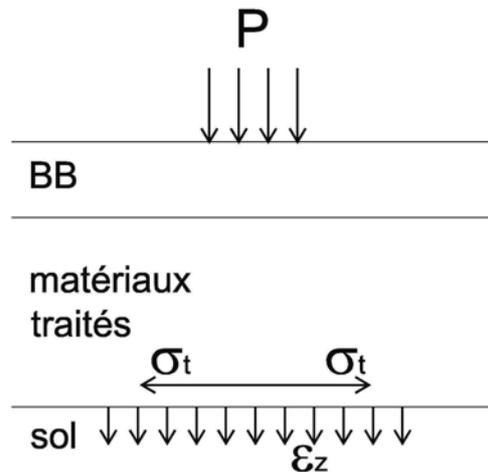
- Figure 7 - Chaussée souple - d'après les cours de l'ENTPE de M.FAURE

Comme on peut le voir dans la figure 7, dans une chaussée souple, la transmission des charges se fait verticalement au travers de la couche de GNT depuis la surface de la chaussée vers le sol support. La diffusion des efforts verticaux reste faible et dépend de l'épaisseur de la couche de matériaux granulaires qui ont une faible rigidité. La couche de GNT présente le même type de déformation que le sol support c'est-à-dire une déformation verticale relative ϵ_z .

La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion qui se traduisent par un allongement relatif horizontal ϵ_t à la base de la couche.

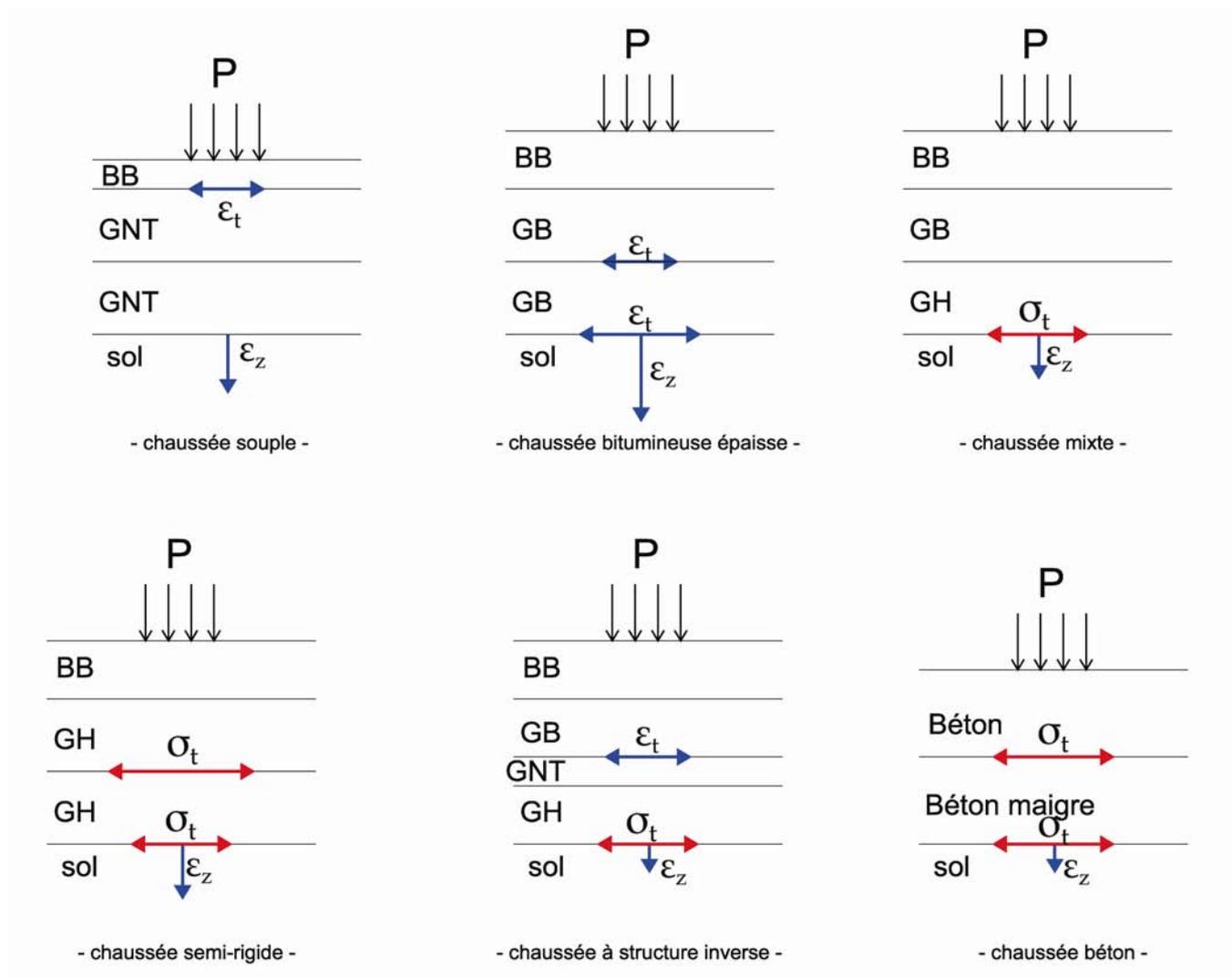
Pour ce type de structure, le facteur dimensionnant est la déformation verticale ϵ_z à la base de la couche de GNT.

Ces chaussées sont particulièrement sensibles aux variations de la portance du sol support sensible à l'eau ou au gel et peut engendrer des déformations permanentes de la structure.



- Figure 8 - Chaussée semi-rigide - d'après les cours de l'ENTPE de M.FAURE

Les matériaux traités aux liants hydrauliques qui composent une structure semi-rigide présente une très grande rigidité, ce qui a pour conséquence une faible transmission des contraintes verticales vers le support. En revanche, le comportement de ces matériaux se rapproche de celui du béton car, s'ils offrent une bonne résistance en compression, ils ont une faible résistance en traction. L'assise traitée va donc subir des contraintes de traction-flexion σ_t qui s'avèrent déterminantes pour son dimensionnement.



- Figure 9 - Types de chaussées et mode de fonctionnement -

La figure 9 présente les contraintes et déformations qui surviennent dans les différents types de chaussée sous sollicitations. Les flèches rouges symbolisent les contraintes et les bleues les déformations. Leur dimension est un ordre de grandeur.

Le fonctionnement de la chaussée souple a été vu précédemment. Pour le calcul, on retiendra en effet la déformation verticale à la base de la couche de GNT comme facteur dimensionnant. C'est également la déformation du sol en surface.

Pour la chaussée bitumineuse, le facteur déterminant du dimensionnement est la déformation horizontale, fluage du matériau bitumineux de l'assise, qui réagit à la contrainte de flexion en s'étirant. La figure montre le cas où les deux couches de matériaux bitumineux ne seraient pas collées, alors il faudrait prendre en compte la déformation de chacune. La déformation verticale du sol en surface est également considérée même si elle n'est pas le facteur déterminant du calcul de structure.

En revanche, il apparaît clairement sur la figure de la chaussée mixte l'importance accordée à la contrainte de traction à la base de la couche de MTLH comme facteur dimensionnant. La déformation du sol reste à calculer comme un critère de dimensionnement.

La contrainte de traction est également le facteur dimensionnant de la structure semi-rigide. La figure montre le cas où les deux couches de MTLH ne seraient pas collées, il faudrait prendre en compte la contrainte à la base de chacune d'elles. La déformation du sol est très faible car la couche traitée fait office de barrière à sa déformation par sa rigidité en compression.

Dans la chaussée à structure inverse, la couche de GNT est là uniquement pour éviter la remontée des fissures.

La couche bitumineuse travaille en traction à la base de la couche, l'amplitude des allongements est fonction de l'épaisseur et de la rigidité du support granulaire.

La contrainte à la base de la couche de MTLH est en relation avec l'épaisseur totale du corps de chaussée.

La déformation du sol est très faible du fait de ces deux absorbeurs de contraintes que sont la couche bitumineuse et la couche de MTLH, la couche de GNT faisant tampon entre les deux.

La chaussée en béton de ciment est considérée comme une structure continue où la contrainte de traction à la base de la couche de béton est prépondérante. La figure montre le cas de deux couches de béton, fondation et base désolidarisées (interface décollées) pour éviter la remontée des fissures. La contrainte de traction se calcule donc à la base de chacune des couches.

La déformation du sol n'est pas déterminante pour le calcul car trop faible vis-à-vis des contraintes de traction.

I.5.2. Les modèles de la mécanique des chaussées

On peut retenir le modèle de Boussinesq, les modèles de Hogg, de Westergaard et les formules d'Odemark pour les bicouches, et enfin celui de Burmister pour le multicouche (modèle sur lequel s'appuie le logiciel ALIZE).

Ces modèles analytiques ont mis en évidence la relation étroite entre la dispersion de la charge pour une contrainte admissible au niveau du sol support et l'épaisseur des couches, faisant tampon à la pression exercée par un pneu, et diffusant cette pression.

Pour réduire l'épaisseur des couches surplombant le massif de sol, ces modèles démontrent également l'importance du module et de la rigidité de ces couches.

I.5.2.1. Le modèle de Boussinesq

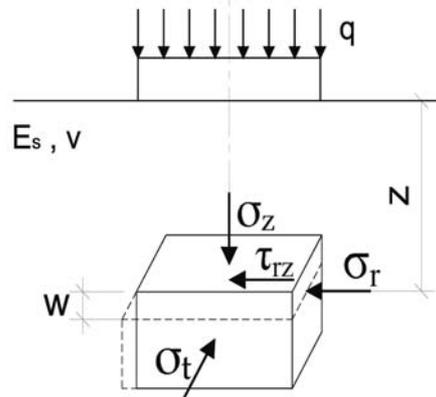
Le modèle de Boussinesq est la base des calculs de tous les autres car il permet de calculer la contrainte dans le sol.

La charge est une pression uniforme q appliquée sur une aire circulaire de rayon a .

Le sol support est un massif semi-infini élastique de module E_s et coefficient de poisson ν .

L'opération consiste à calculer l'épaisseur H (profondeur z) pour laquelle la diffusion de la pression est suffisante pour être admissible par le sol.

La contrainte verticale σ_z calculée doit être inférieure à la contrainte admissible par le sol σ_{zad} .



$$\sigma_z = q \left(1 - \frac{z^3}{[a^2 + z^2]^{3/2}} \right)$$

$$\sigma_z = q \left(1 - \frac{(z/a)^3}{[1 + (z/a)^2]^{3/2}} \right)$$

On calcule z/a puis z avec la valeur de a et obtient l'épaisseur H .

Le déplacement dans le massif, dans l'axe de la charge à la profondeur z est noté w .

$$w = \frac{q}{E_s} \left[2(1-\nu^2)(a^2 + z^2)^{1/2} - \frac{(1-\nu)z^2}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + (\nu + 2\nu^2 - 1)z \right]$$

La déflexion en surface du massif w_0 ($z=0$)

$$w_0 = 2 \frac{q}{E_s} a (1 - \nu^2)$$

Pour que la contrainte σ_z soit très petite par rapport à la pression q , on constate qu'il faut une forte épaisseur. Si on considère une couche granulaire sur le sol, le problème de l'épaisseur n'est pas résolu car le corps granulaire a un module proche de celui du sol.

I.5.2.2. Les modèles bicouches

Ils mettent en valeur la nécessité de l'augmentation du module E_1 de la couche sur le massif de sol pour diminuer l'épaisseur H de cette couche.

Pour augmenter le module il faut utiliser un liant qui rigidifie la couche. Ainsi traitée, la couche présente alors un comportement proche d'un solide, avec une bonne résistance en compression qui du coup, ne pouvant se courber, génère une contrainte de traction par flexion à sa base.

Le modèle de Hogg est schématisé par une plaque (E_1, ν) posée sur un massif infini comme celui de Boussinesq (E_2, ν).

Les inconnus sont le déplacement vertical de la plaque et la contrainte verticale sur le massif. Les déplacements verticaux de la plaque sont assimilables à ceux du massif ; ces derniers sont reliés à la contrainte sur le massif par les formules de Boussinesq.

Les moments fléchissant de la plaque (et par la suite les contraintes de tractions dans la plaque) sont déduits des déplacements verticaux w , par les formules usuelle des plaques.

Il ressort de ce modèle, par le truchement des calculs, une fonction de rigidité de la chaussée déterminante pour le calcul de la contrainte à la base de la plaque :

$$[(E_1/E_2) \times H^3]$$

La contrainte n'est autre que le produit de cette fonction de rigidité avec un autre facteur de variation :

$$P/H^2$$

(P représente la somme des pressions verticales à l'aplomb du cercle de charge).

La contrainte est donc fonction de l'épaisseur de la couche mais également de sa rigidité et donc son module.

En effet le rapport des modules est un facteur réutilisé dans d'autres modèles comme les Abaques bicouches ALIZE 3 car il caractérise la valeur plus élevée du module E_1 de la couche vis-à-vis de celle du module E_2 du sol.

Le modèle de Westergaard reprend l'hypothèse de la plaque mince pour figurer la chaussée mais le sol support est représenté par des ressorts dont le déplacement vertical w est proportionnel à la pression verticale $v = k w$ (k est le module de réaction du sol support).

Les conclusions sont sensiblement les même que pour le modèle de Hogg, c'est-à-dire l'influence de l'épaisseur dans le calcul de la contrainte ainsi que l'importante variation due au rapport des modules (E_1/E_2). Il fait en plus intervenir un facteur fondamental des matériaux traités aux liants hydrauliques, le rayon de rigidité des dalles.

Le rayon de rigidité de la dalle n'est pas sans rappeler le rayon de courbure R des Abaques bicouches ALIZE 3. La déflexion de la couche de chaussée d est un déplacement vertical dans l'axe de la charge (ou plutôt du jumelage) qui s'effectue selon ce rayon.

Les grandes tendances de variations des modèles bicouches sont donc l'épaisseur, le module de la couche et le rayon de chargement.

I.5.2.3. Les modèles multicouches

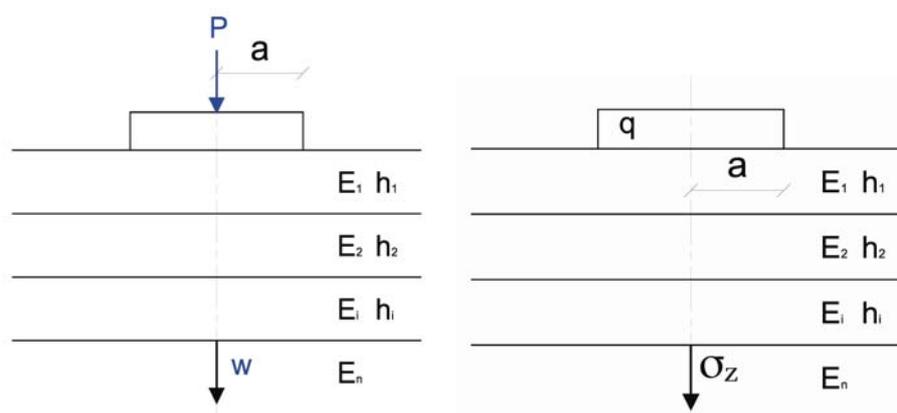
La structure de chaussée du modèle de Burmister est décrite par un ensemble de couches considérées comme des solides élastique (et non plus des plaques) d'épaisseurs finies et

constantes en plan. La couche inférieure, dont la limite supérieure correspond à la PF, est un massif semi-infini. Les interfaces entre les couches peuvent être collées ou décollées (glissante), ou semi-collée (somme de la moitié des deux autres). Les conditions d'interfaces conduisent à une continuité des déplacements (collage) ou à des contraintes de cisaillement nulles (glissement). Le calcul est fait sous une charge de référence de 65 kN (demi-essieu à roues jumelées). La charge est représentée par 2 disques de rayons 12,5 cm, dont les centres sont distants de 37,5 cm et appliquant une pression uniforme en surface de chaussée de 0,662 MPa. Les sollicitations (contraintes et déformations réversibles) sont calculées à la base des couches de matériaux liés et au sommet des couches non liées.

La méthode suppose un calculateur numérique (d'où le programme ALIZE ou les abaques bicouches) car la résolution des problèmes d'élasticité supposent un grand nombre d'opérations.

On peut toutefois retenir les formules d'Odemark (et Kirk pour la contrainte) permettant de calculer la contrainte verticale sur le sol et le déplacement vertical au niveau du sol support (déflexion).

Il s'agit d'un multicouche élastique de n couches, d'épaisseur h_i , de module E_i et de coefficient de poisson ν_i tous égaux à celui du massif ν , soumis à une charge schématisée par une pression uniforme q appliquée sur une aire circulaire de rayon a . le module du massif est noté E_n .



Le déplacement vertical w au niveau du sol support et dans l'axe de la charge :

$$w = P / [2 E_n \times h_e \times (1 + a/ h_e)^{0,5}]$$

avec

$$P = \pi a^2 q$$

et

$$h_e = 0,8 \times \Sigma [h_i (E_i/ E_n)^{1/3}]$$

Dans le cas d'un bicouche, il faut prendre 0,9 à la place de 0,8.

La contrainte verticale sur le sol support :

$$\sigma_z = q \left(1 - \frac{1}{[1 + (a/ h_e)^2]^3} \right)$$

La rigidité éventuelle des couches n'est pas autant considérée que dans les autres modèles (modèle de Westergaard, modèle de Hogg, modèle de Burmister), cependant les formules de calculs simples sont exécutables et la démarche de calcul en est au moins limpide.

(Unités : h et a en m, P en N, σ_z et q en MPa, E en MPa, w en mm)

I.5.3. La méthode française de dimensionnement

Basée sur le modèle de Burmister (multicouche), elle est également appelée méthode ALIZE lorsqu'elle fait appel au programme ALIZE pour le calcul des déformations et contraintes dans la structure sous l'action de charges modélisées.

La méthode est décrite dans le guide technique de conception et dimensionnement des structures de chaussée, édité par le LCPC et SETRA en 1994 et la norme française NF P 98-096 de 2011. Les valeurs retenues seront celle du logiciel ALIZE.

La méthode française de dimensionnement repose sur l'analyse mécanique du fonctionnement de la structure, les résultats d'essais de laboratoire sur la fatigue des matériaux, et les connaissances tirées de l'observation de chaussées existantes.

Après avoir calculé les contraintes et déformation dans la structure sous charge de référence, on calcule alors les valeurs de contraintes / déformations admissibles des matériaux de chaque couche en fonction de leur loi de fatigue propre et du trafic équivalent NE (exprimant le nombre d'essieux de 130 kN correspondant au nombre total de cycles de chargement).

Le principe de la démarche consiste à vérifier que, pour chaque couche, les valeurs des contraintes et déformations calculées sont inférieures aux valeurs admissibles.

Puis on vérifie le comportement de la structure au gel/dégel.

I.5.3.1. Les étapes de la démarche

- 1) Détermination des données :
 - type de charge (roue simple 65kN, essieu 130kN) ;
 - trafic ;
 - portance support (PF).
- 2) Choix du type de structure et pré-dimensionnement :
Couches, matériaux, épaisseur, interfaces, module, coefficient de poisson.
- 3) Calculs
 - σ et ϵ calculées dans la structure choisie :
Contraintes et déformations sous l'essieu de référence (130kN).
 - σ et ϵ admissibles dans matériaux :
Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support.
- 4) Vérification de la structure :
Comparaison des valeurs calculées aux valeurs admissibles.
$$\sigma \text{ et } \epsilon \text{ calculées} < \sigma \text{ et } \epsilon \text{ admissibles}$$

Si ce n'est pas le cas il faut ajuster les épaisseurs des couches.
- 5) Vérification de la tenue au gel-dégel de la structure :
Comparaison de l'indice de gel de référence IR (hiver selon le lieu) à l'indice de gel atmosphérique de la structure calculé IA.
$$\text{Il faut } IA \geq IR$$

I.5.3.2. Les données du calcul

a. La charge

L'essieu de référence est un jumelage de 130 kN.

La roue simple a un rayon A (cm) et une charge Q (MPa).

L'essieu quelconque a un rayon A (cm), une charge Q (MPa), et un entraxe D (cm)

L'essieu standard de 13T (= 130 KN) a un rayon A = 12,5 cm, une charge Q = 65 KN, une pression p = 0,662 MPa, et un entraxe D = 37,5 cm (= 3 x A).

b. Le trafic

Il est déterminé par le nombre de poids lourds (PL) sur la voie la plus chargée.

Les poids lourds sont définis comme des véhicules de charge utile supérieure ou égale à 5 T.

Le volume journalier de trafic PL, Moyenne journalière annuelle (MJA) donne une classe de trafic.

- Tableau XII - classes de trafic - d'après le cours de Routes GGC 234 de M. VANISCOTE

Classe	T5	T4	T3		T2		T1		T0		TS		TEX
			T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+	
MJA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000

Pour le calcul de dimensionnement il faut définir le trafic équivalent NE défini par un nombre d'essieux de référence. Il se calcule à partir du trafic cumulé N, et du coefficient d'agressivité moyen du trafic CAM. Le trafic cumulé se calcule à partir du nombre MJA et d'un facteur de cumul C sur la période de calcul, correspondant à la durée initiale pour laquelle la chaussée a été calculée.

$$C = [(1 + \tau)^p - 1] / \tau$$

p : durée de vie (nombre d'années)

τ : taux de croissance géométrique

$$N = 365 \times \text{MJA} \times C$$

$$\text{NE} = N \times \text{CAM}$$

- Tableau XIII - coefficient d'agressivité selon le trafic et le type de chaussée - Guide Technique de conception des structures de chaussée - 1994

Chaussée à faible trafic					
Classe	T5	T4	T3-	T3+	$\geq T2$
CAM	0,4	0,5	0,7	0,8	1
Chaussée à moyen et fort trafic					
Matériaux / Structure de chaussée				CAM	
Chaussée mixte, inversée et bitumineuse				0,8	
Chaussée bitumineuse épaisse / Sol support				1	
MTLH, béton de ciment / Structure semi-rigide				1,3	

c. Le risque

Il est défini selon le matériau et le niveau trafic pour une durée de vie donnée.

- Tableau XIV – Risques de calcul retenus à 20 ans - GT chaussées 1994

	T0	T1	T2	T3
Matériaux bitumineux	2	5	12	25
MTLH	2,5	5	7,5	12

d. La plateforme

Il s'agit du sol support caractérisé par un module, selon la classe de PF et un coefficient de poisson ($\nu=0,35$).

La CDF fait l'objet d'un surclassement de PF ou est considérée comme une couche de chaussée.

- Tableau XV - Portance à long terme de la PF - GTR

Module de calcul (MPa)	20	50	120	200
Classe de PF	PF1	PF2	PF3	PF4

e. Les interfaces

Elles sont considérées comme étant collées (non glissantes) sauf :

- Tableau XV - Conditions aux interfaces des couches non collées - d'après le cours de Routes GGC 234

Couches	Interfaces
Fondation et CDF traitée GCV/GCV	Glissantes
GH/GH	Semi-glissantes

f. Les caractéristiques des matériaux

Il s'agit du module E et du coefficient de poisson ν .

Pour les matériaux traités il faut la résistance en fatigue (ϵ_6 ou σ_6), ainsi que les écarts-types SN et Sh.

SN : représente la dispersion de la fatigue du matériau

Sh : les disparités d'épaisseur de la couche à la mise en œuvre

b : la pente de fatigue

Les tableaux ci-dessous donnent les paramètres de calcul pour chaque type de matériaux.
(voir également annexe 5)

- Matériaux granulaires (GNT)

Coefficient de poisson : $\nu=0,35$

- Tableau XV - Valeurs du module d'Young des couches de GNT - GT chaussées 1994

Faible trafic ($T \leq T3$)											
Couche de base	GNT 1 : $E=600$ MPa GNT 2 : $E=400$ MPa GNT 3 : $E=200$ MPa										
Couche de fondation	$E_{GNT} = k E_{PF}$ Ou $E_{GNT} = k E_{GNT-1}$ <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>catégorie</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>3</td> <td>2,5</td> <td>2</td> </tr> </table> Max. = E couche de base			catégorie	1	2	3	k	3	2,5	2
catégorie	1	2	3								
k	3	2,5	2								
Trafic moyen ($T2$ et $T1$) : structure GB/GNT											
Couche de fondation	$E_{GNT} = 3 E_{PF}$ Ou $E_{GNT} = 3 E_{GNT-1}$ max. = 480 MPa										
Structure inverse											
	E = 480 MPa										

- Matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH)

- Tableau XVI - Caractéristiques mécaniques des graves traités au LH - norme NF P 98-096

Matériau	E (MPa)	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	Sh	ν	kc
GC 3	23 000	0,75	15	1	0,03	0,25	1,4
GC 4	25 000	1,2	15	1	0,03	0,25	1,4
GCV	30 000	1,40	16	1	0,03	0,25	1,5
GLg	15 000	0,60	12,5	1	0,03	0,25	1,5
GLp	20 000	0,70	13,7	1	0,03	0,25	1,5
Glp + chaux	15 000	0,60	12,5	1	0,03	0,25	1,5
GLR	23 000	0,75	15	1	0,03	0,25	1,4

- Tableau XVI – Caractéristiques mécaniques des sables traités au LH - norme NF P 98-096

Matériau	E (MPa)	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	Sh	v	kc
SL 3	12 500	0,65	10	0,8	0,025	0,25	1,5
SL 2	8 500	0,425					
SL 1	3 700	0,175					
SC 3	17 200	0,75	12				
SC 2	12 000	0,50					
SC 1	5 000	0,21					

- Matériaux traités aux liants hydrocarbonés

- Tableau XVII – Caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrocarbonés - NF P 98-096

Matériau	E (MPa)	ε_6 (10^{-6})	-1/b	SN	v	kc
GB 1	7 000	70	5	0,4	0,35	1,3
GB 2	9 000	80	5	0,3	0,35	1,3
GB 3	9 000	90	5	0,3	0,35	1,3
GB 4	11 000	100	5	0,3	0,35	1,3
EME 1	14 000	100	5	0,30	0,35	1
EME 2	14 000	130	5	0,25	0,35	1
BBSG 1	5 400	100	5	0,25	0,35	1,1
BBSG 2 - 3	7 000	100	5	0,25	0,35	1,1
BBDr	3 000	-	-	-	0,35	-
BBME 1	9 000	-	-	-	0,35	-
BBME 2	12 000	-	-	-	0,35	-

- Les bétons de ciment

- Tableau XVIII – Caractéristiques mécaniques des bétons de ciment - norme NF P 98-096

Classe	E (MPa)	σ_6 (MPa)	-1/b	SN	v	kc
BC 5	35 000	2,15	16	1	0,25	1,5
BC 4	24 000	1,95	15	1	0,25	1,5
BC 3	24 000	1,63	15	1	0,25	1,5
BC 2	20 000	1,37	14	1	0,25	1,5

g. Les coefficients d'ajustement
Ils permettent d'adapter le modèle de calcul au cas étudié.

k_c → coefficients de calage

- Tableau XIX - Coefficient de calage - d'après le cours de Routes GGC 234

Matériau	k_c
GCV, GL, SH, Béton	1,5
GC, GLR	1,4
Grave-bitume GB	1,3
Béton bitumineux BB	1,1
EME	1

k_r → coefficients de risque

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

$$\delta = [SN^2 (c^2/b^2) Sh^2]^{0,5}$$

$c = 0,02$

SN : dispersion de la fatigue du matériau

u : fractile du risque

Sh : dispersion de l'épaisseur de la couche à la mise en œuvre

Graves traitées LH et bétons compactés	Sh= 3cm (= 2 cm si maîtrise stricte qualité)			
Matériaux traités aux liants hydrocarbonés	Sh fonction épaisseur couche bitumineuse (e)			
	e	e ≤ 10	10 < e <15	15 ≤ e
	Sh	1	1+0,3(e-10)	2,5
Bétons de ciment	Sh=1 cm (couche base sur fondation traitée)			
	Sh= 3 cm (autres)			

fractile u	-2,326	-2,054	-1,960	-1,881	-1,645	-1,439	-1,282	-1,175	-0,674	0
Risque r	1	2	2,5	3	5	7,5	10	12	25	50

k_s → coefficients de plateforme (lié au compactage, à l'hétérogénéité locale de portance)

- Tableau XX - Coefficient de plateforme -

Module PF	E < 50MPa	50 MPa < E < 120 MPa	E > 120 MPa
k_s	1/1,2	1/1,1	1

k_d → coefficients de discontinuité pour les matériaux hydrauliques

- Tableau XXI - Coefficient de discontinuité -

Matériau	k_d
MTLH de classe T4 ou T5 Béton compacté	1/1,25
Bétons armés continus Dalle goujonnées	1/1,47
Béton de ciment	1/1,70
Tous les autres matériaux MTLH	1

I.5.3.3. Le calcul

a. Sollicitations induites dans la structure par la charge de référence

Les calculs des contraintes et déformations dans la structure sous la charge de référence (demi essieu 65 KN, pression $p = 0,662$ MPa uniformément répartie sur un cercle de rayon A) sont réalisés à l'aide d'un modèle multicouches élastique linéaire semi-infini de type modèle de Burmister.

b. Sollicitations admissibles

Il s'agit de la vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support.

La méthode de dimensionnement distingue trois mécanismes différents d'endommagement par fatigue associés aux grandes familles de matériaux :

- Matériaux bitumineux : déformation horizontale, allongement relatif ε_t
- Matériaux traités aux liants hydrauliques : contrainte de traction σ_t
- Les matériaux non traités (de type GNT ou sol support) : déformation verticale ε_z

Les sollicitations admissibles se calculent selon ces critères.

- Déformation admissible du sol support ou matériau non traité :

$$\varepsilon_{z,ad} = A \times (NE)^{-0,222}$$

A dépend du trafic : $A = 0,016$ pour les chaussées à faible trafic ($T < T3$)

$A = 0,012$ pour les chaussées à moyen et fort trafic ($T \geq T3$)

- Déformation admissible des matériaux bitumineux (dits noirs) :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_t(NE) k_r \times k_c \times k_s$$
$$\varepsilon_t(NE) = \varepsilon_6 \times [E(10^\circ C) / E(\theta_{eq})] (NE/10^6)^b$$

Les essais de fatigue en laboratoire, sont exprimés pour une température de $10^\circ C$ et une fréquence de 25 Hz. On néglige, en général, la correction de fréquence entre 10 et 25 Hz.

La valeur du module de ces matériaux est donnée pour une température de $15^\circ C$ (considérée alors comme température équivalente) et une fréquence de 10 Hz. Le module d'un enrobé diminue quand la température augmente et la fréquence des sollicitations décroît. La température équivalente (θ_{eq}) est telle que la somme des dommages subis par la chaussée pour une distribution de températures soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante dite équivalente.

- Contrainte admissible des matériaux traités aux liants hydrauliques (dits blancs) :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t(NE) k_r \times k_c \times k_s \times k_d$$
$$\sigma_t(NE) = \sigma_6 \times (NE/10^6)^b$$

Rappelons que la prise en compte du traitement de la CDF se fait soit par un surclassement de la PF, soit en l'introduisant dans le calcul de structure comme une couche de chaussée.

c. Vérification au gel/dégel

L'opération consiste à calculer l'indice de gel admissible (IA) par la structure de chaussée et à comparer la valeur obtenue à celle de l'hiver de référence (IR).

$$IA \geq IR$$

Il s'agit de voir la profondeur que le gel peut atteindre sans endommager les matériaux, sachant que les matériaux les plus gélifs sont ceux situés en bas de la structure, voir le sol même.

Le traitement au LH de la CDF empêche effectivement que les matériaux qui la compose soit sensibles au gel. Le gonflement au gel est d'ailleurs un critère de l'essai d'aptitude du sol au traitement ; il est toléré mais dans une certaine limite basse.

Le problème n'est pas que le sol gel mais qu'il provoque un gonflement du sol avec l'eau absorbé. Une fois en phase de dégel, la couche en libérant l'eau pompée perd de sa portance, la déflexion augmente et les matériaux sont davantage sollicités. D'où la pose de barrière de dégel.

Lorsque le sol n'est pas gélif, il y a congélation sans variation de volume.

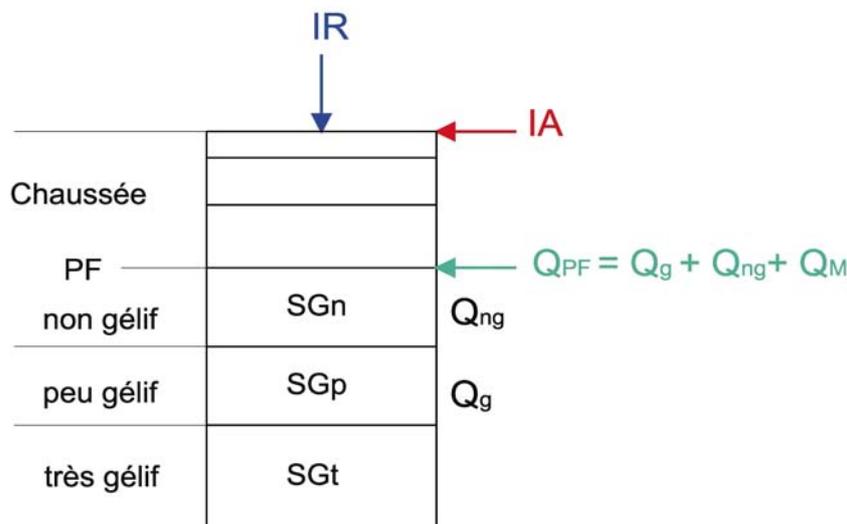
- L'indice de gel de référence se détermine par le choix de l'hiver de référence caractérisé par son indice de gel (IR).

- L'indice de gel atmosphérique admissible (IA) s'évalue en fonction de la protection apportée par les couches de chaussée et la CDF ainsi que la quantité de gel admissible en surfaces des matériaux gélifs.

L'IA dépend donc de la gélivité matériaux, de la protection thermique qu'ils peuvent apportée, du rôle de la résistance mécanique de la chaussée.

Trois classes sont définissent la sensibilité des sols au gel :

- les sols non gélifs : SGn
- les sols peu gélifs : SGp
- les sols très gélifs : SGt



La détermination de l'IA s'effectue par étape suivant un cheminement qui mène du sol support à la surface de la chaussée.

1) On commence donc le calcul par la quantité de gel admissible de la PF (Q_{PF}).

$$Q_{PF} = Q_{ng} + Q_g + Q_M$$

Q_{ng} est la quantité de gel correspondant à la protection thermique apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et le sol en fonction de leur nature (A_n) qui n'est autre que la classe définie par le GTR et la norme NF P 11-300, et de leur épaisseur (h_n) :

$$Q_{ng} = A_n h_n^2 / (h_n + 10)$$

- Tableau XXII - valeurs des coefficients A_n -

Matériau	A	B et C	D	LTCC	CV, SC, SL
A_n	0,15	0,13	0,12	0,14	0,17

Q_g est la quantité de gel admissible en surface des couches gélives. Elle est fonction de la pente (p) obtenue à l'essai de gonflement.

- Tableau XXIII - Valeur de selon la pente de l'essai de gonflement -

Pente	$0,05 < p \leq 0,25$	$0,25 < p \leq 1$	$p > 1$
Q_g	4	$1/p$	0

Q_M est la quantité de gel correspondant à la surcharge mécanique admissible par la chaussée pendant le dégel. (e est l'épaisseur de la couche dégelée, en m)

$$Q_M = e/0,1$$

2) On calcul ensuite la protection thermique apportée par la chaussée avec l'indice de gel en surface (IS) et l'indice de gel transmis à la base de la chaussée (It).

$$IS^{0,5} = (1+ah) \times It^{0,5} + bh$$

$$It^{0,5} = Q_{PF}$$

(h est l'épaisseur de la chaussée)

- Tableau XXIV - Coefficients a et b pour le calcul IS -

	BB - GB	BC - GC - GL GNT - GE	GCV	LTCC	SL-SL
a	0,008	0,008	0,012	0,012	0,012
b	0,06	0,10	0,13	0,14	0,15

3) Enfin on détermine IA avec IS . ($^{\circ}C \times j$)

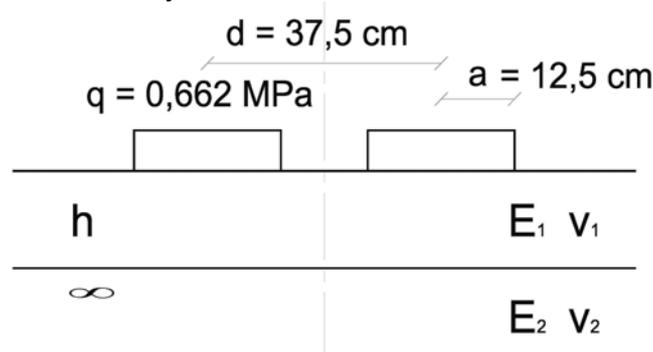
$$IA = IS / 0,7 + 10$$

I.5.4. Les Abaques Bicouches ALIZE 3

Ils ont pour but de présenter simplement quelques résultats de mécanique des chaussées d'usage courant.

Bien que limité aux structures bicouches, la méthode de calcul reprend les principes de la méthode de Burmister : calculs des contraintes et déformations à l'intérieur d'un multicouche élastique soumis à une charge de révolution.

Tous les calculs ont été effectués pour une charge correspondant au jumelage type de l'essieu légal français de 13 tonnes. La charge est représentée par une pression verticale q s'exerçant uniformément sur deux cercles de rayon a .



La structure bicouche est composée d'un massif homogène élastique semi-infini (massif de Boussinesq), défini par son module E_2 et son coefficient de poisson ν_2 , surmonté d'une couche élastique caractérisée par son épaisseur h , module E_1 , coefficient de poisson ν_1 .

Les coefficients de poisson sont de valeur égale : $\nu_2 = \nu_1 = 0,25$

Les unités des abaques sont :

- Contraintes et déformations en bars
- Epaisseur couche (h) en cm
- Déflexion (d) en $1/100^{\text{e}}$ mm
- Rayon de courbure (R) en m
- Produit $R \times d$ en $\text{m} \times 1/100^{\text{e}}$ mm

Les paramètres calculés sont :

- La déflexion d
- Le rayon de courbure R
- Le produit $R \times d$
- L'allongement relatif horizontal dans la première couche ϵ_t
- La contrainte de traction dans la première couche σ_t
- L'enfoncement relatif dans le massif ϵ_z
- La contrainte de compression dans le massif σ_z

Les planches d'abaques présentent les variations de ces paramètres calculés en fonction du rapport des modules E_1/E_2 et de l'épaisseur de la première couche h (par pas de 5 cm).

Le domaine défini est limité par :

$$5 \leq h \leq 40 \text{ cm}$$
$$1 \leq E_1/E_2 \leq 1000$$

I.5.5. Les méthodes pratiques de dimensionnement

I.5.5.1. Le Catalogue des structures types de chaussées neuves (1998)

Le catalogue présente des structures types de chaussée précalculées établies par fiche, où il ne reste plus qu'à faire le choix de la classe de trafic et la classe PF pour déterminer directement la structure de chaussée.

Les mêmes types de structure sont établis en deux lots de fiches concernant pour l'un les voies du réseau structurant (VRS) et pour l'autre les voies du réseau non structurant (VRNS)

I.5.5.2. Les manuels de conception de chaussées et des PF d'autoroutes

a. Le manuel de conception des chaussées d'autoroutes du SCETAUROUTE

De la même manière que le catalogue des chaussées du SETRA, le manuel présente des fiches de structure type de chaussée pour lesquelles plusieurs épaisseurs de couches sont proposées en fonction du trafic et de la portance de la PF.

La méthodologie proposée consiste en une optimisation de l'ensemble chaussée-CDF qui se traduit par : l'intégration de la CDF dans la structure, le choix de techniques économiques, l'optimisation de la structure selon la qualité obtenue sur chantier, un chiffrage globale construction + entretien.

L'intégration de la PF dans la structure est possible grâce à la qualité obtenue à court terme qui est suffisante pour prendre en compte les caractéristiques et les épaisseurs de la PST et de la CDF dans le dimensionnement des chaussées.

Le traitement des matériaux du site au LH permet d'atteindre ces objectifs de qualité et constitue une amélioration à long terme des caractéristiques des couches traitées. Ce qui se traduit par une économie substantielle au niveau des couches de chaussée. La CDF traitée est alors promue au rôle de couche de fondation.

Pour le dimensionnement des chaussées, on détermine une classe de PF qui tient compte de la nature et de l'état prévisible à long terme du sol support et de l'incidence de la CDF.

Il faut donc déterminer la classe de trafic ou le trafic équivalent (NE) et la classe de PF. Les tableaux ci-dessous donnent les éléments nécessaires.

On peut remarquer que la classe de trafic minimum est T2 et que la CAM est considéré au regard d'un réseau autoroutier selon une durée de service.

L'essieu de référence européen (115 KN) diffère de celui français (130 KN).

Notons que les cas de PST 0, PST 1, PST 2 ne sont pas considérés pour les autoroutes et qu'il y a deux supplémentaires PST 5 et PST 6.

Le classement de l'arase contient une classe intermédiaire AR 12 située entre l'AR 1 et l'AR 2 et deux classes supplémentaires AR 3 et AR 4. De la même manière, il existe une classe intermédiaire AR 23 située entre AR 2 et AR 3, admettant une valeur de 80 MPa ; elle est aussi appelée PF2 amélioré.

Le classement des sols supports s'effectue en deux fois par une classe du GTR et une classe de portance (Sk).

▪ Trafic

Le trafic PL journalier moyen se compte pour la voie la plus chargée (PL : CU \geq 50 kN).

2 voies	VL 90% et VR 10 %
3 voies	VL 80% et VM 20 %

VL : voie lourde (lente)

VR : voie rapide

Le taux de croissance géométrique annuel est pris à 4%, pour une durée de 15,20,25 ans.

- Tableau XXV - Classes de trafic autoroutier -

T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+	TEX	
150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	PL 8000
0,88	1,77	1,75	2,92	4,38	7,01	11,7	17,5	29,2	10 ⁶ NE 130 kN 46,7
1,43	1,91	2,85	4,76	7,14	11,4	19,1	28,6	47,7	10 ⁶ NE 115 kN 76,2
245	325	490	815	1220	1950	3265	4890	8160	PL européen -

- Tableau XXVI - CAM et durée de service selon le type de chaussée -

Structure	CAM	Durée
GB/GB	0,8	15 ans
EME	1	15 ans
GB/GRH	0,8	15 ans
GB/GH	0,8 dans GB et 1,3 dans GH	20 ans
Béton	1,3	25 ans

- Plateforme support de chaussée

Le classement des sols d'arases (AR) peut s'appuyer sur la classification des PST.

- Tableau XXVII - Classement des AR en fonction PST -

PST	Description des matériaux	AR	Sk
PST 3	Sensibles à l'eau bonne portance mise en oeuvre CDF	AR 1	S1
		AR 12 (drainage)	S _{AR}
PST 4	Sensibles à l'eau Traités chaux ou LH	AR 12 (traitement chaux)	S2
		AR 2 (traitement LH)	S _{AR}
PST 5	Sableux fins, insensibles à l'eau Hors nappe posant des problèmes de traficabilité	AR 2 (EV2 ≥ 50 MPa)	S2
		AR 3 (EV2 ≥ 50 MPa)	S3
PST 6	Graveleux ou rocheux, insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage / traficabilité	AR 2 (EV2 ≥ 50 MPa)	S2
		AR 2 (EV2 ≥ 120 MPa)	S3
		AR 2 (EV2 ≥ 200 MPa)	S4

- Tableau XXVIII - Classement des AR en fonction CBR -

Classe	Classe de portance Sk	CBR Court terme	CBR Long terme
AR 1	S1	≥ 8	≥ 4
AR 12	S _{AR}	≥ 8	≥ 6
AR 2	S2	≥ 16	≥ 10
AR 3	S3	≥ 25	≥ 25
AR 4	S4	≥ 40	≥ 40

- Tableau XXIX - Critères de réception et caractérisation des AR -

Classe	Classe de portance Sk	EV2 (MPa)	d (1/100 ^e mm)	Module Equivalent E Long terme (MPa)
AR 1	S1	≥ 30	≤ 400	≥ 20
AR 12	S _{AR}	≥ 40	≤ 300	≥ 30
AR 2	S2	≥ 80	≤ 150	≥ 50
AR 3	S3	≥ 120	≤ 100	≥ 120
AR 4	S4	≥ 200	≤ 60	≥ 200

Le classement des PF défini trois classes (PF2, PF3, PF4) caractérisées par les valeurs de l'EV2 et la déflexion (court terme), le module équivalent (à long terme); une distinction est faite selon que la CDF est traitée ou non.

- Tableau XXX - Critères de réception des PF - CDF non traitée

Classe	EV2 (MPa)	d (1/100 ^e mm)	Module Equivalent E Long terme (MPa)
PF 2	≥ 80	≤ 150	≥ 50
PF 3	≥ 120	≤ 100	≥ 120
PF 4	≥ 200	≤ 60	≥ 200

- Tableau XXXI - Critères de réception des PF - CDF traitée -

Classe	d (1/100 ^e mm)	E (MPa)
PF 2	≤ 80	≥ 50
PF 3	≤ 50	≥ 120
PF 4	≤ 20	≥ 200

La détermination de la classe de PF se fait grâce aux règles de passage de classe d'AR à la classe de PF (présentés dans les tableaux suivants) qui ont été établis en tenant compte de l'incidence des CDF sur les contraintes de flexion à la base de la chaussée.

Pour tenir compte de la qualité exceptionnelle obtenue sur certaines PF autoroutières, il a été défini une classe PF4 constituée à partir d'une de classe d'arase AR 1, AR 12, AR 2 surmontée d'une CDF traitée.

Par ailleurs, il est fréquent d'avoir recourt à un traitement à la chaux de l'arase sur une épaisseur de 30 à 35 cm (EV2 ≈ 40 MPa); l'arase ainsi traitée est classée AR 12.

La classe de PF est déterminé différemment selon que la CDF est traitée ou non.

- Tableau XXXII - Classe de PF - CDF non traitée -

AR	Sk	Nature CDF	PF
AR 1	S1	Matériaux S2	PF 2 (à partir de 70 cm)
		Matériaux S3 ou S4	PF 2 (à partir de 50cm) PF 3(à partir de 80cm)
AR 12	S _{AR}	Matériaux S2	PF 2 (à partir de 35 cm)
		Matériaux S3 ou S4	PF 3 (à partir de 65 cm)
AR 2	S2	Absence de CDF / matériaux S2	PF 2
		Matériaux S3 ou S4	PF 3 (à partir de 50 cm)
AR 3	S3	Absence de CDF Ou réglage en matériaux S3	PF 3
AR 4	S4	Absence de CDF Ou réglage en matériaux S4	PF 4

La CDF traitée est caractérisée par son classement mécanique comme défini par le GTS, en fonction de son module E et de la résistance à la traction directe R_t à 90 jours.

- Tableau XXXIII - Classe de PF et épaisseurs - CDF traitée -

AR	Sk	Classe mécanique CDF	Epaisseurs de PF (en cm)		
			PF 2	PF 3	PF 4
AR 1	S1	3	-	35	40
		4	35	40	50
		5	40	50	
		Traitée à la chaux	50		
AR 12	S _{AR}	3	-	30	35
		4	30	35	40
		5	35	40	
AR 2	S2	3	réglage	-	30
		4	réglage	30	35
		5	réglage	35	

b. Le manuel de conception des plates-formes autoroutières du SCETAUROUTE

Dans ce manuel, une attention particulière est accordée au trafic de chantier pour la conception de la PST.

La conception de la PF comprend celle de la PST (trafic de chantier, portance à long terme, protection gel) et celle de la CDF (portance PF>PST, protection gel-dégel).

Les objectifs sont la portance minimale de la PST et la classe de PF; objectifs déterminés à l'aide du module EV2 pour les matériaux non traités et de la déflexion pour les matériaux traités.

▪ Trafic

L'analyse du trafic de chantier se fait selon la stratégie de terrassement, car le mouvement des terres engendre le transport de quantités importantes (de 100 000 à 2 000 000 tonnes); on parle alors de tonnage (classes de tonnage définies selon la quantité transportée).

Ensuite il faut faire la conversion du nombre de véhicules mobilisés pour transporter ces quantités en nombre d'essieux équivalents NE.

- Tableau XXXIV - Classes de trafic de chantier -

NE (13 t)	10 000	30 000	100 000	300 000	1 000 000	3 000 000	
Classe	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5		Cas spéciaux

▪ Classification des sols supports

Les sols supports (corps de remblai ou fond de déblai) font l'objet d'une double classification : classe géotechnique du GTR (voir Annexe 6) et classe de portance (différenciation selon la sensibilité à l'eau et précision du niveau de portance).

- Tableau XXXV - Classes de portance du sol support -

Classe de portance	CBR (immersion)	EV2 (MPa)
S0	0 - 3	Non réalisé
S1	3 - 6	
S12	6 - 10	30 - 50
S2	10 - 20	50 - 80
S23	20 - 30	80 - 120
S3	Non représentatif	120 - 200
S4		> 200

Il y a des plages de portance prévisible du sol permettent de passer d'une classification à l'autre; en effet aux sols de classe définie par le GTR correspond une plage de portance.

- Tableau XXXVI- Plage de portance indicative à court terme des sols supports non améliorés -

Portance → ↓ Sol	S ₀	S ₁	S ₁₂	S ₂	S ₂₃	S ₃	S ₄
A1	XXX						
A2	XXX						
A3	XXX						
B1	XXX						
B2	XXX						
B31				XXX			
B32			XXX				
B4	XXX						
B5	XXX						
B6	XXX						
C1		XXX					
C2		XXX					
C1B11			XXX				
C2B11			XXX				
C1B31				XXX			
C2B31				XXX			
D1			XXX				
D2				XXX			
D3				XXX			
R11		XXX					
R12		XXX					
R13	XXX						
R21				XXX			
R22				XXX			
R23			XXX				
R31		XXX					
R32		XXX					
R33		XXX					
R34		XXX					
R41				XXX			
R42			XXX				
R43		XXX					
R61					XXX		
R62				XXX			
R63			XXX				

XXX portance de dimensionnement plage de portance

Les sols traités à la chaux ont une classe de portance S2 sauf les sols de classe A rangé en S1.

- Tableau XXXVII - Plage de portance indicative à court terme des les sols supports traités à la chaux -

Portance → ↓ Sol	S ₀	S ₁	S ₁₂	S ₂	S ₂₃	S ₃	S ₄
A1		XXX					
A2		XXX					
A3		XXX					
B5			XXX				
B6			XXX				
C1			XXX				
C2			XXX				

Les sols traités au LH ont une classe de portance S2.

- Tableau XXXVIII - Plage de portance indicative à court terme des sols supports traitées aux LH -

Portance → ↓ Sol	S ₀	S ₁	S ₁₂	S ₂	S ₂₃	S ₃	S ₄
A1				XXX			
A2				XXX			
A3				XXX			
B5				XXX			
B6				XXX			
C1				XXX			
C2				XXX			

▪ Structures des PF

La constitution de la PF se fait en fonction des matériaux disponibles, de leur valorisation par le traitement, du trafic de chantier et de la qualité du sol support.

Les objectifs de qualité de la PST sont fixés en terme de portance, déformabilité (EV2/déflexion), traficabilité (ornière), et nivellement.

- Tableau XXXIX - Objectifs de qualité sur la PST-

	Non traité	Non traité	traité ou non	Non traité	traité	Non traité	traité
trafic	TC1	TC2	TC3	TC4		TC5	
Portance déflexion	20 MPa	35 MPa	50 MPa	80 MPa	80/100 ^e	120 MPa	50/100 ^e
Ornière glissance	Admissible			Non Admissible			
nivellement	+/- 5 cm	+/- 5 cm	+/- 5 cm	+/- 5 cm	+/- 3 cm	+/- 5 cm	+/- 3 cm

- Tableau XL - Objectifs de qualité sur la CDF-

	PF 2		PF 3		PF 4	
	Non traité	traité	Non traité	traité	Non traité	traité
Portance /déflexion Court terme	20 MPa 80/100 ^e	80/100 ^e	102 MPa 100/100 ^e	50/100 ^e	200 MPa 60/100 ^e	20/100 ^e
Portance /déflexion Long terme	20 MPa	80/100 ^e	120 MPa	50/100 ^e	200 MPa	20/100 ^e
Ornière /glissance	Non Admissible					
nivellement	+/- 3 cm	+/- 2 cm	+/- 3 cm	+/- 2 cm	+/- 3 cm	+/- 2 cm

La structure de PF est ensuite envisagée selon la portance du sol support, les matériaux et l'épaisseur de la PST, le classe de trafic, les objectifs de PF.

le manuel définit 4 tableaux de classement selon les matériaux de la PST :

- matériaux traité aux LH (classe 5)
- limons traités à la chaux
- matériaux non traités S2
- matériaux non traités S3

Les entrées des tableaux sont : Sk, TCi, ép. PST, PFi en fonction Sf (CDF non traitée) ou m (CDF traitée).

I.5.6. L'impact du traitement de sol sur les paramètres de dimensionnement

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.

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.

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.

II. Analyse bibliographique de traitement de sol

II.1. Résultats des traitements de sol présentés dans le magazine "Routes"

II.1.1. Exemple 1 : Traitement au liant hydraulique routier de plateforme logistique

(magazine "Routes" N°98 de Décembre 2006 : Traitement en place au liant hydraulique routier)

Le projet est un traitement de sol en place pour la plateforme logistique de Casino, à Gaël, dans le département de l'Ille-et-Vilaine. La zone de 18 hectares comprend 65 000 m² d'entrepôts et 10 000 m² de surface de stockage à l'air libre. La plateforme de gestion des marchandises devait engendrer à l'usage un trafic de 25 camions ainsi qu'un train. On peut tout de suite constater que ce trafic (sans le train) est inférieur à celui occasionné par les travaux dont le nombre d'engins présents simultanément sur le chantier était de 40.

C'est pourquoi, notamment, le chantier s'est déroulé en circuit fermé, pas d'entrée ni de sortie d'engin, afin d'éviter un trafic supplémentaire sur les routes avoisinantes non structurées pour ce type de circulation (la classe de trafic du dimensionnement de base de ces routes aurait dû être largement supérieure pour assumer les allées et venues des engins de chantier).

La solution de traitement, issue d'un appel d'offre ouvert à variante, a été envisagée pour réduire les coûts qui ont dépassé l'enveloppe budgétaire prévue avec une solution traditionnelle d'apport de granulats. L'économie réalisée fut de 1,5 millions d'euros par rapport à cette solution classique et a notamment permis une réduction de l'épaisseur de dallage des bâtiments du fait de la bonne portance du support.

La Communauté de communes a fourni son aide en vendant un terrain terrassé, avec la PF à niveau, tenant lieu d'arase de terrassement (AR), car, en échange, la plateforme va générer près de 400 emplois, ce qui constitue un retour sur investissement.

Après débroussaillage et décapage de la terre végétale, les déblais furent réutilisés en remblais avec un traitement à la chaux, et un traitement supplémentaire au liant hydraulique routier (LHR) fut réalisé pour la zone bâtie et la voirie (sur 35 cm d'épaisseur).

Il s'agit de traitement en place avec la technique du dépôt-reprise.

Les caractéristiques du traitement sont données dans le tableau suivant.

- Tableau XLI - Caractéristiques du traitement de l'exemple 1 -

Surface Totale (emprise opération)		180 000 m ²	
Terrassement		220 000 m ³	
Matériau		Schistes (broyés pour obtention de fines)	
Surface traitée au LHR		135 000 m ²	
Produit	Type	ROLAC 645	Chaux
	Dosage	5 à 6 %	1 à 2 %
	Quantité	6 000 tonnes	3 000 tonnes
Portance		PF3 soit plus de 120 MPa	

II.1.2. Exemple 2 : Traitement au ciment d'une déviation de route nationale

(magazine "Routes" N°100 de Juin 2007 : Un traitement de sol en place au ciment pour la déviation de Plombières-les-bains)

Il s'agit du traitement en place de la couche de forme (CDF) de la déviation de la route nationale de Plombières-les-bains, dans les Vosges, route située à 600m d'altitude.

Le projet est un élargissement de la chaussée afin de passer de 2 x 1 voie à 2 x 2 voies et requalifier la route en voie express (c'est à dire circulable à 110km/h).

Le traitement de sol en place de la CDF est une initiative laissée à l'entreprise de terrassement, après accord du maître d'oeuvre. Les caractéristiques demandées étaient une portance PF4 et une résistance au gel.

Le matériau du site est un grès des Vosges qui est un matériau rocheux gélif d'où son traitement au ciment.

Après un décapage de la terre naturelle, le grès est concassé sur site. Le ciment est ensuite épandu sur la 1^{ère} couche d'épaisseur 35 cm de matériau concassé en place, puis malaxage et compactage du mélange. La 2^d couche est réalisée en 1 seule passe continue de 35 cm d'épaisseur avec la reprise des stocks intermédiaires de grès concassé.

Les caractéristiques du traitement sont données dans le tableau suivant.

- Tableau XLII – Caractéristiques du traitement de l'exemple 2 -

Trafic		Trafic TC ₆₃₀
Indice de gel		470°C.jour
Matériau		Grès des Vosges (concassé en 0/20)
Epaisseur traitée		70 cm (en 2 couches de 35 cm)
Produit	Type	Ciment CEM II/B 32,5 R CE NF
	Dosage	5 %
	Quantité	3 300 tonnes
Portance		PF4 (classe mécanique 5, zone 4)

La structure de chaussée réalisée se présente ainsi :

matériaux	couches
BBSG	roulement
GB	base
SC	fondation
CDF traitée	Sol support

- Figure 10 – Représentation schématique de la structure de chaussée de l'exemple 2 -

II.1.3. Exemple 3 : Traitement au ciment d'une déviation de route départementale

(magazine "Routes" N°102 de Décembre 2007 : Traitement au ciment de la déviation de la RD104, LaChapelle-sous-Aubens)

Le projet est un traitement au ciment et à la chaux des matériaux locaux réutilisés pour la construction d'une voie de déviation de la RD104, passant par LaChapelle-sous-Aubens, dans l'Ardèche. La déviation de la RN 104 s'inscrit dans le cadre du plan routier départemental (1995-2000). La route offre un itinéraire alternatif à la RD104 déjà saturé par le trafic, car elle constitue un des deux axes majeurs traversant le bassin d'Aubenas.

L'infrastructure est une chaussée de 2 x 1 voie avec créneaux de dépassement.

Le relief chahuté induit des très gros terrassements avec une succession de zones de déblai et remblai. Il est donc prévu de réemployer les déblais en remblais et effectuer un nivelage de l'ensemble.

Les matériaux du site sont des marnes et des limons. Les marnes, matériau évolutif au contact de l'air, ont été fragmentées pour leur donner une granulométrie régulière en vue de leur réutilisation en remblai. Les limons ont été traités une première fois à la chaux pour diminuer la teneur en eau avant le compactage ; et l'assainissement de la plateforme fut assuré par 2km de buses; Puis les limons furent traités à nouveau, avec un arrosage préalable à l'épandage du ciment, pour leur mise en œuvre en CDF de 35 cm d'épaisseur.

"Le traitement en place des matériaux du site a ainsi permis d'éviter un important trafic de poids lourds sur les routes avoisinantes...sécurité de circulation, critères économiques, développement durable et performances techniques. "

Les caractéristiques des traitements sont données dans le tableau suivant.

- Tableau XLIII - Caractéristiques du traitement de l'exemple 3 -

Longueur de la voie		7,3 km soit 7 300 ml	
Terrassement		520 000 m ³ dont 280 000 m ³ de rochers	
Matériau		Marnes (fragmentées) Limon	
Produit	Type	Ciment CEM II 32,5 CE NF	Chaux
	Dosage	5 %	
	Quantité		5 300 tonnes
Portance		80 MPa	

II.1.4. Exemple 4 : Traitement au liant hydraulique routier pour une rocade

(magazine "Routes" N°103 de Mars 2008 : Traitement des sols au liant hydraulique routier de la rocade sud-est de Troyes)

La rocade Sud-Est de Troyes, dans l'Aube, termine la boucle de contournement de l'agglomération. Elle a nécessité la construction de 8 ponts et de 5 giratoires.

Un traitement au liant hydraulique routier (LHR) de la couche basse et de la couche haute du remblai en zone inondable formant une digue artificielle a été effectué. Un autre traitement au LHR de la CDF, épaisseur 35 cm.

Ce chantier a coûté 50 millions d'euros dont 17,6 millions d'euros pour le lot Terrassement.

Une importance particulière devait être accordée aux délais d'exécution à cause des premiers gels d'octobre. Mais les pluies d'été abondantes ont provoqué beaucoup de retard, d'où un rythme de cadence soutenu pour rattraper ce retard.

Les caractéristiques des traitements sont données dans le tableau suivant.

- Tableau XLIV - Caractéristiques du traitement de l'exemple 4 -

Longueur de la voie		5,8 km soit 5 800 ml	
Terrassement total		900 000 m ³	
	Déblais	320 000 m ³	
	Remblais	785 000 m ³	
	Déficit en matériaux	465 000 m ³ (rapportés)	
Matériau		craie	
Produit	Type	LHR	
	Dosage	Partie basse remblai	Partie haute remblai et CDF
		3 %	4 à 5 %
Quantité		20 000 tonnes	

II.1.5. Récapitulatif et commentaires de ces traitements

Voici un tableau récapitulatif des traitements de ces exemples de chantier.

Le volume des terrassements est donné à titre indicatif pour se faire une idée de la taille du chantier et ne représente pas le volume de matériaux traités.

Dans l'exemple 3, seul le matériau concerné par le traitement est cité (pas les marnes fragmentées réutilisées en remblais).

- Tableau XLV – Récapitulatif des caractéristiques de traitement des exemples de chantier -

	Exemple 1		Exemple 2	Exemple 3		Exemple 4
Type de voie	PF logistique		Route express	RD		Rocade
Terrassement	220 000 m ³		-	520 000 m ³		900 000 m ³
Matériau	Schistes broyés		Grès concassés	Limens		Craie
Produit	Rolac	Chaux	Ciment CEM II 32,5	Ciment	Chaux	LHR
Dosage	5 à 6 %	1 à 2 %	5 %	5 %	-	4 à 5 %
Quantité	6 000 t	3 000 t	3 300 t	-	5 300 tonnes	-
Couche traitée	CDF	PST	CDF	CDF		CDF
Épaisseur traitée	35 cm	-	70 cm	35 cm		35 cm
Portance	PF3 (>120 MPa)		PF4	80 MPa		

On remarque que l'épaisseur de la CDF est de 35 cm sauf pour la voie express dont les conditions (trafic et gel) sont particulières.

On peut aussi constater que le dosage de LH (Ciment ou LHR) est sensiblement le même (5%) pour tous les matériaux. En revanche, les performances obtenues varient beaucoup : de 80 MPa pour le traitement des limons au ciment + chaux à plus de 200 MPa (PF4) pour le traitement du grès au ciment.

La chaux est utilisée pour les matériaux de remblai dans l'exemple 1 et pour un pré-traitement de la CDF dans l'exemple 3. Mais elle n'est pas employée seule.

Dans l'exemple 1, elle rend le matériau moins sensible à l'eau pour constituer une classe de PST minimum requise pour effectuer un traitement de CDF, c'est à dire PST2.

Dans l'exemple 3, elle a permis d'abaisser la teneur en eau des limons.

Le traitement à la chaux ne permet pas d'élever les caractéristiques mécaniques d'un matériau suffisamment pour être considéré comme seul produit de traitement de CDF. En effet le module élastique E d'un matériau traité à la chaux est très faible (plafond de 2000 MPa).

II.2. Exemples de traitement selon le type de sol tirés d'après de CIM Béton - 2009

CIM Béton, dans son ouvrage sur le traitement des sols, donne quelques dosages de produit de traitement selon le type de sols à améliorer. Ces préconisations sont sensiblement similaires aux modalités envisagées par le GTS pour les chantiers de faible importance (voir au paragraphe 1.4.4.2. *Méthodologie générale de formulation*, le tableau IX – *Modalités de traitement envisageables pour les chantiers de faible importance*). Par exemple, pour le sol A1, le dosage du ciment C 32,5 donné par le GTS est de 7% alors que celui de CIM Béton pour un même ciment est de 6 % (6 à 7 % pour LHR).

Voici les propositions de CIM Béton :

▪ 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.

▪ 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 prétraitement 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 (C1, C2)

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 (R1)

Un LHR adapté constitue souvent la meilleure option, techniquement et économiquement.

Avec les craies R12, un dosage de 5 à 7 % donne un résultat correct. Dans les régions crayeuses, c'est fréquemment la tenue au gel qui dicte le dosage minimal à retenir. Avec une craie R11, un dosage de 5 % est généralement suffisant.

III. Présentation des cas étudiés dans le département de l'Hérault

III.1. La géologie de l'Hérault

(Voir chronologie des évènements géologiques et coupes géologiques en annexe 7)

Le département de l'Hérault dispose d'un patrimoine géologique exceptionnel dû à l'extrême diversité des roches présentes à sa surface, qui témoignent de 500 à 600 millions d'années d'histoire de la Terre.

III.1.1 Histoire géologique de l'Hérault

Son histoire telle que nous la connaissons débute à l'ère primaire vers -540 millions d'années, pendant la période pré-cambrienne et cambrienne, par des dépôts de vases argileuses et de sables qui seront transformés en schistes (Montagne noire) à la fin du Paléozoïque.

Vers -500 millions d'années, un très long épisode marin commence. Il va durer près de 200 millions d'années, au cours duquel des dépôts s'accumulent, et forment des roches marines (grès, schistes et calcaires).

Au terme de cette période, des plissements apparaissent. Il faudra près de 30 millions d'années pour qu'une chaîne de montagne s'élève (plissement Hercynien). En profondeur, certaines roches sont transformées alors que des remontées de magma forment des massifs de granite (Caroux, Espinouse). Le métamorphisme s'exerce aussi pour le calcaire qui se transforme en marbre avec fusion de gros cristaux de calcite. Le gneiss (Caroux et gorges d'Héric) est un ancien granite déformé et recristallisé. Le plissement de la chaîne hercynienne, le soulèvement consécutif puis l'érosion qui lui succède permettent de voir à l'heure actuelle les affleurements de toutes ces roches formées à de grandes profondeurs.

L'érosion commence dès la fin de la période Carbonifère et, pendant le Permien, elle entraîne des dépôts de sédiments continentaux sous forme de roches détritiques : conglomérats, argiles, sables et galets, ruffes rouges (lac du Salagou) et charbon issus des débris végétaux.

Pendant une grande partie de l'ère secondaire, une nouvelle transgression marine va avoir lieu et complètement submerger ces roches. Un nouveau dépôt calcaire et argileux se constitue laissé par la mer du Jurassique et du Crétacé inférieur.

Ce sont les calcaires de couleur gris et les dolomies qui dominent le paysage des garrigues du nord et de l'est de l'Hérault (Pic Saint Loup, Hortus, Causse du Larzac, montagne de Sète).

Les bauxites, colorées en rouge par les oxydes de fer, sont des roches sédimentaires nées sous un climat tropical, provenant de l'émersion fin Crétacé inférieur, à partir de l'altération de roches telles que des argiles, et des marnes.

Puis pendant l'ère tertiaire, de nouveaux plissements vont se produire en liaison avec la surrection de la chaîne pyrénéo-provençale. Ces reliefs subiront aussi les actions des phénomènes d'érosion pendant environ 10 millions d'années.

L'épandage fluviatile de l'Oligocène produits des alluvions grossières conglomérats, grès, argiles, ainsi que des dépôts lagunaires comme le calcaire lacustres en fonds des bassins (lacs).

Puis vers -30 millions d'années, une partie de cette chaîne de montagne s'effondre et la mer envahit ce qui deviendra le golfe du Lion et les basses plaines de l'Hérault.

Deux nouvelles transgressions marines vont avoir lieu à la fin de l'ère tertiaire. La mer miocène dépose des sédiments jaunâtres constitués de calcaires coquilliers, molasses, et sable fin. La mer du Pliocène va laisser des sédiments sous la forme d'argiles bleues et sables jaunes contenant de nombreux fossiles : sables de Montpellier et sables à huîtres.

Les calcaires, sous un climat chaud et très humide sont profondément attaqués et dissous par l'eau, une importante karstification se développe avec formations d'avens, de grottes et encaissement des vallées principales.

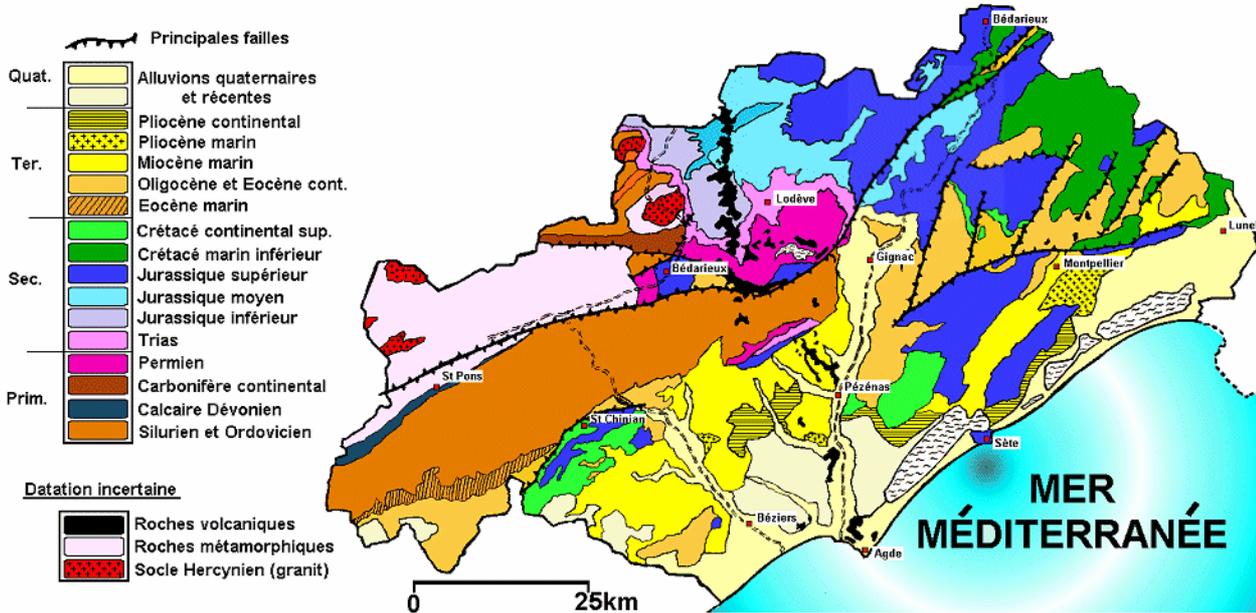
Vers -2.5 Ma la mer se retire définitivement et les paysages de l'Hérault vont prendre leur aspect actuel. Seuls quelques épisodes volcaniques (coulées basaltiques) suivant un axe presque nord-sud (Lodève, Agde) et des dépôts alluvionnaires du Rhône (sables et galets), viendront modifier quelque peu la composition géologique du département.

Le Quaternaire est marqué par l'édification de différentes terrasses fluviatiles, glacis, colluvions et dépôts de pente; les coulées volcaniques du Quaternaire moyen situées en rive droite de l'Hérault correspondent à des fractures de distension de l'écorce terrestre qui ont provoqué les montées de magma basaltique. Sur la côte des formations sableuses marines et éoliennes s'étirent en long cordon littoral.

Le travail du froid en période glaciaire va donner sa physionomie actuelle aux cordons littoraux, par gélifraction (fissures et fractures de la dolomie) et la dissolution des calcaires (bancs et baumes).

Enfin la mer revient, la Méditerranée, et ses courants littoraux étalent sables et galets isolant les étangs.

III.1.2 Les grandes zones géologiques de l'Hérault



- Figure 11 - Carte géologique du département de l'Hérault -

L'histoire géologique a laissé son empreinte de façon différenciée dans les paysages que l'on peut globalement organiser en quatre secteurs correspondant aux quatre ères : ère primaire au nord-ouest avec les montagnes, ère secondaire au nord-est avec les garrigues et les causes, ère tertiaire sur la moitié sud avec les plaines, ère quaternaire pour le littoral et le creusement de l'ensemble des vallées.

L'héritage de l'ère primaire, au nord-ouest du département, est constitué par les montagnes héraultaises formées des roches les plus anciennes : schistes, marbres, micaschistes, gneiss, granites, ruffes ainsi qu'un bassin charbonnier.

Au nord-est du département, le paysage est constitué de calcaires hérités de l'ère secondaire : calcaires jurassiques et calcaires crétacés, marnes noires, dolomie, et bauxites.

La moitié sud du département est plus particulièrement marquée par l'ère tertiaire : bancs calcaires et pierre de taille.

Le littoral et les vallées sont hérités de l'ère quaternaire : formations sableuses fragiles et instables sur les côtes, accumulation de l'érosion et de la karstification pour les vallées et formation de quelques épanchements basaltiques.

III.2. Présentation des cas

Les six cas sont présentés tout d'abord d'un point de vue géologique à l'aide des cartes échelle 1/50 000e du BRGM afin d'établir leur contexte. Ensuite leur projet de traitement est exposé brièvement, puis l'étude de formulation (le cas échéant) avec l'identification géotechnique du sol, les résultats de l'essai d'aptitude et le dosage en produit de traitement. Enfin quelques remarques sont données en conclusion sur le déroulement de l'étude et les hypothèses de départ, que sont la qualification de la PST et de l'AR par rapport à l'objectif de PF, ainsi que les performances mécaniques découlant du traitement.

La figure 12 donne un plan de situation permettant de localiser les différents cas qui se trouvent aux alentours de Béziers et Pézenas.



- Figure 12 - Plan de situation des six cas d'étude - extrait de carte IGN -

Légende de la carte :

Les points rouges symbolisent les cas 1 à 5.

Le trait mauve, encadré par deux tirets plus foncés, signale la section d'autoroute (de A à B) considérée par le cas 6.

Les cas sont :

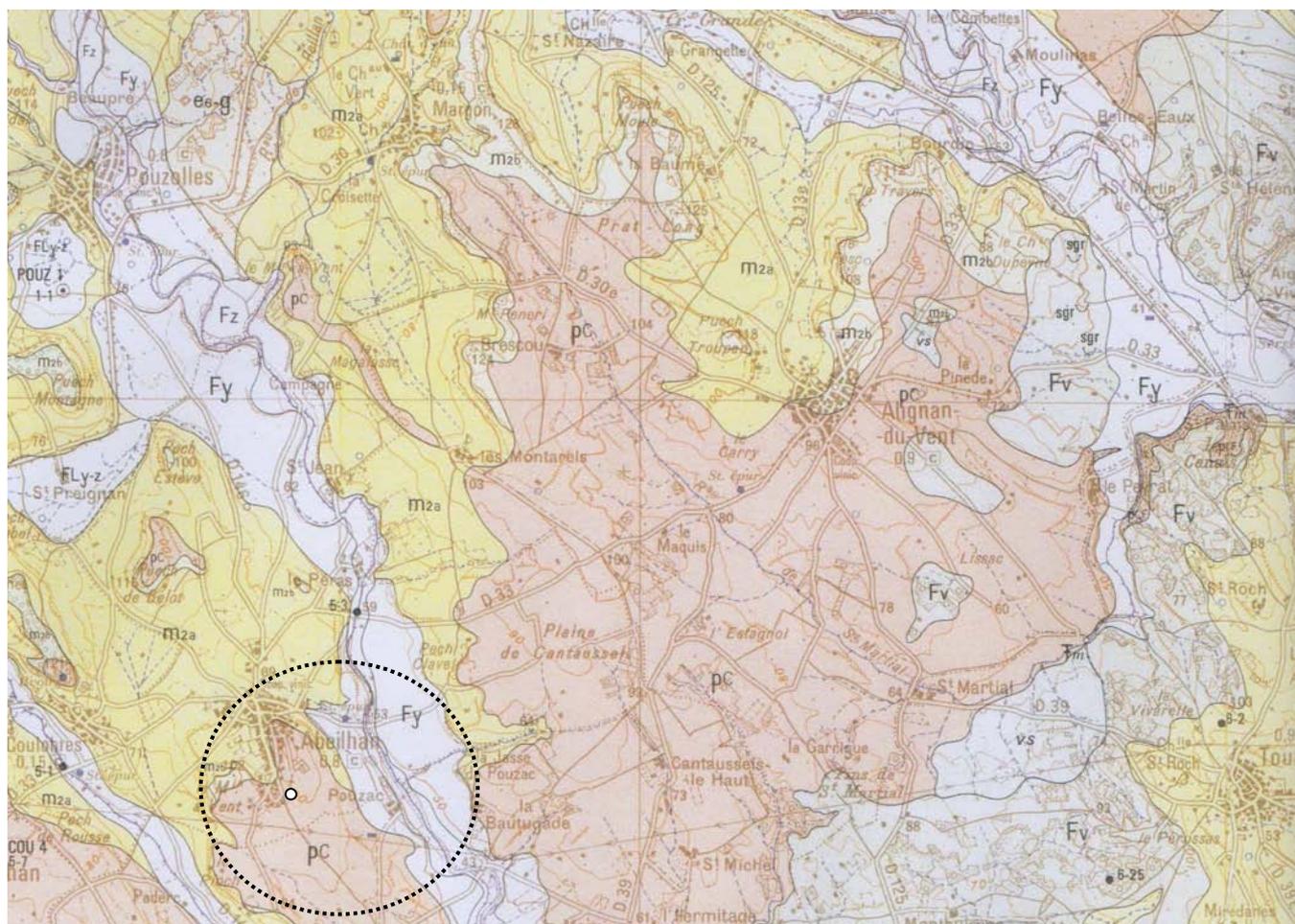
- Cas 1 : voirie de lotissement, Abeilhan
- Cas 2 : parking et voie de livraison de zone commerciale, Colombiers
- Cas 3 : bretelle de raccordement de la RD à la ZAC Bastit, Béziers
- Cas 4 : Voie de liaison, Caux
- Cas 5 : Raccordements des autoroutes A75 et A9, Béziers
- Cas 6 : Autoroute A75, Section Pézenas-Béziers

(Les documents d'informations disponibles pour chaque cas sont répertoriés en annexe 8)

III.2.1. Cas 1 : voirie d'un lotissement, Abeilhan, 34.

III.2.4.1. Contexte géologique

Le projet de lotissement longe un bord du cimetière d'Abeilhan, et est accolé à un lotissement déjà existant qu'il vient prolonger.



- Figure 13 - Abeilhan - extrait de la feuille géologique de Pézenas -

Abeilhan se trouve dans la plaine du Bas-Languedoc formés de sables et de marnes déposés lors de la transgression marine miocène dans un profond golfe actuellement occupé par les vallées quaternaires de l'Hérault et de ses affluents. Le Pliocène et le début du Quaternaire correspondent à une phase de nivellement et de comblement par des dépôts fluviaux.

Le lotissement se situe dans une zone de formation géologique du Pliocène continental (pC) ; cette formation détritique est composée, entre autres, de limons rougeâtres plus ou moins caillouteux et gréseux, associés à des poudingues de galets calcaires ou siliceux, en provenance de la Montagne Noire, et correspond à des dépôts d'épandages fluviaux.

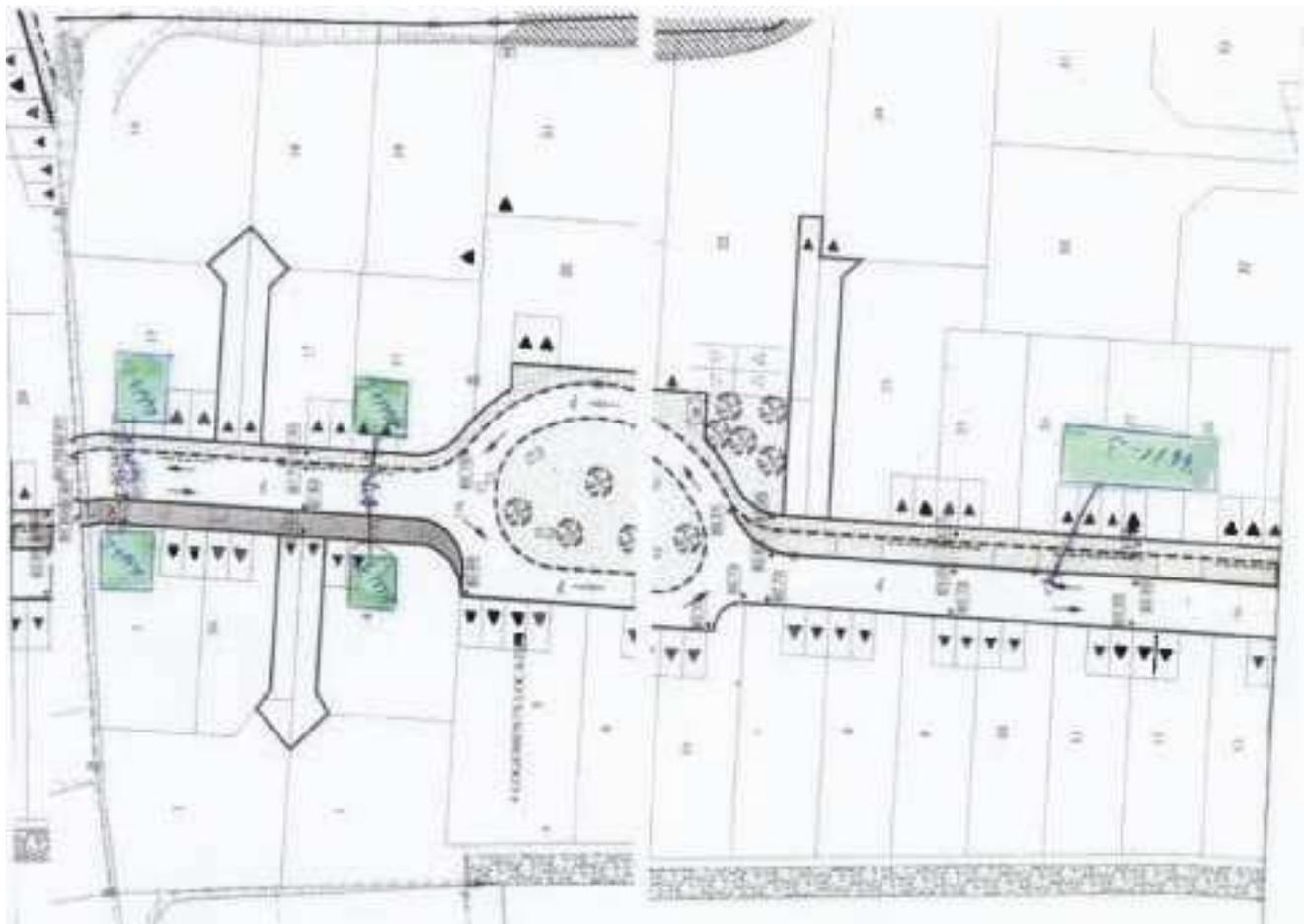
L'étude de sol, présentée ci-après, a effectivement identifié des limons peu plastiques, sables fins avec présence de blocs.

Ces alluvions peuvent également s'expliquer par la proximité d'un cours d'eau (zone d'alluvions anciennes du Pléistocène supérieur - Fy) qui a pu laisser des éléments épars.

Les alluvions du Pléistocène supérieur comportent des éléments grossiers : blocs, galets et graviers de calcaires siliceux, de grès, de quartz... ; elles sont plus ou moins limoneuses.

III.2.4.2. Projet de traitement

Il s'agit du traitement au ROLAC des matériaux du site. Une partie est traitée avec la technique du dépôt - reprise, une autre est traitée directement en place.



- Figure 14 - Plan de masse du projet de lotissement -

La voirie centrale est remblayée par les matériaux traités provenant des parcelles attenantes. Les parcelles de la partie supérieure (le long du cimetière) et la voie qui longe le côté du lotissement sont traitées en place.

La voirie centrale est composée d'une CDF de 35 cm d'épaisseur, d'une couche de GNT 0/20 de 10 cm et il est prévu une couche de 5 cm pour la réalisation des enrobés.

Le terrassement de la plateforme doit donc être arasé à - 15 cm de la côte fini du projet.

Les matériels d'exécution du chantier sont :

1 épandeuse, 1 malaxeur (tracteur + rotobêche), une grande pelle et des plus petites, 2 compacteurs vibrants à cylindre lisse de type V5, 2 camions de produit (le 3^{ème} reporté au lendemain), 2 arroseuses, 2 tombereaux.

III.2.4.3. Sol et produit de traitement

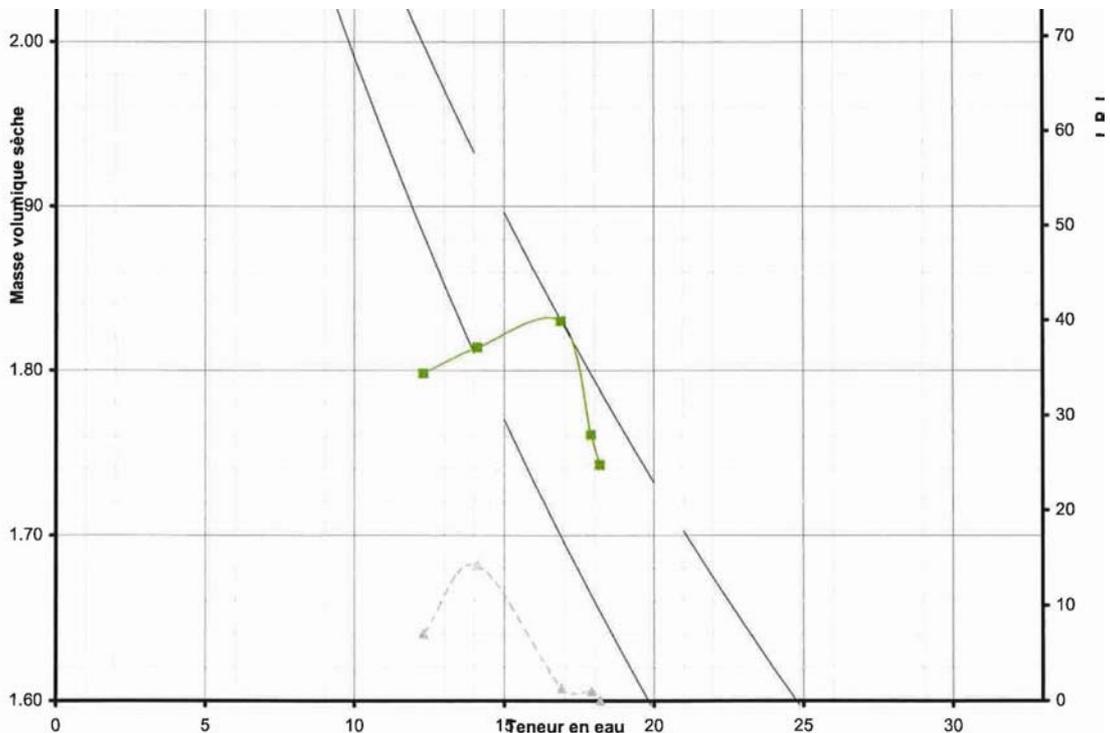
Le matériau à traiter a été identifié par le BET géotechnique selon la classification du GTR comme étant un sol fin de classe A₁, c'est à dire celle où l'on trouve des limons peu plastique, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques. ($VBS \leq 2,5$ ou $I_p \leq 12$) L'analyse note la présence de gros éléments épars dans les échantillons et sur le site de type bloc ou cailloux.

"Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur W_n est proche de W_{OPN} . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l' I_p ." GTR

Les résultats obtenus en général sur le traitement de sols A₁ + 4% de ROLAC sont les suivants :

- Teneur en eau à l'OPN = 16,9 %
- Masse volumique sèche (OPN) = 1,830 t/m³
- IPI (OPN) = 13

La figure 15 représente ces caractéristiques.



- Figure 15 - Courbe Proctor du sol traité -

Les essais réalisés par le BET confirment l'aptitude du sol au traitement :

Gonflement volumique $G_v = 0,81\%$ (spécification norme NF P 94-100 : < à 5%)

Résistance mécanique $R_{tb} = 0,20$ (spécification norme NF P 94-100 : > à 0,2 MPa)

Le BET recommande d'accorder une attention particulière au maintien de la teneur en eau de traitement et de respecter le dosage.

Dosage de ROLAC = 4% soit 27kg/m²

Epaisseur de traitement 35 cm

Le ROLAC est un liant hydraulique routier, ciment à base de Clinker de Portland. Celui utilisé est un produit de LAFARGE : ROLAC 645 S PN provenant de l'usine de Port-La-Nouvelle.

III.2.4.4. Intérêt du traitement

Le traitement de sol de la CDF permet ici de réduire considérablement l'épaisseur des couches d'assise et limiter l'apport de matériaux nobles tels que les granulats de carrières.

L'économie réalisée grâce à la technique est alors évidente :

Au lieu de 15 cm de GNT 0/20 et de 30 cm de GNT 0/31,5 pour la solution traditionnelle, le traitement ne nécessite que l'apport de 10 cm de GNT 0/20.

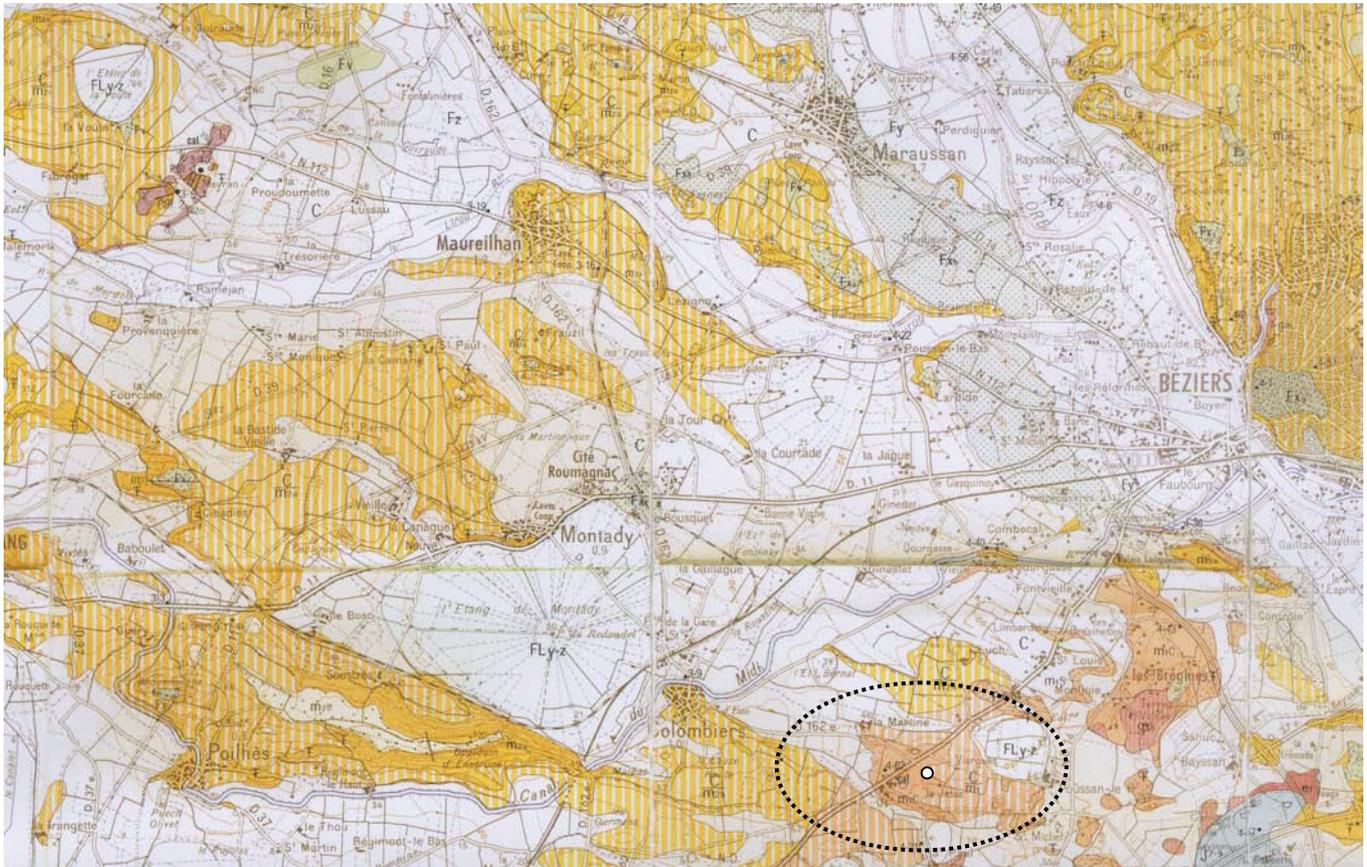
Il s'agit donc d'une optimisation globale du complexe chaussée/CDF, où la CDF devient une couche d'assise de chaussée et remplace la couche de fondation classique.

Les hypothèses de départ ne figurant pas dans les documents consultés. Cependant d'après les tableaux du GTR il s'agit d'une PST 2 / AR 1 visant une PF 2 de classe mécanique 5 et d'épaisseur 35 cm. Le GTR envisage d'ailleurs un traitement du matériau de type A₁ pour une utilisation en CDF afin de palier à leur sensibilité à l'eau.

Pour ce type de chantier, de petite taille, l'étude du traitement est de niveau 1. Il s'agit d'une simple vérification de la formule de base par l'essai d'aptitude du sol au traitement.

III.2.2. Cas 2 : parking zone commerciale, Oppidum, Colombiers, 34

III.2.2.1. Contexte géologique



- Figure 16 - Colombiers - extrait de la feuille géologique de Béziers -

La zone concernée est identifiable sur la carte de la figure 16 comme la composition de deux formations : des colluvions limoneuses du Quaternaire (C) et un faciès molassique du Miocène (m1) constitué de marnes, calcaires coquillers, parfois sableux ou gréseux.

La couche de recouvrement, identifiée lors de l'étude de reconnaissance par le BET en charge de la mission type G12, est composée de colluvions sablo-limoneuses à argileuses reposant sur un substratum marno-calcaire. Les matériaux limono-sableux renferment quelques graves et sont assez compacts (état de forte dessiccation superficielle). Avec la profondeur, les limons deviennent de plus en plus argileux, et sont très humides en fond d'horizon.

La présence d'une nappe a été décelée vers 2,50 m de profondeur en moyenne, ce qui explique la forte humidité des limons très argileux.

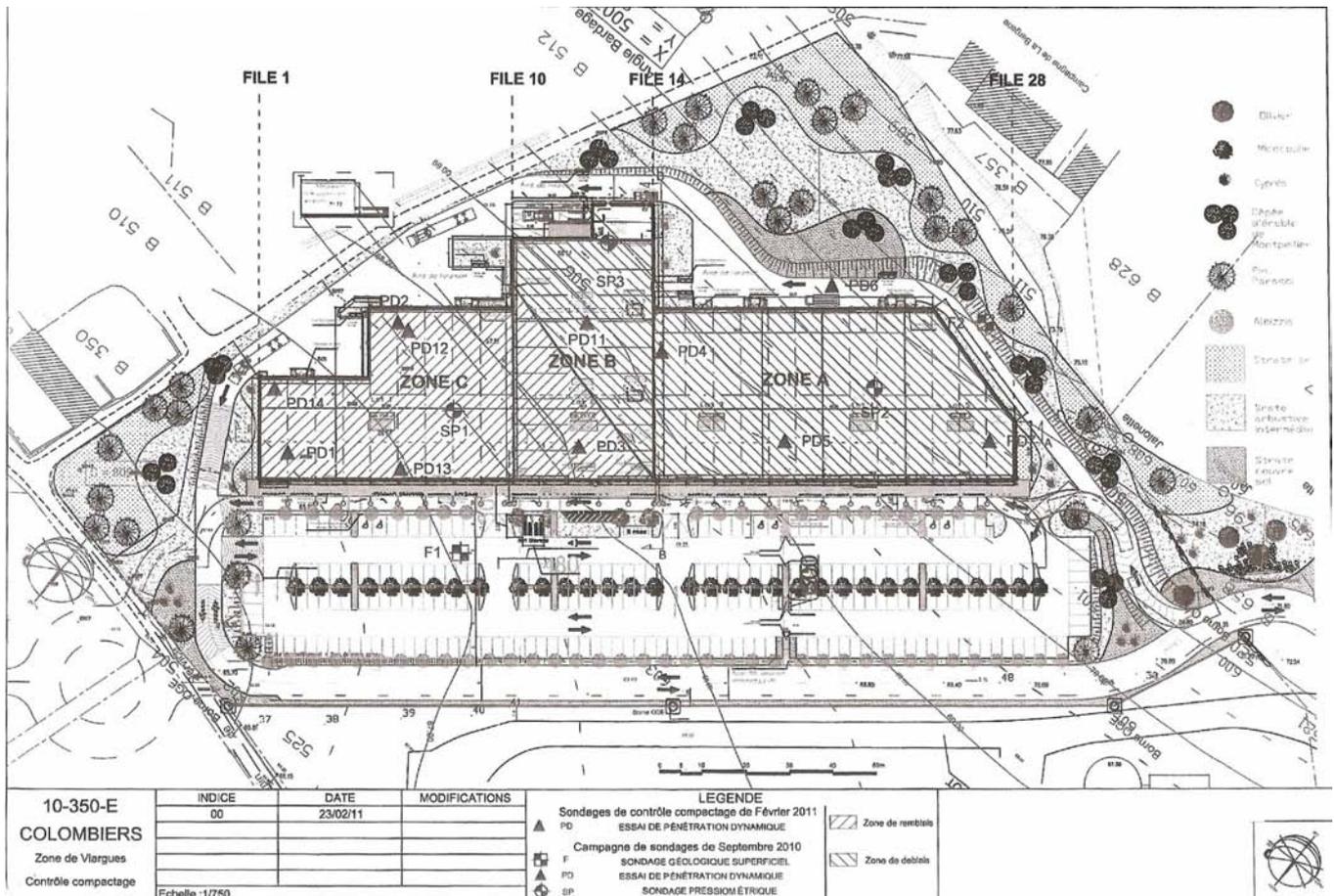
Les résultats des investigations in situ, sont présentés en annexe 8; il s'agit des sondages pressiométriques, des essais de pénétration dynamique et de fouilles à la pelle mécanique.

Les caractéristiques géomécaniques de la couche colluviale sont les suivantes :

- Pression limite nette : $Pl^* = 1,25$ à $1,68$ MPa
- Module pressiométrique : $EM = 15,9$ à $34,2$ MPa
- Caractéristiques pénétrométriques : $qd = 0,8$ à 4 MPa (valeurs de pics).

III.2.2.2. Projet de traitement

La nature même du projet nécessita deux types de traitement des matériaux du site : un traitement à la chaux pour la réutilisation des déblais en remblais sous le bâtiment à usage commercial, et un traitement au ROLAC pour la CDF de la structure de chaussée du parking et de la voie de livraison.



- Figure 17 - Plan d'implantation des sondages du projet de zone commerciale -

Le bâtiment se situe sur un terrain en pente, donc une partie fut seulement déblayée et l'autre fut remblayée par le matériau du site traité à la chaux sur une hauteur finale de 1,00 m.

En effet, il était prévu de traiter les matériaux du fond de forme sur une hauteur de 0,50 m avec 1% de chaux mais les résultats d'essais de portance du BET chargé de la mission de supervision géotechnique d'exécution (G4), montrèrent une insuffisance de la valeur de l'EV2. Donc la couche traitée fut purgée et un nouveau traitement à la chaux fut effectué sur 0,50 m de profondeur.

La zone du parking et celle de la voie de livraison sont d'abord décaissées sur une hauteur de 0,50 m puis remblayées avec les matériaux du site traités au Rolac. La chaussée est composée d'une CDF traitée de 35 cm d'épaisseur, d'une couche de GNT 0/20 de 10 cm ainsi que d'un enrobé de 5 cm.

Le bâtiment repose sur un dallage béton réalisé par le lot 2 (gros œuvre) sur une couche de 35 cm de GNT 0/31,5 posée sur un géotextile séparant l'ensemble du fond de forme traité.

III.2.2.3. Sol et produit de traitement

Les matériaux ont été identifiés, par le BET en charge de l'étude de leur traitement, selon la classification géotechnique du GTR comme étant de classe B₅ : Sables et graves très silteux.

"La proportion de fines et la faible plasticité de ces dernières, rapprochent beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols A₁. " GTR

Rappel à propos des sols A₁ :

"Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau." GTR

De plus le matériau est dit d'état hydrique humide.

Pour ce matériau de type B_{5h}, le GTR précise, dans les conditions d'utilisation en remblai, que :

"Ces sols sont difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. Ils sont sujets au matelassage ce qui est à éviter au niveau de l'arase de terrassement. "

Les conditions de mise en œuvre de ces matériaux sont donc liées à leur sensibilité à l'eau. L'énergie de compactage est différente selon la teneur en eau et les conditions météorologiques.

Pour une utilisation en l'état, sans pluie ni évaporation (toujours selon les préconisations du GTR), le compactage sera faible pour un remblai de faible hauteur (h < 5 m).

Pour un compactage moyen, il faut nécessairement agir sur la teneur en eau, soit par aération si les conditions climatiques constituent une évaporation suffisante, soit par un traitement avec un réactif adapté, comme la chaux.

Le tableau suivant résume les modalités de compactage définies par le GTR.

- Tableau XLVI - Modalités de compactage pour un sol B₅ utilisé en remblai - GTR

Compactage faible : utilisation en état			Compactage moyen : traitement à la chaux		
Modalités	V4*		Modalités	V4*	
Q/S	0,195		Q/S	0,100	
Epaisseur (m)	0,4	0,8	Epaisseur (m)	0,3	0,6
Vitesse (km/h)	5	2,5	Vitesse (km/h)	4	2
Nombre de passes	3	5	Nombre de passes	3	6
Q/L	975	490	Q/L	400	200

*V4 désigne un compacteur vibrant à cylindres lisses de classe 4.

Par ailleurs, le GTR prévoit un traitement systématique de ces sols B_{5h} pour les réutiliser en couche de forme.

"La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique nécessairement de les traiter pour les utiliser en couche de forme. Ce traitement peut être un traitement aux liants hydrauliques pour les moins argileux de la classe ou un traitement associant chaux + liant hydraulique pour les plus argileux et les plus humides. Ces sols se traitent le plus souvent en place et éventuellement en centrale après les avoir traités en place à la chaux. " GTR

Le dosage de chaux pour le traitement des matériaux de remblai est de 1%. L'épaisseur traitée est de 1,00 m au final, réalisée en deux fois par tranche de 50 cm ; à cause de la portance insuffisante relevée lors des essais de plaque sur la première tranche de 50 cm.

Le dosage de ROLAC 645 pour le traitement des matériaux de la CDF des voiries est de 4%. L'épaisseur traitée est de 35 cm.

Dans son rapport initial, le BET en charge de la mission type G12 (BET différent de celui qui a réalisé l'étude de traitement), préconisait des conditions de réutilisation des matériaux similaires, traitement et contrôle du compactage strict (d'où la mission G4), dont les critères sont :

- Fond de forme : $EV2 \geq 40$ MPa
- Par couche de remblai : $EV2 \geq 50$ MPa
- PF finie (avec couche de GNT) : $EV2 \geq 80$ MPa
- Résistance dynamique apparente (pour toute la hauteur du remblai) : $qd \geq 5$ MPa
- $k = EV2 / EV1 \leq 2$

III.2.2.4. Intérêt du traitement

Le traitement au ROLAC n'a pas réduit suffisamment la teneur en eau du matériau. L'état hydrique du mélange sol + 4% de ROLAC est "h". La teneur en eau mesurée est de 12,2% ; or la teneur à l'Optimum Proctor Modifié est de 10,5%. Le BET préconisa donc d'aérer le matériau afin de faire chuter son état hydrique.

D'autre part, les premières constatations faites sur la nature du matériau et son état hydrique, (sol de classe B5 et état hydrique "h"), permettent d'établir les hypothèses de départ suivantes : PST 1 améliorée par un traitement à la chaux, comme préconisé dans les commentaires des différents cas de PST du GTR (fascicule II, p. 55) :

"...procéder à une amélioration du matériau jusqu'à 0,5 m d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique de remblai. On est ramené au cas de PST 2, 3, ou 4 selon le contexte. " GTR

Grâce aux résultats des essais de portance de la PF sous chargement statique à la plaque qui ont mesuré un module $EV2$ de l'ordre, en moyenne de 150 MPa, la classe de PST peut être déduite de celle de la PF 3 nécessitant au minimum une PST 3 / AR 2, pour une épaisseur de CDF de 35 cm.

De même que pour le cas 1 dont la structure de chaussée est identique : enrobé de 5 cm, GNT 0/20 de 10 cm et CDF traité à 4% de ROLAC de 35 cm d'épaisseur, le traitement permet ici de réduire considérablement l'épaisseur des couches d'assise, limiter l'apport de matériaux nobles et réaliser ainsi une économie sur les granulats de carrières.

Il s'agit donc d'une optimisation globale du complexe chaussée/CDF, où la CDF devient une couche d'assise de chaussée et remplace la couche de fondation classique.

De plus les caractéristiques géotechniques du terrain naturel limoneux et humide ne constituaient pas des conditions favorables aux travaux de terrassement encore moins à l'exécution d'une voirie. Le traitement a donc rendu possible la réalisation de ces travaux, tout en optimisant la portance du sol support.

sorte. Il s'agit d'une part de colluvions indifférenciées (Cx), formations constituées par des dépôts généralement très graveleux, issues des nappes d'alluvions plus anciennes et ne pouvant être rattachées à un niveau particulier du Pléistocène moyen.

D'autre part, les colluvions différenciées du Pléistocène supérieur (Cyb) sont des formations qui portent des sols bruns calciques peu évolués.

L'étude conclut sur la classification géotechnique du matériau A₂ (d'après échantillon), soit un matériau fin de consistance changeant brutalement selon la teneur en eau, dont la fraction de fine présente une éventuelle sensibilité aux phénomènes de retrait-gonflement par dessiccation-imbibition.

III.2.3.2. Projet de traitement

Le traitement fut proposé comme variante pour un projet de bretelle d'accès à une ZAC depuis une route départementale.

Les figures suivantes permettent de voir les structures de chaussée prévues dans le cadre de la solution traditionnelle et dans le cadre de la variante traitement.

Structure avec traitement		Structure traditionnelle	
matériaux	épaisseurs	matériaux	épaisseurs
BBME	5 cm	BBSG	6 cm
EME	2 x 9 cm	GB3	2 x 12 cm
CDF traitée	35 cm	GNT	40 cm
		géotextile	

- Figure 14 - Représentation schématique des structures de chaussée envisagées -

III.2.3.3. Sol et produit de traitement

Le produit de traitement proposé est le ROLAC sur une épaisseur de 35 cm.

III.2.3.4. Intérêt du traitement

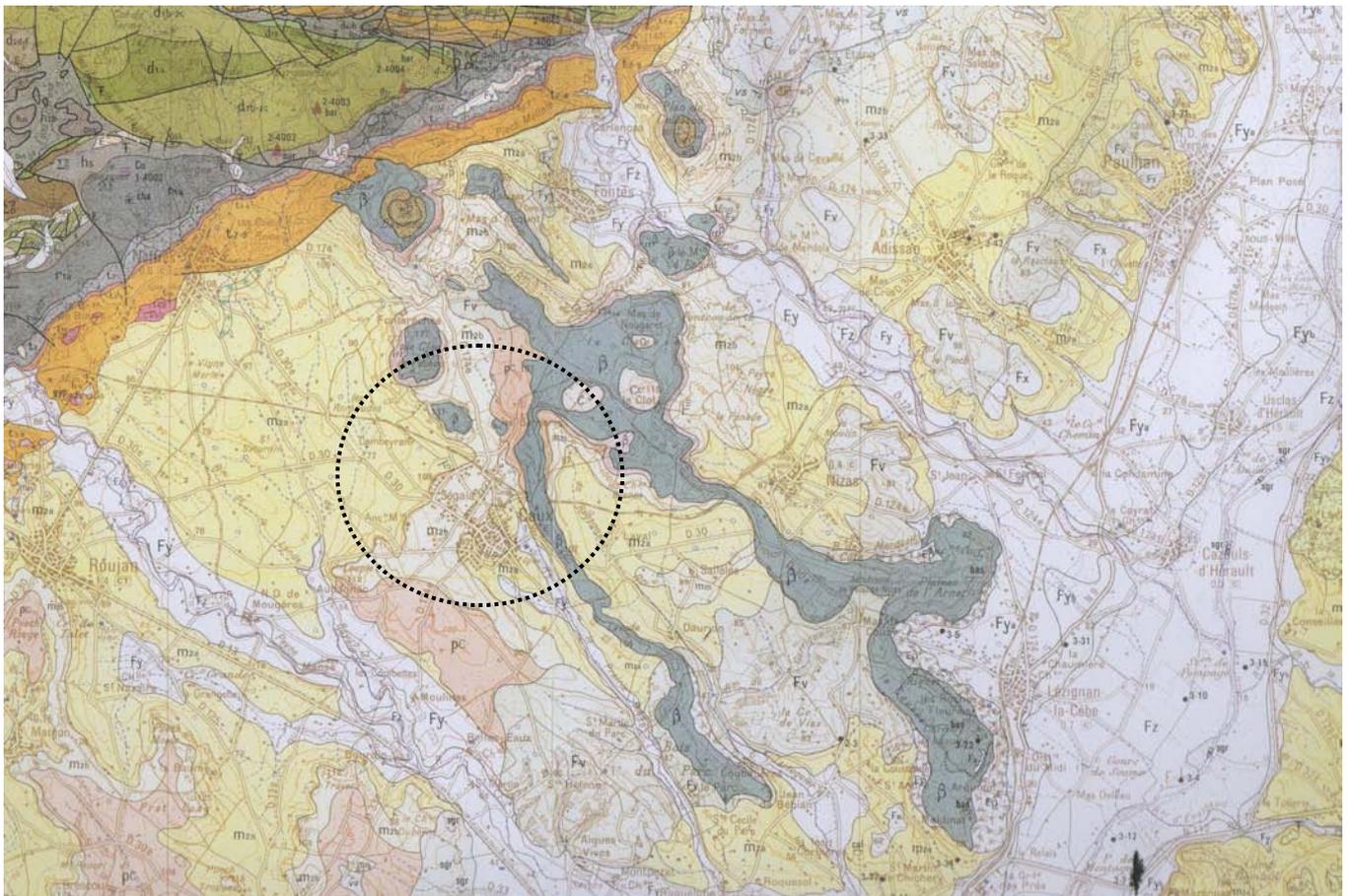
Le DPGF compare les deux solutions de structure de chaussée et permet de conclure sur une économie de 20% de la variante traitement.

III.2.4. Cas 4 : voie de liaison, Caux, 34

III.2.4.1. Contexte géologique

Situé à proximité de Pézenas, au Nord-ouest, Caux se trouve au croisement de plusieurs formations dont notamment une coulée de basalte (β), qui est une roche très dure.

Les autres formations visibles sur la carte sont du pliocène continental (pC) et du Miocène moyen (m2a, m2b).



- Figure 19 - Caux - extrait de la feuille géologique de Pézenas -

Les formations du Miocène moyen peuvent se regrouper en deux ensembles :

- les marnes bleues et la molasse marno-sableuse (m2a) d'une grande homogénéité se développent d'une façon générale dans toute la région, occupant le fond des grandes dépressions où elles jaunissent en surface. Au dessus apparaît la molasse calcaire marno-sableuse ; les marnes deviennent plus sableuses; elles sont entrecoupées de plusieurs bancs épais, de calcaires coquilliers parfois gréseux ou calcaires-lumachelles.

- l'autre formation est constituée de molasse à dragées (m2b), qui se charge progressivement de petits galets de quartz apportés de la Montagne Noire et façonnés par le flux et le reflux de la mer miocène, et de dépôts issus des étangs saumâtres de la zone littorale correspondant à des calcaires laguno-lacustres blanchâtres, soit argileux, soit compacts.

Le Pliocène continental (pC) est caractérisé par une formation continentale détritique composée

de limons rougeâtres plus ou moins caillouteux et gréseux, associés à des poudingues de galets calcaires ou siliceux, en provenance de la Montagne Noire, et correspond à des dépôts d'épandages fluviaux.

Les informations fournies par l'entreprise et les recherches menées par la suite ne permettent pas de situer précisément la voirie en question.

Cependant le classement du sol en A2, sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, laissent supposer que cette voie de liaison se trouve au niveau du regroupement des horizons d'alluvions du Pliocène continental, et de la molasse marno-sableuse du Miocène, au nord de Caux.

III.2.4.2. Projet de traitement

Il s'agit d'une part du traitement en place au liant hydraulique routier (LHR) des matériaux du site afin de constituer l'assise de la chaussée, d'autre part du traitement des matériaux du site à la chaux vive pour obtenir une PST 4 / AR 2.

La structure de la chaussée est composée d'une couche de roulement de 6 cm avec un BBSG de classe 3, d'une couche d'assise en matériaux traités de 35 cm d'épaisseur et d'un sol support de chaussée traité à la chaux sur 50 cm environ.

III.2.4.3. Sol et produit de traitement

Les sols ont été identifiés de classe A2 selon le GTR : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes.

"Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12 , il constitue le critère d'identification le mieux adapté. " GTR

Ils sont de type T1/T2 selon le guide technique des traitements de sol appliqué aux assises de chaussée ; c'est-à-dire sols fins et sableux.

En voici les caractéristiques géotechniques :

- Tableau XLVII – Critères limitatifs selon le type de sol concerné – GTS Assise

Type de sol		Argilosité	Dmax	D passant entre 80 et 99 %
Sols fins	A ₁ , A ₂	VBS < 5 Ou Ip < 20	≤ 31,5	≤ 20

La valeur minimale de l'indice de portance immédiate à atteindre pour les matériaux traités de ce type de sol est donnée par le GTS Assises : IPI ≥ 20

III.2.4.4. Intérêt du traitement

Le traitement à la chaux vive sur 50 cm permet donc d'obtenir une PST 4 / AR 2, et de constituer une PF 2 de 50 MPa nécessaire au traitement au LHR (pas de PF1 possible pour traitement).

En effet le GTR préconise un traitement à la chaux de ce type de sol A2 pour une utilisation en remblai et un traitement au liant hydraulique pour une utilisation en CDF, si l'état hydrique du matériau est h.

Ce premier traitement constitue donc la plateforme de terrassement qualifié d'arase (remblai).

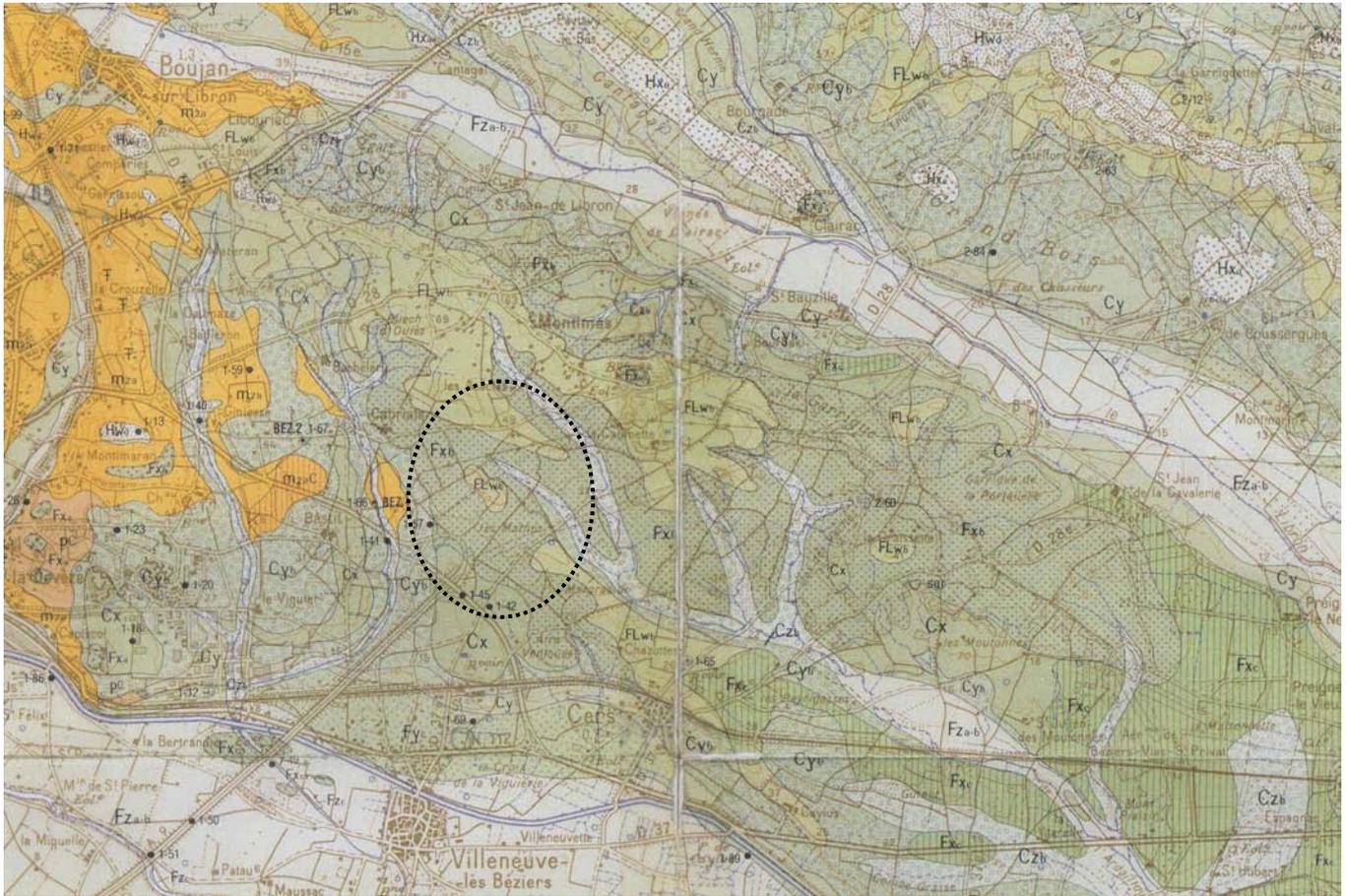
Le second traitement des matériaux au LHR permet à la fois d'avoir une couche d'assise de chaussée et une CDF car le GTS Assises précise qu'une couche d'épaisseur > 30 cm est considérée comme une couche unique forme-fondation.

L'économie réalisée est certaine car il n'y a pas de matériau apporté outre le BBSG.

III.2.5. Cas 5 : Raccordement de l'autoroute A75 à l'autoroute A9

III.2.5.1. Contexte géologique

L'embranchement se trouve à l'est de Béziers, au sud-ouest de Montimas, à l'est de Bastit. Il se trouve donc en pleine zone d'alluvions du Quaternaire (FLwb, FXb). On voit également sur la carte un bras de colluvions (Czb, Cyb).



- Figure 20 – Raccordement A75 et A9 - extrait de la feuille géologique d'Agde -

Les colluvions différenciées du Pléistocène supérieur (Cyb) sont des formations qui portent des sols bruns calcaïques peu évolués.

Les dépôts fluviatiles du Pléistocène inférieur (FLwb) sont composés de sables, limons, graviers et cailloutis.

Les formations du Pléistocène moyen (Fxb) sont des alluvions grossières.

Les colluvions de versant et remplissages colluviaux de vallons (Czb) sont de nature limono-sableuse, localement caillouteuse.

La nature du sol identifié pour l'étude de traitement comme de classe A₁, limons et sables fins, permet de situer la voirie au niveau des alluvions du Pléistocène inférieur (FLwb) et des colluvions de remplissage (Czb), passant juste au milieu de la diagonale imaginaire reliant Montimas à Cabrials.

III.2.5.2. Projet de traitement

Le projet est un raccordement des autoroutes A75 et A9 à Béziers, pour lequel un traitement de la couche de forme aux liants hydrauliques routiers est envisagé.

L'objectif du traitement est l'obtention d'un matériau de couche de forme de classe mécanique 4 qui, traité sur 35 cm d'épaisseur en centrale de malaxage, permet de réaliser une PF 4 (module > 200 MPa).

L'étude réalisée par le laboratoire géotechnique a permis de comparer les différents liants hydrauliques suivants :

- 1,5 % CaO + 5% et 7 % ROLAC 645
- 1,5 % CaO + 5% et 7 % Ciment CEM II 32,5
- 5% et 7 % liant routier spécial LRS

C'est finalement le ROLAC 645 qui sera retenu, car le plus adapté, avec un dosage de 5% sur une épaisseur traitée de 35 cm.

III.2.5.3. Sol et produit de traitement

Les sols du site sont classés selon la norme NF P 11-300 : A1m.

Le GTR définit pour la classe A₁ des limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques. (VBS ≤ 2,5 ou Ip ≤ 12).

Pour une utilisation des matériaux en couche de forme, le GTR fait les observations suivantes :

"La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter avec des liants hydrauliques associés éventuellement à la chaux. La maîtrise de l'état hydrique de ces sols traités est souvent délicate en raison de la variation brutale de leur comportement (portance) pour de faibles écarts de teneur en eau." GTR

Les références de compactage obtenues par l'essai Proctor Normal sont répertoriées dans le tableau XLVIII, ci-après.

- Tableau XLVIII – Références de compactage déterminées par l'étude de traitement du laboratoire -

	1,5 % CaO + 5 % ROLAC (CEM II)	1,5 % CaO + 7 % ROLAC (CEM II)	5 % LRS
Densité Humide Max.	2,113 t/m ³	2,124 t/m ³	2,109 t/m ³
Teneur en eau à l'optimum	15,2 %	16,0 %	14,2 %
Densité sèche Max.	1,834 t/m ³	1,831 t/m ³	1,847 t/m ³
IPI à l'OPN	12	12	14

Les essais d'aptitude du sol au traitement ont été effectués sur les trois produits de traitement. Ils montrent que quelque soit le liant employé, les différents traitements envisagés sont adaptés.

- Tableau XLIX – Résultats des essais d'aptitude du sol au traitement -

Formule	1,5 % CaO + 6 % ROLAC 645	1,5 % CaO + 6 % CEM II	6 % LRS	Référence pour avis adapté
Gonflement volumique G_v	0,9	0,8	1,4	≤ 5
Résistance en compression diamétrale à 7 jours R_{tb}	0,57	0,67	0,62	$\geq 0,2$

La mesure des performances mécaniques sur des échantillons à l'OPN permet d'évaluer le comportement du sol traité vis à vis de :

- L'âge autorisant la circulation sur la couche traitée : R_c à 7 jours
- La résistance à l'immersion au jeune âge : R_c à 60 jours et R_{ci} à 28 et 32 jours, R_{ci} / R_{c60}
- La résistance au gel : R_{tb} à 7 jours
- Les performances escomptables à long terme : E et R_t à 90 jours

- Tableau L – Performances mécaniques de chaque type de traitement -

		1,5%CaO + 5% ROLAC	1,5%CaO + 7% ROLAC	1,5%CaO + 5% CEM II	1,5%CaO + 7% CEM II	5 % LRS	7 % LRS
7 jours	R_c	1,96	2,45	1,66	1,96	1,23	1,56
28 jours	R_c	3,30	3,91	2,52	2,91	1,94	2,49
	E	2881	6915	3857	4652	2823	5996
	R_t	0,31	0,44	0,26	0,28	0,19	0,27
60 jours	R_c	3,80	4,39	3,06	2,91	2,48	2,49
	E	4698	6046	5317	4652	3612	4540
	R_t	0,33	0,48	0,26	0,28	0,24	0,33
90 jours	E	5050	7198	6356	6643	5612	7000
	R_t	0,39	0,53	0,36	0,44	0,32	0,42
Zone mécanique		3	3/4	4	3	4	3/4

Les performances mécaniques à 90 jours, E et R_t permettent de définir la classe mécanique du matériau traité en centrale.

La classe mécanique 3 permet l'obtention d'une PF 4 à partir d'une AR 2 pour une épaisseur de CDF traitée de 30 cm. Le ROLAC 645 semble le mieux adapté à l'utilisation car la classe mécanique est obtenue quelque soit le dosage. Le dosage retenu est 5% et l'épaisseur 35 cm.

III.2.5.4. Intérêt du traitement

Une étude de sensibilité aux paramètres d'influence a permis de démontrer que les dispersions des caractéristiques de compactage, dues à l'épandage du liant, n'ont pas d'influence notable sur les performances mécaniques car la classe mécanique 3 reste obtenue.

De plus la classe mécanique 4 requise comme objectif n'est pas nécessaire car les performances mécaniques obtenues lors de l'étude du traitement a conclu qu'une classe mécanique 3 était suffisante pour obtenir une PF 4 avec une CDF traitée de 30 cm.

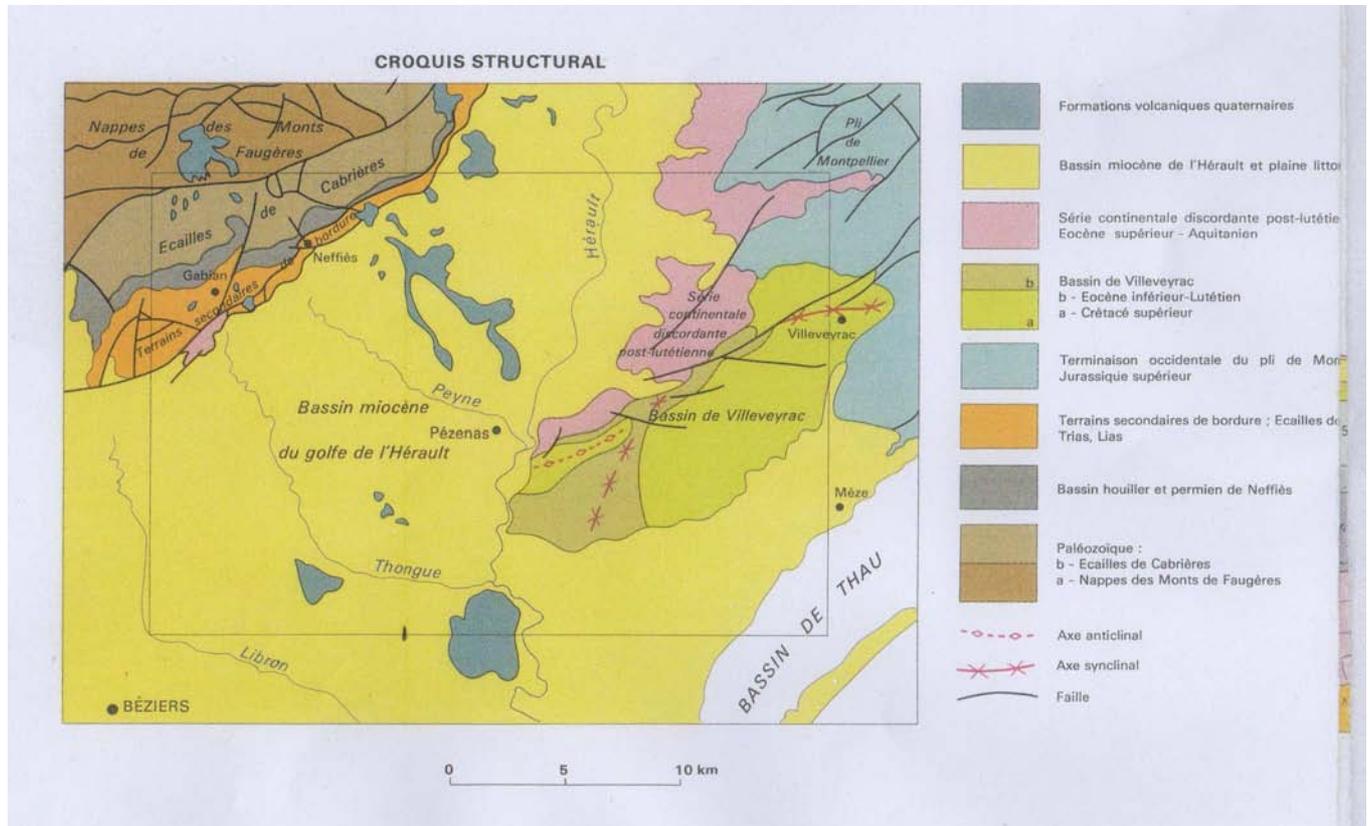
L'épaisseur préconisée par le laboratoire demeure de 35 cm certainement pour garder une marge supplémentaires de garantie d'obtention de ces performances. C'est en quelque sorte une majoration pour une optimisation.

L'étude de formulation réalisée est de type niveau 2 car il y a une étude spécifique des caractéristiques mécaniques du matériau traité; Pour être de niveau 3, il aurait fallu la réalisation de planches d'essai et chantier expérimental.

III.2.6. Cas 6 : Autoroute A 75, Section Pézenas-Béziers, 34

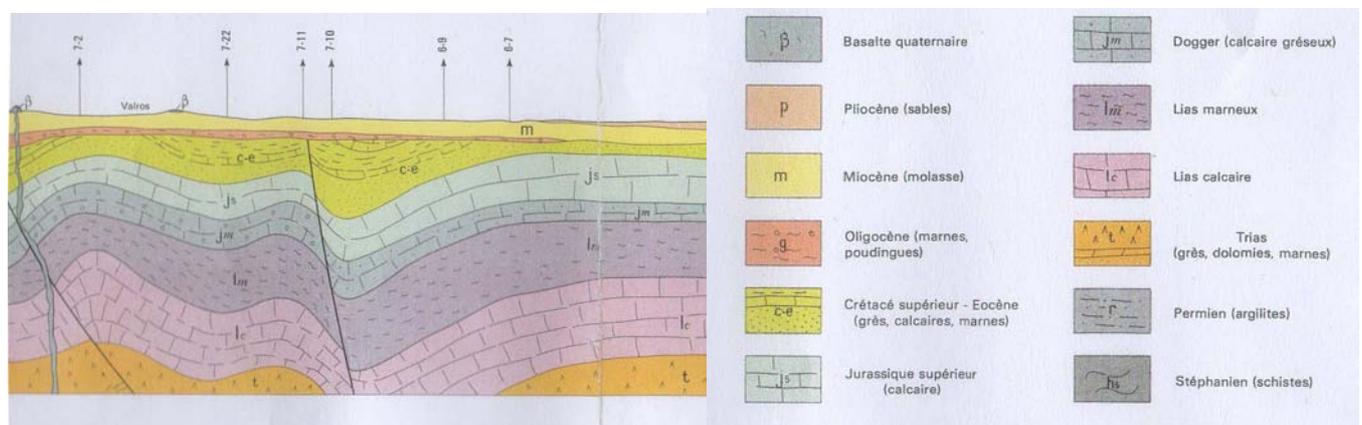
III.2.6.1. Contexte géologique

Cette section de l'autoroute A75 se situe au cœur du bassin miocène du golfe de l'Hérault.



- Figure 21 - Bassin miocène - extrait de la carte géologique de Pézenas au 1/50 000e-

La coupe géologique de la voie faisant du traitement montrent les matériaux trouvés à proximité de Valros : limons argilo-sableux de classes A₁-A₂ et sables limono-graveleux de classe B₅.

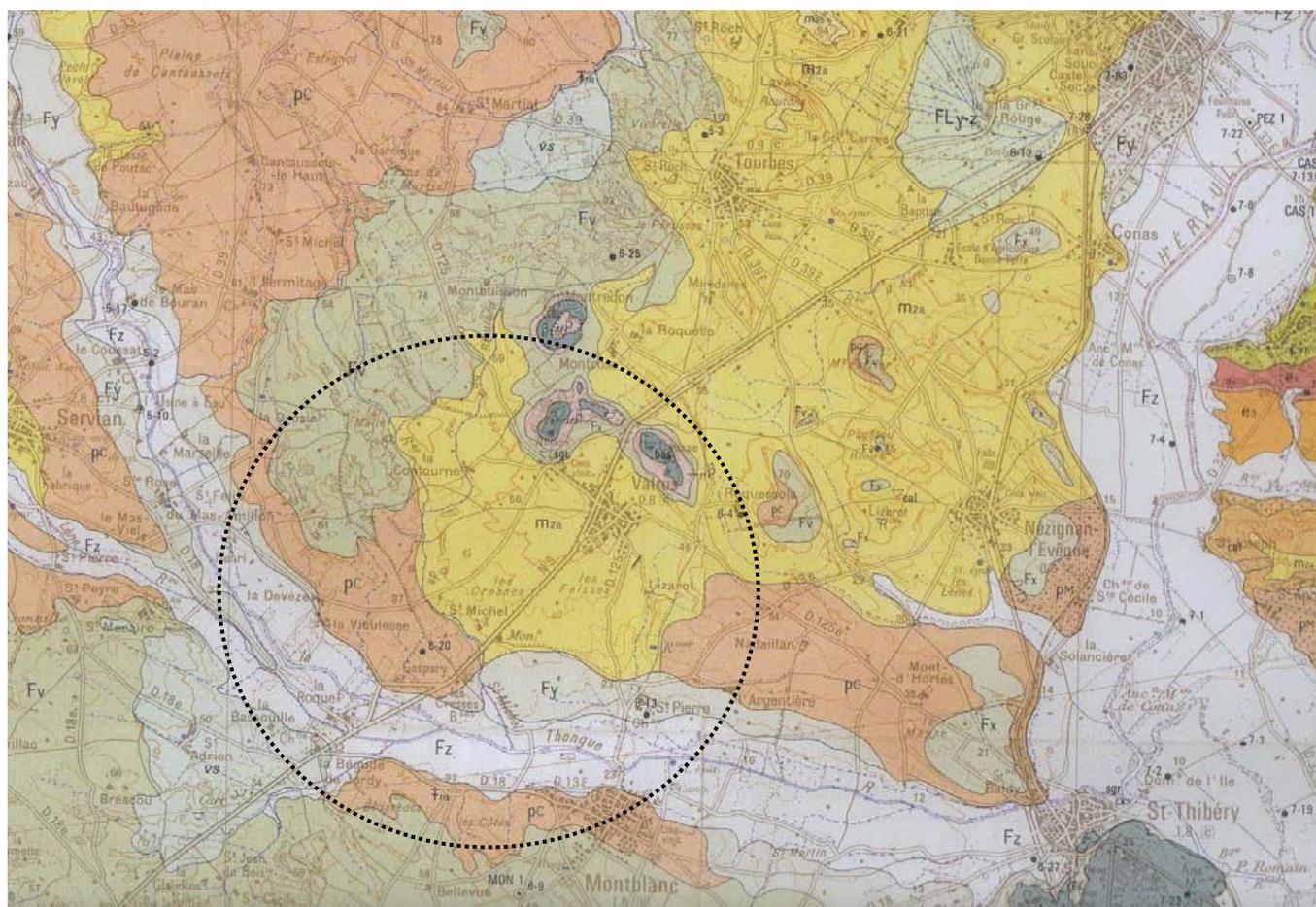


- Figure 22 - Coupe schématique des formations - extrait au niveau de Valros -

Les limons proviennent de dépôts fluviaux, de la formation d'alluvions récentes (Fz) composée de limons, sables et graviers.

La formation d'alluvions anciennes du Pléistocène supérieur (Fy) correspond à des alluvions grossières (blocs, galets et graviers de calcaires siliceux, de grès...) et peut donc être écartée, bien que plus ou moins limoneuse.

Les sables sont probablement des sables et graviers fluviaux du Pliocène continental (pC). Cette formation continentale détritique qui remplit les anciennes vallées est composée de limons rougeâtres plus ou moins caillouteux et gréseux, associés à des poudingues de galets calcaires ou siliceux, en provenance de la Montagne Noire. Elle correspond à des épandages fluviaux.



- Figure 23 – Valros - extrait de la carte géologique de Pézenas au 1/50 000^e -

III.2.6.2. Projet de traitement

Le projet est le traitement en centrale au liant hydraulique routier des matériaux du site pour constituer la CDF d'une section courante de l'autoroute A75.

L'objectif de portance à long terme est une PF4.

Les études de traitement ont été réalisées sur les sols du déblai D8 et de l'emprunt situé de part et d'autre de ce déblai (voir localisation des gisements sur les plans et la coupe géotechnique : figure 24, figure 25 et figure 26).

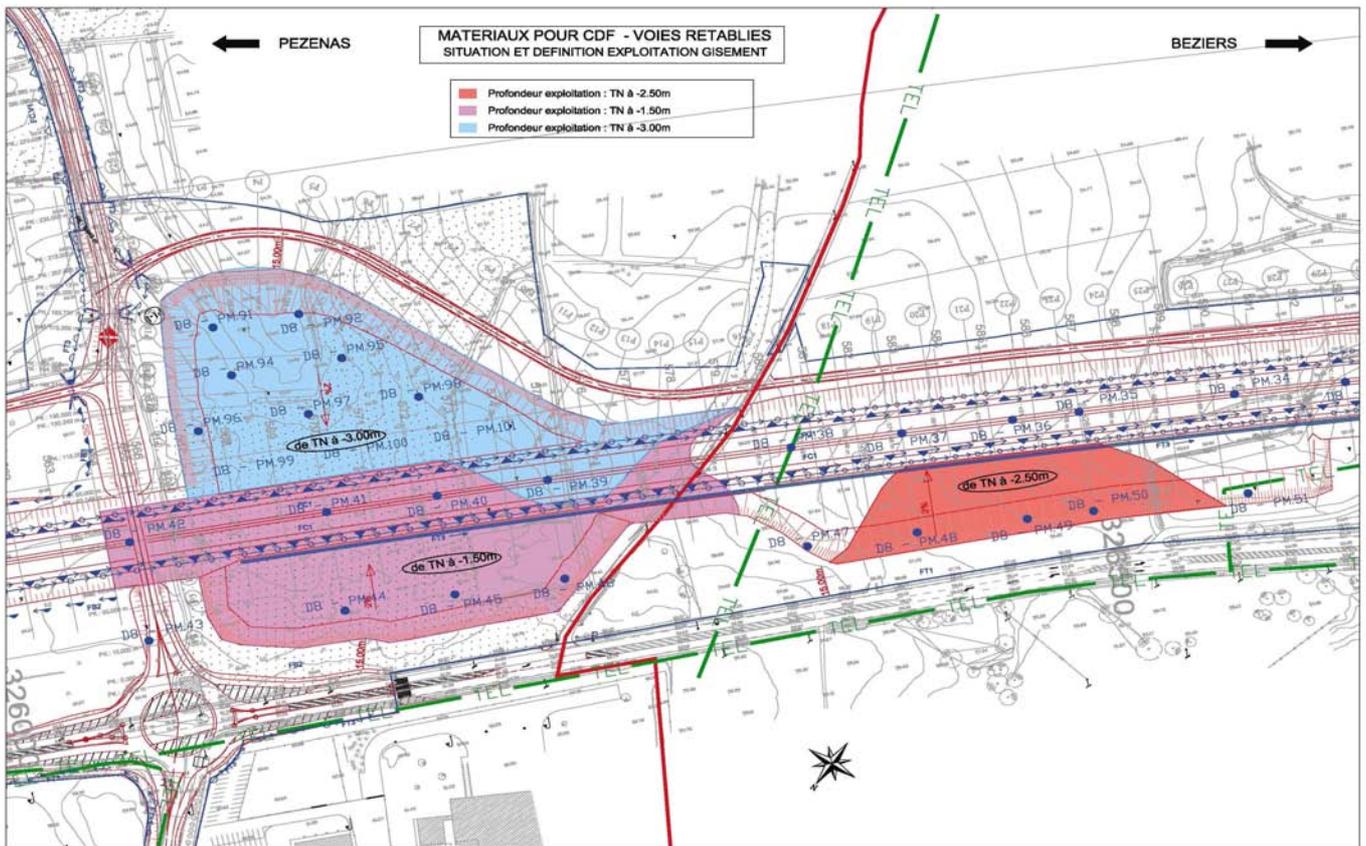
La totalité des matériaux potentiellement disponibles a été évalué à 120 000 m³.

Les différents sols qui composent le gisement induisent un traitement particulier de chacun :

Les matériaux limoneux argileux A₁/A₂ ont été prétraités avec 1% de chaux au moment de la mise en dépôt puis avec 5% de Rolac.

Les matériaux sableux graveleux B₅ ont été traités avec 5,5% de Rolac.

L'ampleur du chantier a nécessité une étude de formulation de niveau 3 avec réalisation de planches d'essai à partir d'un chantier expérimental.



- Figure 24 - Plan de repérage des profondeurs d'exploitations du gisement - 2,50 m à 3,00 m – étude BET

III.2.6.3. Sol et produit de traitement

Les différentes natures de sol du gisement ont été identifiées lors de sondages.

Les différentes catégories de matériaux ont ensuite été regroupées, pour les besoins de l'étude, par frange limono-argileuse et frange sablo-graveleuse afin d'obtenir un matériau représentatif de ceux qui composent le gisement.

- Tableau LI - Identification des matériaux du site par sondage - d'après étude BET

Sondage	Profondeur	Nature du matériau	Mélange sable argileux	Mélange limon
PM 100	0,8	Limon marron argileux		X
	2,2	Limon marron argileux		X
	3	Sable limoneux graveleux	X	
	4	Sable + ou - argileux	X	
	4,8	Sable graveleux propre	X	
PM 101	08	Limon marron		X
	1,4	Limon sableux graveleux		X
	2,6	Sable graveleux propre	X	
	3,8	Sable graveleux propre	X	
	4,7	Sable propre	X	

Les caractéristiques des mélanges sont présentées dans le tableau suivant. Ce sont des :

- limons argilo sableux de classe A1 et A2 en surface et en fond de déblai de façon ponctuel.
- sables limono graveleux de classe B5, dont le passant à 80 μ se situe entre 15 et 35% Ils représentent la majorité des sols à matrice sableuse du gisement.
- sables limono graveleux de classe B4/B5, dont le passant à 80 μ se situe entre 7 et 20%, retenus pour vérifier l'incidence du déficit en fines ($\% < 80\mu < 25\%$) du matériau sur les caractéristiques mécaniques, ce cas extrême pourrait être rencontré en fond de déblai ou d'emprunt sous forme d'inclusion.

- Tableau LII - Paramètres d'identification des matériaux - d'après étude BET

Nature du mélange	D _{max}	5mm	2mm	80 μ	w%	VBS	IPI	ρ_s	w%IPI	GTR
Limon argilo sableux	10	96,9	90	67	13,5	2,93	15	1,75	15,5	A ₂ m
Sable limono graveleux (Echantillon n° 1)	10	99,2	97,9	28,1	8,1	1,36	29	1,92	7,8	B ₅ m
Sable limono graveleux (Echantillon n° 2)	20	73,7	49,9	23,2	5,4	0,8	32	1,80	5,4	B ₅ S/m

Différents dosages ont été testés avec vérification de l'aptitude au traitement.

Les dosages suivants ont été retenus :

- Limon argilo sableux traité à 4% de ROLAC 645 et à 1% Cao + 5% ROLAC 645
- Sable limono graveleux 1 traité à 5% de ROLAC 645
- Sable limono graveleux 2 traité à 5,5 % de ROLAC 645

Le comportement des matériaux traités fut ensuite étudié pour vérifier l'insensibilité à l'eau par un essai Proctor, et mesure des caractéristiques mécaniques (R_t et E). Les résultats de ces essais sont récapitulés dans le tableau LIII.

Ils démontrent que la classe mécanique 3 est satisfaisante pour atteindre l'objectif de PF4 avec 30 cm de CDF.

Le rapport d'étude précise que les arases terrassement ont été traitées au ciment sur une épaisseur de 40 cm et que les caractéristiques mécaniques en place mesurées à la plaque atteignent les performances de classe d'arase AR3.

Il recommande de réduire la rigidité de la PF pour limiter les phénomènes de fissuration.

- Tableau LIII - Caractéristiques des matériaux traités - d'après étude BET

Sol		Limons argilo sableux à argile limono sableuse	Sable limono graveleux Echantillon n° 1	Sable limono graveleux Echantillon n° 2
Dosage et liant		1%CaO + 5% ROLAC	5% ROLAC	5,5% ROLAC
Densité OPN t/m ³		1,8	1,99	2,02
WOPN %		17,4	9,9	8,3
IPI à l'OPN		15	30	45
CBR à l'OPN		> 100	305	425
Test d'aptitude				
G _v (G _v < 5%)		0,57	1,62	1,41
R _{tb} (R _{tb} > 0,20)		0,43	0,5	0,54
Module E		4300	4933	5500
Diagnostic		Adapté	Adapté	Adapté
Classe mécanique		3/4	3	3
Caractéristiques mécaniques				
7 jours	R _c (MPa)	2,75	2,33	2,08
14 jours	R _c (MPa)	3,36	2,9	2,53
28 jours	R _{tb} (MPa)	0,45	0,43	0,41
	E (MPa)	4667	4483	4270
60 jours	R _c (MPa)	4,36	3,33	3,06
	R _{ci} (MPa)	4,03	3,12	3,37
90 jours	E (MPa)	5933	5400	7507
	R _{tb} (MPa)	0,55	0,49	0,57
Classe mécanique		3	3/4	3/4

III.2.6.4. Intérêt du traitement

L'étude de traitement d'un chantier de cette catégorie, Autoroute, a généré beaucoup de données issues de nombreux essais. Le rapport consulté est un récapitulatif des résultats les plus pertinents pour une exécution optimale.

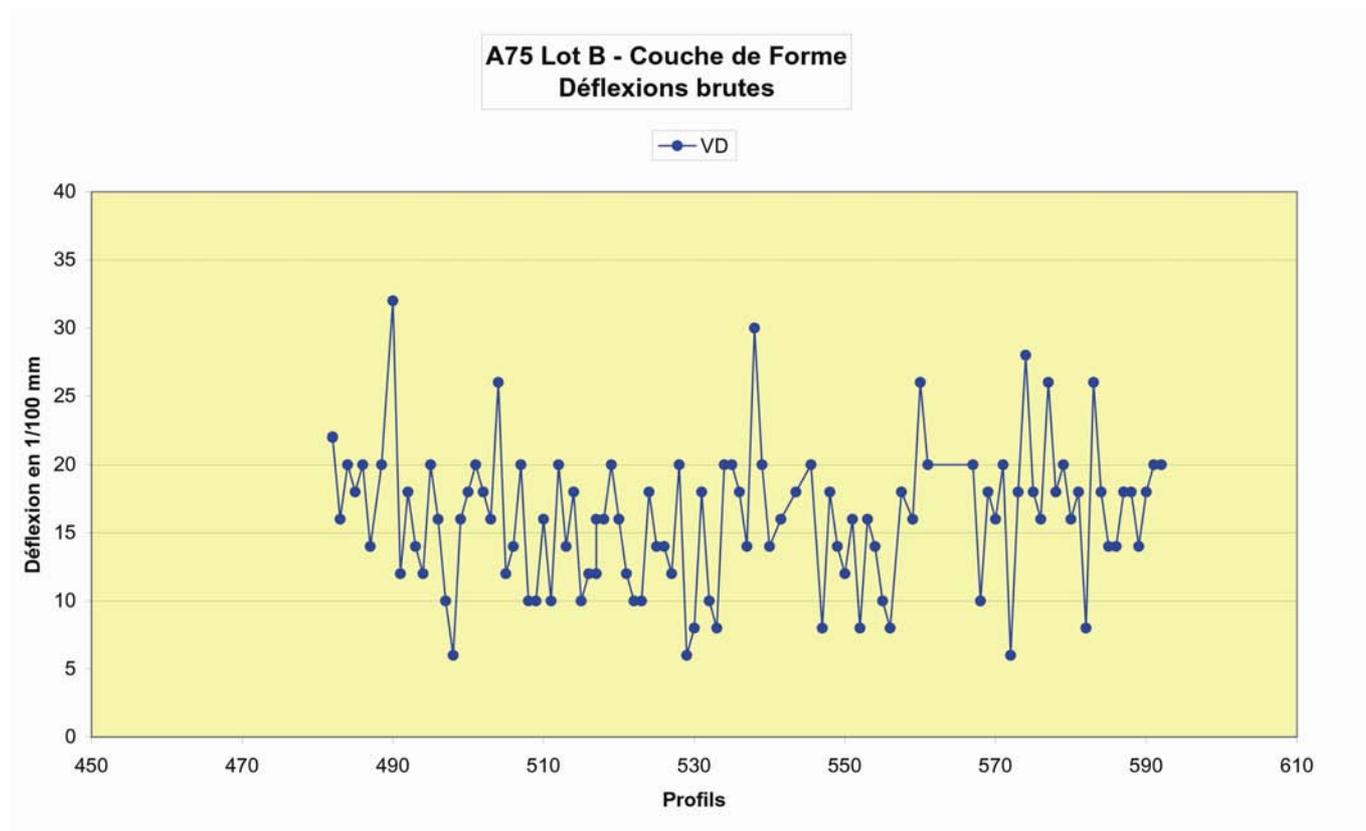
Quelques extraits de tous ces documents sont joints en Annexe 10; ce sont les résultats des : essais Proctor, le diagramme Rt - E, essais de compression diamétrale, de compression simple,

essais d'aptitude au traitement, sondages à la pelle mécanique.

La portance d'une CDF traitée se détermine avec la mesure de sa déflexion, elle doit être inférieure à $20 \times 1/100$ mm pour une PF 4 d'autoroute (c.f Manuel SCETAUROUTE).

Pou ce chantier la déflexion a été mesuré en continu avec un déflectographe, et par série de mesures ponctuelles avec la poutre de Benkelman.

Les résultats montrent qu'en moyenne la limite est respectée, sur le graphique de la figure 27, on peut voir quelques pics mais ils figurent en nombre toléré.



- Figure 27 - Graphique des mesures de déflexion prise avec la poutre Benkelman -

IV. Etude comparative et synthèse des calculs de chaussée, de coût, et des traitements

Dans cette partie nous allons tout d'abord voir comment le traitement de sol impact sur le calcul de structure de chaussée ; d'une part grâce à la résistance apportée par la couche traitée au regard d'une solution traditionnelle (en graves non traitées), d'autre part au terme d'un bilan global des résultats de calcul regroupant les cas présentant de fortes similitudes.

Ensuite nous constaterons l'économie financière réalisée sur la modification de la structure de chaussée par le traitement sous forme de coûts globaux.

Et enfin une synthèse comparative des traitements permettra d'extrapoler les résultats obtenus dans les cas présentés à d'autres cas similaires.

IV.1. Comparaison des calculs de structure de chaussée

La CDF traitée s'introduit de deux différentes manières dans le calcul des sollicitations de la structure de chaussée ; elle constitue soit un support de qualité supérieure par l'augmentation de la classe de PF, soit elle est intégrée à la structure de chaussée et joue le rôle de la couche de fondation.

Dans les cas étudiés, la CDF est considérée comme une couche d'assise lorsqu'il s'agit de petite voirie à faible trafic. Pour les cas d'autoroute, l'importance du trafic requière une PF de grande performance, pour éviter notamment le surdimensionnement aberrant des couches de chaussée.

Tous les calculs de structure sous charge de référence (essieu français 130 kN) sont effectués avec le programme ALIZE.

Le calcul des valeurs admissibles est lui effectué à la main (excepté le calcul du coefficient k_r)

Le développement des calculs se trouve en annexe 12.

Les données de chargement sont :

- jumelage standard de 65 kN
- pression verticale : 0,6620 MPa
- rayon de contact : 0,1250 m
- entraxe jumelage : 0,3750 m

Les unités sont : m, MN et MPa ; déformations en $\mu\text{d}\acute{e}\text{f}$; déflexions en mm/100.

IV.1.1. L'apport structurel de la couche traitée dans la rigidité de la chaussée

La rigidité d'une couche se mesure par son module élastique E (module de Young).

La loi de Hooke met en relation ce module E avec la contrainte σ et la déformation ϵ par la relation suivante :

$$E = \sigma / \epsilon$$

Les principes de la mécanique des sols permettent de calculer la contrainte verticale en tout point d'un sol par la relation qui existe entre le poids volumique du sol (γ) et son épaisseur (h).

$$\sigma_z = \gamma \times h$$

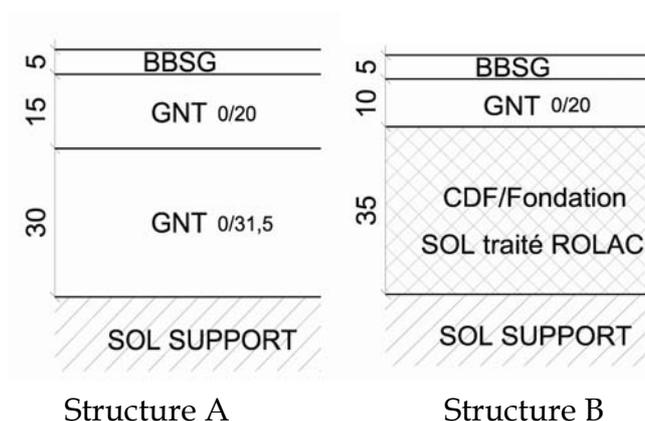
Les résultats des calculs de structure effectués par la méthode ALIZE traduisent cette relation entre l'épaisseur de la couche, son module et la déformation engendrée, en incluant un autre facteur qu'est le trafic. Ainsi les contraintes et déformations ne se calculent pas seulement au regard du poids propre mais également en prenant en compte une charge supplémentaire.

La comparaison des calculs structurels entre la solution traditionnelle et la variante traitement est faite sur les Cas 1, Cas 2 et Cas 3. Dans ces cas, le sol traité sert à la fois de support de chaussée et de couche d'assise incluse dans le calcul comme une couche de chaussée.

Les Cas 5 et Cas 6 de chaussée d'autoroutes ne font pas l'objet de ce comparatif car l'obtention d'une portance de type PF4 est une condition sinequanon de la structure.

▫ Voirie Cas 1 - voie de desserte - faible trafic

Trafic : T5 : MJA = 5 PL/j/sens/voie



- Figure 28 - structures de chaussée du cas 1 -

A - Structure de chaussée souple : BBSG /GNT

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

$$\epsilon_z = 777,8 \times 10^{-6} < \epsilon_{z,ad} = 1982 \times 10^{-6}$$

B - Structure avec CDF traitée/fondation (= couche de chaussée incluse dans le calcul)

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

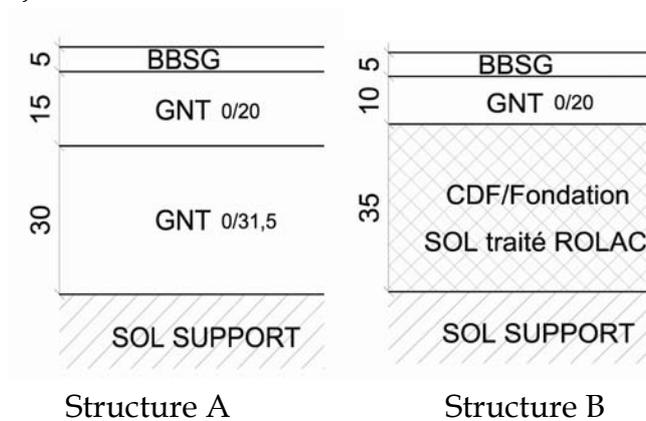
$$\begin{aligned} \epsilon_z &= 124,2 \times 10^{-6} < \epsilon_{z,ad} = 1699 \times 10^{-6} \\ \sigma_t &= 0,522 \text{ MPa} < \sigma_{t,ad} = 0,817 \text{ MPa} \end{aligned}$$

L'apport structurel de la couche traitée est visible par la déformation du sol support ϵ_z qui se trouve amoindri dans la structure B (sol traité). L'écart est surtout perceptible au niveau de la valeur calculée dans la structure (de 777 à 124).

L'épaisseur du complexe reste sensiblement la même, en revanche la couche de granulats apportés est nettement diminuée (figure 28).

▫ Voirie Cas 2 - voie de desserte - faible trafic

Trafic : T5 : MJA = 10 PL/j/sens/voie



- Figure 29 - structures de chaussée du cas 2 -

A - Structure de chaussée souple : BBSG /GNT

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

$$\epsilon_z = 777,8 \times 10^{-6} < \epsilon_{z,ad} = 1699 \times 10^{-6}$$

B - Structure avec CDF traitée/fondation (= couche de chaussée incluse dans le calcul)

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

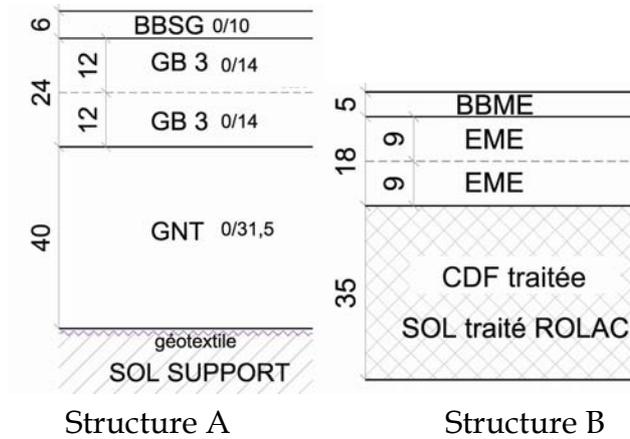
$$\begin{aligned} \epsilon_z &= 124,2 \times 10^{-6} < \epsilon_{z,ad} = 1457 \times 10^{-6} \\ \sigma_t &= 0,522 \text{ MPa} < \sigma_{t,ad} = 0,77 \text{ MPa} \end{aligned}$$

La contrainte de traction admissible du Cas 2, à la base de la couche du traitée, est inférieure à celle du Cas 1 car le trafic est deux fois plus important (de 5 PL à 10 PL).

Cependant, tout comme pour le Cas 1, la rigidité de la couche traitée induit une déformation du sol support inférieure à celle de la structure traditionnelle (figure 29).

▫ Voirie Cas 3 - voie de distribution - faible trafic

Trafic : T5 : MJA = 20 PL/j/sens/voie



- Figure 30 - structures de chaussée du cas 3 -

A - Structure de chaussée bitumineuse épaisse : BBSG /GB 3 /GNT

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= 187,6 \times 10^{-6} < \varepsilon_{z,ad} = 1275 \times 10^{-6} \\ \varepsilon_t &= 70,1 < \varepsilon_{t,ad} = 196 \end{aligned}$$

B - Structure mixte : BBSG /EME / CDF traitée

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

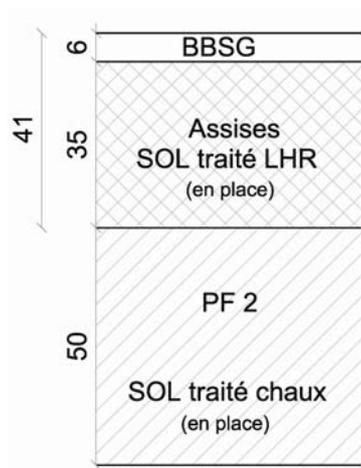
$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= 97,9 \times 10^{-6} < \varepsilon_{z,ad} = 1149 \times 10^{-6} \\ \varepsilon_t &= 13,6 < \varepsilon_{t,ad} = 154,3 \\ \sigma_t &= 0,208 \text{ MPa} < \sigma_{t,ad} = 0,287 \text{ MPa} \end{aligned}$$

La déformation de la couche bitumineuse est inférieure dans la structure B (sol traité) à celle de la structure A (figure 30).

La rigidité de la couche traitée permet de réduire les sollicitations du matériau bitumineux, tout en réduisant pourtant l'épaisseur.

▫ Voirie Cas 4 - voie de liaison - faible trafic - Structure semi-rigide

Trafic : TC1 : MJA = 25 PL/j/sens/voie

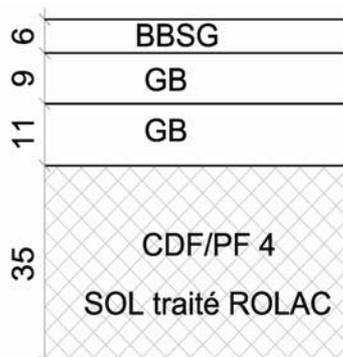


- Figure 31 - structure de chaussée du cas 4 -

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 0,390 \text{ MPa} < \sigma_{t,ad} = 0,439 \text{ MPa} \\ \varepsilon_z &= 231 \times 10^{-6} < \varepsilon_{z,ad} = 784 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

▫ Voirie Cas 5 - bretelle de raccordement d'autoroutes - trafic fort
 Structure de chaussée bitumineuse épaisse : BBSG /GB 4

Trafic : T0+ : MJA = 1 500 PL/j/sens/voie

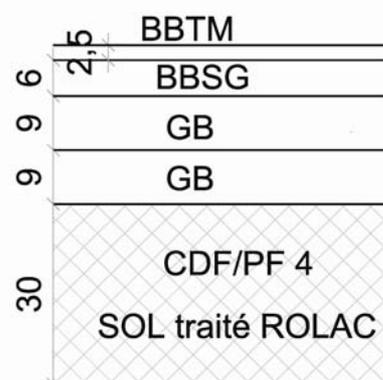


- Figure 32 - structure de chaussée du cas 5 -

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= 169,6 \times 10^{-6} < \varepsilon_{z,ad} = 328 \times 10^{-6} \\ \varepsilon_t &= 57,5 < \varepsilon_{t,ad} = 76,96 \end{aligned}$$

▫ Voirie Cas 6 - autoroute - trafic fort
 Structure de chaussée bitumineuse épaisse : BBTM / BBSG /GB 3



- Figure 33 - structures de chaussée du cas 6 -

Comparaison des valeurs calculées et des valeurs admissibles

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= 188 \times 10^{-6} < \varepsilon_{z,ad} = 328 \times 10^{-6} \\ \varepsilon_t &= 65 < \varepsilon_{t,ad} = 69,26 \end{aligned}$$

IV.1.2. Bilan structurel global et comparatif des cas entre eux

Les résultats des calculs de structure font l'objet d'un récapitulatif sous forme de tableau bien que les valeurs de sollicitations ne soit pas réellement comparables entre elles car les structures et les trafics surtout sont différents. Néanmoins la vision simultanée de leurs résultats présente un intérêt certain, notamment pour se rendre compte de l'apport de la couche traitée au sein de la structure et établir un bilan comparatif.

- Tableau LIV – Récapitulatifs des calculs de chaussée -

Cas	Matériaux assises	Trafic PL	N	CAM	NE	Sollicitations structure	Sollicitations admissible
Cas 1	GNT	5	30 445	0,4	12 178	$\epsilon_z = 777 \times 10^{-6}$	$\epsilon_{z,ad} = 1982 \times 10^{-6}$
	GNT-MTLH	5	30 445	0,8	24 356	$\epsilon_z = 124 \times 10^{-6}$ $\sigma_t = 0,522 \text{ MPa}$	$\epsilon_{z,ad} = 1699 \times 10^{-6}$ $\sigma_{t,ad} = 0,817 \text{ MPa}$
Cas 2	GNT	10	60 890	0,4	24 356	$\epsilon_z = 777 \times 10^{-6}$	$\epsilon_{z,ad} = 1699 \times 10^{-6}$
	GNT-MTLH	10	60 890	0,8	48 712	$\epsilon_z = 124 \times 10^{-6}$ $\sigma_t = 0,522 \text{ MPa}$	$\epsilon_{z,ad} = 1457 \times 10^{-6}$ $\sigma_{t,ad} = 0,77 \text{ MPa}$
Cas 3	GB 3 - GNT	20	177 370	0,5	88 685	$\epsilon_z = 187 \times 10^{-6}$ $\epsilon_t = 70,1$	$\epsilon_{z,ad} = 1275 \times 10^{-6}$ $\epsilon_{t,ad} = 196$
	EME - MTLH	20	177 370	0,8	141 896	$\epsilon_z = 97,7 \times 10^{-6}$ $\epsilon_t = 13,6$ $\sigma_t = 0,208 \text{ MPa}$	$\epsilon_{z,ad} = 1149 \times 10^{-6}$ $\epsilon_{t,ad} = 154$ $\sigma_{t,ad} = 0,287 \text{ MPa}$
Cas 4	MTLH	25	212 175	1	212 175	$\epsilon_z = 231 \times 10^{-6}$ $\sigma_t = 0,39 \text{ MPa}$	$\epsilon_{z,ad} = 784 \times 10^{-6}$ $\sigma_{t,ad} = 0,44 \text{ MPa}$
Cas 5	GB 4	1 500	10 962 914	0,8	8 770 331	$\epsilon_z = 169 \times 10^{-6}$ $\epsilon_t = 57,5$	$\epsilon_{z,ad} = 328 \times 10^{-6}$ $\epsilon_{t,ad} = 76,96$
Cas 6	GB 3	1 500	10 962 914	0,8	8 770 331	$\epsilon_z = 188 \times 10^{-6}$ $\epsilon_t = 65$	$\epsilon_{z,ad} = 328 \times 10^{-6}$ $\epsilon_{t,ad} = 69,226$

- Cas 1 - Cas 2

On remarquera que les calculs de structure du Cas 1 et Cas 2 sont identiques car d'une même configuration sous une même charge de référence, en revanche les calculs de sollicitations admissibles diffèrent à cause du trafic qui est volontairement pris différent pour distinguer l'usage de la voirie d'un lotissement de celle d'une voie de livraison et parking de zone

commerciale. Les valeurs admissibles diminuent avec l'augmentation du trafic.

On peut également constater pour ces deux cas que la valeur de la déformation du sol support lors du calcul de structure sous charge de référence est nettement diminuée par l'action protectrice de la couche traitée. En effet cette dernière absorbe une bonne partie de sollicitations issues de la charge.

- Cas 5 - Cas 6

D'autre part on connaît le lien entre les épaisseurs de couche de chaussée et le trafic.

Les Cas 5 et Cas 6 soulignent bien cette corrélation, car pour un même trafic, avec des épaisseurs sensiblement différentes (matériaux bitumineux d'assise ép. 20 cm pour Cas 5 et ép. 18 cm pour Cas 6), les déformations verticales à la base de la couche sont différentes. Certes il y a aussi une distinction, ou précision, sur le type de matériau employé, qui est un GB 4 pour le Cas 5 et GB 3 pour le Cas 6 qui signifie également une différence de résistance de la couche.

- Cas 3 - Cas 4

La valeur prise pour le coefficient d'agressivité moyen du trafic (CAM) est décisive au regard des sollicitations admissibles par les matériaux. Il existe bien sur, dans la norme NF P 98-086, ou les ouvrages d'aide au dimensionnement comme les manuels du SCETAUROUTE ou le guide de conception des structures du SETRA-LCPC, des valeurs de référence à utiliser selon l'importance du trafic (fort ou faible), le type de structure, et les matériaux de chaussée.

Pourtant il peut être volontairement choisi une valeur supérieure dans le but de démontrer les capacités d'usage de la chaussée. Il en est ainsi pour la chaussée du Cas 4 où la CAM est prise à 1 au lieu de 0,4 (valeur préconisée par le guide SETRA-LCPC de 1994) pour tous les matériaux d'une chaussée soumise à un trafic faible de classe T5, ou bien même 0,8 (valeurs proposées dans le catalogue de 1998) pour une structure semi-rigide, VRNS.

Certes le but même de ce coefficient est d'effectuer une pondération ou pas du trafic cumulé au moment de sa conversion en trafic équivalent (en nombre d'essieux de référence).

On remarque également que les valeurs admissibles obtenues pour la chaussée du Cas 3 sont supérieures, pour un trafic quasi similaire (20 PL pour le Cas 3 et 25 PL pour le Cas 4) et ce bien que la structure de chaussée soit différente.

IV.2. Calculs comparatifs des coûts

Un récapitulatif de calcul de coûts est présenté dans le tableau ci-dessous.

Les prix de base, sur lesquels s'appuie le calcul, sont des estimations grossières (dite "à la louche") des coûts engendrés par une option plutôt qu'une autre.

En effet, les diverses expériences de chantier déjà réalisés permettent d'évaluer l'économie faite sur le prix global des travaux, à l'aide du traitement de sol, à environ 20%.

- Tableau LV - Tableau comparatif des calculs des coûts - solution traditionnelle et solution traitement -

	Surfaces (m ²)	Volume (m ³) ép. 35 cm	solution GNT 31€/m ³	traitement 23€/m ³
CAS 1	1 500,00	525,00	16 275,00	12 075,00
CAS 2	12 000,00	4 200,00	130 200,00	96 600,00
CAS 3	3 000,00	1 050,00	32 550,00	24 150,00
CAS 4		0,00	0,00	0,00
CAS 5	120 000,00	42 000,00	1 302 000,00	966 000,00
CAS 6	750 000,00	262 500,00	8 137 500,00	6 037 500,00

L'économie réalisée par le traitement se traduit également par la réduction des épaisseurs des couches de chaussée. En effet quelques centimètres de matériau bitumineux (3 à 4 cm) en moins suffisent à faire une économie, d'autant plus substantielle que le linéaire de la voie est important, au niveau du coût global (voir détails de calcul de coût en Annexe 13).

Le traitement permet de réduire voir d'éliminer l'apport de granulats de carrières présentant un coût de transport, alors que les matériaux réutilisés sont sur place, ceux du site.

IV.3. Synthèse comparative des traitements

Afin de voir plus clairement les différences de performances obtenues par chaque traitement de chacun des cas, les données sont présentées dans un tableau récapitulatif ci-dessous.

- Tableau LVI – Récapitulatifs des traitements -

Cas	sol	Produit et dosage	Couche traitée et épaisseur	EV2 / déflexion ou PF
Cas 1	A ₁	4% Rolac	CDF/fondation	-
Cas 2	B ₅	4% Rolac	CDF/fondation	150 MPa
Cas 3	A ₂	4% Rolac	CDF/fondation	140 MPa
Cas 4	A ₂	LSR	Assise	PF2
Cas 5	A ₁	5% Rolac	CDF/PF	PF4
Cas 6	A ₁ / A ₂ B ₅	5,5 % Rolac (+ 1% chaux) 5% Rolac	CDF/PF	déflexion < 20/100 ^e mm PF4

Le traitement des sols des Cas 1, Cas 2 et Cas 3 sont sensiblement identiques car ils sont traités avec le même dosage de produit sur une même épaisseur ; La couche de forme (CDF) traitée est ensuite incluse dans le calcul de la structure de chaussée car il s'agit de petites voiries.

On remarque que le produit et son dosage sont les mêmes quelque soit le sol : A₁, A₂, et B₅.

Ces sols sont de nature limono sableuse argileuse et se traitent donc facilement au liant hydraulique routier (LHR) qu'est le Rolac 645 S PN.

Ces traitements ont permis de gagner en portance et de limiter l'apport de graves non traitées (GNT), produits de carrière couteux. Les sols ne pouvaient être utilisés en état sans la réalisation d'un matelas offrant résistance mécanique, mais aussi protection au gel.

L'avantage du traitement est bien sur l'utilisation des matériaux du site mais également l'élévation des performances mécaniques.

Le traitement des sols, des Cas 5 et Cas 6, a pour but de constituer un support suffisant pour recevoir la chaussée d'autoroute. Il s'agit de traitement en centrale permettant d'obtenir une PF4 de qualité. Le traitement en centrale garantit en effet une certaine homogénéité du mélange sol + liant, et offre une qualité de portance sans dispersion des propriétés mécaniques de la couche traitée. L'homogénéité des caractéristiques du support est un fait important pour les chaussées d'autoroute car elle favorise l'uni final bien qu'il soit également rendu par les couches de roulement et d'assise, bitumineuses dans ces cas.

Le Cas 4 reste en marge des autres car il s'agit du traitement de la couche d'assise de la chaussée. Cependant il offrait un bon exemple de comparaison avec les Cas 1 et Cas 2 dont la CDF est considéré comme une couche de fondation.

D'ailleurs, dans ces Cas 1 et Cas 2, la couche de GNT est là pour éviter la remontée des fissures, comme c'est le cas dans une structure inverse. En effet le travail en traction de la couche traitée au liant hydraulique peut provoquer des fissurations qui, les couches étant collées entre elles (hypothèse de calcul notamment), remontent vers la surface et induisent un faïençage ou des lézardes de la couche bitumineuse de roulement.

Les manuels de conception de chaussée disent d'ailleurs qu'une couche de GNT n'est pas dimensionnante. Seule l'épaisseur permet la dispersion de la pression due au chargement.

Par extrapolation des résultats de ces cas étudiés, on peut déduire que le ROLAC est un produit qui convient à différents sols de type limono sableux argileux (A₁, A₂, et B₅). Pour un dosage à 4% la performance de portance obtenue, par un traitement en place, est environ 140 à 150 MPa, soit une PF3.

Pour un dosage de 5 à 5,5 %, la portance est de type PF4, pour un traitement en centrale, soit plus de 200 MPa.

CONCLUSION

Le traitement de sol est une technique d'amélioration des matériaux pour les rendre aptes à l'usage.

Traiter un sol c'est le mélanger intimement avec un produit, comme la chaux ou un liant hydraulique, afin de lui conférer des propriétés mécaniques de qualité supérieure. De nombreux matériaux à priori non utilisables peuvent être améliorés et éviter ainsi de substituer aux terrains en place un matériau noble d'apport devenant rare.

Appliquée successivement à différents niveaux du projet de terrassement dans le cadre de travaux de voirie (tout d'abord les remblais constituant la partie supérieure des terrassements, ensuite la couche de forme, puis les couches d'assises de chaussée) la technique du traitement de sol évolue et se perfectionne au fil du temps et des expériences de chantier.

Son application aux matériaux de sols pour constituer la couche de forme, plateforme support de chaussée, comporte de nombreux avantages, notamment par rapport aux structures dites traditionnelles en graves non traités.

En effet, les matériaux traités présentent des performances structurelles largement supérieures à celle des matériaux granulaires traditionnellement utilisés dans la réalisation des couches de forme.

Nous avons vu précédemment que la déformation du sol est moins importante dès lors que l'on introduit dans la structure une couche de matériaux traités conférant une certaine rigidité à l'ensemble de la chaussée. Les Cas 1 et 2 illustrent bien ce fait car la valeur calculée de cette déformation verticale est nettement inférieure à celle décrite par le cas de la structure B comportant un sol traité.

Une contrainte de traction est certes générée au sein de la couche traitée par sa solidification due à l'action de prise du liant. Cependant le durcissement a pour effet une croissance de la résistance mécanique du matériau, tout comme le montrent les essais de l'étude de formulation. L'étude du traitement du Cas 6, par exemple, comporte un tableau récapitulatif des caractéristiques mécaniques des matériaux traités, pris à différents âges, grâce auquel nous pouvons constater une augmentation effective de la valeur du module E.

La rigidité de la couche induit une répartition différente des sollicitations dans la structure de chaussée. Les résultats des calculs du Cas 3, déformations et contraintes dans la structure sous une charge de référence, soulignent le transfert de charges s'opérant entre les couches. Les valeurs de la déformation verticale du sol support et de la déformation transversale de la couche bitumineuse d'assise sont diminuées d'au moins 50%.

La déformation de la couche bitumineuse est inférieure dans la structure B (structure mixte avec sol traité) à celle de la structure A (structure bitumineuse épaisse). La rigidité de la couche traitée permet de réduire les sollicitations du matériau bitumineux.

Cette augmentation des caractéristiques mécaniques est une optimisation certaine du dimensionnement de chaussée car elle permet également de réduire les couches qui composent la structure de celle-ci et donc de réaliser une économie sur le coût général du projet.

Nous avons également vu que l'économie réalisée sur les coûts globaux du traitement du sol est d'environ 20%.

Sur le plan financier la technique du traitement de sol permet donc de réduire les coûts de fourniture en matériaux nécessaires au projet de terrassement et de supprimer les coûts indirects liés au transport que ce soit pour évacuer les déblais non utilisés ou pour apporter d'autres matériaux provenant de carrières.

Par ailleurs la technique s'inscrit clairement dans la démarche de Développement Durable, car le traitement de sol permet de promouvoir les matériaux du site en limitant l'apport des granulats nobles de carrières et ainsi de préserver les ressources naturelles.

Du point de vue environnemental, l'utilisation du traitement devrait donc être généralisée par les maîtres d'ouvrage. Car, comme l'énonce clairement l'article L110 du Code de l'Urbanisme, " Le territoire français est le patrimoine commun de la nation. Chaque collectivité publique en est le gestionnaire et le garant dans le cadre de ses compétences. "

Des études sont d'ailleurs en cours pour améliorer les conditions de réalisation et ajuster les produits de traitement aux performances recherchées afin d'élargir le champ d'utilisation de la technique.

Nous avons vu l'efficacité des liants hydrauliques routiers pour la réalisation de couches de forme en réemployant les matériaux du site.

Le traitement à la chaux ne constitue pas une augmentation suffisante de la portance pour être utilisé seul pour la couche de forme, cependant l'usage de la chaux convient bien pour stabiliser les remblais. Son action principale est de faire chuter la teneur en eau des terrains argileux ou trop humides, mais elle est aussi peut apporter une amélioration suffisante des performances mécaniques pour la partie supérieure des terrassements ou la partie basse des talus.

D'autres produits de traitement confèrent des propriétés intéressantes. La bentonite, par exemple, permet de réaliser une couche étanche car en présence d'eau, elle gonfle et remplit les vides contenus dans le matériau compacté ; elle réduit ainsi la porosité et abaisse la perméabilité.

Au regard de ses possibilités d'emplois et de performances, il y a donc un grand intérêt à considérer le traitement comme une technique remarquablement efficace qui n'a pas fini d'évoluer et de se perfectionner. Son attrait pour les professionnels ne devrait pas fléchir de si tôt.

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1 : Classification des matériaux : tableau synoptique et sous-classes
- ANNEXE 2 : Récapitulatif des essais et des normes
- ANNEXE 3 : Essais relatifs au terrassement et au traitement de sol
- ANNEXE 4 : Fiche produit ROLAC 645 S PN
- ANNEXE 5 : Propriétés des matériaux pour le dimensionnement
- ANNEXE 6 : Règles de classement des sols – manuel SCETAUROUTE
- ANNEXE 7 : Documents relatifs à la géologie
- ANNEXE 8 : Listes des documents fournis par les entreprises
- ANNEXE 9 : Documents relatifs au Cas 2 : résultats des investigations
- ANNEXE 10 : Documents relatifs au Cas 6 : résultats des essais
- ANNEXE 11 : Fiches récapitulatives du traitement de sol de chaque cas
- ANNEXE 12 : Calculs de structure de chaussées de chaque cas
- ANNEXE 13 : Calculs des couts den fonction des prix unitaire DPGF

BIBLIOGRAPHIE

■ Traitement de sol :

- Publications du SETRA/LCPC pour le Ministère de l'équipement, des transports et du logement

- *GTR : Réalisation des remblais et des couches de forme*
septembre 1992, actualisé 2000
- *GTS : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques / Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*

- Notes d'information du SETRA :

(accessibles par Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>)

- N°5, Janvier 2002. *Terrassements : remblais et couches de forme*, CFTR
- N°6, Janvier 2002. *Le traitement des sols*, CFTR
- N°38, Février 1988. *Valorisation des produits de scalpage*, SETRA/CFTR/CETE
- N°59, Juillet 1990. *Le traitement des sols à la chaux et(ou) aux ciments*, DTCES/CETE
- N°119, Mai 2009. *Chantier de traitement de sols en place*, SETRA/LCPC/DREIF/CETE

- Dossier du magazine "Routes" :

- *Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de formes*
N°89, Septembre 2004, p.7-14, rubrique : Documentation technique
- *Traitement en place au liant hydraulique routier, Ille-et-Vilaine*
N°98, Décembre 2006, p12-13, rubrique : Chantier
- *Un traitement de sol en place au ciment pour la déviation de Plombières-les-bains, VOSGES*
N°100, Juin 2007, p.15, rubrique : Chantier
- *Traitement au ciment - déviation de la RD 104, Lachapelle-sous-Aubens, ARDECHE*
N°102, Décembre 2007, p.18-19, rubrique : Chantier
- *Traitement des sols au liant hydraulique routier - rocade sud-est Troyes, AUBE*
N°103, Mars 2008, p.20-21, rubrique : Chantier

- Autres :

- *Traitement des sols aux liants hydrauliques*
CIM Béton, Centre d'information sur le ciment et ses applications, Novembre 2009.
Collection technique, Terrassements et assises de chaussées (148p)

▪ Thèses :

- *Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols*
Tangi LE BORGNE, janvier 2010, INPL de Nancy
- *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation*
Nicolas CABANE, décembre 2004, Ecole des Mines d'Alès

■ Dimensionnement des chaussées :

- *Abaques Bicouches ALIZE 3*
C. PEYRONNE, A. DE BOISSOUDY, C. MASSONPIERRE
1975, LCPC et Ministère de l'Équipement
- *Catalogue des structures type de chaussées neuves*
Publications du SETRA/LCPC pour le Ministère de l'équipement, des transports et du logement, 1998
- *Chaussées neuves à faible trafic*, Manuel de conception, juillet 1981, réimpression janvier 1991. DRCR, Direction des routes et de la circulation routière.
- *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*
Guide Technique, Publications du SETRA/LCPC pour le Ministère de l'équipement, des transports et du logement, décembre 1994
- *Dimensionnement structurel des chaussées routières*,
Norme française NF P 98-086, Octobre 2011, AFNOR
- *Dimensionnement des chaussées*, C. PEYRONNE, G. CAROFF, J. GILBERT, sous la coordination de J. BONNOT, et J-C CHANTEREAU, sous la direction de G. JEUFFROY et R. SAUTEREY, 1991. cours de routes, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées (244p.)
- *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes*
G. CAROFF, E. LAYERLE, H. LE CAIGNEC, A. SPERNOL
SCETAUROUTE, 1997
- *Manuel de conception des plateformes autoroutières*
G. CAROFF, Y. CASAN, T. GOSSELIN, C. GUYONNET, F. JULLEMIER, P. MOSSON, JF. NOLOT, JP. PUECH, N. RIVIERE, A. SPERNOL
SCETAUROUTE, 1998
- *Routes*
FAURE M., 2003. Collection : les cours de l'ENTPE, édition ALEAS, LYON
Tome 1 (258p.) et Tome 2 (255p.)

■ Mécanique des sols :

- *Eléments de mécanique des sols*
François SCHLOSSER
2003, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées
- *Mécanique des sols*
J. VERDEYEN, V. ROISIN, J. NUYENS
1968 Presse universitaire de Bruxelles, édition DUNOD

■ Géologie de l'Hérault :

- *La géologie de l'Hérault*
Jean-Claude BOUSQUET
Edition Les écologistes de Leuzière
- *Géologie du Languedoc Roussillon*
Jean-Claude BOUSQUET et Gabriel VIGNARD
1997, Presse du Languedoc Roussillon, édition BRGM
- *Les fondements du paysage de l'Hérault : la géologie*
site Internet de la DIREN Languedoc Roussillon

LISTE DES FIGURES

- **Figure 1** : Coupe type d'une structure de chaussée - d'après le cours de Routes GGC 234 de M.VANISCOTE
- **Figure 2** : Etats de consistance d'un sol
- **Figure 3** : Courbe Proctor
- **Figure 4** : Zone de classe mécanique de CDF selon Rt et E, Manuel SCETAUROUTE
- **Figure 5** : Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol (*CIM Béton*)
- **Figure 6** : Logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager (*figure C1-2 du GTS, p.102*)
- **Figure 7** : Types de chaussées et mode de fonctionnement
- **Figure 8** : Chaussée souple
- **Figure 9** : Chaussée semi-rigide
- **Figure 10** : Représentation schématique de la structure de chaussée de l'exemple 2
- **Figure 11** : Carte géologique de l'Hérault
- **Figure 12** : Plan de situation des six cas d'étude - extrait de carte IGN
- **Figure 13** : Abeilhan - extrait de la feuille géologique de Pézenas - Cas 1
- **Figure 14** : Plan de masse du projet de lotissement - Cas 1
- **Figure 15** : Courbes Proctor du sol - Cas 1
- **Figure 16** : Colombiers - extrait de la feuille géologique de Béziers - Cas 2
- **Figure 17** : Plan d'implantation des sondages du projet de zone commerciale - Cas 2
- **Figure 18** : ZAC Bastit - extrait de la feuille géologique d'Agde - Cas 3
- **Figure 19** : Caux - extrait de la feuille géologique de Pézenas - Cas 4

- **Figure 20** : Raccordement A75 et A9 - extrait de la feuille géologique d'Agde - Cas 5
- **Figure 21** : Bassin miocène - extrait de la feuille géologique de Pézenas - Cas 6
- **Figure 22** : Coupe schématique des formations - extrait au niveau de Valros - Cas 6
- **Figure 23** : Valros - extrait de la feuille de Pézenas - Cas 6
- **Figure 24** : Plan de repérage des profondeurs d'exploitations du gisement - Cas 6
- **Figure 25** : Plan de repérage des matériaux de CDF - profondeur 0,50 m à 4,00 m - Cas 6
- **Figure 26** : Profil en long géotechnique - Cas 6
- **Figure 27** : Graphique des mesures de déflexion prise avec la poutre Benkelman - Cas 6
- **Figure 28** : structures de chaussée du cas 1
- **Figure 29** : structures de chaussée du cas 2
- **Figure 30** : structures de chaussée du cas 3
- **Figure 31** : structure de chaussée du cas 4
- **Figure 32** : structure de chaussée du cas 5
- **Figure 33** : structure de chaussée du cas 6

LISTE DES TABLEAUX

- **Tableau I** : Classes principales du GTR
- **Tableau II** : Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour l'emploi en CDF (*tableau VII du fascicule 1 du GTR, p.60*)
- **Tableau III** : Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour l'emploi en CDF (*tableau VII du fascicule 1 du GTR, p.60*)
- **Tableau IV** : Tableau des modules de calcul descriptifs du sol support (*tableau XI du fascicule 1 du GTR, p.68*)
- **Tableau V** : Tableau des modules de calcul de la PF support de chaussée (*tableau XII du fascicule 1 du GTR, p.69*)
- **Tableau VI** : Classe de PF en fonction du cas de CDF
- **Tableau VII** : Classe mécanique du matériau traité, GTS (*tableau C1-X du GTS, p.109*)
- **Tableau VIII** : Classe de PF selon la classe d'AR, la classe du matériau et l'épaisseur de CDF (*tableau C1-XI du GTS, p.110*)
- **Tableau IX** : Récapitulatif des actions des liants
- **Tableau X** : Valeurs de référence pour qualifier l'aptitude d'un sol au traitement, GTS (*tableau C1-IV du GTS, p.97*)
- **Tableau XI** : Modalités de traitement envisageables pour les chantiers de faible importance (*tableau C1-V du GTS, p.99*)
- **Tableau XII** : classes de trafic
- **Tableau XIII** : coefficient d'agressivité selon le trafic et le type de chaussée
- **Tableau XIV** : Risques de calcul retenus à 20 ans - GT chaussées 1994
- **Tableau XV** : Portance à long terme de la PF
- **Tableau XV** : Conditions aux interfaces des couches non collées
- **Tableau XV** : Valeurs du module d'Young des couches de GNT

- **Tableau XVI** : Caractéristiques mécaniques des Graves traités au LH
- **Tableau XVI** : Caractéristiques mécaniques des sables traités au LH
- **Tableau XVII** : Caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrocarbonés
- **Tableau XVIII** : Caractéristiques mécaniques des bétons de ciment
- **Tableau XIX** : Coefficient de calage
- **Tableau XX** : Coefficient de plateforme
- **Tableau XXI** : Coefficient de discontinuité
- **Tableau XXII** : valeurs des coefficients An
- **Tableau XXIII** : Valeur de selon la pente de l'essai de gonflement
- **Tableau XXIV** : Coefficients a et b pour le calcul IS
- **Tableau XXV** : Classes de trafic autoroutier
- **Tableau XXVI** : CAM et durée de service selon le type de chaussée
- **Tableau XXVII** : Classement des AR en fonction PST
- **Tableau XXVIII** : Classement des AR en fonction CBR
- **Tableau XXIX** : Critères de réception et caractérisation des AR
- **Tableau XXX** : Critères de réception des PF - CDF non traitée
- **Tableau XXXI** : Critères de réception des PF - CDF traitée
- **Tableau XXXII** : Classe de PF - CDF non traitée
- **Tableau XXXIII** : Classe de PF et épaisseurs - CDF traitée
- **Tableau XXXIV** : Classes de trafic de chantier
- **Tableau XXXV** : Classes de portance du sol support

- **Tableau XXXVI** : Plage de portance indicative à court terme des sols supports non améliorés
- **Tableau XXXVII** : Plage de portance indicative à court terme des les sols supports traités à la chaux
- **Tableau XXXVIII** - Plage de portance indicative à court terme des sols supports traitées aux LH
- **Tableau XXXIX** : Objectifs de qualité sur la PST
- **Tableau XL** : Objectifs de qualité sur la CDF
- **Tableau XLI** : Caractéristiques du traitement de l'exemple 1
- **Tableau XLII** : Caractéristiques du traitement de l'exemple 2
- **Tableau XLIII** : Caractéristiques du traitement de l'exemple 3
- **Tableau XLIV** : Caractéristiques du traitement de l'exemple 4
- **Tableau XLV** : Récapitulatifs des caractéristiques de traitement des exemples
- **Tableau XLVI** : Modalités de compactage pour un sol B₅ utilisé en remblai, GTR- Cas 2
- **Tableau XLVII** : Critères limitatifs selon le type de sol concerné, GTS Assise - Cas 4
- **Tableau XLVIII** : Références de compactage déterminées par l'étude de traitement - Cas 5
- **Tableau XLIX** : Résultats des essais d'aptitude du sol au traitement - Cas 5
- **Tableau L** : Performances mécaniques de chaque type de traitement - Cas 5
- **Tableau LI** : Identification des matériaux du site par sondage - Cas 6
- **Tableau LII** : Paramètres d'identifications des matériaux - Cas 6
- **Tableau LIII** : Caractéristiques des matériaux traités - Cas 6
- **Tableau LIV** : Récapitulatifs des calculs de chaussée

- **Tableau LV** : Tableau comparatif des calculs des coûts - solution traditionnelle et solution traitement
- **Tableau LVI** : Récapitulatifs des traitements

LE TRAITEMENT DE SOL DE LA COUCHE DE FORME, PLATEFORME DE CHAUSSEE

Application à des projets de terrassement dans le département de l'Hérault

RESUME

Le traitement de sol est une technique complète car elle apporte une efficacité d'exécution, une optimisation des performances mécaniques, une valorisation des ressources naturelles, et enfin une économie de coût. Son usage présente un intérêt certain pour la couche de forme (CDF).

Les projets présentés sont des travaux de terrassement pour voirie dans le département de l'Hérault, il s'agit de l'autoroute A75, de son raccordement à l'A9, et de plusieurs voies de desserte.

Après avoir défini les bases nombreuses sur lesquelles s'appuie l'étude, que sont les paramètres géotechniques, le traitement, la chaussée et son dimensionnement, quelques exemples de l'efficacité du traitement de sol sont exposés avant de passer à l'analyse détaillée des cas.

Chaque cas est ensuite présenté par son contexte géologique puis l'étude de formulation, le calcul de structure et enfin les coûts. Une synthèse comparative des résultats clôt l'analyse et permet d'extrapoler des recommandations d'usage pour le traitement de la couche de forme. Cette synthèse a pour but de démontrer les avantages techniques et financiers du traitement de sol, ainsi que son apport environnemental avec la notion de Développement Durable.

Mots clés : Traitement de sol - Couche de forme - Dimensionnement de chaussée - Rolac

ABSTRACT

The soil treatment is a whole technique because it enables an effectiveness of execution, an optimization of long-term mechanicals properties, upgraded value of natural resources, and so a cost economy. The projects presented are embankments for road foundation in Hérault department: the highway A75, its link to the A9, and few other smallest roads.

Afterwards set up the key references of analysis, like geotechnical properties, treatment method, structural road design, some examples are picked out just before explanation of detailed case study.

Each case is following described by its own geology, then with dosing formulation study, calculation of road structure and cost price. A comparative compilation of results ends the analysis and a purpose of use advices is made upon treated form layer involving ground improvement. The technical and financial advantages are demonstrated by this synthesis, to finish in a finding on Sustainable Development advantage.

Key words : Soil treatment - Form layer of road structure - Structural road design - Rolac