

Caractérisation des matériaux constitutifs de plate-forme ferroviaire ancienne

V.-N. TRINH^{1, 2}
A.-M. TANG¹
Y.-J. CUI¹
J. CANOU¹
J.-C. DUPLA¹
N. CALON²
L. LAMBERT²
A. ROBINET²
O. SCHOEN³

¹ École des Ponts ParisTech
UR Navier/CERMES
6-8, avenue Blaise-Pascal
Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée
Cedex 2

² SNCF
Direction de l'ingénierie
6, avenue
François-Mitterrand
93574 La Plaine Saint-Denis

³ Réseau Ferré de France
92, avenue de France
75013 Paris

Résumé

Afin de mieux comprendre la structure d'une plate-forme ancienne et surtout celle de la couche intermédiaire qui s'est créée principalement par l'interpénétration du ballast et du sol support sous l'action des trains, les matériaux constitutifs d'une plate-forme ferroviaire ancienne se trouvant à Sénissiat (à côté de Lyon) ont été caractérisés en laboratoire. Les limites d'Atterberg, la valeur de bleu de méthylène et la minéralogie ont été déterminées sur les fines, alors qu'en revanche, les analyses granulométriques ont couvert tous les éléments de différentes dimensions tant pour le sol intermédiaire que pour le sol support. Les résultats montrent que le sol intermédiaire est un sol hétérogène très compact constitué de gros éléments et également de fines venant du sol support. Les propriétés de compactage au Proctor modifié du sol intermédiaire sont également étudiées en travaillant sur la portion après l'écrêtage à 20 mm. Les corrections nécessaires ont été effectuées pour prendre en compte l'effet des gros éléments. On a remarqué que la densité sèche maximale obtenue au laboratoire ($2,28 \text{ Mg/m}^3$) est légèrement inférieure à celle mesurée en place ($2,39 \text{ Mg/m}^3$), ce qui montre les difficultés liées à la préparation d'échantillons représentatifs en laboratoire par compactage.

Mots-clés : plate-forme ferroviaire, sol intermédiaire, sol support, granulométrie, gros éléments, compactage.

Characterisation of constitutive materials of old railway platform

Abstract

In order to better understand the structure of an old platform and especially the structure of the intermediate layer that was created mainly by interpenetration of subgrade under trains action, the constitutive materials of an old railway platform situated in Sénissiat (near Lyon) were characterised in laboratory. The Atterberg limits, methylene blue value and mineralogy were determined on the fine-grained portion, whereas analysis of the pore size distribution covered the whole grain elements of different dimensions for both the intermediate soil and the soil subgrade. The results show that the intermediate soil corresponds to a heterogeneous material that is very compact and constituted of large grain elements and of fine grains from subgrade. The compaction properties of intermediate soil under Modified Proctor energy was also studied using the portion after clipped to 20 mm. The required corrections were made to account for the effect of large grain elements. It was observed that the maximum dry density obtained in laboratory (2.28 Mg/m^3) is slightly lower than that measured in field condition (2.39 Mg/m^3), showing the difficulties related to the preparation of representative soil samples in laboratory by compaction.

Key words: railway platform, intermediate soil, subgrade, pore size distribution, large grain elements, compaction.

Introduction

La structure d'assise des voies anciennes en exploitation est constituée d'une couche de ballast, d'une éventuelle couche de ballast pollué (contenant des fines d'attrition du ballast et des fines provenant du sol support) et d'une couche de matériaux appelée « couche intermédiaire, CI » (Fig. 1). Cette dernière forme une couche hétérogène qui s'est créée depuis l'édification de la ligne sous l'action des trains par l'interpénétration du sol support, des éventuelles couches de matériaux rapportés lors de la construction de la ligne ou lors de son entretien (ballast, pierres cassées, graviers, sables, etc.) et de produits divers (scories, produits d'usure, etc.). La densification au cours du temps et la nature géologique des terrains rencontrés confèrent une grande hétérogénéité à cette structure. Actuellement, le réseau exploité en France compte 29 175 km de voies anciennes dites « ligne classique » circulant jusqu'à 220 km/h. Si le défaut de drainage reste une cause essentielle des dégradations de plate-forme, l'expérience montre que, dans certaines conditions, l'absence de drainage n'a pas porté préjudice au comportement de la voie.

Depuis la fin des années 1970 et les études de conception de la première ligne à grande vitesse (Paris-Lyon), la société nationale des chemins de fer (SNCF) a intégré et défini, dans ses référentiels, la notion de structure d'assise ferroviaire (ballast et sous couche) (Fig. 2). Ainsi la sous-couche est définie comme étant une couche de matériaux granulaires bien gradués, insensible à l'eau, intercalée entre le ballast et la plate-forme de terrassement, sur une épaisseur comprise entre 0,15 m et 0,55 m. Lors de la mise en œuvre de la sous-couche, son compactage doit permettre d'obtenir un niveau de compactage équivalent à q_1 soit 100 % de l'Optimum Proctor modifié (OPM).

La couche intermédiaire des voies anciennes (Fig. 1), comme la sous-couche des voies nouvelles (Fig. 2), a pour fonction : a) d'assurer, en complément du ballast, la répartition des charges transmises au niveau de la plate-forme ; b) d'assurer la transition granulométrique entre le ballast et la plate-forme ; c) de protéger la plate-forme du ruissellement des eaux de pluie qui s'infiltrent relativement vite à travers le ballast ; d) de protéger la plate-forme du gel. La compréhension des phénomènes d'interactions entre l'eau et les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs de la couche intermédiaire permettra de définir

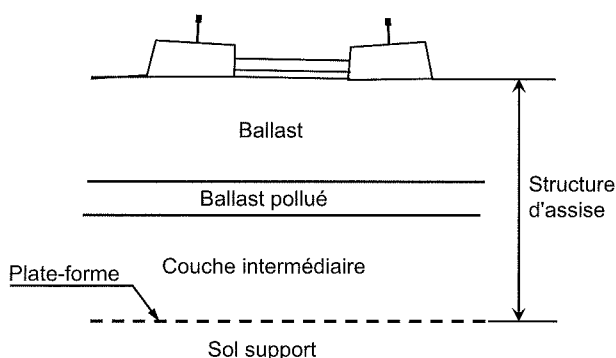


FIG. 1 Structure classique (SNCF, 1996a).
Classical structure (SNCF, 1996a).

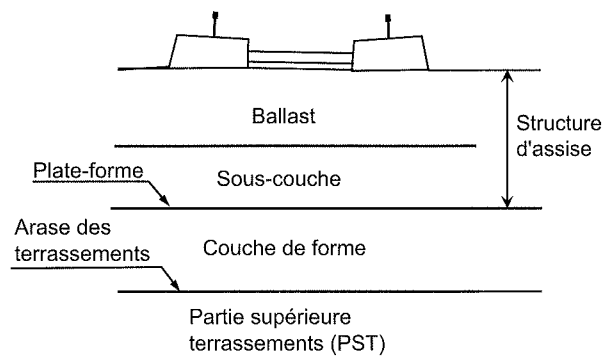


FIG. 2 Voie nouvelle : structure avec couche de forme normale (SNCF, 2006).
New railway : structure with a normal shape layer (SNCF, 2006).

in fine des recommandations quant à la nécessité de mettre en place ou non des dispositifs de drainage, tout en conservant les caractéristiques mécaniques et de séparation identiques à une sous-couche classique, mais permettant l'infiltration des eaux zénithales dans le sol support.

En général, les investigations géotechniques sont réalisées soit par des essais en place, soit par des essais en laboratoire. Pourtant, dans le cas du sol intermédiaire qui est un sol grossier hétérogène, les essais en place standard ne sont pas applicables ; les travaux de caractérisation des sols hétérogènes en place sont rares et nécessitent des équipements spécifiques (Xu *et al.*, 2007). Dans la plupart des cas, les sols hétérogènes sont prélevés et reconstitués au laboratoire par compactage afin de réaliser les essais mécaniques ou hydrauliques (Reiffsteck *et al.*, 2007 ; Dupla *et al.*, 2007 ; Ekblad et Isacson, 2007 ; 2008 ; Radampola *et al.*, 2008). Pourtant, ces travaux sont souvent réalisés sur les sols utilisés dans des remblais ou des travaux routiers. Concernant les travaux de recherche sur les plates-formes ferroviaires, en plus des recherches sur le sol support soumis au chargement dû à la circulation des trains (Li et Selig, 1998a, b ; Okada et Ghataora, 2002 ; Choudhury *et al.*, 2008 ; Indraratna *et al.*, 2006), d'autres phénomènes spécifiques ont été étudiés : a) la remontée du sol support dans les couches supérieures (Alobaidi et Hoare, 1996 ; Kabir *et al.*, 2006 ; Haque *et al.*, 2007 ; Kamruzzaman *et al.*, 2008 ; Indraratna *et al.*, 2007) ; b) le développement de la surpression interstitielle à la surface entre le sol support et la sous-couche (Alobaidi et Hoare, 1996). Les travaux sur les caractéristiques hydromécaniques des sols intermédiaires des plates-formes anciennes restent rares.

Dans le présent travail, les matériaux constitutifs de la plate-forme d'une voie ancienne se trouvant à Sénisiat (nord-ouest de Lyon, France) sont étudiés. En plus des essais sur les fines (limites d'Atterberg, valeur de bleu de méthylène, composition minéralogique), des analyses granulométriques ont été réalisées. Ensuite, la densité du sol intermédiaire est analysée. Les résultats obtenus donnent des éléments de base pour les études approfondies prévues dans le futur pour étudier le comportement hydromécanique de la structure d'assise des voies anciennes en exploitation. Ces travaux font partie du projet de recherche « Plate-forme sans drainage-structure perméable » qui a pour objectif d'élaborer des recommandations afin de répondre à la problématique du drainage des plates-formes anciennes lors de travaux de modernisation.

Description du site et prélèvement du matériau

En préambule à cette recherche, une étude a été menée en 2007, par la division hydraulique de la direction de l'ingénierie SNCF, sur un échantillon de lignes réparties sur l'ensemble du territoire français et sélectionnées selon les critères suivants :

- groupes UIC (fonction de l'importance et du type de trafic) ;
- nature géologique du sol support ;
- diversité des pluviométries moyennes annuelles ;
- représentativité du réseau ferré français (hors ligne à faible trafic).

Ainsi sur un échantillon constitué de 16 lignes (soit 1 280 km), il a été recensé 520 km de linéaire en déblai (soit 40,6 %) dont 11 km sont *a priori* sans drainage. Cela représente 2,1 % du linéaire et concerne 52 sites. L'étude montre que la majorité des sites répertoriés se trouvent sur des terrains calcaires ou alluvionnaires (Fig. 3).

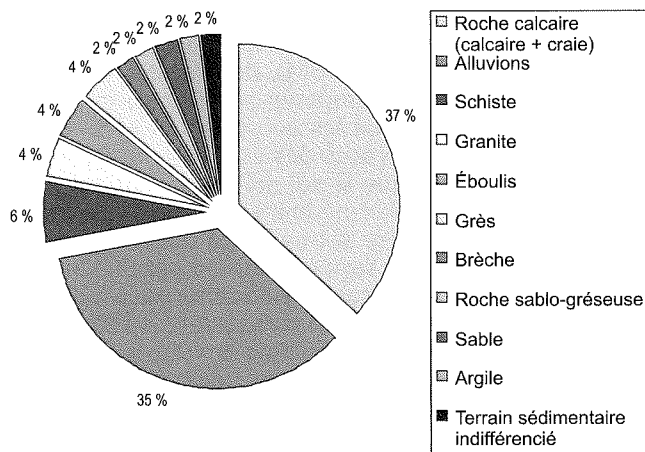


FIG. 3 Représentation des déblais non drainés en fonction du type de sol support.
Representation of undrained cuts as a function of subgrade soil type.

L'exploitation de ces résultats a permis d'extraire une liste de sites potentiellement intéressants pour le prélèvement de matériaux de couche intermédiaire. Les caractéristiques de ces sites sont : i) plate-forme en déblai des deux côtés de la voie, et ii) absence de drainage sur une longueur supérieure à 200 m. Ces résultats ont permis de détecter sept sites qui ont, alors, fait l'objet de visites terrain permettant de mieux préciser leurs caractéristiques (géométrie du déblai, nature géologique, etc.). Le déblai de Sénissiat, situé au kilomètre 13 + 780 de la ligne Bourg-en-Bresse à Bellegarde a été sélectionné finalement pour des facilités de réalisation de prélèvement (accessibilité, absence de circulation, etc.).

Le site étant en travaux, la partie supérieure de la structure d'assise (couches de ballast et ballast pollué) de la voie ancienne a été enlevée. Le schéma décrivant les prélèvements réalisés est présenté sur la figure 4. Le premier prélèvement a été réalisé jusqu'à 0,5 m de profondeur sous l'arase de plate-forme (Ap). La photo (Fig. 5) a été réalisée après les prélèvements 1 et 2 (Fig. 4). Celle-ci montre une interface très nette à 0,5 m de profondeur qui sépare la couche supérieure (brune noirâtre) du sol support (brun de nature argileuse). Une autre interface moins visible existe à la profondeur de 0,3 m. Elle sépare la couche supérieure (noirâtre) de la couche inférieure (brune noirâtre) contenant des galets roulés. La structure d'assise, sous l'arase de la plate-forme du site de Sénissiat, a été alors représentée par les trois couches suivantes :

- une couche intermédiaire (CI) de 0,3 m d'épaisseur ;
- une couche de transition (CT) de 0,2 m d'épaisseur ;
- le sol support (SS).

Le premier prélèvement concerne un sol mélangé (SM) comprenant la couche intermédiaire (CI), la couche de transition (CT) et le sol support (SS). Le deuxième prélèvement a été effectué dans le sol support (Figs. 4 et 5). Le troisième prélèvement concerne le sol intermédiaire seul, sur une profondeur de 0,3 m à partir de l'Ap. Ce prélèvement a été réalisé 10 m en amont des prélèvements 1 et 2.

Lors des prélèvements, quelques mesures en place ont été réalisées. La densité du sol intermédiaire a été estimée en utilisant une méthode similaire à celle au densitomètre membrane (NF P94-061-2). Une cavité a été creusée dans la couche intermédiaire 110 m en aval du premier prélèvement (Fig. 4). Le sol excavé a été récupéré pour déterminer le poids humide et la teneur en eau en laboratoire. Afin de déterminer le

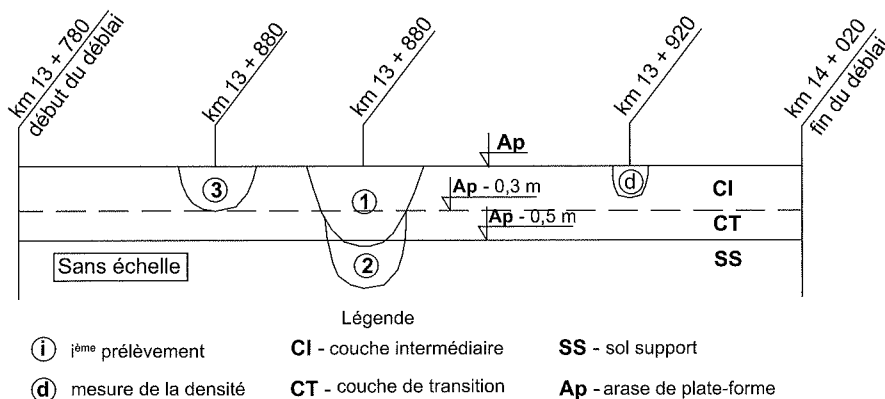


FIG. 4 Positions et profondeurs des prélèvements du sol.
Situations and depths of soil sampling.

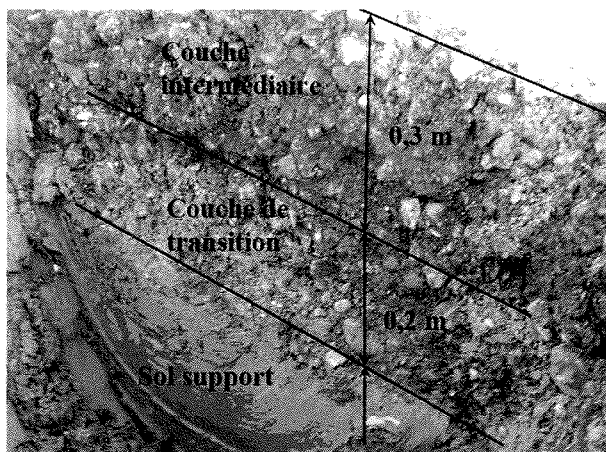


FIG. 5 Photo prise sur deux premiers prélèvements.
Picture taken during the first two sampling operations.

volume de la cavité, une bâche plastique a été placée dans celle-ci avant sa mise en eau à l'aide d'un récipient gradué. Les valeurs obtenues sont : masse volumique : $\rho_h = 2,51 \text{ Mg/m}^3$; masse volumique sèche : $\rho_d = 2,39 \text{ Mg/m}^3$; teneur en eau massique : $w = 5,13 \%$. Pour une première évaluation de la perméabilité du sol, la bâche plastique a été retirée laissant l'eau s'infiltrer dans le sol. Après une demi-heure, le niveau de l'eau dans le trou n'avait pas baissé montrant une faible perméabilité de la couche intermédiaire.

La teneur en eau volumique du sol support a été également mesurée à différentes profondeurs en utilisant la sonde ThetaProbe ML2x (Delta-T, 1999). Ces mesures ont été effectuées dans l'excavation des deux premiers prélèvements (Fig. 4). Les valeurs obtenues à 0,6 m et à 0,8 m de profondeur sont de 38,5 %. Par contre, celle à 0,55 m de profondeur (juste en dessous de l'interface entre le sol support et la couche de transition) est un peu plus élevée soit 41,7 %. On note que cette mesure s'est avérée très difficile à cause de la présence de gros éléments qui posent des difficultés pour l'insertion de la sonde.

3

Essais d'identification

Les sols récupérés à partir des prélèvements ont permis la réalisation des essais d'identification suivants : analyse granulométrique, analyse minéralogique, détermination des limites d'Atterberg et de la valeur de bleu de méthylène.

L'analyse granulométrique permet d'étudier la taille des grains solides constituant le sol. Elle se traduit par une courbe qui identifie le sol selon la classification GTR (GTR, 1992). Les essais sont effectués selon la méthode de tamisage à sec après lavage (NF P94-056) pour les particules supérieures à 80 μm et la méthode de sédimentation (NF P94-057) pour les particules inférieures à 80 μm . Pour le sol intermédiaire, quatre essais sont réalisés pour deux positions différentes : les deux premiers essais sur les sols prélevés de la cavité réalisée pour la détermination de la densité en place (SI-1 et SI-2) ; les deux autres sur les échantillons pris pendant le troisième prélèvement (SI-3 et SI-4, voir la figure 4). Les courbes granulométriques obtenues sont présen-

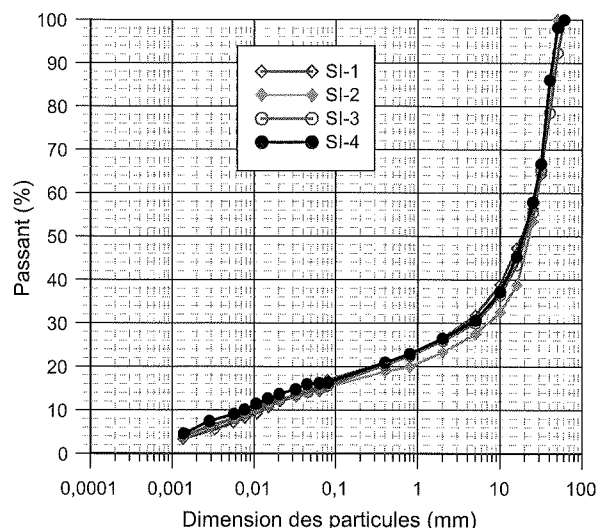


FIG. 6 Courbes granulométriques du sol intermédiaire (SI).
Grain size distribution curves of intermediate soil (SI).

tées sur la figure 6. On observe que les sols pris à deux emplacements distants de 120 m le long de la ligne donnent des courbes granulométriques identiques. Le sol intermédiaire contient environ 16 % de particules inférieures à 80 μm .

Quant au sol mélangé (SM), deux essais (SM-1 et SM-2) sont réalisés et comparés avec les essais sur SI (Fig. 7). On observe que les courbes de SM se trouvent légèrement au dessus des courbes du sol intermédiaire, montrant que le sol mélangé contient plus de fines que le sol intermédiaire. Un troisième essai (SM-3) est réalisé sur le sol mélangé dont les mottes d'argile venant du sol support ont été préalablement enlevées. La courbe obtenue est identique à celle du sol intermédiaire (Fig. 7). En conclusion, la différence entre les courbes granulométrique des sols mélangé et intermédiaire est due à la présence des mottes d'argiles venant du sol support.

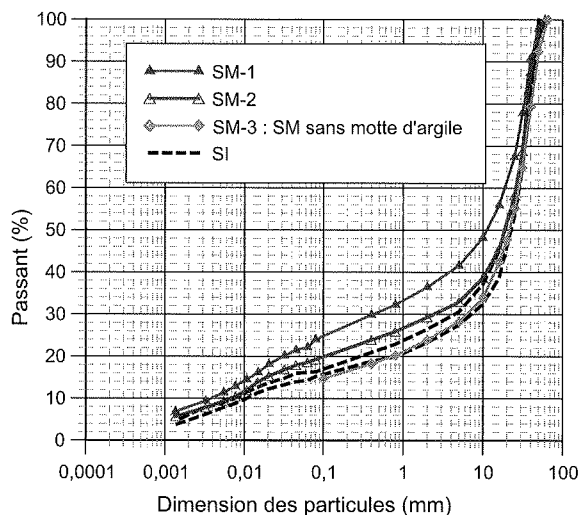


FIG. 7 Courbes granulométriques du sol mélangé (SM) et du sol intermédiaire (SI).
Grain size distribution curves of mixed soil (SM) and intermediate soil (SI).

Les courbes granulométriques obtenues sur le sol support (SS) sont présentées sur la figure 8. On constate que 98 % des particules sont inférieures à 80 μm dont 50 % ont une granulométrie inférieure à 2 μm . Sur la figure 9, les courbes granulométriques des sols écrêtés à 80 μm sont présentées. On constate que celles des sols mélangés sans mottes d'argile et celles des sols intermédiaires sont similaires. Elles contiennent 26-37 % de particules inférieures à 2 μm tandis que le sol support en contient 50-52 %.

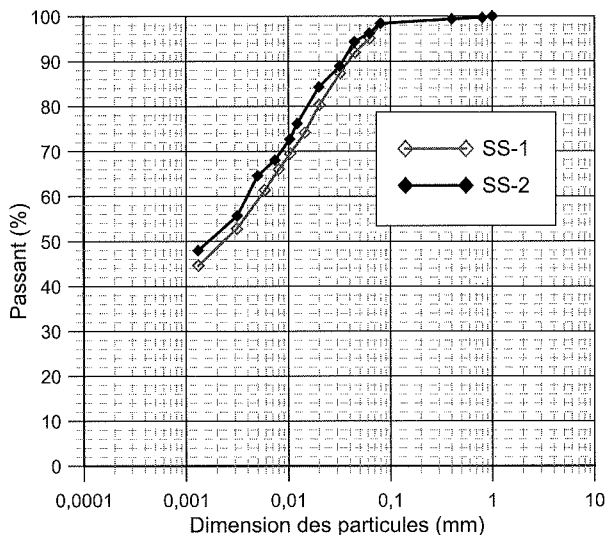


FIG. 8 Courbe granulométrique du sol support.
Grain size distribution curves of subgrade.

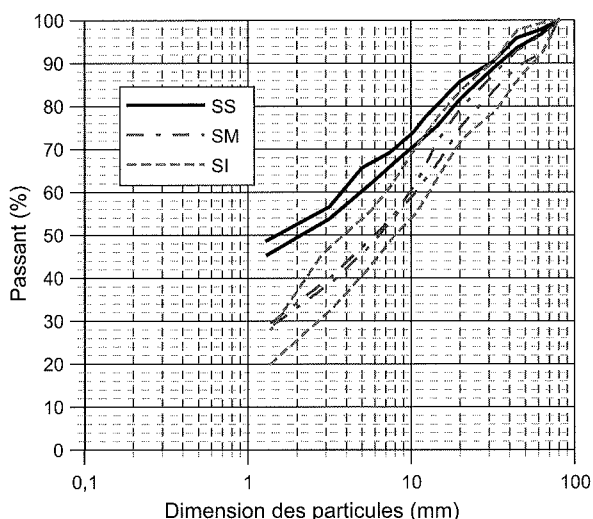


FIG. 9 Courbes granulométriques des sols écrêtés à 80 μm .
Grain size distribution curves of soils clipped to 80 μm .

Selon la norme NF P94-051, la détermination des limites d'Atterberg s'applique aux particules fines inférieures à 400 μm . Cependant, l'analyse granulométrique du sol support montre que la plupart des particules (98 %) sont inférieures à 100 μm . Afin de comparer les fines de différents sols, les limites d'Atterberg sont déterminées avec les sols écrêtés à 100 μm : la limite de liquidité (w_L) est déterminée à la coupelle de Casagrande (NF P94-051) ; la limite de plasticité (w_p) est déterminée par la méthode des rouleaux (NF P94-051). Les résultats sont présentés dans le tableau I. On observe que le sol support est le plus plastique avec une limite de liquidité de 57,8 % et un indice de plasticité (I_p) de 24,1. Selon le diagramme de Casagrande, le sol support est un limon très plastique. Les fines du sol intermédiaire et du sol mélangé sans mottes d'argile sont moins plastiques et correspondent à un limon peu plastique.

L'essai au bleu de méthylène consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir les surfaces interne et externe de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) sert à apprécier globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse présente dans un sol. Elle constitue un des paramètres d'identification pour la classification des sols (NF P11-300). Selon la norme NF-P94-068, l'essai est réalisé avec les particules inférieures à 5 mm. Cependant, dans un but de comparer les caractérisations des fines de différents sols, les fractions inférieures à 100 μm ont été utilisées dans ce travail pour effectuer l'essai au bleu de méthylène. Les résultats sont présentés dans le tableau I. On constate que les fines (< 100 μm) du sol support donnent une valeur de VBS de 6,23 correspondant, selon GTR (1992), à un sol argileux. Les valeurs de bleu des fines (< 100 μm) du sol intermédiaire et du sol mélangé sans mottes d'argile sont respectivement de 3,58 et 3,67. Ces valeurs correspondent à des limons de plasticité moyenne d'après les seuils définis dans la GTR (1992). Selon la classification GTR (1992) basée sur la taille des particules, l'indice de plasticité et la valeur de bleu, le sol support et les fines (< 100 μm) du sol intermédiaire et celles du sol mélangé sans mottes d'argile correspondent à la classe A2.

La minéralogie des particules inférieures à 100 μm du sol intermédiaire et du sol support est analysée par diffraction aux rayons X. Au niveau des minéraux non argileux (de tailles entre 2 μm et 100 μm), le sol support contient majoritairement du quartz tandis que le sol intermédiaire contient les mêmes minéraux avec une proportion de quartz de 5 à 6 % plus importante. De plus, une analyse au calcimètre (NF P94-048) a montré la présence de 16 % de calcite dans le sol intermédiaire contre 0 % dans le sol support. Les minéraux argileux (particules inférieures à 2 μm) présentent la même composition pour le sol support et le sol intermédiaire : illite, kaolinite, chlorite et interstratifié chlorite/smectite.

TABLEAU I Limites d'Atterberg et valeur de bleu de méthylène.

Type de sol	Fraction des fines (< 100 μm)	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité	VBS (sur < 100 μm)
	(%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	(g)
Sol mélangé sans mottes d'argile	20	40,2	28,9	11,3	3,67
Sol intermédiaire	18	45,7	30,9	14,8	3,58
Sol support	98	57,8	33,7	24,1	6,23

Concernant les gros éléments du sol intermédiaire, les graviers ayant la taille de 25-50 mm sont lavés et séparés en trois groupes (Fig. 10) : a) galets roulés (8 %) qui ne proviennent pas de la couche de ballast ; b) ballast blanc (82 %) contenant 100 % de carbonate selon l'analyse au calcimètre ; c) ballast noir ou gris (10 %), plus rigide que le ballast blanc, contenant 17 % de carbonate.

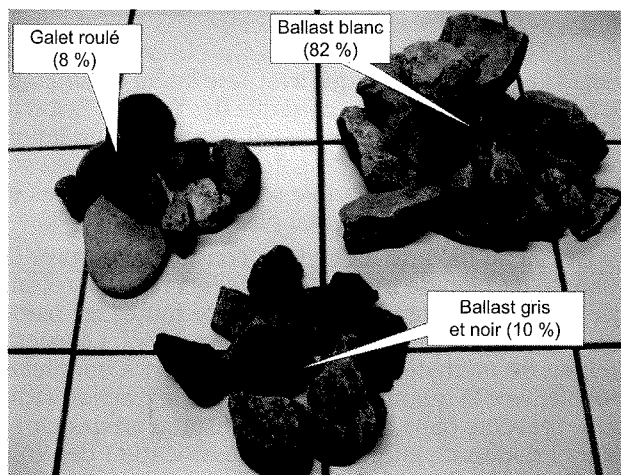


FIG. 10 Analyse des graviers (25-50 mm) du sol intermédiaire.
Analysis of gravels (25-50 mm) in intermediate soil.

Le tableau II présente une synthèse sur la composition du sol intermédiaire. Il contient moins de 10 % de granulats supérieurs à 50 mm (gros galets roulés et pierres cassées). Le sol contient majoritairement (42-48 %) du ballast et quelques galets de taille 25-50 mm. Les granulats de taille 0,08-25 mm représentent 36-40 %. Ces granulats peuvent être les microballasts (10-25 mm) qui sont utilisés pour la correction manuelle du nivellement des voies (Alias, 1984), les produits de dégradation des ballasts, les sables et les pollutions (produits d'usure, scories, etc.). Enfin, les fines (< 80 μm) représentent 16 % et les particules argileuses (< 2 μm), 5 %.

La masse volumique des particules inférieures à 2 mm du sol intermédiaire est déterminée au pycnomètre à eau (NF P94-054) : $\rho_s = 2,67 \text{ Mg/m}^3$. La masse volumique des particules supérieures à 2 mm (et de celles supérieures à 20 mm) est déterminée en utilisant la même méthode mais avec les matériels plus grands (NF EN 1097-6). Une valeur de 2,68 Mg/m^3 est obtenue pour les deux tailles.

TABLEAU II Composition du sol intermédiaire.

Composants	Taille (mm)	Pourcentage (%)
Pierres cassées + galets roulés	50-63	3-10
Ballasts + galets	25-50	42-48
Microballasts + sable + dégradation des ballasts + pollutions (produits d'usure, scories...)	0,08-25	36-42
Fines + sable + dégradation des ballasts + pollutions	< 0,08	~ 16
Argile	< 0,002	~ 5

Essais de compactage

Les propriétés de compactage du sol intermédiaire sont étudiées au Proctor modifié suivant la norme NF P94-093. Le moule CBR et la dame Proctor modifié ont été choisis car la taille des plus gros éléments du sol intermédiaire atteint 63 mm. Les compactages sont réalisés sur le sol écrêté à 20 mm. Les résultats sont présentés sur la figure 11. D'après la norme NF P94-093, lorsque le pourcentage des éléments de taille supérieure à 20 mm est inférieur ou égal à 30 % on peut obtenir la courbe Proctor moyennant une correction des valeurs de densité sèche ρ_d et de teneur en eau w déterminées sur la fraction 0-20 mm du matériau en utilisant les formules suivantes :

- pour la teneur en eau :

$$w' = w - \Delta w \text{ avec } \Delta w = \frac{m}{100} w \quad (1)$$

où :

w' (%) est la teneur en eau du matériau 0/D, D (mm) étant le diamètre maximal du matériau (mm) ;

w (%) est la teneur en eau déterminée sur la fraction 0/20 ;

m (%) est la proportion de la fraction 20/D dans le matériau ;

- pour la masse volumique sèche :

$$\rho_d' = \frac{\rho_d}{1 + \frac{m}{100} \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} - 1 \right)} \quad (2)$$

où :

ρ_d' (Mg/m^3) est la masse volumique sèche du matériau 0/D, D (mm) étant le diamètre maximal du matériau (mm) ;

ρ_d (Mg/m^3) est la masse volumique sèche déterminée sur la fraction 0/20 ;

ρ_s (Mg/m^3) est la masse volumique des particules solides du sol.

La courbe obtenue après correction est présentée sur la figure 11 pour le sol intermédiaire. On note néanmoins que ce sol contient plus de 30 % d'éléments plus grands que 20 mm (environ 50 %, Fig. 6). Ainsi, au sens strict, les conditions pour appliquer ces correc-

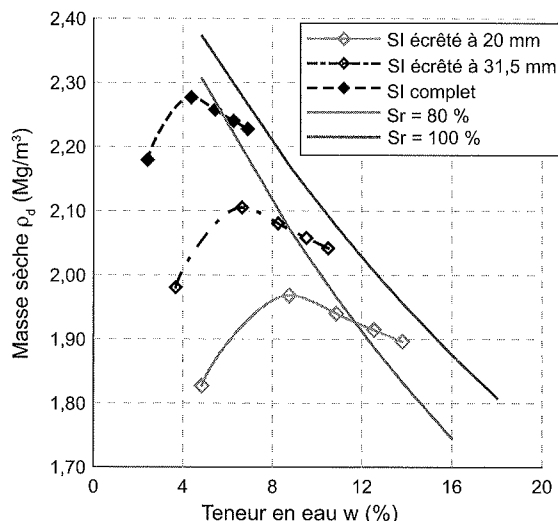


FIG. 11 Courbes de compactage Proctor modifié.
Modified Proctor compaction curves.

tions ne sont pas vérifiées. Sur la figure 11, la courbe correspondant au sol intermédiaire écrêté à 31,5 mm est également présentée car cette fraction correspond à celle de la couche « sous ballast » sur les lignes nouvelles (Fig. 2) et à celle des graves non traitées utilisées en fondations routières (NF P98-125).

A partir des courbes présentées sur la figure 11, la densité sèche maximale (ρ_{dmax}) ainsi que la teneur en eau optimale (w_{OPM}) sont déterminées pour chaque type de sol et les valeurs sont présentées dans le tableau III. La densité maximale du sol intermédiaire non écrêté déterminée au laboratoire est de 2,28 Mg/m³, qui est légèrement inférieure à la densité sèche mesurée en place (2,39 Mg/m³).

Afin de mieux comparer les densités mesurées en place et en laboratoire, les densités du sol intermédiaire en place de la fraction 0/20 mm et de la fraction 0/31,5 mm sont estimées. Pour ce faire, les constituants du sol intermédiaire sont d'abord divisés en trois phases : air, eau, et solide (Fig. 12). La figure 12a présente le schéma habituel d'un sol et la figure 12b représente le sol intermédiaire avec la phase solide divisée en deux parties : particules supérieures à 20 mm et celles inférieures à 20 mm. Sur cette figure, M_a , M_w , M_s et V_a , V_w , V_s sont la masse et le volume de l'air, de l'eau et des particules solides, respectivement. Les indices i et s sont ajoutés après pour indiquer la partie inférieure et supérieure à 20 mm.

- Pour les particules solides supérieures à 20 mm :
 - masse sèche (M_{ss}) : $M_{ss} = m M_s$ avec m le pourcentage des particules solides supérieures à 20 mm ;
 - volume du solide :

$$V_{ss} = \frac{M_{ss}}{\rho_{ss}} \quad (3)$$

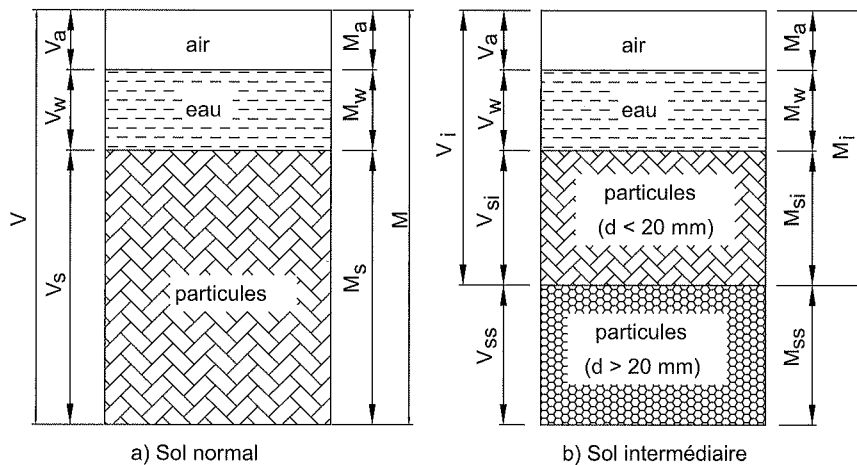


FIG. 12 Schéma des constituants du sol intermédiaire. Scheme of components of intermediate soil.

TABEAU III Comparaison de la densité et de la teneur en eau obtenues en laboratoire et en place.

Sol intermédiaire	En laboratoire		En place		Comparaison ρ_d / ρ_{dmax} (%)
	ρ_{dmax} (Mg/m ³)	w_{OPM} (%)	ρ_d (Mg/m ³)	w (%)	
Écrêté à 20 mm	1,97	8,8	2,16	10,3	109,6
Écrêté à 31,5 mm	2,11	6,7	2,23	8,6	105,7
Complet	2,28	4,4	2,39	5,1	104,5

Pour le sol intermédiaire complet, sa densité sèche a été calculée par :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} = 2,39 \text{ (Mg/m}^3\text{)} \implies M_s = \rho_d V \quad (4)$$

- Pour le sol intermédiaire écrêté à 20 mm :
 - densité sèche :

$$\begin{aligned} \rho_{di} &= \frac{M_{si}}{V_i} = \frac{M_s - M_{ss}}{V - V_{ss}} \\ &= \frac{(1-m) \cdot \rho_d \cdot V}{V - \frac{m}{\rho_{ss}} \cdot \rho_d \cdot V} = \frac{(1-m) \cdot \rho_d \cdot \rho_{ss}}{\rho_{ss} - m \rho_d} \end{aligned} \quad (5)$$

- teneur en eau :

$$w_i = \frac{M_w}{M_{si}} = \frac{M_s \cdot w}{M_s - M_{ss}} = \frac{w}{1-m} \quad (6)$$

A partir des essais réalisés en place et en laboratoire on obtient : $m = 0,5$ (valeur déduite des résultats sur le sol intermédiaire écrêté à 20 mm, Fig. 6) ; $\rho_d = 2,39 \text{ Mg/m}^3$; $w = 5,13 \%$ et $\rho_{ss} = 2,68 \text{ Mg/m}^3$. Les valeurs calculées pour le sol intermédiaire en place écrêté à 20 mm sont donc : $\rho_{di} = 2,16 \text{ Mg/m}^3$ et $w_i = 10,3 \%$ (Tableau II). La même méthode est appliquée pour le sol intermédiaire écrêté à 31,5 mm et les valeurs obtenues sont : $\rho_{di} = 2,23 \text{ Mg/m}^3$ et $w_i = 8,55 \%$ (Tableau III). On observe que la densité en place est de 5 à 10 % plus grande que la densité maximale obtenue au laboratoire. Le tableau IV synthétise les résultats obtenus lors de l'essai Proctor modifié réalisé sur les matériaux du site de Sénissiat, avec ceux trouvés dans la littérature. On constate que c'est le sol intermédiaire du site de Sénissiat qui contient le plus de fines (< 80 μm) et qui a la densité la plus faible.

TABEAU IV Comparaison des résultats de l'essai Proctor modifié.

Sol	Teneur en fine (< 80 µm)	ρ_s (Mg/m ³)	ρ_{dmax} (Mg/m ³)	W_{GPM} (%)	Référence
	(%)				
0/20	7	2,68	2,22	5,8	Cardenas Gomez (2007)
	7	-	2,20	5,8	Coronado Garcia <i>et al.</i> (2004)
	10	-	2,22	5,5	
	31	2,68	1,97	8,8	Ce travail
0/31,5	2	2,68	2,22	5,2	Cardenas Gomez (2007)
	6	2,70	2,35	4,9	RFF <i>et al.</i> , (2008)
	7	2,68	2,29	5,9	Cardenas Gomez (2007)
	8	2,70	2,37	4,2	RFF <i>et al.</i> , (2008)
	24	2,68	2,11	6,7	Ce travail

5

Discussion

Parmi les sept sites considérés intéressants pour l'étude, on a sélectionné le site de Sénissiat en raison des facilités de réalisation de prélèvement. Les observations sur place ont montré la structure de la plate-forme ferroviaire ancienne avec trois couches (Fig. 5) : a) une couche intermédiaire de 0,3 m d'épaisseur ; b) une couche de transition de 0,2 m d'épaisseur ; c) le sol support. Cette structure est similaire à celle montrée par Elaskar (2006). En effet, Elaskar (2006) a présenté une analyse des carottages sur une portion de voie de 5,3 km, du PK 406 + 400 au PK 411 + 700, de la ligne classique « Clermont-Ferrand – Paris ». Les sondages ont été réalisés tous les 50 m sur cette portion pour déterminer la nature des matériaux de chaque couche et les zones humides. Une couche intermédiaire de 0,3 m d'épaisseur a été identifiée sur les zones considérées comme saines. Cette épaisseur peut augmenter en fonction des conditions d'humidité ou de teneur en eau de la plate-forme. Généralement, la couche intermédiaire est composée d'un matériau de type grave concassée et d'un autre de type grave-sable grossier compacté. Il existe, à la base, une couche de petite épaisseur d'environ 0,2 m. Cette couche est composée de matériau de type sable grossier ou argile-sable grossier compacté. Enfin, la première partie de la plate-forme de terrassement où le sol support est plutôt un matériau fin. Concernant les propriétés de chaque couche, une légère différence sur les couches de transition a été obtenue entre les deux études. Sur le site de Sénissiat, la couche de transition contient des galets roulés d'un D_{max} d'environ 200 mm qui ne sont pas présents dans la couche intermédiaire. Ceci montre que la composition de la couche intermédiaire est liée à l'histoire de la ligne.

D'après l'analyse des éléments supérieurs à 25 mm, la plupart des gros éléments trouvés dans le sol intermédiaire sont des grains de ballast calcaire : 82 % contre 10 % de ballast granitique et 8 % de galets roulés (Fig. 10). Pourtant selon la norme NF F53-695 et SNCF (2006), le ballast provient du concassage de roches massives à l'exclusion de tout matériau calcaire et alluvionnaire. D'après Elaskar (2006) et Cholet *et al.* (2006), la plupart des couches de ballast pollué, situées entre la couche de ballast et la couche intermédiaire sur la ligne classique existante (Fig. 1), ont été réalisées avec des matériaux du site ou à proximité. Comme le site de Sénissiat repose

sur des formations calcaires d'après la carte géologique (n° 651-652) du BRGM au 1/50 000, le ballast calcaire semble, *a priori*, avoir été utilisé sur cette ligne.

Dans la structure des plates-formes ferroviaires anciennes, la couche intermédiaire joue le même rôle que la sous-couche des lignes nouvelles (Fig. 2). Or, la couche intermédiaire du site de Sénissiat contient environ 16 % de fines (< 80 µm) tandis que la sous-couche des lignes nouvelles (GNT 0/31,5 mm) en contient 4-8 % (SNCF, 1995). Les analyses minéralogiques ont montré que les minéraux argileux (particules inférieures à 2 µm) du sol intermédiaire du site de Sénissiat sont similaires à ceux du sol support. Pour les particules de 2-100 µm, le sol intermédiaire contient 16 % de calcite qui n'a pas été trouvée dans le sol support. On peut en déduire que les particules fines de la couche intermédiaire proviennent, d'une part, du sol support à cause du phénomène de remontée de fines et, d'autre part, de la dégradation du ballast (calcite et quartz) due au passage des trains. En effet, l'état hydrique de la plate-forme, associé à la sollicitation dynamique causée par la circulation du train, influence forcément le phénomène de remontée des fines (Kabir *et al.*, 2006 ; Haque *et al.*, 2007 ; Kamruzzaman *et al.*, 2008 ; Indraratna *et al.*, 2007). La dégradation des ballasts due au trafic des trains a été étudiée par Li et Selig, 1995 ; Indraratna *et al.*, 2005 ; Lackenby *et al.*, 2007 ; Karraz, 2008. En réalisant des essais triaxiaux cycliques sur des microballasts (6-24 mm), Karraz (2008) a obtenu 7 % de grains inférieurs à 6 mm produits par le chargement cyclique après 3,5 millions de cycles.

Le sol support du site de Sénissiat est classé A2 suivant la norme NF P11-300 et la GTR (1992). La teneur en eau volumique mesurée sur place est de 40 %, illustrant l'humidité élevée de ce sol. Vu qu'on ne dispose pas de suffisamment de paramètres pour déterminer l'état hydrique de ce sol, on estime qu'avec une telle teneur en eau volumique, le sol devrait correspondre à la classe A2h. D'après la classe de qualité du sol support en place de la ligne ferroviaire (SNCF, 2006), le sol A2h correspond à la classe S0. Or, la classe S0 désigne des sols de mauvaise qualité que l'on considère comme impropres à la réalisation d'une plate-forme correcte. Ce sol doit être amélioré par le traitement à la chaux ou au liants hydrauliques, par le drainage, par le pré-chargement, etc., pour atteindre la qualité S1 (SNCF, 1996b). C'est la raison pour laquelle un système de drainage longitudinal a été mis en place sur ce déblai lors de la modernisation de cette ligne.

La densité sèche mesurée en place pour le sol intermédiaire ($2,39 \text{ Mg/m}^3$) est plus grande que la valeur maximale obtenue au laboratoire ($2,28 \text{ Mg/m}^3$, Tableau III). Elaskar (2006) a trouvé que la densité en place de la couche intermédiaire sur la ligne classique « Clermont-Ferrand – Paris » du PK 406 + 400 au PK 411 + 700 était de 86-98 % de celle de l'OPM tout en indiquant que la méthode utilisée (Panda-endoscopie) sous-estimait la densité en place. En effet, la méthode utilisée repose sur la prise en compte d'hypothèses pessimistes en ce qui concerne les matériaux et l'état hydrique. De plus, la granulométrie des couches ainsi que la méthode de détermination de l'OPM pour le matériau contenant plus de 30 % des éléments supérieurs à 20 mm n'ont pas été montrées dans les travaux d'Elaskar (2006). Or, la couche intermédiaire est formée depuis l'édification de la ligne par interpénétration du sol support, des couches rapportées (pierres cassées, gravier, sable, ballast, etc.) et des pollutions (produits d'usure, scories, etc., SNCF, 1996a). Lors de la modernisation de la ligne de Bourg-en-Bresse à Bellegarde-sur-Valserine, des planches d'essais ont été réalisées sur les matériaux utilisés pour la sous-couche de cette ligne (RFF *et al.*, 2008). L'objectif de la planche d'essai est de définir les modalités de compactage qui permettent d'obtenir 95 % des valeurs de compacité supérieures à 100 % de la densité OPM. D'après cette planche d'essai, la densité sèche moyenne *in situ* satisfaisant cette dernière condition est de $2,40 \text{ Mg/m}^3$ soit 101,1 % de l'OPM pour le matériau de Rivat, et de $2,39 \text{ Mg/m}^3$ soit 101,6 % de l'OPM pour celui de Vincent. On voit que la densité sèche de la couche intermédiaire mesurée en place ($2,39 \text{ Mg/m}^3$) est la même que la densité *in situ* de la sous-couche sur cette ligne et que l'on peut avoir valeurs différentes à l'OPM et pour la densité *in situ*.

Le tableau III montre que la densité sèche en place du sol intermédiaire écrêté à 31,5 mm est de 105,7 % de l'OPM ; cette dernière est plus importante que celle obtenue par RFF *et al.* (2008). En effet, la densité à l'OPM du sol intermédiaire écrêté à 31,5 mm ($2,23 \text{ Mg/m}^3$) est plus petite que celle du matériau de Rivat ($2,37 \text{ Mg/m}^3$) et que celle du matériau de Vincent ($2,35 \text{ Mg/m}^3$). Ces matériaux ont la même nature calcaire et une densité des particules solides de $2,68 \text{ Mg/m}^3$ à $2,70 \text{ Mg/m}^3$. En revanche, le pourcentage des fines ($< 80 \mu\text{m}$) du sol intermédiaire écrêté à 31,5 mm est nettement plus grand que celui des deux autres, soit 24 % contre 6 % de Vincent et 8 % de Rivat. Plusieurs travaux ont mis en évidence l'influence du pourcentage des fines sur le compactage. D'après Côté et Konrad (2003), le volume des vides des grains supérieurs à $80 \mu\text{m}$ obtenu après par compactage est indépendant du pourcentage des fines si ce dernier est inférieur à un certain seuil. D'après Cardenas Gomez (2007), quand le pourcentage des fines est plus grand que le seuil critique, ces fines remplissent non seulement des pores formés par la structure des gros éléments, elles contribuent aussi au volume global. Considérant que la structure formée par les fines est en général moins compacte que celle formée par les gros éléments, la densité globale diminue avec l'augmentation de la fraction des fines. Selon Flon et Poulin (1987), le pourcentage critique des fines ($< 80 \mu\text{m}$) est de 10 % pour les matériaux 0/20 mm utilisés en fondation routière. Cette conclusion est en concordance avec les résultats présentés dans le tableau IV concernant le sol 0/20 mm. En effet, quand la fraction des fines est inférieure ou égale à 10 %, la densité maximale obtenue par Cardenas Gomez (2007) et Coronado Garcia *et al.* (2004) est de $2,20\text{-}2,22 \text{ Mg/m}^3$; la densité maximale est diminuée à $1,97 \text{ Mg/m}^3$ lorsque la fraction des fines est de 31 %.

La granulométrie du matériau a également un effet important sur la densité. A fractions des fines égales, la masse volumique augmente avec le coefficient d'uniformité (Cardenas Gomez, 2007). De plus, la nature des fines présente également un effet significatif sur l'OPM du sol : la densité maximale est plus petite lorsque les fines sont plus argileuses (Flon et Poulin, 1987 ; Omar *et al.*, 2003).

6

Conclusion

Dans le cadre du projet de recherche « Plate-forme sans drainage-structure perméable » qui a pour objectif l'élaboration des recommandations afin de répondre à la problématique du drainage des plates-formes anciennes lors des travaux de modernisation, les matériaux constitutifs de la plate-forme d'une voie ancienne à Sénissiat (nord-ouest de Lyon, France) ont été caractérisés. Sous les couches de « ballast » et de « ballast pollué » qui ont été ôtées, une couche intermédiaire de 0,3 m d'épaisseur a été identifiée. Elle est séparée du sol support par une couche de transition de 0,2 m d'épaisseur. En premier lieu, les essais d'identification ont été réalisés, permettant d'analyser la plasticité (limites d'Atterberg, valeur de bleu de méthylène), la granulométrie et la composition minéralogique de ces sols. Les résultats montrent que le sol support est un limon très plastique avec 98 % de particules inférieures à $80 \mu\text{m}$ dont 50 % de particules inférieures à $2 \mu\text{m}$. Le sol intermédiaire contient 3-10 % de pierres cassées et galets (50-63 mm), 42-48 % de ballast et galets (25-50 mm), 36-42 % de microballast, sable, ballast dégradé (0,08-25 mm), et 16 % de fines ($< 80 \mu\text{m}$). Les analyses minéralogiques montrent que la majorité (82 %) des graviers de taille 25-50 mm est calcaire. De plus, les particules inférieures à $2 \mu\text{m}$ du sol intermédiaire ont une composition minéralogique similaire à celle du sol support. Les particules de taille 20-100 μm du sol support contiennent majoritairement du quartz tandis que celles du sol intermédiaire contiennent du quartz et de la calcite. Ces résultats montrent que le sol intermédiaire est un mélange des matériaux rapportés lors de la construction de la ligne ou lors de son entretien (pierres cassées, graviers, sables...), ou dus à la dégradation du ballast et du sol support.

Les propriétés de compactage du sol intermédiaire ont été étudiées au Proctor modifié. On a commencé par le sol écrêté à 20 mm et les corrections ont été appliquées pour estimer la densité sèche maximale du sol intermédiaire avec la fraction complète. La valeur obtenue au laboratoire ($2,28 \text{ Mg/m}^3$) est inférieure à celle mesurée en place ($2,39 \text{ Mg/m}^3$). Cette différence est expliquée par la teneur en fines importantes du sol intermédiaire étudié qui engendrait certaines erreurs dans les corrections. De plus, les sollicitations cycliques créées par la circulation de trains pendant des années ont certainement contribué à la densification du sol intermédiaire.

Les résultats obtenus dans ce travail permettent de donner des éléments de base pour des études plus approfondies sur le comportement hydromécanique des plates-formes ferroviaires anciennes, prévues dans le projet.

REMERCIEMENTS

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet de recherche « Plate-forme sans drainage-structure perméable » et les auteurs adressent leurs remerciements au Réseau Ferré de France, la SNCF et l'École des Ponts-ParisTech pour leurs soutiens. Les auteurs tiennent à remercier également Madame Martine Audiguier (Centre Géoscience, Mines-ParisTech) pour la réalisation des analyses minéralogiques.

Bibliographie

- AFNOR – NF P94-054. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau, 1991.
- AFNOR – NF P94-057. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation, 1992.
- AFNOR – NF P11-300. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, 1992.
- AFNOR – NF P94-051. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité de la coupelle et limite de plasticité au rouleau, 1993.
- AFNOR – NF P98-125. Assises de chaussées. Graves non traitées : méthodologie d'étude en laboratoire, 1994.
- AFNOR – NF P94-061-2. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique d'un matériau en place. Partie 2 : Méthode au densitomètre à membrane, 1996.
- AFNOR – NF P94-056. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par tamisage à sec après lavage, 1996.
- AFNOR – NF P94-048. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en carbonate. Méthode du calcimètre, 1996.
- AFNOR – NF F53-695. Installations fixes ferroviaires : ballasts et gravillons de soufflage. Caractéristiques et spécifications, 1996.
- AFNOR – NF P94-068. Sols : reconnaissance et essais. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux, 1998.
- AFNOR – NF P94-093. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau, 1999.
- AFNOR – NF EN 1097-6. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 2001.
- Alias J. – *La voie ferrée*. Techniques de construction et d'entretien, 2^e édition mise à jour, 1984, 524 p.
- Alobaidi I., Hoare D.J. – Development of pore water pressure at the subgrade-subbase interface of a highway pavement and its effect on pumping of fines. *Geotextiles and Geomembranes* 14 (2), 1996, p. 111-135.
- Cardenas Gomez P.A. – *Caractéristiques hydrauliques de matériaux granitiques concassés*. Thèse de doctorat de l'université Laval, 2007.
- Cholet C., Saussine G., Gautier P.-E., Cléon L.-M. – Granular Media and Ballasted Railway Tracks (Milieux granulaires et voies ballastées). *Nonsmooth Mechanics and Analysis*, 2006, p. 221-232.
- Choudhury D., Bharti R.K., Chauhan S., Indraratna B. – Response of multilayer foundation system beneath railway track under cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134 (10), 2008, p. 1558-1563.
- Coronado Garcia O., Fleureau J.-M., Correia A.G., Caicedo B. – Influence de la succion sur les propriétés de matériaux granulaires routiers. *57^e Congrès canadien de Géotechnique*, 2004, p. 6.
- Côté J., Konrad J.M. – Assessment of the hydraulic characteristics of unsaturated base-course materials : a practical method for pavement engineers. *Can. Geotech. J.* 40 (1), 2003, p. 121-136.
- Delta-T – ThetaProbe Soil Moisture Sensor type ML2x User Manual, v1.21. Document Code : ML2x-UM-1.21, 1999, 22 p.
- Dupla J.-C., Pedro L.S., Canou J., Dormieux L. – Comportement mécanique de sols grossiers de référence. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 268-269 (22 réf.), 2007, p. 31-57.
- Eklblad J., Isacsson U. – Time-domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in road pavements. *Can. Geotech. J.*, 44 (7), 2007, p. 858-872.
- Eklblad J., Isacsson U. – Influence of water and mica content on resilient properties of coarse granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 9 (3), 2008, p. 215 - 227.
- Elaskar A.R. – Développement d'une méthode de diagnostic et d'évaluation du potentiel des plates-formes ferroviaires. *Mémoire du diplôme d'ingénieur de l'Université Blaise-Pascal*, 2006, 98 p.
- Flon P., Poulin J.-F. – L'influence du pourcentage de particules fines sur la portance d'une chaussée à partir d'essais en laboratoire. Rapport transports Québec, RTQ-87-03. Ministère des Transports du Québec, 1987.
- GTR – Guide technique GTR. Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule 1 et 2, LCPC – SETRA, 1992.
- Haque A., Kabir E., Bouazza A. – Cyclic filtration apparatus for testing sub-ballast under rail track. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, p. 180-186.
- Indraratna B., Lackenby J., Christie D. – Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Géotechnique*, 55 (4), 2005, p. 325-328.
- Indraratna B., Raut A.K., Khabbaz H. – Constriction-based retention criterion for granular filter design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (3), 2007, p. 266-276.
- Indraratna B., Shahin M.A., Rujiki-atkamjiorn C., Christie D. – Stabilization of ballasted rail tracks and underlying softsoils formations. *Indian Geotechnical Conference*, India, 2006, p. 143-152.
- Kabir E., Haque A., Bouazza A. – Effect of cyclic loading on filtration behaviour of subballast material. *Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics*, 148, 2006, p. 180-186.
- Kamruzzaman A.H.M., Haquet A., Bouazza A. – Filtration behaviour of granular soils under cyclic load. *Géotechnique*, 58 (6), 2008, p. 517-522.
- Karraz K. – *Comportement cyclique à long terme d'un matériau granulaire modèle pour application aux infrastructures ferroviaires*. Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, 2008.
- Lackenby J., Indraratna B., McDowell G., Christie, D. – Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique*, 57 (6), 2007, p. 527-536.
- Li D., Selig E.T. – Wheel/track dynamic interaction : track substructure perspective. *Vehicle System Dynamics*, 24 (suppl.), 1995, p. 183-196.
- Li D., Selig E.T. – Method for railroad track foundation design. I : Development. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (4), 1998a, p. 316-322.
- Li D., Selig E.T. – Method for railroad track foundation design. II : Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (4), 1998b, p. 323-329.
- Okada K., Ghataora G.S. – Use of cyclic penetration test to estimate the stiffness of railway subgrade. *NDT & E International*, 35 (2), 2002, p. 65-74.
- Omar M., Shanableh A., Basma A., Barakat S. – Compaction characteristics of granular soils in United Arab Emirates. *Geotechnical and Geological Engineering*, 21 (3), 2003, p. 283-295.
- Radampola S.S., Gurung N., McSweeney T., Dhanasekar M. – Evaluation of the properties of railway capping layer soil. *Computers and Geotechnics*, 35 (5), 2008, p. 719-728.
- Reiffsteck P., Arbaut J., Sagnard N., Khay M., Subrin D., Chapeau C., Levaucher D. – Mesures en laboratoire du comportement mécanique des sols hétérogènes. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 268-269, 2007, p. 59-81.
- RFF, SYSTRA, SNCF – Planches d'essais/références. Matériaux de sous-couches issus des carrières Rivat et Vincent, 2008.
- SNCF – ST n° 590B. Spécification technique pour la fourniture des granulats utilisés pour la réalisation et l'entretien des voies ferrées, 1995.
- SNCF – IN 0259. Conception, réalisation et entretien : des ouvrages de drainage et l'écoulement, des structure d'assise et des plates-formes. Référentiel Infrastructure, 1996a.
- SNCF – IN 0260. Structure d'assise. Référentiel Infrastructure, 1996b.
- SNCF – EF 2 C 34. Grandes opérations programmées de voie courante (GOP). Préparation. Référentiel infrastructure, 2004.
- SNCF – IN 3278. Référentiel technique pour la réalisation des LGV, partie génie civil. Référentiel Infrastructure, 2006.
- Xu W.J., Hu R.L., Tan R.J. – Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in the Hutiao Gorge area, China. *Géotechnique*, 57 (3), 2007, p. 255-264.