

Caractérisation de la couche intermédiaire

dimensionner à minima la chaussée et de venir intervenir dessus si les conditions de trafic évoluent. Cette analyse technico-économique est également rendue possible par le fait qu'il est plus facile d'intervenir sur un réseau routier que sur le réseau ferroviaire. Les impacts sur les circulations étant moins importants de par le caractère étoilé du réseau routier. L'autre point important dans le dimensionnement est la prise en compte des sollicitations. Dans le ferroviaire, les sollicitations sont prises égales à 22,5 t/e et ce quel que soit le convoi qui circule sur la ligne. À titre d'exemple, un TGV à une charge à l'essieu de 17 t, les voitures corail de 13 t. seul les trains frets et les locomotives peuvent avoir une charge à l'essieu maximale de 22,5 t. notons qu'ici on n'intègre pas la charge maximale de 25 t/e définie par l'UIC, car à ce jour aucune ligne en France ne fait circuler ce tonnage. Or, le dimensionnement routier intègre la notion d'agressivité du matériel roulant (Coefficient d'Aggressivité du Matériel – CAM). Cela permet en fonction du type de circulation (charge, nombre d'essieux...) d'estimer si celui-ci sera plus ou moins agressif pour la structure et donc adapter le dimensionnement au plus juste.

Un autre point important est le type de sollicitation appliqué à la structure. Dans le cadre d'une chaussée routière, celle-ci est sollicitée directement par les roues des véhicules et de façon continue. Si l'on étudie ce qui se passe au niveau de la voie ferrée, la charge est appliquée au rail qui la transmet à la traverse, qui est ensuite diffusée à la base de la structure de chaussée par le ballast. Cette transmission des efforts est ainsi dépendante de plusieurs facteurs qui sont l'inertie du rail, l'espacement entre traverses, le type de traverses et le principe de diffusion des charges au sein du massif de ballast. Il est donc plus difficile d'appréhender de façon exacte le niveau de sollicitation à la base de la structure ferroviaire que pour une chaussée routière.

Le chapitre précédent a présenté la méthode de dimensionnement des structures d'assises de lignes nouvelles, qui utilise des matériaux de carrière bien définis (SNCF, 1995). Comme présenté dans le chapitre 1, ces structures ne représentent que 6% du linéaire du réseau national, les 94% restant étant formé par interpénétration entre les fines du sol support et le ballast. Cependant, dans la grande majorité, ces lignes ne présentant pas de défauts structurels. Il est donc nécessaire de caractériser mécaniquement la couche intermédiaire et de faire un parallèle avec la sous-couche qui constitue maintenant nos voies pour mieux comprendre le rôle de la CI dans le comportement de la voie ferrée.

Les résultats sur la couche intermédiaire présentés ici sont issus des travaux de Trinh (2011) qui fut le premier à étudier le comportement hydromécanique des plateformes sans drainage sur les lignes classiques françaises.

Les matériaux utilisés pour ces essais ont été prélevés dans le déblai de Sénissiat sur le chantier ferroviaire Bourg-en-Bresse à Bellegarde (Trinh 2011, Calon 2011). Au total, quatre prélèvements ont été réalisés (à emplacements distincts) permettant de réaliser une stratigraphie (Chapitre I) de la structure d'assise type rencontrée sur sol meuble. Cette coupe a permis de dissocier trois 'formations différentes'. La première est la formation constituant le sol support. La troisième est la couche intermédiaire proprement dite formée par l'interpénétration des fines du sol support dans le ballast. Enfin entre ces deux couches se trouve la couche de transition qui est constituée 'à parts égales' de sol support et de ballast.

Seuls trois prélèvements ont pu être utilisés pour la réalisation des différents essais. Le quatrième prélèvement mêlait des éléments du sol support, non représentatifs du matériau de couche intermédiaire.

Identification du matériau en laboratoire

Les prélèvements effectués sur le site de Sénissiat ont fait l'objet des essais d'identification suivants : analyse granulométrique, analyse minéralogique, détermination des limites d'Atterberg et de la valeur au bleu de méthylène.

Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet d'étudier la distribution de la taille des grains solides constitutifs du sol. Pour le sol intermédiaire, quatre essais ont été réalisés sur les différents prélèvements. Les deux premiers (SI-1 & SI-2) ont été réalisés sur le sol prélevé manuellement afin de déterminer la densité in situ selon la méthode à la membrane. Les deux autres échantillons (SI-3 & SI-4) ont été pris sur un prélèvement en grande masse réalisé mécaniquement. Les courbes granulométriques obtenues sont présentées sur la Figure II.11. On observe que ces courbes obtenues à partir des deux séries de prélèvements, distants de 120 m, sont similaires.

Ces premiers résultats montrent que la constitution du sol intermédiaire pour les éléments supérieurs à 1mm est sensiblement la même que le matériau de sous couche (Figure II.12). Pour les particules fines, il contient environ 21 % de particules inférieures à 80 µm. Si nous le comparons au seuil admissible pour une sous-couche (4 à 8 %) (SNCF, 1995), nous constatons que nous sommes largement au-dessus de celui-ci, mais bien inférieurs au seuil défini par le GTR ou la norme NF P11-300 (AFNOR, 1992) qui définit la limite avec un sol fin, par une proportion de fines inférieure à 35 %.

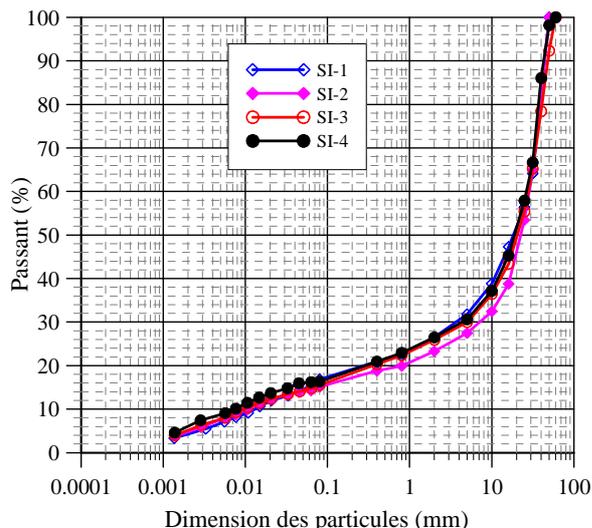


Figure II.11 : Courbes granulométriques du sol de la couche intermédiaire de Sênissiat (Trinh, 2011)

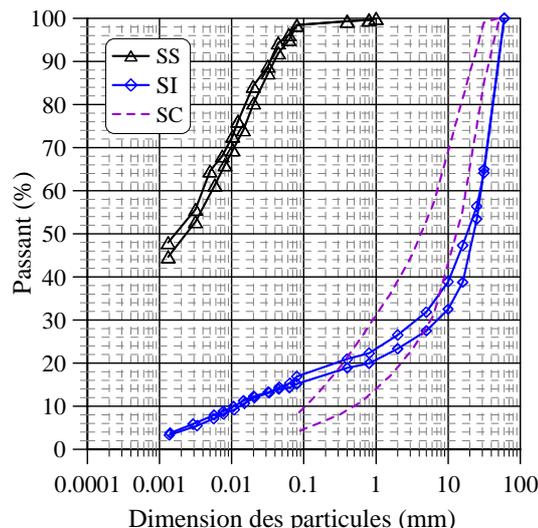


Figure II.12 : Courbes granulométriques du sol support (SS), du sol intermédiaire (SI) du site de Sênissiat et de la sous-couche (SC - Trinh, 2011))

A partir des courbes granulométriques du sol de la couche intermédiaire (Figure II.11), les coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c) du sol de la couche intermédiaire sont déterminés comme le montre le Tableau II.9.

Tableau II.9 : Coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c) du sol de la couche intermédiaire (Trinh, 2011)

| Sol | d_{10} (mm) | d_{30} (mm) | d_{60} (mm) | C_u | C_c |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|-------|-------|
| Couche intermédiaire | 0,01 | 5 | 30 | 3 000 | 83 |

Deux granulométries ont été réalisées sur la couche de transition (sol mélangé (SM)), et comparées avec les essais sur SI (Figure II.13). On observe que ces courbes se trouvent légèrement au-dessus des courbes du sol intermédiaire, montrant ainsi que le sol mélangé contient une part plus importante de fines du sol support. Un troisième essai (SM-3) a été réalisé pour vérifier l'influence des fines sur le fuseau granulométrique de la couche de transition. Les mottes d'argile présentes dans l'échantillon ont donc été enlevées. La courbe résultante est identique à celle du sol intermédiaire (Figure II.13). Ainsi, on peut conclure que la différence entre les courbes granulométriques des couches de transition et intermédiaires est due à la présence des mottes d'argiles provenant du sol support.

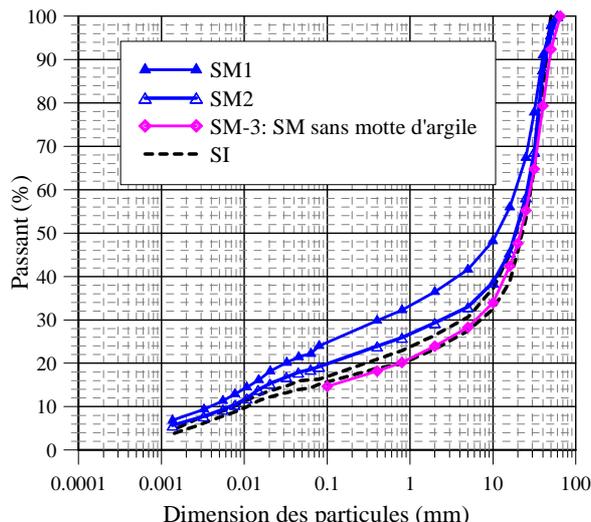


Figure II.13 : Courbes granulométriques du sol mélangé (SM) et du sol intermédiaire (SI - Trinh, 2011))

Détermination des limites d’Atterberg et la Valeur au Bleu de Méthylène (VBS)

Cet essai permet de définir, pour un sol, la limite de liquidité (w_L) et la limite de plasticité (w_P). Les résultats sont présentés dans le Tableau II.10. Ces différents essais réalisés sur le sol support (SS), le sol intermédiaire (SI) et le sol de transition (SM) montrent 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. Ainsi, selon le diagramme de Casagrande (Figure II.14), 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 et ont un indice de plasticité égal respectivement à 11 et 15.

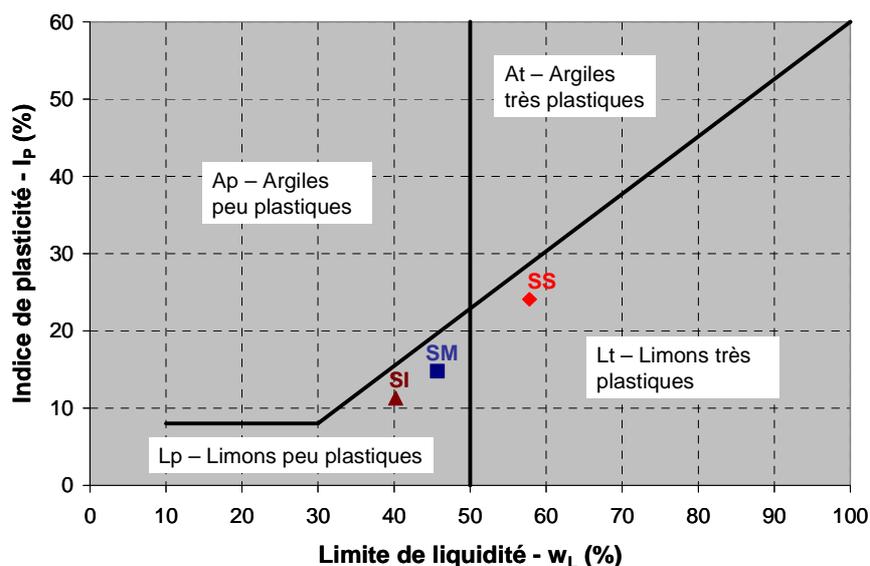


Figure II.14 : Diagramme de CASAGRANDE (Trinh, 2011)

L'essai au bleu de méthylène 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 (AFNOR, 1992). Les résultats sont présentés dans le Tableau II.10.

Tableau II.10 : Limites d'Atterberg et Valeur de Bleu de Méthylène (Trinh, 2011)

| Type de sol | Fraction fines (<100µm) (%) | Limite de liquidité w_l (%) | Limite de liquidité w_p (%) | Indice de plasticité I_p | VBs ($\emptyset < 100\mu\text{m}$) (g) |
|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Sol mélangé sans motte d'argile (SM) | 20 | 45,7 | 30,9 | 14,8 | 3,67 |
| Sol intermédiaire (SI) | 18 | 40,2 | 28,9 | 11,3 | 3,58 |
| Sol Support (SS) | 98 | 57,8 | 33,7 | 24,1 | 6,23 |

Les résultats obtenus par l'essai au Bleu permettent de mettre en évidence que le sol support correspond, selon la norme NF P 11-300 (AFNOR, 1992), à un sol argileux (VBs=6.23g). Quant aux valeurs du sol de transition et du sol intermédiaire (SI), les valeurs de bleu des fines (<100 µm) 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 (SETRA, 1992). A titre de comparaison, la valeur au bleu pour une sous-couche doit être inférieure à 0,1g soit un sol ne contenant pas ou très peu de particules argileuses et qui est par conséquent insensibles à l'eau.

Ainsi, les résultats de ces essais (I_p & VBs) et la classification GTR permettent d'attribuer au sol intermédiaire un classement de sol en A2 qui correspond à une argile peu plastique.

Essai de compactage

Les propriétés de compactage du sol intermédiaire sont étudiées par le biais de l'essai Proctor Modifié suivant la norme NF P94-093. Le moule CBR et la dame Proctor modifiée ont été choisis du fait de la présence d'éléments de grande taille ($D_{\text{max}}=63$ mm). Afin de se conformer à la norme, le sol a été écrêté à 20 mm et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure II.15.

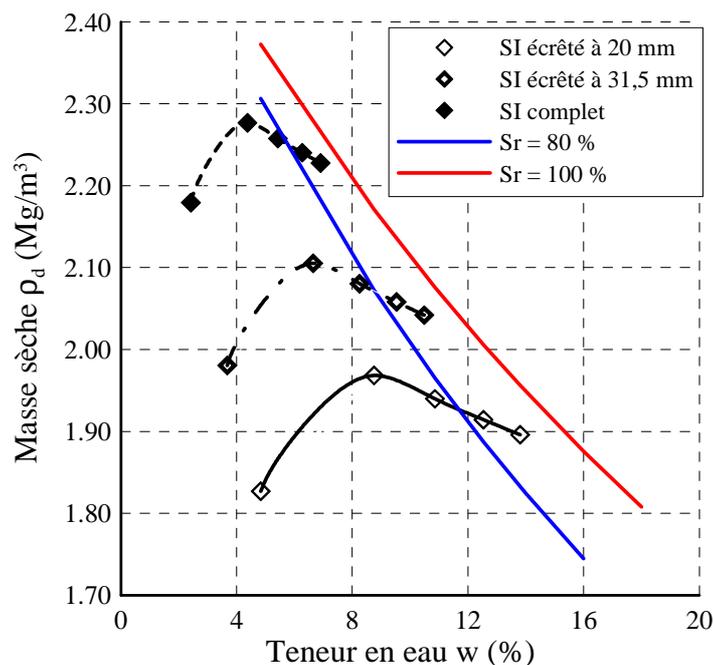


Figure II.15 : Courbe de compactage proctor modifié (Trinh, 2011)

La courbe obtenue après corrections est présentée sur la Figure II.15 pour le sol intermédiaire. On note néanmoins que ce sol contient plus de 30 % d'éléments supérieurs à 20 mm (environ 50 %, Figure II.13). En théorie, selon la norme, les conditions pour appliquer les corrections ne sont pas vérifiées. C'est pourquoi on a reporté sur la Figure II.15 la courbe correspondant au sol intermédiaire écrêté à 31,5 mm. L'extrapolation des caractéristiques de compactage a été possible en se référant à la norme NF P98-125 (AFNOR, 1994). Cette fraction 0-31.5mm correspond à celle de la sous-couche mise en œuvre sur les lignes à grande vitesse et à celle des graves non traitées utilisées en fondations routières.

À partir des courbes présentées sur la Figure II.15, la densité sèche maximale (ρ_{dmax}) ainsi que la teneur en eau optimale (w_{OPM}) sont déterminées pour chaque type de sol (SS, SM, SI). Les valeurs présentées dans le

Tableau II.11 permet une analyse comparative entre le matériau à l'état naturel (in situ) et celui reconstitué en laboratoire. Ces résultats montrent que la densité maximale obtenue en laboratoire sur un sol intermédiaire non écrêté est de $2,28 \text{ Mg/m}^3$. Cette valeur est sensiblement inférieure à la densité sèche mesurée en place ($2,39 \text{ Mg/m}^3$). Cette différence peut s'expliquer par la façon dont la densification a été obtenue. La sous-couche reconstituée en laboratoire a été compactée à l'aide d'une dame proctor modifiée dont l'énergie de compactage ne peut être comparée avec une sollicitation

ferroviaire qui s'est exercée pendant un siècle et demi et dont la charge à l'essieu n'a cessé d'augmenter (22.5T/essieu actuellement). Ces résultats confirment que la densité de la couche intermédiaire en place est plus importante (5-10 %) que celle obtenue en laboratoire.

Tableau II.11 : Comparaison de la densité et teneur en eau obtenue en laboratoire et en place (Trinh, 2011)

| Sol intermédiaire | En laboratoire | | In situ | | ρ_d / ρ_{dmax} (%) |
|-------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------|----------------------------|
| | ρ_{dmax} (Mg/m ³) | W _{OPM} (%) | ρ_d (Mg/m ³) | w (%) | |
| Ecrêté à 20mm | 1,97 | 8,8 | 2,16 | 10,3 | 109,6 |
| Ecrêté à 31,5mm | 2,11 | 6,7 | 2,23 | 8,6 | 105,7 |
| Complet | 2,28 | 4,4 | 2,39 | 5,1 | 104,5 |

Lors du chantier de 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 (RFF et al., 2008). L'objectif de ces planches d'essais est de définir les modalités (vitesse, nombre de passe du matériel) de compactage permettant d'atteindre une densité q_1 qui est acquise lorsque 95% des valeurs de compacités sont supérieures à 100% de la densité OPM. L'analyse de ces résultats permet de définir l'état de compacité réel obtenu après travaux et ainsi situer nos valeurs d'OPM obtenues en laboratoire avec des valeurs pratiques.

Deux matériaux ont été testés sur cette planche d'essai. Le premier issu de la carrière de RIVAT a une densité sèche de 2,40 Mg/m³ soit 100,4 % de l'OPM. Le second matériau, appelé « Vincent », a des caractéristiques sensiblement identiques à celles de la carrière de RIVAT soit une densité sèche de 2,39 Mg/m³ correspondant à un 100 % de l'OPM. Nous pouvons conclure que la densité sèche de la couche intermédiaire mesurée en place (2,39 Mg/m³) est la même que celle obtenue lors des planches d'essai. Ainsi, il est possible d'obtenir les mêmes valeurs obtenues à l'OPM et celles mesurées in situ à condition d'utiliser du matériel de compactage adapté (type V5).

C. Synthèse

Le présent chapitre a permis de justifier le dimensionnement actuel des structures d'assises au travers des modélisations menées par Profillidis. Par ailleurs, le parallèle présenté entre le dimensionnement ferroviaire et routier montre deux approches différentes en termes d'objectif de durabilité, à savoir une approche probabiliste pour le domaine routier et de performance sur un siècle pour le ferroviaire. En confrontant ces méthodes, on voit comment le dimensionnement probabiliste

pourrait être appliqué au dimensionnement des structures ferroviaires existantes, et donc comment une structure donnée pourrait supporter une augmentation de trafic (charge ou vitesse). En tout cas, il est primordial de bien connaître le niveau de sollicitation appliqué à la structure. Pour une chaussée routière, celle-ci est sollicitée directement par les roues des véhicules et de façon continue. En revanche pour la voie ferroviaire, la charge est appliquée au rail qui la transmet à la traverse, qui est ensuite diffusée à la base de la structure de chaussée par le ballast. Cette transmission des efforts est ainsi dépendante de plusieurs facteurs qui sont l'inertie du rail, l'espacement entre traverses, le type de traverse et le principe de diffusion des charges au sein du massif de ballast. Il est donc plus difficile d'appréhender le niveau de sollicitation à la base de la structure ferroviaire que pour une chaussée routière. Cependant, les travaux menés par Lamas-Lopez (2016) permettent d'apporter certains éléments de réponses.

La présentation des travaux de Trinh (2011) a mis en évidence qu'une couche intermédiaire prélevée sur le site de Sénissiat avait plus ou moins les mêmes caractéristiques qu'une sous-couche de LGV, malgré un processus de création long de 150 ans. Ces deux matériaux ont un fuseau granulométrique et une densité d'OPM relativement proche. Ces premiers résultats peuvent donc être des prémices d'explication justifiant le bon fonctionnement de certaines de ces structures historiques.

La seule observation que la couche intermédiaire ait les mêmes propriétés qu'une sous couche n'est pas suffisante pour déterminer si cette structure pourra résister aux surcharges ferroviaires. Ainsi, on met en évidence dans le cadre de ce chapitre les limites actuelles en termes de connaissance et compréhension du fonctionnement de la couche intermédiaire face aux sollicitations ferroviaire. Il est donc nécessaire d'approfondir nos connaissances en menant une réflexion sur les sujets suivants :

- Comment par la géophysique, on peut mieux caractériser le comportement mécanique du sol support et de la couche intermédiaire
- Comment intégrer l'effet de sollicitations hétérogènes (trains voyageurs, trains FRET, train étranger...) sur la dégradation de la structure d'assise et ainsi comment appliquer la loi de Dormon au domaine ferroviaire.
- Enfin, il convient d'étudier le comportement dynamique de la couche intermédiaire face aux sollicitations ferroviaires. Pour cet item, des éléments de réponse seront apportés dans le chapitre 5 grâce aux travaux menés par Lamas-Lopez (2016).