
LA GENESE DE LA COUCHE INTERMEDIAIRE

Comme on a vu précédemment (Chapitre I), la Couche Intermédiaire (CI) assure, vis-à-vis du sol support ou de la plateforme de terrassement, la répartition des charges, en complément du ballast et de la traverse. Elle permet d'assurer la séparation granulométrique, évitant la pollution du ballast par des fines, et la protection du sol support vis-à-vis des eaux de pluie et du gel. De plus, la formation de cette couche est dépendante de l'histoire de la ligne et du matériau de ballast utilisé lors de sa construction. Cependant, ce sont bien les propriétés du sol support qui jouent un rôle primordial dans la formation de la CI, que ce soit en terme de densité ou de capacité de séparation entre le sol support et le ballast.

Ce chapitre vise à montrer comment l'attrition du ballast joue un rôle dans la genèse de la couche intermédiaire et comment la qualité (pourcentage de fines et densité) du sol support conditionne la formation de celle-ci.

A. La dégradation du ballast

Précédemment nous avons mis en évidence que la couche intermédiaire est un mélange de sol support, du ballast et des fines issues de sa dégradation. Cette partie s'attachera à présenter la genèse de la couche intermédiaire en faisant un historique du ballast utilisé en voie, à démontrer l'impact des circulations et des opérations d'entretien sur la dégradation du ballast. Enfin, on conclura par l'analyse chimique de la couche intermédiaire de Sénissiat qui permet de confirmer que cette structure est formée par l'interpénétration du ballast et du sol support, mais également des produits issus de la dégradation du ballast.

1. Les ballasts utilisés au cours du temps

Historiquement, le ballast mis en œuvre lors de l'édification des lignes était des pierres dures concassées, dont les gisements étaient situés à proximité du chantier. En effet, les critères de sélection de l'époque n'imposaient pas de dureté minimale ni de fuseau granulométrique homogène, bien que le ballast doive être assez dur pour résister aux chocs provoqués par les charges roulantes et pour supporter les effets des actions de bourrage. Un ballast tendre ou poreux se désagrège rapidement, il absorbe l'humidité qui retient des poussières et des corps étrangers et ainsi perd son comportement frottant. C'est pour cela qu'historiquement différents types de roches ont été utilisées chacune dans des conditions différentes. On peut citer par exemple :

- Les roches sédimentaires : seules les formations primaires sont utilisées, car elles constituent des pierres suffisamment dures pour constituer un ballast de bonne qualité. Ces produits sont fragiles et se fendent dans le sens de la stratification et pour les roches calcaires celles-ci s'altèrent par dissolution. Néanmoins, les roches siliceuses (grès, quartzites) résistent bien aux altérations liées à des agents atmosphériques.

- Notons qu'actuellement l'homologation de carrières de ballast de calcaires durs est en cours à la SNCF, car cette roche répond aux critères définis par la norme NF EN 13450 (AFNOR, 2003). Cependant, il sera nécessaire de vérifier l'impact des fines issues de l'attrition de ce produit et vérifier qu'elles n'engendrent pas un ciment qui aurait pour effet de lier les particules de ballast et d'empêcher les opérations de bourrage.

- Les graviers : il se compose de cailloux roulés, qui peuvent être concassés dans de rare cas, car cette opération rendait le matériau plus couteux. Généralement, le gravier issu d'anciennes rivières contenait plus de fines que celui issu de gravière, ce qui nécessitait de le laver pour le rendre exempt de fines argileuses. Cependant la forme roulée du matériau rendait les opérations de bourrage inefficaces, car les graviers « roulaient » les uns sur les autres (absence de friction).

- Les roches volcaniques : avant d'être généralisées sur le RFN, ces roches étaient déjà utilisées à la fin du XIXe siècle. Leurs caractéristiques en termes de compacité, de densité, d'absence de porosité, mais également le fait qu'elles soient non gélives et qu'elles résistent parfaitement aux agents atmosphériques, ont largement contribué à leurs utilisations.

- Enfin, sur les lignes situées à proximité des mines, il n'était pas rare de trouver des produits issus des hauts fourneaux. Ces laitiers concassés remplissaient pleinement le rôle du ballast du fait des arêtes vives. Cependant, la présence de chaux dans le laitier le rendait fragile et faisait qu'il se délitait sous l'effet cumulé des sollicitations mécaniques induites par les circulations et du climat.

2. L'impact des circulations et du bourrage sur la dégradation du ballast

La qualité mécanique du ballast est essentielle pour que celui-ci résiste aux différentes sollicitations mécaniques qui sont le trafic et les opérations de maintenance. Différents travaux ont étudié l'influence de ces paramètres sur la dégradation du ballast. Parmi ceux-ci, je présenterai les études menées sur le réseau ferroviaire français (Perales, 2010) et suisse (Paderno, 2010).

a. Etude de la dégradation du ballast sur le réseau français

Des premiers travaux sur la dégradation du ballast ont été menés par Lecocq (REF, 1985), dans le but de quantifier l'évolution du pourcentage de fines produites en fonction du chargement, et ce pour différents matériaux de ballast. L'objectif final de cette étude était de déterminer un état de pollution du ballast qui rendait les opérations de maintenance inefficaces. Les conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont que : la production de fines est dépendante de la dureté du matériau ballast ; les fines résultantes de l'usure de la traverse peuvent représenter jusqu'à 4% de la totalité des fines produites ; enfin, le colmatage total du ballast est atteint pour un pourcentage de fines (<1,6mm) de 12,5%. De ces travaux, Lecocq a proposé des abaques de dégradation du ballast en fonction de la qualité du matériau et de la classe de trafic de la ligne (Figure III.1). Dans ce graphique, la DRG renseigne la dureté globale du ballast, qui permet de prendre en compte la dispersion des qualités de dureté (DR) du matériau définie par :

- La résistance à l'usure par frottement des grains entre eux (essai d'attrition DEVAL Sec (DS) et Humide (DH))
- La résistance aux chocs des grains de ballast entre eux (essai de fragmentation Los Angeles)
- La valeur DR retenue (obtenue à l'aide d'un abaque) est la plus petite des DRs et DRh (respectivement sec et humide). Ainsi la dureté globale DRG est évaluée statistiquement, elle équivaut à la plus petite des deux valeurs suivantes :
 - $\overline{DR} - 0.5\sigma_{DR}$ (moyenne des DR – ½ écart type)
 - $DR_{mini} + 2$ (Plus faible valeur de DR + 2)

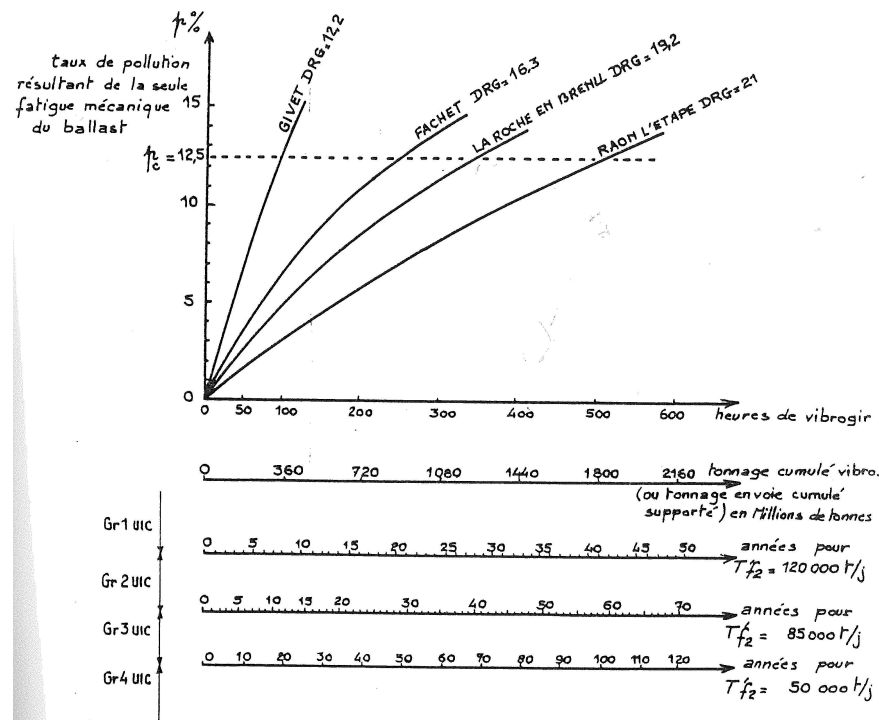


Figure III.1 : Usure des différents ballasts sur des voies de trafic divers :
attrition résultante de la fatigue mécanique (1985, Lecocq)

En 2010, Perales (2010) a réalisé une étude sur la dégradation du ballast de LGV (granulométrie 31,5/50 mm, de la carrière de Montaute (58)). L'objectif de ces travaux était de voir l'impact indépendamment l'influence des opérations de maintenance et des circulations ferroviaires sur la dégradation du ballast. Pour l'étude de l'impact des circulations sur le matériau ballast, Perales a simulé à l'aide du vibrogir (banc d'essai reproduisant le chargement ferroviaire) jusqu'à 20 années de circulation d'un essieu de 17,5 T, correspondant à un trafic cumulé de 240 millions de tonnes. Des échantillons de ballast ont été prélevés à intervalle régulier pour quantifier la dégradation du ballast en termes de production de fines et de fragmentation des grains, et ce en fonction de l'historique de chargement. Cet essai montre que la production de fines (<25mm) est importante au début des sollicitations et que celle-ci stagne à mi-vie de sollicitation (Figure III.2). De ce test, un ratio de production de fines par rapport au trafic cumulé a été établi. Ainsi pour une ligne LGV, circulée par des trains de 17,5T/essieux, la production moyenne de fines (<25mm) est estimée à 170 g/MT.

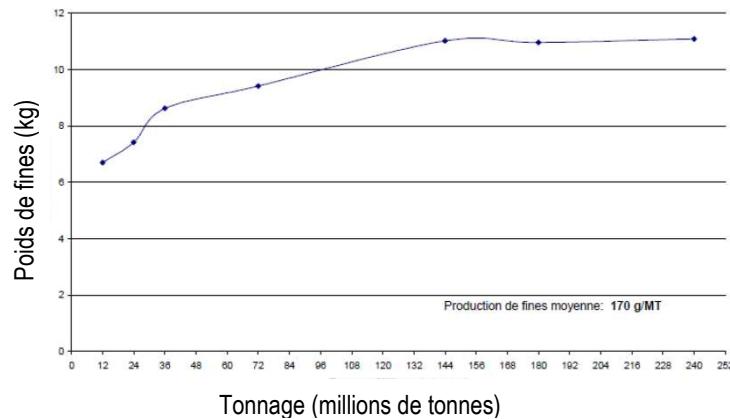


Figure III.2: Evolution de la production de fine en fonction du tonnage (Perales, 2010)

Toujours dans le cadre de cette recherche, l'influence du bourrage a été étudiée. Celle-ci a été faite sous deux approches différentes, la première a consisté à regarder l'effet de la vitesse de plongée des bourroirs sur la dégradation des grains et dans un second temps à regarder l'effet du serrage. L'effet de la vitesse de plongée a été étudié, en laboratoire, sur une plage de vitesse de 1 à 2 m/s. L'essai a consisté à faire pénétrer une pioche dans un échantillon de ballast cylindrique de 80 cm de haut pour 38 cm de diamètre. Il en ressort qu'après 30 plongées à 1 m/s, le pourcentage de fines produites par l'impact des bourroirs est compatible avec les spécifications de la norme. Lorsque les pioches sont enfouies dans le ballast à une vitesse de 2 m/s, on note une dégradation beaucoup plus importante des grains de ballast et le fuseau granulométrique du ballast sort de la norme à partir de 15 plongées, pour les particules inférieures à 25mm. La Figure III.3 montre l'effet de la vitesse de pénétration des bourroirs dans le ballast. Ce graphique met en évidence que la dégradation du ballast se fait soit par usure des grains soit par cassure. Cependant, on constate qu'à partir d'une vitesse de plongée de 1,6 m/s, c'est bien la rupture des grains qui prédomine comme mécanisme de dégradation.

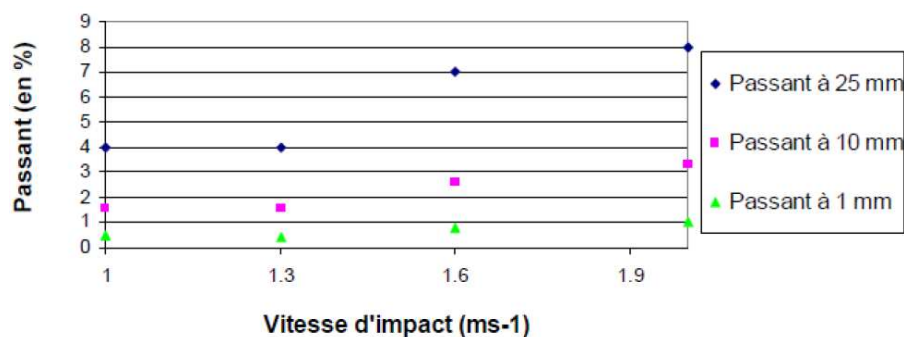


Figure III.3 : Evolution du passant après 30 plongées de bourroir (Perales, 2010)

Concernant l'effet même du bourrage, celui-ci a été étudié in situ sur une portion de voie située à Arras. L'expérimentation a consisté à déposer 20 mètres de voie et la faire reposer sur du ballast contenu dans des big bag. L'objectif était que les fines produites par les opérations de bourrage soient contenues dans les sacs et qu'elles puissent être analysées. Le bourrage de cet élément de voie a été réalisé par une bourreuse de LGV constituée de deux blocs bourroirs. Chaque élément de traverse a été bourré de 5 à 45 fois pour voir l'effet de cette opération. La Figure III.5 montre la répartition granulométrique de grains de ballast après 45 cycles de bourrage. On note que cette opération de maintenance a un impact important sur l'augmentation du pourcentage de particules de diamètre inférieure à 50 mm résultant de la casse des gros grains de ballast.

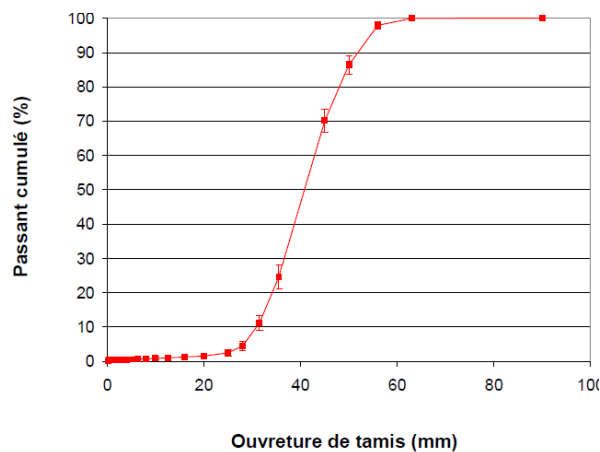


Figure III.4: Moyenne granulométrique du ballast de référence (Perales, 2010)

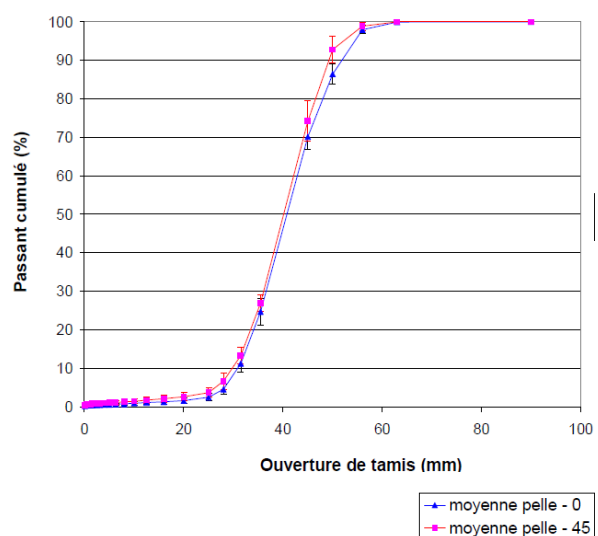


Figure III.5: Moyenne granulométrique du ballast après 45 bourrages (Perales, 2010)

b. Etude de la dégradation du ballast sur le réseau Suisse.

Paderno (2010) a quantifié l'impact des opérations de bourrage sur la dégradation du ballast, sur le réseau ferroviaire Suisse. Le ballast utilisé, lors de ces travaux, est un grès concassés contenant 25 - 30% de minéraux durs (quartz et calcite). La résistance à la fragmentation Los Angeles est de 11 à 15. Le granulat utilisé étant conforme à la norme Européenne EN 13450 et les conditions de trafic et de maintenance sont assimilables aux règles françaises ; la dégradation du granulat peut être considérée comme transposable à la dégradation de ceux mis en œuvre sur le RFN. Lors de son étude, Paderno a reproduit en laboratoire (Figure III.6) une portion de voie et l'a sollicité pour représenter vingt années d'une portion de voie circulée par des trains de 22T/e (correspondant à une ligne UIC 2). En parallèle,

des actions de maintenance corrective sur la géométrie de la voie ont été opérées. Après sollicitations, le châssis de voie a été déposé et la granulométrie de ballast analysée sous traverse et autour de celle-ci. Ce zonage permet d'estimer l'effet des sollicitations et des bourroirs sur la dégradation du ballast. Notons toutefois que le granulat situé entre traverses subit exclusivement l'action de plongée des bourroirs ; la sollicitation induite par les circulations étant moins importante, alors que les grains situés sous traverses subissent l'action cumulée du trafic et du bourrage mécanique.

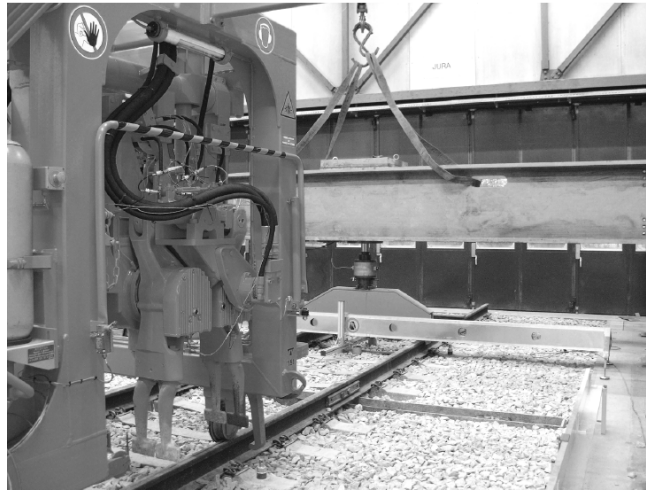


Figure III.6 : Dispositif d'essai – Bloc bourroir 1x et poutre de sollicitation (Paderno 2010)

La Figure III.7 montre l'influence du trafic et du bourrage sur la dégradation du ballast. Ainsi, la comparaison avec le ballast originel non sollicité permet d'observer une évolution granulométrique des granulats. Le décalage des courbes vers la gauche après sollicitation indique une diminution granulométrique des grains de ballast.

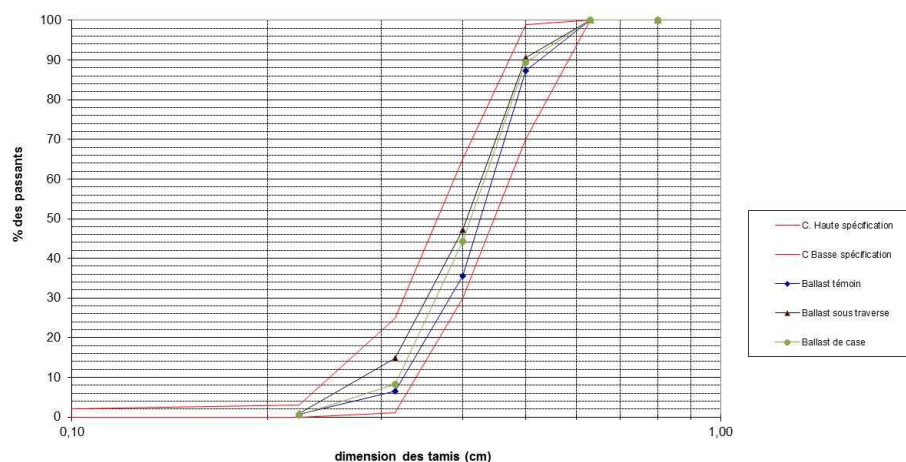


Figure III.7 : Courbes granulométriques du ballast avant et après sollicitations

Ce travail met en évidence deux points principaux :

- Le premier est que le ballast situé sous traverse est plus dégradé par celui situé dans les cases. Cela s'explique d'une part par la sollicitation du trafic ferroviaire, mais également par la fragmentation des grains suite à la mise en vibration des bourroirs.
- En second point, on peut noter l'impact de la plongée des bourroirs sur la modification granulométrique des ballasts. En effet, bien que moindre, la correction granulométrique du ballast situé en case est non négligeable.

c. Conclusion:

Ces travaux ont mis en évidence l'effet des circulations et des opérations de maintenance sur la dégradation du ballast. L'ensemble des auteurs met en évidence l'effet du bourrage sur la fragmentation des grains, dès les vingt premiers cycles de maintenance. Pour ce qui est de l'effet des circulations sur la production de fines, les travaux de Perales ont mis en évidence, dans le cas d'une LGV, la production de 170 g de fines par million de tonnes circulées. Ces informations confirment donc l'apport des produits de dégradation du ballast dans la constitution de la couche intermédiaire. Cependant il est nécessaire de procéder à une analyse minéralogique des fines de la couche intermédiaire pour justifier cette hypothèse en regardant notamment leur nature pétrographique. Ces travaux d'identification ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Trinh (2011), sur la couche intermédiaire de Sénissiat et sont présentés dans le paragraphe suivant.

3. Analyses minéralogiques

Afin de comprendre l'origine des fines dans la couche intermédiaire, la minéralogie des particules inférieures à 100 μm du sol intermédiaire et du sol support a été analysée par diffraction aux rayons X. L'objectif étant de voir si la nature des fines était en tout point identique à la géologie du site ou si des minéraux étrangers étaient présents. L'identification de la nature minérale des minéraux non argileux (de tailles comprises entre 2 μm et 100 μm) du sol support a montré que celui-ci contenait majoritairement du quartz. Pour ce qui est de la couche intermédiaire, elle contenait les mêmes minéraux avec une proportion de quartz plus importante (de 5 à 6%). Une analyse au calcimètre (AFNOR, 1996a) 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. Concernant les gros éléments du sol intermédiaire, les graviers compris dans l'intervalle 25-50 mm sont lavés puis séparés en trois catégories (Figure III.8) :

- galets roulés (8%) qui ne proviennent pas de la couche de ballast actuel ;
- ballast blanc (82%) contenant 100% de carbonate selon l'analyse au calcimètre ;
- ballast noir ou gris (10%), plus rigide que le ballast carbonaté, contenant 17% de carbonate.

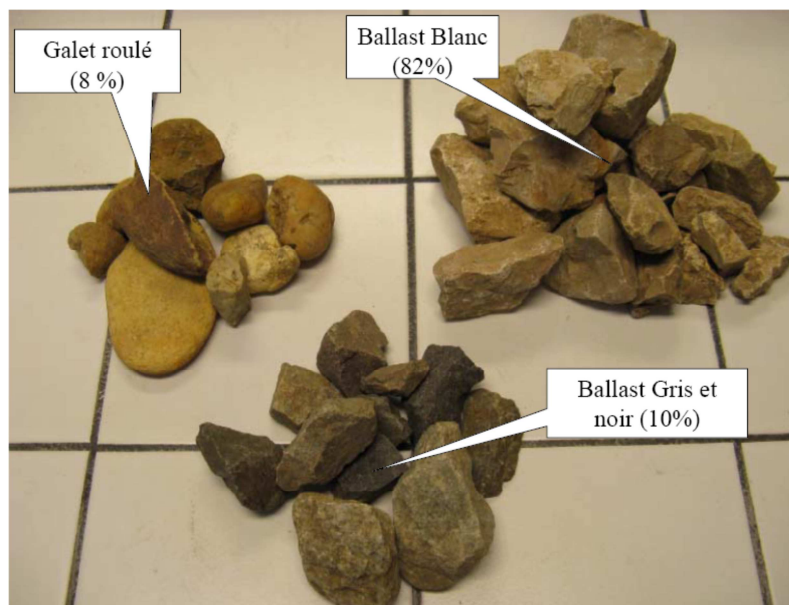


Figure III.8 : Graviers de 25 à 50 mm du sol intermédiaire (Trinh 2011)

Ces essais montrent que les particules fines de la couche intermédiaire proviennent simultanément de l'attrition du ballast et des fines du sol support, d'une part du sol support à cause du phénomène d'interpénétration, et d'autre part de la dégradation du ballast (calcite et quartz) due au trafic des trains et à la maintenance. Pour ce qui est du mécanisme d'interpénétration, celui-ci est conditionné par l'état hydrique de la plateforme, et les sollicitations dynamiques générées par les trains qui permettent la pénétration des granulats de ballast dans le sol support (Kabir et al., 2006; Haque et al., 2007; Kamruzzaman et al., 2008 ; Indraratna et al., 2007). Ce mécanisme permet donc une densification du sol support originel pour créer une couche intermédiaire apte à recevoir de multiples sollicitations.

Le Tableau III.1 présente une synthèse de la composition de la couche intermédiaire. Les granulométries réalisées indiquent que ce sol est majoritairement constitué (42-48 %) de ballast (galet roulé ou roche concassée), auquel s'ajoute entre 5-10 % de granulats supérieurs à 50 mm (galets roulés, pierres cassées). Les granulats de taille de 0,08 — 25 mm représentent quant à eux 36-42 % des échantillons analysés, ceux-ci peuvent être du gravillon de soufflage (10 — 25 mm) qui était utilisé pour la correction manuelle du nivellement des voies (Alias, 1984), des produits de dégradation du

ballast, des sables et des produits de pollutions (attrition). Enfin, les fines ($< 80 \mu\text{m}$) représentent environ 16 % du volume total et les particules argileuses ($< 2 \mu\text{m}$) représentent 5 %.

Tableau III.1 : Composition du sol intermédiaire (Trinh 2011)

Composant	Taille (mm)	Pourcentage (%)
Pierres cassées & galets roulés	50/63	3/10
Ballast & galets	25/50	42/48
Micro ballast, sable, dégradation du ballast & produits d'usure	0,08/25	36/42
Fines, sable, produit d'usure	$< 0,08$	~ 16
Argile	$< 0,002$	~ 5

4. Conclusion

Cette partie met en lumière comment le ballast posé à même le sol support a permis de constituer au fil des décennies une couche intermédiaire apte à recevoir les circulations modernes. Ainsi, la qualité mécanique du ballast, le trafic cumulé sur la voie et les opérations de maintenance sont des paramètres qui ont contribué à la création de cette couche intermédiaire. Toutefois, il ne faut pas négliger la nature du sol support au niveau géologique et hydrique. L'importance du sol est historiquement démontrée par la mise en place de paillés, hérissons pour améliorer la qualité hydrique et la densité d'un sol médiocre. Cependant, sur certaines zones, bien que le sol semblait être satisfaisant pour construire dessus une voie de chemin de fer, à la longue aucune couche intermédiaire ne s'est formée et il a été, ou est nécessaire, de procéder à des travaux de plateforme pour renforcer certains tronçons.

Devant ce constat, on se posait la question sur ce qui permettait ou non la création d'une couche intermédiaire. Pour cela Duong (2013) a étudié le processus de formation de la couche intermédiaire, et les résultats de ces travaux sont présentés dans la prochaine partie.

B. Influence du sol support sur le mécanisme de création de la couche intermédiaire

Comme on a vu précédemment, la couche intermédiaire est formée par interpénétration des matériaux anthropiques (ballast, matériaux de soufflage ainsi que leurs produits de dégradation) et le sol en place. Ainsi, il est important de regarder l'influence du sol support dans la création de cette couche. Pour ce faire, Duong (2013) a travaillé sur un matériau modèle, en remplacement du sol support. Ce sol a été préparé à partir du sable de concassage et du kaolin (70% / 30% - Figure III.9),

appelé 70S30K. La matière employée dans cette étude contient un pourcentage élevé de fines (le passant inférieur à $80\ \mu\text{m}$ représente 95%), semblable aux sols rencontrés sur des sites présentant des défauts de remontées boueuses (Alobaidi et Hoare, 1996 ; Aw, 2007). De plus, ce mélange a également une courbe granulométrique semblable au limon de Jossigny, largement étudié par ailleurs (Fleureau et Indarto, 1995 ; Cui et Delage, 1996 ; Bouabdallah, 1998).

Cette étude repose sur l'analyse du comportement de l'interface ballast / matériau 70S30K compacté à trois densités sèches différentes : $1,4\ (\text{E1})$, $1,5\ (\text{E2})$ et $1,6\ \text{Mg/m}^3\ (\text{E3})$. La teneur en eau initiale a été fixée à 16%, correspondant à la valeur à l'OPM.

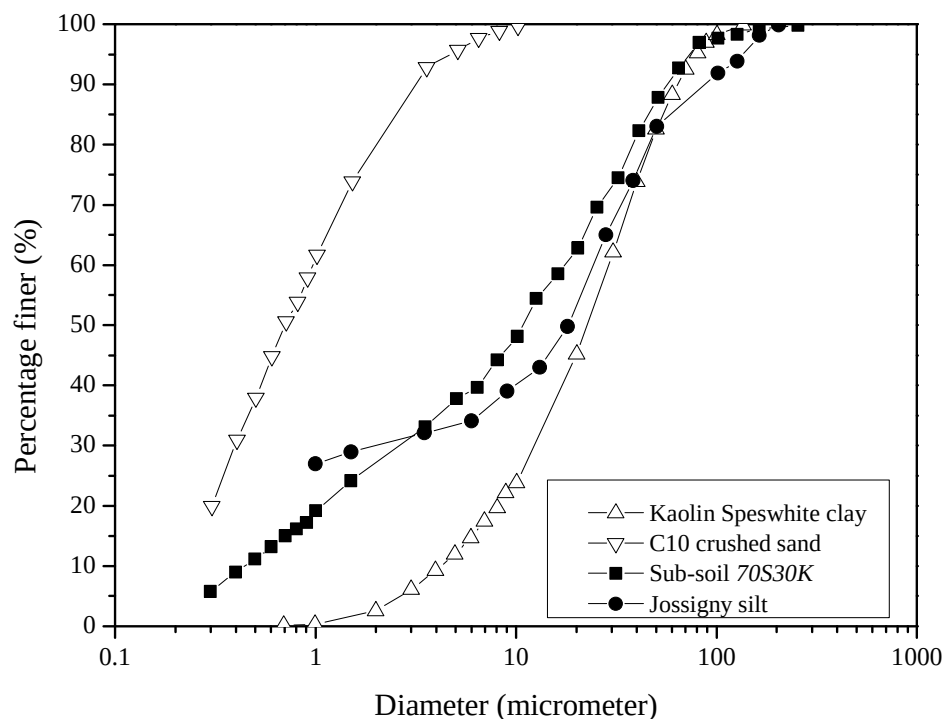


Figure III.9: Courbe granulométrique du sol reconstitué (Duong 2013)

1. Mécanisme de création de la couche intermédiaire

Les essais pour étudier la création de la couche intermédiaire sont réalisés sur un échantillon de 550 mm de diamètre pour une hauteur de 400 mm (Figure III.10), à la teneur en eau OPM (16%) et à une densité sèche de $1,78\ \text{Mg/m}^3$.



Figure III.10 : Cellule de modélisation de la formation de la couche intermédiaire (Duong 2013)

Après un préchargement permettant le réarrangement du ballast, et un précyclage à basse fréquence (0,1 Hz pendant 20 cycles ; 1 Hz pendant 50 cycles et 2 Hz pour 100 cycles), l'échantillon est chargé de 30 à 100 kPa à 5Hz pendant 500 000 cycles. Cette fréquence a été choisie, car elle est assimilable à la circulation d'un train à 100 km/h et l'effort appliqué (30 à 100 kPa) correspond aux sollicitations ferroviaires sur les voies françaises (Trinh, 2011). Au terme de cette étape, le sol support est saturé jusqu'à obtenir une lame d'eau de 20 mm au-dessus de l'échantillon de sol. L'objectif étant d'étudier le comportement d'un massif de ballast subissant la même procédure de chargement, qui repose sur un sol saturé en eau. La Figure III.11 présente les différentes étapes de chargement (Figure III.11a) appliqué à l'échantillon ainsi que les déplacements associés (Figure III.11b).

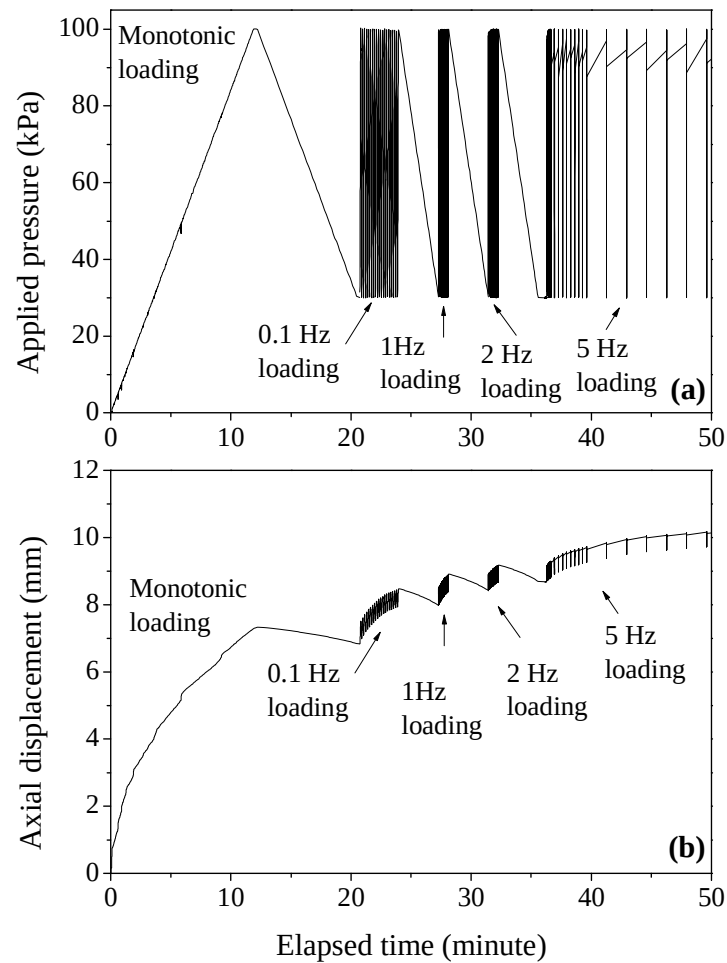


Figure III.11: Résultats types d'un préchargement ($w=16\%$; $\rho_{d-initial}=1,5\text{Mg/m}^3$ - Duong 2013)

2. Analyse du comportement à l'état non saturé

Si l'on regarde le déplacement axial du piston pour les trois densités de sol support (1,4, 1,5 et 1,6 Mg/m^3 - Figure III.12), l'on remarque que l'allure des trois courbes est identique, quelle que soit la densité du sol. Ainsi, nous observons une augmentation rapide des tassements, dus au réarrangement des grains de ballast, suivi par une phase de stabilisation. Cependant, la Figure III.12 met en évidence l'impact de la densité initiale du sol support sur les déplacements observés. Le premier constat est que les tassements observés lors de la phase de préchargement sont presque deux fois plus importants entre les échantillons E1 (1,4 Mg/m^3) et E3 (1,6 Mg/m^3). Cette différence de tassement du piston, ne peut pas être affecté uniquement à la stabilisation du ballast (celle-ci devrait être homogène quel que soit l'échantillon), mais également à la pénétration des particules de ballast dans le sol support lorsque la densité de celui-ci est faible. On identifie ici clairement l'effet du sol support dans le comportement du ballast.

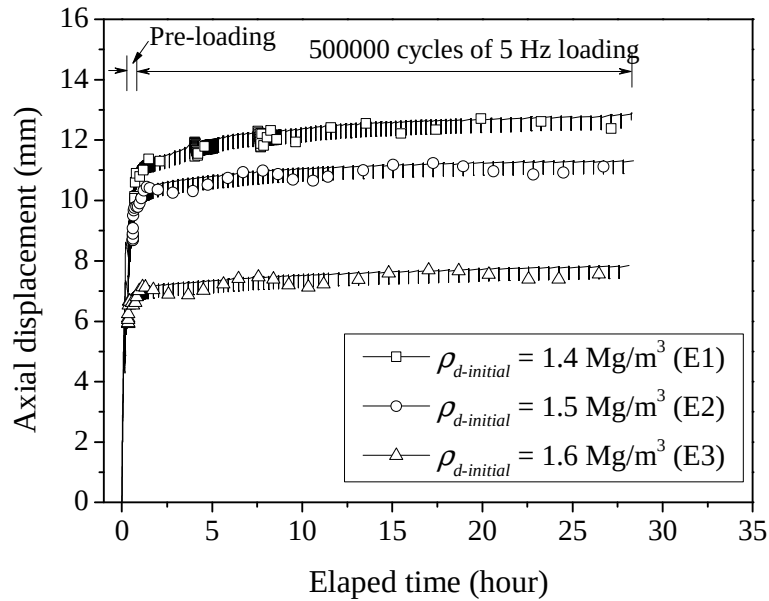


Figure III.12: Déplacement axial du vérin pendant le chargement (Duong 2013)

L'incrustation ballast à la surface du sol support doit avoir une influence sur la variation de teneur en eau volumique (θ) du massif de sol. La Figure III.13 met en évidence l'évolution de θ à trois profondeurs différentes. On note que θ augmente plus rapidement dans la zone proche de la surface ($=200\text{mm}$) par rapport à deux autres zones plus profondes. Cet accroissement est la conséquence de la densification du sol par l'effet cumulé de la pénétration du ballast dans le sol support et des chargements cycliques, occasionnant une diminution de l'indice des vides dans le sol et par conséquent une augmentation de la teneur en eau volumique.

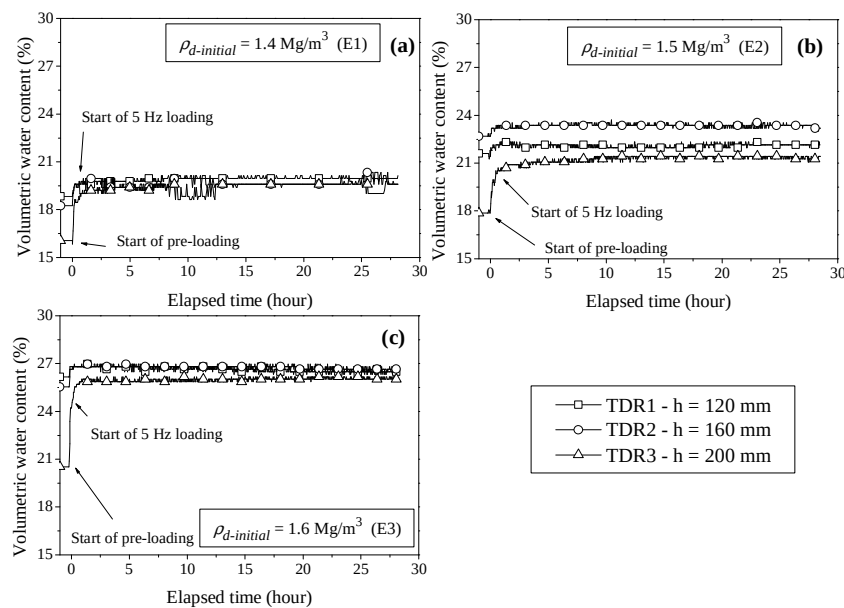


Figure III.13 : Evolution de la teneur en eau volumique pendant le chargement (à l'état non-saturé – Duong 2013)

3. Analyse du comportement à l'état saturé

A la fin des 500 000 cycles de chargement, le massif de sol est saturé pendant environ 20h. Cette phase (Figure III.14) se caractérise par une augmentation de la teneur en eau volumique jusqu'à une valeur proche de 38% et par une pression interstitielle nulle. Un décalage entre la saturation de l'échantillon est observé sur les Figure III.14a et Figure III.14b. Celui-ci s'explique par le fait que pour les sols fins, la migration de l'eau dans les macropores est rapide ; cependant, le temps pris pour remplir les micropores est relativement long (40 h).

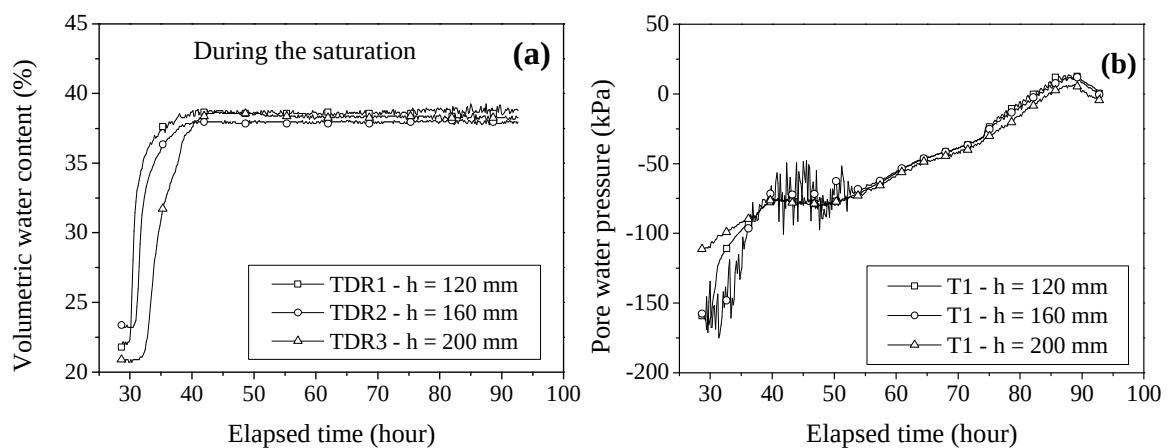


Figure III.14 : Résultat de saturation de l'échantillon de sol ($\rho_{d\text{-initiale}}=1,5 \text{ Mg/m}^3$ - Duong 2013)

Si l'on analyse le comportement des différents échantillons (E1, E2, et E3), on constate que le comportement de ceux-ci à l'état saturé dépend fortement de la densité du sol support. La Figure III.15 permet de regarder l'évolution du comportement de l'échantillon saturé ($\rho_{d\text{-initiale}}=1,4 \text{ Mg/m}^3$) en analysant la contrainte appliquée, la pression interstitielle, le déplacement du piston et la teneur en eau volumique (Figure III.15a, b, c et d). La Figure III.15c montre que le déplacement du piston augmente rapidement dès les premiers chargements cycliques et s'accompagne également d'une augmentation rapide de la pression interstitielle, avec des valeurs comprises entre 40 et 80 kPa, au bout de quelques secondes. Si l'on met en regard l'évolution de la pression interstitielle et la contrainte appliquée, on remarque que la contrainte effective (contrainte totale moins pression interstitielle) est négative à certain moment ce qui conduit à la liquéfaction du sol support qui favorise l'enfoncement du ballast et la remontée des fines. L'essai E1 a été interrompu au bout de 900 s, car le mécanisme de remontée boueuse a été considéré comme atteint.

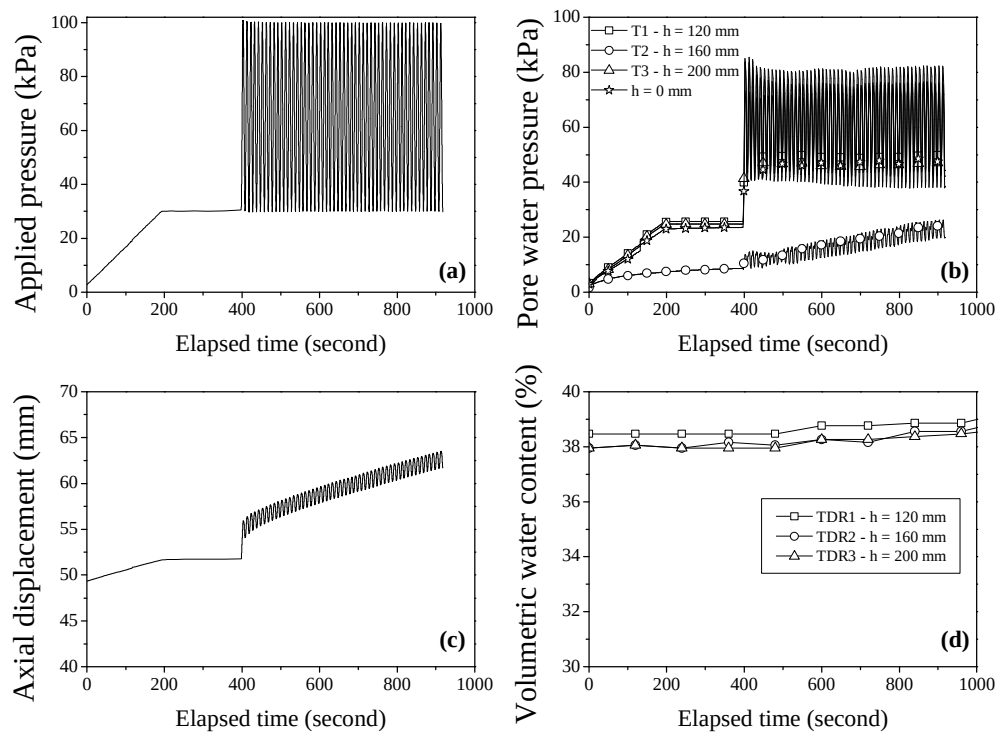


Figure III.15 : Comportement de l'échantillon $p_{d-initiale}=1,4\text{Mg/m}^3$: a) contrainte appliquée ; b) pression interstitielle ; c) déplacement du piston ; d) teneur en eau volumique (Duong 2013)

Si l'on regarde les photographies prises lors de l'essai E1 (Figure III.18), celles-ci montrent clairement la migration des fines dans le ballast, et ce même après un faible temps de cyclage.

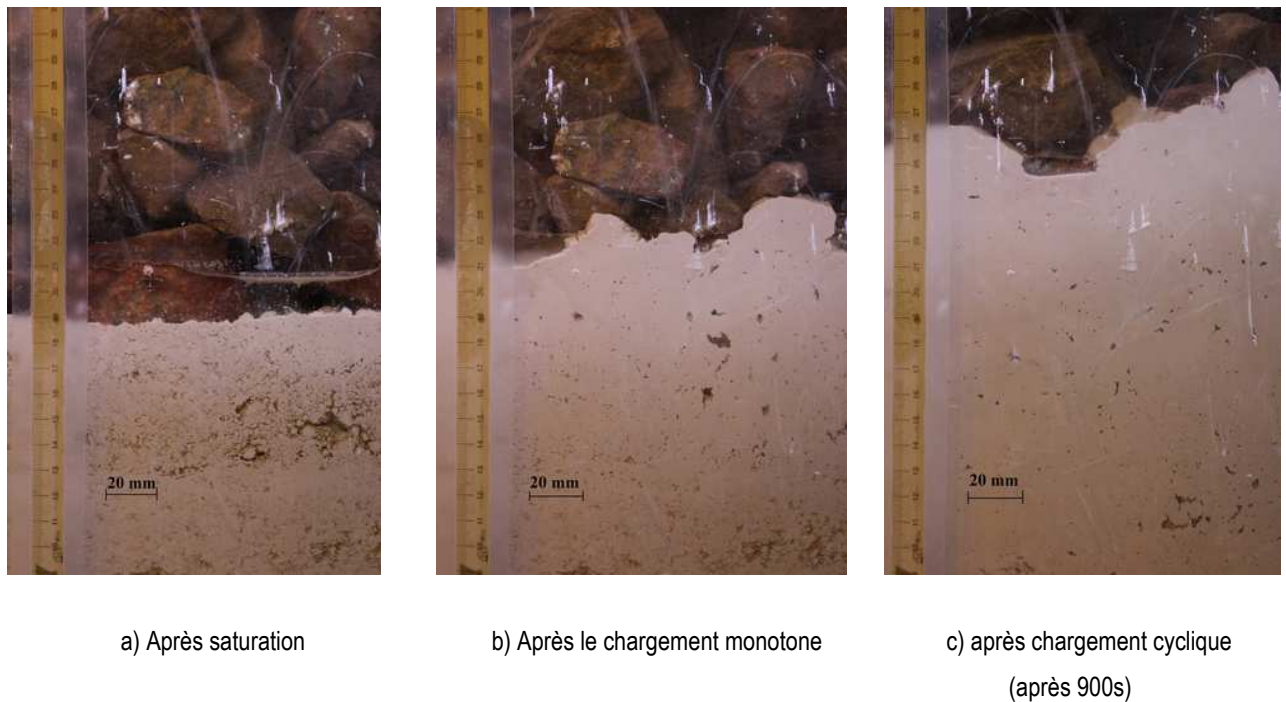


Figure III.16 : Interface ballast / sol saturé à différentes étape de chargement ($p_{d-initiale}=1,4 \text{ Mg/m}^3$ – Duong 2013)

La Figure III.17 permet de regarder l'évolution du comportement de l'échantillon saturé ($\rho_{d-initial}=1,5\text{Mg/m}^3$) en analysant la contrainte appliquée, la pression interstitielle, le déplacement du piston et la teneur en eau volumique (Figure III.17a, b, c et d). On observe que la pression interstitielle augmente, pour atteindre près de 30 kPa, pendant la phase de préchargement puis décroît légèrement, sans revenir à sa valeur initiale. Cela met en lumière les premiers effets de la densité du sol sur le comportement du système « sol support / ballast ». On peut expliquer ce phénomène par la faible conductivité hydraulique du matériau modèle ($8.4.10^{-7}$ m/s à 1.5 Mg/m^3) qui induit un temps important avant de dissiper la pression interstitielle. De plus, cette pression interstitielle augmente rapidement à des valeurs comprises entre 40 et 58 kPa dès que la sollicitation cyclique de l'échantillon débute. Notons que dans certains cas la contrainte effective devient négative, impliquant une liquéfaction du sol support. Celle se caractérise par un enfoncement du ballast dans le sol support et par conséquent par une perte de la tenue mécanique et géométrique de la voie. Ce phénomène se manifeste par un doublement (30 à 60 mm – Figure III.17c) de l'enfoncement du piston durant la phase de chargement cyclique.

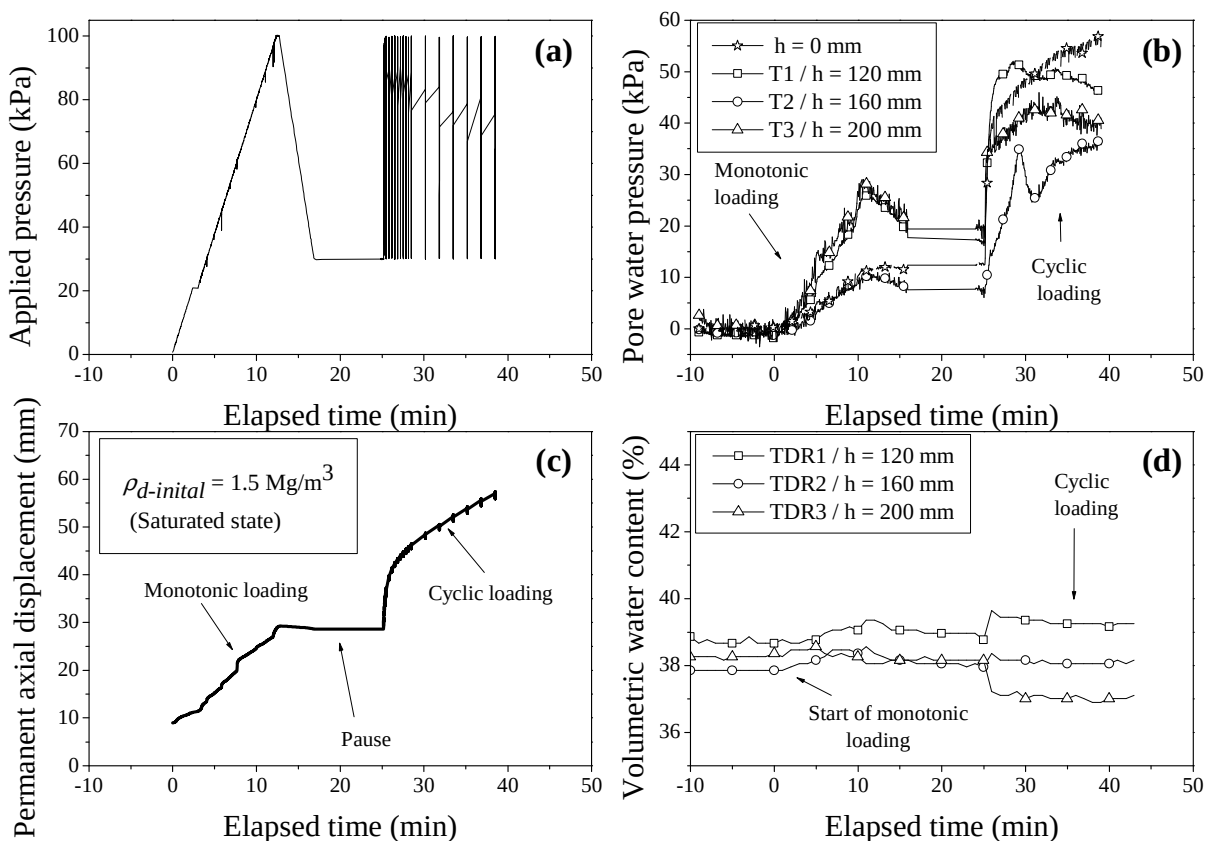
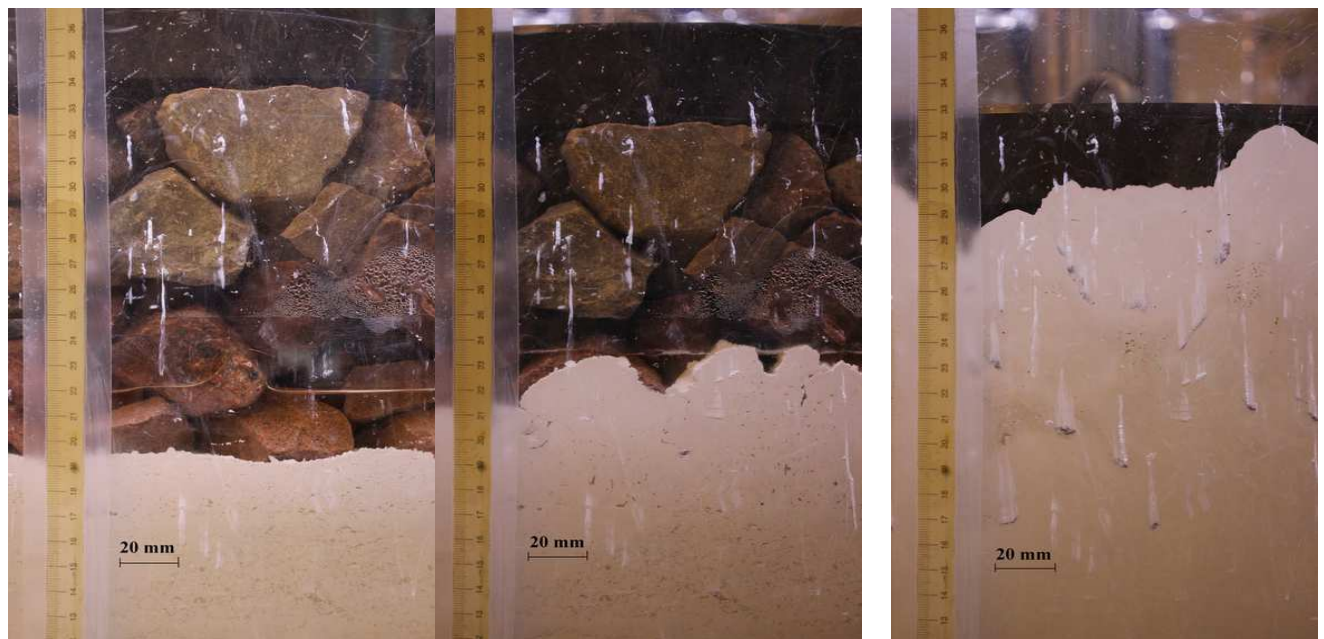


Figure III.17 : Comportement de l'échantillon $\rho_{d-initial}=1,5 \text{ Mg/m}^3$: a) contrainte appliquée ; b) pression interstitielle ; c) déplacement du piston ; d) teneur en eau volumique (Duong 2013)

Les photographies prises lors de l'essai E2 (Figure III.18) montrent clairement la migration des fines dans le ballast.



a) Après saturation

b) Après le chargement monotone

c) après chargement cyclique
(Après 40 min)

Figure III.18 : Interface ballast / sol saturé à différentes étape de chargement ($\rho_{d\text{-initiale}}=1,5\text{Mg/m}^3$ – Duong 2013)

Enfin, l'analyse de l'échantillon E3 ($\rho_{d\text{-initiale}}=1,6\text{ Mg/m}^3$) a mis en évidence l'absence de sur-pression interstitielle favorisant le développement des remontées boueuses. En effet, les pressions mesurées dans le massif de sol sont systématiquement inférieures à 20 kPa, malgré le dysfonctionnement de certains capteurs, ce qui empêche le phénomène de liquéfaction du sol. De plus, les sollicitations cycliques n'ont qu'un faible impact sur le tassement du ballast (10%).

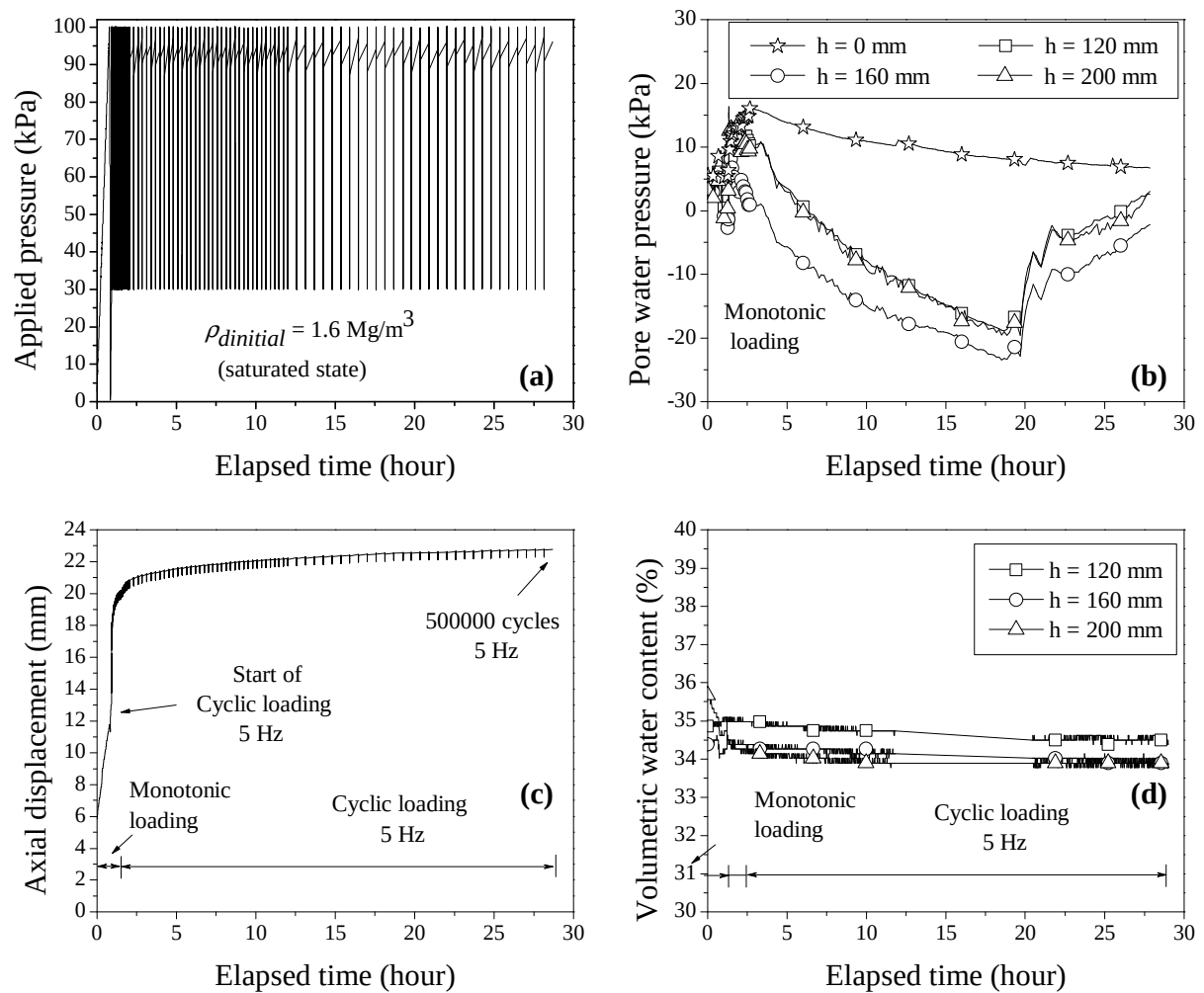


Figure III.19 : Figure III.20 : Comportement de l'échantillon $\rho_{d-initial}=1,6\text{Mg/m}^3$: a) contrainte appliquée ; b) pression interstitielle ; c) déplacement du piston ; d) teneur en eau volumique (Duong 2013)

Pour ce qui est du phénomène de liquéfaction, la Figure III.21 met en évidence le mécanisme à l'intérieur de l'échantillon. On observe la pression interstitielle qui suit la tendance imposée par la contrainte appliquée par le piston et celle-ci atteint des valeurs élevées. Cet enregistrement permet de calculer la contrainte effective dans le sol et montre que, pendant la phase de déchargement, on a une pression négative dans le sol.

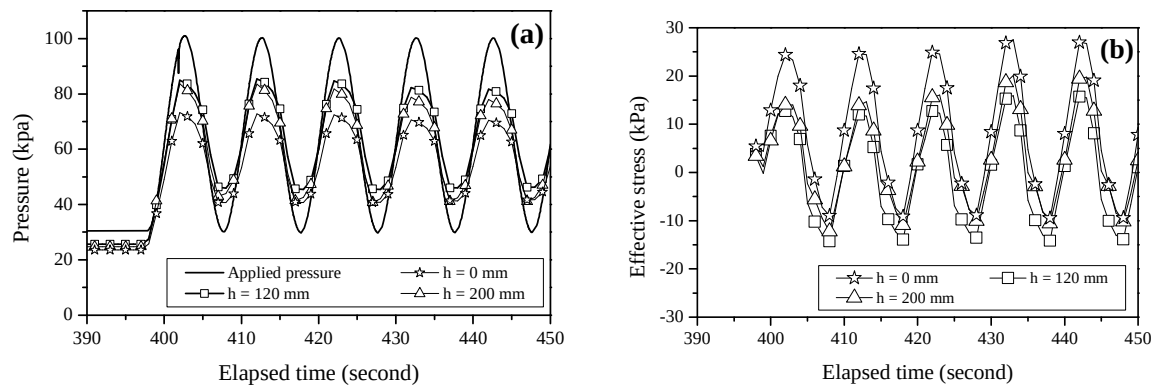


Figure III.21 : Comparaison entre la contrainte appliquée et la pression interstitielle (a) ; variation de la contrainte effective (b) (Essai E1 – Duong 2013)

A l'inverse de ce que l'on a pu observer lors des essais E1 et E2, les photographies prises lors de l'essai E3 ne montrent pas de remontée de fines au sein du massif de ballast. Cela confirme donc l'influence de la liquéfaction du sol dans le mécanisme de remontée boueuse.



a) Après saturation

b) Après le chargement
monotone

c) après chargement cyclique
(Après 30h)

Figure III.22 : Interface ballast / sol saturé à différentes étapes de chargement ($\rho_{d\text{-initiale}}=1,6 \text{ Mg/m}^3$ – Duong 2013)

4. Conclusion

Le fait d'avoir utilisé, lors de ces essais, la même procédure de chargement à deux teneurs en eau différentes a mis en évidence l'effet de l'eau dans le mécanisme de remontée boueuse. En effet, les essais à l'état non saturé montrent que le chargement cyclique n'a pas d'impact sur le tassement du ballast et ce quelle que soit la densité du sol support. A l'inverse, lorsque le sol est à l'état saturé, l'effet

de l'eau et l'impact de la densité du sol support est clairement mis en évidence. La Figure III.23 montre le déplacement axial permanent du piston en fonction du nombre de chargement. Les courbes des échantillons E1 et E2 sont similaires et les tassements cumulés ont une forme exponentielle, tandis que pour l'échantillon E3, l'accumulation des tassements est presque linéaire.

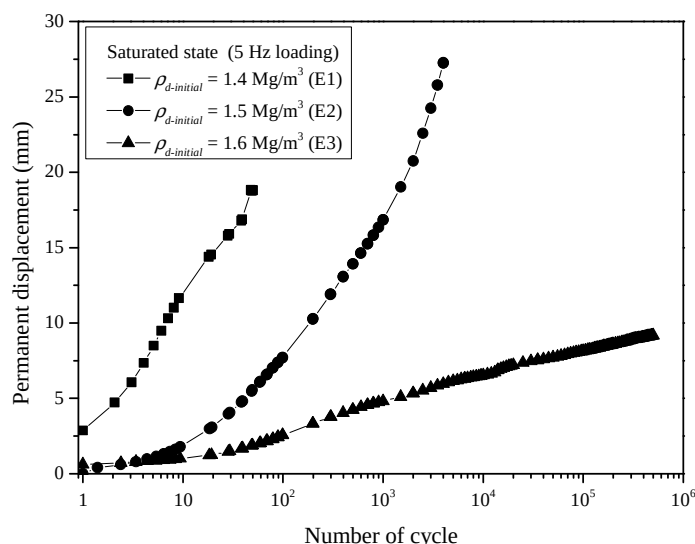


Figure III.23 : Influence des cycles sur le déplacement du massif de sol – comparaison entre les trois essais (Duong 2013)

Les échantillons E1, E2 et E3 ont respectivement été compactés à 79, 84 et 90% de l'OPM. Pour pouvoir interpréter l'influence de ces valeurs de compactage sur ce qui est prescrit à la SNCF, il est nécessaire de transposer ces valeurs de l'OPM à l'Optimum Proctor Normal (OPN). Ainsi, la norme ASTM (ASTM C-1479-07a) indique que pour un sol fin, la valeur à l'OPN est 10% inférieure à celle de l'OPM. En prenant en compte cette conversion, On obtient pour nos échantillons des valeurs d'OPN de 71.1, 75.6 et 81%. Ces valeurs peuvent être comparées avec celles prescrites par le SETRA (1992) pour le compactage des remblais à savoir 95% de l'OPN (objectif q4). Ainsi, bien que nos valeurs soient bien inférieures à celles prescrites par les règles de l'art des terrassements français, on met en évidence l'effet positif du compactage entre l'échantillon E2 et E3 (cinq points d'écart) : dans un cas on a une remontée de fines et dans l'autre on a une amorce de création de couche intermédiaire. Ces travaux montrent bien l'importance, lors de l'édification des lignes, d'avoir un sol support possédant une bonne portance pour éviter l'apparition des remontées boueuses suite au développement des surpressions interstitielles.

C. Synthèse et conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière le processus de création de la couche intermédiaire au cours du temps et de l'histoire de la voie ferrée. Les travaux menés par Trinh (2011) ont montré le processus de création de la couche intermédiaire à savoir l'interpénétration des matériaux de ballast et du sol support. Ceci a été confirmée par l'analyse minéralogique des éléments du sol et de la couche intermédiaire, montraient la présence de minéraux de sol dans la couche intermédiaire ainsi que la présence de résidus de ballast. Cependant, la granulométrie de la couche intermédiaire met en évidence une part importante de granulats dont le diamètre est compris entre celui du sol support et le ballast, qui provenaient de la dégradation du ballast. Le tamisage et l'analyse chimique ont mis en évidence l'hétérogénéité des matériaux de la couche intermédiaire. En effet, la diversité du ballast historiquement mis en œuvre et les opérations de maintenance du nivellement, comprenant le soufflage de gravier sous la traverse et des opérations de bourrage, ont produit des résidus contribuant à la création de la couche intermédiaire. Actuellement, les opérations de maintenance mécanisées et les sollicitations induites par les circulations plus importantes qu'au début du XX^{ème} siècle contribuent également à la création de cette couche malgré l'utilisation de ballast normé. Parderno (2010) a montré que les circulations et les opérations de maintenance avaient un rôle important dans la dégradation du ballast. Les opérations de bourrage érodent le ballast lors de la plongée des bourroirs produisant ainsi une quantité importante de fines, et lorsque les bourroirs entrent en vibration pour serrer le ballast, celui-ci peut être fracturé. L'étude réalisée montre bien comment une opération de bourrage peut être agressive pour le ballast et par conséquent la durée de vie du renouvellement. En effet, plus on bourre, plus on casse le ballast, et plus on crée des fines et moins il est facile de maintenir la géométrie de la voie, car le ballast fonctionne moins en friction.

Les travaux menés par Duong (2013) sont la suite logique des travaux initiés par Trinh (2011) et ont permis de mettre en avant le processus de formation de la couche intermédiaire. On a notamment pointé l'importance de la densité du sol support dans la formation de la couche intermédiaire. Ses résultats étayent ce qu'on peut constater sur le réseau français, et conforté par l'étude bibliographique présentée dans le premier chapitre, à savoir la prépondérance de la nature du sol support. En effet, en fonction de sa nature (plasticité des fines, perméabilité, etc.) l'eau contenue a un impact plus ou moins important sur le comportement global de la voie ferrée. Une faible perméabilité du sol, comme on peut la rencontrer dans les argiles et les marnes va engendrer des surpressions interstitielles au passage des circulations et par conséquent une liquéfaction du sol et donc la migration de fines au sein du massif de ballast. A l'inverse, si le sol est plus perméable, ce qui est le cas des sols sablo-limoneux, ceux-ci ont la capacité de dissiper les surpressions induites par le passage des circulations, favorisant

le drainage de la couche intermédiaire et donc la création de la couche intermédiaire. On a également mis en lumière l'importance de la densité initiale du sol sur la création de la couche intermédiaire. Ce constat peut être mis en relation avec les travaux réalisés lors de la création de voie ferrée à savoir l'importance de la densité de l'arase terrassement vis-à-vis de la traficabilité du terrain. Un sol mou ne peut accepter la circulation d'engin lourd à ce titre, les travaux d'amélioration historiques consistaient à densifier le sol en y imprégnant des pavés pour augmenter la traficabilité de la chaussée. L'objectif final étant de diminuer les déformations du sol sous des chargements et donc la pérennisation des travaux.

Si l'on transpose ces résultats à ce que l'on peut rencontrer sur le RFN, cela conforte ce qui a été mis en évidence par Duong. Dans un premier temps, La qualité du sol support est essentielle à prendre en compte lorsque l'on procède à des travaux de modernisation. Si la structure en place a une faible densité, assimilable à une faible portance, et qu'elle matelasse au passage des engins, il n'est pas possible de construire une nouvelle structure sans purger le matériau en place. Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en œuvre une sous-couche classique. Cette technique n'engendrera pas à proprement parlé la création de couche intermédiaire, mais la densité importante de la couche intermédiaire (100% de l'OPM) évitera la création de surpression interstitielle dans le massif de sol, et donc une liquéfaction du sol qui est le moteur des remontées boueuses et la dégradation de la structure d'assise. L'autre point mis en lumière par ces travaux est la gestion de l'eau au niveau de la plateforme, qui est essentielle pour éviter la dégradation de la voie. Le constat fait sur le réseau national est que lorsque la voie est établie en remblai les désordres liés à la plateforme sont moins nombreux, car la couche intermédiaire est naturellement drainée du fait que les structures soient hors sol. On peut constater malgré cela des problèmes de nivellement sur la voie qui, lorsqu'ils ont pour origine les structures d'assise, sont la conséquence d'un corps de remblai qui tasse avec le temps, mais également de travaux d'abaissement de plateforme pour des questions de mise au gabarit. Dans ces deux cas, l'eau est emprisonnée dans les structures et ne peut être évacuée naturellement. Pour les plateformes implantées en déblais, mis à part sur des sols sableux, on constate l'importance de drainage longitudinal dans le maintien des propriétés de la couche intermédiaire. Ainsi, lorsque le drainage est mal calé où qu'il a disparu au cours du temps (colmatage), on constate la dégradation de la couche intermédiaire qui se traduit bien souvent par une perte de la géométrie de la voie. Cela nécessite une intervention sur la structure en y apposant un géotextile de séparation pour éviter la remontée de fines ou en recréant une sous couche.

Ainsi, ces travaux montrent clairement l'effet important de l'eau dans le comportement mécanique de la couche intermédiaire, mais également dans sa capacité à drainer l'eau contenue. Cette approche

système (sol/ballast) nécessite d'être conforté par une analyse du comportement hydromécanique de la couche intermédiaire, qui sera présentée dans le prochain chapitre.