

Analyse et modélisations numériques permettant de quantifier la stabilité d'un talus existant en remblais ferroviaires sous diverses sollicitations : évolutions du chargement, variations du niveau de la nappe

Analysis and numerical modeling for quantification of stability of an existing slope in railway embankments under various stresses: changes in loading, variations in the level of undergroundwater

Dr. Luc MASSAT¹, Dr. Lionel CAUSSE¹, Christophe AUCLAIR¹

¹ RATP Infrastructures, Paris, France

RÉSUMÉ – L'objet de l'étude est de quantifier la stabilité et la déformation d'un talus ferroviaire existant sous des sollicitations variables tels que le niveau de la nappe ou la surcharge ferroviaire (renouvellement matériel roulant). L'approche de calcul mise en œuvre à partir de la définition d'un modèle hydro-géotechnique, l'analyse de données inclinométriques et de facteurs de forme du talus ont permis de mener à bien cette étude.

ABSTRACT – The purpose of the study is the quantification of the stability and of the deformation of an existing railway embankment under fluctuating stresses such as the underground water level or the railway overload (renewal of rolling stock). The calculation approach implemented from the definition of a hydro-geotechnical model, the analysis of inclinometric data and form factors of the embankment to complete the proposed work.

1 Introduction

La stabilité de talus en remblais ferroviaires existants est complexe à appréhender notamment du fait de l'évolution spatio-temporelle du facteur de stabilité et des déformations. Pour un exploitant ferroviaire, cette problématique de stabilité spatio-temporelle se pose, notamment, dans le cadre de la maintenance de ouvrages ou lorsque les conditions d'exploitation évoluent (modification de la charge ferroviaire par exemple).

Cette étude se base sur le linéaire sud du RER B parisien correspondant à une ancienne ligne ferroviaire mise en service dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle. Cet article propose une méthode de classification des talus permettant de hiérarchiser et circonscrire les zones à étudier : analyse des différents contextes de l'ouvrage (pentes, données inclinométriques, inspection visuelle des talus) et synthèse géotechnique permettant une approche numérique.

Il est proposé d'aborder dans cet article un cas de talus ferroviaires en remblais en contexte urbain parisien. Nous traiterons dans une première partie l'analyse des différents contextes de l'ouvrage en terre et notamment les facteurs évolutifs et sujets à des incertitudes. Dans une seconde partie deux modèles numériques seront présentés, l'un en déformation et l'autre avec un calcul aux états limites. Dans une troisième partie, les résultats des analyses numériques et les analyses paramétriques réalisées permettront d'apporter des réponses sur l'évolution du facteur de stabilité en fonction de diverses sollicitations naturelles et anthropiques. L'article conclura sur le facteur prépondérant associé à la plus forte réduction du facteur de sécurité et l'impact sur les déplacements et précisera les pistes de confortement pour améliorer la stabilité du talus.

2 Critère de classification des talus

2.1 Objet de l'étude

Le projet correspond à l'étude de la stabilité des talus en remblais sur le linéaire sud de la ligne du RER B en vue du renouvellement du matériel roulant qui va induire un surplus de charge. Le linéaire sud dans la vallée de l'Yvette jusqu'à Saint Rémy-les-Chevreuse, correspond au prolongement de l'ancienne ligne Paris-Sceaux mise en service dès 1846.

2.2 Critère de classification des talus retenus

2.2.1 Critères de vulnérabilité quantitatifs basés sur la géométrie des talus

Pour circonscrire l'étude à une partie du linéaire, des critères qualitatifs (inspections visuelles) et quantitatifs (pente et hauteur des talus et distance entre rail et bord du talus) (Tableau 1) ont été retenus de manière empirique pour définir le risque de stabilité des talus (Tableau 2). La pente du talus et la diffusion de la surcharge ferroviaire sont en relation avec l'angle de frottement du remblai notamment, d'où les critères quantitatifs retenus.

Tableau 1 : Criticité des critères quantitatifs pour établir le risque de stabilité des talus

Pente (angle)	Hauteur (H)	Distance rail/bord talus (d)	Criticité de vulnérabilité
>57% (30°)	> 6m	<2m	Fort
46% à 57% (25° à 30°)	1,5m<H<6m	2m<d<H	Modéré
<46% (25°)	<1,5 m	>H	Faible

Tableau 2 : Risque de stabilité des talus à partir de la combinaison des critères qualitatifs

Classe de talus	Critères de classement
Risque 0 (faible)	Au moins 1 des 3 critères de classement a une criticité faible
Risque 1 (modéré)	Les 3 critères ont un niveau de criticité modéré
Risque 2 (fort)	1 critère avec un niveau de criticité fort 2 critères avec un niveau de criticité modéré
Risque 3 (très fort)	2 critères avec un niveau de criticité fort Et 1 critère avec un niveau de criticité modéré à fort

Ces critères de classifications ont permis de retenir 6 talus classifiés en risque 2 et/ou 3 sur l'ensemble du linéaire sud.

2.2.2 Critères de vulnérabilité à partir des données inclinométriques

Les talus retenus ont fait l'objet d'une campagne de mesures inclinométriques avec une analyse/classification basée sur les 3 critères qualitatifs suivants :

- l'évolution maximale enregistrée, de l'ordre du millimètre, pluri-millimétrique, ou centimétrique ;
- l'évolution des mesures inclinométriques (cycle ou dérive) ;
- la localisation d'une surface franche d'initialisation des mouvements ou un mouvement profond (au minimum plus profond que la base du talus), continu de genre fluage.

Les critères et les seuils retenus sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Critères de vigilance et seuils associés à partir des données inclinométriques

Critère de vigilance	 1 - faible	 2 - moyenne	 3 - forte
Evolution maximale (mm)	d < 5mm	5 mm < d < 10 mm	d > 10 mm
Comportement (cycle ou dérive continue)	Cycle saisonnier	Cycle saisonnier / léger à coups	Dérive
Surface de rupture ou fluage	Fluage	Glissement / Fluage	Surface localisée

2.3 Modèle géotechnique – Talus de l'interstation La Hacquinière / Bure-sur-Yvette

2.3.1 Localisation et historique du site

La présente étude se focalise sur le talus de l'interstation La Hacquinière / Bure-sur-Yvette, parmi les 7 talus étudiés comme il a fait l'objet d'instabilités passées et qu'il s'agit d'une des zones où la hauteur du remblai ferroviaire est la plus importante (~12-13 m) (Figure 1, Figure 2 et Figure 3). Le talus est traversé par le ru Le Vaularon via un ouvrage maçonné en pied de talus.



Figure 1 : Localisation du site d'étude sur fond de carte topographique (source : géoportail)

L'inspection visuelle du talus en 2018 n'a pas montré de signe flagrant d'instabilité, hormis une érosion superficielle du remblai par érosion des matériaux de surface dans la pente des talus. Par le passé, suite à des instabilités constatées entre les coupes 5 et 7 (Figure 2), le talus a fait l'objet des travaux suivants :

- de 1970 à 1978 : amélioration drainage du talus nord (pose de drains subhorizontaux) suite à l'instabilité constatée en 1970 ;
- 1981 : reprofilage du talus sud à la suite de l'instabilité constatée en 1978 ;
- 1985 : travaux de consolidation du talus Nord par mise en place de gabions en pied de talus avec drains collecteurs associés.

Ces instabilités ont été attribuées à une trop forte pente, la présence de sol compressibles sous le corps du remblai de type alluvions et la hauteur de la nappe.

2.3.2 Modèle géotechnique et hydrogéologique

Compte tenu de la variabilité latérale de l'épaisseur ou des propriétés mécaniques de certains horizons - Remblais, Alluvions anciennes et Sables de Fontainebleau notamment - et compte tenu du niveau variable de la nappe entre la partie du talus à l'Ouest du Vaularon et celle à l'Est (Massat et al., 2021), deux modèles géotechniques et hydrogéologiques sont retenus (Tableau 4 pour la coupe 3 et Tableau 5 pour la coupe 6).

Au niveau de la coupe 3, une délimitation entre remblais en tête de talus et en pied de talus est établie d'après les paramètres mécaniques de ces deux horizons (Massat et al. 2021). Pour la coupe 6, étant dans une zone d'ancienne instabilité du talus, les propriétés mécaniques plus défavorables du remblai en tête du talus sont considérées sur toute la hauteur du remblai.

Pour le modèle hydrogéologique (Tableau 6), étant donné les relevés piézométriques pluriannuels au niveau de la coupe 6, seul un niveau EB est retenu pour cette coupe. Au niveau de la coupe 3, nous ne disposons pas de suivi piézométrique. Nous considérons un niveau EB favorable et un niveau EB défavorable considéré comme hypothèse en période de précipitation intense. Compte tenu des niveaux de crue observées dans la zone (crue de l'Yvette), nous ne retenons pas de niveau EH (Hautes eaux), EE (eaux exceptionnelles).

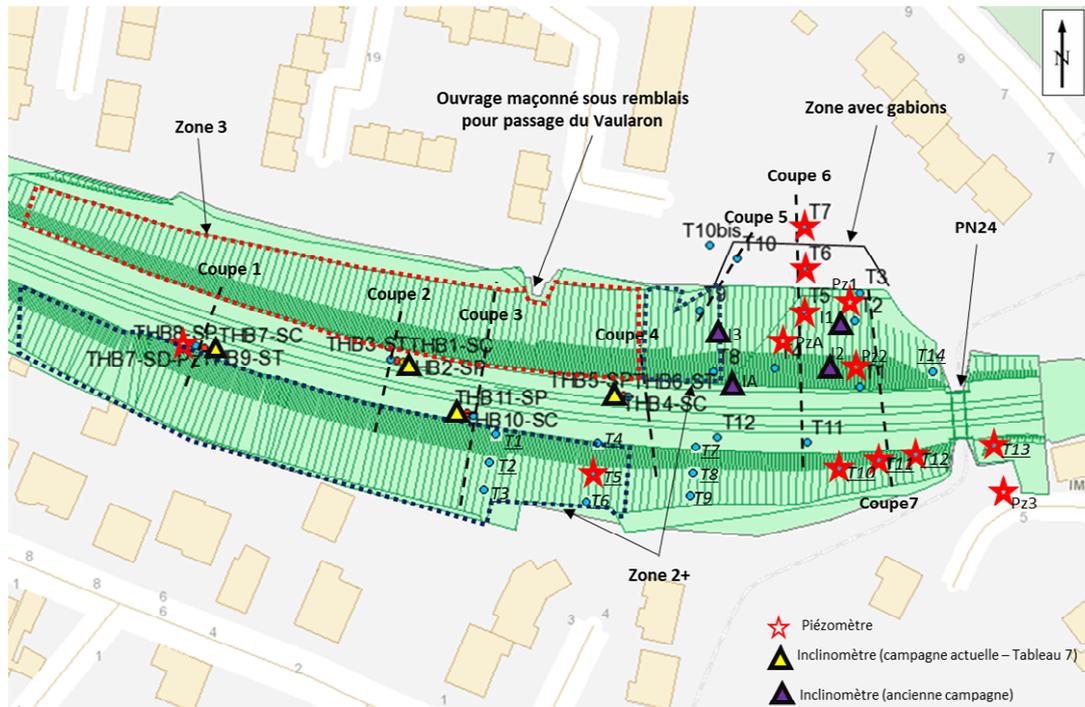


Figure 2 : Vue en plan du talus avec cartographie des zones de risque 2 et 3 et plan d'implantation des sondages des campagnes d'investigation ESIRIS 2019 (série THB), SIMECSOL 1970 (série T), SIMECSOL 1978 (série \underline{T}) et des inclinomètres/piézomètres de la campagne SIMECSOL/ARCADIS de 1982 à 2015.

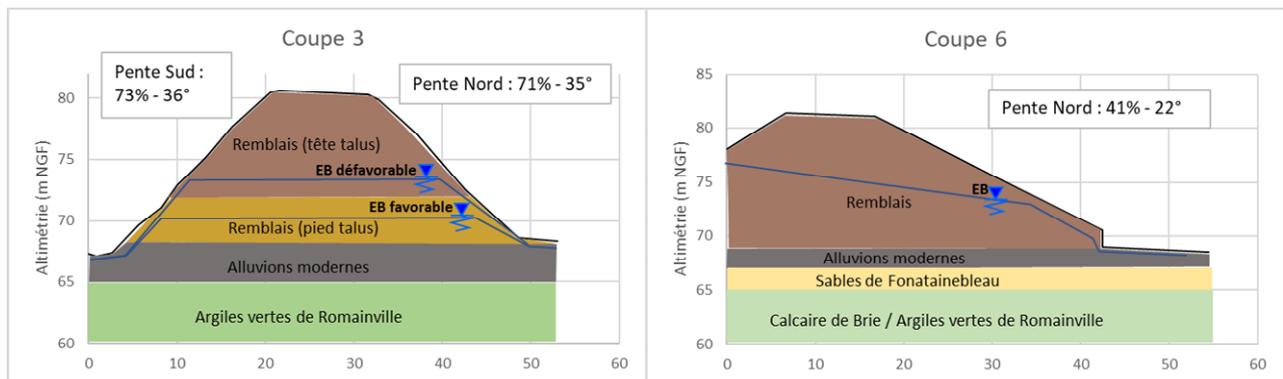


Figure 3 : Profils altimétriques au niveau des coupes 3 et 6 de la Figure 3

Tableau 4 : Modèle géotechnique retenu pour la coupe 3

	Cote toit (m NGF)	Epaisseur (m)	γ_h (kN/m ³)	C' (kPa)	ϕ' (°)	α	PI* (MPa)	Em (MPa)
Remblais (tête talus)	+80,5	8,5	18,8	4	29	0,33	0,5	4
Remblais (pied talus)	+72,0	4,0	18,8	10	28	0,33	0,8	5
Alluvions modernes	+68,0	3,0	20,9	0	30	0,5	0,8	5
Argiles vertes de Romainville	+65,0	> 4,0	19,2	15	25	0,5	0,9	6

Tableau 5 : Modèle géotechnique retenu pour la coupe 6

	Cote toit (m NGF)	Epaisseur (m)	γ_n (kN/m ³)	C' (kPa)	ϕ' (°)	α	Pj* (MPa)	Em (MPa)
Remblais (tête talus)	+81,0	11,5	18,8	4	29	0,33	0,5	4
Alluvions modernes	+69,5	1,5	20,9	0	30	0,5	0,8	5
Sables de Fontainebleau	+68,0	3,0	21,0	0	30	0,5	0,3	4
Calcaire de Brie/Argiles vertes de Romainville	+65,0	> 4,0	19,2	15	25	0,5	0,9	6

Tableau 6 : Modèle hydrogéologique retenu pour les coupes 3 et 6

	Coupe 3		Coupe 6	
	EB favorable	EB défavorable	EB	
			Pente Sud	Pente Nord
Nappe libre	+70,0	+73,0	+76,5	+73,0

2.3.3 Synthèse du suivi inclinométrique

La synthèse de l'analyse inclinométrique a permis de mettre en évidence un mouvement faible (Tableau 7).

Tableau 7 : Analyses inclinométrique du talus La Hacquinière / Bure-sur-Yvette

Sondages	THB1-SC	THB4-SC	THB7-SC	THB10-SC
Evolution maximale (mm)	(<2mm/an)	(<4mm/an)	(<3mm/an)	(<6mm/an)
Comportement (cycle ou dérive continue)	Cycle saisonnier / respiration	Cycle saisonnier / léger à coup	Cycle saisonnier / léger à coup	Cycle saisonnier / léger à coup
Surface de rupture ou fluage	Tassement	Glissement	Glissement et fluage	Glissement et fluage
Critère de vigilance				

2.4 Méthodes de justification de la stabilité du talus

2.4.1 Principe de dimensionnement

La démarche consiste à d'étudier l'influence de la surcharge générée par le renouvellement du matériel roulant MI84 par MI20 (l'influence du reprofilage du talus – coupe 6 n'a pas été étudié directement, il peut être comparé à la coupe 3 qui a une pente de talus plus forte). La démarche calculatoire suivante est adoptée :

- vérifier la stabilité du talus par un modèle de calcul de type Bishop en quantifiant la dégradation du facteur de sécurité F_s induit par la surcharge du matériel roulant. Le talus étant déjà existant et stable, la stabilité du talus existant a fait l'objet d'un calcul sans pondération des paramètres. Les calculs de stabilité réalisés correspondent à la méthode de Bishop pour laquelle les surfaces de rupture sont circulaires (Bishop, 1955). Le logiciel utilisé est TALREN version 5.2.

Le coefficient de sécurité est défini par :

$$F_s(\text{Bishop}) = \frac{\text{Moment résistant}}{\Gamma_{s3} \cdot \text{Moment moteur}}$$

où Γ_{s3} : coefficient de méthode pour considérer l'imprécision de la méthode de calcul ;

- **quantifier les déformations induites par la surcharge par un modèle numérique aux éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis.** Les différentes couches de sols ont été modélisées en utilisant un modèle de comportement élastoplastique et critère de rupture Mohr-Coulomb avec les valeurs des paramètres définies dans la synthèse géotechnique. Les déformations évaluées sont comparées aux valeurs seuils d'auscultation des voies à respecter (gauche court, gauche long, affaissement).

2.4.2 Surcharges ferroviaires

Conformément à l'EC1-2, nous considérons :

- une charge ferroviaire uniforme répartie sur une distance quasi infinie (charge UDL), autrement dit la charge linéaire des convois et non la charge ponctuelle d'un essieu/boggie ;
- une diffusion de la charge en fonction de la profondeur en conservant la force appliquée à la surface du remblai. La charge est donc diffusée sur une surface décrite à partir du contour de la surface initiale, agrandie en fonction de la profondeur selon un angle de diffusion identique dans toutes les directions (Eurocode 1, 2004).

Dans notre cas d'étude, nous considérons la diffusion de la charge d'exploitation sur l'épaisseur traverse + couche de forme ce qui nous fait considérer la charge à 0,55 m/TN (0,70 m/fil rail). Cette approche est particulièrement appropriée comme les justifications de stabilité des talus sont réalisées par des approches de calcul 2D. Ainsi, la surcharge considérée a été diffusée en 3D jusqu'à la base de la couche de forme + ballast.

Les surcharges ferroviaires sont considérées pour le convoi actuel MI84, le convoi actuel et projeté du train travaux et le convoi projeté du MI20 (Tableau 8). Les charges à considérer pour le convoi projeté MI20 sont des données confidentielles (marché en cours). Compte tenu de l'incertitude par rapport à ces données, une valeur de charge majorée a également été considérée. A ce stade d'étude, la surcharge ferroviaire projetée du MI20 n'est pas supérieure à 50% de la surcharge ferroviaire actuelle du MI84. La surcharge qui reste la plus défavorable à l'état actuel/projeté est celle du train travaux.

Tableau 8 : Surcharges ferroviaires prises en fonction du convoi

Chargement	Train	Charge linéaire (kN/ml)	Charge uniforme appliquée à 0,55m/TN (kPa)
Actuel	MI84	31,7	10,6
Actuel/Projeté	Train travaux	100,3	34,4
Projeté	MI20	Données confidentielles (augmentation inférieure de 50% au MI84)	
	MI20 majoré		

2.4.3 Phasage de calcul

Les calculs sont menés pour la coupe 3 avec les niveaux d'eau EB favorable et EB défavorable et pour la coupe 6 avec le niveau EB. La surcharge ferroviaire du MI20 est appliquée après celle du MI84 pour le calcul de la déformation notamment afin de quantifier la déformation induite par l'incrément de charge.

3 Résultats et interprétation

3.1 Résultats du calcul de stabilité Talren

Les résultats des facteurs de sécurité pour les différentes situations de calcul sont présentés dans le Tableau 9 et la Figure 4.

Les cercles de glissements calculés sont identiques pour l'ensemble des phases d'une situation de calcul, à savoir « Coupe 3 – EB favorable », « Coupe 3 – EB défavorable » et « Coupe 6 – EB ».

Tableau 9 : Résultats des calculs Bishop pour les coupes 3 et 6

Situation de calcul	Facteur de sécurité - Fs_min		
	Coupe 3		Coupe 6
	EB favorable	EB défavorable	EB
Etat actuel (MI84)	1,20	1,05	1,49
Etat projeté (MI20)	1,20	1,05	1,49
Etat projeté (MI20 majoré)	1,20	1,04	1,49
Train travaux	1,19	1,03	1,47

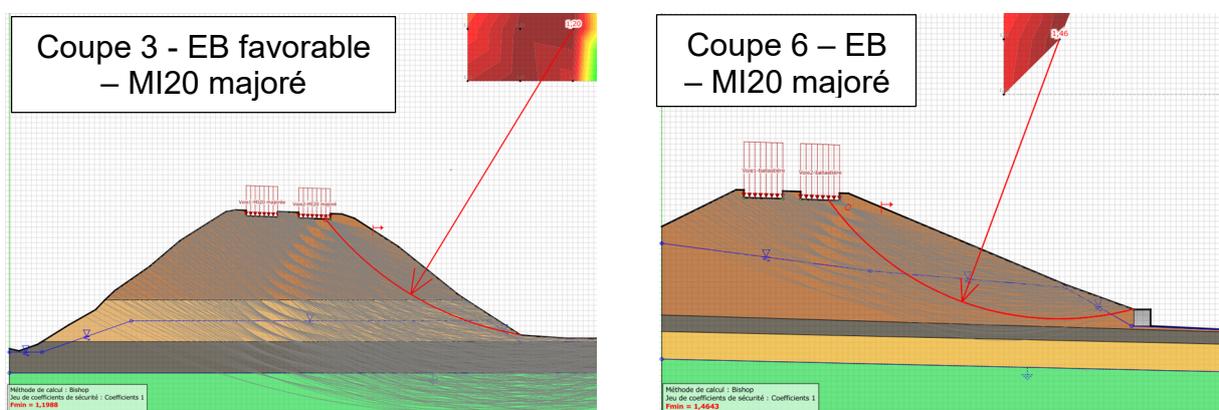


Figure 4 : Exemple de résultats pour les coupes de 3 et 6 avec la charge du matériel MI20 majoré

En comparant les deux situations de calcul de la coupe 3, EB favorable/EB défavorable, on remarque que le niveau d'eau influe sur le facteur de sécurité. Néanmoins dans ces deux situations de calcul, le facteur de sécurité reste supérieur à 1,0 quelle que soit la surcharge considérée. Pour la coupe de calcul 6, les facteurs de sécurité calculés sont plus élevés par rapport à la coupe 3 et ce malgré un niveau d'eau de la nappe élevé dans le talus. Ne disposant pas du profil altimétrique avant reprofilage du talus (coupe 6), il n'a pas été directement possible d'étudier l'influence du reprofilage sur la stabilité. Néanmoins, le reprofilage du talus consécutif à son instabilité semble avoir amélioré l'état de stabilité en réduisant la pente du talus sur le versant Nord (22°) par comparaison avec la pente plus élevée du talus sur le même versant Nord au niveau de la coupe 3 (35°).

Avec les hypothèses géotechniques retenues, le facteur de sécurité pour une même situation de calcul « Coupe 3 – EB favorable », « Coupe 3 – EB défavorable » et « Coupe 6 – EB » n'est pas sensiblement dégradé par l'incrément de charge induit par le nouveau matériel roulant MI20 par rapport au matériel roulant actuel MI84. L'état de stabilité du talus ne sera donc pas impacté par le renouvellement du matériel roulant. Par ailleurs, pour chaque situation de calcul, la phase de calcul la plus défavorable correspond au train travaux déjà en circulation.

3.2 Résultats du calcul de déformations Plaxis

Les déplacements verticaux induits par l'incrément de surcharge du MI20, majorée ou non, sont faibles (<5 mm) et très inférieurs aux valeurs seuil préconisées (Tableau 10). Les déplacements horizontaux sont également faibles (<5 mm) et localisés en pied de talus.

D'après ces calculs, on en déduit que l'incrément de charge induit par le renouvellement du matériel roulant aura un faible impact les déformations mesurées par les inclinomètres localisés sur le linéaire de talus étudié. Il est possible de remarquer que l'augmentation du niveau d'eau dans le talus induit des déformations plus importantes au niveau des voies et cela se corrèle bien avec la réduction du facteur de sécurité observé en calcul de stabilité.

Tableau 10 : Résultats des calculs de déformations et comparaisons aux valeurs seuils

Préconisations	Valeur seuil de calcul			
Affaissement voies 1/2	35 mm			
Ecart de dévers voies 1/2	7 mm			
Résultats du modèle	EB favorable		EB défavorable	
	Incrément charge MI84/MI20	Incrément charge MI84/MI20 majoré	Incrément charge MI84/MI20	Incrément charge MI84/MI20 majoré
Affaissement voie 1 (mm)	2,3	2,7	3,1	3,4
Dévers voie 1 (mm)	0,6	0,6	0,7	0,7
Affaissement voie 2 (mm)	2,2	2,6	2,5	2,9
Dévers voie 2 (mm)	0,6	0,7	0,6	0,6

4 Interprétation et conclusion

D'après les résultats présentés, l'incrément de charge induit par le renouvellement du matériel roulant ne va pas induire de déstabilisation ou de déformations majeures du talus présenté dans cette étude. Par conséquent, aucun travaux de renforcement des talus n'est envisagé à ce stade de l'étude (amélioration du drainage, clouage, etc). Un suivi inclinométrique pluriannuel avant et durant la mise en service du nouveau matériel roulant sera mis en œuvre. Le suivi (fréquence des mesures) sera adapté en fonction de la vulnérabilité des inclinomètres et les résultats de l'analyse comparés aux résultats des déformations des modèles aux éléments finis. Le travail mené pour les 5 autres talus (résultats non présentés) a permis d'aboutir aux mêmes conclusions que pour le talus de l'interstation La Hacquinière / Bure-sur-Yvette.

La stratégie mise en œuvre dans notre étude en corrélant analyse qualitative (analyse visuelle, définition de critère sur la géométrie des talus, disposition des surcharges ferroviaires, déformation mesurée par les inclinomètres) et quantitative (facteur de stabilité, déformations calculées aux éléments finis) se base sur la définition précise d'un modèle géotechnique et hydrogéologique et donc sur l'obtention de données in-situ complet (paramètres pressiométriques et intrinsèques, suivi piézométrique).

Cette étude sur un talus mis en place au cours du 19^{ème} et stable jusqu'à ce jour a également nécessité une approche de calcul sans tenir compte des facteurs partiels des Eurocodes qui auraient abouti à un état non stable du talus actuel et donc à des travaux de renforcement. Le suivi inclinométrique au cours de la mise en service du nouveau matériel roulant doit assurer le suivi de la stabilité des talus et si nécessaire aboutir à des travaux de renforcements sans que ceux-ci soient uniquement liés à cette mise en service.

Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), pp.7-17

Eurocode 1 (2004). Actions on structures, 148 pages

Massat L., Causse L., Auclair C. (2021), Synthèse géotechnique - MING - RER B – Adaptation des infrastructures en ligne pour le renouvellement du matériel roulant, interstation La Hacquinière/Bures-sur-Yvette, 78 pages