

Influence de la construction de grands remblais routiers sur une voie ferrée existante

Calculs en éléments finis et constatations

Françoise GESTIN
Technicienne supérieure

Olivier COMBARIEU
Adjoint au Directeur

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées
de Rouen

Xavier GANDON
Ingénieur des Travaux publics de l'Etat
Subdivision de l'Équipement de Lisieux

Présentation

Daniel Schneider
Ingénieur des Ponts et Chaussées
Chef du service Études et grands travaux
Direction départementale de l'Équipement du Calvados

Dans le cadre de la réalisation des grandes infrastructures routières, le maître d'ouvrage est de plus en plus amené à utiliser des outils perfectionnés pour garantir un impact le plus faible possible de la route sur l'environnement.

Ainsi, les études préalables au titre de la loi sur l'eau font fréquemment appel à des modèles hydrauliques et hydrologiques complexes, permettant de calculer précisément la courbe de remous en amont des ouvrages, et l'impact sur les habitations situées dans cette zone.

De la même façon, tous les projets routiers nouveaux comportent des études acoustiques qui modélisent l'environnement urbain actuel et futur et les modifications acoustiques qu'ils génèrent.

Dans le cas de la déviation de Lisieux, il s'agissait de convaincre le gestionnaire des voies franchies, en l'occurrence la SNCF, que la montée d'un important remblai de la déviation n'induirait pas un déplacement des rails susceptible de perturber la circulation ferroviaire.

Cette démonstration ne semblait pas, a priori, évidente. Aussi, le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen, interlocuteur privilégié de la Direction départementale de l'Équipement dans le domaine géotechnique, a-t-il engagé un calcul aux éléments finis, afin d'appréhender l'influence des différentes phases de montée des remblais sur la plateforme SNCF.

RÉSUMÉ

Cet article expose la démarche adoptée pour étudier l'influence, sur la stabilité d'une plate-forme ferroviaire, de la construction de deux importants remblais d'accès routier à un ouvrage d'art de franchissement :

- ✓ le choix des caractéristiques de déformation et de cisaillement a été fait à partir d'essais pressiométriques cycliques, seuls essais facilement et rapidement réalisables,
- ✓ les phasages successifs de montée des remblais ont été modélisés et calculés par éléments finis (par CÉSAR LCPC),
- ✓ enfin, les mouvements des voies ferrées et porte-caténaires ont été suivis par topographie fine, à fin de comparaison. Les mesures ont d'ailleurs conduit à des valeurs bien inférieures à celles prévues.

MOTS CLÉS : 42 - Remblai - Stabilité - Voie ferrée - Éléments finis (méthode) - Pont - Déplacement (mouvement) - Calcul - Contrôle - Continu - Déformation - Construction (exécution) - /Rail.

Cette vérification aux éléments finis a été accompagnée par un suivi du déplacement réel des rails et des caténaires. Le fait que les prévisions déjà rassurantes du calcul ont qualitativement bien rendu compte des déplacements réellement constatés et très sensiblement inférieurs, a définitivement rassuré le gestionnaire des voies ferrées qui avait, après les premiers constats, autorisé la poursuite des travaux.

Introduction

La déviation de la route nationale 13 à Lisieux, contourne l'agglomération lexovienne par le sud, sur environ 8 km. Le tracé franchit une succession de buttes et de vallées nécessitant la construction de nombreux déblais, remblais et ouvrages d'art dans des conditions géotechniques complexes. Le tracé retenu s'est avéré de ce point de vue le plus difficile, parmi tous ceux examinés lors des études préliminaires. Il est présenté sur la figure 1.

Au niveau du franchissement de la voie ferrée Paris-Cherbourg, le tracé traverse en déblai la butte d'Assemont, puis descend en remblai vers l'ouvrage de franchissement des voies et franchit

sur un remblai de grande hauteur la petite vallée du Cirieux. Suite à la demande de la Direction régionale de la SNCF, auprès de la Direction départementale de l'Équipement du Calvados, Maître d'œuvre, le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen a été chargé d'examiner l'influence de la construction de ces remblais sur la stabilité de la voie ferrée.

Description du projet

La déviation franchit les voies ferrées par l'ouvrage d'art PI 11 (passage inférieur n° 11). Les remblais d'accès atteignent près de 14 m de hauteur vers l'Ouest, et 24 m du côté Est.

La construction des remblais a été effectuée en deux étapes successives :

- un premier remblai de 14 m pour combler la vallée, jusqu'au niveau de la plateforme des voies ferrées ;
- un second remblai d'accès de 10 m de hauteur, construit sur le premier.

Les figures 2 et 3 illustrent la géométrie de la voie et des remblais d'accès.

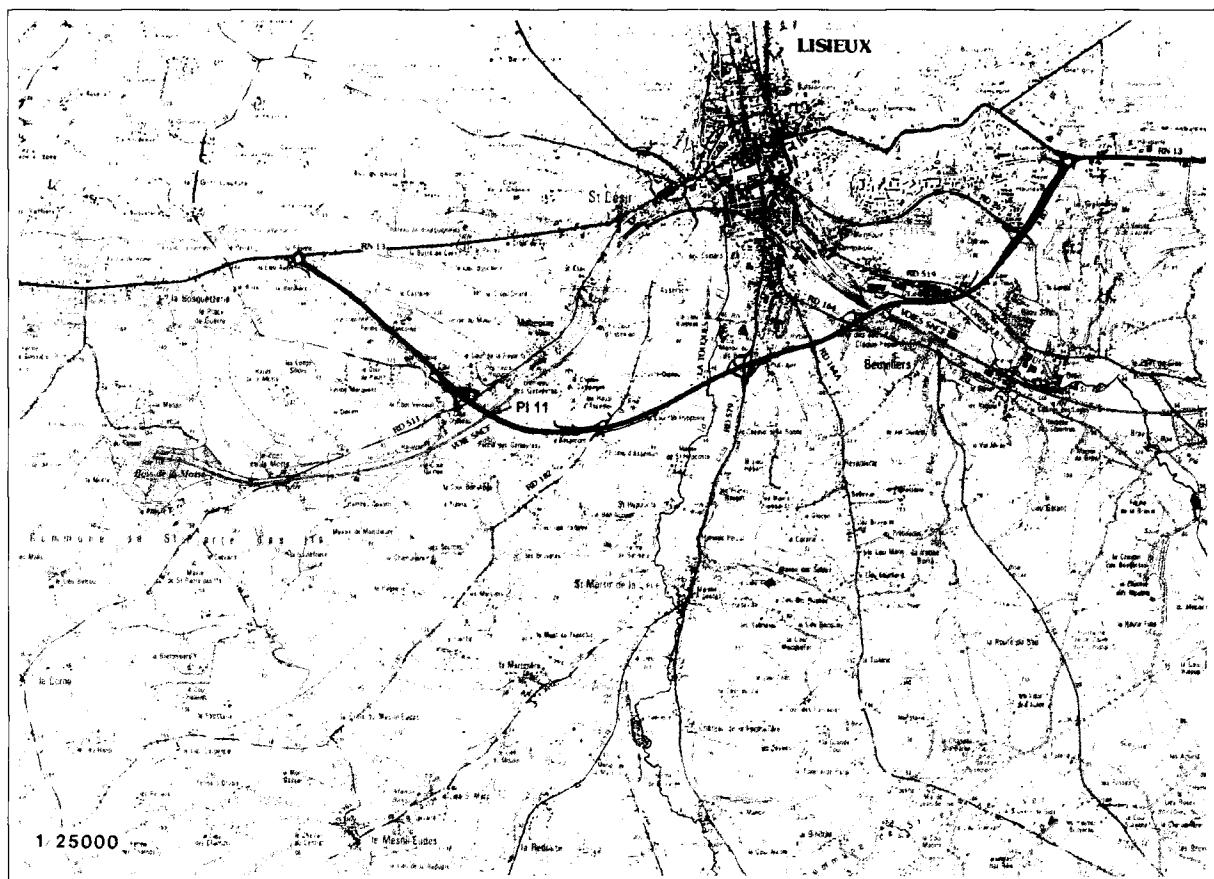


Fig. 1 - Tracé de la déviation de Lisieux.



Fig. 2 - Vue latérale des deux remblais d'accès depuis la butte d'Assemont vers la vallée du Cirieux.

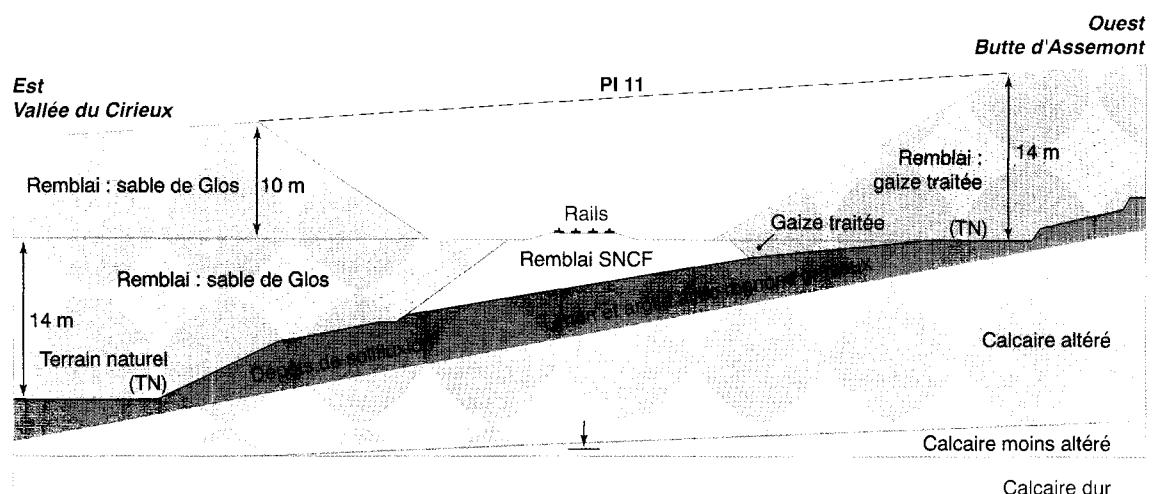


Fig. 3 - Coupe en long des remblais.

Investigations réalisées pour l'étude

Outre les connaissances déjà acquises, il a été effectué aux emplacements indiqués sur la figure 4a :

- 5 sondages avec essais pressiométriques F 1 à F 5, de 17 à 25 m de profondeur, avec quelques essais cycliques, conformément au projet de norme les concernant ;
- 2 sondages de reconnaissance détaillée T1 et T2, en tarière hélicoïdale de diamètre 170 mm, avec mesures de teneur en eau sur les échantillons remaniés prélevés.

Cette campagne a permis, en complétant la description lithologique, de préciser l'état hydrique et de définir un ensemble de caractéristiques pressiométriques à chacune des unités du modèle retenues pour les calculs.

En ce qui concerne les futurs remblais, à l'ouest en gaize traitée et à l'est en sable de Glos, les caractéristiques nécessaires au calcul ont été mesurées sur des remblais déjà mis en œuvre sur le tracé de la déviation, et analogues quant à leur constitution et leur modalité de mise en œuvre.

Ces essais et reconnaissances ont conduit à définir géométriquement un modèle pour lequel il s'est agi, pour chacune des entités géotechniques retenues, d'affecter les caractéristiques mécaniques traditionnelles : déformabilité et résistance au cisaillement, nécessaires aux calculs.

En ce qui concerne les caractéristiques de cisaillement, la nature des terrains en place (remblai SNCF, dépôts et calcaire plus ou moins altéré), n'incitait pas à prévoir leur mesure à partir d'essais de laboratoire.

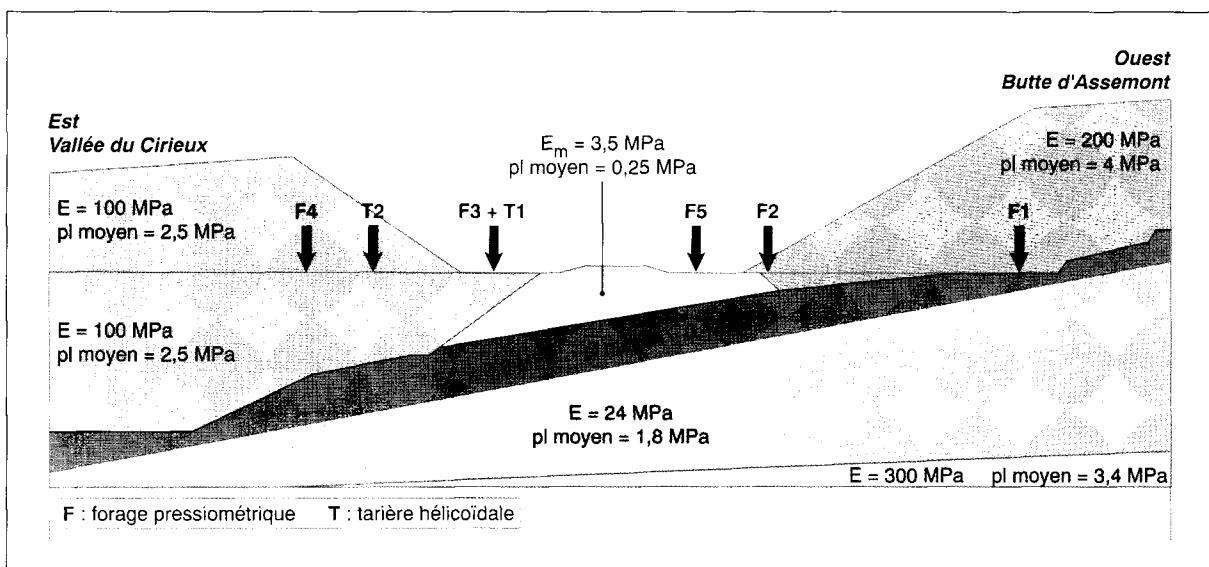


Fig. 4a - Positionnement des sondages. Valeur des modules pressiométriques E_m et pressions limites.

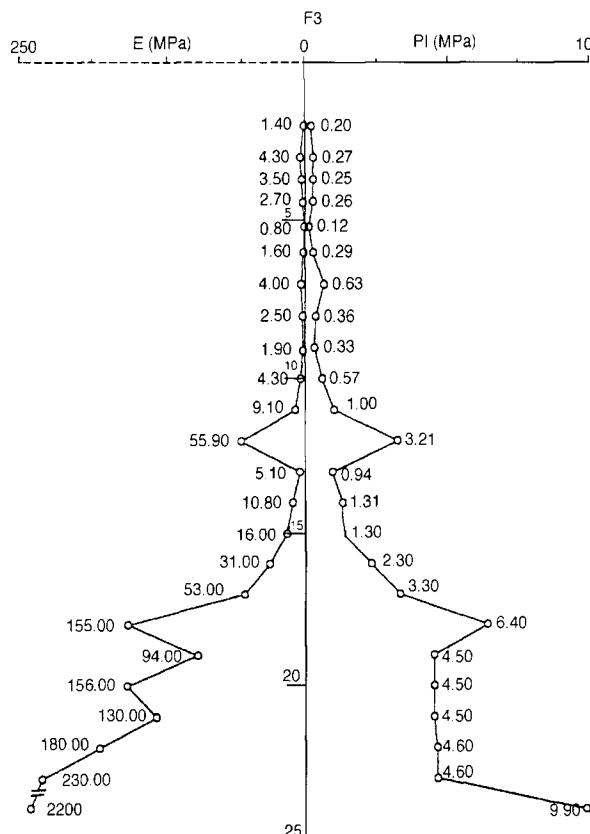


Fig. 4b - Profil pressiométrique F3.

La démarche a ainsi consisté :

① à définir pour chaque entité (au nombre de 7), une pression limite et un module cyclique moyens. Ce dernier, mesuré au cours de l'essai pressiométrique après un déchargeage partiel

en cours d'essai, est assimilé à un module élastique noté E_R pour une plage de contraintes relativement étendue ;

② à calculer, pour chaque entité, un couple de valeur c et ϕ qui rend compte, et est donc compatible, avec la pression limite moyenne ci-dessus. On a utilisé pour cela les relations proposées par O. Combarieu liant pl , E ($= E_R$), c et ϕ [1]. Il faut cependant souligner les difficultés de l'exercice, puisque plusieurs couples sont possibles. Aussi, l'expérience et la bonne connaissance du comportement des sols constituent-elles une aide précieuse. En particulier, la nature des sols et l'absence de nappe (pratiquement située au niveau du calcaire dur inférieur) confèrent une vraie cohésion à l'ensemble des sols concernés.

La valeur du coefficient de Poisson a été fixée à 0,33. Celle de l'angle de dilatance ($\Psi = 0$) a été choisie nulle, à la fois par simplicité et du fait d'une influence *a priori* faible sur les résultats recherchés.

Les figures 4a, 4b et 5 récapitulent l'ensemble des éléments descriptifs et mécaniques. Le profil pressiométrique F 3 (fig. 4b) complète le profil de la figure 4a.

Ce récapitulatif appelle les observations suivantes :

Le tableau I contient les résultats des essais cycliques et témoigne d'une assez forte hétérogénéité des sols en place ; ces essais particuliers ont été surtout concentrés dans les formations les plus déformables : remblai SNCF, dépôts de solifluxion et calcaire altéré.

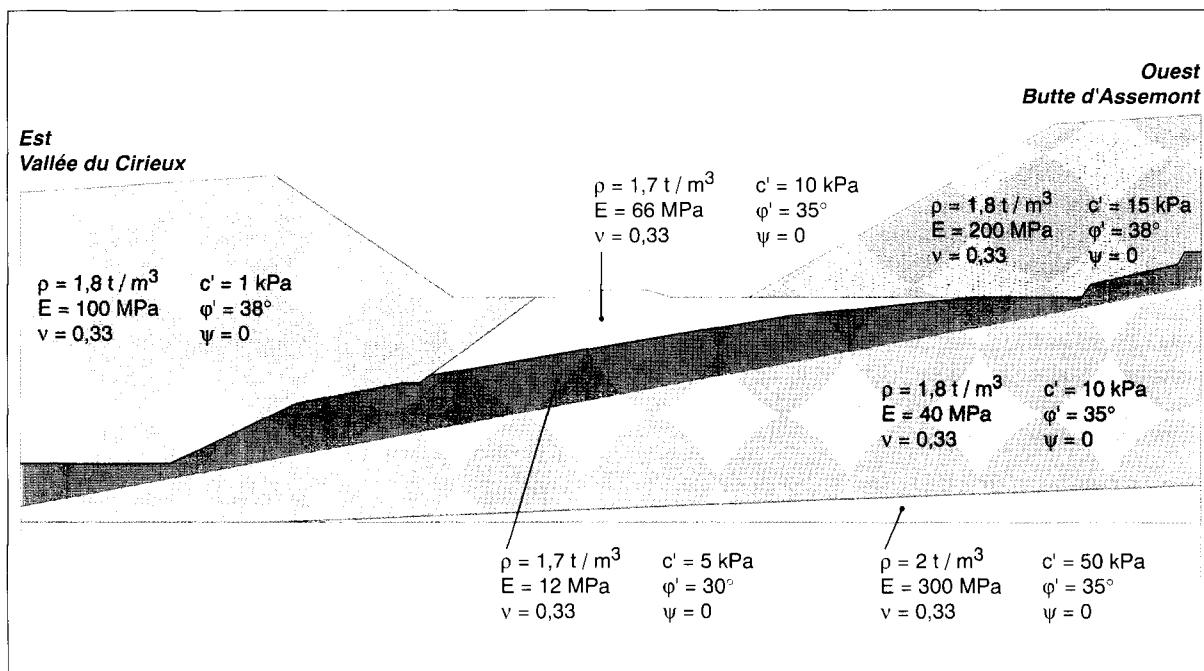


Fig. 5 - Caractéristiques des couches retenues pour le calcul aux éléments finis.

TABLEAU I
Caractéristiques pressiométriques mesurées lors d'essais cycliques

Matériau	E_M (MPa)	E_R (MPa)	$\frac{E_R}{E_M}$	p_f (MPa)	p_i (MPa)
Remblai amont de gaize traitée	7,6	11,2	1,47	0,38	0,92
	50	175	3,5	2	3,4
	85	390	4,6	3,4	5,8
	32	100	3,1	1,3	2,1
Remblai aval en sable de Glos	29	93	3,2	1,3	2,2
	26	100	3,8	1,8	3
Remblai SNCF limon sableux calcaire	2,7	4,8	1,77	0,11	0,26
	6,7	17,2	2,56	0,35	0,51
	3	6	2	0,15	0,23
Dépôts de solifluxion	4	13,2	3,3	0,29	0,42
	1,6	6,9	4,3	0,16	0,29
	4	13,4	3,3	0,43	0,63
	2,5	4,5	1,8	0,18	0,36
Calcaire altéré	6,8	17,2	2,5	0,33	0,57

Évaluation des déplacements verticaux et horizontaux au niveau des voies SNCF

Les voies ferrées à l'endroit de l'ouvrage d'art sont en courbe et accusent de ce fait un léger devers. Les craintes de la SNCF portaient tout naturellement sur les déformations induites, tant verticales qu'horizontales. Aussi, même si un suivi topographique précis devait accompagner

l'édition des remblais, le gestionnaire de la voie a souhaité que lui soit fournie une estimation des déformations avant tout démarrage du chantier de remblaiement.

Ces déformations ont été évaluées par la méthode des éléments finis, seule capable d'une telle prévision ; sa mise en œuvre a été assurée par la Société ITECH, à l'aide du progiciel CÉSAR-LCPC conçu et développé par le LCPC.

Caractéristiques du modèle de calcul

La coupe de calcul est naturellement perpendiculaire à l'axe des voies. C'est celle déjà représentée sur les figures 3 et 4. Elle intègre la position des différentes couches géologiques, la présence des voies ferrées ainsi que la position du terrain naturel avant la mise en place des couches de remblai.

Les calculs sont menés en analyse bidimensionnelle, c'est-à-dire avec une hypothèse de déformations planes. Le comportement des sols est modélisé par une loi élasto-plastique de Mohr-Coulomb, sans dilatance.

Pour le maillage, une distance de 50 m de part et d'autre de l'axe des voies a été pris en compte pour limiter géométriquement le modèle. Le maillage du modèle complet (fig. 6) est constitué de 7905 nœuds et 3850 éléments triangulaires à six nœuds.

Quatre séries successives de calcul ont été réalisées, qui correspondent aux quatre phases successives de remblaiement (fig. 7a à 7d) :

➤ **phase P0** : phase d'initialisation des contraintes géostatiques. Le substratum, constitué par le calcaire dur à la base du modèle, est considéré comme indéformable. Les conditions initiales sont conformes aux recommandations données par P. MESTAT [2].

➤ **phase P1** : mise en place d'une première partie du remblai de sable de Glos situé à l'Est et dont la hauteur est de 7 m ;

➤ **phase P2** : mise en place de la deuxième partie du remblai de sable de Glos, soit 7 m supplémentaires jusqu'au niveau de la plate-forme ferroviaire.

➤ **phase P3** : mise en place du troisième remblai d'accès proprement dit, de sable de Glos (sur 10 m), du remblai en gaize traitée (sur 14 m), sachant que les travaux sont conduits simultanément de chaque côté des voies.

Résultats des prévisions

L'étude portant sur l'impact des travaux de remblaiement sur la stabilité des voies ferrées, les déplacements ont été calculés au niveau des voies

au cours des quatre phases de calcul. Les déplacements horizontaux et verticaux sont présentés pour deux coupes données sur la figure 8 :

- la coupe AB horizontale, qui correspond à la zone délimitée par la voie ferrée ; (les points A et B correspondent aux rails extrêmes),

- la coupe CD verticale passant par l'axe des deux voies.

Les déplacements calculés et cumulés sont représentés sur les quatre graphiques des figures 9, 10, 11 et 12.

Ces déplacements calculés conduisent aux remarques suivantes :

➤ **Phase 1** : la mise en place du remblai provoque un déplacement horizontal d'ensemble de la voie d'environ 8 mm vers l'amont et un soulèvement vertical d'environ 2 mm ;

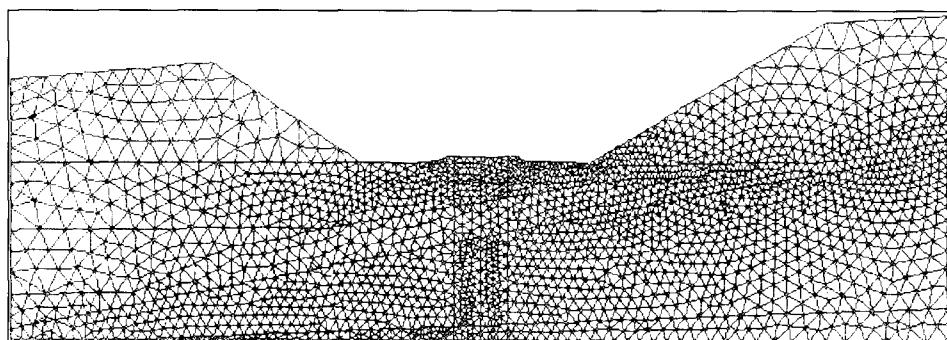
➤ **Phase 2** : la deuxième phase de remblaiement accentue les tendances constatées lors de la phase P1. Le déplacement horizontal moyen cumulé est alors de 2,2 cm et le déplacement vertical montre une faible rotation de la voie. Le soulèvement en amont est de 3 mm, alors qu'il est de 6 mm environ à l'aval. Les figures 13a et 13b illustrent le champ des déplacements horizontaux et vitaux, à l'issue de cette phase ;

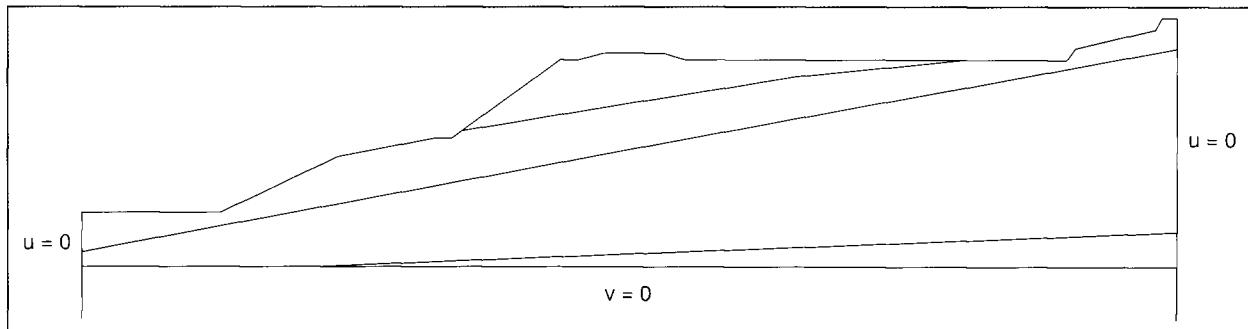
➤ **Phase 3** : la mise en place des remblais de part et d'autre de la voie accentue le phénomène de soulèvement. Le déplacement vertical calculé atteint 1,6 à 1,8 mm. Cette phase a tendance à réduire l'effet de rotation, puisque l'écart de soulèvement entre les différents points de la coupe AB n'est que de 2 mm.

Par ailleurs, les déplacements horizontaux montrent un rétrécissement de la zone de la voie. Le déplacement horizontal en amont (point B) reste sensiblement égal à 2,2 cm alors que celui de l'aval (point A) n'est plus que de 1,5 cm, du fait de la poussée provoquée par la mise en place du remblai en gaize traitée.

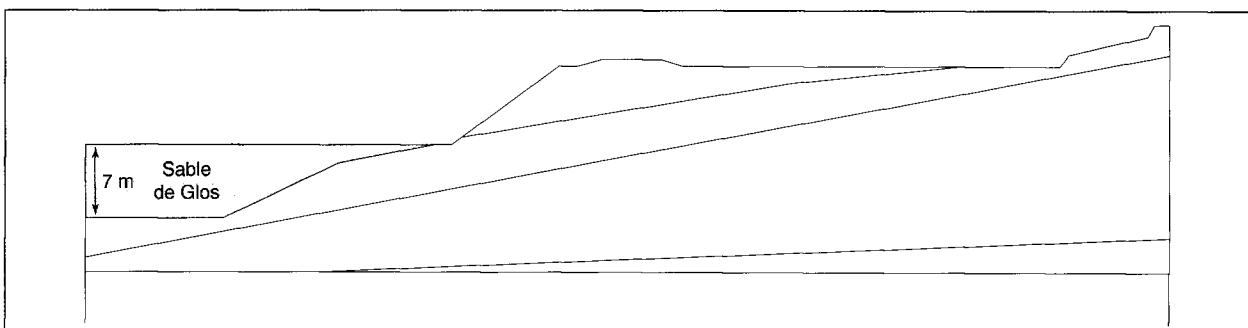
Il a été admis par la SNCF que les valeurs annoncées étaient compatibles avec les déformations induites tant au niveau des voies qu'au niveau de la ligne caténaire. Celle-ci, par l'intermédiaire de son poteau support, subit également une déformation relative.

Fig. 6 -
Maillage choisi
pour le calcul.

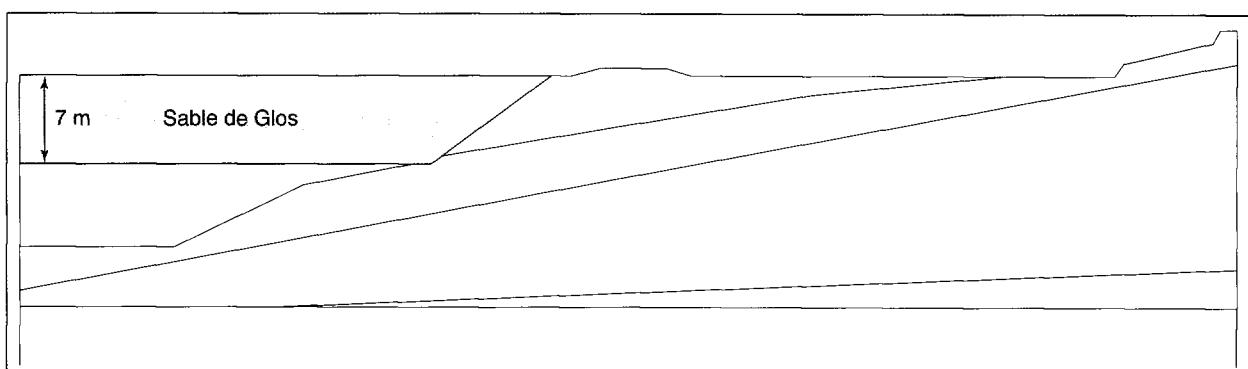




a - Phase d'initialisation P_0



b - Phase P_1



c - Phase P_2

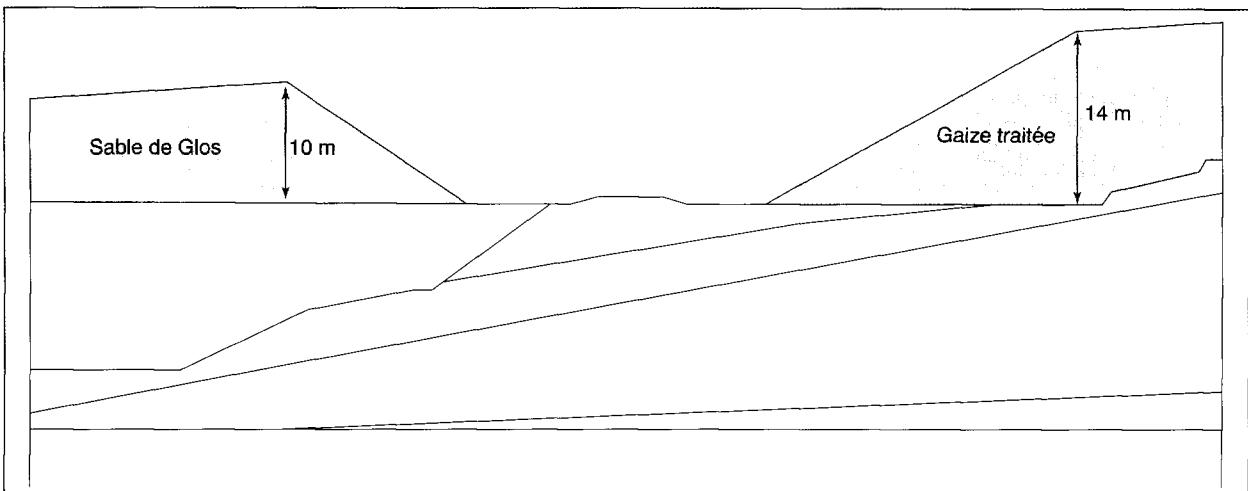


Fig. 7 - Les quatre phases successives de remblaiement

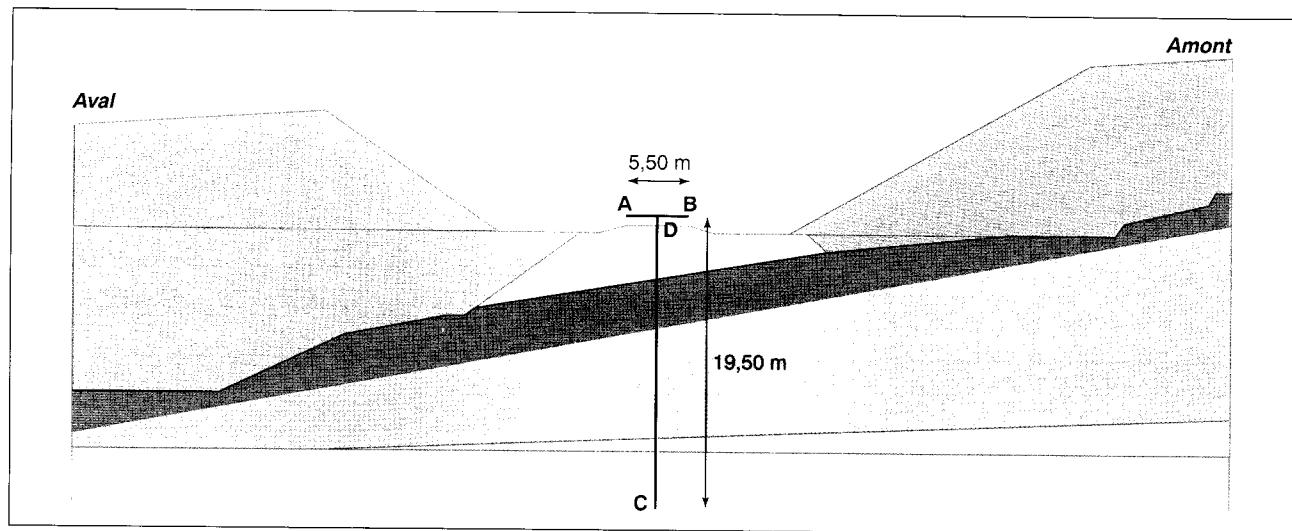


Fig. 8 - Définition des coupes de calcul.

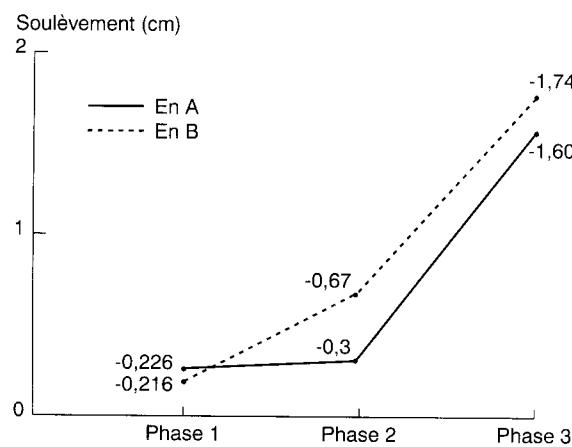


Fig. 9 - Déplacements verticaux calculés en A et B (soulèvement).

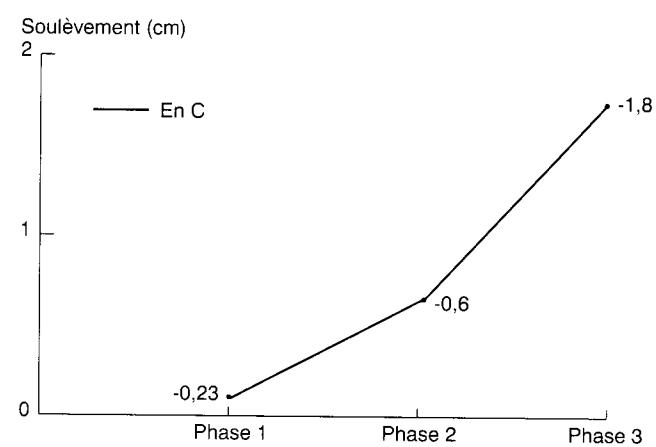


Fig. 11 - Déplacements verticaux calculés en C.

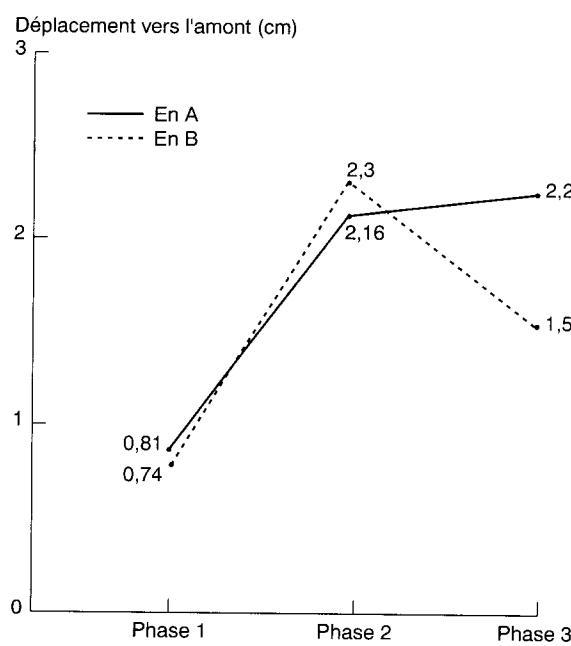


Fig. 10 - Déplacements horizontaux calculés en A et B.

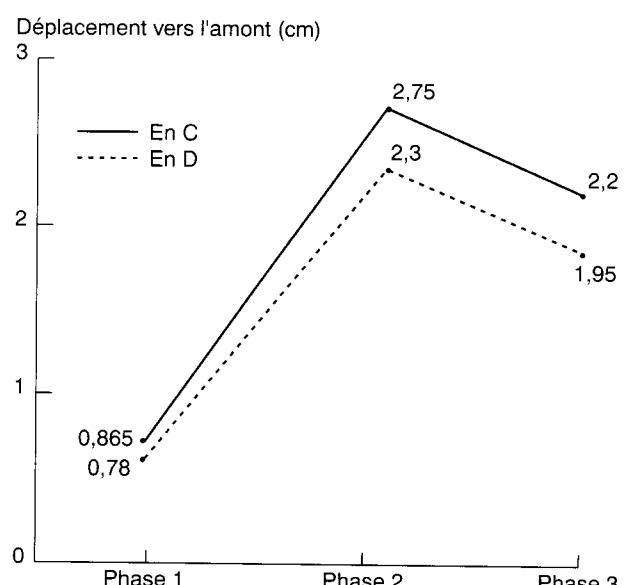


Fig. 12 - Déplacements horizontaux calculés en C et D.

Suivi des déformations des rails pendant les travaux

Le suivi des déformations a été réalisé par mesures topographiques :

- de 21 repères répartis sur les rails de chaque voie ;
- de repères fixés sur 12 plots en béton mis en place en amont et parallèlement à la voie ferrée. Un plot est visible sur la photo (fig. 1) prise à la fin de la mise en place des remblais ;
- de 3 porte-caténaires placés à une distance de 4 m du rail, soit en crête du talus.

Le tableau II regroupe les déformations verticales et horizontales des rails obtenues par le calcul aux éléments finis et les mesures topographiques obtenues à la fin des phases 2 et 3.

Les suivis topographiques en X, Y et Z des trois poteaux caténaires ont été effectués sur des repères situés à 9 m environ du pied des poteaux.

Les déplacements mesurés pour le caténaire situé dans l'axe de la déviation ont été élevés puisqu'ils ont atteint :

Phases	Déplacement horizontal (mm)	Déplacement vertical (mm)
2	44	5
3	111	21

Pour les deux autres caténaires, les déformations mesurées sont restées inférieures au centimètre.

TABLEAU II
Comparaison des déplacements prévus et mesurés

Déplacements (mm)	Calculs aux éléments finis		Mesures topographiques (suivi)		
	Rail A	Rail B	Rail A	Rail B	Plot en béton
Horizontaux (de l'amont vers l'aval)	phase 2	21,6	23	2,8	2,8
	phase 3	22	15	2 à 5	—
Verticaux	phase 2	-3	-6,7	+ 2	-2
	phase 3	-16	-17	+ 1 à + 4	-4 à -11

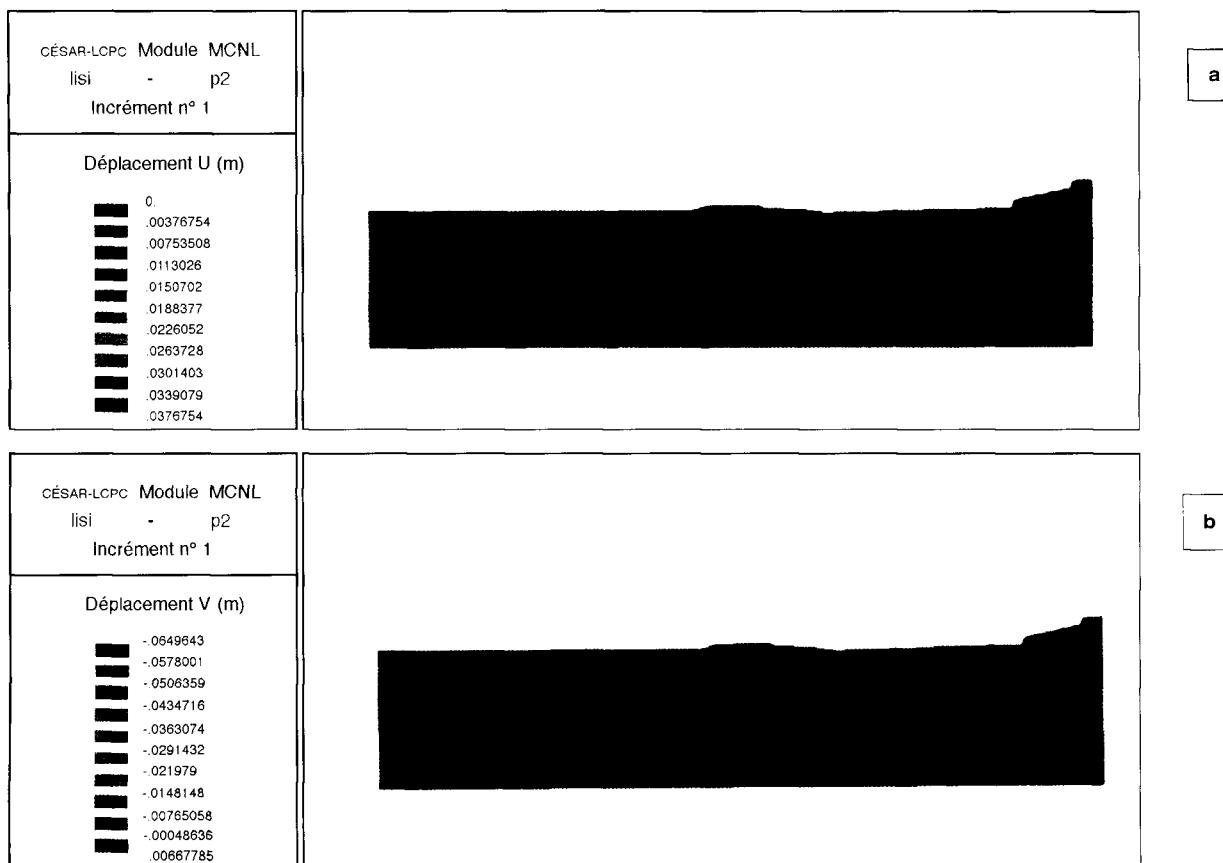


Fig. 13 - Déplacements horizontaux et verticaux en phase P_2 .

Conclusions

La comparaison entre les déplacements du sol calculés et mesurés au niveau des voies ferrées a bien entendu rassuré le gestionnaire des voies quant à l'incidence des importants travaux de terrassements.

Les déplacements mesurés du porte-caténaire central ont cependant conduit à la fin des travaux à un repositionnement de ce dernier. Ces déplacements sont expliqués par son implantation proche de la crête du talus dans un remblai de médiocre qualité présentant initialement quelques désordres et témoignant de caractéristiques locales très faibles.

Qualitativement, les déplacements observés au niveau des rails sont assez conformes à la cinématique des mouvements donnés par le calcul aux éléments finis. Cependant, quantitativement, ces déplacements mesurés sont très inférieurs à ceux calculés. Si, dans le cas présent, cette constatation ne peut qu'être rassurante, puisqu'elle va dans le sens de la sécurité, elle nécessite quelques commentaires :

• on ne doit pas accorder une confiance aveugle aux calculs par éléments finis et le suivi des comportements des ouvrages reste tout à fait recommandé, voire nécessaire ;

• dans le cas présent, il est évident que le choix des modules de déformation n'est pas très satisfaisant. Les valeurs des modules considérées dans le modèle s'avèrent trop faibles, et cet exemple illustre bien la nécessité de mieux appréhender les caractéristiques de déformabilité du sol à prendre en compte dans de tels calculs, ce qui constitue actuellement une préoccupation en géotechnique, puisque manifestement le module de déformation diminue avec des contraintes appliquées croissantes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] COMBARIEU O. (1996), À propos de la détermination de l'angle de frottement des sols pulvérulents au pressiomètre, *Revue Française de Géotechnique*, **77**, p. 51-58.
- [2] MESTAT P., ARAFATI N. (1998), Modélisation par éléments finis du comportement du rideau de palplanches expérimental de Hochstetten, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **216**, p. 19-39.

ABSTRACT

The effect on an existing railway track of constructing large road fills Finite element calculations and observations

F. GESTIN, O. COMBARIEU, X. GANDON

The paper presents the approach used to study the effect on the stability of a railway track of constructing two major road fills providing access to a level crossing structure :

- strain and shear characteristics were measured by cyclic pressuremeter tests, which were the only tests that could be conducted easily and rapidly,
- the successive stages of construction of the fills has been modelled and computed using the finite element technique (using the CÉSAR-LCPC software program),
- lastly, the movement of the railway tracks and the catenary supports were monitored using detailed topography for the purposes of comparison. The measurements obtained were considerably smaller than those forecast.