
Analyse des désordres affectant une plate-forme ferroviaire. Approche statistique et modélisation.

Julien Dubost *** — Alain Denis * — Denys Breysse * — Marc Chanson **

* Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA) – Université Bordeaux1 - Avenue des Facultés - Domaine Universitaire 33405 TALENCE cedex.
j.dubost@cdga.u-bordeaux1.fr, a.denis@cdga.u-bordeaux1.fr, d.breysse@cdga.u-bordeaux1.fr

** SNCF – Direction Régionale Poitou-Charentes Aquitaine – DRI – Pole Ingénierie – Groupe Etudes Générales (PI.EG) – 54 bis rue Amédée St Germain, 33077 BORDEAUX cedex.
marc.chanson@sncf.fr

RÉSUMÉ. Suite à des tassements survenus sur une plate-forme ferroviaire, une étude a été entreprise pour en analyser les causes. L'homogénéité du site a dans un premier temps été caractérisée par une approche statistique, puis les calculs initiaux de tassements ont été repris par simulations de type Monte-Carlo. Ces deux approches montrent l'intérêt de prendre en compte la variabilité des sols pour une meilleure estimation des risques géotechniques.

ABSTRACT. Due to settlements of a freight railway platform, a study was undertaken to analyze their causes. First, the homogeneity of the site was described with a statistical approach, then preliminary calculations settlements were done again using Monte-Carlo simulations. These two methods show the interest to take in account the variability of the soils for a better estimation of the geotechnical risks.

MOTS-CLÉS : Géotechnique, tassements, plots ballastés pilonnés, substitution dynamique, analyse statistique, méthode de Monte-Carlo, éléments finis.

KEYWORDS: Geotechnical engineering, settlements, large rock columns, dynamic substitution, statistical analysis, Monte-Carlo method, finite element.

1. Introduction

Les tracés et emplacements des voies et des plates-formes ferroviaires sont déterminés en fonction des objectifs de dessertes et des emprises au sol disponibles. Les aménagements ferroviaires sont, par conséquent, très souvent implantés sur des sites à fortes contraintes géotechniques dues à la présence de sols compressibles. Un renforcement de ces sols est alors nécessaire. C'est dans ce contexte qu'a été implantée, à la fin des années 1990, une nouvelle plate-forme ferroviaire de transport combiné sur la façade atlantique. Peu de temps après sa mise en service, des affaissements sont survenus. Une étude a donc été entreprise pour analyser les désordres survenus et leurs causes possibles.

Les données géologiques et géotechniques de cette zone ont dans un premier temps été réinterprétées en utilisant différentes méthodes statistiques simples, avec comme objectif une évaluation rationnelle des caractéristiques moyennes des sols, de leur variabilité et de leur incertitude. Une telle analyse permet d'estimer l'homogénéité des sols compressibles dans la zone d'étude.

Les calculs de tassements ont ensuite été repris de manière à évaluer l'influence des paramètres géotechniques et de position des couches retenus sur les valeurs de tassement calculées. La variabilité des paramètres entrant dans ces calculs a donc été prise en compte, permettant ainsi d'obtenir une estimation des tassements plus représentative du site.

2. Site d'étude

La parcelle retenue pour le projet, d'une superficie de 11 ha, se situe dans une plaine inondable, à une altitude moyenne de 3m NGF. La zone est drainée par 3 cours d'eau principaux et de nombreux petits fossés. Un assainissement de ces terrains initialement marécageux avait été entrepris, nombre de parcelles avaient été mises hors d'eau par remblaiement avec des matériaux très hétérogènes. La réalisation d'une plate-forme de cette importance dans un milieu marécageux présentait d'importantes contraintes techniques. Des investigations géologiques et géotechniques ont donc été menées.

2.1. Géologie / géotechnique

Trois campagnes de reconnaissance géotechnique (correspondant aux phases APS, APD, et exécution) ont été menées en 1992, 1994 et 1999. Elles ont mis en évidence la présence de tourbes et d'argiles vasardes très compressibles sur plusieurs mètres d'épaisseur. Au total, plus de 240 sondages ont été réalisés.

Trois couches de sol se distinguent (figure 1) :

- Un horizon supposé incompressible constitué d'une couche sablo-argileuse surmontant un substratum marno-calcaire.
- Les sols compressibles d'une épaisseur variant de 1 à 7 mètres du sud vers le nord. Très hétérogènes, ils sont constitués de limons argileux dans leur partie supérieure, d'argiles vasardes plus ou moins organiques remplacées par de la tourbe dans le dernier tiers sud.
- Les remblais anthropiques occupant environ 80% du site, constitués principalement de matériaux de décharge, sur 2 à 3 mètres d'épaisseur.

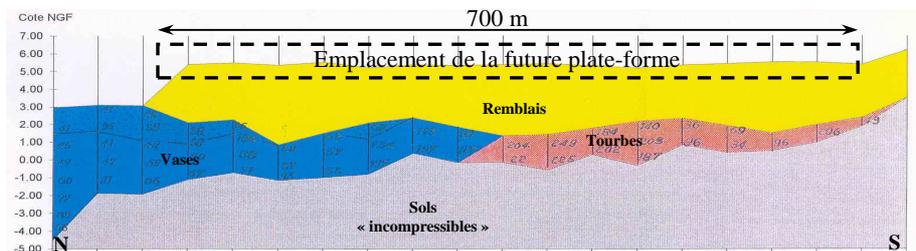


Figure 1. Profil géotechnique type (Rapport géotechnique CETE, 1994).

Les caractéristiques géotechniques moyennes des sols compressibles qui ont été retenues sont issues de l'étude de 1994, et sont présentées dans le tableau 1.

		Limons argileux	Argiles vasardes	Sols tourbeux
Teneur en eau	W% Tarière	42	68	160
	W% CPS	45	84	253
Indice de plasticité IP		42	52	-
Indice de consistance IC		0,9	0,4	-
% de matière organique		-	≈ 7 %	De 30 à 78 %
Essais triaxiaux	Cohésion C'	De 2,7 à 13 kPa	De 6 à 14 kPa	De 11 à 37 kPa
	Angle de frottement ϕ'	De 20° à 28°	De 20° à 26°	De 31° à 34°
Poids volumique (kN/m^3)		15 à 18		12
Indice des vides e_0		1,19 à 1,99		2,53
Indice de compressibilité Cc		De 0,3 à 0,4	De 0,5 à 1,4	De 1,16 à 3,93

Tableau 1. Caractéristiques des sols compressibles.

2.2. Méthode de renforcement des sols adoptée

L'exploitation d'une plate-forme à l'aide de portiques porte conteneurs requiert des tassements totaux et différentiels très faibles. Il a donc été décidé de renforcer le sol en place par des plots ballastés pilonnés (ou substitution dynamique).

Cette méthode de substitution dynamique emprunte sa technique de réalisation au compactage dynamique et son principe de fonctionnement à celui des colonnes ballastées (Liausu, 1984, 1990). Elle consiste à créer, par substitution dynamique, de

larges massifs granulaires (2,5 m de diamètre ; 5-6 m de longueur) qui s'ancrent sur un sol porteur et supportent le poids des superstructures.

Les 2500 plots réalisés selon une maille de 36 m² devaient permettre d'obtenir les critères de nivellement requis pour la future plate-forme. Les modélisations en éléments finis menées par le bureau d'étude de l'entreprise titulaire du marché concluait à un tassement maximum d'environ 2 cm, et des tassements différentiels ne dépassant pas 2 pour 1000.

2.3. Désordres constatés

Un an après la mise en service du site, des zones d'affaissements ont été signalées sur la plate-forme. Un nivellement de précision d'une partie des rails de roulement des portiques porte-conteneurs a été réalisé. Les résultats de cette investigation font apparaître deux zones où des tassements significatifs sont survenus :

- le quart nord ouest de la plate-forme, où les tassements sont les plus importants (21 cm maximum), sur une superficie d'environ 8000 m².
- une zone centrale, transverse, plus étendue (10500 m² environ), mais avec des valeurs de tassement moins importantes (7cm maximum). L'analyse présentée ici porte sur une partie de cette zone.

Dans l'état actuel des connaissances sur les désordres, plus de 20% des rails de roulement des portiques de la plate forme présentent un affaissement de plus de 2,5 cm par rapport à la mesure de récolement effectuée à la livraison de la plate-forme en novembre 2001. On peut estimer la surface affaissée à environ 18500 m², mais la totalité de la plate-forme n'ayant pas été nivelée, cette superficie pourrait se révéler plus importante encore. L'évolution des tassements se poursuit à l'heure actuelle.

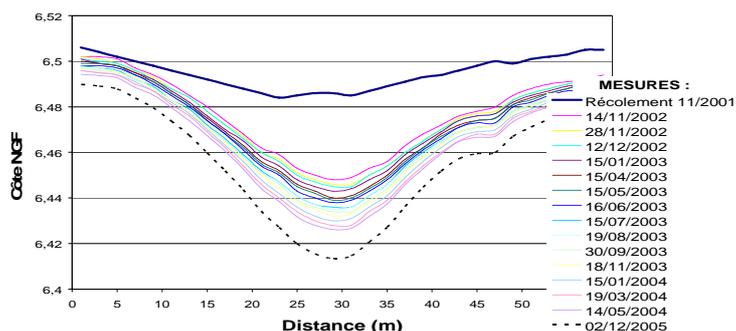


Figure 2. Suivi de nivellement de la déflexion de la zone centre.

3. Analyse d'une zone caractéristique

Face à ce constat, il a été décidé d'instrumenter une zone restreinte mais représentative des désordres. La zone choisie est située dans la partie centre de la plate-forme, d'environ 70 mètres de long dans le sens des rails. 15 mesures de nivellement ont été effectuées (figure 2), ainsi que 3 sondages pressiométriques au centre de la déflexion pour déterminer les caractéristiques du sol et d'un plot ballasté.

3.1. Données géotechniques à disposition

Lors de l'étude géotechnique AVP, une quinzaine de sondages avaient été réalisés à proximité de cette zone d'étude (sondages tarières, carottés). Une campagne d'essais pressiométriques a également été menée avant le début des travaux pour confirmer et affiner les résultats de l'étude précédemment citée. Huit sondages pressiométriques sont situés à proximité de la déflexion. Un des trois sondages réalisés suite à la constatation des désordres (SP2) est également utilisable.

Les coupes des sols accompagnants les huit sondages avant travaux (PRA 28 à 41) présentent successivement une couche de remblai, des argiles vasardes sur 5–6 mètres d'épaisseur, puis un horizon sableux, confirmant les conclusions des études précédentes. Le sondage SP2, post travaux, montre une surépaisseur de sol compressible d'environ 6 mètres.

Six mesures par forages ont été réalisées (1 par mètre), la dernière se situant, d'après les coupes, dans la couche sableuse. Les caractéristiques des neuf sondages pressiométriques sont présentées dans le tableau 2.

E_M	PRA28	PRA29	PRA30	PRA34	PRA35	PRA36	PRA40	PRA41	SP2
moyenne	5,85	3,37	6,12	5,42	3,63	2,77	3,60	4,12	5,97
Coefficient de variation	0,53	0,39	0,44	0,56	0,31	0,78	0,20	0,36	0,59
P_L									
moyenne	0,58	0,43	0,55	0,43	0,46	0,35	0,50	0,46	0,32
Coefficient de variation	0,63	0,77	0,85	0,74	0,89	1,10	0,48	0,46	0,53

Tableau 2. Données pressiométriques pour le sol compressible (en MPa).

3.2. Caractérisation de l'homogénéité de la zone d'études

Face à ce constat, nous avons cherché à savoir si il aurait été possible de détecter une « anomalie » géologique, telle une couche de plus forte compressibilité, à l'intérieur de l'horizon compressible, pouvant engendrer de tels désordres à partir des sondages à disposition. L'analyse statistique des moyennes et des variances des modules pressiométriques et des pressions limites permet d'estimer l'homogénéité de la couche compressible dans la zone d'étude (Cassan, 2000).

3.2.1. Méthode d'analyse des variances

Cette méthode permet d'apprécier globalement si les mesures effectuées dans tous les forages appartiennent à la même population. On évalue donc la variance sur la totalité des mesures (s^2), à l'échelle d'un forage (s^2_1), et entre forages (s^2_2). On calcule ensuite une variable aléatoire $F = s^2_1/s^2_2$ qui suit une loi du F de Fisher-Snedecor à $v_1=r-1$, $v_2=N-r$ degrés de liberté (avec n le nombre de mesure par sondage, r le nombre de sondages, N le nombre total de mesures). La condition d'acceptation de l'hypothèse d'homogénéité au seuil de probabilité α est alors : $F \leq F_{\alpha, v_1, v_2}$.

On obtient $F_{Em} = 2.0252$ et $F_{Pl} = 0.4425$ pour $F_{0,05(8;45)} = 2.15$.

Pour les valeurs de module pressiométrique, comme de pression limite, on vérifie $F \leq F_{\alpha, v_1, v_2}$. Au regard des variances, on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse que le site soit homogène.

3.2.2. Méthode d'analyse des moyennes

On compare successivement les moyennes empiriques de chaque sondage x_i à la moyenne globale de tous les sondages \bar{x} (test T de Student). Pour cela, on crée une variable aléatoire t'_i qui suit une loi de Student à $v_i=n_i+N-2$ degrés de liberté. Le domaine d'acceptation de l'égalité des moyennes du sondage i et de l'ensemble des sondages est : $-t_{\alpha/2, v_i} \leq t'_i \leq t_{\alpha/2, v_i}$. Les résultats du test sont présentés dans le tableau 3.

	PRA28	PRA29	PRA30	PRA34	PRA35	PRA36	PRA40	PRA41	SP2
$t'_i (E_M)$	1,1938	-1,185	1,4493	0,7788	-0,929	-1,76	-0,961	-0,466	1,3056
$t'_i (P_L)$	0,9684	-0,189	0,7213	-0,176	0,0708	0,3366	0,383	0,0318	-1,009
$t_{\alpha/2=0,025}$	2,065								

Tableau .3. Test d'homogénéité des moyennes.

On vérifie bien $-t_{\alpha/2, v_i} \leq t'_i \leq t_{\alpha/2, v_i}$. Donc, au regard des moyennes, on ne peut rejeter l'hypothèse que le site soit homogène.

3.2.3. Discussion

Les résultats de ces deux tests statistiques simples, appliqués à des données de sondages pressiométriques, ne montrent pas que le site présente une hétérogénéité en ce qui concerne les valeurs de E_M et de P_L , sur l'épaisseur de sol compressible étudiée. L'origine des désordres ne semble donc pas provenir d'une hétérogénéité de cette couche.

Plus que l'homogénéité (ou la non homogénéité du site), ces résultats montrent que ces tests statistiques ne permettent pas de mettre en évidence la possible présence d'une « anomalie », telle qu'une couche de très forte compressibilité, au sein de cet horizon. Les données pressiométriques ne sont peut être pas assez discriminantes pour un site tel que celui-ci, avec des sols compressibles hétérogènes constitués d'argiles vasardes plus ou moins organiques. D'autres moyens de

reconnaissance géotechnique, tel que le pénétromètre ou l'utilisation de diagraphies type Gama Ray, pourraient conduire à des résultats différents.

4. Analyse des tassements

L'étude statistique des sondages ne permettant pas de mettre en évidence la présence d'une « anomalie » géologique, nous avons repris les calculs de tassement en prenant en compte l'incertitude existant sur les différents paramètres géométriques et mécaniques des sols, incertitudes directement liée à la variabilité naturelle des sols.

4.1. Application de la méthode de Monte-Carlo

Les simulations de type Monte-Carlo consistent à reproduire un grand nombre de fois un calcul, en prenant à chaque calcul des valeurs de paramètres du calcul différentes. Les calculs de tassements initiaux (faits à partir des essais œdométrique, suivant la théorie de la consolidation de Terzaghi) ont donc été repris en prenant en compte la variabilité de chacun des paramètres du calcul. Pour ce faire on a considéré qu'ils se distribuaient selon une loi gaussienne (les variables étant indépendantes les une des autres), avec un coefficient de variation différent pour les éléments de géométrie et les caractéristiques des matériaux (tableaux 4).

Paramètres de sols	γ_{sol} (kPa)	H_0 (m)	e_0	C_s	C_c	C_r	σ'_p (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	σ'_{vf} (kPa)
Remblais et limons	16,8	3	1,53	0,05	0,58	0,026	80	80	118
Argiles vasardes	15,1	2	2,31	0,1	1,07	0,048	88	88	126
Coefficient de variation	2%	10%	10%	10%	10%	10%	2%	2%	2%

Tableau 4. Caractéristiques des sols retenues pour les simulations.

L'application de la méthode de Monte-Carlo (figure 4 et tableau 5) permet de prendre en compte l'incertitude existant sur les paramètres du calcul, en particulier sur les données géométriques et mécaniques du modèle. La valeur moyenne de tassement ainsi obtenue peut donc être considérée dans un intervalle de confiance plus représentatif de l'hétérogénéité probable des sols, mais aussi des incertitudes existant sur la géométrie du modèle.

Une analyse menée sur chaque paramètre indépendamment des autres a mis en évidence l'influence marquée de l'épaisseur de la couche compressible sur les résultats. Il faut donc s'interroger sur l'influence de ce paramètre sur le dimensionnement de la méthode de renforcement des sols choisie.

L'utilisation de simulations type Monte-Carlo lors d'études pour des projets sensibles aux tassements (en particulier différentiels) sur sites à la géologie complexe (Houy, 2005), ne peut être qu'un plus pour l'estimation des risques.

Moyenne	0,434
Maximum	0,601
Minimum	0,292
Ecart type	0,042

Tableau 5. Tassements avant renforcement du sol (en mètres).

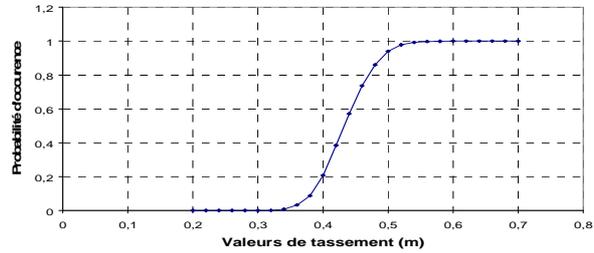


Figure 4. Répartition des tassements avant renforcement du sol.

4.3. Modélisation par éléments finis

Une des perspectives de l'étude précédente, est la prise en compte des incertitudes dans les modélisations par éléments finis (Auvinet et al. 2000 ; El Gonouni, 2004). Nous avons utilisé le logiciel CASTEM, dans lequel nous avons modélisé le site étudié en axisymétrique, avec les mêmes hypothèses que précédemment. Les calculs ont été réalisés en élasticité, en faisant varier la profondeur du sol incompressible sur lequel s'appuient les plots selon une loi normale. La figure 5 donne les valeurs de tassement dans l'axe du plot obtenues pour un approfondissement du sol porteur sous la base des plots.

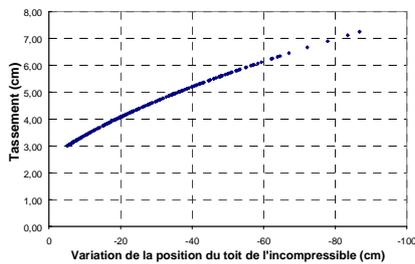


Figure 5. Tassement en fonction de la variation de la profondeur du sol incompressible.

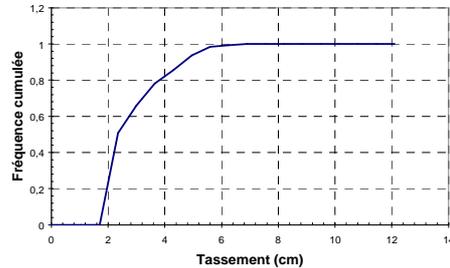


Figure 6. Fonction de répartition des tassements.

Le tassement attendu, quand le sol incompressible est à la profondeur escomptée est de l'ordre de 2,3cm. On constate qu'une surépaisseur de 60 cm de sol compressible sous la base des plots (erreur plausible lors d'une reconnaissance à la tarière) multiplie par 3 le tassement en tête du plot. La figure 6 montre que la probabilité d'avoir un tassement deux fois supérieur à celui estimé de manière déterministe est d'environ 15%, valeur très semblable à la fraction de la plate-forme présentant un affaissement.

Cette première approche par modélisation aux éléments finis, prenant en compte l'incertitude sur la position du toit du sol porteur, montre bien la grande sensibilité

de la méthode de renforcement de sol mise en œuvre à une faible variation de ce paramètre. Une modélisation simple, par éléments finis, utilisant la méthode de Monte-Carlo, aurait permis d'attirer l'attention du maître d'œuvre et du maître d'ouvrage sur la nécessité d'une reconnaissance plus fine de la position du sol incompressible.

Or, force est de constater la présence d'une « anomalie » géologique, surépaisseur de sol compressible de 6 m rencontrée dans le sondage pressiométrique SP2, au droit de la zone affaissée. Une modélisation réalisée avec cette surépaisseur de sol donne un tassement de plus de 20 cm. La figure 2 montre que les tassements ne sont pas stabilisés à ce jour, qu'à long terme leur évolution pourrait atteindre cette valeur.

5. Conclusion

L'étude statistique réalisée sur les données pressiométriques n'a pas permis de mettre en évidence une hétérogénéité marquée des sols compressibles sur l'épaisseur considérée, malgré une variabilité des valeurs importante.

Cette variabilité a cependant été prise en compte dans les calculs de tassement en appliquant la méthode de Monte-Carlo. On a ainsi pu mettre en évidence l'intérêt de son application pour les calculs de tassement sans renforcement du sol (méthode analytique) et avec renforcement (méthode numérique par éléments finis). Les résultats obtenus montrent que la prise en compte d'incertitudes sur les paramètres géométrique et géotechnique, avec des coefficients de variation pourtant modérés, entraîne des valeurs de tassements pouvant varier du simple au double.

Sur le site présenté ici, une approche statistique et des modélisations utilisant des simulations type Monte-Carlo auraient permis de mettre en garde les maîtres d'œuvre et d'ouvrage de la probabilité importante que surviennent des tassements supérieurs aux critères fixés.

5. Remerciements

Nous remercions la SNCF pour la mise à disposition du site d'étude, l'ANRT pour le financement de ces travaux, le CEA pour la mise à disposition du logiciel CASTEM et Christian Laborderie, professeur à l'ISABTP (Université de Pau et des Pays de l'Adour), pour son aide dans l'utilisation de ce code.

5. Bibliographie

- Auvinet, G., Mellah R., Masrouri F., Rodriguez J.F., « *La méthode des éléments finis en géotechnique* », Revue Française de la Géotechnique, n°93, 4^{ième} trimestre 2000.
- Cassan M., « *Utilisation de la statistique descriptive en géotechnique* », Revue Française de la Géotechnique, n°93, 4^{ième} trimestre 2000.
- El Gonouni M., Analyse des incertitudes dans l'évaluation des tassements lors de travaux souterrains en site urbain, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2004.
- Houy L., Variabilité des sols et risques liés à l'interaction sol-ouvrage, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2005.
- Liausu P., « *Renforcement de couches de sol compressible par substitution dynamique* », Actes du Colloque International : Renforcement en place des sols et des roches. Paris, vol. 1, 1984.
- Liausu P., Juillie Y., « *Procédures de contrôles sur un chantier de plots ballastés, Voies ferrées ELA 3 à Kourou (Guyane française)* », Travaux, n° 655, pp 9-14, 1990.