

Développement d'un modèle non linéaire de la voie ferrée ballastée

Development of a non-linear ballasted railway track model

Alves Fernandes V., Costa d'Aguiar S.
Innovation & Recherche SNCF, Paris, France

Lopez-Caballero F.
LMSSMat – Ecole Centrale Paris, Châtenay-Malabry, France

RÉSUMÉ : L'objectif de ce travail est d'étudier la réponse mécanique de la voie ferrée dans le contexte de comportement mécanique non-linéaire des matériaux ferroviaires. Un modèle éléments finis 2D avec épaisseur en déformation plane modifiée est utilisé ; des frontières absorbantes sont implémentées avec un modèle de comportement viscoélastique de type Kelvin-Voigt afin de réduire les réflexions d'onde aux bords. Le modèle de comportement de sols ECP est considéré pour la couche intermédiaire et la plateforme, dont les paramètres sont calibrés à partir des essais triaxiaux disponibles dans la littérature. Afin de montrer l'effet de l'utilisation d'un modèle de comportement non-linéaire, les déplacements verticaux normalisés obtenus sont comparés à un modèle élastique. L'importance de l'état initial et de son évolution est évoquée afin d'assurer une transposition correcte des essais laboratoires aux conditions d'utilisation des voies ferrées, principalement pour le ballast.

ABSTRACT: The aim of this work is to study track mechanical response in the context of non-linear mechanical behavior of track layers. A 2D finite element model with a modified width plane strain condition is used in this work; viscous boundaries are implemented using a Kelvin-Voigt viscoelastic mechanical model as to reduce wave reflexion on boundaries. The ECP constitutive model is considered to simulate the behavior of soils of both the intermediate layer and platform. The model parameters were calibrated from triaxial test results available in the literature. In order to show the effect to use a non-linear soil behavior, the obtained normalized vertical track displacements were compared to those obtained with an elastic model. The importance of initial state evolution of track materials on the context on non-linear mechanical behavior is discussed as to assure the correct transposition of laboratory tests to track current conditions, especially to the ballast material.

MOTS-CLÉS : voie ferrée, éléments finis, mécanique non-linéaire, rotation de contraintes principales

KEYWORDS: railway track, finite-element model, non-linear mechanical behaviour, principal stress axis rotation

1 INTRODUCTION

Les géomatériaux ferroviaires possèdent différentes échelles de complexité. La taille des grains, la géométrie et la nature des matériaux peuvent varier selon les couches ferroviaires et à l'intérieur de chaque couche. La réponse mécanique des géomatériaux est très non-linéaire et dépend du chemin de contraintes appliqué, du taux de déformation plastique ; et selon la taille des grains et/ou nature du sol, sa réponse mécanique peut être aussi dépendante de la présence de l'eau. Cet ensemble de caractéristiques contribue à l'évolution de la réponse mécanique de la voie ferrée ; cependant, seulement un modèle élastoplastique non-linéaire est capable d'en prendre compte.

L'utilisation des modèles rhéologiques avancés pose deux questions majeures : comment obtenir les paramètres nécessaires au modèle ? et combien représentatif est leur transposition directe vers la modélisation de la réponse mécanique d'une structure sous charge ? La première question est fréquemment répondue à partir des essais en laboratoire ou *in-situ*. La deuxième, par contre, est spécifique des modèles non-linéaires, pour lesquels le chemin de contraintes et l'évolution de l'état initial doivent être pris en compte afin de modéliser correctement la réponse de la structure.

L'objectif de ce papier est d'étudier la réponse mécanique de la voie ferrée en utilisant des modèles de comportement élastique et élastoplastique pour les différents composants. Le modèle de comportement avancé ECP (Aubry et al., 1982, Hujeux, 1985) est choisi puisque il permet de simuler un large éventail de possibles réponses mécaniques. Les deux aspects auparavant évoqués – obtention de paramètres et leur transposition vers la structure – sont discutés dans le contexte des géomatériaux ferroviaires.

2 MODÈLE DE COMPORTEMENT ECP

Le modèle élastoplastique multimécanisme développé à l'Ecole Centrale Paris, appelé modèle ECP (Aubry et al., 1982, Hujeux, 1985) est écrit selon le concept de contraintes effectives de Terzaghi. Le modèle est basé dans le critère de rupture de type Coulomb est dans le concept d'état critique. Tout phénomène irréversible est modélisé par trois déformations planes déviatoriques plastiques dans trois plans orthogonaux et une dans le plan isotrope. L'évolution de l'écrouissage est contrôlée par la déformation plastique selon le mécanisme : déformation déviatorique et volumique pour les mécanismes déviatoriques et déformation volumique pour le mécanisme isotrope. Le comportement cyclique utilise l'écrouissage cinématique basé dans les variables d'état au dernier changement de direction de chargement.

Le modèle est basé dans la théorie de la plasticité incrémentale, laquelle considère une décomposition complète des déformations dans une partie élastique et plastique. Le modèle considère l'élasticité non-linéaire pour la réponse élastique. Le module isostatique (K) et de cisaillement (G) sont fonctions de la pression moyenne effective (p') :

$$K(p') = K_{ref} \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^{n_{el}} \quad (1)$$

$$G(p') = G_{ref} \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^{n_{el}} \quad (2)$$

K_{ref} et G_{ref} sont le module isostatique et de cisaillement mesurés à la pression moyenne de référence p_{ref} , et n_{el} est le degré de non-linéarité. La surface de réponse déviatorique dans le plan k est la suivante :

$$f_k(\sigma, \varepsilon_v^p, r_k) = q_k - \sin \phi'_{pp} \cdot p'_k \cdot F_k \cdot r_k \quad (3)$$

avec:

$$F_k = 1 - b \ln \left(\frac{p'_k}{p_c} \right) \quad (4)$$

$$p_c = p_{c0} \exp(\beta \varepsilon_v^p) \quad (5)$$

ϕ'_{pp} est l'angle de frottement à l'état critique, b contrôle la forme de la surface de réponse, β est le module de compressibilité plastique et p_{c0} représente la contrainte à l'état critique correspondant à l'indice de vides initial. r_k est appelé le degré de frottement mobilisé et il est associé à la déformation déviatorique plastique. Sa loi d'évolution est la suivante :

$$\dot{r}_k = \dot{\lambda}_k^p \frac{(1 - r_k)^2}{a} \quad (6)$$

$\dot{\lambda}_k^p$ est le multiplicateur plastique du mécanisme k et a :

$$a = a_1 + (a_2 - a_1) \alpha_k(r_k) \quad (7)$$

$$\alpha_k = 0 \text{ if } r_k^{elas} < r_k < r_k^{hys}$$

$$\alpha_k = \left(\frac{r_k - r_k^{hys}}{r_k^{mob} - r_k^{hys}} \right)^m \text{ if } r_k^{hys} < r_k < r_k^{mob} \quad (8)$$

$$\alpha_k = 1 \text{ if } r_k^{mob} < r_k < 1$$

a_1 , a_2 et m sont des paramètres du modèle. Cette écriture permet la décomposition de l'érouissage déviatorique dans les domaines pseudo-élastique, hystérétique et mobilisé. Chaque domaine est défini par les rayons respectifs r_k^{elas} , r_k^{hys} et r_k^{mob} . La surface de réponse du mécanisme isotrope est définie par :

$$f_{iso} = |p'| - d \cdot p_c \cdot r_{iso} \quad (9)$$

avec:

$$\dot{r}_{iso} = \dot{\varepsilon}_{iso}^p \frac{(1 - r_{iso})^2}{c_{mon} \frac{p_c}{p_{ref}}} \quad (10)$$

d est un paramètre du modèle et c_{mon} contrôle l'érouissage volumique. Le modèle considère une fonction de charge associée dans le plan déviatorique (k). La fonction de dilance proposée par Roscoe (Roscoe et al., 1958) est considérée afin d'obtenir l'incrément de déformation déviatorique plastique de chaque mécanisme :

$$\dot{\varepsilon}_{vk}^p = \dot{\lambda}_k^p \cdot \alpha_\psi \cdot \alpha_k(r_k) \left(\sin \psi - \frac{q_k}{p'_k} \right) \quad (11)$$

ψ est l'angle caractéristique et α_ψ un paramètre constant.

Lopez-Caballero et Modaressi-Farahmand-Ravazi (2008) ont proposé une classification des paramètres du modèle selon leur méthode d'estimation : directement et non directement mesuré.

3 ESSAIS EN LABORATOIRE

Les paramètres du modèle ont été calibrés pour les différents géomatériaux ferroviaires à partir des essais triaxiaux disponibles dans la littérature.

Tableau 1. Classification des paramètres du modèle élastoplastique ECP

	Directement mesurés	Non directement mesurés
Elasticité	$K_{ref}, G_{ref}, n_e, p_{ref}$	
Etat critique et Plasticité	$\phi'_{pp}, \beta, p_{c0}, d$	B
Fonction de charge et érouissage Isotrope	ψ	$a_1, a_2, \alpha_\psi, m, c_{mon}$
Taille de domaines		$r_k^{ela}, r_k^{hys}, r_k^{mob}, r_{iso}^{ela}$

3.1 Matériau ballast

Des essais mécaniques sur le ballast ont été effectués par différents auteurs (Suiker 2002, Fortunato 2005 and 2010, Indraratna et al. 2011). Un comportement très dilatant à faible confinement a été mis en évidence. Lors des opérations de rénovation ou de bourrage des voies ferrées, une procédure de stabilisation du ballast est effectuée, puisque le ballast présente grand tassement et réarrangement des grains dans les premières centaines de cycles (Jeffs and Maritch, 87).

Du point de vue de la mécanique des sols, l'état initial du ballast évolue lors de la procédure de stabilisation. Du point de vue de modélisation numérique, cela revient à développer une procédure d'initialisation des contraintes qui tienne compte de cette évolution et qui considère le ballast déjà dans son état stabilisé. Même si la calibration des paramètres du modèle ECP a été effectuée selon les essais triaxiaux, le comportement de ce matériau a été choisi comme linéaire élastique dans une première approche, puisque le développement d'une procédure d'évolution de l'état initial est encore en cours.

3.2 Matériau de la couche intermédiaire

La couche intermédiaire est composée d'un mélange des matériaux provenant de la couche de ballast pollué et de la plateforme. Elle existe seulement dans les voies classiques anciennes, dans lesquels aucune couche de forme n'a été construite et dont la vitesse est actuellement limitée à 220 km/h. Trinh (2010) a étudié les propriétés mécaniques et hydrologiques de ce matériau à partir d'une série d'essais triaxiaux, à différentes teneurs en eau, et à partir d'essais d'infiltration. Même si la réponse mécanique a été très influencée par la teneur en eau, seulement les essais effectués à la saturation ont été considérés.

Les Figures 1 et 2 montrent la réponse déviatorique et volumique des paramètres calibrés pour le modèle ECP lors du chemin de contrainte de l'essai triaxial. Sur les mêmes figures, le résultat expérimental est aussi exposé. Les paramètres numériques obtenus sont cohérents et suivent le résultat expérimental de Trinh (2010).

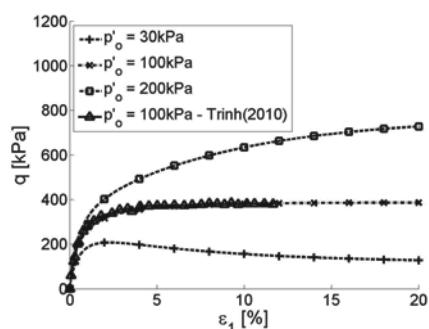


Figure 1. Contrainte déviatorique q vs. déformation axiale ε_1

3.3 Matériau de la plateforme

La plateforme est supposée raide. Afin de prendre en compte ce comportement, les paramètres proposés par Costa d'Aguiar (2008), obtenus à partir des essais mécaniques dans le sable de Toyoura (Fukushima and Tatsuoka, 1984), sont utilisés.

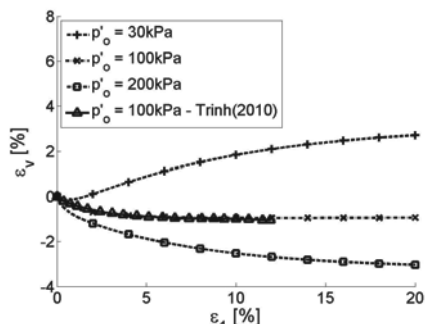


Figure 2. Déformation volumétrique ε_v vs. déformation axiale ε_1

4 MODELE ELEMENT FINIS DE LA VOIE FERREE

Un modèle éléments finis 2D en déformation plane avec épaisseur (Saez, 2009) est considéré dans ce travail. La superstructure est composée du rail, des semelles, des traverses et du ballast non-confiné entre traverses. Le rail est modélisé par des éléments poutres et les autres composants par des éléments volumiques. Le modèle considère une structure de voie ferrée classique appartenant au réseau français, composée de ballast sain, ballast pollué, une couche intermédiaire et la plateforme. La Figure 3 montre la cellule périodique représentant la structure ferroviaire avec les respectives épaisseurs de couches. Ces épaisseurs sont issues de valeurs moyennes obtenues à partir des mesures de caractérisation *in-situ* déjà utilisées par les auteurs dans des travaux précédents (Alves Fernandes et al., 2012). Afin de réduire la réflexion des ondes P et S dans les bords du maillage, des couches absorbantes avec un modèle de comportement de type Kelvin-Voigt ont été utilisées dans les deux bords latéraux.

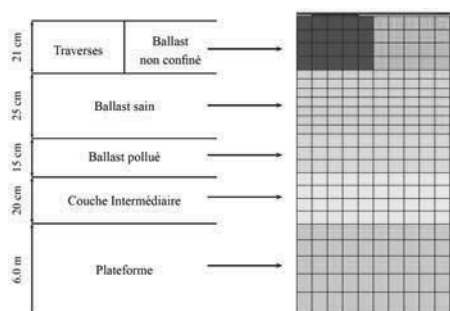


Figure 3. Cellule périodique représentative de la structure ferroviaire

Les propriétés mécaniques des matériaux de la superstructure sont définies dans le Tableau 2.

Tableau 2. Propriétés élastiques des composants de la superstructure

	E [MPa]	ν [.]
Semelles	40	0.3
Traverses	$34 \cdot 10^3$	0.3
Ballast non confiné	50	0.2
Ballast sain	150	0.2
Ballast pollué	250	0.3

La force appliquée par le train sur la voie est considérée ponctuelle et appliquée directement aux nœuds des éléments poutre. Le déplacement longitudinal de la force est effectué nœud à nœud à la vitesse voulue. Le chargement d'un boggie est modélisé à partir de deux charges de 85 kN représentant chaque roue, F_1 et F_2 , écartées de 3 m. Les déplacements verticaux obtenus par le modèle élastique et élastoplastique sont comparés afin de monter l'effet du modèle de comportement.

5 RESULTATS

Le modèle élastique est analysé en premier afin de définir le cas de référence. La Figure 4 montre le déplacement vertical u_z de différentes couches normalisé par le déplacement absolu maximum au niveau du rail. L'abscisse est recentrée sur la deuxième force F_2 , qui passe sur un point après la force F_1 . Une réduction rapide des déplacements entre le rail et la traverse est observée. Les semelles atténuent 60% du déplacement vertical total dans ce cas. La couche intermédiaire présente encore 28% du déplacement vertical total et la plateforme 20%.

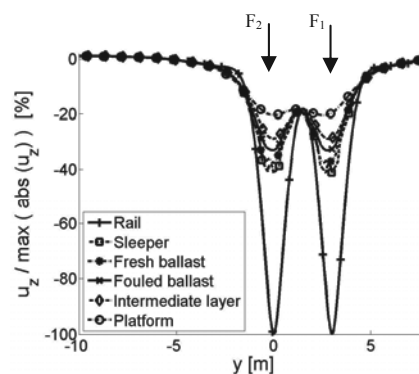


Figure 4. Déplacement vertical normalisé pour les différentes couches de la structure ferroviaire à l'instant de force maximum appliqué sur une traverse (cas élastique ; vitesse de 150km/h)

La Figure 5 montre le déplacement vertical u_z normalisé par le déplacement absolu maximum au niveau du rail pour le cas élastoplastique. Contrairement au cas élastique, un tassement au niveau du rail de l'ordre de 20% du déplacement vertical maximum est obtenu. Le déplacement vertical maximum de chaque essieu n'atteint plus la même valeur, le deuxième essieu (F_2) présente une valeur maximale plus grande que le premier essieu (F_1). Ce fait peut être expliqué par une augmentation du confinement sous F_1 dû à F_2 et pourtant une augmentation de la résistance du sol sous F_1 . Dans les voies réelles en utilisation courante, le tassement est observé à plus petite échelle. Comme discuté auparavant, une procédure numérique d'évolution de l'état initial des matériaux non-linéaires doit être développée afin d'assurer qu'ils soient au même état qu'en voie courante.

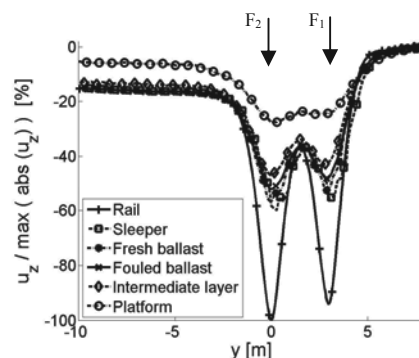


Figure 5. Déplacement vertical normalisé pour les différentes couches de la structure ferroviaire à l'instant de force maximum appliqué sur une traverse (cas élastoplastique ; vitesse de 160km/h)

Une différence importante entre le chemin de contraintes de l'essai triaxial et des charges mobiles est le cisaillement. Différemment des points directement sous la charge appliquée, les points en amont et en aval expérimentent aussi une légère réduction du confinement et une augmentation de la contrainte déviatorique due au cisaillement. La présence de cisaillement mène aussi à la rotation de l'axe de contraintes. Différents auteurs ont montré (Grabe and Clayton, 2009, Ishikawa et al., 2011, parmi d'autres) que le ballast et les matériaux des plateformes ferroviaires répondent différemment à ces deux chemins de contraintes. Une augmentation de la déformation verticale permanente est observée dans le cas de rotation de l'axe des contraintes principales.

L'évolution de l'angle de rotation de l'axe des contraintes principales θ_1 en fonction du temps est étudiée selon la position dans la cellule périodique (Figure 3). La position entre traverses est montrée sur la Figure 6. On observe que dans ce cas la couche de ballast subit une rotation maximale de plus de 60° (30° positive et négative), valeur qui réduit avec la profondeur. La plateforme subit une rotation maximale de 20%. Par contre, les points directement sous la traverse sont soumis à des angles de rotation plus petits (Figure 7). Comme la voie ferrée possède un support discret, les points de la cellule périodique suivent des chemins de contrainte différents. La discontinuité du support mène à une concentration de la charge sous traverse, ce qui augmente la part de la contrainte verticale vis-à-vis du cisaillement et donc limite la valeur maximale de θ_1 . Les points entre traverses subissent des contraintes normales moins importantes et de contraintes de cisaillement plus élevées, ce qui augmente l'angle de rotation. Une répartition progressive des contraintes normales et de cisaillement est obtenue en profondeur et cette non-homogénéité est moins observée dans la couche intermédiaire et la plateforme.

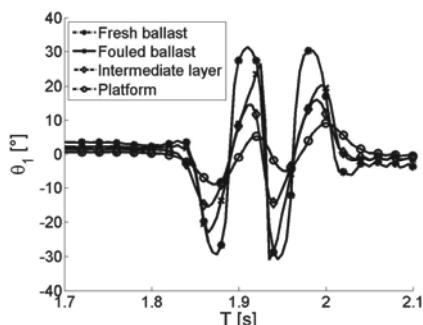


Figure 6. Rotation de l'axe des contraintes principales θ_1 pour différentes couches entre traverses (cas élastique; vitesse de 150km/h)

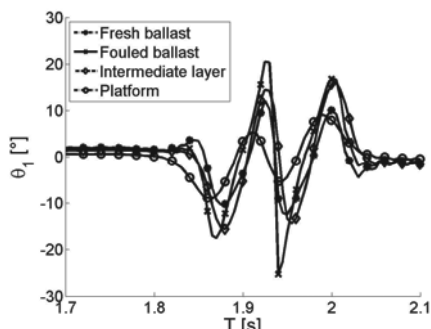


Figure 7. Rotation de l'axe des contraintes principales θ_1 pour différentes couches sous traverse (cas élastique; vitesse de 150km/h)

6 CONCLUSION ET TRAVAUX À VENIR

Les géomatériaux ferroviaires possèdent différents degrés de complexité, leur réponse mécanique dépend de leur état initial, du chemin de contraintes imposé et pour les matériaux fins aussi

du degré de saturation. Seulement des modèles rhéologiques complexes peuvent prendre ces différents aspects en compte.

Le modèle élastoplastique ECP a été choisi afin de modéliser la réponse mécanique de la couche intermédiaire et de la plateforme. Les paramètres du modèle ont été calibrés à partir de résultats d'essais triaxiaux disponibles dans la littérature. Même si des paramètres ont été aussi calibrés pour le ballast, une attention particulière doit être portée à la modélisation de ce matériau. Il présente grande dilatance à faible confinement, condition rencontrée en voie avant stabilisation. Dans ce sens, une procédure pour faire évoluer l'état initial doit être développée, basée sur les procédures effectuées en voie.

Les résultats des simulations élastique et élastoplastique ont montré les atouts des modèles complexes : prise en compte des phénomènes irréversibles et évolution de l'état initial. L'influence du support discret sur les voies ballastées dans l'angle de rotation de l'axe de contraintes principales a été aussi étudiée. Le support contribue à des chemins de contraintes différents selon la position dans la cellule périodique. L'angle de rotation est plus petit sous traverse vis-à-vis entre traverse pour les couches proches du support. Une homogénéisation progressive des contraintes est obtenue en profondeur.

7 REFERENCES

- Alves Fernandes, V., Costa d'Aguiar, S., Lopez-Caballero, F. 2012. Influence of soil properties variability on the railway track response under moving load. *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Transportation Geotechnics* (en anglais)
- Aubry, D., Hujeux, J.-C., Lassoudière, F., and Meimon, Y. 1982. A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour. *Proceedings of the Int. Symp. Num. Mod. Geomech.*, Balkema, 3-13. (en anglais)
- Costa d'Aguiar, S. 2008. *Numerical modelling of soil-pile axial load transfer mechanisms in granular soils*. PhD, Ecole Centrale Paris, France. (en anglais)
- Fortunato, E. 2005. *Renovação de plataformas ferroviárias – Estudos relativos à capacidade de carga*. PhD, Universidade do Porto, Portugal (en portugais).
- Fortunato, E., Pinelo, A., Fernandes, M. M. 2010. Characterization of the fouled ballast layer in the substructure of a 19th century railway track under renewal. *Soils and Foundation*, 50(1):55-62. (en anglais)
- Fukushima, S. and Tatsuoka, F. 1984. Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures. *Soils and Foundations*, 24(4):30-48. (en anglais)
- Gräbe, P. J., Clayton, C. R. I. 2009. Effects of Principal Stress Rotation on Permanent Deformation in Rail Track Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(4):555-565. (en anglais)
- Hujeux, J.-C. 1985. Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. In V. Davidovici, editor, *Génie Parasismique*, Presses ENPC, France, pp. 278-302. (en anglais)
- Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C. 2011. *Advanced Rail Technology – Ballasted Track*. CRC Press/Balkema. (en anglais)
- Ishikawa, T., Sekine, E., Miura, S. 2011. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads. *Canadian Geotechnical Journal* 48(5):691-703. (en anglais)
- Jeffs, T., Marich, S. 1987. Ballast characteristics in the laboratory. *Conference on Railway Engineering, Perth*, pp. 141-147. (en anglais)
- Lopez-Caballero, F., Modaressi-Farahmand-Ravazi, A. 2008. Numerical simulation of liquefaction effects on seismic SSL. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28(2): 85-98. (en anglais)
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., Wroth, C. P. 1958. On the yielding of soils. *Géotechnique* 8(1), 22-52. (en anglais)
- Suiker, A. 2002. *The mechanical behaviour of ballasted railway tracks*. PhD, Delft University of Technology, Netherlands. (en anglais)
- Saez, E. P. R. 2009. *Dynamic non-linear soil-structure interaction*. PhD, Ecole Centrale Paris, France. (en anglais)
- Trinh, V. 2010. *Comportement hydromécanique des matériaux constitutifs de plateformes ferroviaires anciennes*. PhD, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.