

VARIABILITÉ DE LA RIGIDITÉ D'UN SOL D'INFRASTRUCTURE ET SES EFFETS SUR L'UNIDES CHAUSSÉES SOUPLES : APPROCHE PROBABILISTE

Michel Vaillancourt, LUCREB, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada
Laurent Houy, CDGA, Université Bordeaux 1, 33405 Talence cedex, France
Denys Breysse, CDGA, Université Bordeaux 1, 33405 Talence cedex, France
Daniel Perraton, LUCREB, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

Le projet consiste à évaluer l'effet de la variation de l'échelle de fluctuation de la rigidité d'un sol d'infrastructure sur l'uni des chaussées souples exprimé en terme d'IRI. L'échelle de fluctuation, qui définit la structure de la dispersion de la rigidité du sol, a un effet direct sur la longueur d'onde des déformations induites et donc sur la valeur d'IRI évaluée à partir de pseudo-profilés décomposés selon des longueurs d'ondes spécifiques. Il s'agit de : 1) montrer selon une approche numérique et statistique l'influence de la variabilité spatiale inhérente des propriétés du sol sur la chaussée en terme de contrainte et de déplacement ; 2) d'analyser les effets de la déformation du sol sur les valeurs de l'IRI.

ABSTRACT

This project want to evaluating the effect of the variation of the scale of fluctuation of the rigidity of infrastructure on the roughness of the flexible pavements expressed in term of IRI. The scale of fluctuation, who defines the structure of the dispersion of the rigidity of the infrastructure, has a direct effect over the wavelength of the induced deformations and thus on the value of IRI evaluated from pseudo-profiles broken up according to specific wavelengths. It acts of: 1) to show, according to a numerical and statistical approach, the influence of the inherent space variability of the properties of the infrastructure on the pavement surface in term of stresses and strains; 2) to analyze the effects of the deformation of the ground on the values of the IRI.

1. INTRODUCTION

En considérant la variabilité spatiale des matériaux d'infrastructure comme la principale cause des déformations de grandes longueurs d'ondes de l'uni des chaussées souples, il est clair que l'échelle de fluctuation de cette variabilité à une influence directe sur la longueur d'onde des déformations associées à ces matériaux. Cet article propose une approche qui consiste à modéliser numériquement : une structure de chaussée reposant sur un sol dont la rigidité est variable selon diverses échelles de fluctuation. L'impact de cette variabilité est évalué en termes de contrainte, de déplacement et de valeurs d'IRI.

2. CARACTÉRISATION DE L'OUVRAGE

La modélisation de la chaussée est représentative d'une section d'autoroute québécoise construite en 2001, ayant fait l'objet d'une investigation approfondie sur un tronçon de 100 mètres. Compte tenu de la stratigraphie du site et de l'élévation prévue du tracé de la route, une couche de matériaux de remblai (≈ 2 m) a été placée sur le sol support avant la mise en œuvre de la structure de la chaussée. Le sol de remblai, provenant des déblais du site, est de la même nature que le sol support : un sable naturel de type SP-SM. L'élévation correspondant à la surface du remblai est la ligne d'infra et les matériaux confinés sous la ligne d'infra représentent le sol d'infrastructure.

La structure de la chaussée se compose d'un enrobé bitumineux (2 couches : couche de base de 80 mm et couche de roulement de 55 mm), et d'une fondation

granulaire (2 couches : 100 mm d'un concassé de 0-20 mm et 205 mm d'un concassé 0-56 mm). Les caractéristiques des matériaux ont été établies par des essais in-situ (essais SPT - *Standard Penetration Test*) et par des essais de laboratoire réalisés à partir d'échantillons prélevés directement sur le site.

Le modèle représentant cette structure de chaussée consiste en une couche rigide combinant les couches d'enrobés bitumineux et de fondation granulaire. Le calcul des couches équivalentes d'Odemark permet de remplacer un système multicouche par une seule couche de module et d'épaisseur unique (Éq.1). Utilisant le rapport des modules de chaque couche (E_0/E_1), on détermine une nouvelle épaisseur (h_e) de la couche 1 (h_1 et E_1) possédant le même module que la couche de référence E_0 . La somme des épaisseurs des couches de même module est réalisée afin d'obtenir une couche unique, corrigé par "f" lié au rapport de rigidité.

$$h_e = fh_1 \left(\frac{E_0}{E_1} \right)^{1/3} \quad [1]$$

3. CONCEPT D'UNI ET D'IRI ET DECOMPOSITION DU PSEUDO-PROFIL

3.1 L'uni et le pseudo-profil

Une façon d'évaluer la qualité de service offert aux usagers de la route consiste à évaluer l'uni de la chaussée par la mesure de son profil longitudinal. Le profil longitudinal fluctue de façon continue le long du tracé de

la route mais son appréciation se fait de façon discrète par des mesures ponctuelles de l'élévation de la surface : le pseudo-profil brut longitudinal.

L'uni d'une chaussée est altérée par des défauts de plusieurs natures et de diverses longueurs d'ondes qui se reflètent directement dans le pseudo-profil. Plusieurs publications présentent une description détaillée des défauts observés à la surface des chaussées (OCDE 1984; Tessier 1990; Durand et Doré 1993;). Dans l'ensemble, les détériorations de grandes longueurs d'ondes originent des couches plus profondes, les sols d'infrastructure et la sous-fondation (tassement; soulèvement différentiel; certains types de fissures; ondulation; bombement; gonflement; etc.) alors que les défauts de courtes longueurs d'ondes sont plutôt liés aux couches supérieures de la chaussée (fissures transversales, longitudinales et polygonales; carrelage; lézardes; désenrobage et arrachement de granulats; pelade; etc). Les défauts de courtes longueurs d'ondes sont essentiellement le fruits d'agents externes tel que l'environnement, les charges dynamiques des poids lourd et le vieillissement tandis que les défauts de grandes longueurs d'ondes sont associés principalement à la variabilité spatiale des caractéristiques des matériaux et du site (Breyse 2001).

Plusieurs études ont porté sur la caractérisation des amplitudes et des longueurs d'ondes associées aux défauts de surface et à leurs effets sur la perception de l'utilisateur (Delanne 1999). À partir d'une analyse du pseudo-profil, on peut donc espérer départager les différents défauts à l'origine des fluctuations de l'uni.

3.2 Indice de Rugosité International (IRI)

À la fin des années 70, sous l'égide du "National Cooperative Highway Research Program" (NCHRP) un nouvel indicateur de la qualité de l'uni d'une chaussée a été proposé, indépendant de la technique utilisée pour les relevés d'élévation. La méthode d'analyse fut développée, simplifiée et standardisée pour aboutir à la création d'un indicateur de la rugosité de surface, l'IRI. (Sayers et Karamihas 1996).

L'IRI se calcule à partir d'un modèle analogique représentatif de la réponse dynamique d'un véhicule au profil d'une chaussée (Sayers et al. 1986). Le modèle du quart de véhicule simule le mouvement vertical du châssis d'un véhicule par l'entremise d'une masse suspendue, lequel est tributaire de l'action combinée du système couplé roue-essieu sujet aux variations du pseudo-profil (Figure 1). L'IRI constitue la somme des déplacements relatifs entre la masse suspendue et la masse non suspendue (Éq. 2). Les paramètres L et v représente respectivement la longueur de la section à l'étude et la vitesse du véhicule.

Un des avantages du modèle du quart de véhicule est qu'il permet de traduire les effets de la chaussée ressentis par les passagers en tenant compte des caractéristiques spécifiques au véhicule. L'inconfort maximum étant ressenti lorsque la roue ou le châssis du

véhicule atteint leur fréquence de résonance, (10 à 12Hz pour la roue et 1 et 1,5Hz pour le châssis) (Delanne, 1999). Bien que l'analyse du confort du passager à l'aide de ce modèle soit pertinente, il ne permet pas une corrélation entre les défauts et leur localisation et la valeur d'IRI.

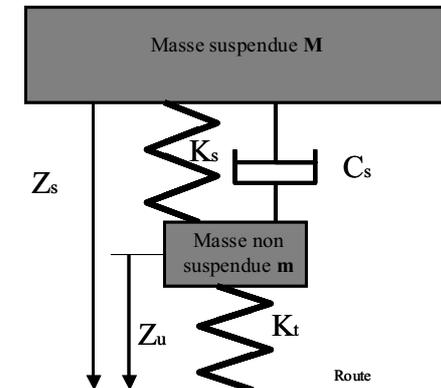


Figure 1. Schématisation du modèle du quart de véhicule possédant les paramètres du véhicule étalon normalisés par rapport à la masse suspendue M , où : $m/M = 0,15$; $K_s/M = 653,0$; la constante de l'amortisseur de la suspension $C_s/M = 63,3$; la constante de ressort de la roue $K_t/M = 6,0$. (Source : Sayers et Karamihas, 1998).

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/v} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \quad [2]$$

3.3 Approche d'analyse proposée

Parce que le pseudo-profil peut être considéré comme la somme de plusieurs signaux sinusoïdaux de diverses longueurs d'ondes et amplitudes, une approche d'analyse basée sur la décomposition du pseudo-profil brut est proposée de manière à définir des pseudo-profil élémentaires. Chacun de ces pseudo-profil peut alors être traité par le modèle du quart de véhicule afin d'en déterminer l'IRI correspondant, l'IRI_{BP}. Il devient possible de cibler les longueurs d'ondes critiques du pseudo-profil brut et d'en évaluer leurs impacts sur la valeur de l'IRI_{BP}. Dans le cadre de l'analyse proposée, le pseudo-profil brut est décomposé selon des longueurs d'ondes spécifiques de manière à mettre en relief l'importance relative de chacune d'elles sur l'IRI.

L'hypothèse sur laquelle repose cette approche suppose que l'IRI_{BP}, calculé sur un de ces pseudo-profil élémentaires, est proportionnel à l'impact qu'à sur l'uni les défauts associés à la longueur d'onde correspondante (Doré et al. 2001, Vaillancourt et al. 2003). Les IRI_{BP} peuvent être regroupés en famille de longueurs d'ondes : les petites (PO : 0,7m-2,8m), les moyennes (MO : 2,8 m-

11,5 m) et les grandes (GO : 11,5 m- 45,2m) (Delanne, 1999).

4. ANALYSE PROBABILISTE EN FONCTION DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES

4.1 Le modèle numérique

La déformation de la chaussée est fonction, entre-autres, du rapport de rigidité entre le sol d'infrastructure et la structure de la chaussée (Breysse, 2001) : dans le cas d'un sol d'infrastructure souple, nettement moins rigide que la structure de la chaussée, le comportement mécanique de la structure s'apparente à celui d'un radier rigide, pratiquement indéformable, et l'échelle de fluctuation des déformations superficielles tend vers l'infini. Par opposition, en présence d'un sol d'infrastructure infiniment rigide vis-à-vis de la structure de la chaussée, l'échelle de fluctuation des déformations superficielles seront tributaires de celles du sol d'infrastructure. En réalité, la valeur du rapport de rigidité est comprise entre ces deux situations extrêmes.

Pour mettre en relief l'importance de la différence de rigidité entre le sol d'infrastructure et la structure de la chaussée sur le pseudo-profil et l'uni, une analyse par éléments finis stochastiques, basée sur la méthode de Monté Carlo, est proposée. Cette méthode consiste à discrétiser le champ aléatoire de la rigidité du sol d'infrastructure et de calculer, de façon déterministe, la réponse du système en terme de contrainte et de déplacement. Par une analyse statistique des résultats des simulations numériques, les risques de dépassement des valeurs critiques (contraintes, déplacement) sont alors estimés pour juger de la performance de l'ouvrage. Cette approche permet d'étudier le comportement dans la direction longitudinale de la chaussée en fonction de la variabilité des propriétés du sol d'infrastructure, en terme de redistribution d'efforts et de déplacement de la chaussée (Elachachi, 2004).

La structure de la chaussée est considérée homogène dans le cadre des simulations numériques alors que la variabilité de la rigidité du sol d'infrastructure est prise en compte. Le comportement de la structure de la chaussée et du sol d'infrastructure est supposé élastique. Or, dans la réalité, les irrégularités du profil longitudinal résultent du cumul des déformations irréversibles sous l'action des charges. Nous faisons l'hypothèse, réaliste, que les structures spatiales des déformations élastiques et des déformations irréversibles sont identiques. Le modèle ne tient pas compte des non linéarités géométriques entre la structure de la chaussée et le sol.

4.1.1 Modélisation du sol et de sa variabilité

Dans un premier temps afin de simuler le comportement du sol d'infrastructure, celui-ci est assimilé à une série de ressorts indépendants, disposés dans l'axe longitudinale, selon le modèle de coefficient de réaction du sol (la transmission des contraintes tangentielles dans le terrain est négligée) (Winkler, 1867).

Le modèle du ressort est décrit par une loi uniaxiale de la forme $p(x) = k.w(x)$ avec $p(x)$ correspondant à la pression exercée à l'abscisse x et $w(x)$ associé au déplacement dans la direction transversale. Le paramètre k , la constante de raideur du ressort, représente le coefficient de réaction du sol. La raideur est donc directement fonction de sa position x .

Différentes formules semi-empiriques permettent de définir la valeur du coefficient de réaction en tenant compte des propriétés du sol et de l'ouvrage. Nous retiendrons la formule proposée par Meyerhof et Baïke. Le coefficient de réaction est calculé en fonction du module E_s et du coefficient de poisson du sol ν_s , et de la largeur b de l'ouvrage :

$$k = \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)b} \quad [3]$$

Dans un second temps, la variabilité dans la direction longitudinale du coefficient de réaction est modélisée à l'aide de la théorie des champs aléatoires (Vanmarcke, 1977). Cette théorie considère que le champ aléatoire de raideur $k(x)$ est défini par 3 paramètres : 1) la raideur moyenne du domaine, 2) sa dispersion et, 3) la structure de cette dispersion.

Soit $k(x)$ le champ aléatoire, si celui-ci est divisé en n zones i de taille D_i , la valeur moyenne m du champ aléatoire correspond à l'espérance mathématique des moyennes locales $k(D_i)$:

$$E[k(D_i)] = m \quad [4]$$

La valeur moyenne est considérée constante dans le champ aléatoire quelle que soit la position de x . La variance σ^2 du champ aléatoire stationnaire est :

$$Var[k(D_i)] = \sigma^2 \gamma(D_i) \quad [5]$$

Vanmarcke (1977) a défini $\gamma(D_i)$ comme étant la fonction de Variance. Cette fonction permet d'intégrer la dimension du domaine (D_i) de la zone i . En effet, $\gamma(D_i) = 1$ pour une dimension du domaine nulle, et ce facteur décroît dès lors que la dimension croît. Cette fonction correspond à un facteur de réduction. La fonction de variance dépend de la fonction de corrélation $\rho(x)$ par l'expression :

$$\gamma(D_i) = \frac{2}{D_i} \int_0^{D_i} \left(1 - \frac{x}{D_i}\right) \rho(x) dx \quad [6]$$

Vanmarcke et Grigoriu (1983) montrent que la fonction de variance dépend de l'échelle de fluctuation, ou longueur de corrélation, L_c , qui définit la distance à l'intérieur de laquelle les valeurs présentent une forte corrélation.

Les valeurs du champ aléatoires du coefficient de réaction $k(x)$ sont calculées à l'aide d'un algorithme proposé par Fenton et Vanmarcke (1990) qui génère un vecteur de variables aléatoires de distribution normale, de moyenne nulle et de matrice de covariance [C], en l'adaptant à des variables de distribution LogNormale (car $k \geq 0$).

4.1.2 Modélisation de l'ouvrage

L'ouvrage est modélisé selon deux composantes : la structure de la chaussée et le sol d'infrastructure. La structure de la chaussée est modélisée sur un largeur définie (largeur b) et discrétisée en éléments-poutres (type P2) (Figure 2). Le poids de la structure de la chaussée est simulé au moyen d'un chargement uniformément réparti en surface des éléments.

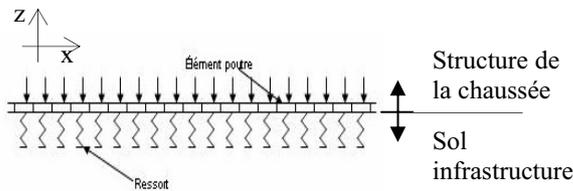


Figure 2. Croquis illustrant le modèle de l'ouvrage

Chaque élément poutre, de longueur L_e , repose sur un élément ressort, représentatif d'une zone de sol homogène, de raideur constante k^e . Le calcul de l'énergie de déformation de la structure de la chaussée et du sol d'infrastructure fournit la matrice de rigidité élémentaire (Figure 3). Celle-ci résulte de la combinaison de l'effet de la rigidité de la poutre (EI) et de l'effet de l'interaction sol poutre (k^e). Les éléments-poutres sont liés entre eux par des nœuds situés à leurs extrémités. Chaque nœud possède trois degrés de liberté : une translation verticale w en z , une rotation θ_g autour de l'axe y de l'extrémité droite de l'élément-poutre situé à gauche du nœud et une rotation θ_d autour de l'axe y de l'extrémité gauche de l'élément-poutre situé à droite du nœud.

Après l'assemblage de la matrice de rigidité [K] et du vecteur de charge {F} de la structure, le système d'équation $\{F\} = [K]\{U\}$ est résolu (par la méthode Gauss) afin d'obtenir le vecteur des déplacements nodaux {U}. Ainsi, chaque nœud est défini avec ses trois degrés de liberté. Ensuite, le vecteur des efforts intérieurs $\{F_{int}^e\}$ est calculé aux extrémités des poutres en effectuant le produit matriciel de la rigidité élémentaire $[K^e]$ et du vecteur des déplacements nodaux $\{\delta^e\}$.

$$[K^e] = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} + \frac{k^e b L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L^e & 54 & -13L^e \\ 22L^e & 4L^{e2} & 13L^e & -3L^{e2} \\ 54 & 13L^e & 156 & -22L^e \\ -13L^e & -3L^{e2} & -22L^e & 4L^{e2} \end{bmatrix}$$

Figure 3. Matrice de rigidité élémentaire de l'élément

4.2 Caractéristiques des simulations

Le tronçon modélisé a une longueur de 120 m et une largeur de 3,7 m. L'épaisseur et le module de rigidité de la structure de la chaussée ont été respectivement fixés à 0,25 m (couche équivalente) et 2,3 GPa. La structure de la chaussée est discrétisée en 480 éléments poutre de 0,25 m de longueur. L'ensemble est soumis à un chargement uniformément réparti $q = 40$ kN par m. l.

La structure de la chaussée repose sur un sol dont la raideur moyenne est 50 MPa. Le coefficient de réaction du sol moyen est donc de 14,85 MN/m³ et son coefficient de variation (C.V.) est de 0,45. L'ouvrage (le champs) est analysé suivant différentes tailles de domaines en correspondance aux échelles de fluctuation de la variance spatiale des caractéristiques du sol, soit : 2,12 m ; 4,24 m ; 8,5 m ; 17 m ; 34 m. Le sol est discrétisé en 480 éléments (zones). Pour chaque échelle de fluctuation, 20 réalisations sont effectuées.

Le calcul numérique permet, pour chaque échelle de fluctuation, d'obtenir le déplacement vertical du sol $W(x)$ (Figure 4) ainsi que les contraintes $\sigma(x)$ (Figure 5) pour l'ensemble de la section de chaussée simulée. Le programme permet également de tracer la fonction de répartition du déplacement et des contraintes, pour chaque échelle de fluctuation. Ainsi, pour une probabilité p donnée (50 %, 95 %), la valeur correspondante de déplacement ou de contrainte est obtenue. Cette valeur a une probabilité de $1-p$ d'être dépassée. L'analyse probabiliste de la réponse de l'ouvrage est effectuée en terme de déformation, via l'IRI, et de contrainte.

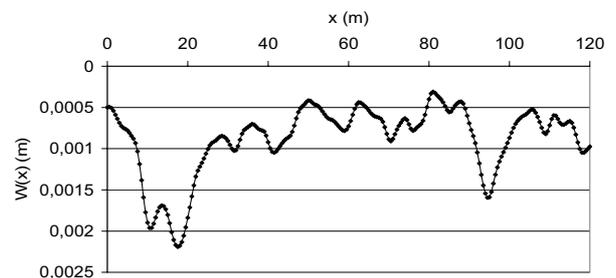


Figure 4. Déplacement vertical $W(x)$ de la structure de la chaussée (échelle de fluctuation = 8,5 m)

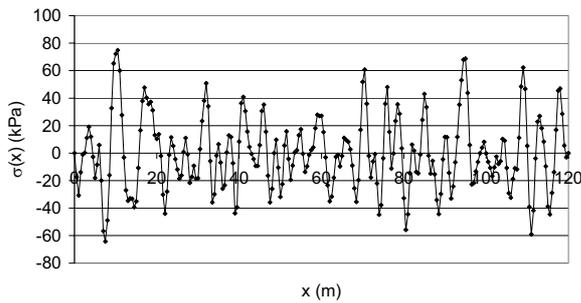


Figure 5. Contraintes $\sigma(x)$ (échelle de fluctuation = 8,5 m)

5. EFFETS DE LA VARIABILITÉ DU SOL SUR LA DÉFORMATION DE L'OUVRAGE

5.1 Le rapport de rigidité sol-structure :

5.1.1 Définition du rapport de rigidité :

Les tassements d'ouvrage et l'apparition des désordres dépendent de la rigidité relative de la structure de la chaussée vis-à-vis du sol. La structure de la chaussée, de module E , est caractérisée par une largeur b et une hauteur totale h . La raideur en flexion de la structure de chaussée est $K_{structure} = \frac{EI}{l^3}$ avec I , l'inertie de la

chaussée ($I = \frac{bh^3}{12}$).

Le rapport de rigidité du sol (K_{sol}) et de la structure permet de définir le terme K_R , terme adimensionnel.

$$K_R = \frac{K_{structure}}{K_{sol}} = \frac{EI}{l^3} \frac{1}{K_{sol}} \quad [7]$$

En considérant une longueur de chaussée de 1m.l. :

$$K_R = \frac{K_{structure}}{K_{sol}} = \frac{bE}{12l^3} \frac{h^3}{K_{sol}} \quad [8]$$

Le déplacement ainsi que les moments fléchissant de l'ouvrage peuvent ainsi être définis en fonction du coefficient de rigidité K_R , lequel est, pour une largeur de voie donnée et un matériau de structure fixée, fonction uniquement du rapport $\frac{h^3}{K_{sol}}$.

5.1.2 Contraintes générées

La Figure 6 présente l'influence du rapport de rigidité relative entre le sol et la structure de chaussée en termes de contraintes pour une longueur de corrélation constante ($L_c = 8,5$ m).

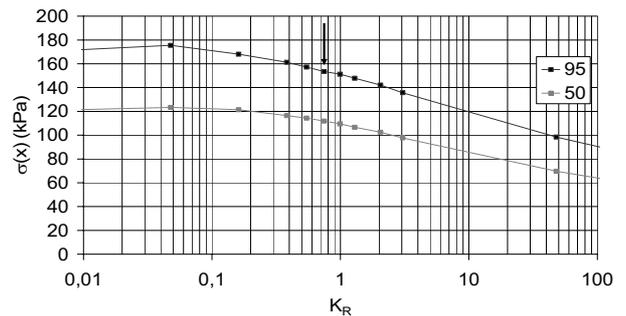


Figure 6. Contraintes en fonction de K_R pour une longueur de corrélation de 8,5 m (la flèche indique la valeur de référence utilisée dans le dimensionnement).

Les contraintes obtenues dans le cas de référence ($K_R = 0,75$, $cv = 0,45$), signalées par la flèche, ont une valeur moyenne de 112 kPa et une probabilité de 5% de dépasser 153 kPa. Les contraintes générées suivent une loi de type puissance, qui implique des contraintes d'autant plus fortes que le sol est souple vis-à-vis de la structure. Les dimensions de l'ouvrage doivent tenir compte de ce rapport afin de ne pas dépasser les contraintes admissibles de la structure de chaussée.

5.1.3 Mesure du déplacement et calcul d'IRI

L'analyse des pseudo-profilés élémentaires et les IRI_{BP} qui en découle permet de définir la contribution des différentes longueurs d'ondes à l' IRI_{Brut} pour différentes rigidités relatives sol-structure. La Figure 7 montre comment fluctue l' IRI_{Brut} ainsi que les IRI_{BP} (PO, MO, GO) en fonction du rapport de rigidité pour une l'échelle de fluctuation de 8,5 m. La valeur de l' IRI_{Brut} , ici normalisé par rapport à l' IRI_{BP} maximum ($K_R=0,037$), diminue avec l'augmentation de K_R . Les proportions d' IRI_{BP} , exprimé en pourcentage de l' IRI_{Brut} , attribuables à chaque bande passante varie avec K_R : IRI_{PO} diminuent, IRI_{MO} passe par un sommet et IRI_{GO} augmente. Notons que pour une valeur de K_R donnée, la somme des IRI_{BP} est 1.

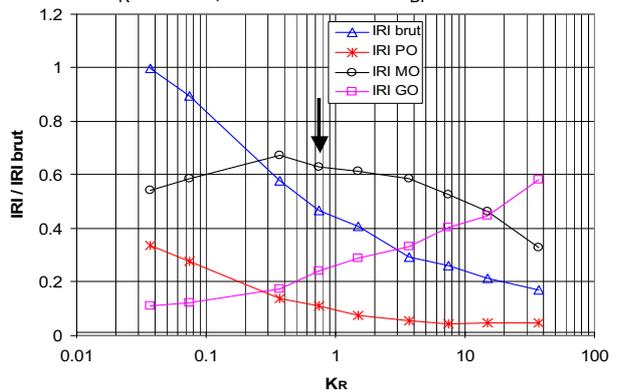


Figure 7. Fluctuation de l' IRI_{Brut} normalisé et des IRI_{BP} (PO, MO, GO) en fonction du rapport de rigidité ($L_c=8,5$ m).

5.2 Dispersion de la rigidité Ksol

5.2.1 Contraintes :

La dispersion des valeurs du sol affecte également les redistributions d'efforts (figure 8) selon une relation quasi linéaire des contraintes en fonction du coefficient de variation de la raideur du sol. Le calcul de la droite de régression pour les fractiles à 50 et 95 % fournit un coefficient directeur plus important. Ceux-ci sont respectivement de 221 kPa et 298 kPa. En effet, en tendant vers 1, la dispersion de K_{sol} est maximale, la structure se déforme fortement et les contraintes extrêmes induites sont éloignées de la valeur moyenne. La constante de la droite de régression est nulle dans les deux cas, en effet, pour un sol homogène (CV nul), la structure ne se déforme pas et les contraintes sont nulles.

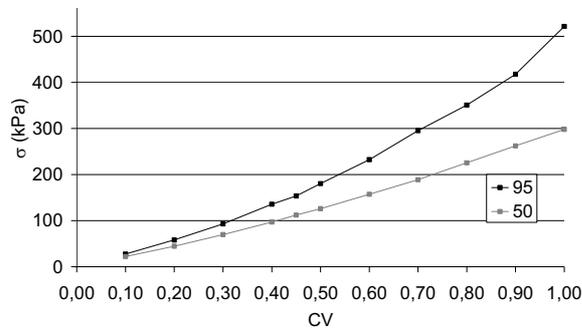


Figure 8. Contraintes σ_{50} et σ_{95} en fonction du coefficient de variation du sol (K_R de 0,75).

5.2.2 IRI :

La dispersion produit une augmentation de l'IRI_{Brut} (Figure 9) car elle accentue la variation de pente du pseudo-profil. Toutefois, avec un sol homogène, les tassements sont uniformes et l'IRI_{Brut} est nul. La dispersion des valeurs du sol n'affecte pas la proportion d'IRI_{BP}.

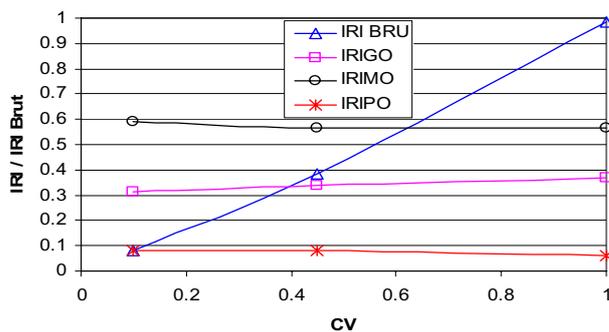


Figure 9. Augmentation de l'IRI_{Brut} normalisé et proportion d'IRI_{BP} en fonction du CV ($l_c = 8,5m$, $K_R = 0,75$)

5.3 Structure de la variabilité

5.3.1 Relation structure du sol et déformation de la chaussée

La Figure 10 présente les différentes valeurs de déplacements mesurées en fonction de la rigidité correspondante, pour chaque échelle de fluctuation.

Dans le cas d'un sol homogène, la relation entre la raideur locale $k(x)$ et le déplacement local $w(x)$ est hyperbolique : $p = \text{constante} = k \cdot w$ d'où $w(x) = p(x)/k(x)$. En présence d'un sol hétérogène, les déplacements obtenus en fonction de la rigidité du sol se présentent sous la forme d'un nuage de points. Quelle que soit l'échelle de fluctuation, pour une même rigidité de sol, différentes valeurs de déplacement sont mesurées. La dispersion du nuage de points diminue lorsque l'échelle de fluctuation (17 et 34 m) augmente. Le nuage de points obéit d'autant plus à une loi hyperbolique que l'échelle de fluctuation est importante, en effet le sol tend à être homogène sur une faible distance.

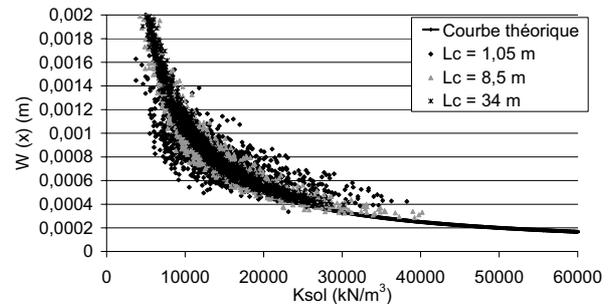


Figure 10. Déplacement vertical $W(x)$ (m) en fonction de la rigidité $k(x)$ du sol

Afin, d'étudier la relation entre la structure de la variabilité du sol et la déformation d'ouvrage correspondante, la structure du déplacement vertical du sol est définie par le calcul du semi variogramme. Le semi variogramme décrit la dissemblance entre deux points.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(u+h) - Z(u)] \quad [9]$$

Le semi variogramme permet de définir la longueur de corrélation au delà de laquelle la propriété du sol (Z) n'est plus corrélée entre deux points. L'échelle de fluctuation de la raideur du sol introduite dans le modèle et celle obtenue par calcul du semi variogramme sont identiques (Vanmarcke, 1977; Elkateb, 2002). De manière identique, la structure horizontale de déformation de la chaussée est calculée à l'aide du semi variogramme.

Les figures 11 et 12 présente les longueurs de corrélation de la rigidité du sol et du déplacement vertical de la structure obtenues pour l'échelle de fluctuation 8,5 m.

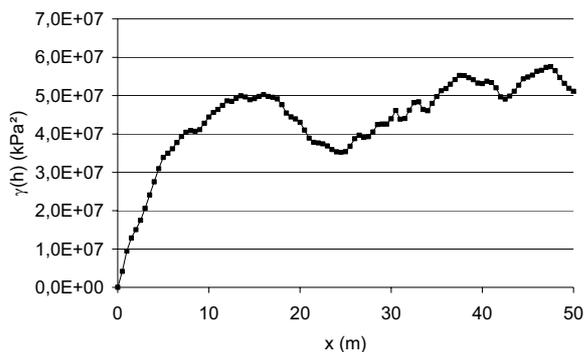


Figure 11. Variogramme de Ksol ; $l_c = 8,5$ m

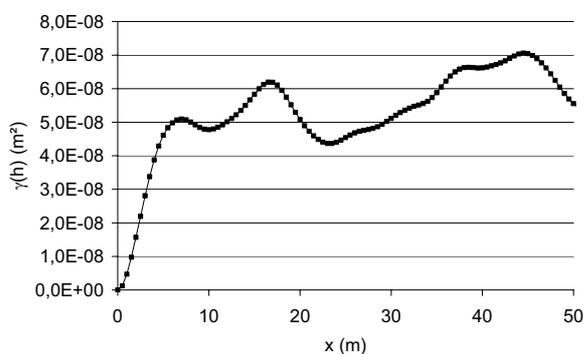


Figure 12. Variogramme de W(x); $l_c = 8,5$ m

Tableau 1. Longueur de corrélation de déplacement de la structure de chaussée ($K_R = 0,75$; $h = 0,25$; $K_{solmoyen} = 14850$ kN/m³).

Lc(K_{sol}) (m)	2,12	4,25	8,5	17	34
Lc(W(x)) (m)	6,75	7	9	18	34

La confrontation des longueurs de corrélation met en évidence une différence dans la structuration spatiale de la déformation de la chaussée vis-à-vis de celle des propriétés mécaniques du sol. En effet, pour une rigidité relative fixée, les valeurs de l'échelle de fluctuation de la déformation sont supérieures à celles attribuées au sol pour les faibles valeurs ($\leq 4,25$ m) ; par contre, pour des longueurs de corrélation plus grandes ($> 4,25$ m), la structure du déplacement est identique à celle de la raideur du sol. Les valeurs de déplacements obtenus mettent en évidence l'interaction mécanique qui existe entre le sol et la structure.

5.3.2 Influence de la structure du sol sur les contraintes

La figure 13 montre les valeurs de contraintes en fonction de la longueur de corrélation pour les fractiles à 50 et à 95%. La contrainte est maximale dès lors que la longueur de corrélation est de 2,1 m. Les contraintes sont fortement modifiées en fonction de la longueur de corrélation, ainsi, pour $L_c=34$ m, les contraintes sont diminuées de plus de 61% pour le fractile à 95 %, et de 65 % pour le fractile à 50% vis-à-vis des valeurs maximales.

A chaque fois, quel que soit le rapport de rigidité sol-structure, les contraintes sont diminuées de plus de 60%, pour un coefficient de variation semblable.

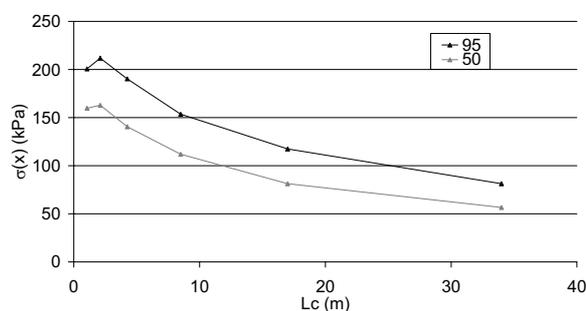


Figure 13. Contraintes σ_{50} et σ_{95} en fonction de la longueur de corrélation pour une chaussée ($K_R = 0,75$)

5.3.3 Déformation de chaussée et IRI

Cette analyse permet de voir dans quelle mesure la déflexion relevée localement dépend des propriétés du support et de la chaussée. En terme d' IRI_{Brut} , les grandes longueurs de corrélation auront peu d'influence, donc l' IRI_{Brut} relatif est faible (Figure 13), alors que pour des longueurs de corrélation plus petites, l' IRI_{Brut} augmente révélant l'importance des contraintes et déplacements de la chaussée.

La proportion de MO et de PO diminuent avec l'augmentation de L_c tandis que celle des GO augmente montrant le lien entre la grandeur de la longueur d'onde et l'échelle de corrélation. Notons que la modélisation utilisée ne permet pas de tenir compte de manière réaliste de la proportion de PO car les petites longueurs d'ondes sont surtout issues de défauts à la surface de la chaussée. La ressemblance entre chaque relation évaluée en fonction de la contrainte et de l' IRI_{Brut} , montre l'effet de l'échelle de fluctuation de la rigidité du sol d'infrastructure sur la structure de chaussée. La variabilité de l'échelle de fluctuation agit de la même façon sur la contrainte au sein de la chaussée et sur l' IRI_{Brut} .

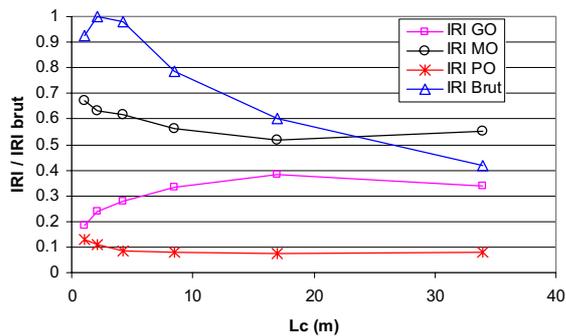


Figure 13 Fluctuation de l'IRI_{Brut} et des IRI par bandes passantes (PO, MO, GO) en fonction de la longueur de corrélation.

CONCLUSION :

L'analyse de la déformation et des contraintes d'une infrastructure routière est effectuée en fonction des conditions géotechniques. Trois paramètres gouvernent la réponse de l'ouvrage : la rigidité relative du sol; la dispersion de la raideur du sol et l'organisation spatiale de cette dispersion. L'analyse met en évidence le lien entre la déformation de l'ouvrage et la structure du sol d'infrastructure de la structure de la chaussée. En fonction de l'organisation spatiale des valeurs de raideur du sol, les grandes longueurs d'ondes conditionnent les contraintes et la déformation de la chaussée et confirmé par l'IRI_{Brut}.

Une première perspective serait de définir le risque de désordres en terme de déformation et de contraintes en fonction des sollicitations et de la résistance de l'ouvrage.

Une seconde perspective sera de distinguer différentes couches superposées, chacune pouvant avoir sa propre échelle de fluctuation, et d'étudier dans quelle mesure les contributions de chaque couche (donc de chaque profondeur) peuvent être distinguées dans l'analyse de l'IRI.

Bibliographie :

Breysse D., 2001. Les enjeux de la modélisation des terrains et des structures pour décrire au mieux l'interaction sol ouvrage, Conf. A. Caquot, Paris, 3/5 Octobre 2001.

Delanne, Y. 1999. Nouvelles spécifications d'uni en France. Symposium international sur l'impact environnemental des défauts d'uni des routes, Éditeur : Paulo Pereira, Valverde Miranda, Porto, Portugal, 22 au 23 mars 1999 pp. 265-374.

Doré, G., Flamand, M., Pierre, P. (2001) Analysis of the wavelength content of the longitudinal profiles for C-LTPP test sections, Revue canadienne de génie civil, vol 29, no1 fev. 2002, pp. 50-57

Durand, J.M. et Doré, G. 1993. Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles. Direction des communications, Ministère des Transports du Québec, Québec, Qc.

Ekateb T., Chalaturnyk R., Robertson K., An Overview of soil heterogeneity: quantification and implications on geotechnical field problem. Canadian Geotechnical Journal, NRC, Vol 40, 15p

Elachachi S.M., Breysse D., Bensafi M., Hamane M., Nedjar D., (soumis 2004) – Comportement longitudinal en flexion d'une conduite enterrée dans un remblai hétérogène, soumis pour publication à la Revue Française de Géotechnique.

Fenton G.A., Vanmarcke E., 1990 – Simulation of Random fields via local average subdivision, Journal of Engineering Mechanics, Vol 116 (8), 1733-1749.

Organisation de coopération et de développement économique. 1984. Caractéristiques de surface des revêtements routiers : leur interaction et leur optimisation. Recherche en matière de route et de transport routiers. Éditeur : OCDE.

Sayers, M.W. et Karamihas, S. M. 1996. Interpretation of road roughness profile data, Final report. Federal Highway Administration, Contract DTFH 61-92-C00143. 164 p.

Sayers, M.W., Gillespie, T.D. et Paterson, W. D. O. 1986. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. Word Bank Technical paper number 46, The world Bank, Washington, D.D. 87 p.

Vaillancourt, M. Perraton, D., Dorchies, P. et Doré, G. 2003. Décomposition du pseudo-profil et analyse de l'indice de rugosité international (IRI), Revue canadienne de génie civil, vol 30, no5 oct. 2003.

Vanmarcke E., 1977 – Probabilistic modeling of soil profiles. Journal of of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, n°11: 1227-145

Vanmarcke E., 1983 – Random Fields: analysis and synthesis M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts London, England.

Winkler E., 1867 – Die Lehre von Der Elasticitaet und Festigkeit; Prag, Dominicus.