

Vibrations dues au passage d'un tramway : mesures expérimentales et simulations numériques

Soutenance de Marc Maldonado

Directeur de thèse : Donatien Le Houédec

École Centrale de Nantes

*Institut de Recherche en Génie civil et Mécanique
UMR CNRS 6183*



Vibrations générées par le tramway \Rightarrow nuisances ?



- Propagation des vibrations (voie \rightarrow sol \rightarrow bâtiment) :
bruit de grondement dans la bande 30-200Hz
- Vibrations sensibles par l'homme : gamme 5-80Hz
- Projet PREDIT3 - Financé par l'Ademe
(GeM-INRETS-SEMITAN-SerdB-CDM)

Problématique concernant les vibrations

- Origine ?
- Caractérisation de la propagation (voie puis sol) ?
- Comment les atténuer ?

Vibrations générées par le tramway \Rightarrow nuisances ?



- Propagation des vibrations (voie \rightarrow sol \rightarrow bâtiment) :
bruit de grondement dans la bande 30-200Hz
- Vibrations sensibles par l'homme : gamme 5-80Hz
- Projet PREDIT3 - Financé par l'Ademe
(GeM-INRETS-SEMITAN-SerdB-CDM)

Problématique concernant les vibrations

- Origine ?
- Caractérisation de la propagation (voie puis sol) ?
- Comment les atténuer ?

Vibrations générées par le tramway \Rightarrow nuisances ?



- Propagation des vibrations (voie \rightarrow sol \rightarrow bâtiment) :
bruit de grondement dans la bande 30-200Hz
- Vibrations sensibles par l'homme : gamme 5-80Hz
- Projet PREDIT3 - Financé par l'Ademe
(GeM-INRETS-SEMITAN-SerdB-CDM)

Problématique concernant les vibrations

- Origine ?
- Caractérisation de la propagation (voie puis sol) ?
- Comment les atténuer ?

Vibrations générées par le tramway \Rightarrow nuisances ?



- Propagation des vibrations (voie \rightarrow sol \rightarrow bâtiment) :
bruit de grondement dans la bande 30-200Hz
- Vibrations sensibles par l'homme : gamme 5-80Hz
- Projet PREDIT3 - Financé par l'Ademe
(GeM-INRETS-SEMITAN-SerdB-CDM)

Problématique concernant les vibrations

- Origine ?
- Caractérisation de la propagation (voie puis sol) ?
- Comment les atténuer ?

Vibrations générées par le tramway \Rightarrow nuisances ?



- Propagation des vibrations (voie \rightarrow sol \rightarrow bâtiment) :
bruit de grondement dans la bande 30-200Hz
- Vibrations sensibles par l'homme : gamme 5-80Hz
- Projet PREDIT3 - Financé par l'Ademe
(GeM-INRETS-SEMITAN-SerdB-CDM)

Problématique concernant les vibrations

- Origine ?
- Caractérisation de la propagation (voie puis sol) ?
- Comment les atténuer ?

Objectif de la thèse

Concevoir des outils prévisionnels permettant de simuler au mieux les phénomènes observés

Spécificités

- Véhicule circulant à basse vitesse
- Environnement urbain, voies sur dalle

Points nouveaux abordés

- Prise en compte de l'ensemble de la structure (véhicule/voie/sol)
- Simulations suivant différentes configurations
- Conditions de couplage spécifiques
- Modèle d'excitation multisource sur le rail

Objectif de la thèse

Concevoir des outils prévisionnels permettant de simuler au mieux les phénomènes observés

Spécificités

- Véhicule circulant à basse vitesse
- Environnement urbain, voies sur dalle

Points nouveaux abordés

- Prise en compte de l'ensemble de la structure (véhicule/voie/sol)
- Simulations suivant différentes configurations
- Conditions de couplage spécifiques
- Modèle d'excitation multisource sur le rail

Objectif de la thèse

Concevoir des outils prévisionnels permettant de simuler au mieux les phénomènes observés

Spécificités

- Véhicule circulant à basse vitesse
- Environnement urbain, voies sur dalle

Points nouveaux abordés

- Prise en compte de l'ensemble de la structure (véhicule/voie/sol)
- Simulations suivant différentes configurations
- Conditions de couplage spécifiques
- Modèle d'excitation multisource sur le rail

- 1 Etude bibliographique
- 2 Campagne expérimentale
- 3 Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol
- 4 Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux
- 5 Conclusion générale

- 1 Etude bibliographique
 - Modélisation du sol
 - Modélisation de la voie
 - Modélisation des efforts au contact roue/rail
 - Conclusion et stratégie
- 2 Campagne expérimentale
- 3 Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol
- 4 Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux
- 5 Conclusion générale

Modélisation du sol

6

Etude du comportement d'un sol soumis à une excitation (ponctuelle ou répartie)

- Méthodes analytiques

- Méthodes semi-analytiques

- Méthode de Boussinesq
- Méthode de Mindlin
- Méthode de Flamant
- Méthode de Boussinesq-Maxwell
- Méthode de Boussinesq-Maxwell

- Méthodes numériques

- Éléments finis
- Éléments finis
- Éléments finis

⇒ utilisation de méthodes inverses pour caractériser un sol

Modélisation du sol

6

Etude du comportement d'un sol soumis à une excitation (ponctuelle ou répartie)

- **Méthodes analytiques**

- Méthodes semi-analytiques

- Méthodes numériques

⇒ utilisation de méthodes inverses pour caractériser un sol

Modélisation du sol

6

Etude du comportement d'un sol soumis à une excitation (ponctuelle ou répartie)

- **Méthodes analytiques**
- **Méthodes semi-analytiques**
 - « Direct stiffness method »
 - « Flexibility matrix approach »
 - « Thin layer method »

● Méthodes numériques

⇒ utilisation de méthodes inverses pour caractériser un sol

Modélisation du sol

6

Etude du comportement d'un sol soumis à une excitation (ponctuelle ou répartie)

- **Méthodes analytiques**
- **Méthodes semi-analytiques**
 - « Direct stiffness method »
 - « Flexibility matrix approach »
 - « Thin layer method »
- **Méthodes numériques**
 - Éléments finis
 - Éléments de frontière

⇒ utilisation de méthodes inverses pour caractériser un sol

Modélisation du sol

6

Etude du comportement d'un sol soumis à une excitation (ponctuelle ou répartie)

- **Méthodes analytiques**
- **Méthodes semi-analytiques**
 - « Direct stiffness method »
 - « Flexibility matrix approach »
 - « Thin layer method »
- **Méthodes numériques**
 - Éléments finis
 - Éléments de frontière

⇒ utilisation de méthodes inverses pour caractériser un sol

Etude bibliographique

Campagne expérimentale

Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol

Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux

Conclusion générale

Modélisation du sol

Modélisation de la voie

Modélisation des efforts au contact roue/rail

Conclusion et stratégie

Modélisation de la voie

7

Discrétisation spatiale

Représentation par éléments finis de la voie

Discrétisation des éléments de la voie à l'aide d'équations analytiques

Résolution numérique rapide

Couplage voie/sol facilité (équations dans le domaine transformé)

Pas de problème de réflexion des ondes

7/54



Modélisation de la voie

7

Discrétisation spatiale

Représentation par éléments finis de la voie

Discrétisation des éléments de la voie à l'aide d'équations analytiques

- ▶ Résolution numérique rapide
- ▶ Couplage voie/sol facilité (équations dans le domaine transformé)
- ▶ Pas de problème de réflexion des ondes

Modélisation de la voie

7

Discrétisation spatiale

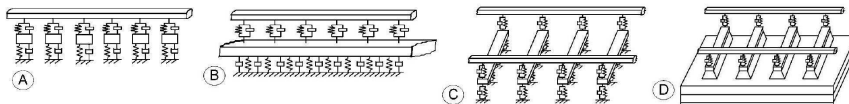
Représentation par éléments finis de la voie

Discrétisation des éléments de la voie à l'aide d'équations analytiques

- ▶ Résolution numérique rapide
- ▶ Couplage voie/sol facilité (équations dans le domaine transformé)
- ▶ Pas de problème de réflexion des ondes

Modélisation de la voie

8



Différents modèles de voie disponibles - *Kruse et Popp, 2000*

- A Rails (poutre unique) sur éléments viscoélastiques et fondation de Winkler
- B Traverses modélisées par une poutre de Timoshenko ou d'Euler-Bernoulli
- C Deux rails pris en compte - Traverses modélisées par des poutres en flexion simple

Modèle retenu

D Assise prise en compte (poutres en flexion/torsion) et sol multicouche

Modélisation des efforts au contact roue/rail

9

Phénomènes d'excitation à l'origine des vibrations

- Force quasi-statique mobile (poids du véhicule)
- Joints du rail, système d'aiguillage
- Excitation paramétrique (rails posés sur traverses = supports discontinus)

Phénomène prépondérant pour le tramway

Usure ondulatoire (roues, rails)

9/54



Modélisation des efforts au contact roue/rail

9

Phénomènes d'excitation à l'origine des vibrations

- Force quasi-statique mobile (poids du véhicule)
- Joints du rail, système d'aiguillage
- Excitation paramétrique (rails posés sur traverses = supports discontinus)

Phénomène prépondérant pour le tramway

Usure ondulatoire (roues, rails)

9/54



Modélisation des efforts au contact roue/rail

9

Phénomènes d'excitation à l'origine des vibrations

- Force quasi-statique mobile (poids du véhicule)
- Joints du rail, système d'aiguillage
- Excitation paramétrique (rails posés sur traverses = supports discontinus)

Phénomène prépondérant pour le tramway

Usure ondulatoire (roues, rails)

Modélisation des efforts au contact roue/rail

9

Phénomènes d'excitation à l'origine des vibrations

- Force quasi-statique mobile (poids du véhicule)
- Joints du rail, système d'aiguillage
- Excitation paramétrique (rails posés sur traverses = supports discontinus)

Phénomène prépondérant pour le tramway

Usure ondulatoire (roues, rails)

Modélisation des efforts au contact roue/rail

9

Phénomènes d'excitation à l'origine des vibrations

- Force quasi-statique mobile (poids du véhicule)
- Joints du rail, système d'aiguillage
- Excitation paramétrique (rails posés sur traverses = supports discontinus)

Phénomène prépondérant pour le tramway

- ▶ Usure ondulatoire (roues, rails)

Etude bibliographique

Campagne expérimentale

Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol

Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux

Conclusion générale

Modélisation du sol

Modélisation de la voie

Modélisation des efforts au contact roue/rail

Conclusion et stratégie

Conclusion et stratégie

10

Peu de travaux sur le sujet précis du tramway (véhicule lent - zone urbaine - poses spécifiques), incluant l'ensemble de la structure véhicule/voie/sol.

Stratégie de travail

10/54



Conclusion et stratégie

10

Peu de travaux sur le sujet précis du tramway (véhicule lent - zone urbaine - poses spécifiques), incluant l'ensemble de la structure véhicule/voie/sol.

Stratégie de travail

- Réalisation d'une campagne de mesures sur des points différents :
Collaboration GeM (rail, sol) et Inrets (essieux - rugosité rails)
- Développement de modèles théoriques adaptés :
- Modèles de contact roue/rail
- Modèles de déformations des rails
- Modèles de déformations des rails
- Validation des modèles théoriques

Conclusion et stratégie

10

Peu de travaux sur le sujet précis du tramway (véhicule lent - zone urbaine - poses spécifiques), incluant l'ensemble de la structure véhicule/voie/sol.

Stratégie de travail

- Réalisation d'une campagne de mesures sur des points différents :
Collaboration GeM (rail, sol) et Inrets (essieux - rugosité rails)
- Développement de modèles théoriques adaptés :
- Validation des modèles théoriques

Conclusion et stratégie

10

Peu de travaux sur le sujet précis du tramway (véhicule lent - zone urbaine - poses spécifiques), incluant l'ensemble de la structure véhicule/voie/sol.

Stratégie de travail

- Réalisation d'une campagne de mesures sur des points différents :
Collaboration GeM (rail, sol) et Inrets (essieux - rugosité rails)
- Développement de modèles théoriques adaptés :
 - prise en compte de l'excitation *via* la rugosité des rails et des roues
 - Modèle semi-analytique développé au laboratoire
 - Équations de voie écrites dans le domaine des nombres d'onde selon l'axe de la voie (couplage facilité)
- Validation des modèles théoriques

Conclusion et stratégie

10

Peu de travaux sur le sujet précis du tramway (véhicule lent - zone urbaine - poses spécifiques), incluant l'ensemble de la structure véhicule/voie/sol.

Stratégie de travail

- Réalisation d'une campagne de mesures sur des points différents :
Collaboration GeM (rail, sol) et Inrets (essieux - rugosité rails)
- Développement de modèles théoriques adaptés :
 - prise en compte de l'excitation *via* la rugosité des rails et des roues
 - Modèle semi-analytique développé au laboratoire
 - Équations de voie écrites dans le domaine des nombres d'onde selon l'axe de la voie (couplage facilité)

● Validation des modèles théoriques

Conclusion et stratégie

10

Peu de travaux sur le sujet précis du tramway (véhicule lent - zone urbaine - poses spécifiques), incluant l'ensemble de la structure véhicule/voie/sol.

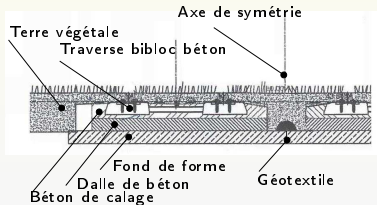
Stratégie de travail

- Réalisation d'une campagne de mesures sur des points différents :
Collaboration GeM (rail, sol) et Inrets (essieux - rugosité rails)
- Développement de modèles théoriques adaptés :
 - prise en compte de l'excitation *via* la rugosité des rails et des roues
 - Modèle semi-analytique développé au laboratoire
 - Équations de voie écrites dans le domaine des nombres d'onde selon l'axe de la voie (couplage facilité)
- Validation des modèles théoriques

- 1 Etude bibliographique
- 2 Campagne expérimentale
 - Description des sites
 - Description des essais
 - Essais au marteau d'impact
 - Mesures embarquées : vibrations des essieux
 - Mesures des vibrations au passage d'un tramway
 - Bilan des mesures
- 3 Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol
- 4 Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux
- 5 Conclusion générale

Pose classique - Ferrière

12

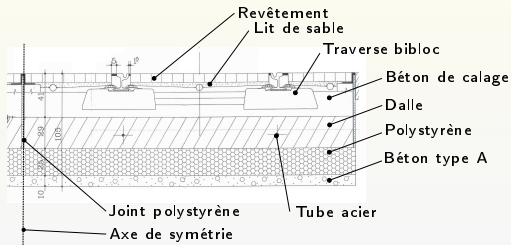


Bâtiments éloignés de la voie de tramway

Voie classique - Ferrière : pas d'isolation spécifique.

Pose isolante - *Libération*

13



Bâtiments proches de la voie (moins de 7m)

Voie isolante - Libération : pose sur dalle flottante.

Mesures sur le sol et la voie

14



(A) 4 bogies - 2 essieux par bogie



(B) 3 bogies - Roues indépendantes

- 4 sites (2 retenus pour les simulations)
- Marteau d'impact
- 4 vitesses :
20-30-40-50km/h
- Mesures :
 - bogie porteur
 - rail
 - sol 0.5-5m

Mesures sur le sol et la voie

14



(A) 4 bogies - 2 essieux par bogie



(B) 3 bogies - Roues indépendantes

- 4 sites (2 retenus pour les simulations)
- Marteau d'impact
- 4 vitesses :
20-30-40-50km/h
- Mesures :
 - bogie porteur
 - rail
 - sol 0.5 → 5m

Mesures sur le sol et la voie

14

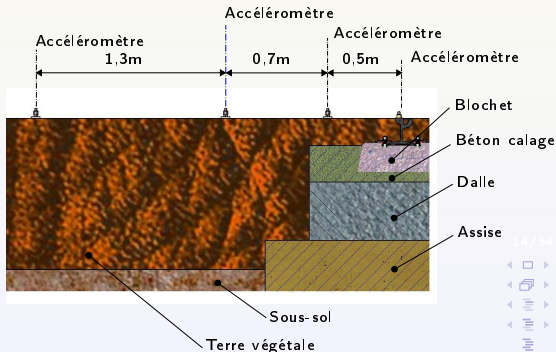


(A) 4 bogies - 2 essieux par bogie



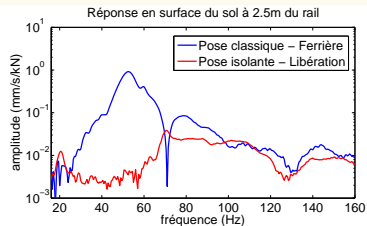
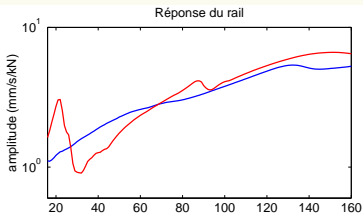
(B) 3 bogies - Roues indépendantes

- 4 sites (2 retenus pour les simulations)
- Marteau d'impact
- 4 vitesses : 20-30-40-50km/h
- Mesures :
 - bogie porteur
 - rail
 - sol 0.5 → 5m



Mobilités ponctuelle (rail) et de transfert voie/sol

15

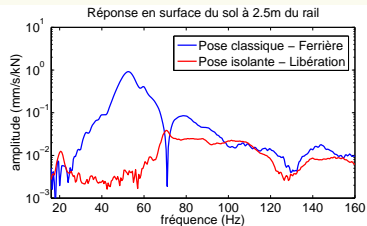
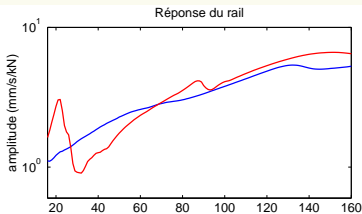


Mobilités ponctuelle et de transfert voie/sol sur 2 sites

- $f \leq 20\text{Hz}$: Résonance de la dalle flottante
- $f > 60\text{Hz}$: Comportement du rail similaire pour les deux poses
- $20 < f < 70\text{Hz}$: Efficacité de l'isolation vérifiée

Mobilités ponctuelle (rail) et de transfert voie/sol

15

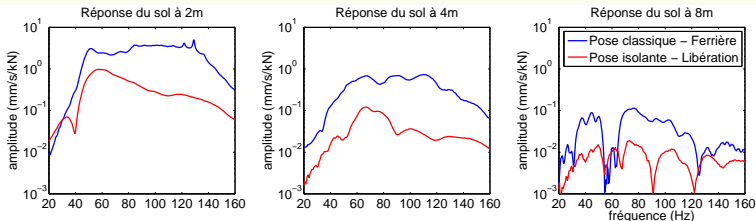


Mobilités ponctuelle et de transfert voie/sol sur 2 sites

- $f \leq 20\text{Hz}$: Résonance de la dalle flottante
- $f > 60\text{Hz}$: Comportement du rail similaire pour les deux poses
- $20 < f < 70\text{Hz}$: Efficacité de l'isolation vérifiée

Mobilités de transfert sol/sol

16

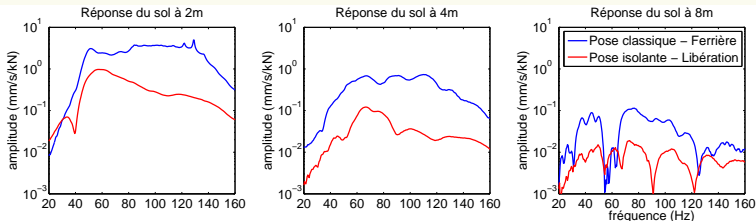


Mesures des mobilités de transfert du sol à 2,4,8 (et 16m)

- Sol Libération (dalle flottante) plus raide que Ferrière (pose classique) ⇒ efficacité de l'isolation ↗
- Sol souple sur sol plus rigide

Mobilités de transfert sol/sol

16

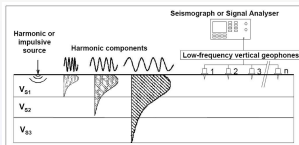
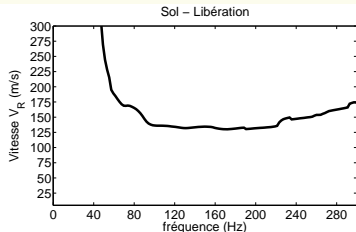
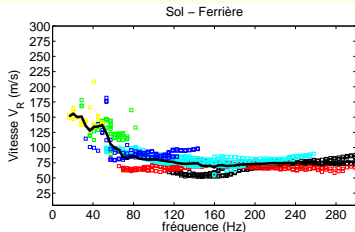


Mesures des mobilités de transfert du sol à 2,4,8 (et 16m)

- Sol Libération (dalle flottante) plus raide que Ferrière (pose classique) ⇒ efficacité de l'isolation ↗
- Sol souple sur sol plus rigide

Courbes de dispersion

17



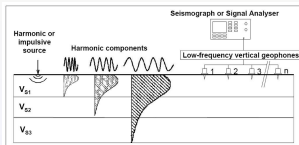
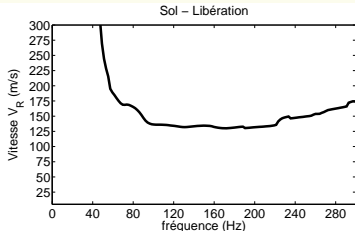
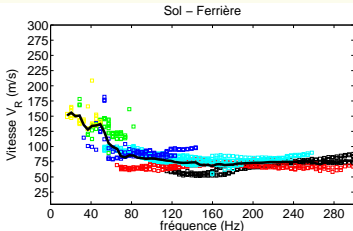
Procédure SASW (*Foti 2000*)
Mesures de 0,5 à 16m

- Sol Ferrière : souple
raideur ↗ avec la
profondeur
- Sol Libération : +raide
raideur ↗↗ avec la
profondeur

17/34

Courbes de dispersion

17



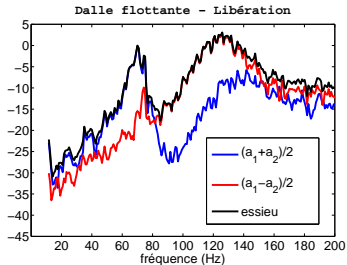
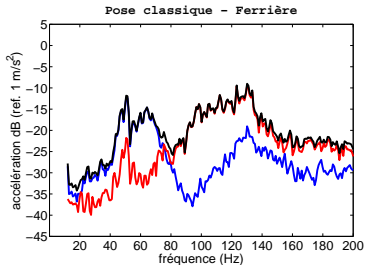
Procédure SASW (*Foti 2000*)

Mesures de 0,5 à 16m

- Sol Ferrière : souple
raideur ↗ avec la
profondeur
- Sol Libération : +raide
raideur ↗↗ avec la
profondeur

Mesures embarquées : vibrations des essieux

18



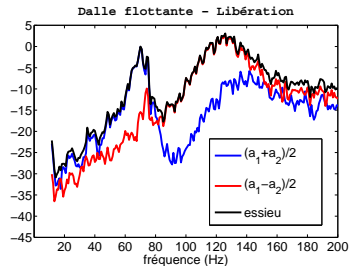
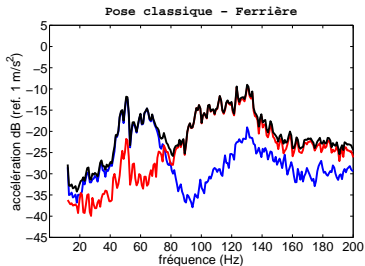
Identification des modes symétrique et antisymétrique
DSP moyenne des accélérations de l'essieu de type A à 30km/h
essieu complet, **partie symétrique**, **partie antisymétrique**

- Résonance de modes rigides du système essieu/voie
- Cohérence faible entre deux essieux
- Rugosité des rails : Libération \gg Ferrière \implies cohérent avec les mesures d'accélération d'essieu

18/34

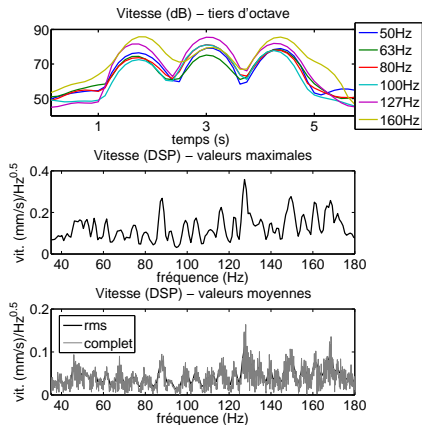
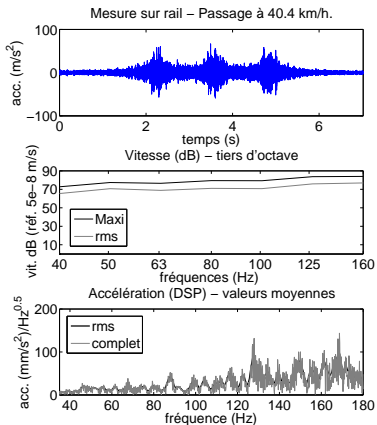
Mesures embarquées : vibrations des essieux

18



*Identification des modes symétrique et antisymétrique
DSP moyenne des accélérations de l'essieu de type A à 30km/h
essieu complet, partie symétrique, partie antisymétrique*

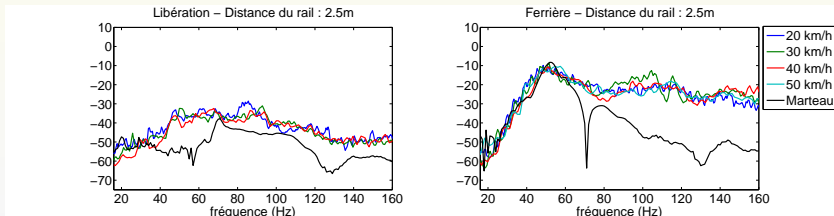
- Résonance de modes rigides du système essieu/voie
- Cohérence faible entre deux essieux
- Rugosité des rails : Libération \gg Ferrière \implies cohérent avec les mesures d'accélération d'essieu



Exemple de fiche pour une mesure sur le rail au passage tramway B - Ferrière

Atténuations de l'excitation au marteau et au passage

20

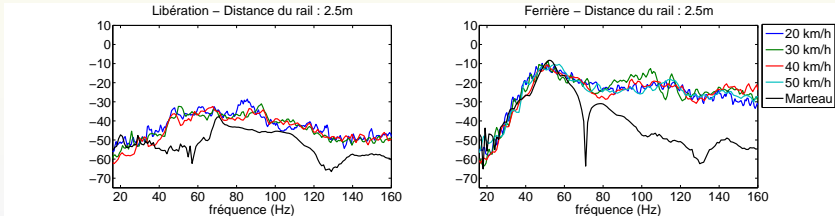


Atténuation (dB) des vibrations dans le sol au passage du tramway A -
Référence sur le rail

- Atténuation différente entre le marteau et le passage
- Phénomène complexe lié à l'excitation multisource

Atténuations de l'excitation au marteau et au passage

20



Atténuation (dB) des vibrations dans le sol au passage du tramway A -
Référence sur le rail

- Atténuation différente entre le marteau et le passage
- Phénomène complexe lié à l'excitation multisource

En ce qui concerne la **génération des vibrations**

- Mesures embarquées \mapsto deux résonances dans la gamme 10–200Hz (modes symétrique et antisymétrique). Vibrations sur essieux différents faiblement corrélées
- Pour les deux types de rame, les fréquences de résonances sont différentes (rame A : 63/125Hz et rame B : 80-100/125Hz)
- Rame B : résonance mode antisymétrique très peu marquée
- Rugosité sur le site Libération (pose isolante) plus élevée que sur Ferrière (pose classique) de l'ordre de 3 à 10dB

En ce qui concerne la propagation des vibrations

En ce qui concerne la **génération des vibrations**

- Mesures embarquées \mapsto deux résonances dans la gamme 10–200Hz (modes symétrique et antisymétrique). Vibrations sur essieux différents faiblement corrélées
- Pour les deux types de rame, les fréquences de résonances sont différentes (rame A : 63/125Hz et rame B : 80-100/125Hz)
- Rame B : résonance mode antisymétrique très peu marquée
- Rugosité sur le site Libération (pose isolante) plus élevée que sur Ferrière (pose classique) de l'ordre de 3 à 10dB

En ce qui concerne la **propagation des vibrations**

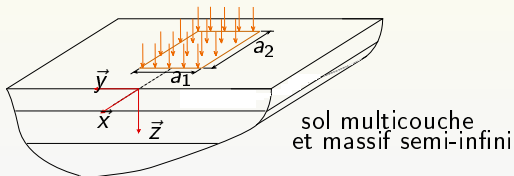
- Niveaux vibratoires rame A $>$ rame B, \simeq 5dB
- Facteur vitesse faible (2 à 3dB)
- Efficacité de la pose isolante vérifiée
- L'atténuation rail/sol au passage est similaire pour les deux rames sur chaque site. Or les niveaux vibratoires mesurés sont différents pour les deux rames \Rightarrow **chaque rame produit une excitation particulière**

- 1 Etude bibliographique
- 2 Campagne expérimentale
- 3 **Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol**
 - Modèle semi-analytique de sol multicouche
 - Modèle retenu - Pose classique
 - Modèle pour une pose de voie isolante
 - Interaction voie-essieu
- 4 Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux
- 5 Conclusion générale

Modélisation du sol

23

Modèle analytique - sol multicouche chargé en surface



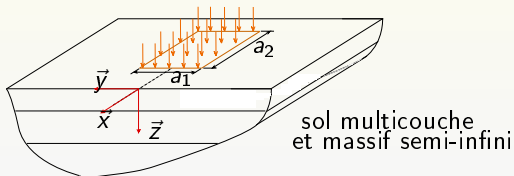
- Écriture de la matrice raideur globale dans le domaine des nombres d'onde horizontaux

$$[S] \cdot [T]^{-1} \cdot \{\bar{u}^*\} = \{\bar{\sigma}^*\} \quad \Rightarrow \quad \{\bar{U}^*\} = [Q] \cdot \{\bar{\Sigma}^*\}$$

Modélisation du sol

23

Modèle analytique - sol multicouche chargé en surface

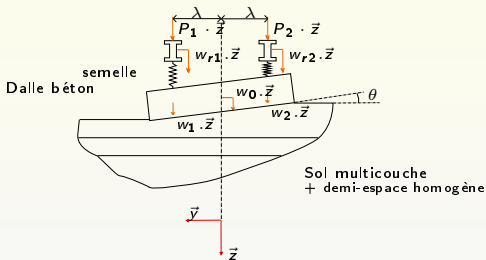


- Écriture de la matrice raideur globale dans le domaine des nombres d'onde horizontaux

$$[S] \cdot [T]^{-1} \cdot \{\bar{u}^*\} = \{\bar{\sigma}^*\} \quad \Rightarrow \quad \{\bar{U}^*\} = [Q] \cdot \{\bar{\Sigma}^*\}$$

Modèle retenu pour une pose classique (Ferrière) avec prise en compte de la rotation de la dalle

- Équations rail flexion
- Équations dalle flexion
- Équations dalle torsion
- **Couplage en déplacement**
- Couplage en rotation



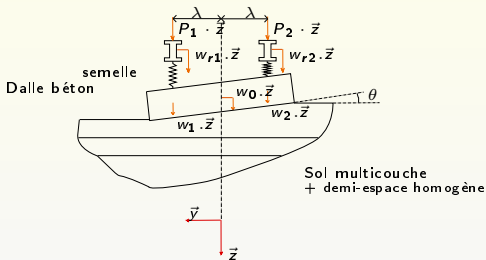
$$\begin{pmatrix} A_1(\beta) & 0 & A_2(\beta) & A_4(\beta) \\ & A_1(\beta) & A_2(\beta) & -A_4(\beta) \\ & & A_3(\beta) + H_0^{-1}(\beta) & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5(\beta) + \frac{2}{3}b^2 \cdot H_1^{-1}(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{w}_{r1}^*(\beta) \\ \bar{w}_{r2}^*(\beta) \\ \bar{w}_0^*(\beta) \\ \bar{\theta}^*(\beta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_1(\beta) = -m_r \cdot \omega^2 + k_p + E_r I_r \cdot \beta^4 \\ A_2(\beta) = -k_p \\ A_3(\beta) = -m_c \cdot \omega^2 + 2 \cdot k_p + E_c I_c \cdot \beta^4 \\ A_4(\beta) = A_2 \cdot \lambda \\ A_5(\beta) = -I_{0c} \cdot \omega^2 + 2k_p \cdot \lambda^2 + D_c \cdot \beta^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0(\beta) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot \text{sinc}(\gamma \cdot b) \cdot d\gamma \\ H_1(\beta) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot g(\gamma) \cdot i\gamma \cdot d\gamma \end{cases}$$

Modèle retenu pour une pose classique (Ferrière) avec prise en compte de la rotation de la dalle

- Équations rail flexion
- Équations dalle flexion
- Équations dalle torsion
- Couplage en déplacement
- Couplage en rotation



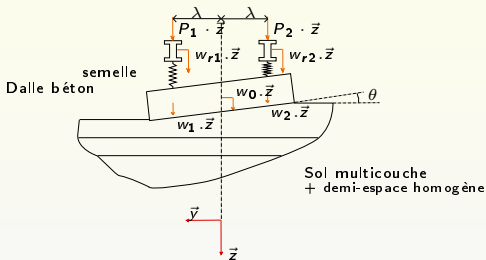
$$\begin{pmatrix} A_1(\beta) & 0 & A_2(\beta) & A_4(\beta) \\ & A_1(\beta) & A_2(\beta) & -A_4(\beta) \\ & & A_3(\beta) + H_0^{-1}(\beta) & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5(\beta) + \frac{2}{3}b^2 \cdot H_1^{-1}(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{w}_{r1}^*(\beta) \\ \bar{w}_{r2}^*(\beta) \\ \bar{w}_0^*(\beta) \\ \bar{\theta}^*(\beta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_1(\beta) = -m_r \cdot \omega^2 + k_p + E_r I_r \cdot \beta^4 \\ A_2(\beta) = -k_p \\ A_3(\beta) = -m_c \cdot \omega^2 + 2 \cdot k_p + E_c I_c \cdot \beta^4 \\ A_4(\beta) = A_2 \cdot \lambda \\ A_5(\beta) = -I_{0c} \cdot \omega^2 + 2k_p \cdot \lambda^2 + D_c \cdot \beta^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0(\beta) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot \text{sinc}(\gamma \cdot b) \cdot d\gamma \\ H_1(\beta) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot g(\gamma) \cdot i\gamma \cdot d\gamma \end{cases}$$

Modèle retenu pour une pose classique (Ferrière) avec prise en compte de la rotation de la dalle

- Équations rail flexion
- Équations dalle flexion
- Équations dalle torsion
- Couplage en déplacement
- Couplage en rotation



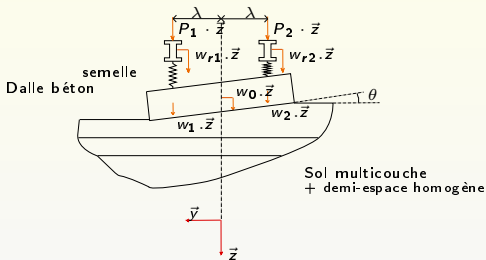
$$\begin{pmatrix} A_1(\beta) & 0 & A_2(\beta) & A_4(\beta) \\ & A_1(\beta) & A_2(\beta) & -A_4(\beta) \\ & & A_3(\beta) + H_0^{-1}(\beta) & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5(\beta) + \frac{2}{3}b^2 \cdot H_1^{-1}(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{w}_{r1}^*(\beta) \\ \bar{w}_{r2}^*(\beta) \\ \bar{w}_0^*(\beta) \\ \bar{\theta}^*(\beta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_1(\beta) = -m_r \cdot \omega^2 + k_p + E_r I_r \cdot \beta^4 \\ A_2(\beta) = -k_p \\ A_3(\beta) = -m_c \cdot \omega^2 + 2 \cdot k_p + E_c I_c \cdot \beta^4 \\ A_4(\beta) = A_2 \cdot \lambda \\ A_5(\beta) = -I_{oc} \cdot \omega^2 + 2k_p \cdot \lambda^2 + D_c \cdot \beta^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0(\beta) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot \text{sinc}(\gamma \cdot b) \cdot d\gamma \\ H_1(\beta) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot g(\gamma) \cdot i\gamma \cdot d\gamma \end{cases}$$

Modèle retenu pour une pose classique (Ferrière) avec prise en compte de la rotation de la dalle

- Équations rail flexion
- Équations dalle flexion
- Équations dalle torsion
- Couplage en déplacement
- Couplage en rotation



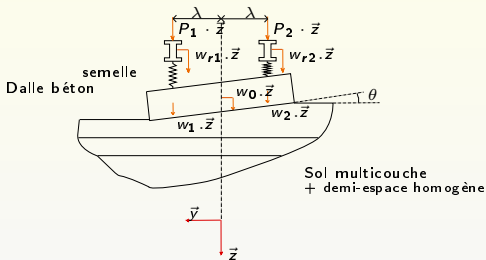
$$\begin{pmatrix} A_1(\beta) & 0 & A_2(\beta) & A_4(\beta) \\ & A_1(\beta) & A_2(\beta) & -A_4(\beta) \\ & & A_3(\beta) + H_0^{-1}(\beta) & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5(\beta) + \frac{2}{3}b^2 \cdot H_1^{-1}(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{w}_{r1}^*(\beta) \\ \bar{w}_{r2}^*(\beta) \\ \bar{w}_0^*(\beta) \\ \bar{\theta}^*(\beta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_1(\beta) = -m_r \cdot \omega^2 + k_p + E_r I_r \cdot \beta^4 \\ A_2(\beta) = -k_p \\ A_3(\beta) = -m_c \cdot \omega^2 + 2 \cdot k_p + E_c I_c \cdot \beta^4 \\ A_4(\beta) = A_2 \cdot \lambda \\ A_5(\beta) = -I_{0c} \cdot \omega^2 + 2k_p \cdot \lambda^2 + D_c \cdot \beta^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0(\beta) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot \text{sinc}(\gamma \cdot b) \cdot d\gamma \\ H_1(\beta) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot g(\gamma) \cdot i\gamma \cdot d\gamma \end{cases}$$

Modèle retenu pour une pose classique (Ferrière) avec prise en compte de la rotation de la dalle

- Équations rail flexion
- Équations dalle flexion
- Équations dalle torsion
- **Couplage en déplacement**
- Couplage en rotation



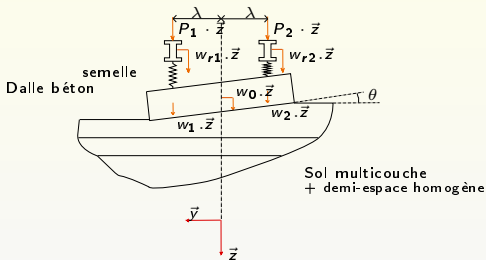
$$\begin{pmatrix} A_1(\beta) & 0 & A_2(\beta) & A_4(\beta) \\ & A_1(\beta) & A_2(\beta) & -A_4(\beta) \\ & & A_3(\beta) + H_0^{-1}(\beta) & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5(\beta) + \frac{2}{3}b^2 \cdot H_1^{-1}(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{w}_{r1}^*(\beta) \\ \bar{w}_{r2}^*(\beta) \\ \bar{w}_0^*(\beta) \\ \bar{\theta}^*(\beta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_1(\beta) = -m_r \cdot \omega^2 + k_p + E_r I_r \cdot \beta^4 \\ A_2(\beta) = -k_p \\ A_3(\beta) = -m_c \cdot \omega^2 + 2 \cdot k_p + E_c I_c \cdot \beta^4 \\ A_4(\beta) = A_2 \cdot \lambda \\ A_5(\beta) = -I_{0c} \cdot \omega^2 + 2k_p \cdot \lambda^2 + D_c \cdot \beta^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0(\beta) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot \text{sinc}(\gamma \cdot b) \cdot d\gamma \\ H_1(\beta) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot g(\gamma) \cdot i\gamma \cdot d\gamma \end{cases}$$

Modèle retenu pour une pose classique (Ferrière) avec prise en compte de la rotation de la dalle

- Équations rail flexion
- Équations dalle flexion
- Équations dalle torsion
- **Couplage en déplacement**
- Couplage en rotation



$$\begin{pmatrix} A_1(\beta) & 0 & A_2(\beta) & A_4(\beta) \\ & A_1(\beta) & A_2(\beta) & -A_4(\beta) \\ & & A_3(\beta) + H_0^{-1}(\beta) & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5(\beta) + \frac{2}{3}b^2 \cdot H_1^{-1}(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{w}_{r1}^*(\beta) \\ \bar{w}_{r2}^*(\beta) \\ \bar{w}_0^*(\beta) \\ \bar{\theta}^*(\beta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

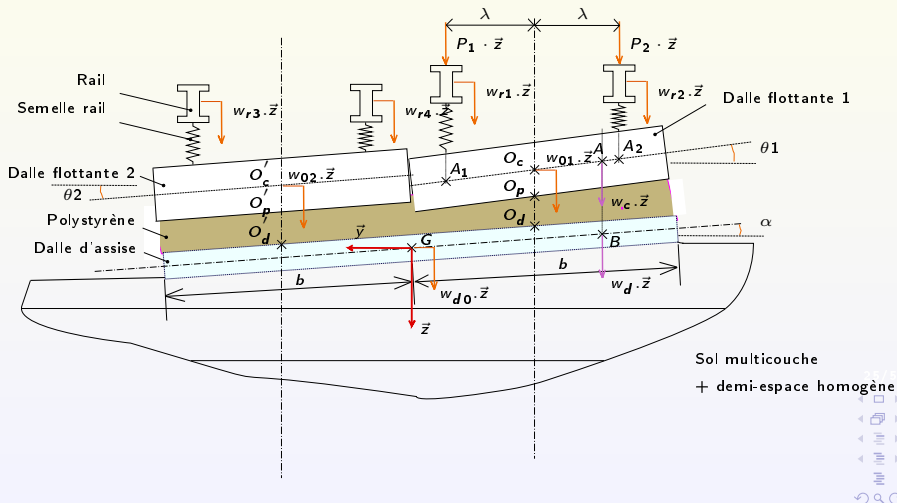
$$\begin{cases} A_1(\beta) = -m_r \cdot \omega^2 + k_p + E_r I_r \cdot \beta^4 \\ A_2(\beta) = -k_p \\ A_3(\beta) = -m_c \cdot \omega^2 + 2 \cdot k_p + E_c I_c \cdot \beta^4 \\ A_4(\beta) = A_2 \cdot \lambda \\ A_5(\beta) = -I_{0c} \cdot \omega^2 + 2k_p \cdot \lambda^2 + D_c \cdot \beta^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0(\beta) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot \text{sinc}(\gamma \cdot b) \cdot d\gamma \\ H_1(\beta) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \cdot g(\gamma) \cdot i\gamma \cdot d\gamma \end{cases}$$

Modèle pour une pose isolante - Libération

Rotations des 3 dalles

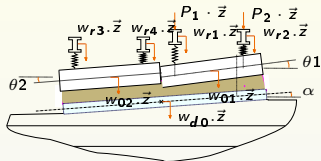
25



Modèle pour une pose isolante - Libération

Rotations des 3 dalles - Mise en équations

- Éq. rails flexion
- Éq. dalles flottantes flexion
- Éq. dalles flottantes torsion
- Éq. dalle d'assise flexion
- Éq. dalle d'assise torsion
- Couplage en déplacement
- Couplage en rotation

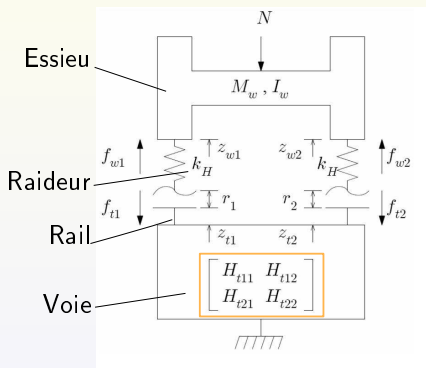


A_1	0	A_2	A_4	0	0	0	0	0	0	0	\bar{w}_{r1}^*
	A_1	A_2	$-A_4$	0	0	0	0	0	0	0	\bar{w}_{r2}^*
		$A_3 + \tilde{k}_p$	0	0	0	0	0	$-\tilde{k}_p$	$\tilde{k}_p \cdot b$	0	\bar{w}_0^*
			$A_5 + \tilde{k}_p \cdot a$	0	0	0	0	0	$-\tilde{k}_p \cdot a$	0	θ_1^*
				A_1	0	A_2	A_4	0	0	0	\bar{w}_{r3}^*
					A_1	A_2	$-A_4$	0	0	0	\bar{w}_{r4}^*
						$A_3 + \tilde{k}_p$	0	$-\tilde{k}_p$	$-\tilde{k}_p \cdot b$	0	\bar{w}_{02}^*
							$A_5 + \tilde{k}_p \cdot a$	0	$-\tilde{k}_p \cdot a$	0	θ_2^*
								$A_6 + H_0^{-1}$	0	0	\bar{w}_{d0}^*
									$A_7 + c \cdot H_1^{-1}$	0	$\bar{\alpha}^*$

sym.

Interaction voie/essieu - Modèle Inrets

27



Modèle utilisé pour
l'interaction voie/essieu

$$z_{wS} = \frac{z_{w1} + z_{w2}}{2} = H_{wrS} \cdot \frac{r_1 + r_2}{2}$$

$$z_{wA} = \frac{z_{w1} - z_{w2}}{2} = H_{wrA} \cdot \frac{r_1 - r_2}{2}$$

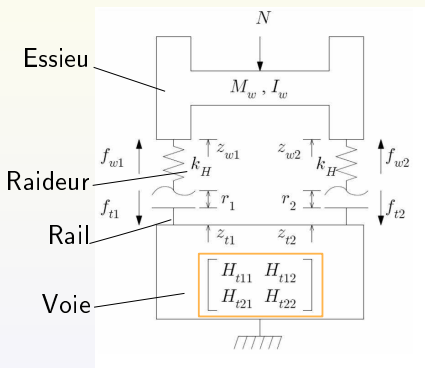
$H_{wrS} - H_{wrA}$ = fonctions de transfert
rugosité combinée/déplacement essieu,
partie symétrique/antisymétrique

$$H_{wrS} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot M_w}{2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

$$H_{wrA} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot I_w}{2d^2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

Interaction voie/essieu - Modèle Inrets

27



Modèle utilisé pour
l'interaction voie/essieu

$$z_{wS} = \frac{z_{w1} + z_{w2}}{2} = H_{wrS} \cdot \frac{r_1 + r_2}{2}$$

$$z_{wA} = \frac{z_{w1} - z_{w2}}{2} = H_{wrA} \cdot \frac{r_1 - r_2}{2}$$

H_{wrS} - H_{wrA} = fonctions de transfert
rugosité combinée/déplacement essieu,
partie symétrique/antisymétrique

$$H_{wrS} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot M_w}{2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

$$H_{wrA} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot I_w}{2d^2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

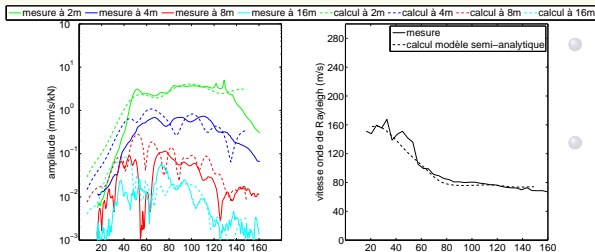
... apports nouveaux ?

- Prise en compte de l'ensemble de la structure :
« véhicule » / voie / sol
- Données d'entrée du modèle :
 - rugosité combinée roue+rail (mesures ou tableaux)
 - paramètres voie
 - paramètres sol (procédure type SASW)
- Rotations des dalles prises en compte à l'aide de conditions de couplage dalle/sol spécifiques
- Calcul de la réceptance croisée (entre rails) possible

- 1 Etude bibliographique
- 2 Campagne expérimentale
- 3 Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol
- 4 **Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux**
 - Caractéristiques mécaniques des sols étudiés
 - Validation du modèle numérique pour le sol
 - Caractéristiques mécaniques des voies étudiées
 - Comparaison fondation élastique↔pose classique
 - Détermination des efforts au contact roue-rail
 - Simulations du passage d'un tramway
- 5 Conclusion générale

Définition des paramètres du sol - Ferrière

30



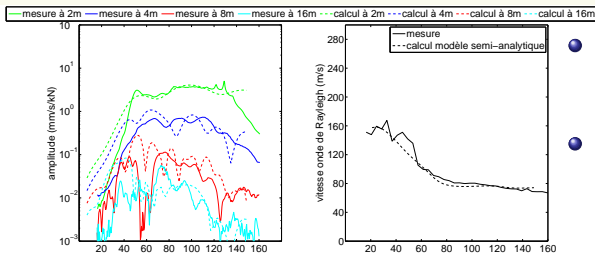
- Inversion (phase)
Lai et Rix 2000
- Optimisation (phase & amplitude)
 (η, E)
 → modèle semi-analytique

Caractéristiques finales retenues

	couche 1	couche 2	massif
$E \times 10^6 (N/m^2)$	26	56,5	207
ν	0,4	0,35	0,33
$\rho (kg/m^3)$	1600	1700	1800
η	0,15	0,10	0,06
Épaisseur (m)	0,4	0,6	∞
Vitesse onde S (m/s)	77	111	208

Définition des paramètres du sol - Ferrière

30



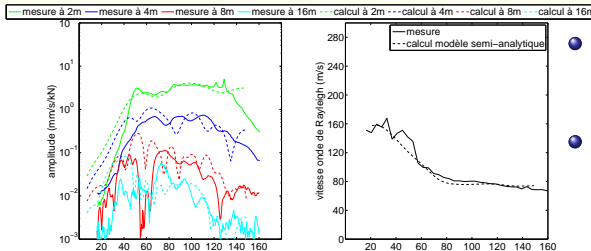
- Inversion (phase)
Lai et Rix 2000
- Optimisation (phase & amplitude)
 (η, E)
 → modèle semi-analytique

Caractéristiques finales retenues

	couche 1	couche 2	massif
$E \times 10^6 (N/m^2)$	26	56,5	207
ν	0,4	0,35	0,33
$\rho (kg/m^3)$	1600	1700	1800
η	0,15	0,10	0,06
Épaisseur (m)	0,4	0,6	∞
Vitesse onde S (m/s)	77	111	208

Définition des paramètres du sol - Ferrière

30



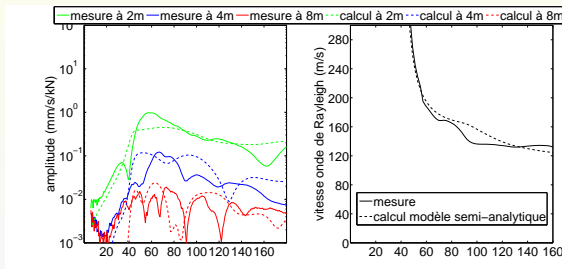
- Inversion (phase)
Lai et Rix 2000
- Optimisation (phase & amplitude) (η, E)
→ modèle semi-analytique

Caractéristiques finales retenues

	couche 1	couche 2	massif
$E \times 10^6 (N/m^2)$	26	56,5	207
ν	0,4	0,35	0,33
$\rho (kg/m^3)$	1600	1700	1800
η	0,15	0,10	0,06
Épaisseur (m)	0,4	0,6	∞
Vitesse onde S (m/s)	77	111	208

Définition des paramètres du sol - Libération

31

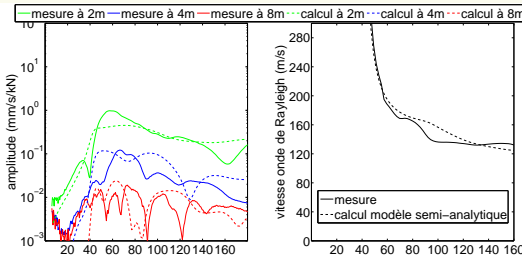


- Inversion (phase) *Lai et Rix 2000*
- Optimisation (phase & amplitude) (η, E)
 → modèle semi-analytique

Caractéristiques
 finales retenues

	couche 1	couche 2	couche 3	couche 4	massif
$E \times 10^6 (N/m^2)$	101	157	341	667	50000
ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$\rho (kg/m^3)$	2000	2000	2000	2000	2000
η	0,4	0,2	0,2	0,1	0,05
Épaisseur (m)	0,6	0,4	1	1	∞
Vitesse onde S (m/s)	144	175	260	360	3100

Définition des paramètres du sol - Libération



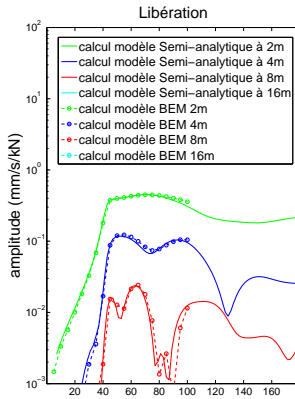
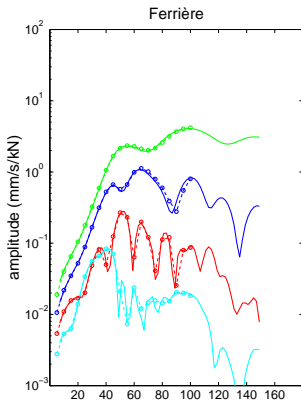
- Inversion (phase)
Lai et Rix 2000
- Optimisation (phase & amplitude) (η, E)
→ modèle semi-analytique

Caractéristiques
 finales retenues

	couche 1	couche 2	couche 3	couche 4	massif
$E \times 10^6 (N/m^2)$	101	157	341	667	50000
ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$\rho (kg/m^3)$	2000	2000	2000	2000	2000
η	0,4	0,2	0,2	0,1	0,05
Épaisseur (m)	0,6	0,4	1	1	∞
Vitesse onde S (m/s)	144	175	260	360	3100

Validation du modèle numérique : **confrontation des résultats** du calcul semi-analytique avec un calcul basé sur la méthode des éléments de frontière (BEM), effectué par L.Auersch

32



Recalage des paramètres de voie - Pose classique

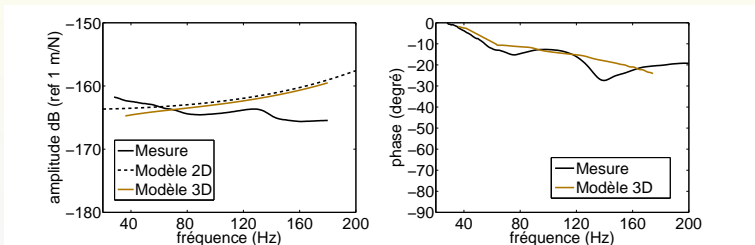
33

rail	masse	m_r	55	$kg \text{ par } m$
	raideur en flexion	$E_r I_r$	4,326	$MN \cdot m^2$
	amortissement	η_r	0,1	
semelle de rail	raideur	k_p	90	$MN \cdot m^{-2}$
	travelage		0,75	m
	amortissement	η_p	0,3	
dalle de béton	épaisseur	h_c	0,61	m
	demi-largeur	b	1,55	m
	masse volumique	ρ_c	2500	$kg \cdot m^{-3}$
	module de Young	E_c	30	GPa
	amortissement	η_c	0,1	
	coefficient de Poisson	ν	0,3	
	masse	m_c	4728	kg/m
	raideur en flexion	$E_c I_c$	1759	$MN \cdot m^2$
	raideur en torsion	D_c	2580	$MN \cdot m^2$
	moment polaire	I_{0c}	3930	$kg \cdot m$

Recalage des paramètres de la semelle

Réceptance - Pose classique

34



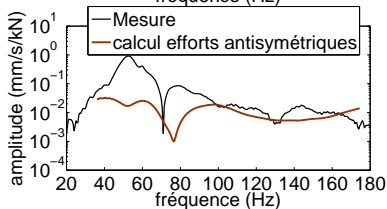
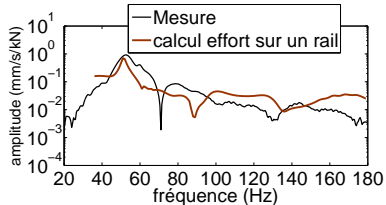
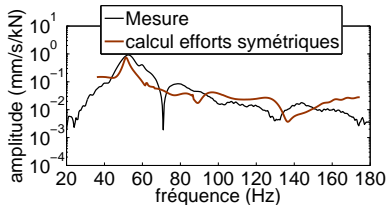
*Amplitude et phase de la réceptance - Comparaison modèles/mesure
Ferrière*

⇒ **Recalage caractéristiques semelle**

Recalage des paramètres de la dalle

Mobilité de transfert voie/sol - Pose classique

35



Comparaison modèle/mesure pour la mobilité de transfert voie/sol à 2,5m - Trois cas d'excitation

⇒ **Rotation de la dalle négligeable pour la pose classique**



Recalage des paramètres de voie

Pose sur dalle flottante

36

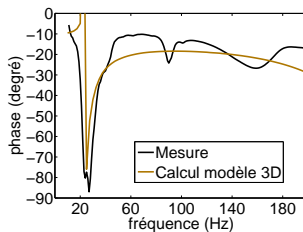
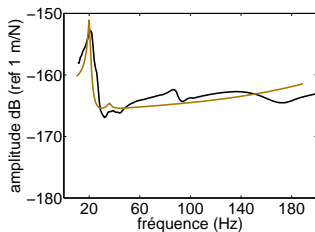
semelle	raideur	k_p	110	$MN \cdot m^{-2}$
	amortissement	η_p	0,3	
dalle flottante	épaisseur	h_c	0,59	m
	demi-largeur	$b/2$	1,55	m
	masse volumique	ρ_c	2200	$kg \cdot m^{-3}$
	module de Young	E_c	15	GPa
	amortissement	η_c	0,1	
	coefficient de Poisson	ν_c	0,3	
	masse	m_c	4024	kg/m
	raideur en flexion	$E_c I_c$	796	$MN \cdot m^2$
	raideur en torsion	D_c	1224	$MN \cdot m^2$
moment polaire	I_{0c}	3339	$kg \cdot m$	
polystyrène	raideur	k_{poly}	20,5	$MN \cdot m^{-2}$
	amortissement	η_{poly}	0,07	
dalle d'assise	épaisseur	h_d	0,1	m
	masse volumique	ρ_d	2200	$kg \cdot m^{-3}$
	module de Young	E_d	15	GPa
	amortissement	η_d	0,1	
	coefficient de Poisson	ν_d	0,3	
	masse	m_d	1364	kg/m
	raideur en flexion	$E_d I_d$	7,75	$MN \cdot m^2$
	raideur en torsion	D_d	11,9	$MN \cdot m^2$
moment polaire	I_{0d}	800	$kg \cdot m$	



Recalage des paramètres de la semelle

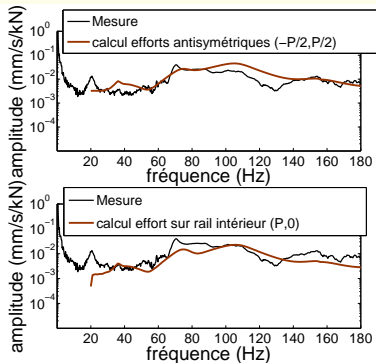
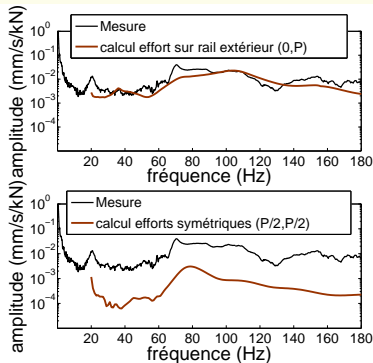
Réceptance - Pose sur dalle flottante

37



Amplitude et phase de la réceptance - Comparaison modèles/mesure
Libération

⇒ **Recalage caractéristiques semelle & polystyrène**



*Comparaison modèle/mesure pour la mobilité de transfert voie/sol -
Quatre cas d'excitation*

- ⇒ **Rotations des dalles non négligeables pour la pose sur dalle flottante**
- ⇒ **Forte atténuation des vibrations sur le mode d'excitation symétrique**

Efficacité et atténuation

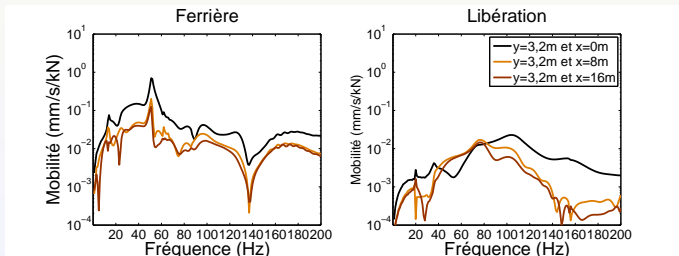
39

- L'efficacité d'une pose dépend directement du sous-sol. Une pose isolante est efficace si le sol est suffisamment raide
- L'atténuation des vibrations sur une ligne parallèle à la voie n'est pas uniforme, notamment pour la pose sur dalle flottante

Efficacité et atténuation

39

- L'efficacité d'une pose dépend directement du sous-sol. Une pose isolante est efficace si le sol est suffisamment raide
- L'atténuation des vibrations sur une ligne parallèle à la voie n'est pas uniforme, notamment pour la pose sur dalle flottante



39/34

Détermination des efforts au contact roue-rail

40

Définition des paramètres d'essieu

- Utilisation des fréquences de résonance essieu/voie et des fonctions de transfert, par exemple

$$H_{wrA} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot I_w}{2d^2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

⇒ Détermination de la masse et de l'inertie de l'essieu

Validation : détermination des accélérations des roues et des rugosités combinées (roues+rails)

- Calcul des accélérations à partir des rugosités mesurées et des

$$\text{formes } z_{wA} = \frac{z_{w1} - z_{w2}}{2} = H_{wrA} \cdot \frac{r_1 - r_2}{2}$$

- Procédure inverse : en partant des accélérations mesurées, obtention des rugosités combinées simplifiées

Détermination des efforts au contact roue-rail

40

Définition des paramètres d'essieu

- Utilisation des fréquences de résonance essieu/voie et des fonctions de transfert, par exemple

$$H_{wrA} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot I_w}{2d^2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

⇒ Détermination de la masse et de l'inertie de l'essieu

Validation : détermination des accélérations des roues et des rugosités combinées (roues+rails)

- Calcul des accélérations à partir des rugosités mesurées et des

$$\text{formes } z_{wA} = \frac{z_{w1} - z_{w2}}{2} = H_{wrA} \cdot \frac{r_1 - r_2}{2}$$

- Procédure inverse : en partant des accélérations mesurées, obtention des rugosités combinées simplifiées

Détermination des efforts au contact roue-rail

40

Définition des paramètres d'essieu

- Utilisation des fréquences de résonance essieu/voie et des fonctions de transfert, par exemple

$$H_{wrA} = 1 - \frac{\omega^2 \cdot I_w}{2d^2} \cdot \left(H_{t11} + H_{t12} + \frac{1}{k_H} \right)^{-1}$$

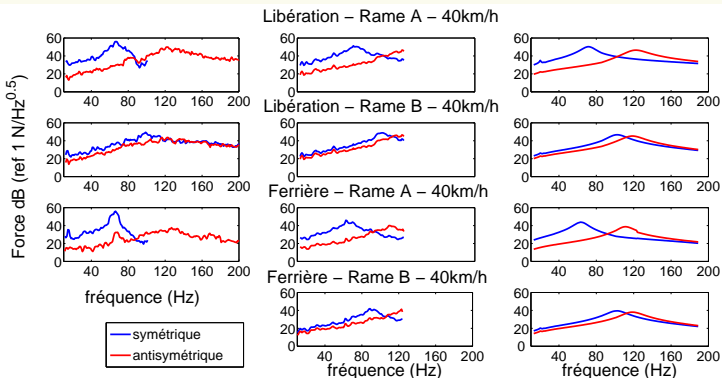
⇒ Détermination de la masse et de l'inertie de l'essieu

Validation : détermination des accélérations des roues et des rugosités combinées (roues+rails)

- Calcul des accélérations à partir des rugosités mesurées et des formes $z_{wA} = \frac{z_{w1} - z_{w2}}{2} = H_{wrA} \cdot \frac{r_1 - r_2}{2}$
- Procédure inverse : en partant des accélérations mesurées, obtention des rugosités **combinées simplifiées**

Détermination des efforts au contact roue-rail

41



accélération mesurées

rugosités rails mesurées

rugosités simplifiées

Simulation du passage d'un tramway

42

Données d'entrée

- Caractéristiques du tramway (nombre de bogies et d'essieux, dimensions) - Vitesse de passage
- Paramètres sol & voie
- Efforts dynamiques à partir des
 - accélérations mesurées (essieux)
 - rugosité mesurée des rails
 - rugosité combinée simplifiée

42/54

Simulation du passage d'un tramway

42

Données d'entrée

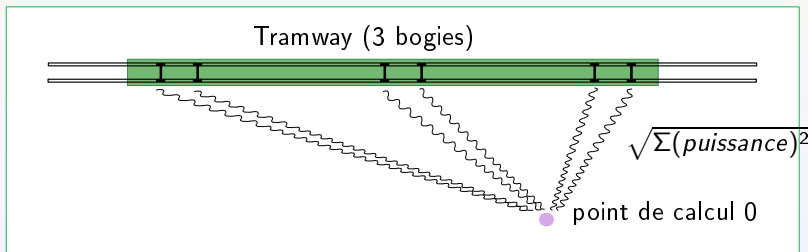
- Caractéristiques du tramway (nombre de bogies et d'essieux, dimensions) - Vitesse de passage
- Paramètres sol & voie
- Efforts dynamiques à partir des
 - accélérations mesurées (essieux)
 - rugosité mesurée des rails
 - **rugosité combinée simplifiée**

Principe du calcul

- **Réponse sol** : Calcul de la réponse du sol en tout point suite à une excitation sur le rail
- **Excitation d'un essieu** : Excitations supposées décorréées (conclusion issue des mesures) et considérées comme ponctuelles \Rightarrow somme sur les spectres de puissance pour les modes symétrique et antisymétrique
- **Excitation complète (train d'essieux)** : Sommation sur les puissances spectrales

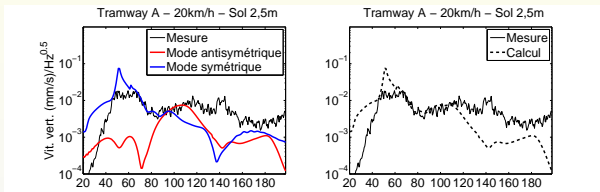
Principe du calcul

- **Réponse sol** : Calcul de la réponse du sol en tout point suite à une excitation sur le rail
- **Excitation d'un essieu** : Excitations supposées décorrélées (conclusion issue des mesures) et considérées comme ponctuelles \Rightarrow somme sur les spectres de puissance pour les modes symétrique et antisymétrique
- **Excitation complète (train d'essieux)** : Sommation sur les puissances spectrales



Calcul au passage - Ferrière

44



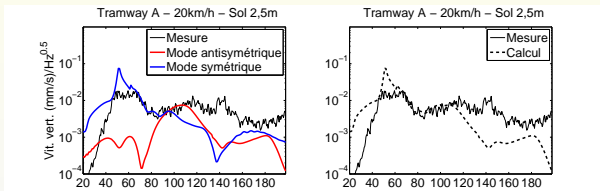
*Décomposition des contributions symétrique et antisymétrique - Calculs à 2,5m de la voie - rame A, Pose classique (Ferrière)
Efforts à partir des rugosités combinées*

Analyse

- Contribution du mode symétrique prédominante
- Faible effet de la rotation de dalle confirmé
- Niveaux mal estimés au-delà de 120Hz environ

Calcul au passage - Ferrière

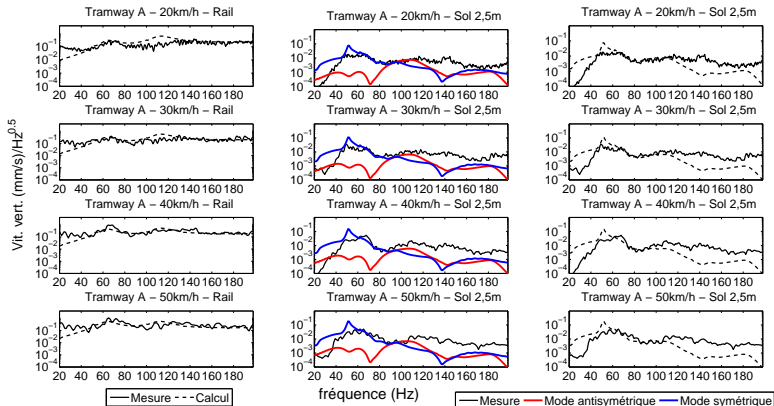
44



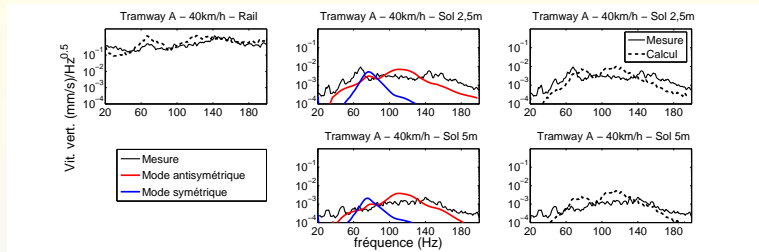
*Décomposition des contributions symétrique et antisymétrique - Calculs à 2,5m de la voie - rame A, Pose classique (Ferrière)
Efforts à partir des rugosités combinées*

Analyse

- Contribution du mode symétrique prédominante
- Faible effet de la rotation de dalle confirmé
- Niveaux mal estimés au-delà de 120Hz environ



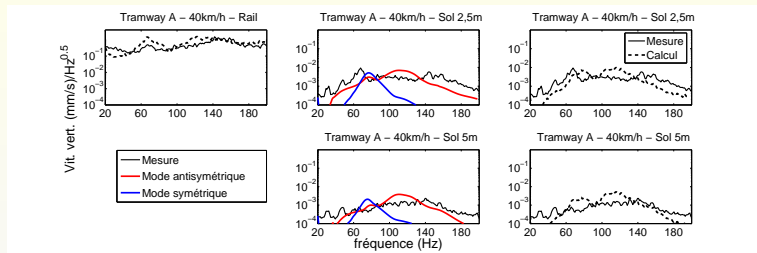
*rame A, Pose classique (Ferrière)
Efforts à partir des rugosités combinées*



rame A, Libération – Calculs à partir des accélérations mesurées et des rugosités combinées (pour les décomposition sur les 2 modes)

Analyse

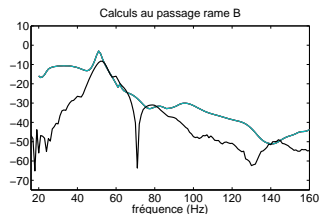
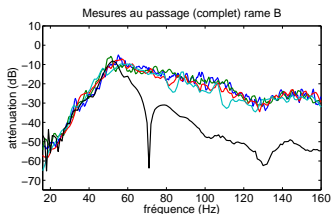
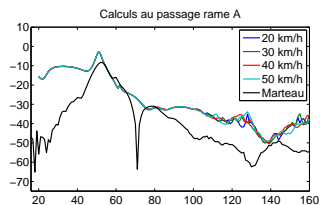
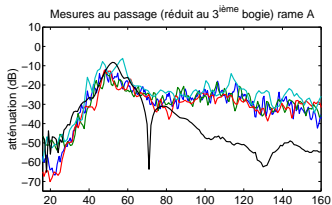
- Contribution du mode antisymétrique prédominant
- Effet important de la rotation de la dalle d'assise
- Réponse du rail bien estimée (pas de mode élastique d'essieu)



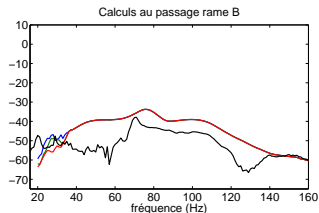
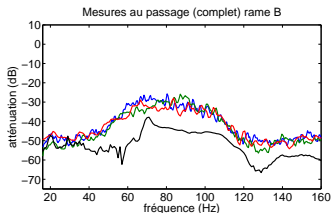
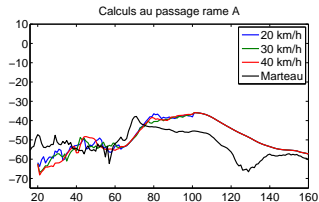
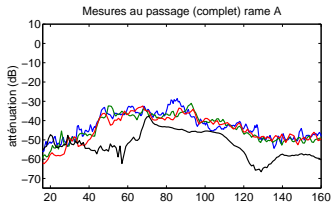
rame A, Libération – Calculs à partir des accélérations mesurées et des rugosités combinées (pour les décomposition sur les 2 modes)

Analyse

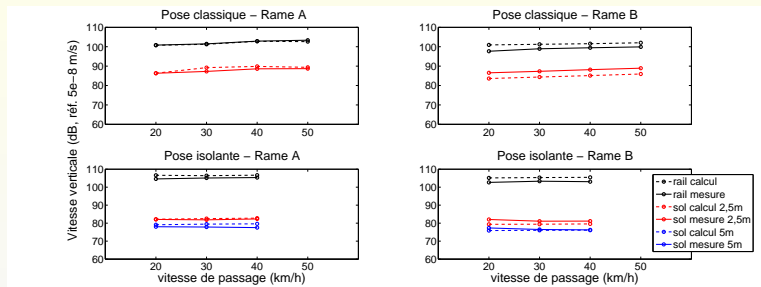
- Contribution du mode antisymétrique prédominant
- Effet important de la rotation de la dalle d'assise
- Réponse du rail bien estimée (pas de mode élastique d'essieu)



*Atténuation des vibrations dans le sol à 2,5m du rail (référence sur le rail)
– Ferrière, rames A et B – Comparaison entre les résultats au passage et
au marteau (à gauche : mesures – à droite : calculs)*



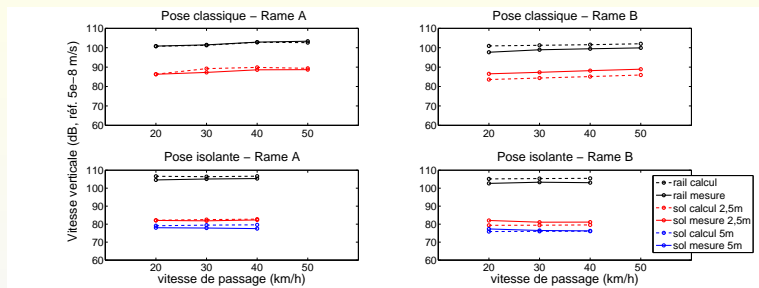
*Atténuation des vibrations dans le sol à 2,5m du rail (référence sur le rail)
 – Libération, rames A et B – Comparaison entre les résultats au passage
 et au marteau (à gauche : mesures – à droite : calculs)*



Écart des calculs par rapport aux mesures - Puissance vibratoire (dB, référence $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) estimée sur la bande de fréquences 20–200Hz

Analyse

- Écart observé : contributions des essieux décorrélés ?
- Résonance essieu/voie peu visible au passage sur le rail & niveaux sous-estimés sur le sol \rightarrow raidissement de la voie au passage ?



Écart des calculs par rapport aux mesures - Puissance vibratoire (dB, référence $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) estimée sur la bande de fréquences 20–200Hz

Analyse

- Écart observé : contributions des essieux décorrélés ?
- Résonance essieu/voie peu visible au passage sur le rail & niveaux sous-estimés sur le sol \rightarrow raidissement de la voie au passage ?

- 1 Etude bibliographique
- 2 Campagne expérimentale
- 3 Modélisation de l'ensemble véhicule-voie-sol
- 4 Comparaison simulations numériques/résultats expérimentaux
- 5 Conclusion générale**

Conclusions concernant l'excitation

- Deux modes d'excitation : symétrique et antisymétrique
- Excitation dynamique due aux irrégularités du rail et des roues
- Effet de la vitesse lié à la rugosité combinée (non uniforme)
- 10–100Hz \mapsto Efforts dynamiques au contact roue/rail symétriques (résonance liée aux masses non suspendues et à la raideur dynamique de la voie - pilonnement de l'essieu)
- 100–200Hz \mapsto Efforts dynamiques au contact roue/rail peuvent présenter une composante non-symétrique (roulis de l'essieu)
- L'effet du type de rame sur les vibrations mesurées s'explique donc, dans la bande 10–200Hz, en considérant la masse (environ deux fois supérieure pour la rame de type A) et les inerties d'essieux (assez proches)

Conclusions concernant les niveaux sur le rail

Les niveaux sur le rail étant généralement bien estimés à l'aide d'un modèle incluant les modes symétrique et antisymétrique de vibrations de l'essieu :

- L'excitation dynamique due aux irrégularités de surface des roues et des rails (rugosité combinée) est prépondérante
- Mode élastique d'essieu négligeable \Rightarrow validation des efforts obtenus à l'aide de la rugosité combinée simplifiée gamme 10-200Hz
- Rame B : les niveaux estimés sur le rail montrent des différences avec les mesures \mapsto hypothèse de décorrélation complète des excitations roues/rails inexacte ?

Conclusions concernant le modèle voie/sol

- Pose classique : Rotation de la dalle négligeable et mode de pilonnement prépondérant
- Pose isolante : Rotation de la dalle d'assise à prendre en compte et mode de roulis prépondérant
- Confirmation de l'atténuation des vibrations au passage (validation du modèle « multisource »)
- Un modèle à trois dimensions est nécessaire pour caractériser correctement l'efficacité d'une pose
- Modèles pertinents permettant d'estimer correctement les vibrations dans le sol

Perspectives

- Effet du raidissement local de la voie *Wu et Thompson 1999 ?*
- Contribution des excitations corrélées ?
- Nouvelle campagne expérimentale

Conclusions concernant le modèle voie/sol

- Pose classique : Rotation de la dalle négligeable et mode de pilonnement prépondérant
- Pose isolante : Rotation de la dalle d'assise à prendre en compte et mode de roulis prépondérant
- Confirmation de l'atténuation des vibrations au passage (validation du modèle « multisource »)
- Un modèle à trois dimensions est nécessaire pour caractériser correctement l'efficacité d'une pose
- Modèles pertinents permettant d'estimer correctement les vibrations dans le sol

Perspectives

- Effet du raidissement local de la voie *Wu et Thompson 1999 ?*
- Contribution des excitations corrélées ?
- Nouvelle campagne expérimentale

Merci
pour votre attention