



ACOUPHEN
Ingénierie en acoustique et vibrations

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE ANALYTIQUE PRÉDICTIF DU COUPLAGE DALLE/SOL

Projet SIPROVIB : Application à la
prédiction vibratoire d'une
plateforme de tramway



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Introduction quel outil prévisionnel ?

- Comment évaluer les impacts vibratoires d'un futur tramway ? Des pratiques individuelles variables, une constante « les lois de propagation sol » une solution répandue les atténuer au niveau de la plateforme !
- Ne disposant pas d'outil d'ingénierie pour répondre à cet impératif technico-économique nous avons entrepris des travaux de recherche pour constituer un logiciel « de prédiction vibratoire pertinent »





un outil pour la prévision et la conception

ACOUPHEN
Ingénierie en acoustique et vibrations

- Pour une évaluation environnementale pertinente la prise en compte du type de plateforme est nécessaire
- Pour la prédiction vibratoire, il convient d'être prudent lorsqu'il s'agit d'appliquer un modèle à des situations en dehors de la « plage » car comme cela est cité dans la norme ISO 14837-1 « l'incertitude liée à une extrapolation augmente avec l'étendue de l'extrapolation »
- La conception de la voie avec ou pas ses solutions d'atténuation est utile dès les premières phases de MO



Distances critiques 7 et 12 m !



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

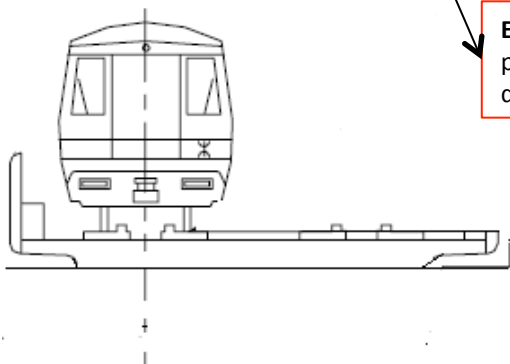
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Problématique source

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO

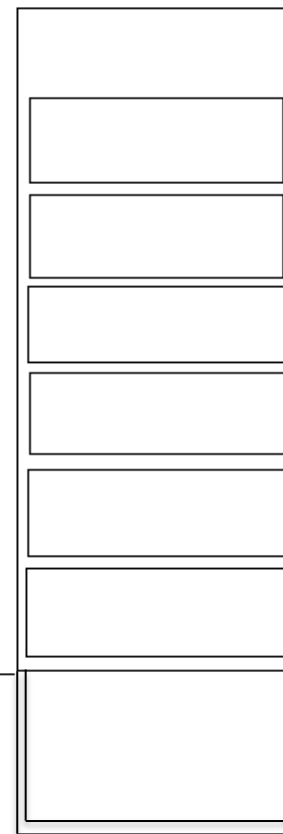
1) Source vibratoire



Excitation de défaut
contact roue/ rail

Excitation d'impact
Joint de rail ; aiguillage...

Excitation de travelage
périodicité des attaches
des rails aux traverses



8 et 9 JUIN 2015

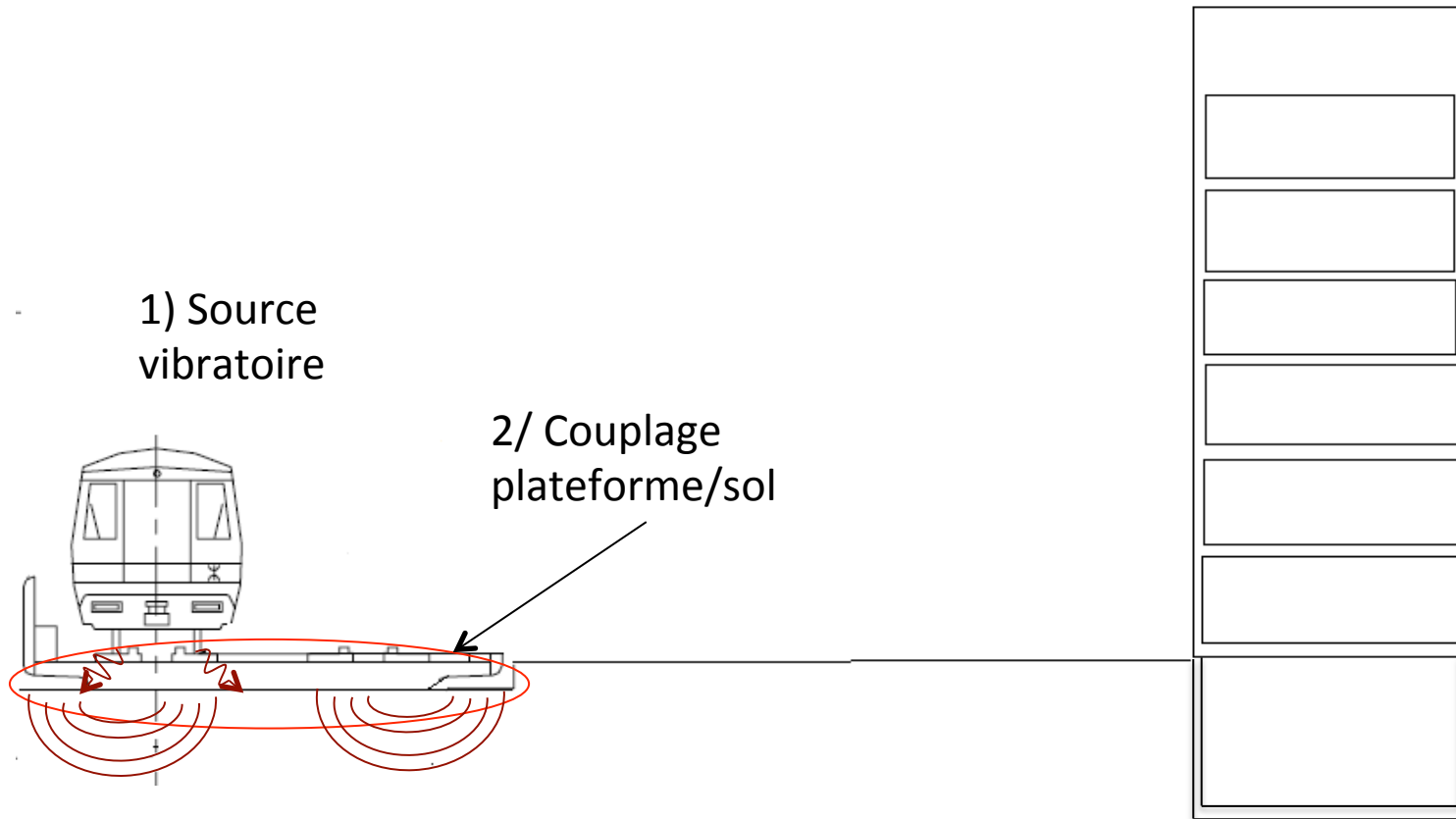
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Problématique plateforme

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

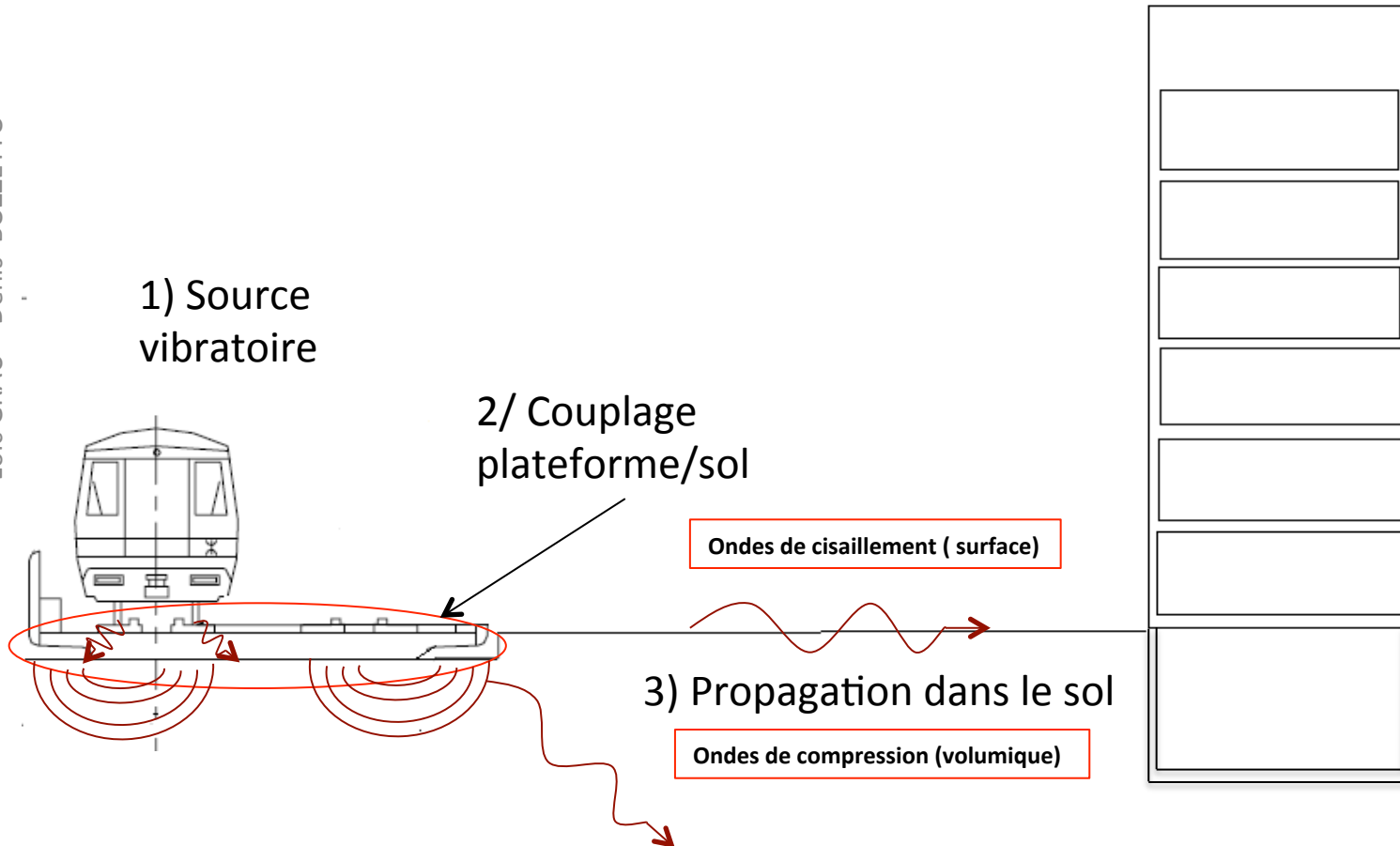
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Problématique sol

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

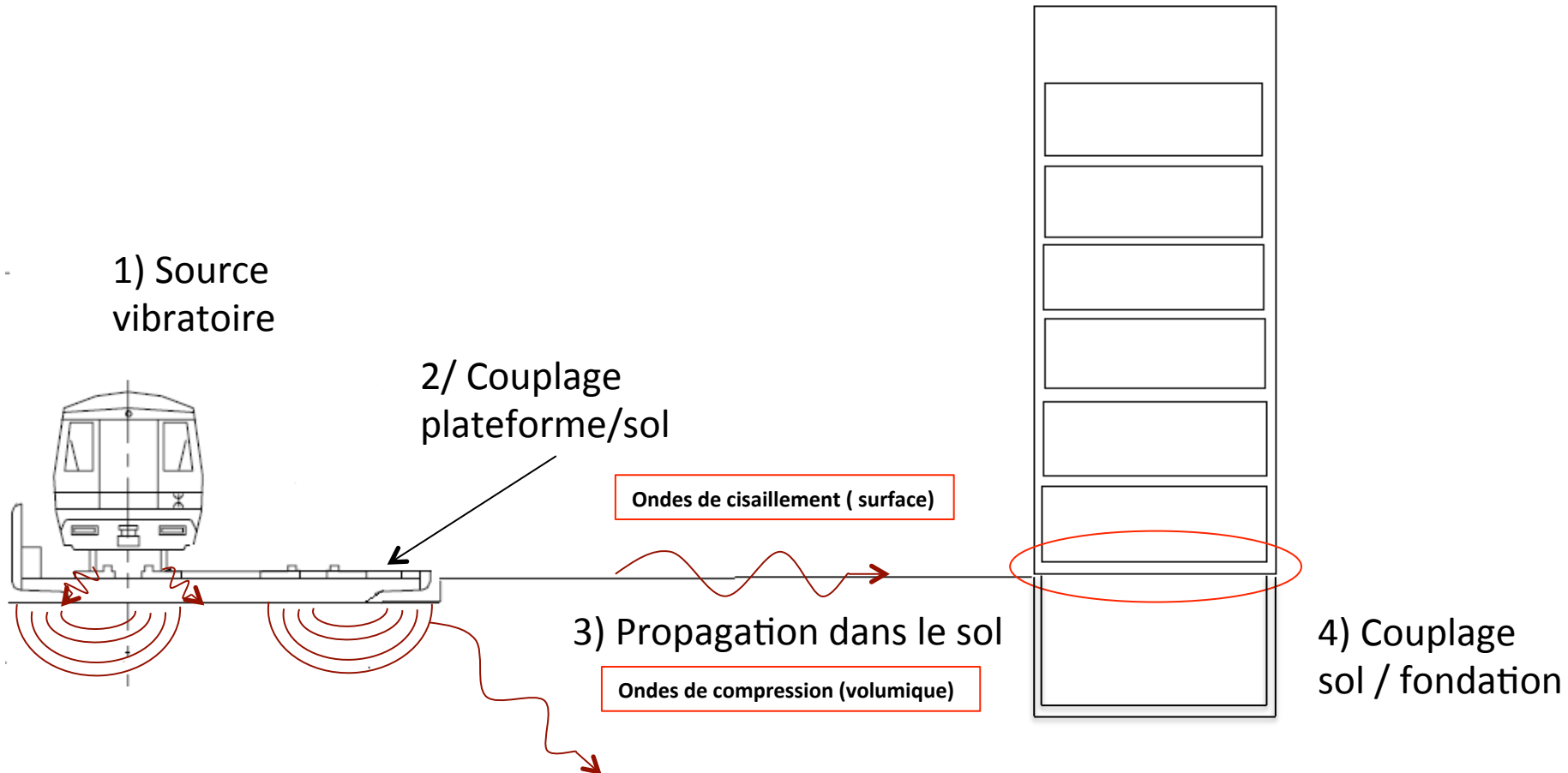
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Problématique fondation

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

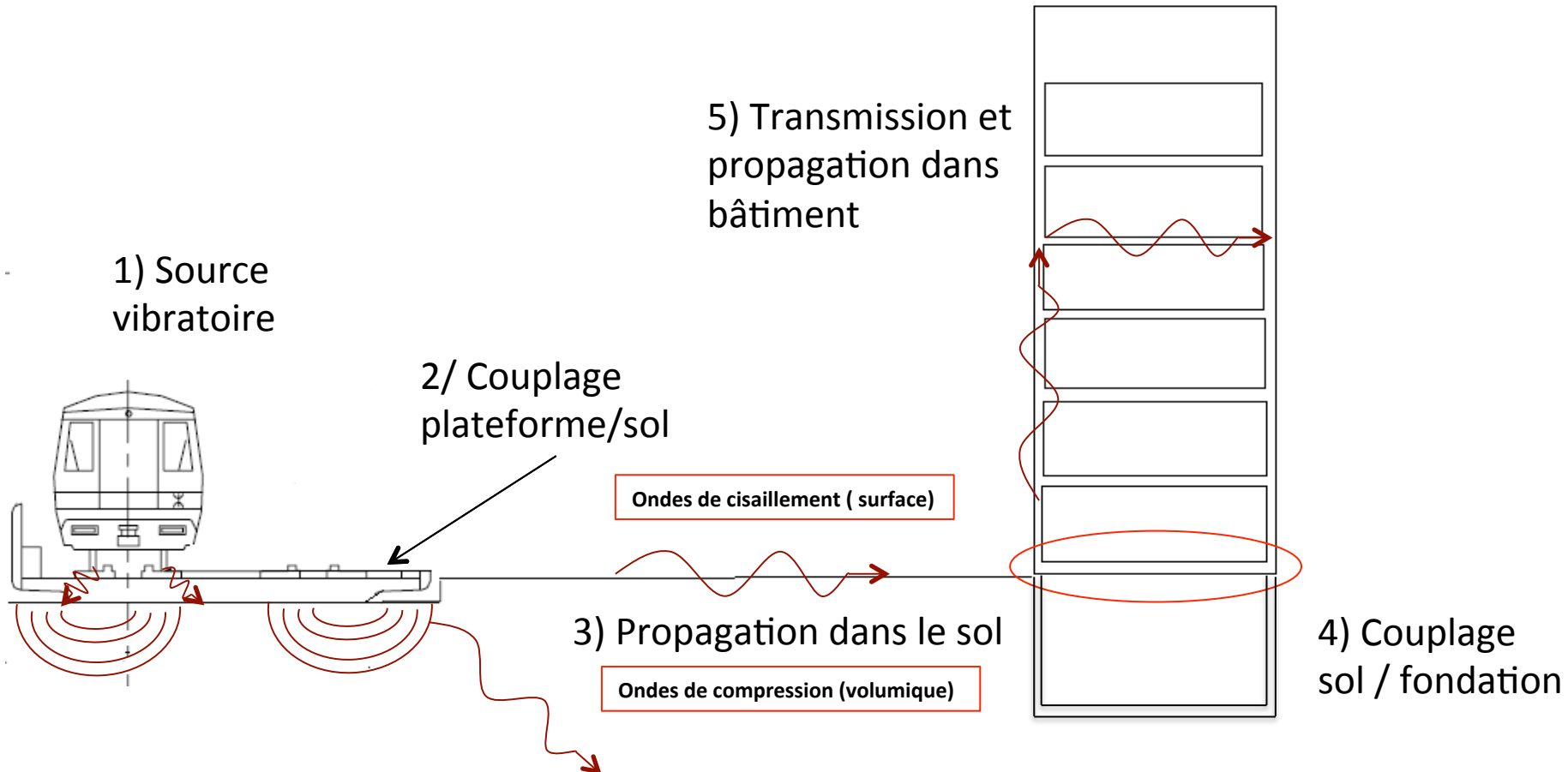
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Problématique structure

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

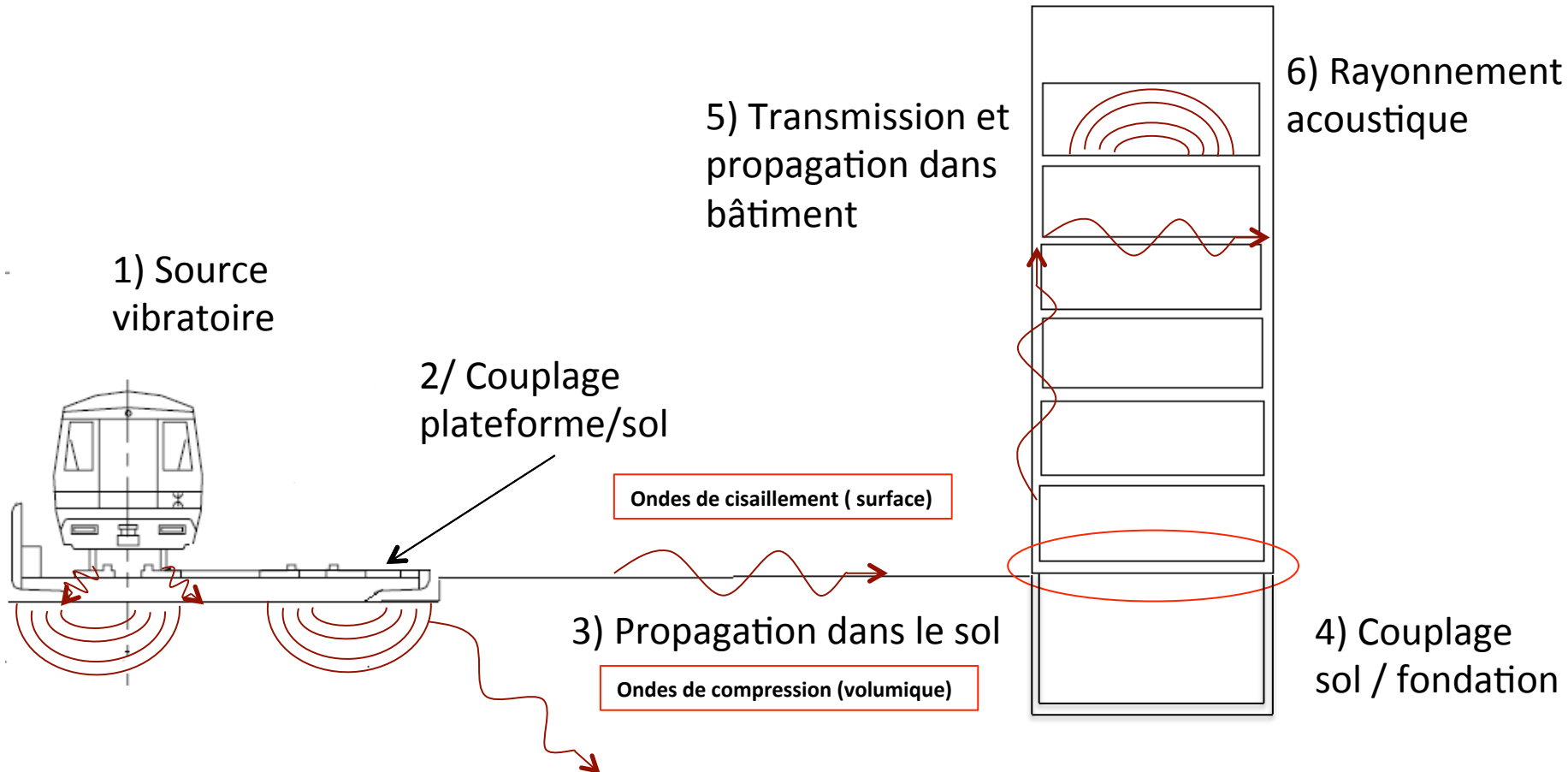
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Problématique bruit rayonné

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Impacts vibratoires d'un tramway

ACOUPHEN
Ingénierie en acoustique et vibrations

Pour les études d'évaluation environnementale il est pertinent de bien connaître :

1. Effet du tramway: Mesure de densité spectrale de puissance d'effort injecté au pied de la plateforme si possible sinon Densité spectrale de puissance « standard ».
2. Effet du sol: Caractérisation des sols par MASW en terme de célérité d'onde et d'amortissement.

Nécessité de la prise en compte de l'interaction entre le sol et la plateforme dans un modèle performant de calcul adapté à une étude d'évaluation sur plusieurs kilomètres, donc rapide, d'où le choix d'un **modèle analytique**

Le modèle doit estimer la distance entre l'axe de la ligne et le récepteur le plus proche au-delà duquel il est très peu probable que les niveaux de vibrations et/ou de bruit transmis par le sol dépassent les critères définis pour le projet



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

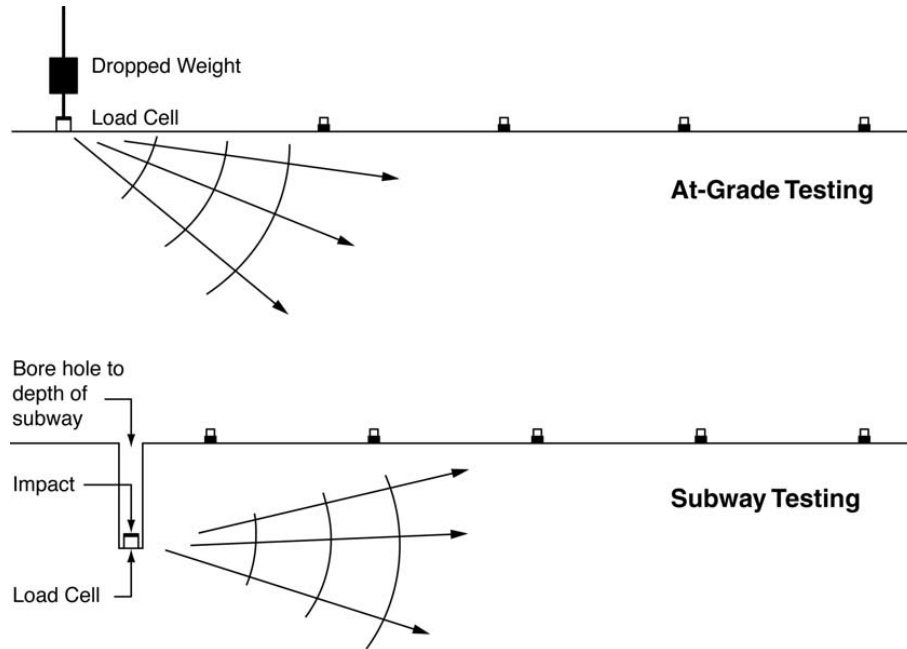
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Caractérisation des sols

Méthode MASW pour les sources à la surface (tramway) et cross-hole pour les sources en profondeur (metro)



Excitation du sol avec marteau impact, masse tombante...
⇒ génération d'onde
⇒ Mesure des niveaux vibratoires en surface qui permet de remonter aux célérités

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

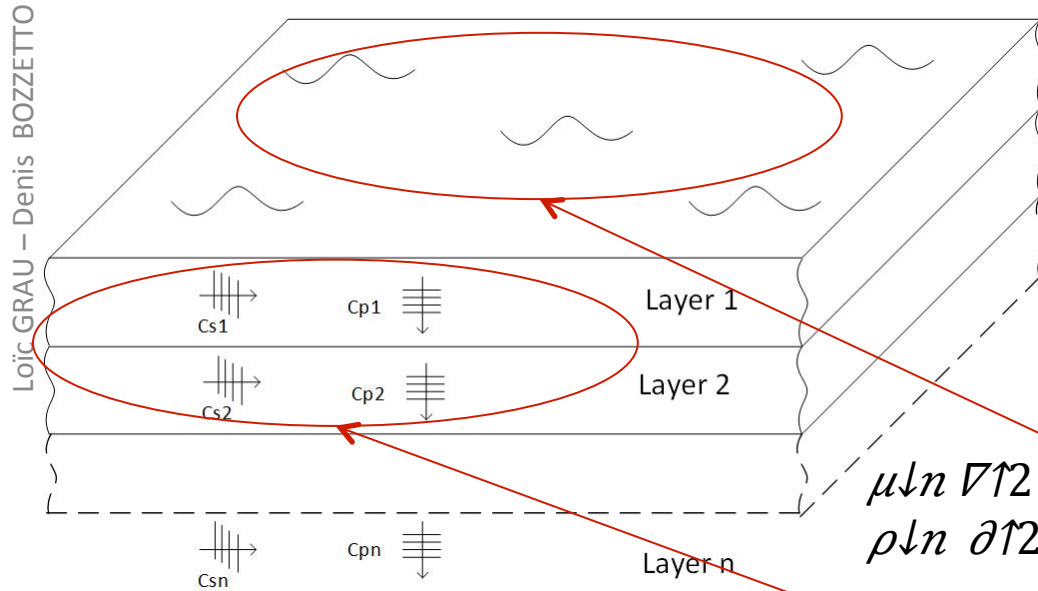




Caractérisation des sols

De façon approximatif, sol \approx succession de strates de milieu continus homogène isotrope

Problématique : Seul les mesures en surface sont possibles



Caractérisation mécanique et géométrique d'un sol: $(c_{pn}, c_{sn}, \rho_n, h_n)$

Equations de Navier:

$$\mu \nabla^2 \underline{u} + (\mu + \lambda) \text{grad}(\text{div}(\underline{u})) = \rho \frac{\partial \underline{u}}{\partial t}$$

Deux catégories d'onde: onde de volume (P et S) et ondes de surface (Rayleigh)



8 et 9 JUIN 2015

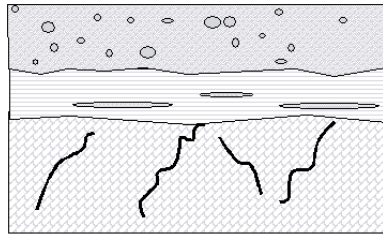
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA

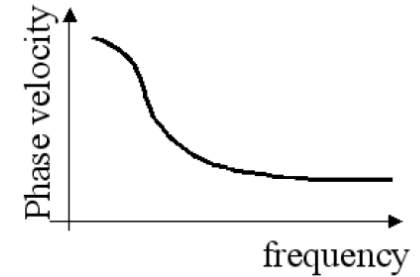
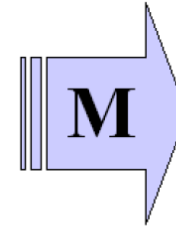


Caractérisation des sols

Problème directe:

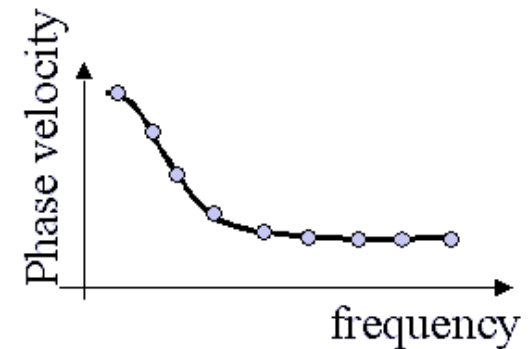


H_1, V_{S1}, v_1, ρ_1
H_2, V_{S2}, v_2, ρ_2
H_3, V_{S3}, v_3, ρ_3



Problème indirecte:

???
???
???

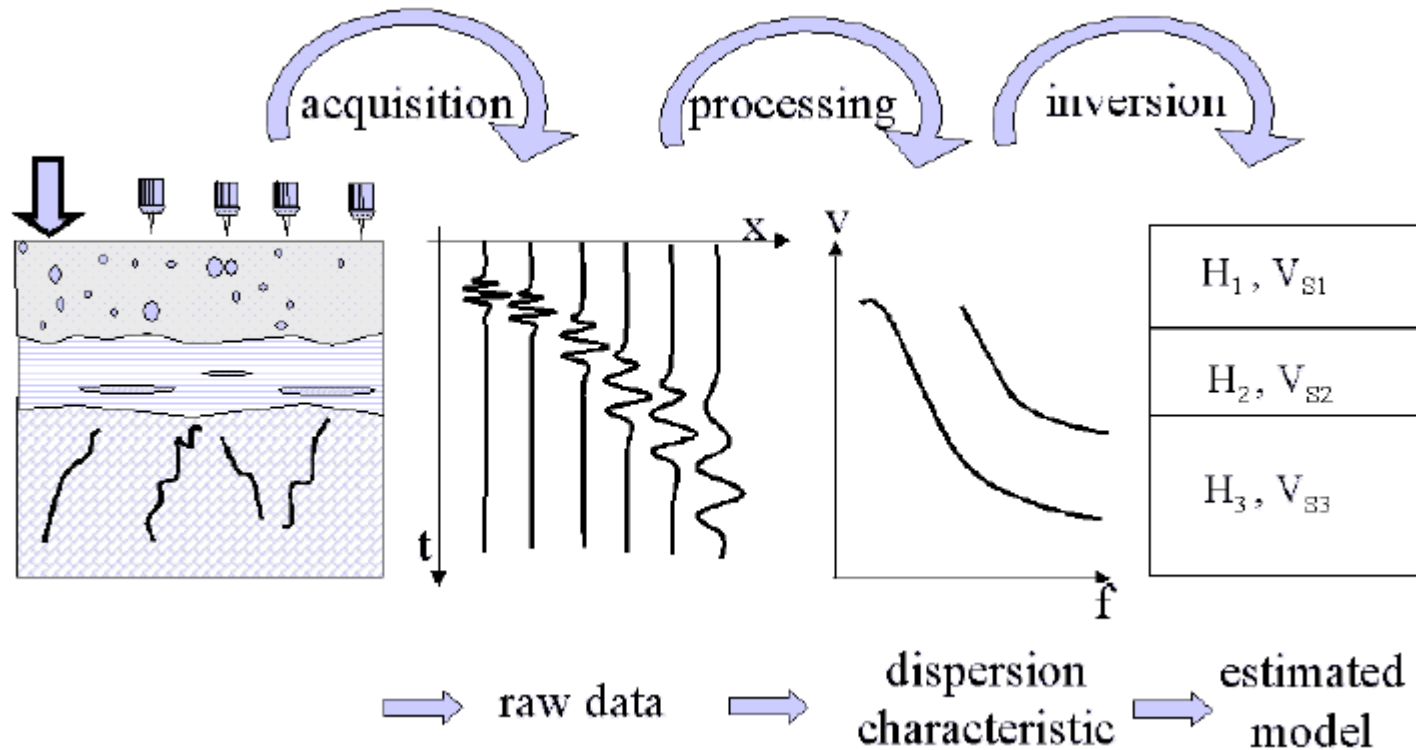


Résolution d'un problème non linéaire aux valeurs propres



Caractérisation des sols

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

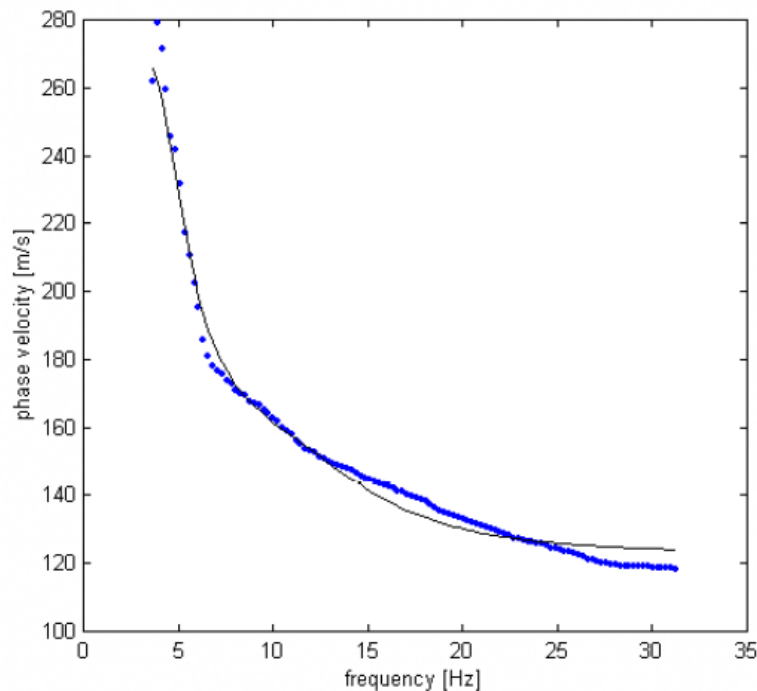
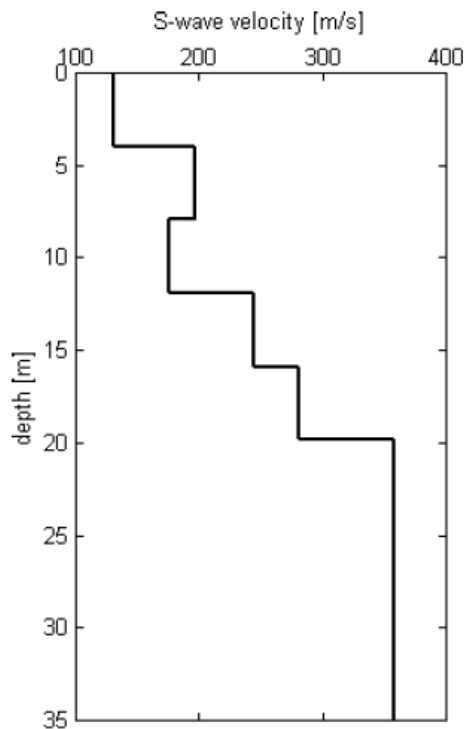
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Caractérisation des sols

Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



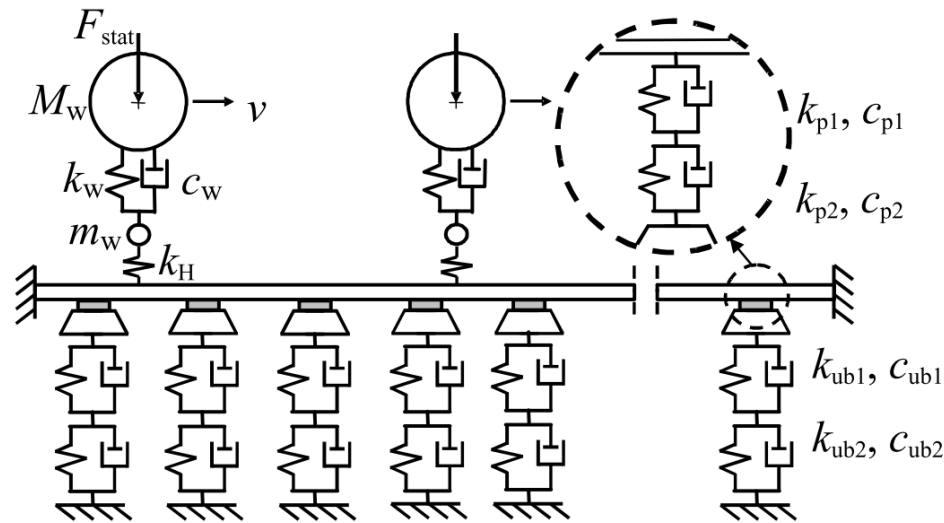
8 et 9 JUN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



- Modèle classiquement utilisé pour modéliser l'interaction sol-structure

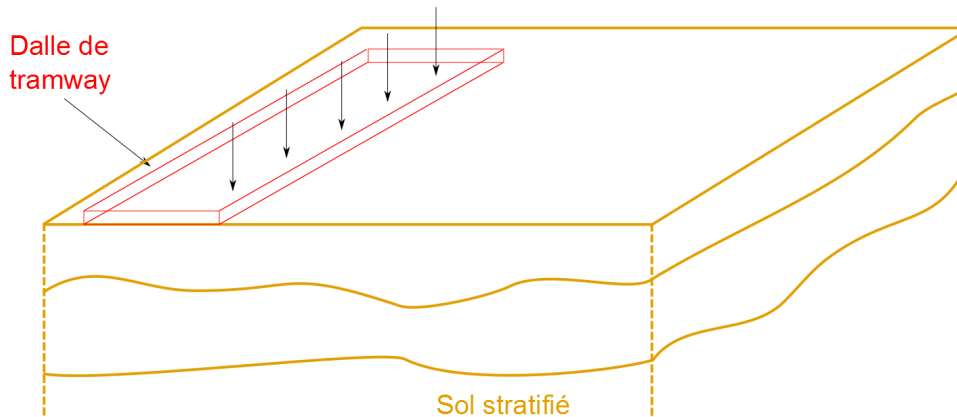




L'outil SIPROVIB 3D

Modèle de simulation semi-analytique sur la plage [10Hz;200Hz]: **SIPROVIB 3D**

$$D \nabla^4 w(x, y, \omega) - \rho h \omega^2 w(x, y, \omega) = F(x, y, \omega) + \sigma p(x, y, \omega)$$



Facteur de premier ordre:

- Surface en contact sol-structure
- Rigidité de la structure relative aux caractéristiques du sol
- Surface en contact de la plaque en flexion avec le sol



8 et 9 JUIN 2015

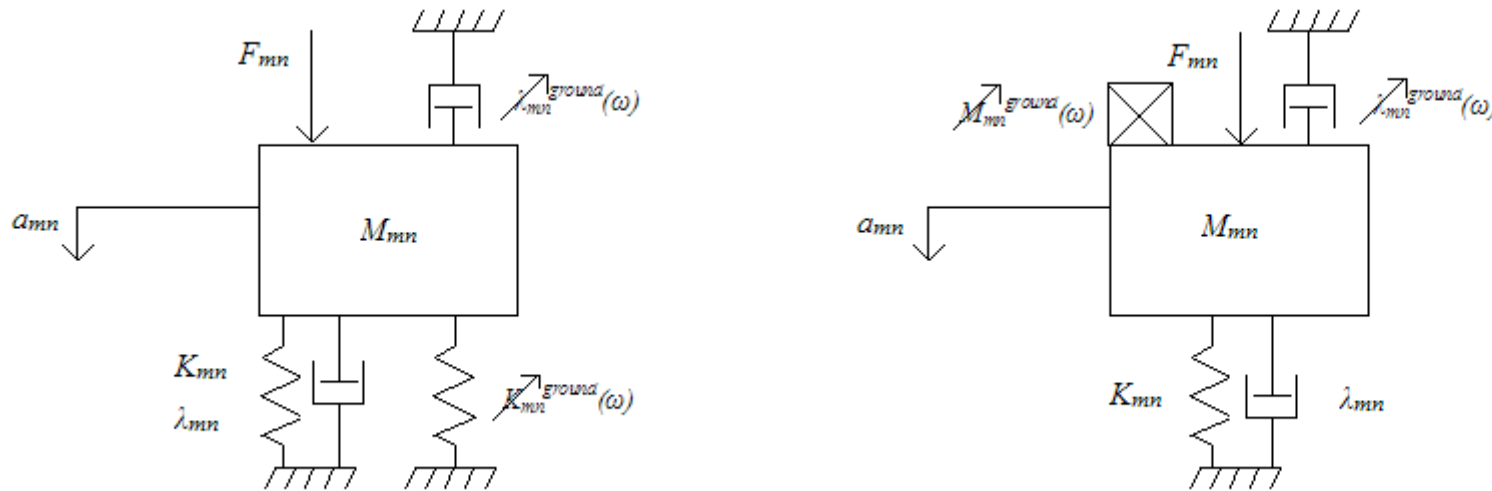
Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Raideur et masse ajoutées

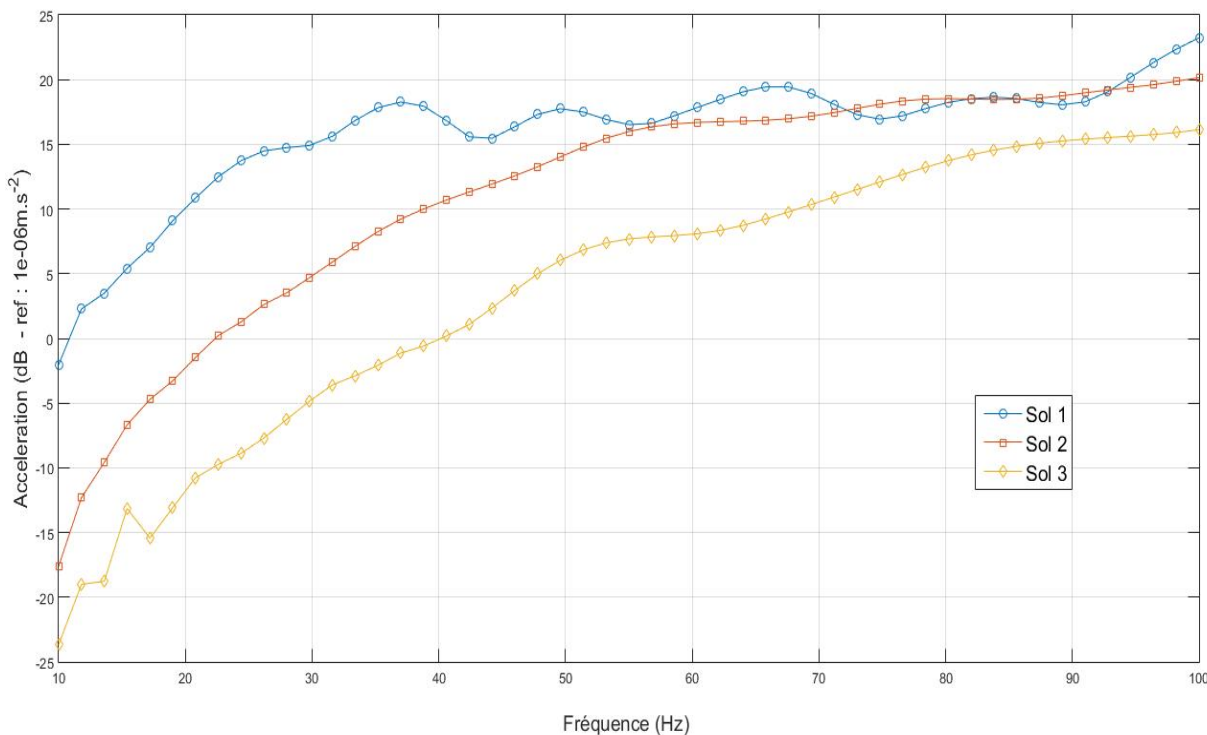
Phénomène de masse ajoutée, raideur ajoutée et amortissement ajoutée à la structure : analogie à l'acoustique





Le sol : solution ou problème !

Influence des caractéristiques de sol le niveau vibratoire à la surface du sol





SIPROVIB : Aide à la conception

ACOUPHEN
Ingénierie en acoustique et vibrations

Pose simple voie ou double voie?



Loïc GRAU – Denis BOZZETTO



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

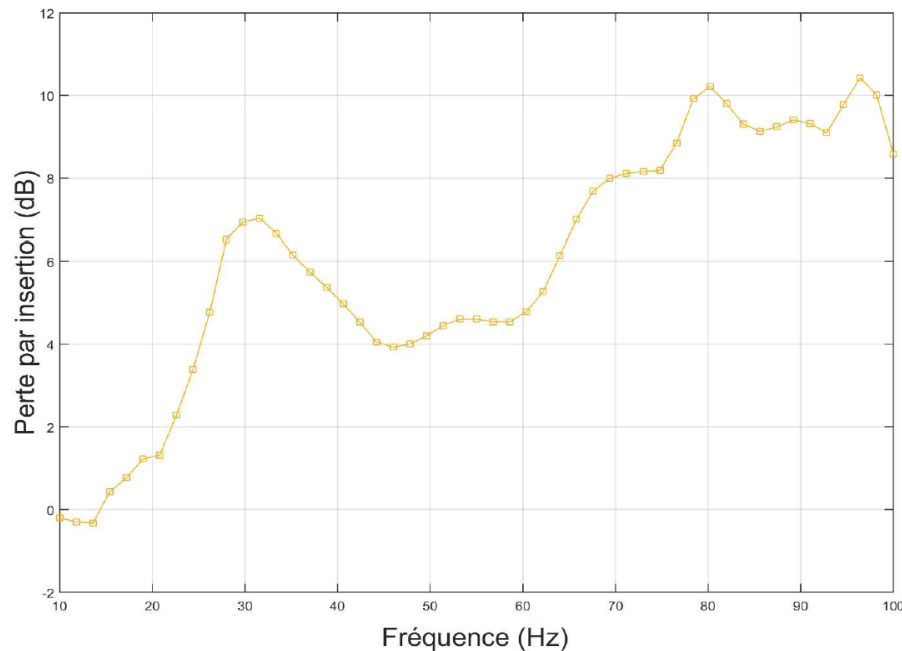
Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA





Aide à la maîtrise d'oeuvre

Effet de Barrière Vibratoire Horizontale de la voie 2 non excitée au passage d'un tramway sur voie 1





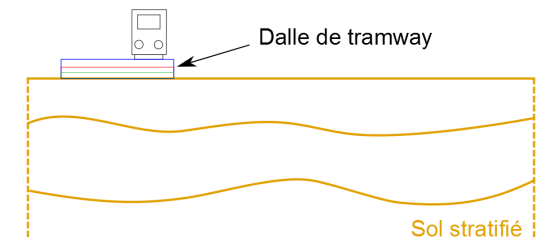
Aide à la maîtrise d'oeuvre

Le modèle permet l'optimisation des dispositifs actuels

SIPROVIB -> Détermination de l'impact vibratoire d'une voie
Optimiser les systèmes de plateforme actuels

Evolution à venir: Prise en compte du résilient (pose -20dB, -10dB).

Un réelle nécessité de connaitre l'interaction sol-structure car le sol change les caractéristiques amortissantes du résilient par couplage.



8 et 9 JUIN 2015

Paris- Auditorium de la Maison des Travaux Publics
3, rue de Berri - Paris 8^{ème}

Organisées par le CIDB, le CINOV-GIAC et la SFA



Conclusion

- Un modèle issu de la R&D d'une PME
- Pratique, simple à utiliser et rapide pour la prévision des impacts vibratoires
- Un outil d'aide à la conception de plateforme de tramway
- Des perspectives intéressantes tournées vers l'innovation avec la possibilité de modéliser des systèmes intégrant des résilients adaptés au couplage sol/structure et donc de prévoir une efficacité avec les conditions du site
 - Merci de votre attention

