

# LES VIBRATIONS DANS LE SOL CAUSEES PAR LE TRAFIC FERROVIAIRE DE SURFACE

A. GUERRERO & E. BONGINI | Colloque CIDB Vibrations dans les bâtiments | 22 mars 2011



*DIRECTION DE L'INNOVATION  
ET DE LA RECHERCHE*



# Sommaire

*Que mesure-t-on ?*

**Etat des lieux**

*Comment expliquer ces niveaux vibratoires ?*

**Approche phénoménologique - modèles analytiques**

Phénomènes en jeu

Paramètres influents

**Modélisations numériques**

**Caractérisation expérimentale des paramètres**

**Application des modèles numériques : études paramétriques**

*Comment agir ?*

**Solutions existantes** : principes et degré d'efficacité



## Etat des lieux *que mesure-t-on ?*

## Mesures vibratoires à proximité des voies

### Les vibrations induites par le trafic ferroviaire, dans le champ proche des voies, induisent :

- une gêne vibratoire chez le riverains : les tableaux tremblent, le sol vibre...
- une gêne acoustique chez les riverains : les structures de l'immeuble (murs) entrent en vibrations et rayonnent du bruit (appelé bruit solidien)
- Des dommages aux bâtiments (des premiers cas de légères fissurations ont été constatées en région de bordeaux)

### Appréhender les vibrations :

1<sup>ère</sup> étape : **les mesurer** pour évaluer leur impact, à l'aide d'accéléromètres ou de géophones

2<sup>e</sup> étape : **analyser** les mesures par rapport au **ressenti humain** -> normes ISO 2631, ou DIN4150



# Mesures au passage Normes : définition

## Calcul des indicateurs

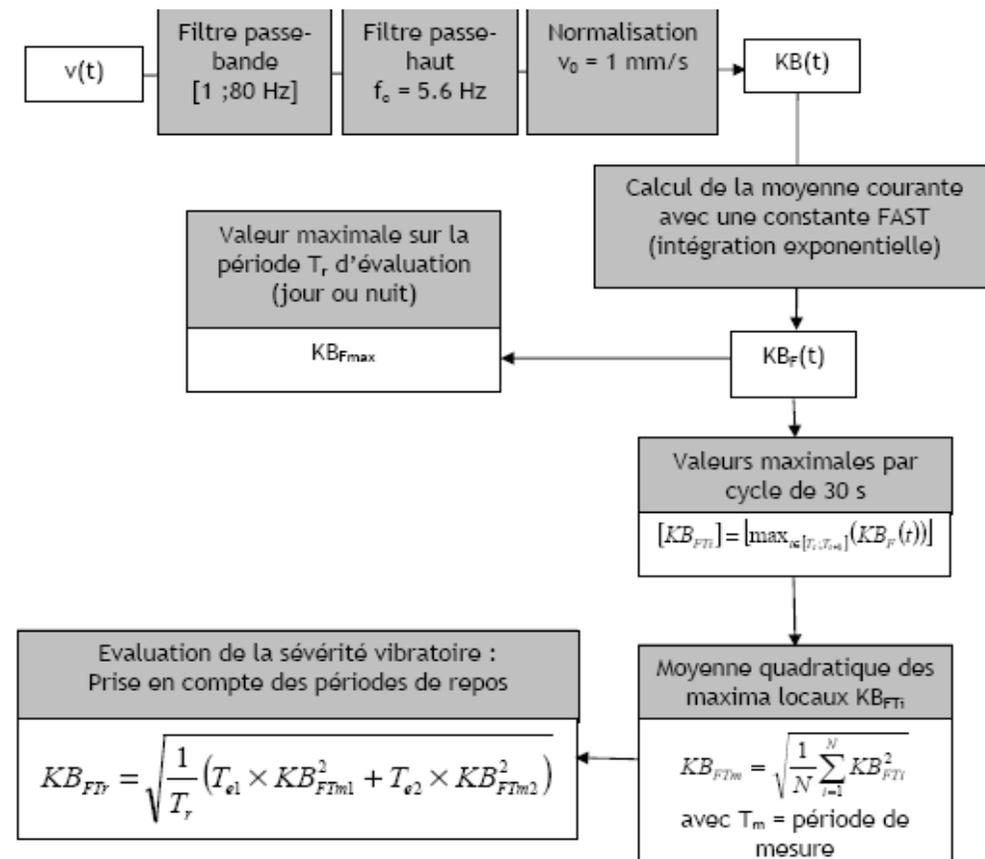
- Accélération rms de la norme ISO 2631

- Où 
$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt}$$

$$(a_w)_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt}$$

## Calcul du KB de la norme DIN 4150

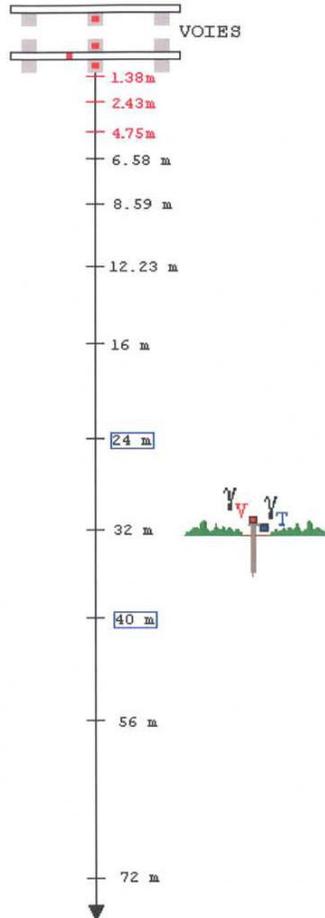
Type	Description de la zone	Valeurs pour un cycle de jour		
		Au	Ao	Ar
1	Zone industrielle	0.4	6	0.2
2	Zone commerciale prédominante	0.3	6	0.15
3	Zone dans prédominance ni commerciale ni résidentielle	0.2	5	0.1
4	Zone majoritairement résidentielle	0.15	3	0.07
5	Zone protégée (hôpitaux, établissements sanitaires)	0.1	3	0.05



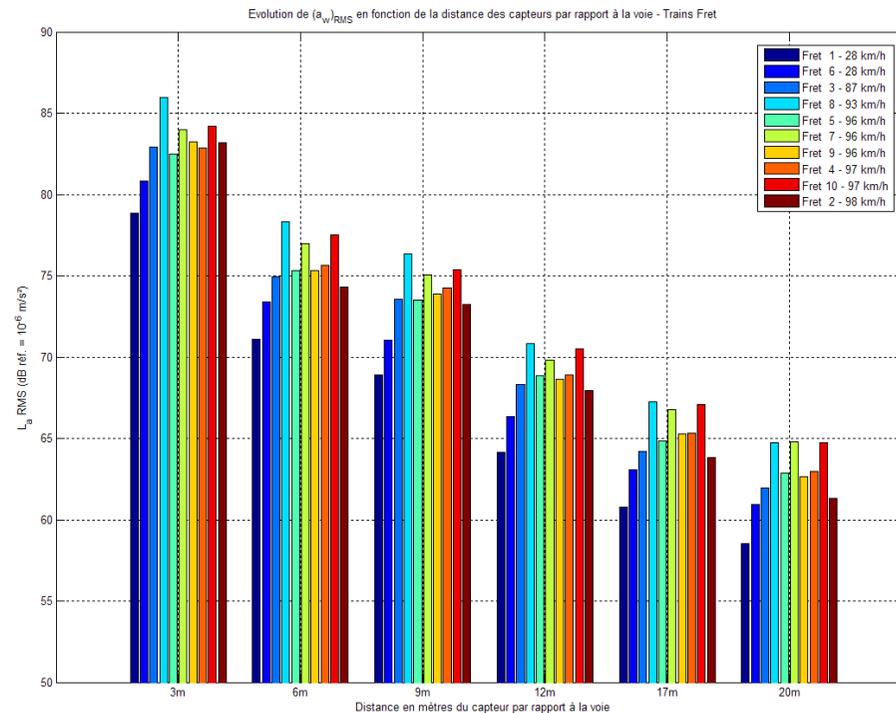
# Mesures vibratoires à proximité des voies

**Mesures "préventives " en champ libre** : construction d'une ligne nouvelle ou d'un bâtiment à côté d'une voie existante

Mesures accélérométriques, champ libre par le biais de piquets cruciformes plantés dans le sol



Pas de normes spécifiques champ libre : application des normes d'analyse du bâtiment (DIN4150 ou ISO 2631) -> niveaux analysés indicatifs mais non représentatifs

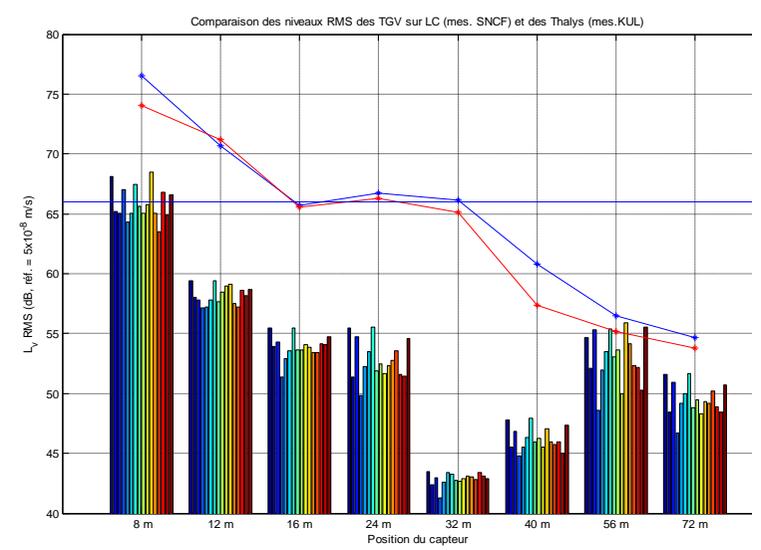


# Mesures vibratoires à proximité des voies

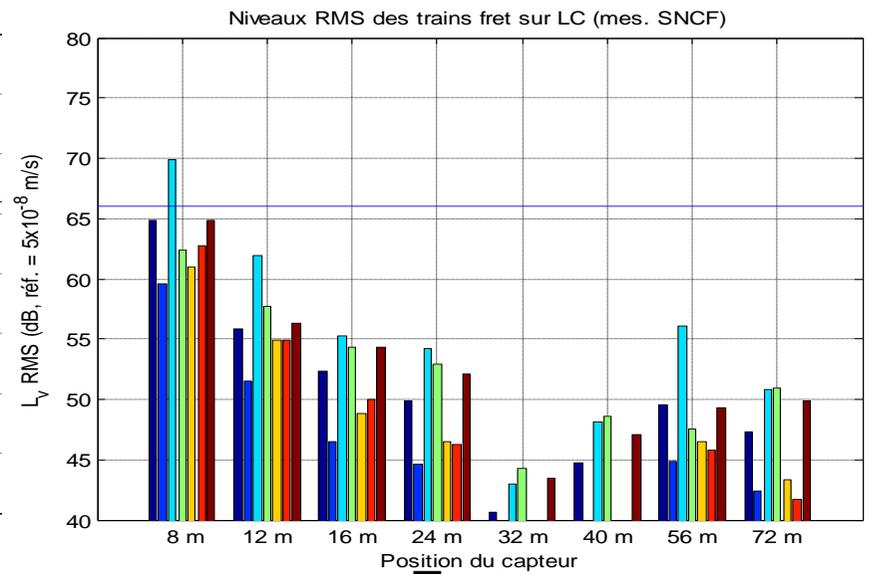
## Champ libre

Mesures au passage caractérisées selon la norme ISO 2631 :

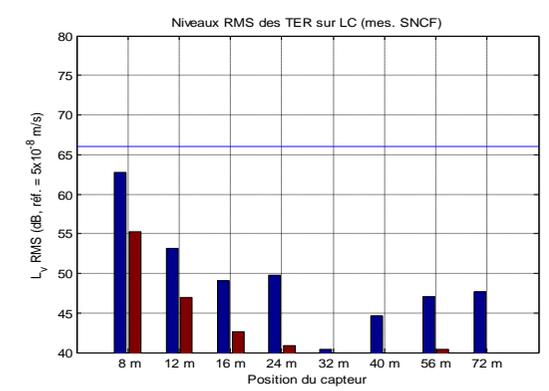
- Sur les lignes classiques et grande vitesse : les niveaux obtenus sont très faibles, seuls les niveaux à 8m de la voie et uniquement pour certains trains dépassent le seuil de sensibilité du corps humain (fixé à 66dBv)



TGV



Fret

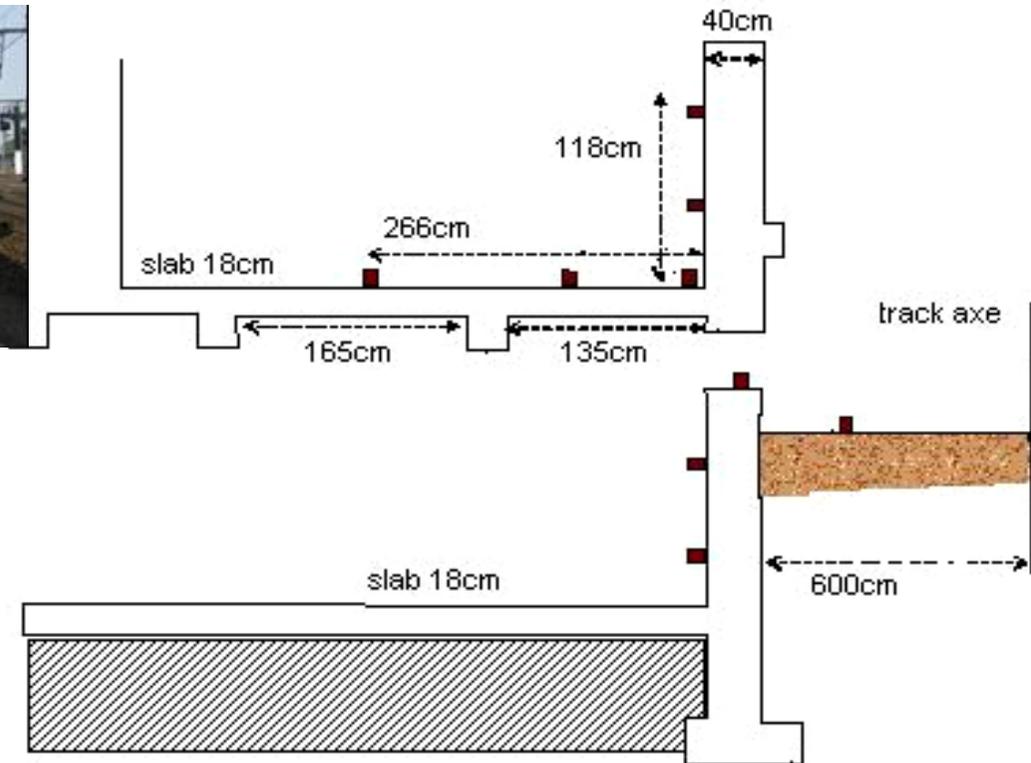
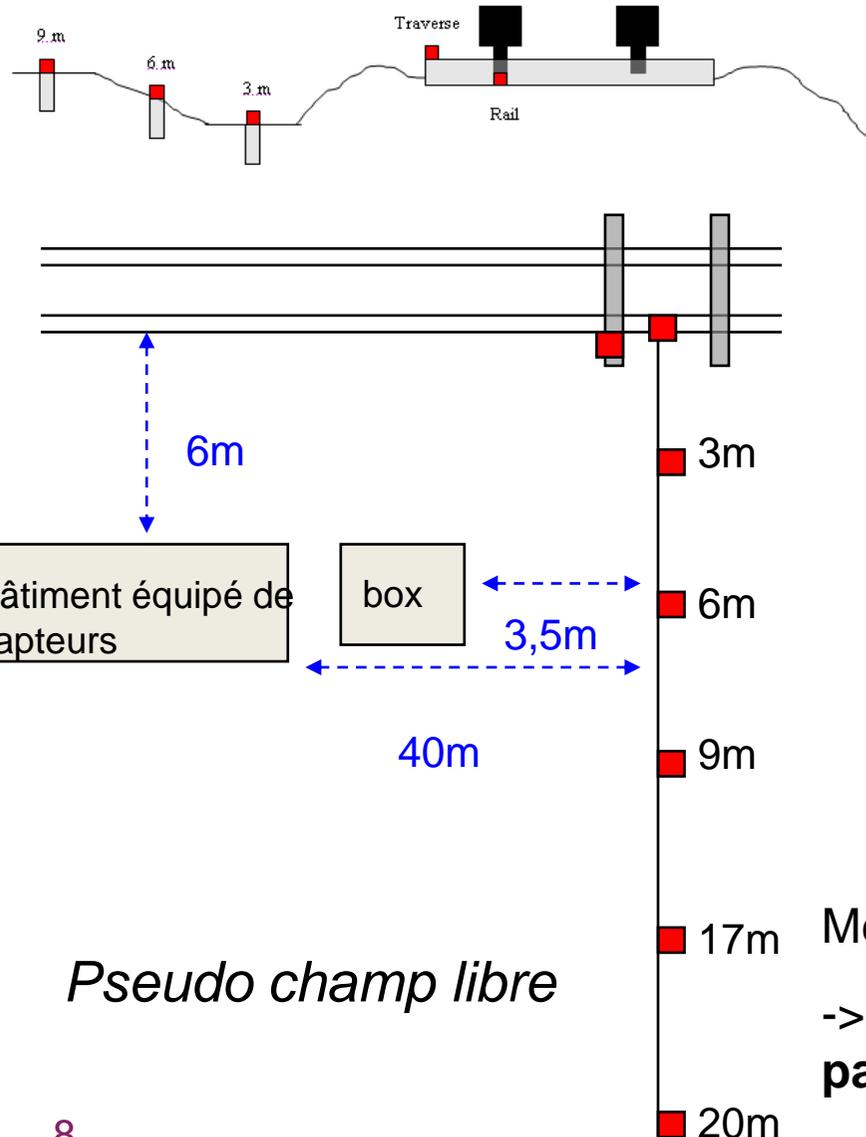


TER

# Mesures vibratoires à proximité des voies

## En bâtiment et en champ libre

Article IWRN 2010



*Dans le bâtiment*

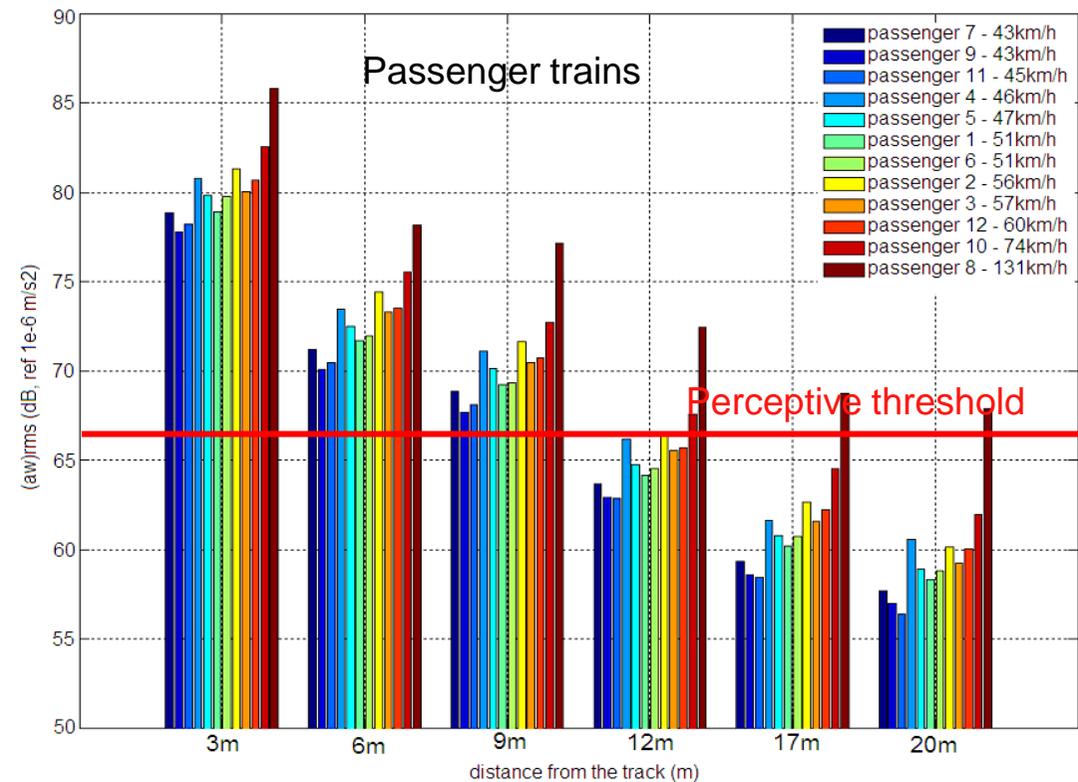
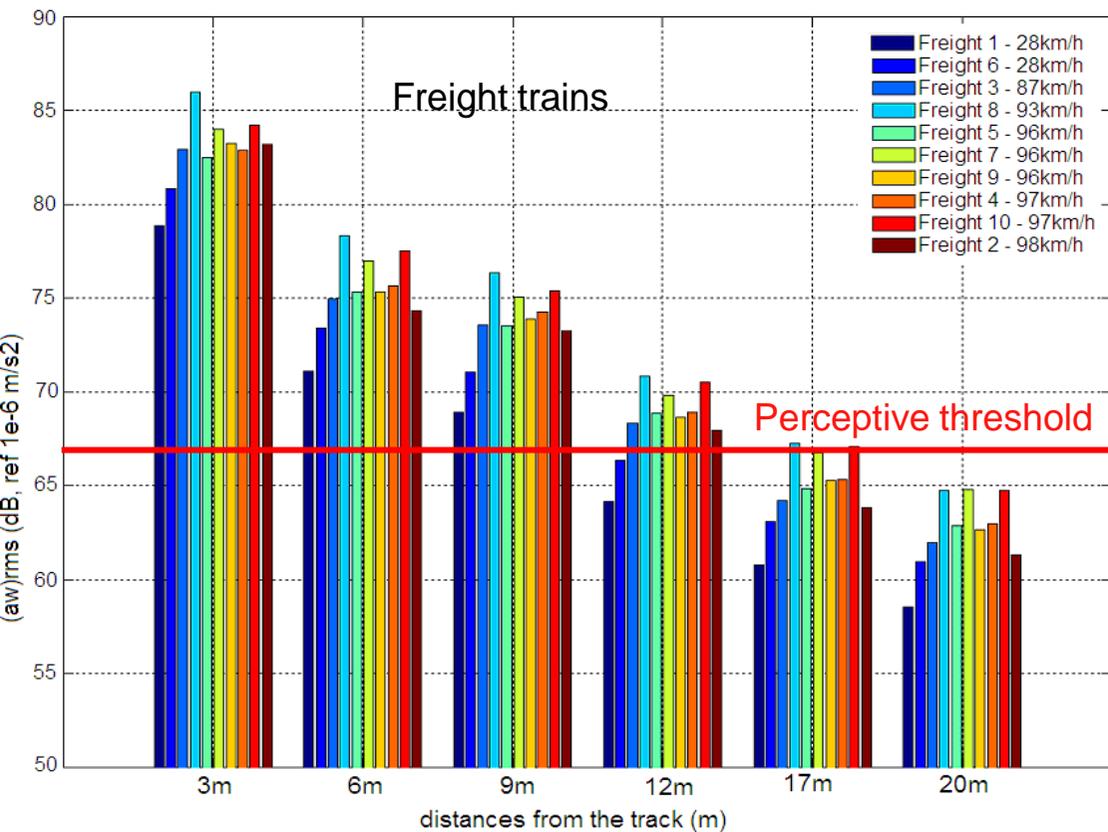
Mesures réalisées près d'une gare:

-> les trains passagers freinaient alors que les Fret passaient en pleine vitesse

# Mesures vibratoires à proximité des voies

## VIBSOLFRET: Champ libre

Indicateur ISO 2631 :  $(aw)_{rms}$  pour les trafic passager et Fret



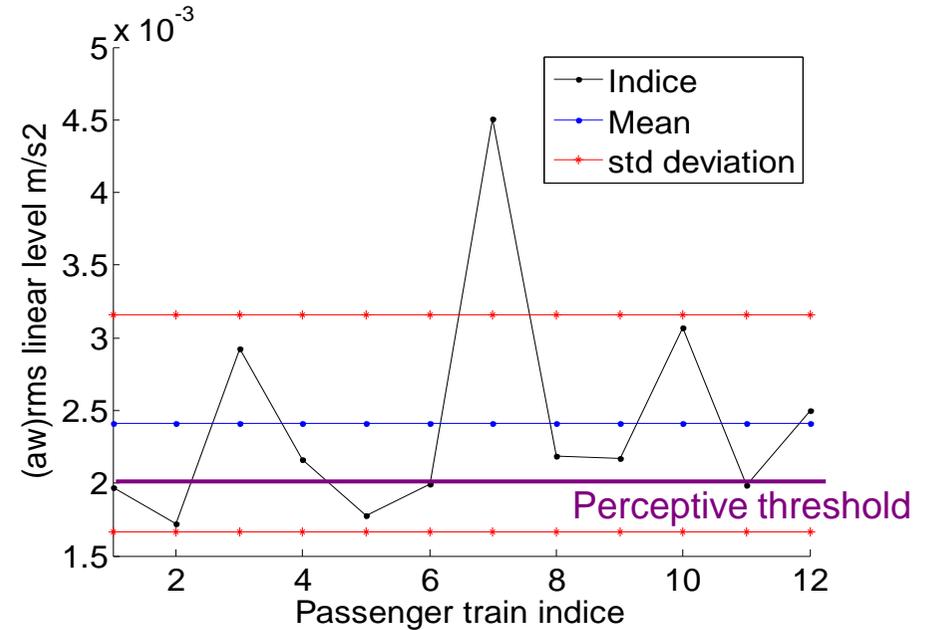
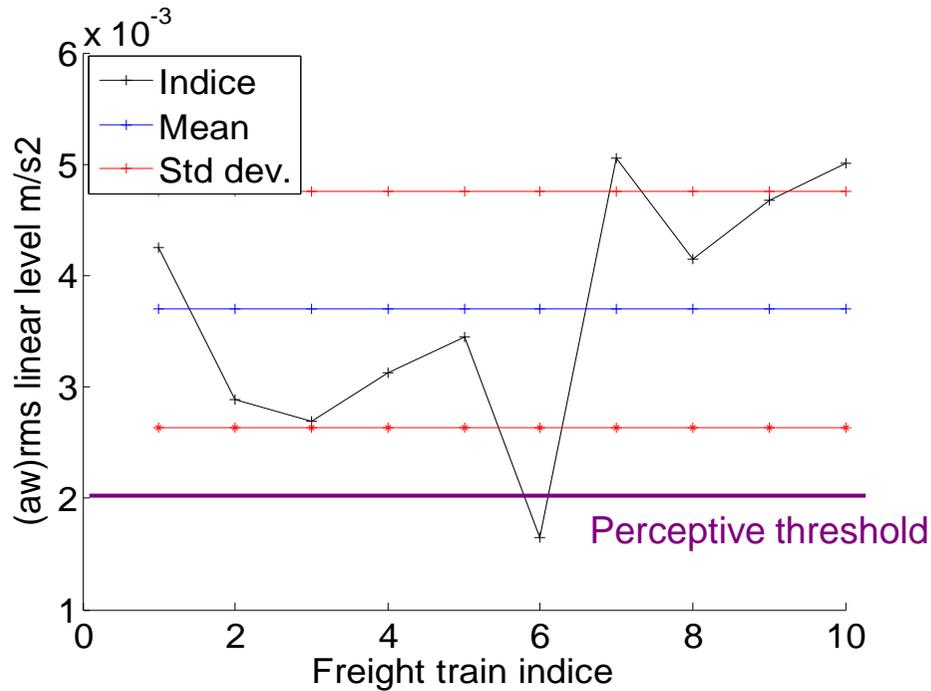
Niveaux plus élevés pour le trafic Fret

Le convoi Fret le plus lent implique des niveaux vibratoires du même ordre de grandeur que les trains passagers. Le train passagers le plus rapide implique des niveaux vibratoires de même ordre de grandeur que les trains Fret.

# Mesures vibratoires à proximité des voies

## VIBSOLFRET: en bâtiment

Indicateur ISO 2631 :  $(aw)_{rms}$  pour des trafics Fret et passager, en milieu de dalle du RdC



Niveaux plus élevés pour le trafic Fret: !!! Les vitesse des trains passagers sont particulièrement basses

Le convoi Fret le plus lent implique des niveaux vibratoires du même ordre de grandeur que les trains passagers.  
Le train passagers le plus rapide implique des niveaux vibratoires de même ordre de grandeur que les trains Fret.

# Mesures vibratoires à proximité des voies

## VIBSOLFRET: en bâtiment vs en champ libre

Indicateur DIN 4150-2 :  $KB_F$  pour le trafic passager et Fret

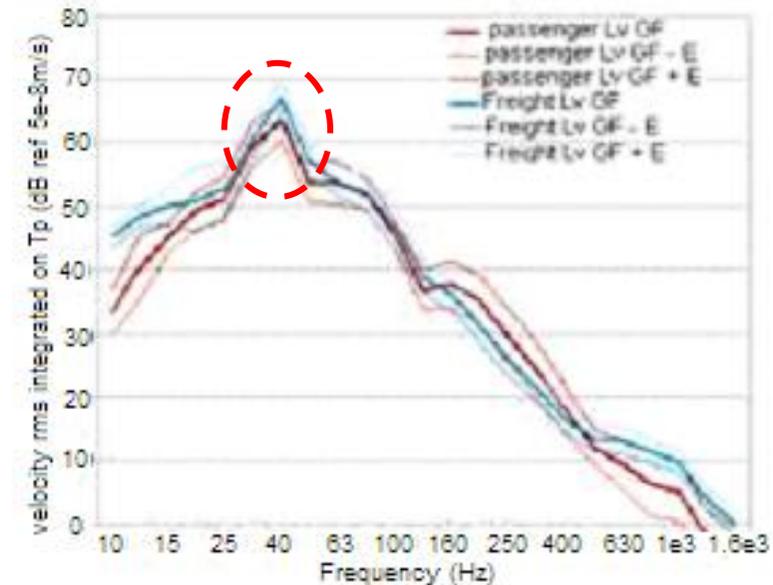
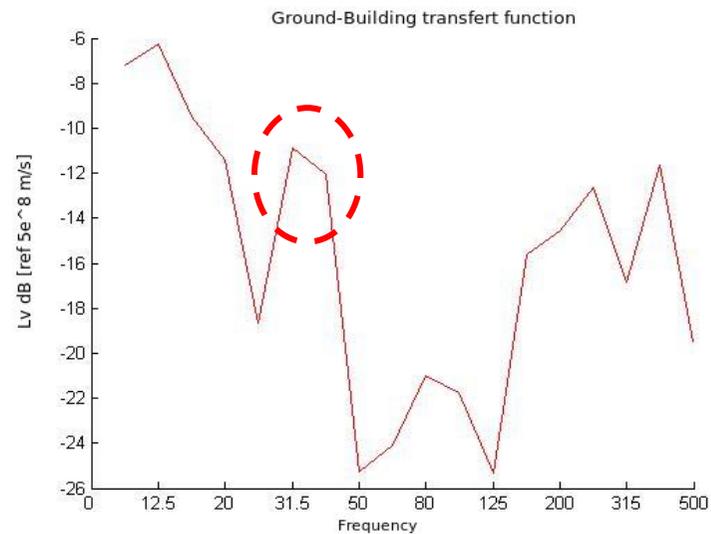
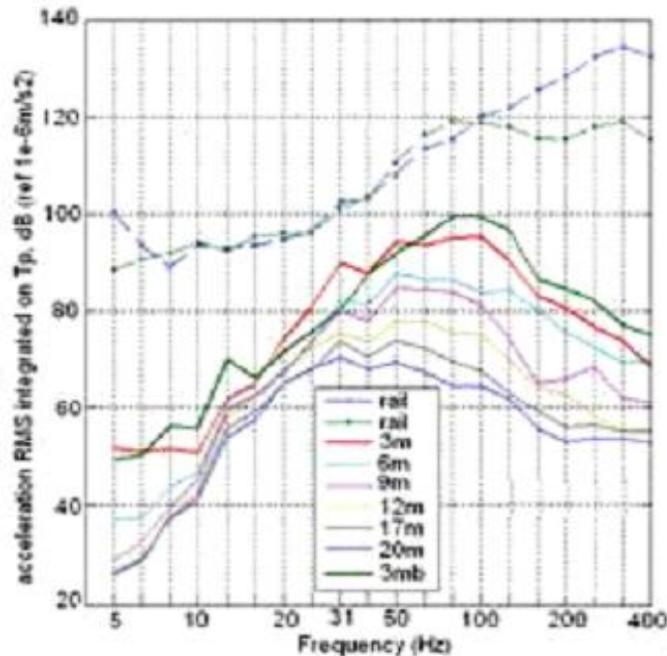
Position du capteur	$KB_{FTr}$	Type de zones vérifiant le critère $KB_{FTr} < Ar$	Position du capteur	$KB_{FTr}$	Type de zones vérifiant le critère $KB_{FTr} < Ar$
<b>Mesures en champ libre</b>			<b>Mesures au droit et dans le bâtiment</b>		
3 m	0.14	1, 2	3 m CSTB	0.13	1, 2
6 m	0.06	1, 2, 3, 4	Lv Xmur2	0.02	1, 2, 3, 4, 5
9 m	0.05	1, 2, 3, 4	Lv Xmur1	0.03	1, 2, 3, 4, 5
12 m	0.03	1, 2, 3, 4, 5	Lv XSS1	0.05	1, 2, 3, 4
17 m	0.01	1, 2, 3, 4, 5	Lv XSS2	0.04	1, 2, 3, 4, 5
20 m	0.01	1, 2, 3, 4, 5	Lv ZVasista	0.01	1, 2, 3, 4, 5
			Lv RDC1	0.07	1, 2, 3
			Lv RDC2	0.04	1, 2, 3, 4, 5
			Lv RDC	0.03	1, 2, 3, 4, 5

2d critère de validation

Les mesures en bâtiment sont plus discriminant que les mesures en champ libre

# Mesures vibratoires à proximité des voies

## VIBSOLFRET: en bâtiment / analyse spectrale



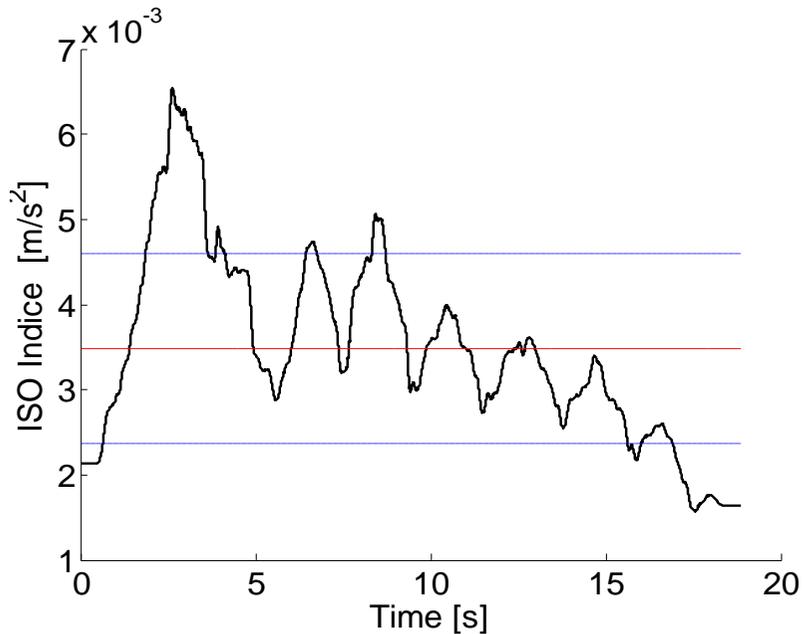
Les contributions spectrales dans le bâtiment sont principalement pilotées par le comportement modal de la structure du bâtiment :

- Dans les basses fréquences, aucune énergie n'est transmise de la voie
- Dans les moyennes fréquences, entre 15Hz et 100Hz, le niveau maximal correspond à une résonance de la dalle du RdC du bâtiment, autour de 31.5Hz
- Dans les hautes fréquences, même si il demeure de l'énergie et des résonances, les niveaux sont bas car les modes en question ne correspondent pas à un déplacement du centre de la dalle (mais cela peut causer du bruit solidien)

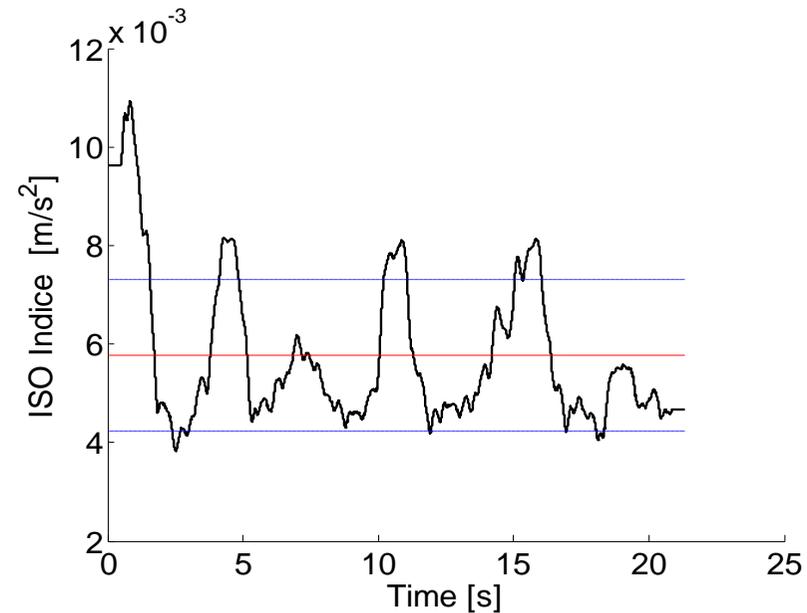
# Mesures vibratoires à proximité des voies

## VIBSOLFRET: signaux temporels

A la recherche du facteur de différenciation entre Fret et passagers...  
(capteur au centre de la dalle du 1er étage du bâtiment)



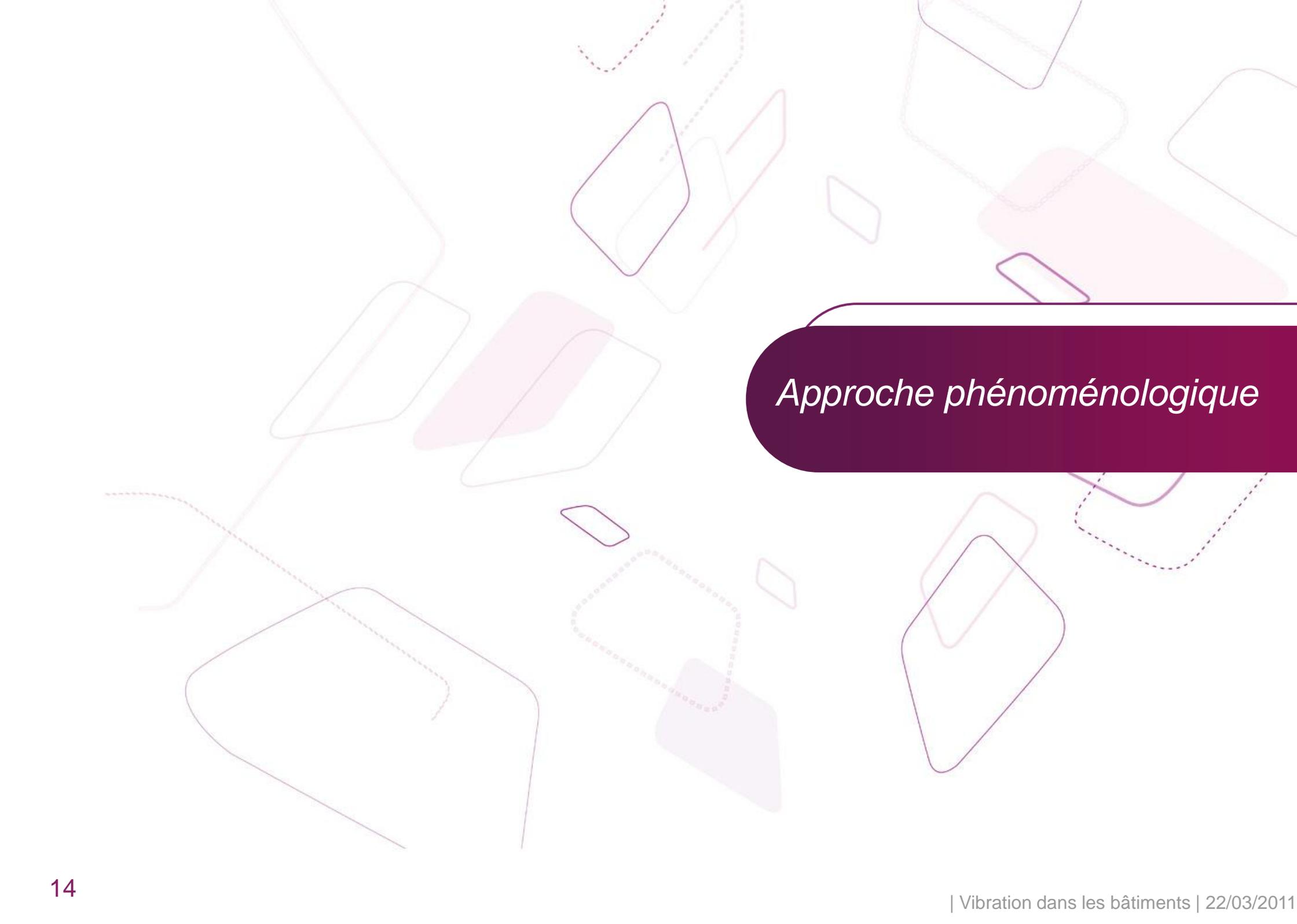
Passenger RS at (3)



Freight RS at (2)

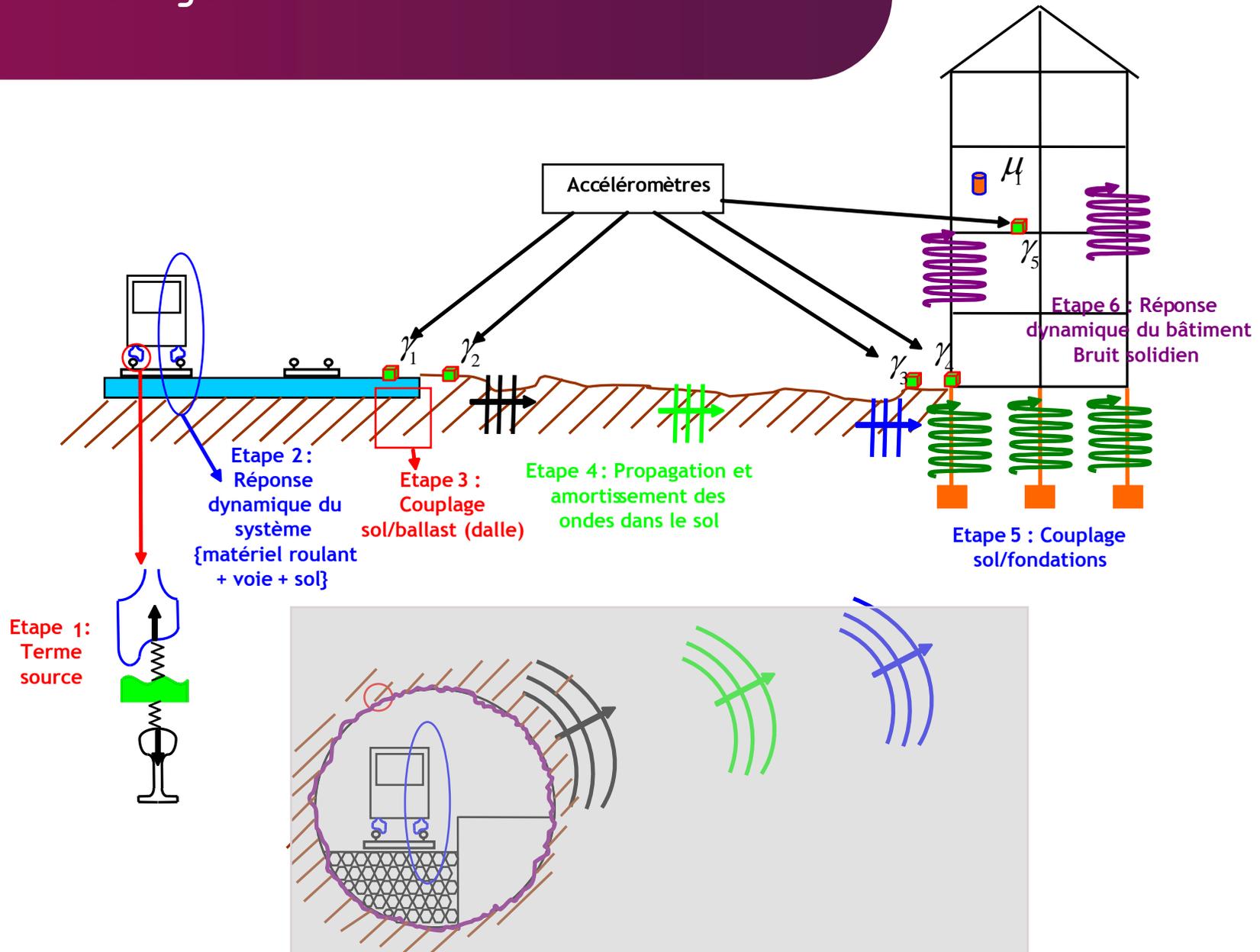
Le signal temporel induit par le trafic Fret présente des occurrences de très forts niveaux =, comparé au signal temporel passager

Temps d'intégration de 1s



## *Approche phénoménologique*

# Phénomènes en jeu



# Phénomènes en jeu

## Mécanismes de génération des vibrations

Combinaison de 2 effets :

-Chargement **quasi-statique** : causé par le déplacement d'une charge sur le  $\frac{1}{2}$  espace infini que représente le système voie/sol ; cet effort excite le système {voie + véhicule} (étape 2) principalement dans les très basses fréquences **entre 1 et 10/15Hz**.

-Chargement **dynamique** : lié aux irrégularités des surfaces de contact de la roue et du rail, aussi appelées rugosités : quelques millimètres d'amplitude pour des longueurs d'onde de quelques centimètres à quelques mètres, selon la vitesse de passage du train. Cet effort excite le système {voie + véhicule} (étape 2) aux moyennes fréquences, entre **15Hz et 200Hz**.

+ les efforts au passage de points singuliers comme des aiguillages ou des joints de rail -> force transmise au sol de type **choc** impactant (excitant une très large gamme fréquentielle).

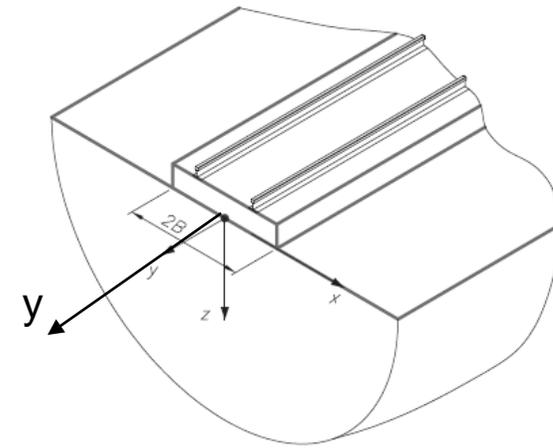
Ces efforts, générés au contact roue/rail, se transmettent via l'interface entre la voie et le sol (étape 3), créant des ondes dans le sol environnant.





## Approche numérique

## Approche numérique : du 3D au 2,5D



La résolution du système peut se faire :

- Pour tout l'espace en **3D** : **très coûteux** en temps de calcul
- Pour une "tranche" transversale de la voie, donc uniquement pour un **espace 2D**

*Comment relier la tranche 2D à l'espace 3D ?*

La voie est un système **périodique dans l'espace**, de période 0,6m correspondant à une travée.

Les grandeurs caractéristiques (ici les déplacements) d'un système périodique sont décomposables sur des fonctions périodiques comme les fonctions sinusoïdales :

$$u(x, y, z, t) = \sum u_i \sin(k_i y + \varphi_i)$$

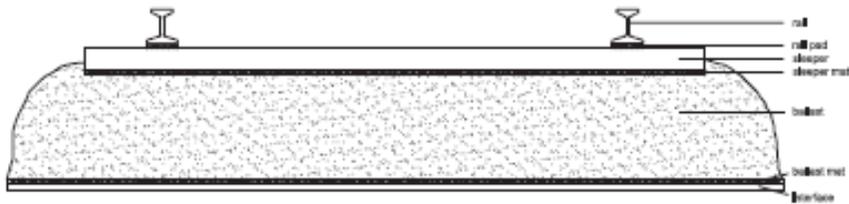
-> transformée de Fourier dans l'espace, des déplacements :  $\tilde{u}(k_y, t) = \int_{y=-\infty}^{+\infty} u(x, y, z, t) e^{ik_y y} dy$

**u(x,y,z,t) équivaut à la somme des fonctions  $\tilde{u}(k_y, t)$  sur tous les  $k_y$**

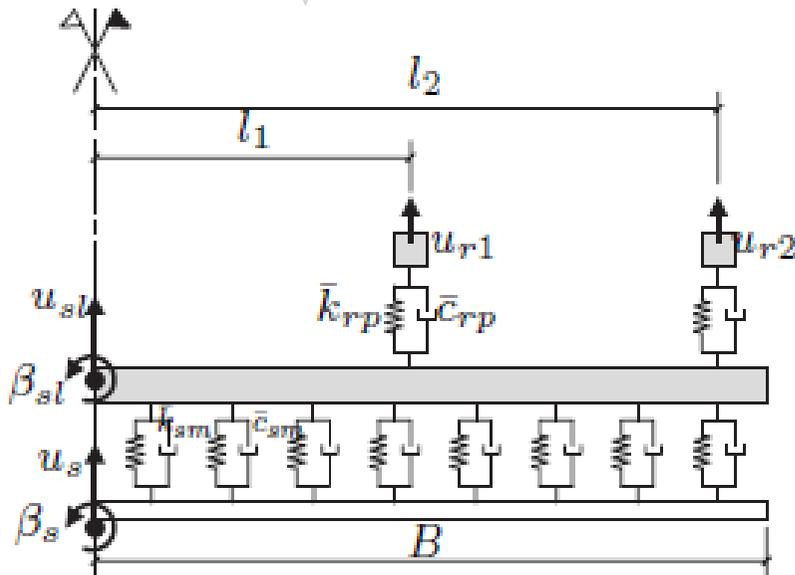
Résolution pour chaque  $k_y$  du problème 2D  $u(x, z, t \rightarrow \omega)$  dans la tranche de la voie. Une fois l'ensemble des fonctions  $\tilde{u}(k_y, t)$  obtenues, il suffit de procéder à une somme (transformée de Fourier inverse) pour obtenir  $u(x, y, z, t)$

# Approche numérique : interaction dynamique voie/sol (2D)

La voie

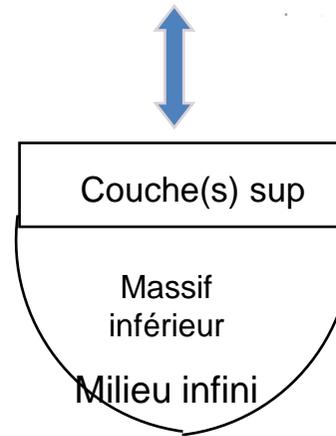
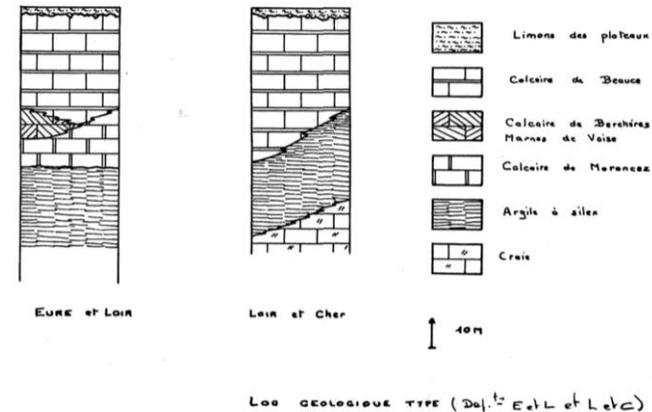


La voie est vue comme un système multicouches souples



Ensemble de systèmes masses ressorts élémentaires

Le sol



Le sol est considéré comme un milieu infini, stratifié, dont l'interface avec la voie est en général considérée comme rigide.

Approche BEM (éléments de frontière) pour obtenir les déplacements dans le milieu semi-infini en fonction des déplacements à l'interface :

-> obtention de la matrice de raideur du sol

## Approche numérique : calcul de l'effort voie/véhicule

L'excitation ou **effort transmis au rail** dépend de :

- La rugosité des 2 sous-systèmes

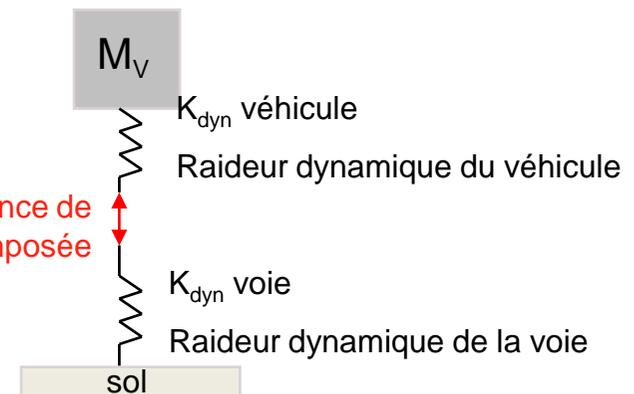
Mais aussi :

Puisque les deux systèmes sont "souples" (non rigides), l'effort entre les 2 dépend de leur **souplesse** (inverse de la raideur dynamique)

- des paramètres dynamiques du véhicule
- Des paramètres dynamiques de la voie

Effort d'interaction dépendant  
de la rugosité et de  $K_{dyn}$

Rugosité : différence de  
déplacements imposée



Il faut calculer les matrices de souplesse des 2 sous-structures :

- voie
- et véhicule qui, comme la voie, est considéré comme un système complexe masses/ressorts -> matrice de raideur dynamique du véhicule

Le calcul de l'effort est d'autant plus complexe car la **charge est en mouvement...**

## Approche numérique

### **Paramètres nécessaires en entrée des modèles :**

*Pour le calcul des matrices de raideur dynamique : il faut les caractéristiques dynamiques des sous structures*

Pour le rail : son module d'Young, sa densité, son module quadratique...

Pour le reste de la voie : les raideurs et amortissements équivalents (modèles masses/ressorts/amortissements) des semelles et ballast

Pour le sol :

- les vitesses des ondes P et S des différentes stratifications et leurs densités
- Ou/et les modules d'Young, densités, et modules de cisaillement des différentes stratifications

Pour le véhicule :

- Les raideurs et amortissements des suspensions primaires et secondaires
- Les masses suspendues et non-suspendues

Pour f :

- La rugosité

## Identification des paramètres

### Les paramètres de sol : méthode MASW

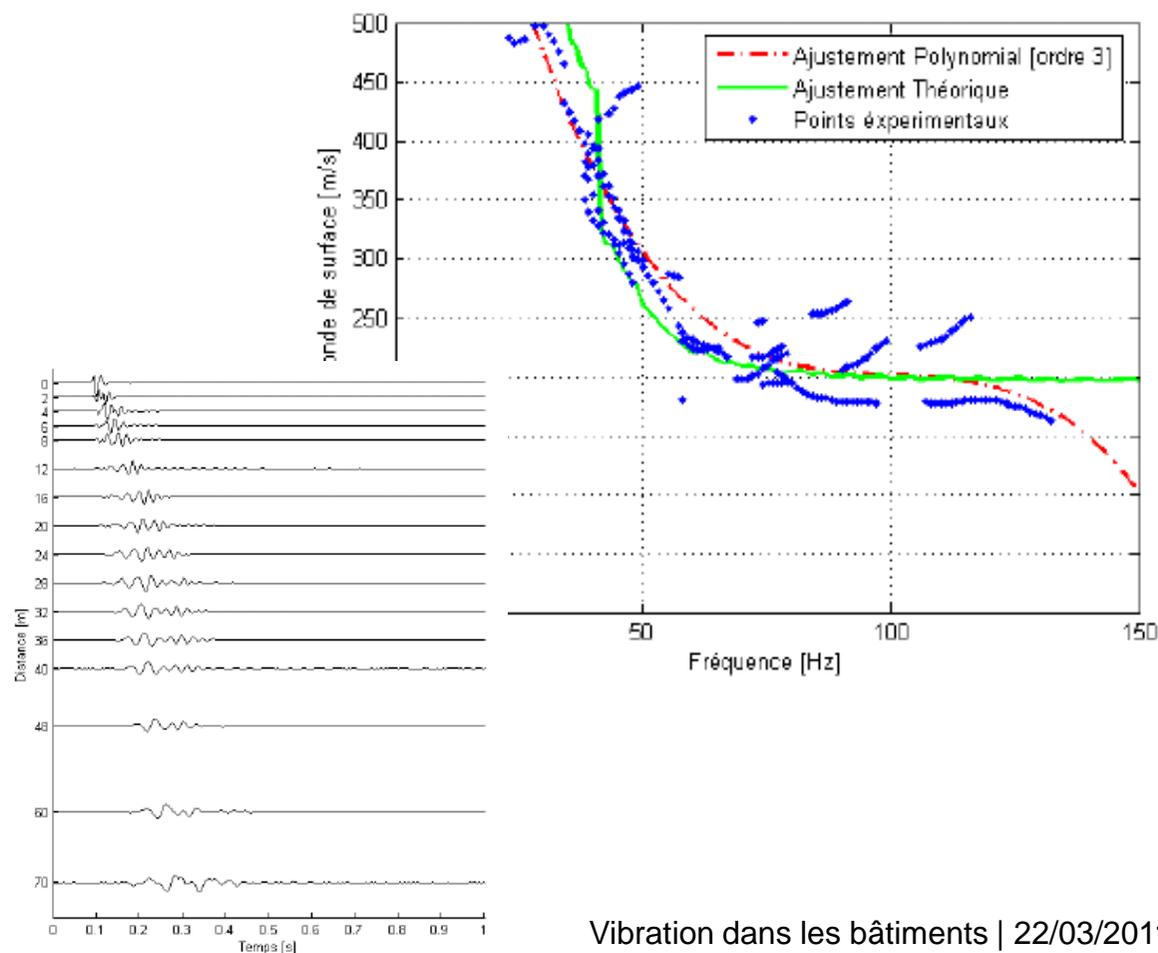
Principes :

- Exciter le sol en un point donné
- Mesurer les accélérations sur une ligne d'accéléromètres



### Analyse des mesures :

- Etudier la vitesse de propagation des ondes de surface (onde de Rayleigh) dont on sait qu'elle dépend de la stratification du sol
- Optimiser les paramètres d'un modèle de sol pour s'ajuster à la **courbe de dispersion** de la vitesse des ondes de surface (grâce au modèle numérique)



# Identification des paramètres

## Les paramètres de voie

1- connaissances préalables issus des essais mécaniques et acoustiques (valeurs moyennes)

Track					
Element considered	physical quantity	symbol	unit	HS line	Classic line
general	Sleeper spacing	d	m	0,6	0,6
rail	mass of rail per unit length (2rails)	$\rho \cdot A_r$	kg/m	60,34x2	60,34x2
	Bending stiffness of rail	E. I <sub>r</sub>	kg.m <sup>2</sup>	6,42E+06	6,42E+06
	loss factor of the rail	$\eta_{Rr}$		5,00E-02	5,00E-02
	Positions of left and right rail	$l_1, l_2$			
Rail pads	Rail pad stiffness	k <sub>rp</sub>	N/m	from 1.e8 at 10Hz to 1,6e8 at 100Hz	from 1.e8 at 10Hz to 1,6e8 at 100Hz
	Rail pad loss factor	$\eta_{rp}$		odg=0,23	odg=0,23
Sleepers	Mass of the sleepers	m <sub>s</sub>	kg	250	250
	Area between one sleeper and the ballast	$l_s \times L_s$	m <sup>2</sup>	0,2436	0,2436
Ballast	Mass of ballast per unit length	m <sub>B</sub>	kg/m		
	ballast stiffness	k <sub>B</sub>	N/m	odg=1,5e8	odg=1,5e8
	Loss factor of ballast	$\eta_{aB}$		odg=1	odg=1
Interface	contact width of railway and ground	$l_{SL}$			

## Identification des paramètres

### **La source d'excitation : la mesure de la rugosité**

Les irrégularités du rail entre 1mm et 3m sont mesurées à l'aide d'un trolley

-> même système de mesure que pour le bruit de roulement

Dans la procédure de traitement pour le bruit de roulement:  
élimination des pics et trous (système linéaire)

-> procédure non adaptée pour les vibrations dans le sol

-> à redéfinir dans les normes de mesurage !

Au-delà de 3m (longueurs d'onde ayant un impact pour les passages à grande vitesse), pas de système de mesure fiable

-> à définir dans les normes de mesurage !



## Application de l'approche numérique

### Etudes paramétriques

Des études paramétriques menées à l'aide des outils numériques permettent de **prédire l'efficacité de solutions de réduction** apportées aux différents systèmes, en fonction :

- du type de sol
- du type de voie
- du type de circulation/véhicule

Le type de bâtiment peut aussi être pris en compte...

Lors de nos dernières études, nous avons calculé l'impact :

- d'une augmentation ou diminution du poids du rail
- De la raideur des semelles sous le rail
- **De la raideur d'une semelle sous traverse**
- Du poids de la traverse
- De la raideur du ballast

Chaque configuration étant testée pour **différentes raideurs de sol**

**Impact sur :**

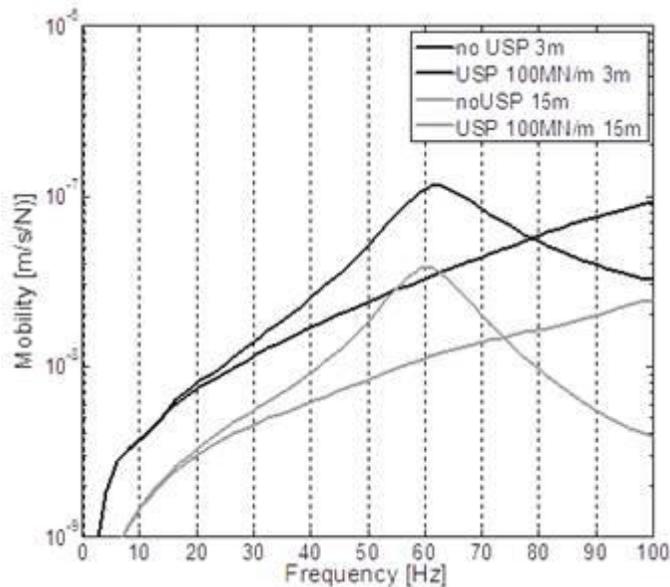
- **La mobilité (fonction de transfert voie/sol)**
- **L'effort d'interaction**

# Application de l'approche numérique

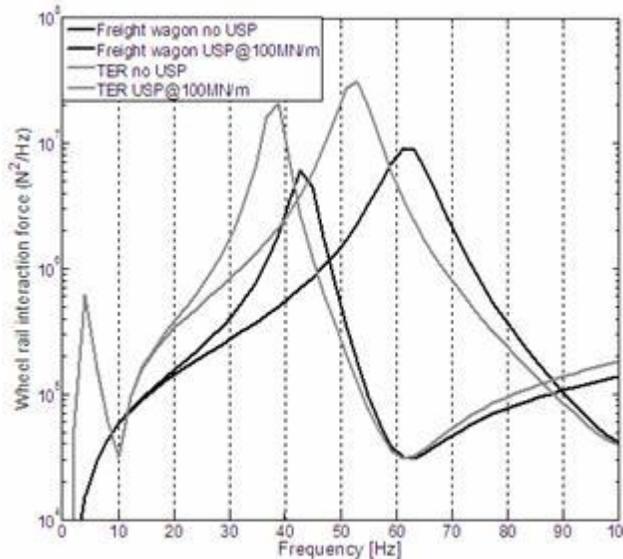
## Etudes paramétriques

Exemple d'étude paramétrique menée à l'aide du code de calcul TRAFFIC © (KULeuven) :

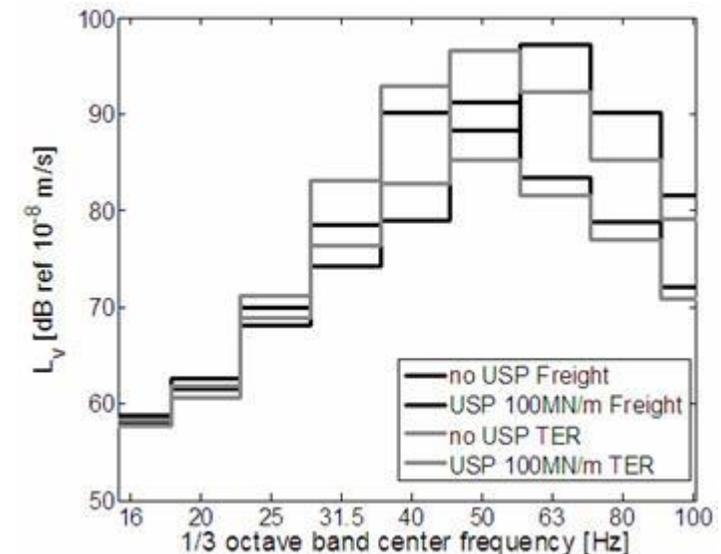
Influence de la raideur du sol et d'une USP sur les niveaux vibratoires en champ libre (combinaison mobilité et effort d'interaction RR)



A 3m et 15m de la voie, sur un sol homogène de grande raideur



Effort d'interaction avec et sans USP, sur un sol dur



Niveau vibratoire en champ libre à 15m de la voie – sol dur

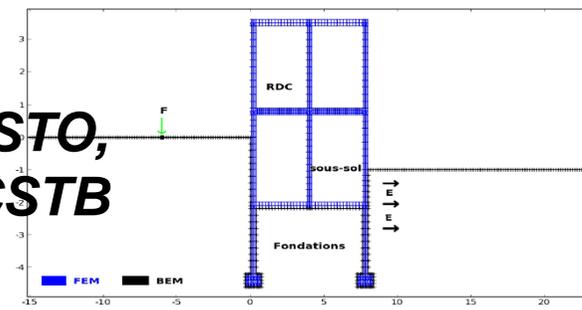
-L'effet de l'USP est négatif (avec plus ou moins de gravité) dans les BF (augmentation du niveau)

-Le shift entre effet positif et négatif est la plupart du temps piloté par le comportement de l'EI (même gamme fréquentielle que le shift de l'effort d'interaction)

-Combinaison complexe entre effort d'interaction et mobilité

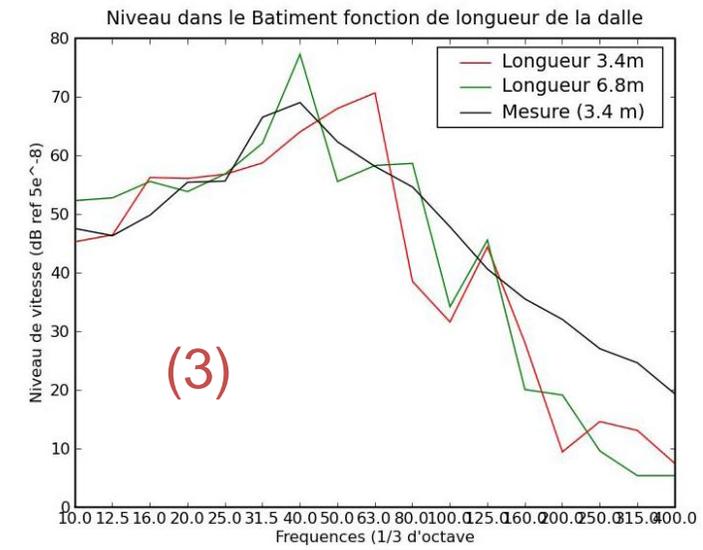
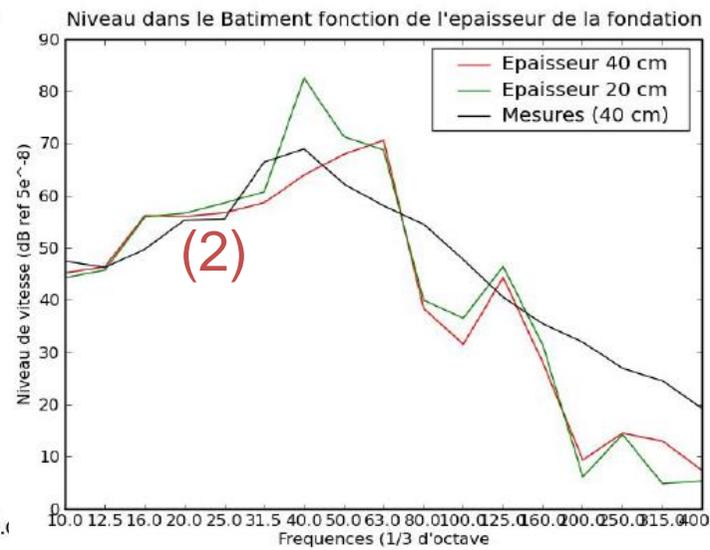
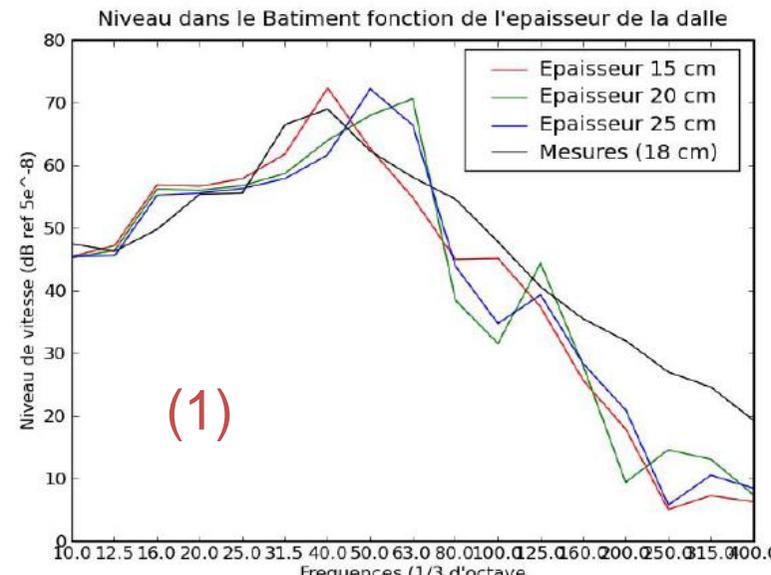
# Application de l'approche numérique influence de la structure du bâtiment

MEFFISTO,  
©CSTB



- Des variations mineures de l'épaisseur de la dalle du rez-de-chaussée (entre 15cm et 25cm, l'épaisseur réelle étant de 18cm) n'impacte pas les niveaux vibratoires en milieu de dalle mais cela change les fréquences propres de la structure (1)
- Des variations de l'épaisseur de la façade (de 20cm à 40cm, l'épaisseur réelle étant de 40cm) ont un impact sur les niveaux vibratoires dans le bâtiment : la façade la plus fine vibre beaucoup plus (effet de masse) et de ce fait transmet beaucoup plus d'énergie à la structure du bâtiment (2)
- Un accroissement des portées des dalles implique de plus forts niveaux vibratoires dans le bâtiment en BF (les dalles deviennent plus souples) (3)

Article Internoise 2010





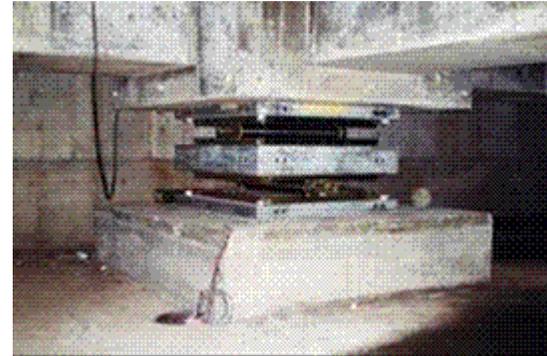
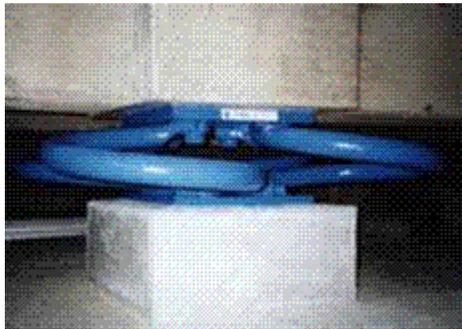
*Comment agir ?*  
Les solutions de réduction

## Les solutions de réduction

### A chaque problème, sa solution...

Chaque configuration problématique voie/sol/immeuble peut avoir de multiples explications :

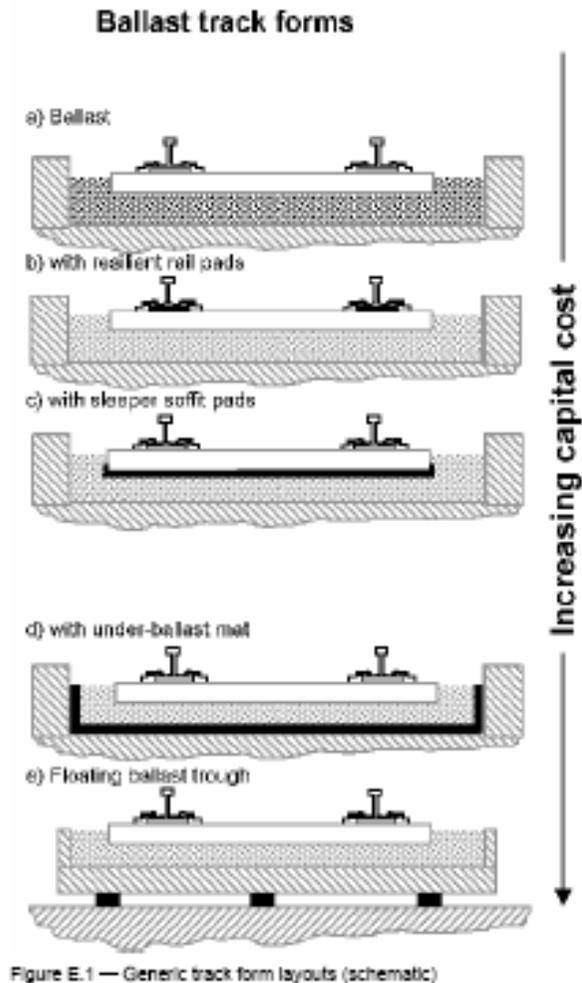
- 1 seul immeuble a des fréquences de résonance proches de celles de la voie : il est préférable d'isoler les fondations de l'immeuble (comme pour les sollicitations sismiques)



- Plusieurs immeubles le long de la voie "tremblent" : a priori, la voie ou/et le sol posent problème : le spectre de vibrations transmises est large avec des niveaux importants  
-> il faut agir sur la voie ou/et le sol

# Agir à la source

Nombreuses solutions de réduction en intervenant sur la voie : il s'agit de rajouter des couches résilientes "C" (qui dissipent une partie de l'énergie)



Type de dispositifs	Gamme fréquentielle d'efficacité	Atténuations apportées	Commentaires
Attaches de rail Semelles sur rail	$f > 40$ Hz	- 7 à - 12 dB à 50-63 Hz	Système usuel le plus performant : « œuf de Cologne »
Semelles sous traverse	$f > 20$ Hz	- 8 à - 10 dB à 31 Hz - 15 à - 20 dB à 63 Hz	Système usuel le plus performant : pose STEDEF
Tapis sous ballast	$f > 25-30$ Hz	- 10 à - 20 dB à 63 Hz	
Dalles flottantes	$f$ supérieure à 2 fois la fréquence de suspension	- 20 dB à 63 Hz pour des fréquences de suspension proches de 15-16 Hz	On peut descendre à des fréquences de suspension de 5 Hz avec des ressorts métalliques
Dalle rigide sous ballast	[8 - 20 Hz]	- 5 à - 10 dB	Attention : amplification pour $f > 25$ Hz
Rigidification du sol	BF		Efficace si le sol est très souple
Mesures sur le chemin de propagation des ondes dans le sol	[8-50 Hz]	- 2 à - 8 dB	Tranchées L'efficacité semble diminuer quand on s'éloigne de la voie

## Agir à la source : essais au banc

**Essais au banc** menés dans le cadre du projet VIBSOLFRET par le CSTB et SATEBA, sous différentes charges statiques, mesure du **facteur de perte par insertion vibratoire** pour :

-Différentes **semelles sous selle**

*Getzner U Sole-plate P*

*EDILON U Sole-plate P*

-Différentes **semelles sous traverses**

*Getzner USP*

*CDM USP*



**Agir à la source :**  
**essais au banc**  
**Semelles sous selle et traverse**

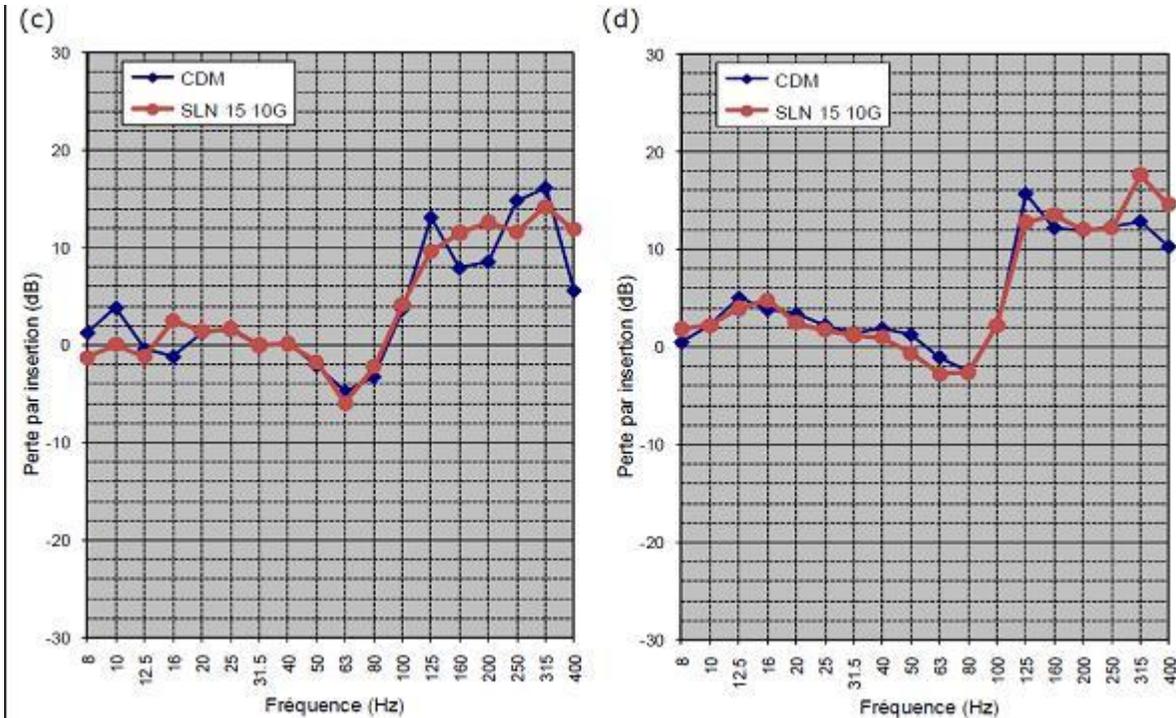
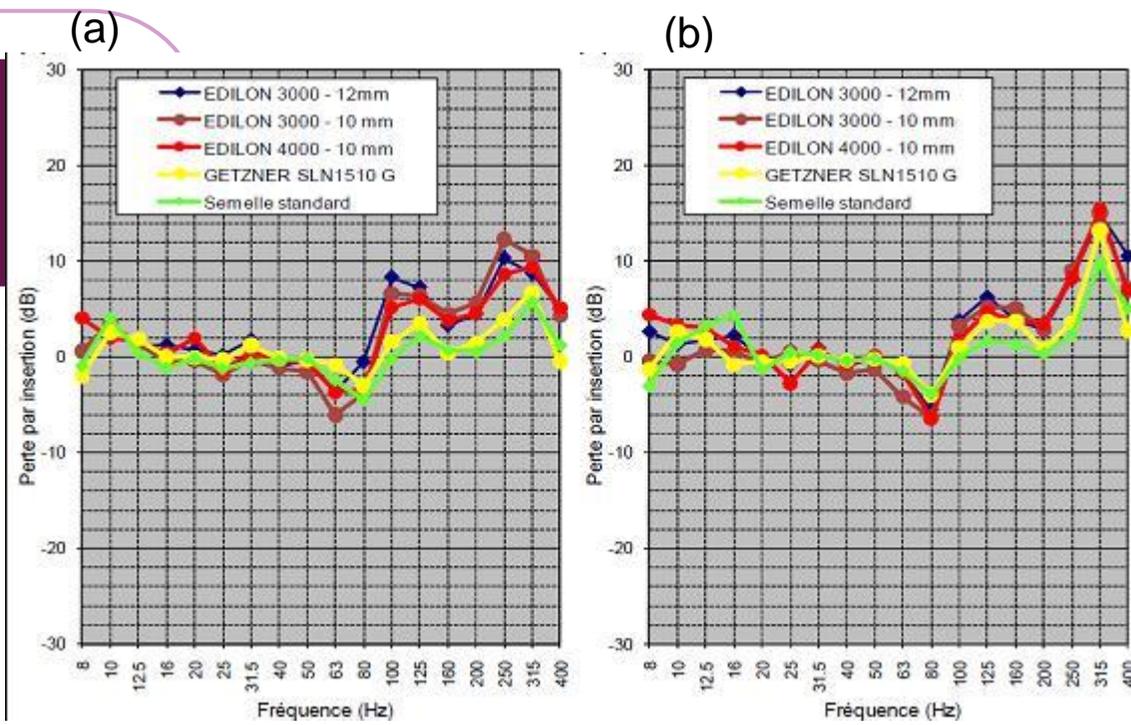
Insertion loss pour 5 semelles sous selle (a et b)  
 et 2 semelles sous traverse (c et d):

(a) Et (c) Static load = 90kN

(b) Et (d) Static load = 120kN

-> pas d'impact réel sur la gamme  
 fréquentielle visée ie 31.5Hz à 50Hz

**!!! Ces tests n'évaluent "que" l'effet sur  
 la mobilité, pas sur l'effort  
 d'interaction !!!**



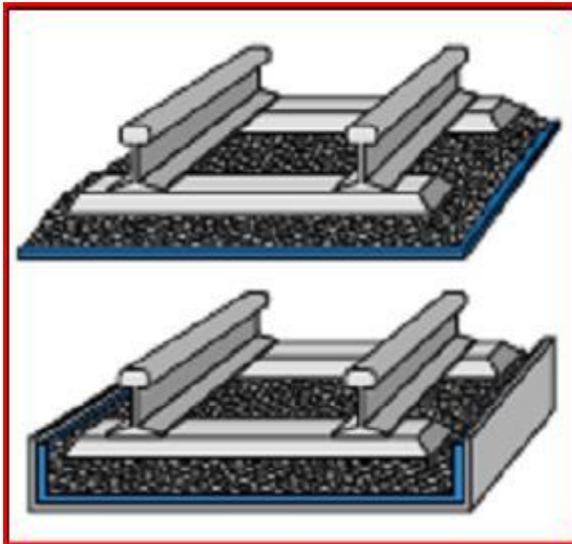
## Agir à la source

Solutions la plus efficace : pose d'un tapis sous ballast (raideur optimisée par **approche numérique**)

Réalisable lors d'un RVB : sa mise en place est lourde (donc couteuse)

Avantageux pour le drainage et la portance de la voie (projet INNOTRACK) et pour le contrôle des vibrations

Point singulier : Tenue de la voie en courbe avec un tel dispositif ? -> étudié dans RIVAS



Merci de votre attention !