



MISE EN PLACE D'UNE DÉMARCHE HOLISTIQUE POUR LUTTER CONTRE LES VIBRATIONS DUES AU TRAFIC FERROVIAIRE

E. BONGINI, A. GUERRERO, B. FAURE



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(S) ENJEU(X) ?
 - Sensibilité des riverains face aux vibrations induites par le trafic qui s'est accrue ces dernières années (en tout cas le nombre de plaintes s'est accru)
 - Le sujet des vibrations pèse désormais dans la concertation avec les riverains dans le cadre des projets de développement du fret et dans une moindre mesure dans les projets de lignes nouvelles voyageurs
 - Sujet complexe difficile à vulgariser
 - Les solutions anti-vibratiles ont un coût non négligeable dans les projets d'infrastructure, notamment de modernisation du réseau existant
 - Pas de solution "clé en main" pour réduire les vibrations dans le cas de lignes de surface





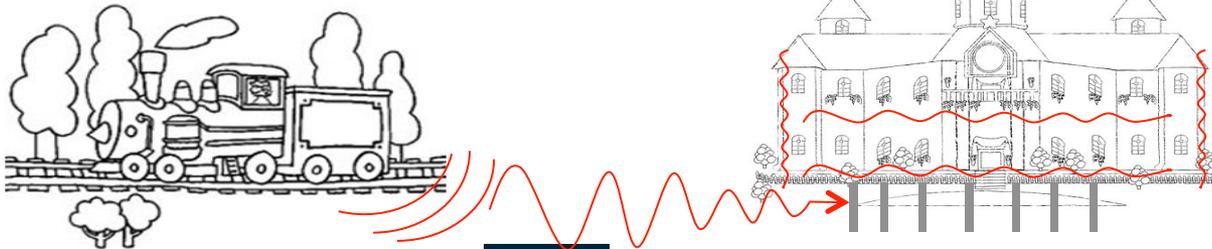
Introduction



- **UNE PROBLÉMATIQUE COMPLEXE :**

Les caractéristiques des vibrations perçues dans les bâtiments par les riverains dépendent :

- De la source, ou effort dynamique au point de contact roue / rail, celle-ci étant elle-même pilotée par :
 - Le comportement du train (masses non suspendues des essieux),
 - La réponse dynamique de la voie (type de pose de voie, traverses bois ou béton, épaisseur de la couche de ballast, nature des sous-couches),
 - La nature des défauts au contact (irrégularités de surface des roues ou de la voie, irrégularités géométriques de la voie)
- Du milieu de propagation : nature du sol et éléments constitutifs en présence sur le chemin de propagation des ondes (présence de bâtis, parkings, tunnel, égouts, câbles...)
- Du /des bâtiments concernés par l'émission vibratoire (type de construction, profondeurs des fondations, matériaux, épaisseurs des parois...)



8 e

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



• PRESCRIPTION DE SOLUTIONS :

Il n'existe pas de solution universelle : un des résultats principaux du projet européen RIVAS est la **définition des domaines de performances** d'une grande gamme de solutions anti-vibratiles :

Conclusions



Monitoring the track condition over the whole wavelength band of interest for vibrations.

It is proposed to consider a new domain D0 [0.5m-3m].
It is well within the capabilities of the many track recording cars used by the Infrastructure Managers in Europe.

Track

Dipped rails and joints seem to generate high, broadband vibration levels
Tamping enables a small reduction of very low frequency vibrations

Wheel

In the worst cases observed, a very bad Out-Of-Roundness (OOR) can generate a very high level of vibration compared to an average wheel condition. Different rolling stock and wheel maintenance strategies lead to different OOR development.

Conclusions of track mitigation measures – WP3



→ USP in ballasted track:

- positive II, for frequencies above 50Hz (up to 15 dB)
- Below 50Hz, soft USP should have an effect on the parametric excitation
- No real advantage of very soft USP compared to medium soft USP
- Advantage of wide sleepers
- Could be used in curves, without problem concerning the stability of track

→ USP in GETRAC system (slab track):

- positive II, for frequencies above 50Hz (up to 15 dB)

→ Very soft railpads / optimized fastening system:

- positive II (up to 12dB) for frequencies above 50Hz
- Below, very soft railpads should have an effect on the parametric excitation
- Very soft railpads should reduce the wheel-rail contact force, reducing the defect growth

→ Turnout:

- Identification of sources that contribute the most is compulsory before proposing mitigation solution(s)
- 2 main phenomena observed until now: impact load at the crossing panel and track stiffness variation along the turnout
- Reduction of impact load at the crossing panel: very soft railpads
- Reduction of track stiffness variation? USP installation does not seem to improve the situation
- Global reduction with mitigation measures on the propagation path.

AVENUE DE LA LIBERTÉ

Conclusions



- The layering of the soil determines the vibration transmission and characteristic spectrum of railway vibration at a given site.
- Geotechnical and geophysical site characteristics are essential to the design of (transmission path) mitigation measures.
- A trench or soft wave barrier can be designed to cut off waves propagating in soft upper layers of soil overlying stiffer material.
- A stiff wave barrier can be designed to block waves and is mostly effective in soft soil.
- Numerical simulations show promising results for vibration reduction by heavy masses next to the track but need to be confirmed by field tests.

RIVAS Final Conference 21/11/2013

1



Conclusions from WP5



- Reducing the unsprung mass is the single most important design change. Other parameters may be important in a limited frequency range
- Depending on vehicle type a 15-35 % reduction of the mass is feasible giving a reduction of up to 3 dB
- The wheel out-of-roundness has a significant influence on the excitation of ground-borne vibration. Based on OOR levels assessed in RIVAS a 3 dB reduction of the vibration level can be expected
 - The relation between wheel maintenance and reduction of vibration need to be assessed for each case of vehicle fleet and track.
- The relation between vehicle design and OOR growth need further investigation
- Difficult to mitigate low-frequency vibration (< 20 Hz) by vehicle design

Orga

Name, Partner Name

1





Introduction



• PRESCRIPTION DE SOLUTIONS :

Il n'existe pas de solution universelle : un des résultats principaux du projet européen RIVAS est la **définition des domaines de performances** d'une grande gamme de solutions anti-vibratiles :

Conclusions



Monitoring the track condition over the whole wavelength band of interest for vibrations.
It is proposed to consider a new domain D0 [0.5m-3m].
It is well within the capabilities of the many track recording cars used by the Infrastructure Managers in Europe.

Track

Dipped rails and joints seem to generate high, broadband vibration levels.
Tamping enables a small reduction of very low frequency vibrations.

Conclusions



- The layering of the soil determines the vibration transmission and characteristic spectrum of railway vibration at a given site.
- Geotechnical and geophysical site characteristics are essential to the design of (transmission path) mitigation measures.
- A trench or soft wave barrier can be designed to cut off waves propagating in soft upper layers of soil overlying stiffer material.
- A stiff wave barrier can be designed to block waves and is mostly effective in soft soil.

Il faut donc définir précisément le besoin : gamme de fréquences en jeu, type de sol, type de circulation, type d'habitation pour sélectionner la solution la plus adaptée.

Conclusions of track mitigation measures – WP3



→ USP in ballasted track:

- positive IL for frequencies above 50Hz (up to 15 dB)
- Below 50Hz, soft USP should have an effect on the parametric excitation
- No real advantage of very soft USP compared to medium soft USP
- Advantage of wide sleepers
- Could be used in curves, without problem concerning the stability of track

→ USP in GETRAC system (slab track):

- positive IL for frequencies above 50Hz (up to 15 dB)

→ Very soft railpads / optimized fastening system:

- positive IL (up to 12dB) for frequencies above 50Hz
- Below, very soft railpads should have an effect on the parametric excitation
- Very soft railpads should reduce the wheel-rail contact force, reducing the defect growth

→ Turnout:

- Identification of sources that contribute the most is compulsory before proposing mitigation solution(s)
- 2 main phenomena observed until now: impact load at the crossing panel and track stiffness variation along the turnout
- Reduction of impact load at the crossing panel: very soft railpads
- Reduction of track stiffness variation? USP installation does not seem to improve the situation
- Global reduction with mitigation measures on the propagation path.

3, Avenue de la République

RIVAS Final Conference 21/11/2013

1



Conclusions from WP5

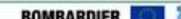


- Reducing the unsprung mass is the single most important design change. Other parameters may be important in a limited frequency range
- Depending on vehicle type a 15-35 % reduction of the mass is feasible giving a reduction of up to 3 dB
- The wheel out-of-roundness has a significant influence on the excitation of ground-borne vibration. Based on OOR levels assessed in RIVAS a 3 dB reduction of the vibration level can be expected
 - The relation between wheel maintenance and reduction of vibration need to be assessed for each case of vehicle fleet and track.
- The relation between vehicle design and OOR growth need further investigation
- Difficult to mitigate low-frequency vibration (< 20 Hz) by vehicle design

Orga

Name, Partner Name

1





Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- INDICATEURS DE PERFORMANCES :

Etudes actuelles : en l'absence de réglementation sur les niveaux vibratoires limites, des seuils vibratoires peuvent être recommandés.

Par exemple le seuil de perception, fixé pour des bâtiments résidentiels dans la norme ISO 10137 (moyenne des niveaux vibratoires sur le passage d'un train dans la gamme de fréquence [8Hz ; 80Hz]) à 72 dB(v) le jour et 69 dB(v) la nuit.

D'autres seuils existent par exemple dans la normalisation allemande : les KBFmax , fonction du type de bâtiment et du trafic.

Le **bruit re-rayonné** par les parois du bâti doit lui aussi être maîtrisé :

- soit Leq moyenné sur les périodes [6h – 22h] et [22h – 6h] < 30 dB(A) de bruit dans les bâtiments
- soit pour le niveau acoustique moyenné au cours d'un passage de train, $LeqTp$ < 30 dB(A) de bruit dans les bâtiments



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





Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



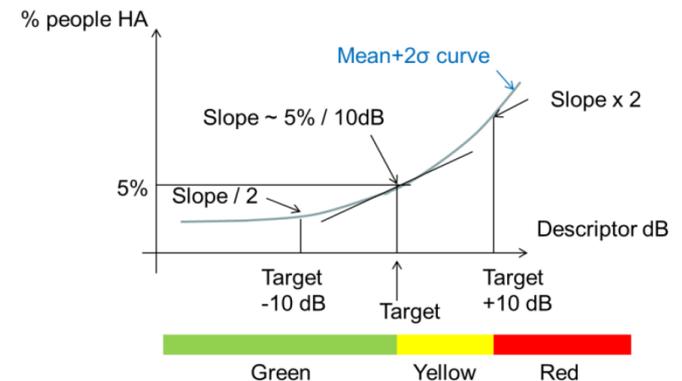
• INDICATEURS DE PERFORMANCES :

Nouveaux indicateurs proposés dans le projet RIVAS : pour les quatre descripteurs d'exposition suivants :

- le niveau maximum vibratoire au passage ($L_v W_m$ slow max) ;
- le niveau vibratoire moyenné sur 24h ($L_v W_m$ eq 24h) ;
- le niveau maximum de bruit re-rayonné au passage ($L_p A$ slow max) ;
- le niveau de bruit re-rayonné moyenné sur 24h ($L_p A$ den24h).

Détermination de zones de « dose-réponse » :

- la zone verte : niveaux inférieurs aux niveaux correspondant à 5 % de la population très gênée ;
- la zone jaune : niveaux égaux aux niveaux correspondants à 5 % de la population très gênées et jusqu'à des niveaux supérieurs de 10 dB à ces niveaux seuil ;
- la zone rouge s'étend au-delà de ces niveaux seuil + 10 dB.



8 et 9 JUIN 2015

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

Organisées par le C



Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- INDICATEURS DE PERFORMANCES :

Exemple des niveaux de performances, estimés numériquement d'une tranchée souple entre la voie et un bâtiment donné, pour un sol dur, comparaison avant et après la mise en place de la tranchée

Descriptor	Before		After		Difference	
	dB	% MHA	dB	% MHA	dB	% MHA
Lv Wm slow max	76	23	74	19	-2	-4
Lv Wm eq 24h	52	7	50	6	-2	-1
Lp A slow max	57	42	41	13	-16	-29
Lp A den 24h	33	11	20	3	-14	-8

Intérêt : descripteurs court et long termes pour des expositions acoustiques et vibratoires. Par contre, le fait qu'il s'agisse d'une exposition multiple (acoustique et vibratoire en même temps) n'est pas pris en compte dans les courbes dose-réponse considérées.



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





Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- INDICATEURS DE PERFORMANCES :

Exemple des niveaux de performances, estimés numériquement d'une tranchée souple entre la voie et un bâtiment donné, pour un sol dur, comparaison avant et après la mise en place de la tranchée

Descriptor	Before		After		Difference	
	dB	% MHA	dB	% MHA	dB	% MHA
Lv Wm slow max	76	23	74	19	-2	-4
Lv Wm eq 24h	52	7	50	6	-2	-1
Lp A slow max	57	42	41	13	-16	-29
Lp A den 24h	33	11	20	3	-14	-8

Intérêt : descripteurs court et long termes pour des expositions acoustiques et vibratoires. Par contre, le fait qu'il s'agit d'une exposition multiple (acoustique et vibratoire en même temps) n'est pas prise en compte dans les courbes dose-réponse considérées.

Ces indicateurs de perception permettent d'établir des cibles de niveaux vibratoires et acoustiques. Un niveau de performance d'une solution peut alors être prescrit à partir :

de ces cibles de niveau & d'un bilan (criticité) de la situation



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





Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- PRESCRIRE UNE SOLUTION PRÉVENTIVE :

Cas de figure : étude préalable à une construction de voie nouvelle ou une modification de ligne (doublement de voie par exemple).

Problématique : l'exposition vibratoire sur le site n'est pas mesurable :

➔ Evaluation par l'emploi d'outils de prédiction basés sur des approches empirique et / ou numérique ainsi que l'étude de sites qui présentent des caractéristiques voisines.

Autre cas de figure : construction de nouveaux bâtiments aux abords des voies.

Problématique : la source des vibrations existe mais pas le récepteur (i.e. le bâtiment).

➔ Approches numérique ou empirique pour prédire le comportement vibratoire de ces futurs bâtiments, afin de les coupler à des mesures de niveaux vibratoires en champ libre au passage des trains.



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





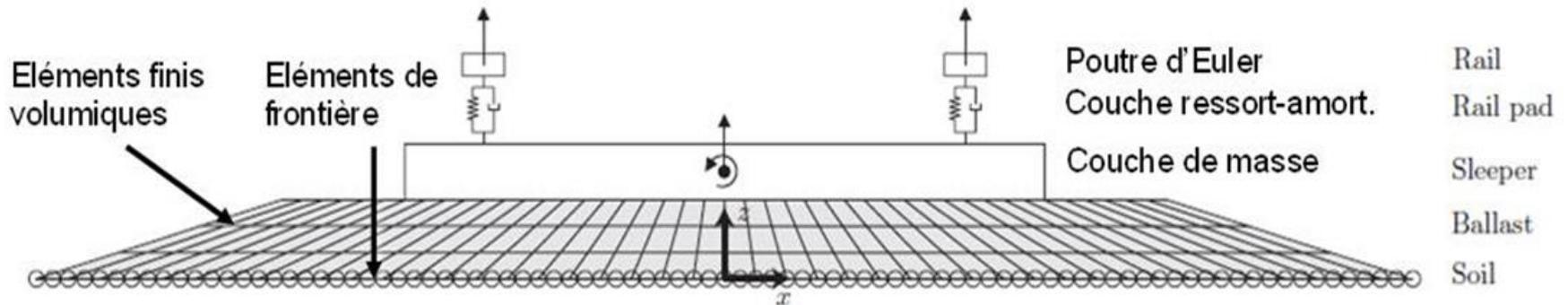
Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- PRESCRIRE UNE SOLUTION PRÉVENTIVE : L'APPROCHE NUMÉRIQUE

Elle requiert des outils spécifiques permettant de combiner différents modèles

Bongini, Guerrero



Comportement vibratoire de la source et propagation des ondes dans le sol sont gérés par des modèles 2D $\frac{1}{2}$, comme illustré ci-dessus par le modèle TRAFFIC de KUL (modèle de sol homogène (pas de bâtis annexes, avec périodicité parfaite le long de la voie),

Modèle de bâtiment souvent réalisé dans des codes EF 3D.



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



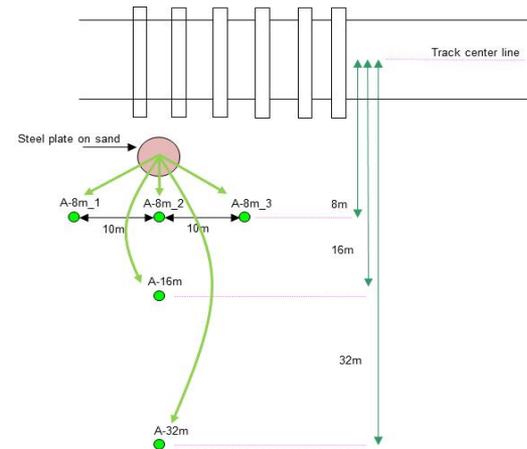


Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- PRESCRIRE UNE SOLUTION PRÉVENTIVE : DONNÉES EMPIRIQUES

Obtenues par des mesures sur le site étudié : mesures de fonction de transfert vibratoires entre la voie existante et le site d'implantation des futurs bâtiments par exemple, pour quantifier les risques d'amplification des vibrations par certains sols et certains couplages sol / bâtiments.



Par ailleurs, des abaques sur les réponses vibratoires des bâtiments peuvent aussi être utiles lors de l'estimation des émissions vibratoires (vibrations et bruit re-rayonné) transmis dans les habitations lorsqu'on connaît les niveaux vibratoires au pied des futurs bâtis.



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





Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- PRESCRIRE UNE SOLUTION PALLIATIVE

Cas de figure : niveaux vibratoires élevés constatés chez le riverain.

Problématique : la voie et le bâtiment existent

➔ La mesure chez le / les riverains est possible et permet de caractériser :

- Les fréquences problématiques
- Les gains de performance à envisager.

➔ Une visite détaillée de la voie au droit des bâtiments permet aussi de vérifier la présence d'éléments de conception pouvant être générateurs de vibrations (comme les joints de rail, les appareils de voie).

La mesure de l'exposition et la description détaillée de la voie permettent d'établir la criticité du site en termes d'émissions vibratoires.





Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile



- CAHIER DES CHARGES D'UNE SOLUTION ANTI-VIBRATILE

« Criticité vibratoire » du site versus indicateurs de performance :
→ niveaux de performance de solutions anti-vibratiles

Ces prescriptions feront partie du cahier des charge des solutions, au même titre que leurs performances « ferroviaires » :

- influence sur le comportement de la voie (tenue latérale, déflexion sous charge),
- tenue dans le temps,
- maintenabilité,
- prix.

Dans le cas de solutions palliatives, la nature des mesures anti-vibratiles est contrainte par l'antériorité des structures : il peut être complexe de modifier la voie ou les bâtiments existants.

Sélection de la « meilleure » solution anti-vibratile :

mettre en regard ce cahier des charges et les **performances annoncées de chaque solution.**

Il est donc nécessaire de caractériser ces performances.



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





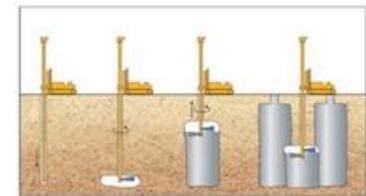
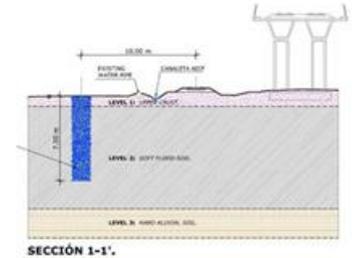
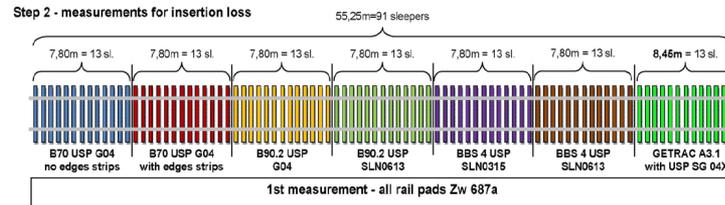
Caractérisation des solutions anti-vibratiles



- REX et AVANCÉES DE RIVAS

Beaucoup de solutions anti-vibratiles testées dans RIVAS, à échelle 1 permettant d'établir leur domaine de performance.

Bongini, Guerrero



On se concentrera dans la suite sur le cas des solutions installées dans la voie ferrée, et plus particulièrement sur les systèmes d'attache souple du rail.



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 solutions anti-vibratiles

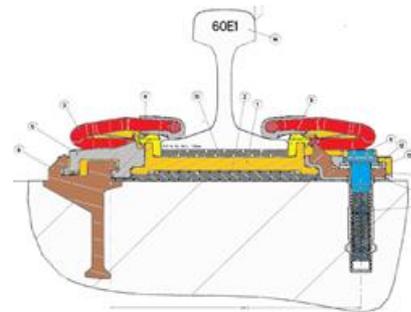


- EXEMPLE DU SYSTÈME D'ATTACHE DU RAIL SOUPLE

Système d'attache DFC pour lequel différentes raideurs équivalentes du systèmes sont testées, de **25MN/m à 300MN/m**

L'attache DFC ou DFC VIPA, pour Double Fast Clip développé par Pandrol , est un système d'attache du rail sur la traverse permettant d'avoir deux couches d'élastomère, entre le rail et la selle en fonte du système, et entre la selle en fonte et la traverse.

Selon le couple de semelles utilisées, la raideur apparente du système global couvre une très large gamme.



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





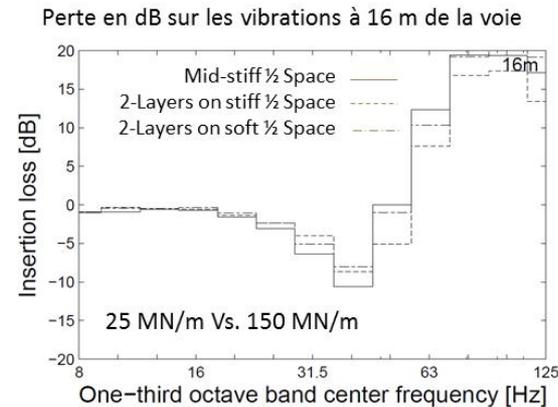
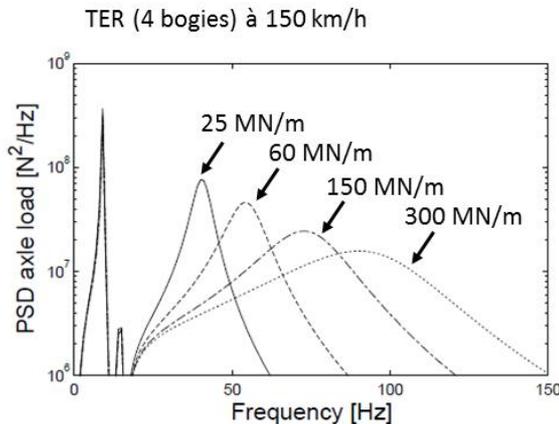
Caractérisation des solutions anti-vibratiles



• SYSTÈME D'ATTACHE SOUPLE : EVALUATION NUMÉRIQUE DES PERFORMANCES

Objectif : Estimation des niveaux de performances de différentes solutions, pour des cas d'utilisation "typiques"

Calcul de la fréquence de coupure des solutions i.e. la fréquence au-delà de laquelle les vibrations sont réduites et évaluation, dans le cas de solution de type assouplissement de la voie, de l'effet d'amplification des vibrations à la fréquence de résonance du système



On observe : un décalage de la fréquence de résonance du système voie / essieu vers les basses fréquences. La fréquence de coupure des vibrations est aussi décalée vers les basses fréquences (fréquence à partir de laquelle les vibrations sont réduites) et les niveaux de performances de la solution sont très peu dépendants du type de sol support.



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 solutions anti-vibratiles



- SYSTÈME D'ATTACHE SOUPLE : TESTS EN LABORATOIRE
HOMOLOGATION ET NOUVELLES MÉTHODE DE CARACTÉRISATION

Objectifs :

- vérifier l'employabilité de nos systèmes dans un contexte ferroviaire donné :
 - Tenue latérale du système
 - Enfoncement vertical
 - Tenue dans des conditions climatiques extrêmes (brouillard salin, tests en enceinte climatique)
 - Tenue à 1 million de cycles de sollicitations
 - Tests d'arrachement pour les semelles sous traverses
- & caractériser les raideurs dynamiques des éléments résilients :
 - Les matériaux résilients / élastomériques présentent généralement des comportements fortement non-linéaires vis-à-vis de la charge / précharge appliquée et de la fréquence d'excitation
 - Il s'agit ici d'obtenir des raideurs des semelles sous rails ou sous traverse soumis à des sollicitations représentatives de celles subies en voie, en dynamique / hautes fréquences



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 solutions anti-vibratiles



- SYSTÈME D'ATTACHE SOUPLE : TESTS IN SITU
HOMOLOGATION ET VÉRIFICATION DES PERFORMANCES

Objectifs :

- Finaliser l'homologation des systèmes : ils doivent être expérimentés pendant 2 ans en voie commerciale avec une surveillance dédiée (influence sur la tenue de la voie, la génération de défauts, vieillissement...)
- Evaluer leurs performances anti-vibratiles en test in-situ



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





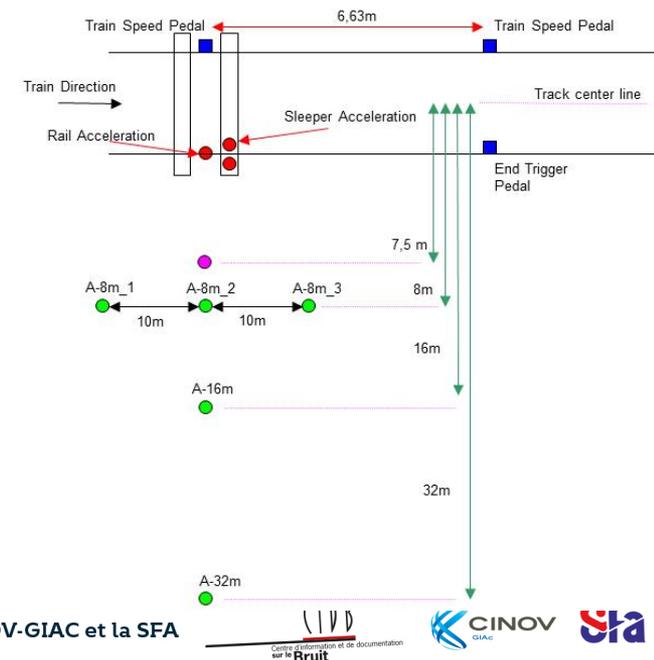
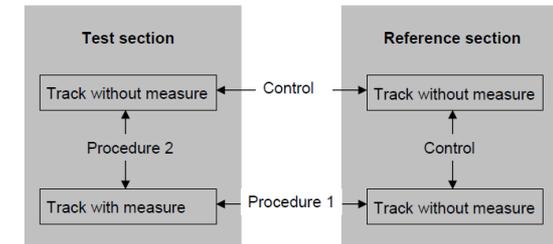
Caractérisation des solutions anti-vibratiles



• SYSTÈME D'ATTACHE SOUPLE : TESTS IN SITU / VÉRIFICATION DES PERFORMANCES

Un protocole d'évaluation des performances anti-vibratiles de nos systèmes a été développé dans le projet RIVAS :

- Double vérification avant vs après la pose et sur le site de test vs. sur un site de référence
- Différents types de mesures (sur les sites de test et de référence) :
 - Fonctions de transfert sol-sol sur les 2 sites (comparabilité des 2 sites en termes de propagation des ondes)
 - Fonctions de transfert voie / champ libre à 8 m, 16 m et 32 m de la voie
 - Réceptances de voie
 - Accélérations verticales au passage de trains



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

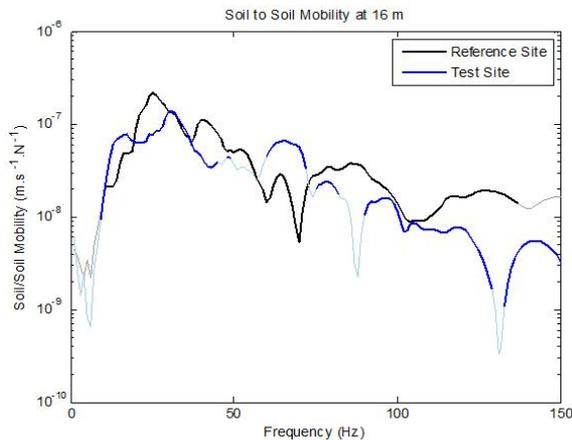




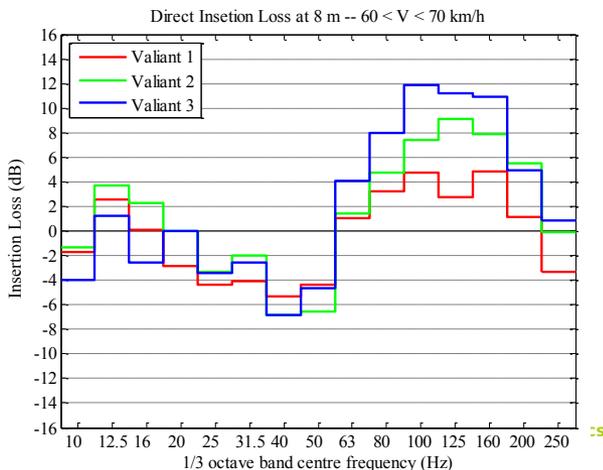
Caractérisation des solutions anti-vibratiles



• SYSTÈME D'ATTACHE SOUPLE : TESTS IN SITU / VÉRIFICATION DES PERFORMANCES



Des sols de nature très différente entre le site test et le site de référence, pourtant distant de 100 m max.
FT sol-sol prises en compte dans la suite des analyses pour comparer les performances des solutions



Une perte par insertion au-delà de 50 Hz pour ce type de solution anti-vibratile, en accord avec les résultats des simulations numériques.

Entre les deux configurations du système Valiant 2 et Valiant 3 : la fréquence de résonance est bien décalée vers les BF lorsque la raideur de l'attache diminue et le niveau de performances anti-vibratiles au-delà de la fréquence de coupure est amélioré.



Conclusion



- DÉMARCHE de SPÉCIFICATION

Identifier le niveau de performance requis et la gamme de fréquence à laquelle il va falloir s'attaquer est un prérequis indispensable pour bien designer une solution de réduction des vibrations.

Cela peut nécessiter un grand nombre de données empiriques et/ou d'analyses numériques.

- CATALOGUE de SOLUTIONS

Répondre à des spécifications précises et propres à chaque site, nécessite d'avoir un catalogue de solutions étoffé. Toutes les étapes listées ci-dessus sont nécessaires pour faire rentrer une solution au catalogue : c'est donc un travail de longue haleine.

