



JOURNEES
TECHNIQUES
ACOUSTIQUE
ET VIBRATIONS



Méthodes fines d'intégration du mouvement en dynamique ferroviaire

Francisco LAMAS-LOPEZ

SNCF – RESEAU / Ecole des Ponts ParisTech

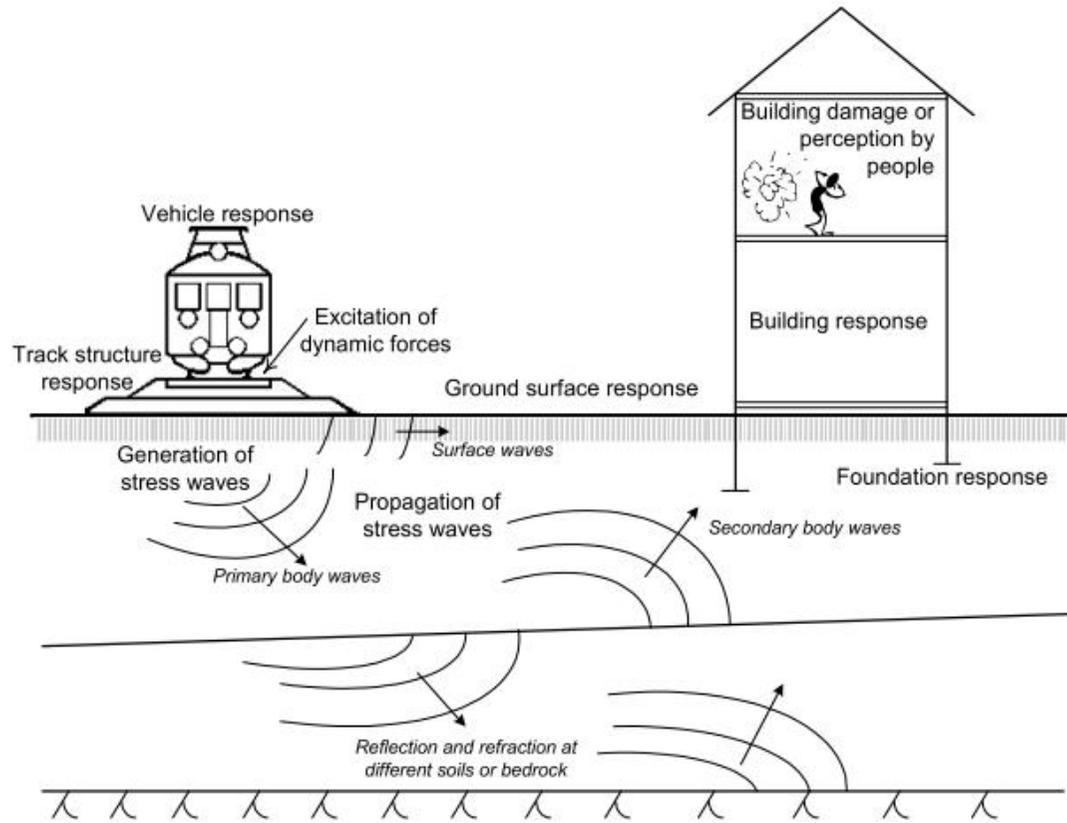
Y.J. Cui (ENPC) ; N. Calon (SNCF) ; S. Costa D' Aguiar (SNCF)



ifsttar – Nantes 4 & 5 juin 2015



Introduction : Les vibrations induites par les passages des trains

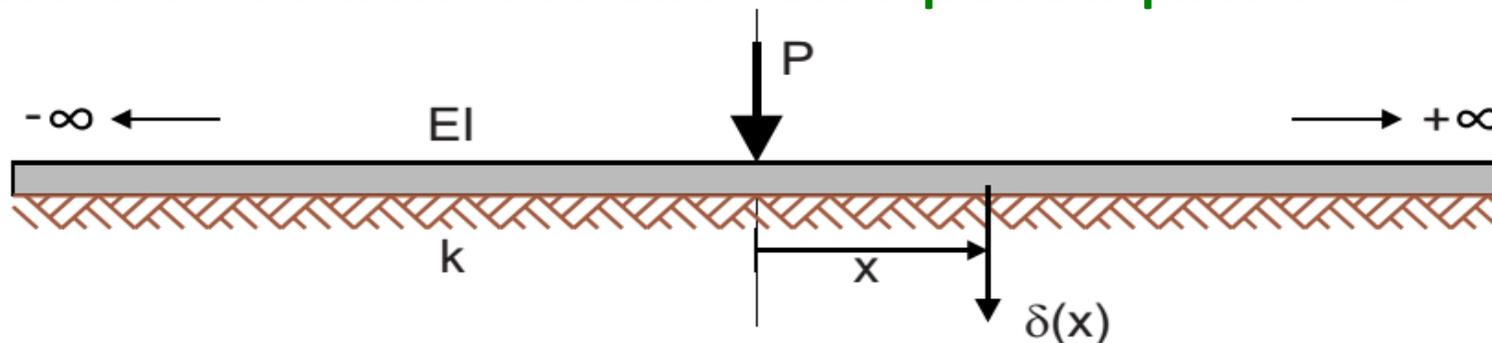


Le processus de transmission des vibrations induites par les trains
(Hall, 2000)

- **Sollicitations dynamiques ferroviaires**
 - Réponse mécanique de la structure d'appui
 - Création et propagation des ondes primaires et secondaires propagées vers l'intérieur de la plateforme
 - Propagation des ondes de surface
 - Vibration des structures autour de la voie ferrée

Introduction : Estimations mécaniques effectuées à partir des mesures de vibrations

- Les amplitudes des vibrations propagées sur une plateforme ferroviaire indiquent les niveaux de sollicitations imposées par les trains aux matériaux, comment les matériaux réagissent au chargement et peuvent constituer un indicateur de l'état mécanique de la plateforme



Représentation schématique d'une voie ferrée avec une 'poutre appuyé sur une fondation élastique' (Esveld, 2001)

$$EI \frac{d^4 \delta(x)}{dx^4} + k \delta(x) = 0 \longrightarrow k = -\frac{q}{\delta} \longrightarrow \delta(x) = \frac{P}{2kL} e^{-x/L} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \longrightarrow \delta_{\max} = \frac{P}{2kL}$$

$$\delta(\infty) = 0, \quad \delta'(0) = 0, \quad \delta'''(0) = \frac{P}{2EI} \quad \text{Si } x=0 \rightarrow \delta_{\max} \quad L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}$$

(Priest et al., 2009)

Introduction : Les mesures des déplacements sur voies ferrées

- Les déflexions des matériaux peuvent être mesurées à l'aide des capteurs comme accéléromètres, géophones, LVDTs ou systèmes d'analyse des images (PIV)



Accéléromètre installé sur une traverse, à côté du système d'attache (AW, 2007)



Installation d'un LVDT attaché à un poteau caténaire (LAMAS-LOPEZ, 2014)

- Certaines questions subsistent encore sur la définition des caractéristiques des capteurs pour estimer déflexions sous chargements, les procédures à utiliser pour les calculer et l'influence de la vitesse des trains ou la charge à l'essieu sur les réponses

Objectifs

- Définition d'une procédure d'analyse applicable aux différents capteurs pour déterminer les amplitudes des déflexion des matériaux sous passage d'un train
- Comparer les résultats de déflexion sur différents types de mesures (accélération, vitesse, déplacement)
- Evaluer l'influence de la vitesse des trains et la charge à l'essieu dans les mesures effectuées

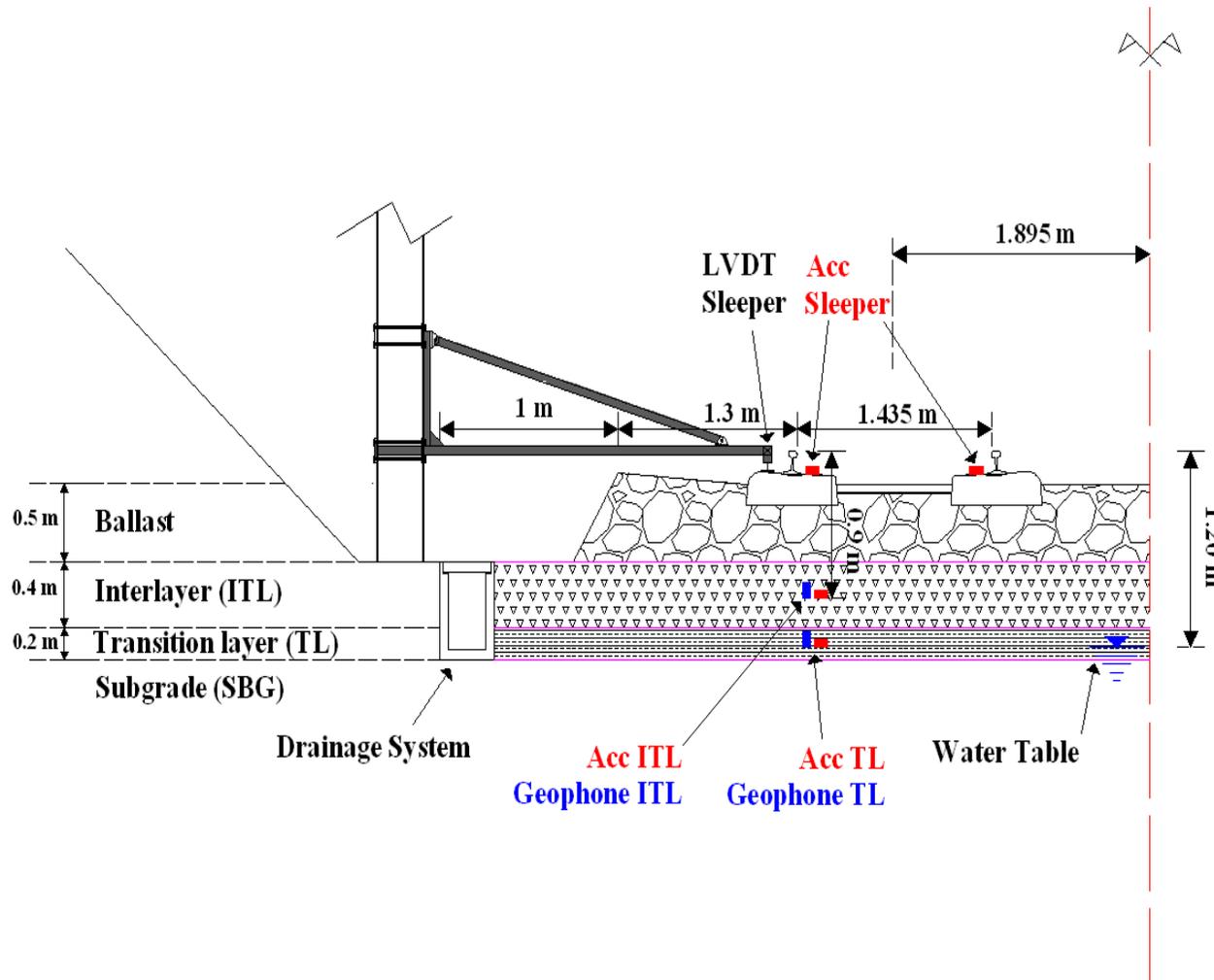


Capteurs utilisés dans l'étude

	MODEL	CAPACITY	DIMENSIONS	OTHER SPECIFICATIONS
ON-SURFACE ACCELEROMETER	ICP PCB-601 D01	$\pm 500 \text{ m/s}^2$	22 x 22 x 49.3 mm	Spectral noise at 10 Hz : $31.0 (\mu\text{m}/\text{sec}^2)/\sqrt{\text{Hz}}$ Frequency range : 0.47 to 10000 Hz
EMBEDDED ACCELEROMETER	TML ARH-10A	$\pm 10 \text{ m/s}^2$	16 x 16 x 28 mm	Rated Output Approx. 0.5 mV/V (1000×10^{-6} strain). Frequency response : 0.5 - 50 Hz Natural Frequency : 100 Hz
GEOPHONE	ION LF-24/0.3 Hz	$\pm 15 \text{ m/s}$	$\phi : 32.5 \text{ mm}$ L: 78.6 mm	Operational Temperature : $-20 - 60^\circ \text{C}$. Lower frequency : 0.3 Hz. IP 65.
LVDT	OMEGA LD661-10	10 mm	$\phi : 19 \text{ mm}$ L: 169 mm	Operational temperature $0-65^\circ \text{C}$. Vibration (sinudoidal), 10 to 50 Hz : 1 to 10 g rms linear. IP 68

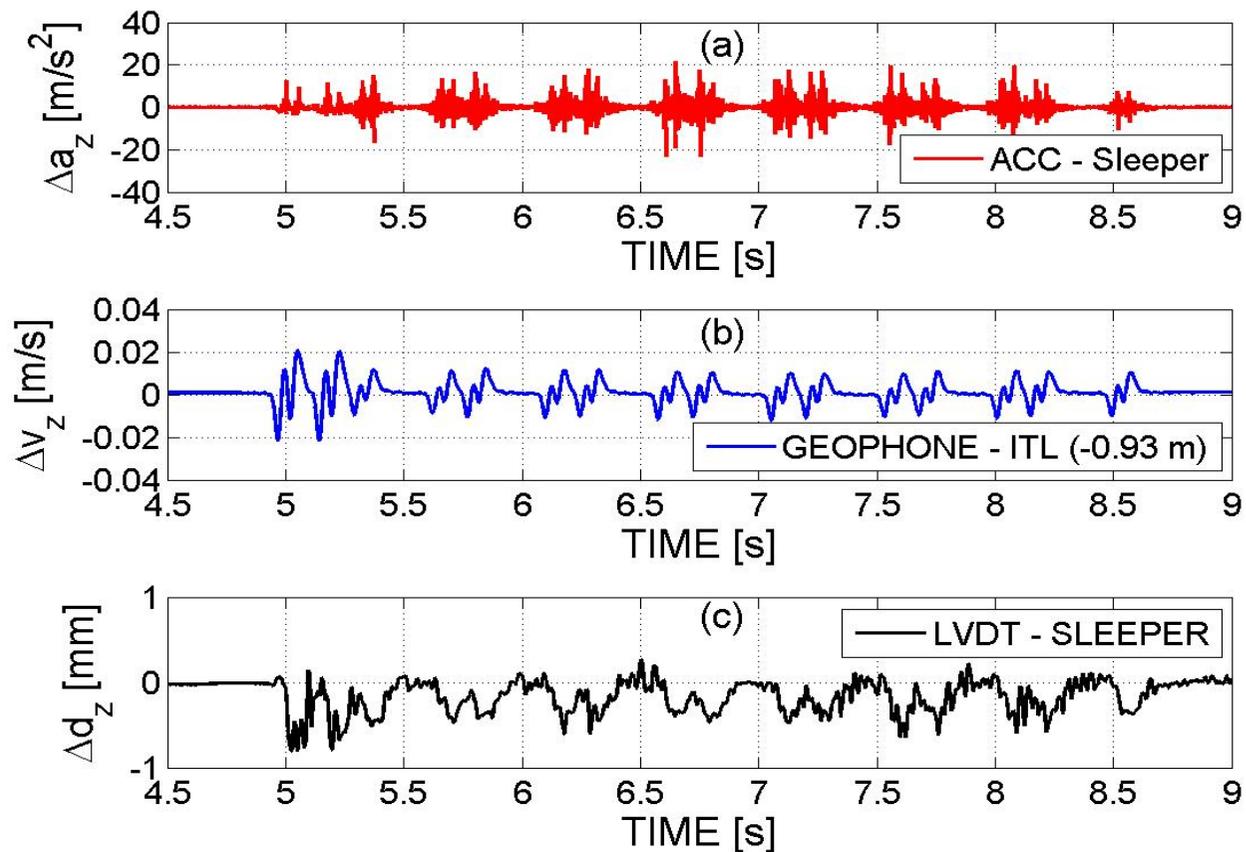


Schéma d'installation des capteurs dans la PFF



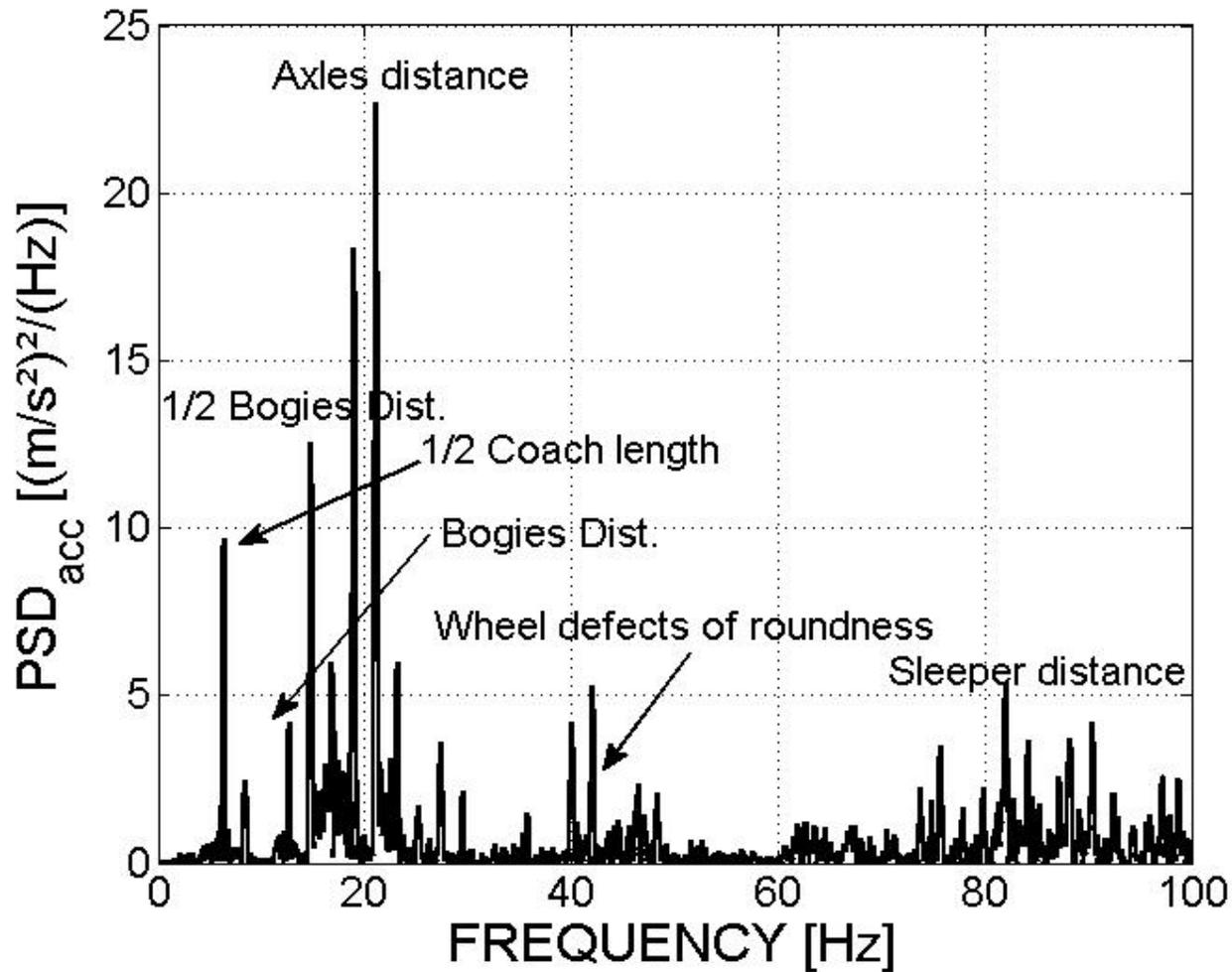
- Site d'expérimentation de Vierzon
- Ligne classique
- $V_{max} = 200$ km/h
- Trafic mixte (43% Intercités)
- Charge Admissible D4 (22.5 Mg/essieu)

Mesures sous passage d'un train

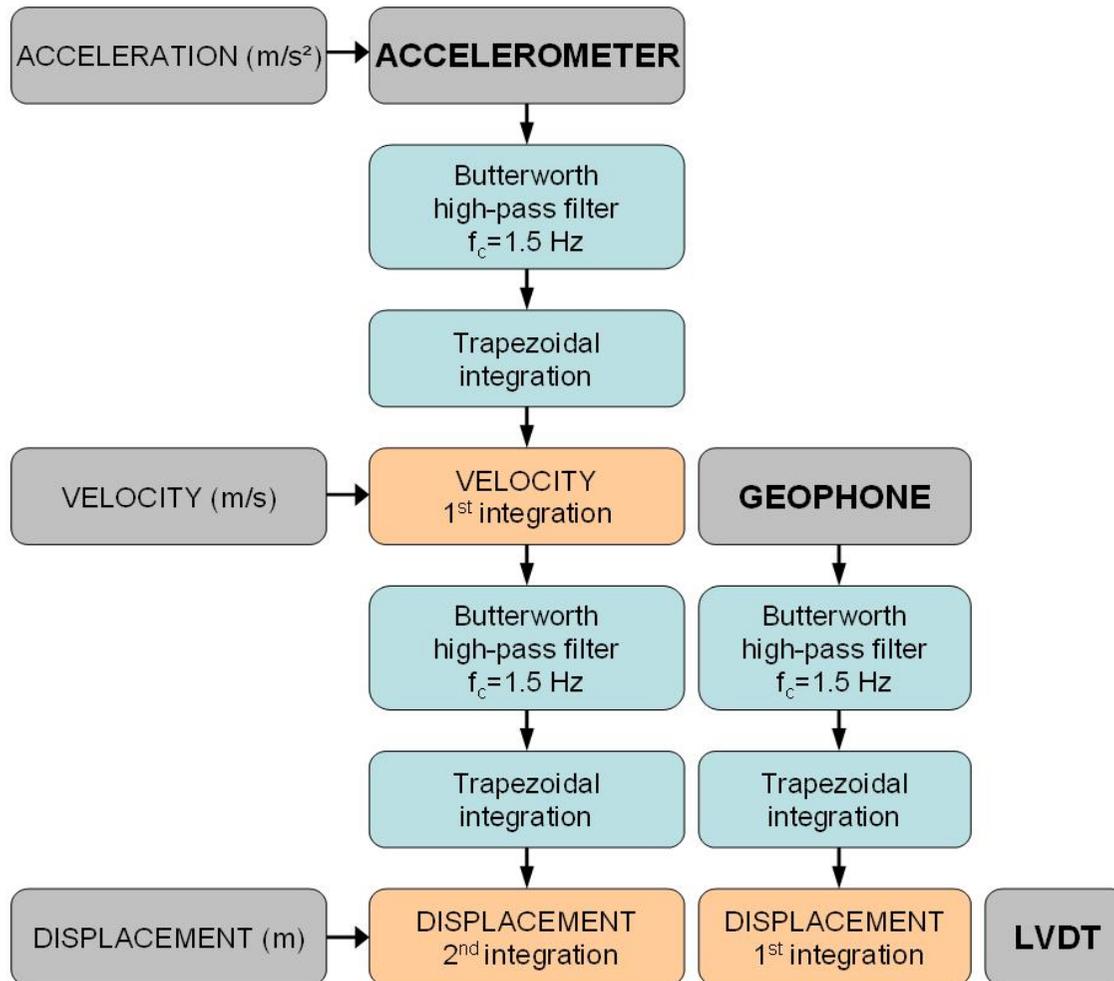


Mesures brutes sous passage d'un train Intercités roulant à 200 km/h (a) d'accélération verticale sur traverse, (b) vitesse en couche intermédiaire (-0.90 m) et (c) déplacement sur traverse avec LVDT

Quelles fréquences sont excitées lors du passage d'un train?

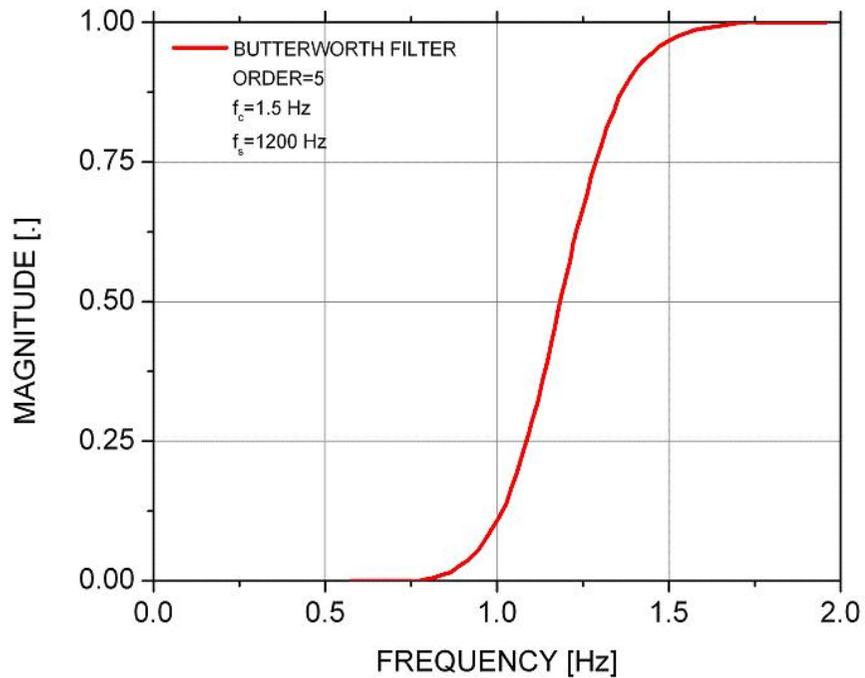


Procédure d'intégration

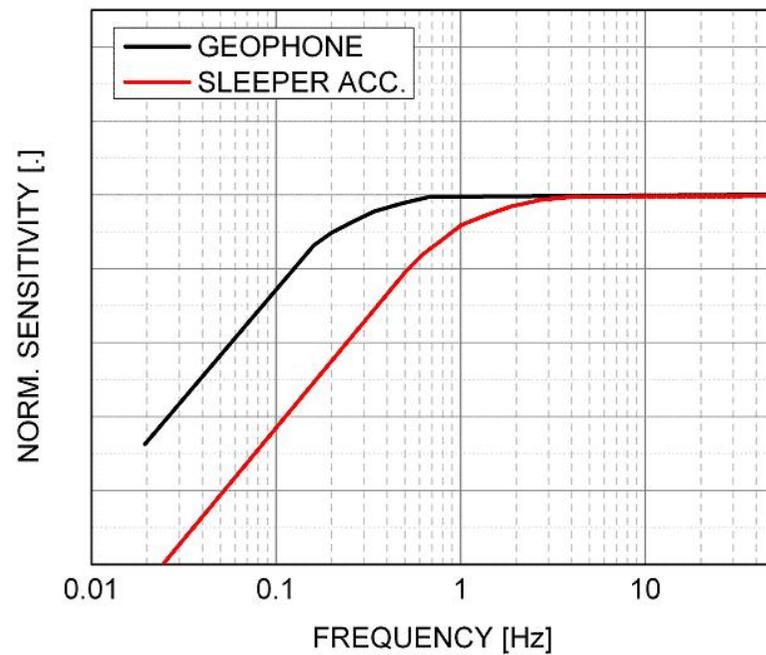


- Filtres 'pass-haut' pour éviter le 'baseline effect' après chaque intégration
- Filtres adaptés à chaque capteur (courbes de réponse fréquentielle)
- Filtrages adaptés à la vitesse des trains sur la ligne
- Utilisation du filtre Butterworth pour ne pas modifier le signal après la fréquence de coupure (aussi parce que le filtre est défini avec 2 paramètres)

Filtre appliqué et réponse fréquentielle capteurs

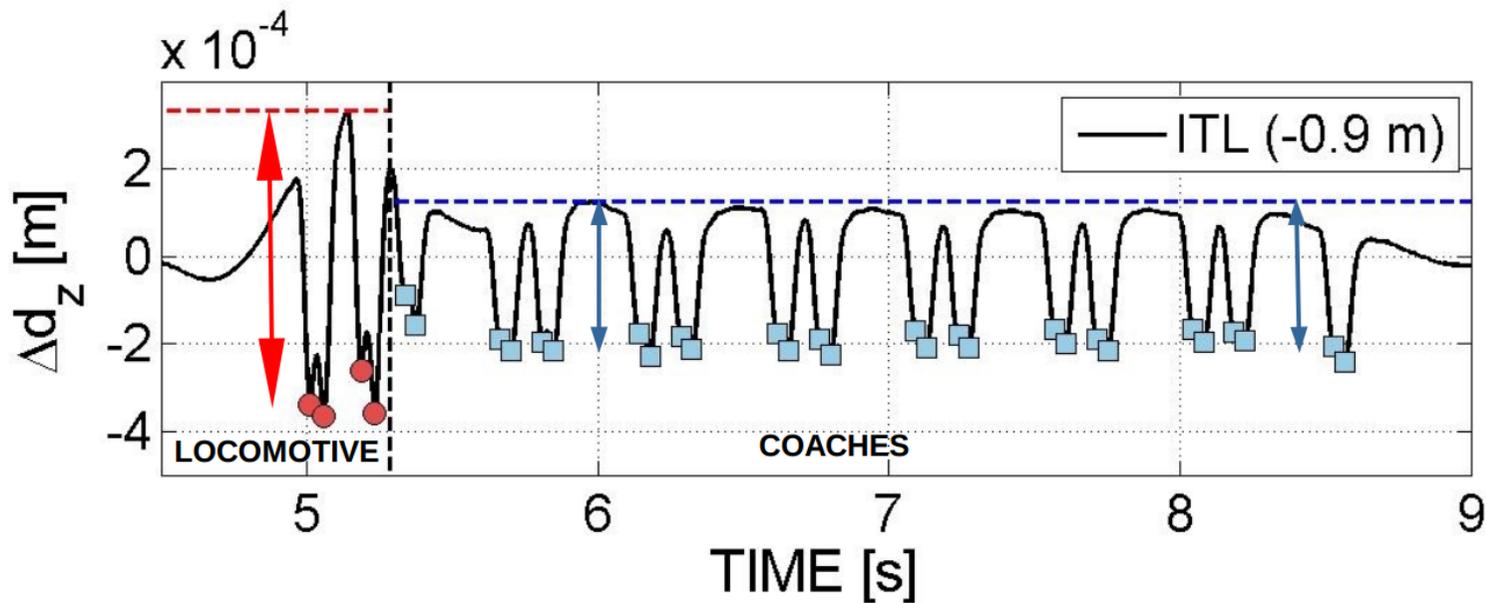


Filtre Butterworth d'ordre 5 avec fréquence de coupure 1.5 Hz pour une fréquence d'échantillonnage de 1200 Hz



Réponse fréquentielle normalisée entre 0 et 50 Hz pour les géophones et les accéléromètres utilisées

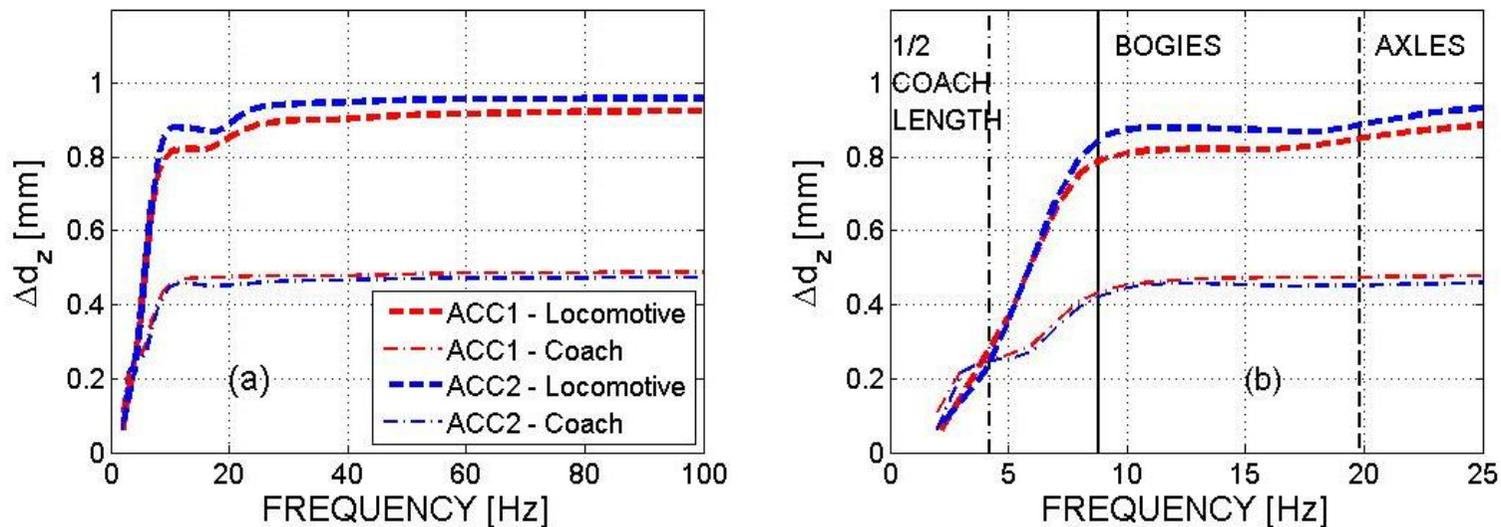
Définition des amplitudes de déflexion à partir d'un signal intégré



Déflection vertical au niveau de la couche intermédiaire (-0.90 m) produite par un train Intercités roulant à 200 km/h. Déflexion calculée à partir d'une double intégration d'un signal d'accélération.

Influence de chaque fréquence sur la déflexion mesurée (1/2)

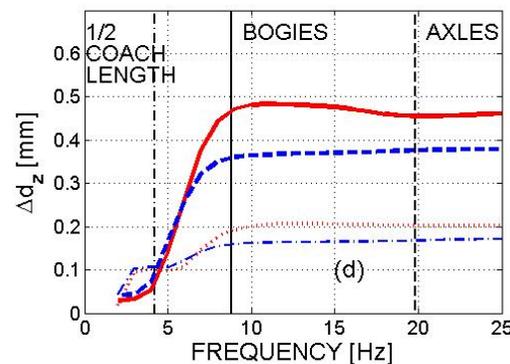
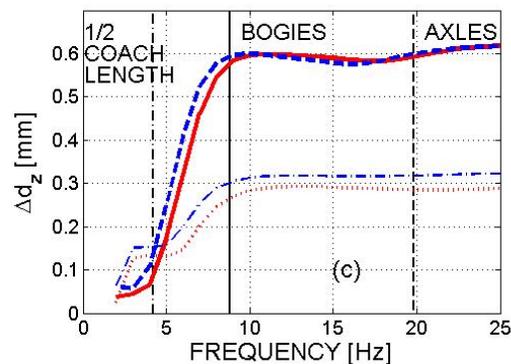
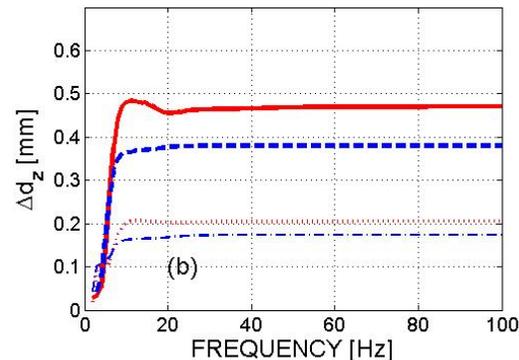
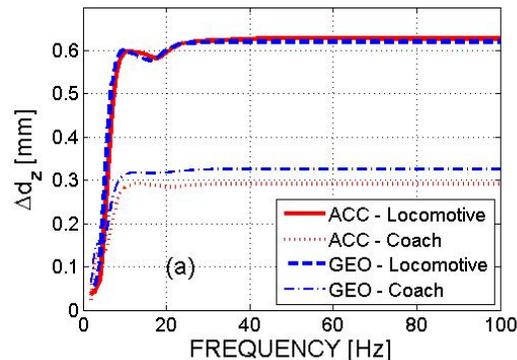
- Un filtre Butterworth ‘passe-bas’ est appliqué tous les 0.5 Hz depuis 1.5 Hz et l’amplitude de déflexion est déterminée



(a) Comparaison entre la déflexion produite sous passage d’un train Intercités à 200 km/h sur deux accéléromètres installés à chaque coté d’une même traverse et (b) zoom sur les 25 premiers Hz

Influence de chaque fréquence sur la déflexion mesurée (2/2)

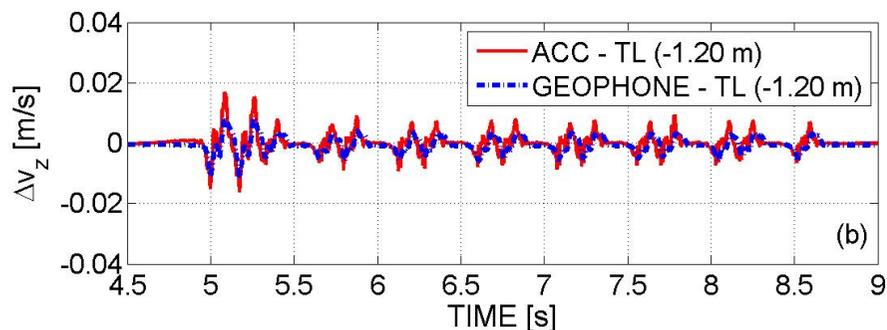
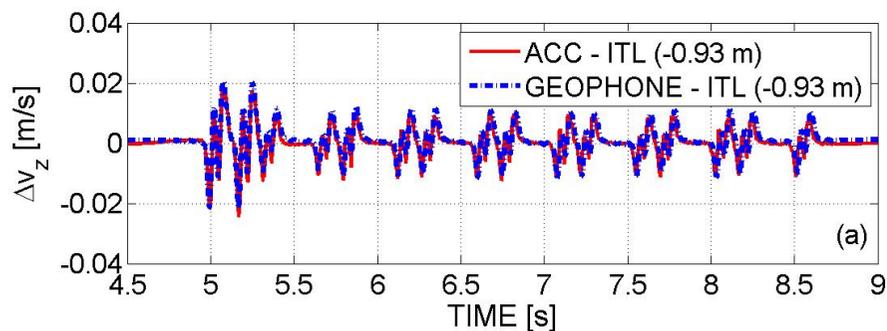
- Un filtre Butterworth ‘passe-bas’ est appliqué tous les 0.5 Hz depuis 1.5 Hz et l’amplitude de déflexion est déterminée



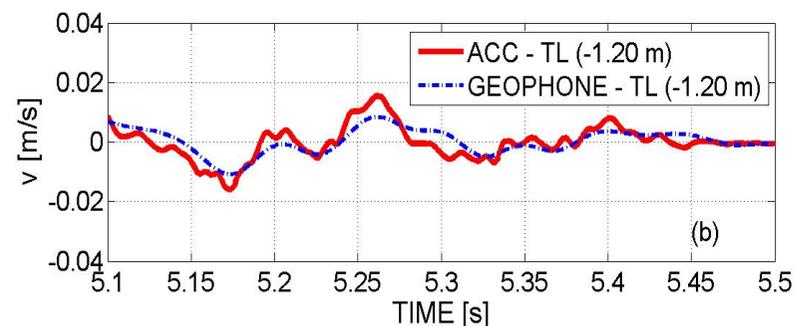
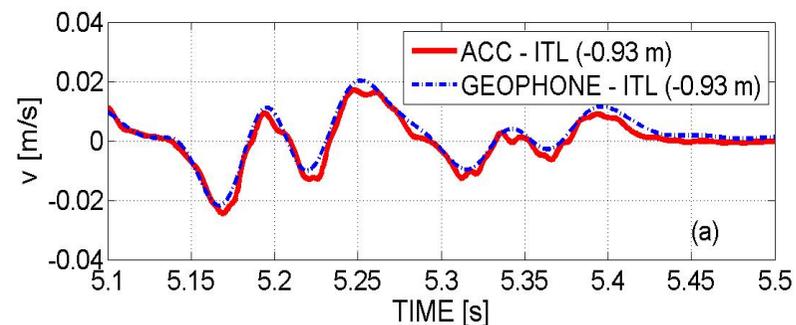
Comparaison entre la déflexion produite sous passage d’un train Intercités à 200 km/h sur un accéléromètre et un géophone installés (a) à la couche Intermédiaire (-0.90 m) et (b) à la couche de transition (-1.20 m). (c) et (d) montrent un zoom sur les 25 premiers Hz des deux figures précédentes respectivement

- Plus du 98% de l’amplitude totale de déflexion mesurée est produite par des longueurs d’onde plus grande que la distance entre essieux.
- $f = 21$ Hz pour trains à 200 km/h

Comparaison entre capteurs (1ere intégration)

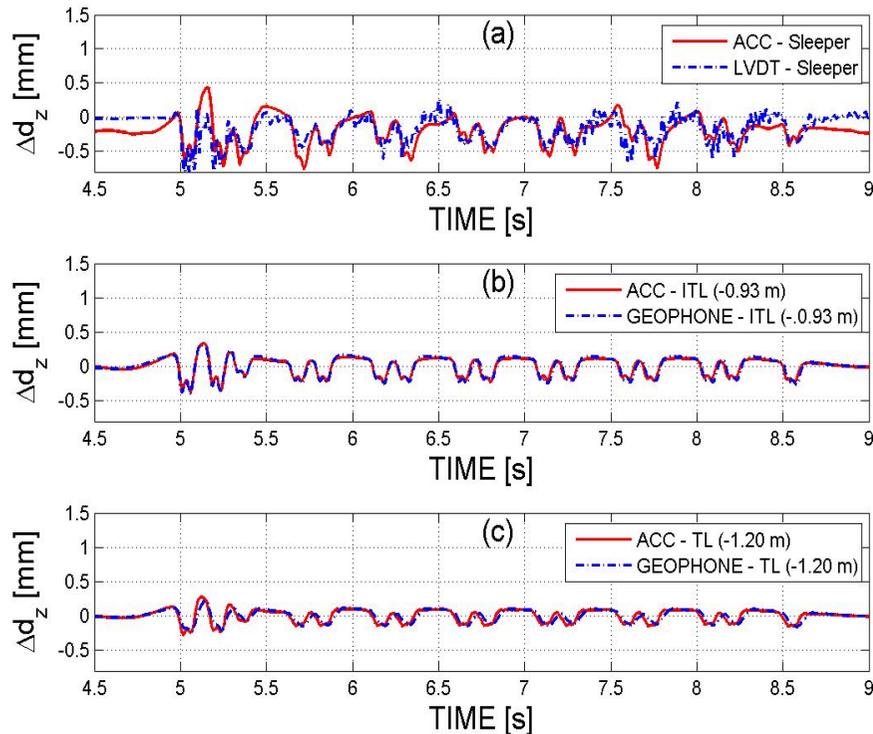


Comparaison entre la vitesse mesurée un accéléromètre et un géophone sous le passage d'un train Intercités roulant à 200 km/h (a) à la couche Intermédiaire (-0.90) et (b) à la couche de transition (-1.20 m)

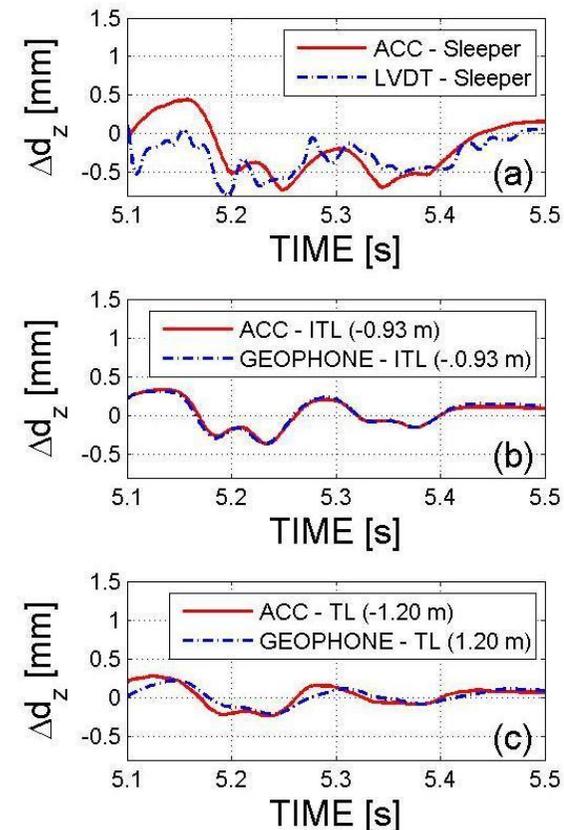


Zoom sur le dernier bogie d'une locomotive (22.5 Mg/axe) et le premier bogie des voitures (10.5 Mg/axe) pour comparer la vitesse mesurée par un accéléromètre et un géophone sous le passage d'un train Intercités roulant à 200 km/h (a) à la couche Intermédiaire (-0.90) et (b) à la couche de transition (-1.20 m)

Comparaison entre capteurs (2ème intégration)

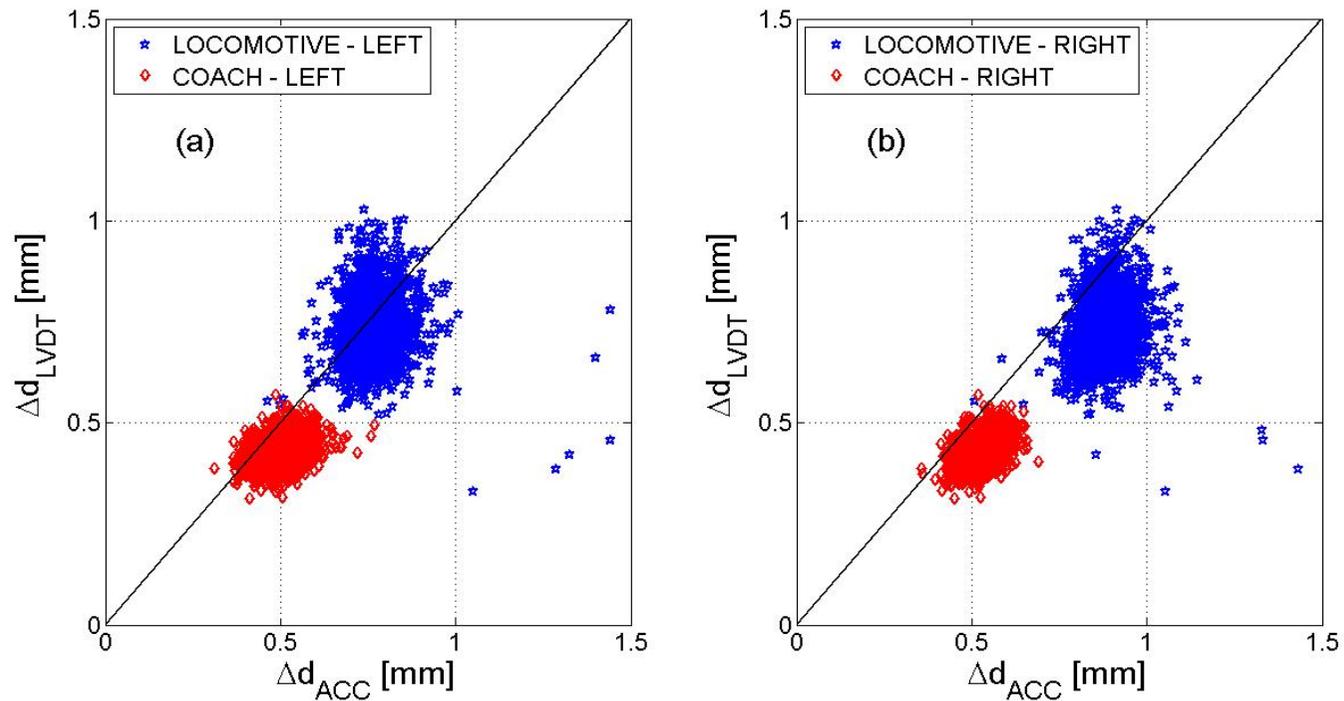


Comparaison entre la vitesse mesurée un accéléromètre et un géophone sous le passage d'un train Intercités roulant à 200 km/h (a) en surface, (b) à la couche Intermédiaire (-0.90) et (c) à la couche de transition (-1.20 m)



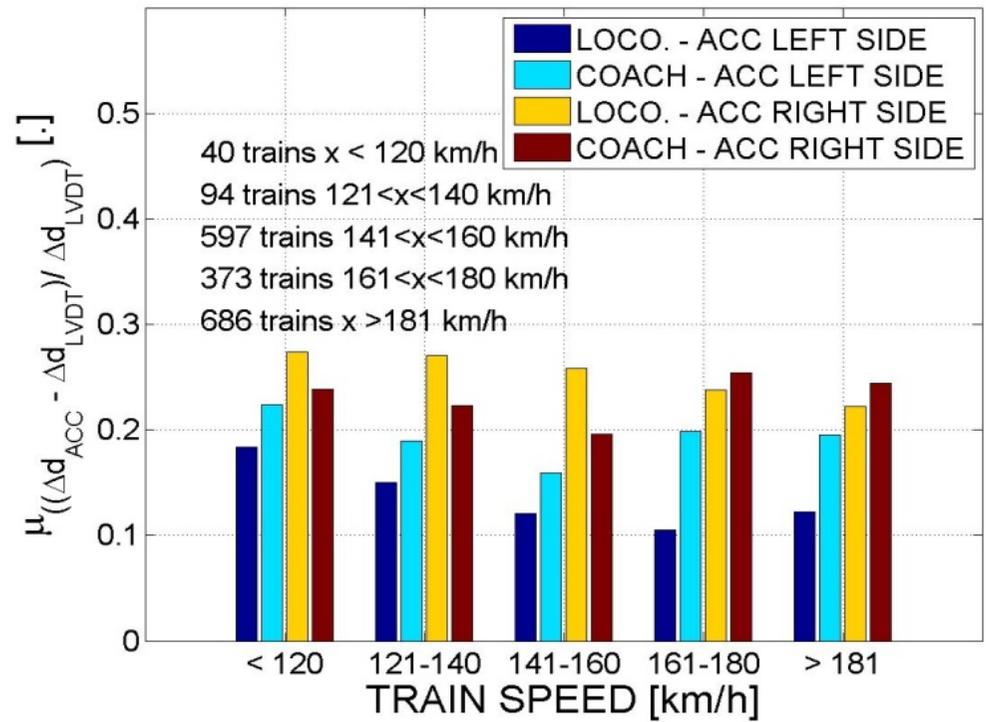
Zoom sur le dernier bogie d'une locomotive (22.5 Mg/axe) et le premier bogie des voitures (10.5 Mg/axe) pour comparer la vitesse mesurée par un accéléromètre et un géophone sous le passage d'un train Intercités roulant à 200 km/h (a) en surface, (b) à la couche Intermédiaire (-0.90) et (c) à la couche de transition (-1.20 m)

Analyse statistique des mesures de déflexion (1/3)



Comparaison entre amplitudes de déflexion moyennes par accéléromètres et LVDT pour la Locomotrice et les voitures de chacun des 1790 trains Intercités enregistrés sur le site de Vierzon (Vitesses comprises entre 60 km/h et 200 km/h). (a) rail gauche et (b) rail droite d'une traverse.

Analyse statistique des mesures de déflexion (2/3)



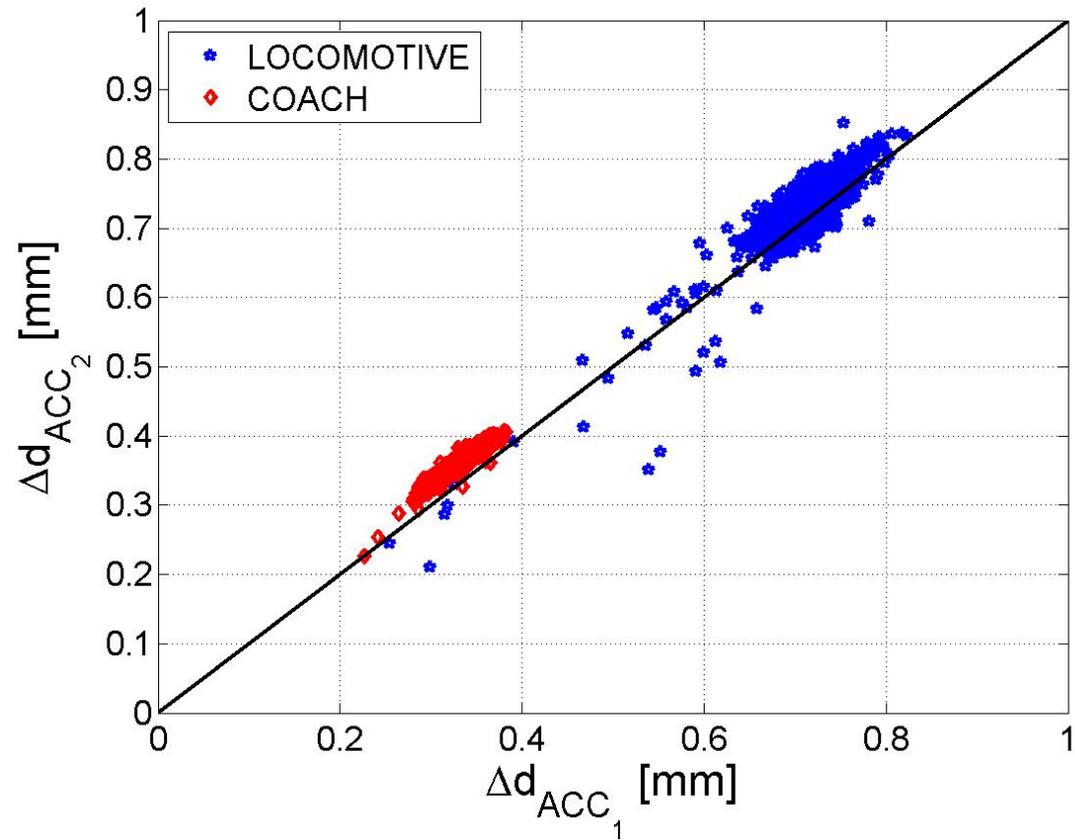
Différence moyenne normalisée entre déflexions mesurées par les accéléromètres et les LVDT, classifiées par charge, vitesse et position sur la traverse

Analyse statistique des mesures de déflexion (3/3)

				$(\Delta d_{z(ACC)} - \Delta d_{z(LVDT)}) / \Delta d_{z(LVDT)} * 100$				
				TRAIN SPEED [km/h]				
				x < 120 km/h	121 km/h < x < 140 km/h	141 km/h < x < 160 km/h	161 km/h < x < 180 km/h	181 km/h < x
SLEEPER	ACC/Left	Loco.	μ [%]	18.41	14.83	12.07	10.64	12.23
			σ [%]	10.05	11.41	12.19	9.12	22.18
		Coach	μ [%]	22.35	18.53	15.78	20.81	19.55
			σ [%]	13.16	12.69	12.18	11.93	11.49
	ACC/Right	Loco.	μ [%]	27.38	26.66	25.70	24.11	22.23
			σ [%]	13.27	10.44	14.15	12.77	22.41
		Coach	μ [%]	23.82	22.02	19.43	26.24	24.45
			σ [%]	9.61	11.47	11.52	10.97	10.83

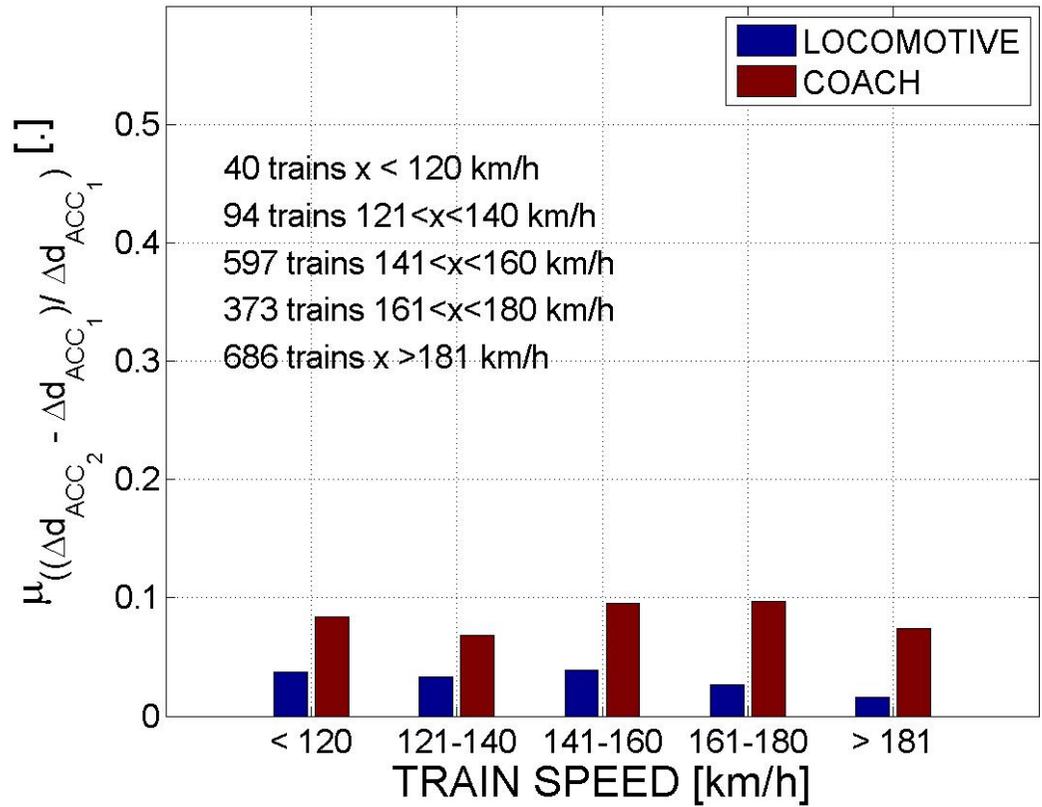
- Pour les charges à l'essieu 'lourdes' (Locomotrices) la moyenne de l'erreur diminue d'environ 5% quand la vitesse augmente mais l'écart type de la distribution augmente
- Pour les charges à l'essieu 'légères' (voitures) la vitesse n'a pas beaucoup d'influence sur la distribution des différences

Répétabilité des mesures (1/2)



Comparaison des mesures de déflexion sur deux accéléromètres différentes installés sur la même traverse. 1790 trains Intercités.

Répétabilité des mesures (2/2)



Erreur moyen normalisé entre les mesures de déflexion calculés à partir de deux accéléromètres installés sur la même traverse.

Conclusions

- Une méthode pour estimer la déflexion sur des mesures d'accélération ou vitesse verticale des matériaux sous passage d'une charge dynamique a été déterminé et prouvée
- A partir de 25 Hz de sollicitation l'incrément de déflexion est inférieur au 2% (pour des trains roulant jusqu'à 200 km/h). Les longueurs d'onde plus petites que la distance entre essieux imposent des déflexions négligeables aux matériaux de l'infrastructure
- Il y a une bonne corrélation entre estimations de déflexion pour les trois capteurs utilisés
- L'erreur moyen entre les valeurs mesurées (LVDT) et les valeurs estimées (Acc.) de déflexion diminue avec la vitesse pour les charges lourdes et reste constante pour les charges plus légères
- Il existe une bonne répétabilité des mesures sous conditions similaires avec erreurs moyennes de moins du 10% pour toutes les vitesses et les deux charges testées



Merci de votre attention

Francisco LAMAS-LOPEZ

SNCF - RESEAU

**DIRECTION PROJETS SYSTEME INGENIERIE
(PSIGT)**

6, Avenue François Mitterrand

93574 La Plaine Saint-Denis (FRANCE)

francisco.lamas-lopez@enpc.fr

ANNEXES

