

Journées Techniques Acoustique et Vibration

Caractérisation de la compacité du ballast ferroviaire par méthodes sismiques

Delphine JACQUELINE

Thèse soutenue le 17 décembre 2015 et encadrée par

M. Jean-Pierre MAGNAN, M. Jean-François SEMBLAT et M. Cyrille FAUCHARD

Mercredi 01 juin 2016



IFSTTAR

UNIVERSITÉ
— PARIS-EST

Plan

1 Introduction

- Contexte
- Description du milieu
- Ballast
- Démarche

2 Expérimentations

- Description
- Instrumenter le ballast
- Traitement des ondes

3 Modélisation

- Modélisations
- Continue
- Discrète

4 Conclusions

- Expérimentations échelle 1
- Modèles réduits
- Perspectives

Description du milieu étudié

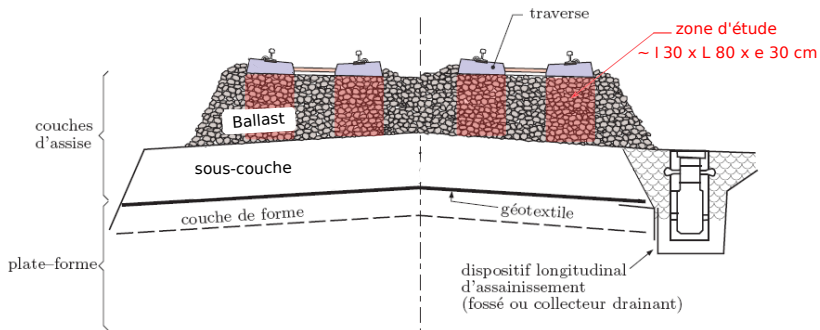


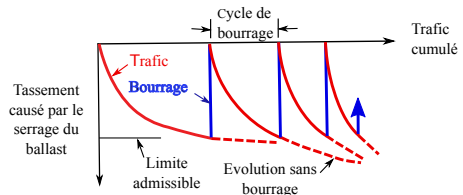
Illustration d'une structure ferroviaire - Kouroussis 2009

Besoin de caractériser la compacité du ballast ?

- **Serrage du ballast** : paramètre ferroviaire important pour assurer **qualité de l'ouvrage** (défaut de serrage → diminution de vitesse de train) **sécurité de l'usager**,
- **Étude de ce paramètre par la compacité au moyen de méthodes sismiques**,
- **Méthodes** existantes **ponctuelles et difficiles** à mettre en place, **littérature succincte** propagation dans ballast,
- **Demande forte des exploitants** de voie (SNCF),
 - Vieillesse des voies (**doublent de la maintenance**),
 - **Besoin de vérification de la mise en œuvre du ballast** (ouverture des marchés), objectif de moyen (6 passages de la bourreuse) → objectif de résultats (densité),



Bourreuse (Colas Rail)



Relation tassement - bourrage

- Intérêt des **méthodes non destructives** (grand linéaire, zone d'études, circulation),

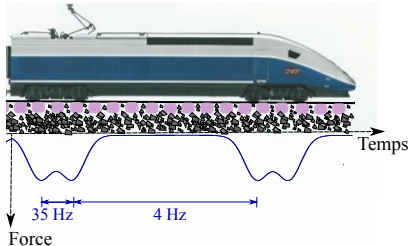
Le ballast : un milieu complexe ?

- Milieu complexe différent d'un milieu continu :
 - Éléments grossiers (25-50 / 31,5-63 mm), **VER** (Volume Élémentaire Représentatif), épaisseur de couche, **e**, faible,

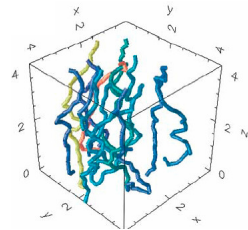
$$\frac{e}{\text{VER}} < 10$$



- Empilement de grains soumis à la charge du train créant des chaînons de force.



Sollicitation d'un TGV



Huillard 2012

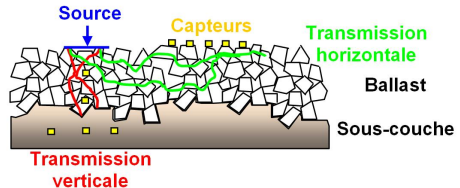
Quelle est la démarche scientifique ?

Deux orientations sont envisagées :

- 1 **Analyse du ballast à grande échelle** : expérimentations à l'échelle 1 pour étudier sa compacité au moyen de la réfraction, la dispersion des ondes de surface et le rapport H/V → **hypothèse d'un milieu continu** (Payeur 2013, Zhai 2004, Bodin 2001).



Expérimentation échelle 1



Schémas des expérimentations

Sources de faible énergie pour rester dans une réponse linéaire
→ hypothèse milieu pseudo élastique sans déplacement d'éléments.

Quelle est la démarche scientifique ?

② Analyse du ballast avec un dispositif de petite dimension : expérimentation sur modèle réduit → hypothèse d'un milieu discret (Saussine 2004, Guerin 1996)

- étudier la réponse du ballast suivant sa compacité à un effort à travers une couche de 15 et de 30 cm de ballast,
- comparer avec une modélisation continue aux éléments finis (CESAR-LCPC) et une modélisation discrète (STTAR3D, Dimnet 2002).



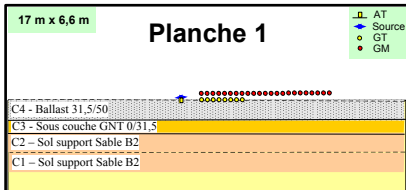
Modèle réduit

Ces comparaisons doivent permettre :

- apprécier la pertinence des méthodes de modélisation,
- aider à comprendre les phénomènes physiques.

Planche expérimentale 1

Définir les paramètres des dispositifs sismiques.



Vue en coupe

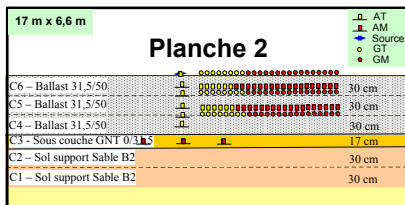


Dispositif expérimental

30 cm de ballast compacté et foisonné				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
8 GT	3	MarteauV Vibrateur P Vibrateur I	15	Réfraction
			25	MASW
			35	
			45	
			55	H/Vévènement ? Pic à 1000 et 1500 Hz
24 GM Ifsttar	Enregistrements avec sources face aux 8G3D			?
	Quelques essais	Vibrateur I	48	Réfraction
				MASW
Nombre d'essais = 100				

Planche expérimentale 2

Pour étudier l'influence de l'épaisseur du ballast.



Vue en coupe

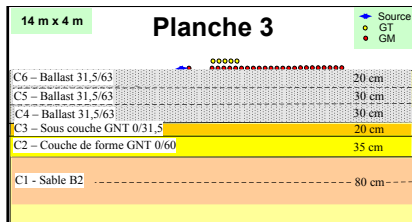


Dispositif expérimental

30 - 60 - 90 cm de ballast compacté et foisonné				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
8 GT +16 GM	5	MarteauV	25	Réfraction
		BouleP	35	MASW
		MarteauH	45	
		Vibrateur P	55	H/Vévènement
		Vibrateur I	110	
6 AT + 10 AM				
Nombre d'essais = 750				

Planche expérimentale 3

Pour valider les méthodes MASW et H/V BDF.



Vue en coupe

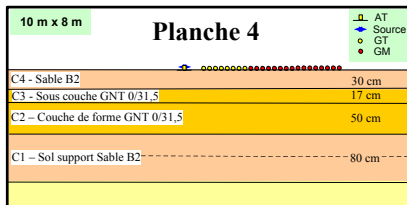


Dispositif expérimental

80 cm de ballast compacté et foisonné				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
24 GM	5	MarteauV BouleP	25	Réfraction
5 GT			55	MASW
			110	H/V BDF
Nombre d'essais = 60				

Planche expérimentale 4

Pour comparer les essais du ballast avec un milieu continu



Vue en coupe



Dispositif expérimental

30 cm de sable compacté				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
8 GT +16 GM	5	MarteauV Vibrateur P Vibrateur I	25	Réfraction
			35	MASW
			45	
			55	
			110	
Nombre d'essais = 60				

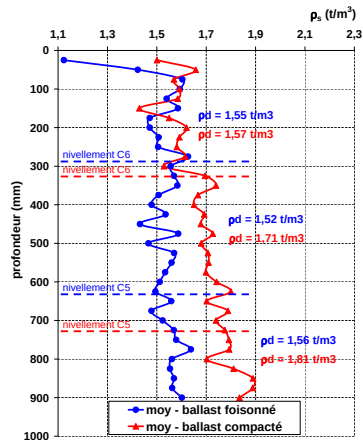
Masse volumique mesurée par méthode nucléaire



Tassement de 4 à 10 cm

ρ_s augmente avec la profondeur

- ρ_s ballast compacté : $1,81 \pm 0,06 \text{ t/m}^3$ (épaisseur 30 cm),
- ρ_s ballast foisonné : $1,56 \pm 0,04 \text{ t/m}^3$.

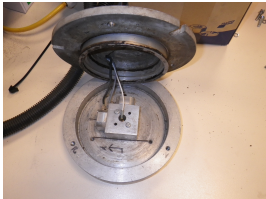


Masse volumique du ballast
(GDS200)

Choix des capteurs

- Instrumentation à la source

Accéléromètre



1^{er} géophone



Géophone à la source



- permet de caractériser la source et normaliser les essais,
 - utiliser le même type de capteur que le reste de la flûte sismique.
- Instrumentation en surface sur le ballast

Géophones

- GT 100 Hz sensibilité de 35 V/m/s,
- GM 4,5 Hz sensibilité de 25 V/m/s

Choix de la fixation

Optimisation de la réponse du capteur par scellement → spectre FFT

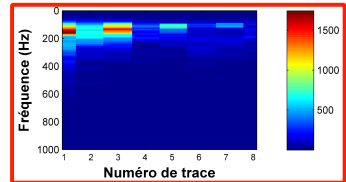
Géophone posé



Accéléromètre collé



Posés



- Réponse aléatoire fonction des contacts → Non interprétable

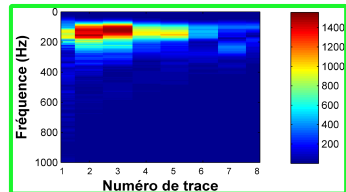
Géophone scellé



Géophone scellé



Scellés



- Moyenne l'effet de la transmission du signal

Choix des sources

Sources faiblement énergétiques sans panneau de voie

Marteau 1kg



$f_p = 150 \text{ Hz} / F = 1 \text{ kN}$

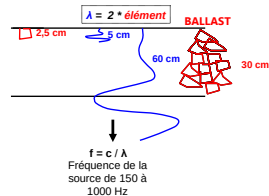
Chute
masse



Sollicitation
horizontale



Choix des fréquences
des sources et longueur
d'ondes



Vibrateur
Inertiel

Rampe 200-1000 Hz / $F = 0,66 \text{ kN}$

$f_{\text{par } 100\text{Hz}} = 100 \text{ à } 600 \text{ Hz} / F = 0,66 \text{ kN}$

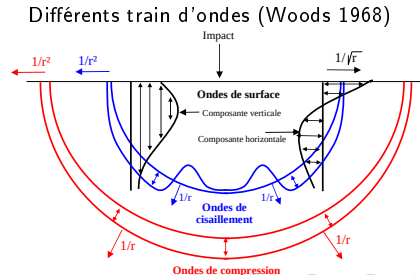
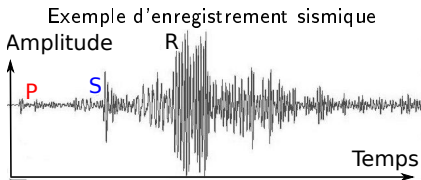


Vibrateur
pneumatique

$f = 300 \text{ Hz maxi} / F = 7 \text{ kN}$

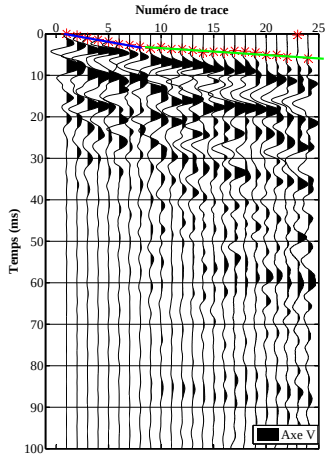
Les différents aspects étudiés

- Rapport spectral signal sur bruit
- Ondes P
 - Vitesse des ondes (directe et réfractée),
 - Amortissement des ondes,
- Ondes R
 - Courbe de dispersion,
- Analyse du signal
 - Rapport H/V évènement et bruit de fond.



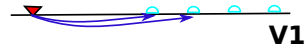
Calcul des vitesses de propagation des ondes P

Détection de l'arrivée des ondes
(5% du pic maxi)

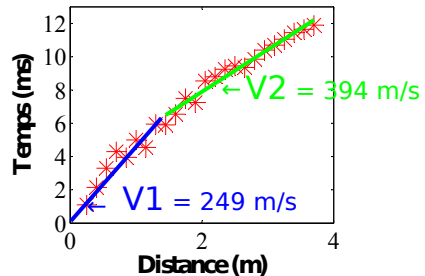
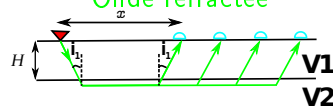


Traces sismiques

Onde directe

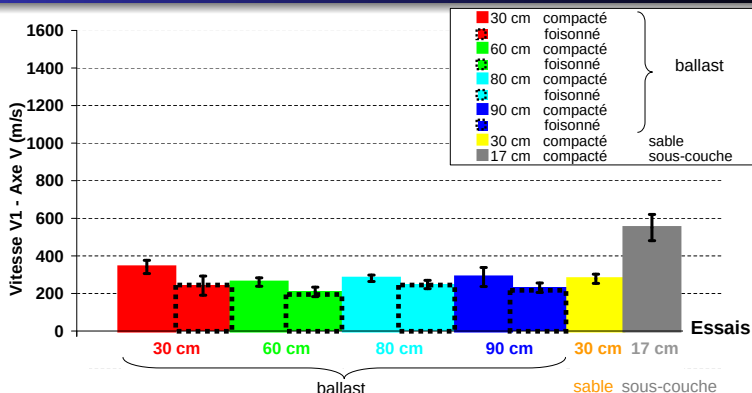


Onde réfractée



Hodochrone

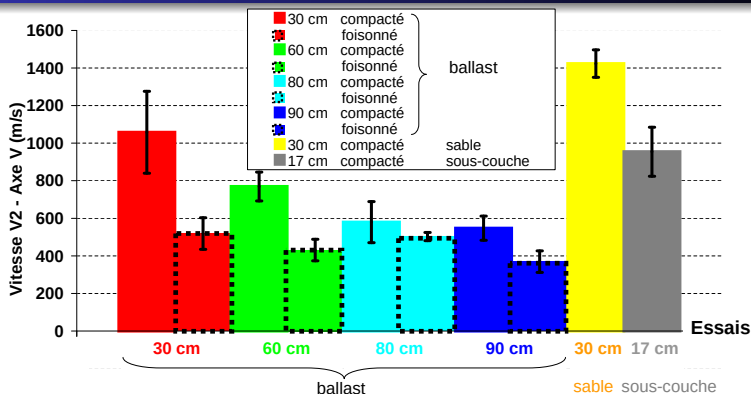
Synthèse des vitesses des ondes P directes - V1



- Nb d'essais : $\simeq 300$ (ρ , Offset, épaisseur, répétabilité)
- $V1_{\text{compacté}} > V1_{\text{foisonné}}$
- $V1$ peu dépendant de l'épaisseur.

V_P	Ballast compacté	Ballast foisonné	Sable compacté
$V1$ (m/s)	300 ± 40	210 ± 20	280 ± 20

Synthèse des vitesses des ondes P réfractées - V2



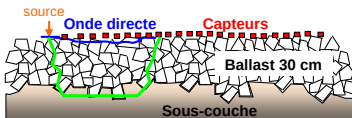
- Nb d'essais : $\simeq 300$ (ρ , Offset, épaisseur, répétabilité)
- $V2_{\text{compacté}} > V2_{\text{foisonné}}$
- $V2$ dépendant de l'épaisseur.

V_P	Ballast compacté	Ballast foisonné	Sable compacté
V2 (m/s)	750 ± 250	400 ± 100	1400 ± 70

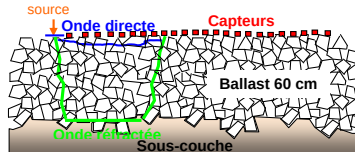
En théorie

Réfraction interface Ballast / Sous-couche

→ V2 identique quelque soit l'épaisseur de ballast



30 cm de ballast

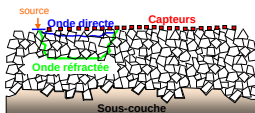


60 cm de ballast

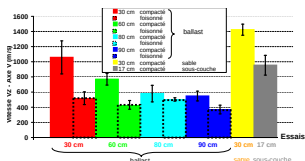
Observations non conformes à la théorie

Hypothèse

Réfraction zone de compactage dans ballast



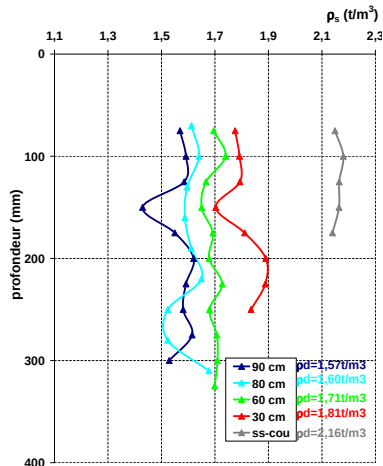
Couche de 60 cm



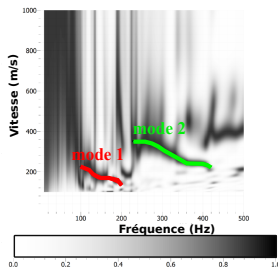
Vitesse dans ballast compacté

- V2 est influencée par l'interface sous-jacente
- $\approx V2$ correspond à $\rho_d \neq$ couches,
- V2fouonné varie - que V2compacté $\rightarrow$ influence de ρ_s sur V2compacté

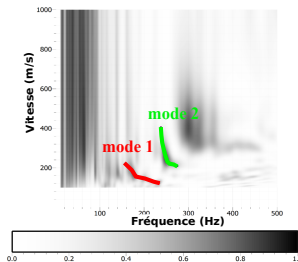
Masse volumique mesurée



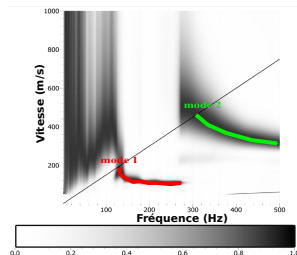
Ondes de surface - courbe de dispersion moyenne



30 cm ballast compacté



30 cm ballast foisonné

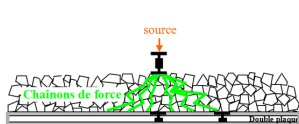


30 cm sable compacté

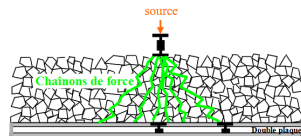
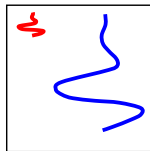
- Détection pertinente sur ballast,
- Mode 1 : V_R 50 à 150 m/s entre 100 et 200 Hz.
- Mode 2 : V_R 150 à 250 m/s entre 200 et 400 Hz.

Modèle réduit

- **Expérimentations grande échelle** → Traitement des ondes **répond en partie** dans le ballast sur l'influence des **vitesse**s mais **pas sur l'amortissement des ondes**,
- Nécessité de **comprendre** les phénomènes au moyen de **modélisations de faible dimension**.



Diffraction prépondérante

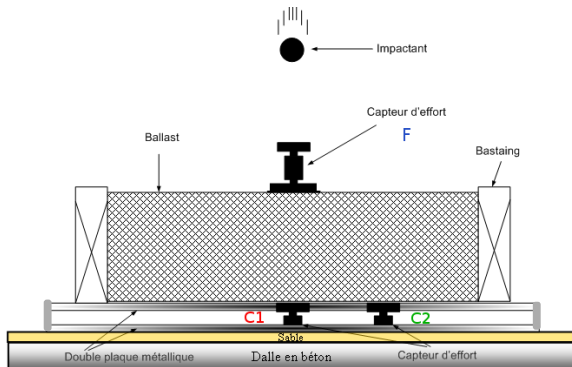


Rapprochement milieu continu

- Transmission d'un effort à travers une couche de ballast (C-F),
- Dispositif de faible dimension (1 m^2)
→ limiter temps de calcul,

Modèle réduit

Plot expérimental comparé à une modélisation continue et discrète.

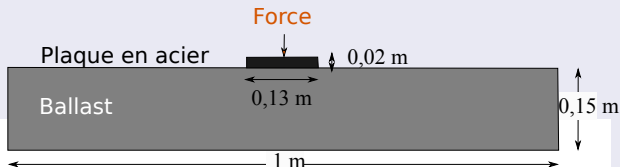


- Couche de ballast de faible dimension (1*1*0,15 et 0,30 m)
- Appui sur un support rigide, efforts sur +sieurs éléments,
- $\rho_d(\text{foisonné}) = 1,51 \text{ t/m}^3$, $\rho_d(\text{compacté}) = 1,63 \text{ t/m}^3$.

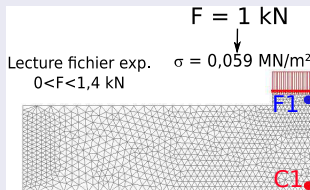
Modèle continu

- Hyp. : le ballast comme un milieu continu (CESAR-LCPC)

Géométrie du modèle



Chargement appliqué et points de mesure



Détermination des paramètres d'amortissement de Rayleigh

- Analyse réponse dynamique linéaire du milieu par éléments finis suivant équation d'équilibre dynamique :

$$[M]\ddot{X}(t) + [C]\dot{X}(t) + [K]X(t) = F(t)$$

- Façon de modéliser l'amortissement

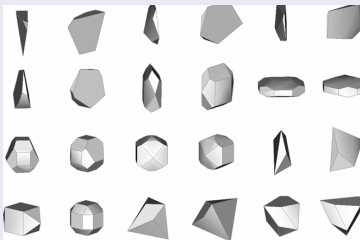
→ formulation de Rayleigh : $[C] = \alpha[K] + \beta[M]$

→ Amortissement $\eta = 2\xi = \frac{\alpha}{\omega} + \beta\omega$

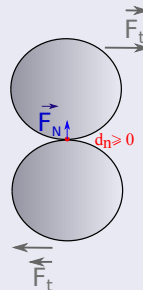
Modélisation discrète

- En collaboration avec l'Ifsttar, **code pour le calcul des milieux discrets** (Dimnet 2002),
- Méthode de calcul de la famille des **méthodes Contacts Dynamics** (Dal-Pont and Dimnet 2004, Jean 99, Moreau 88),
- couche générée aléatoirement.

24 types de polyèdres 3D Huang 2010

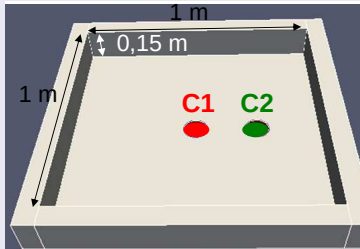


Contact unilatéral

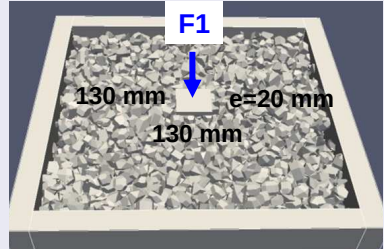


Couche granulaire modélisée

Caisson en bois de 1*1*0,15m
instrumenté et modélisé



Couche granulaire modélisée
avec plaque de répartition

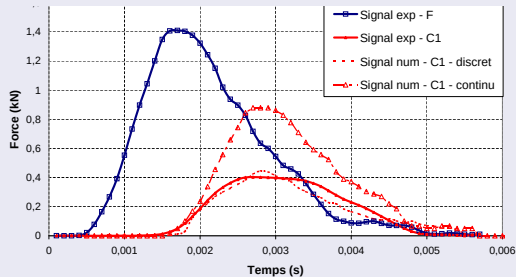


Génération de la couche granulaire

- Couche générée aléatoirement,
- Agrégats tombant avec une distance au centre de 60 mm,
- Agrégats de 20 à 60 mm (librairie Huang, 2010).

Comparaison mesure et simulation discrète/continue

15 cm de ballast foisonné, $H=30\text{cm}$



C1 - 15 cm

- Modèle discret plus proche de l'expér. que le modèle continu,
- pente plus forte modélisation continue.

Conclusions des expérimentations à grande échelle

- BDD sismique expérimentale très importante (nombre d'essais >900),
- Travail utile pour les mesures sismiques ferroviaires avec définition d'une méthodologie d'essais (24G, Scellement, écartement géophone de 15cm), Sismique = indicateur qualitatif de la compacité
 - Variation de 30 % de V_P ,
 - $V_2 = f(\rho)$,
 - V_1 aussi mais moins visible, pb scellement.
- Compléments pour indicateur quantifiable de la compacité,
- Ballast $\neq$ équations de milieu continu
 - Décroissance d'amplitude plus forte dans compacté pour certains cas,
 - Mode 1 courbe de dispersion peu visible.
- Mécanique des milieux granulaires non linéaire,

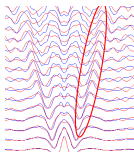
Conclusions des modèles réduits

- Résultats similaires aux planches à l'échelle 1
 - Ballast compacté pouvant amortir plus,
 - Grande variabilité des résultats suivant les contacts,
 - Visualisation de la non linéarité du ballast.
- Néanmoins V_P plus faibles 90 à 220 m/s au lieu de 220 à 300 m/s (élastomère ?),
- Paramétrage difficile de la modélisation continue,
- Modélisation discrète plus adaptée, néanmoins intégrer entrée du ballast.

Perspectives

Grande échelle

- Modélisation des **courbes de dispersion théorique** en poursuivant l'étude paramétrique,
- **Crosscorrélation de bruit de fond sismique** (LR de Nice, D. Mercerat)
- **Réponse de la traverse** en fonction de ρ et e



Temps (s) - Crosscorrélation



Réponse de la traverse

Modèle réduit

- Modélisation continue avec des **modèles d'amortissement type NCQ**,
- Intégration dans le **modèle discret** la réponse de l'**entrée du ballast**.

Merci pour votre attention !
delphine.jacqueline@cerema.fr

Articles :

- D. Jacqueline, C. Fauchard, J-F. Semblat et J-P. Magnan, 2014, Propagation d'ondes sismiques dans le contrôle de compactage du ballast ferroviaire, Conférence internationale Georail à Paris (France),
- D. Jacqueline, S. Hemmati, G. Vincelas et E. Dimnet, 2014, Mesure et simulation de la propagation de vibrations à travers une couche de ballast, Conférence internationale Georail à Paris (France),
- D. Jacqueline, E. Dimnet, S. Hemmati, G. Vincelas, 2015, Numerical modelling and experimental measurment of the propagation of a mechanical signal through a ballast layer, Panamerican conference on soils mechanics and geotechnical engineering à Buenos Aires (Argentine).