

Sujet thèse : Caractériser l'état de serrage du ballast par la propagation d'ondes

Ministère de l'Écologie,
du Développement
durable et de l'Énergie



Centre d'Études
Techniques de
l'Équipement
Normandie Centre

Centre
d'Expérimentation
et de Recherche

Expérimentation

Date : 10/10/2012

Directeurs thèse :

Jean-Pierre MAGNAN (IFSTTAR Paris)

Jean-François SEMBLAT (IFSTTAR Paris)

Conseiller technique :

Cyril FAUCHARD (LR Rouen)



Delphine JACQUELINE

Thèse : 2010-2014

CER Rouen

- Contexte de l'étude
- Objectifs de la thèse
- Expérimentation
 - Description plots et dispositifs de mesure
 - MEO
 - Résultats MEO
 - Résultats propagation dans ballast
 - Résultats H/V
 - Résultats OS
- Conclusions et poursuites

- Suite directive européenne années 90, marchés ouverts à la concurrence :
- Séparation «gestion infrastructure » (RFF) et «exploitation» (SNCF ou...) → fret en 2005, voyageurs en 2010
 - Exemples :
 - LGV Est (P1-2011) : RFF (MO) + Inexia-arcadis, Setec, Egis (Mo) + équipements (Inexia) + raccordement réseau (SNCF)
 - LGV Tours Bordeaux (2017) : Construction, exploitation, maintenance (Vinci Lisea) voie concédée

- SNCF : Objectif de moyens → objectif de résultats :
 - Suivi des chantiers de renouvellement des voies par la SNCF → empiriquement 6 passages de bourreuse



Bourrage :

- mise en place mécanique du ballast sous une voie par vibration
- réglage profil en long et en travers

- Ouverture marchés → nécessité de vérifier de façon rapide l'état de serrage du ballast (méthode non destructive)

- Etudier l'état de serrage du ballast par la propagation d'ondes

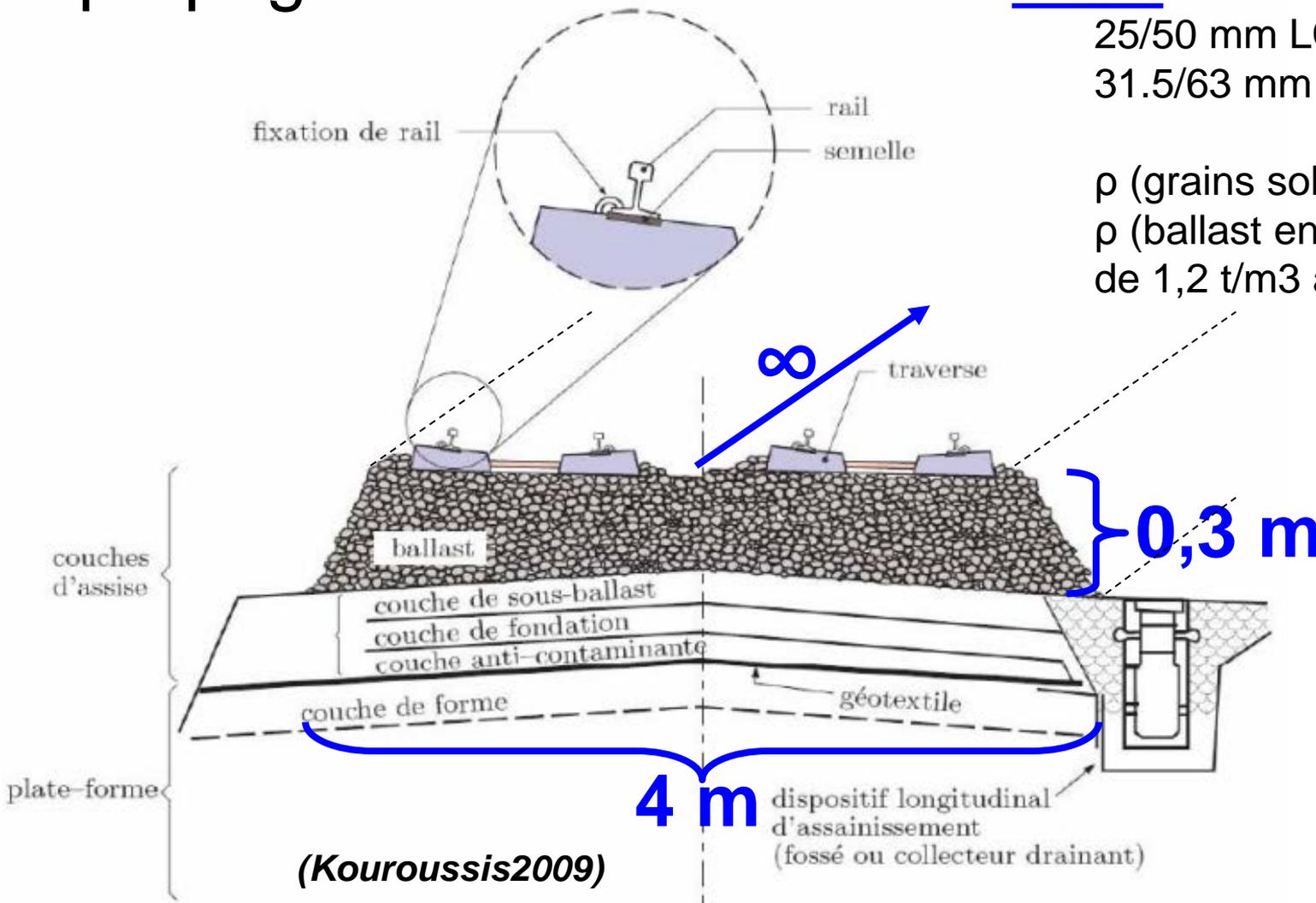
Ballast :

25/50 mm LC

31.5/63 mm LGV

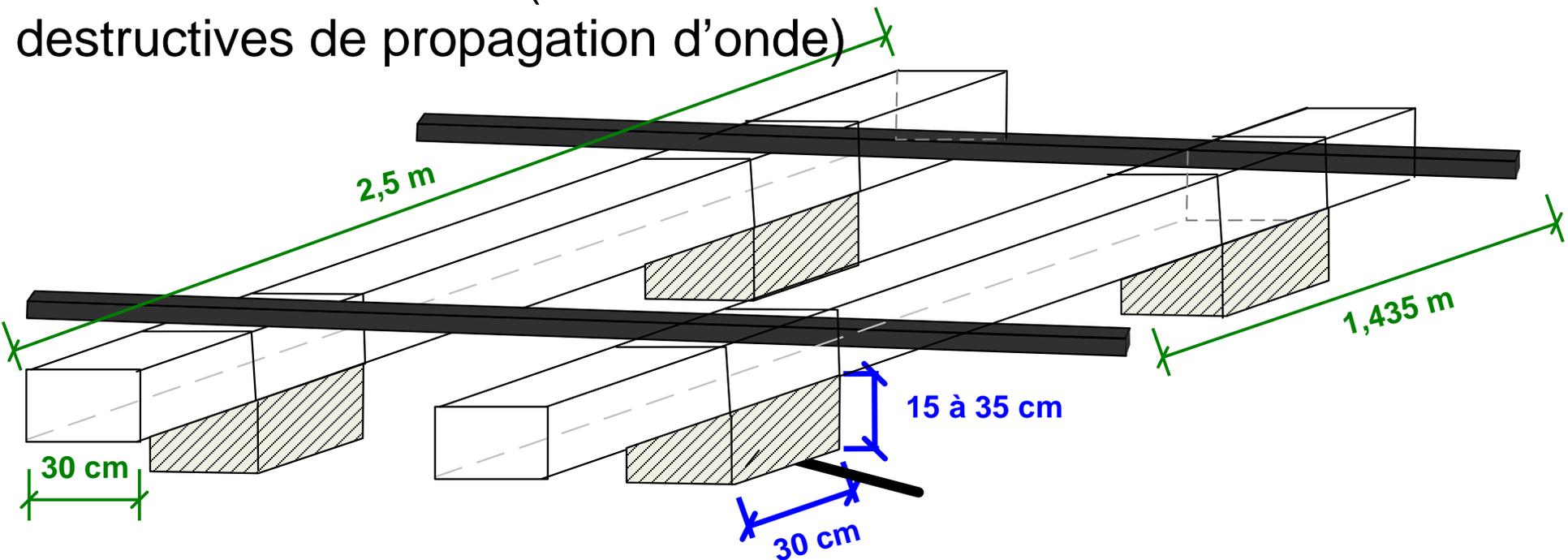
ρ (grains solides) : 2,8 t/m³

ρ (ballast en voie - *foret2003*) :
de 1,2 t/m³ à 1,5 t/m³



OBJECTIFS DE LA THESE

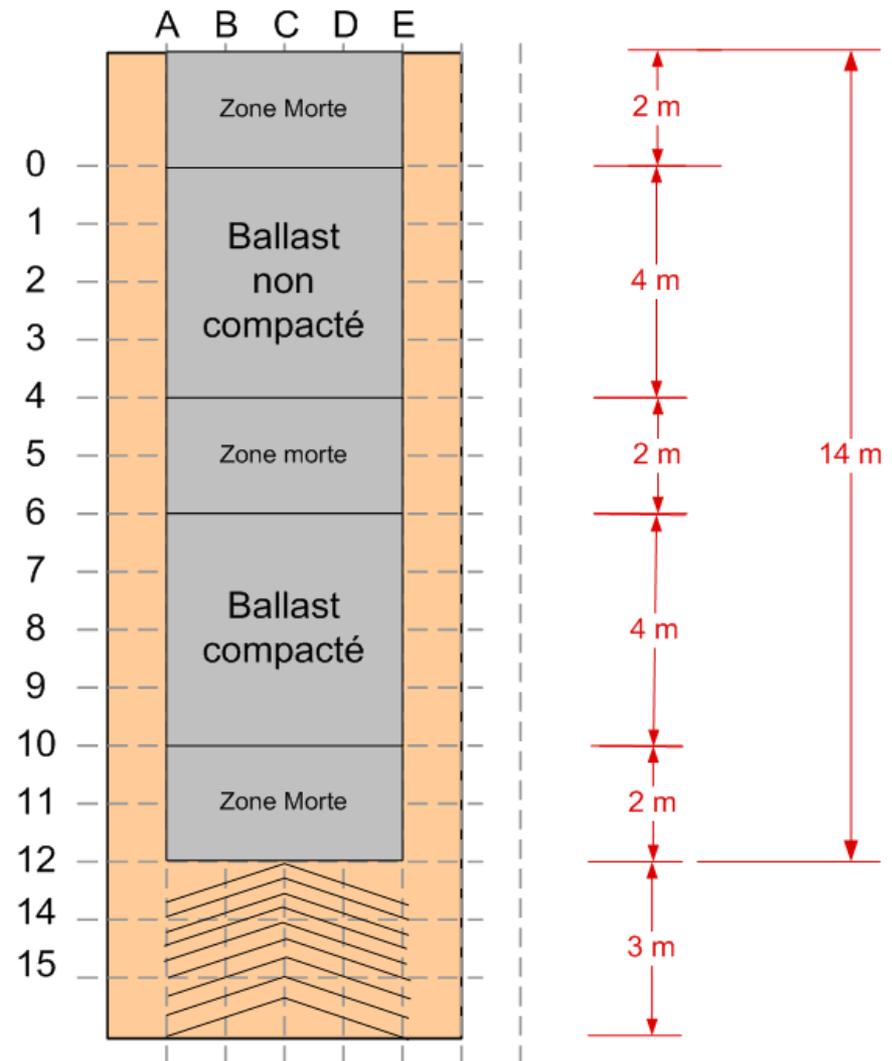
- Milieu discret \rightarrow complexe, pas modélisable avec les hypothèses des milieux continus d'où l'importance de l'expérimentation
- Lois de tassement (déf. permanente et élastique)
- Zone d'étude considérée $30 \times 30 \times (15 \text{ à } 35)$ cm sous traverse \rightarrow difficile d'auscultation (solliciter traverse ou méthodes non destructives de propagation d'onde)



Sensibilité méthode
OS et H/V pour
détecter des
variations de
compacité de ballast

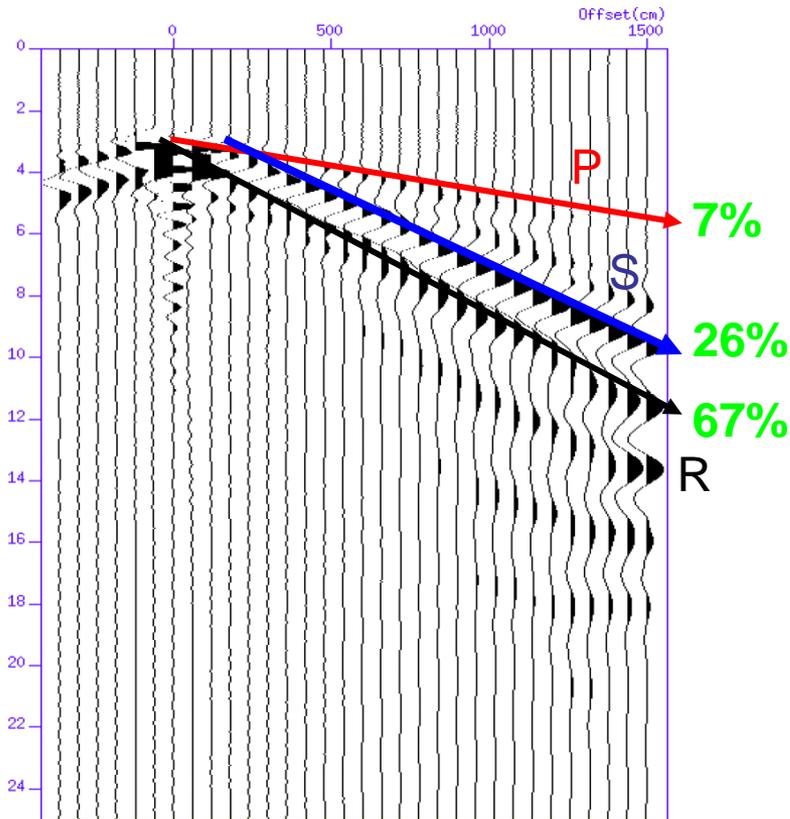


comparaison plot
compacté et foisonné
sans panneau de voie

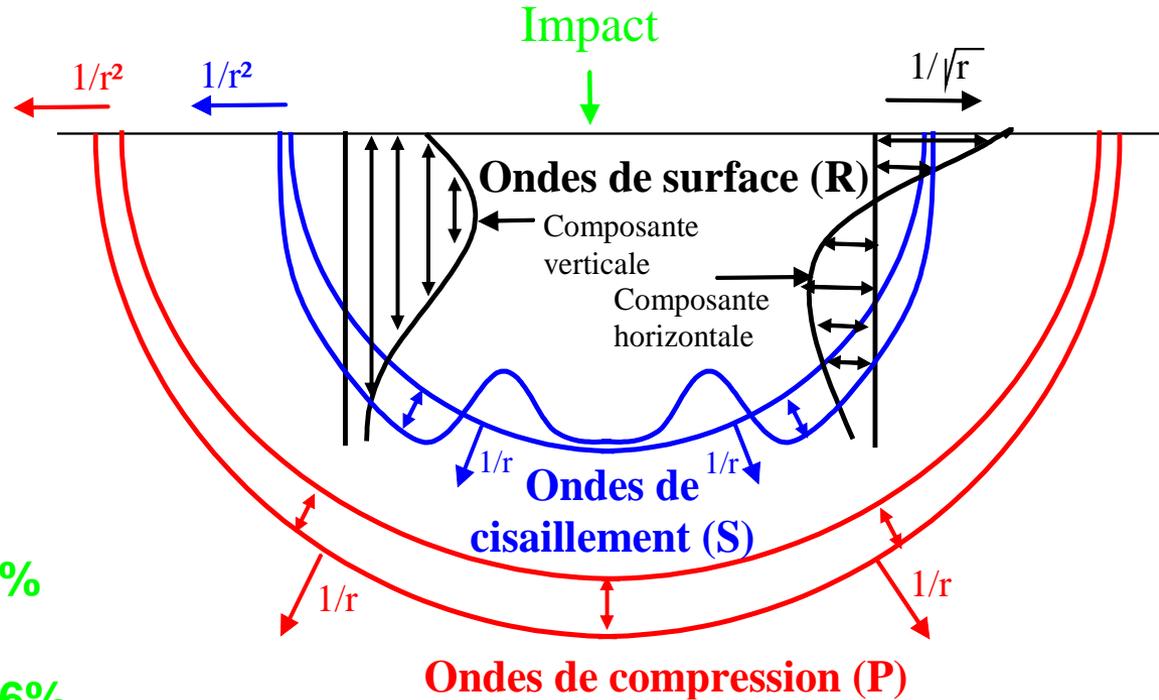


ONDES SISMIQUES

Résultante P et Sv



Signal temporel



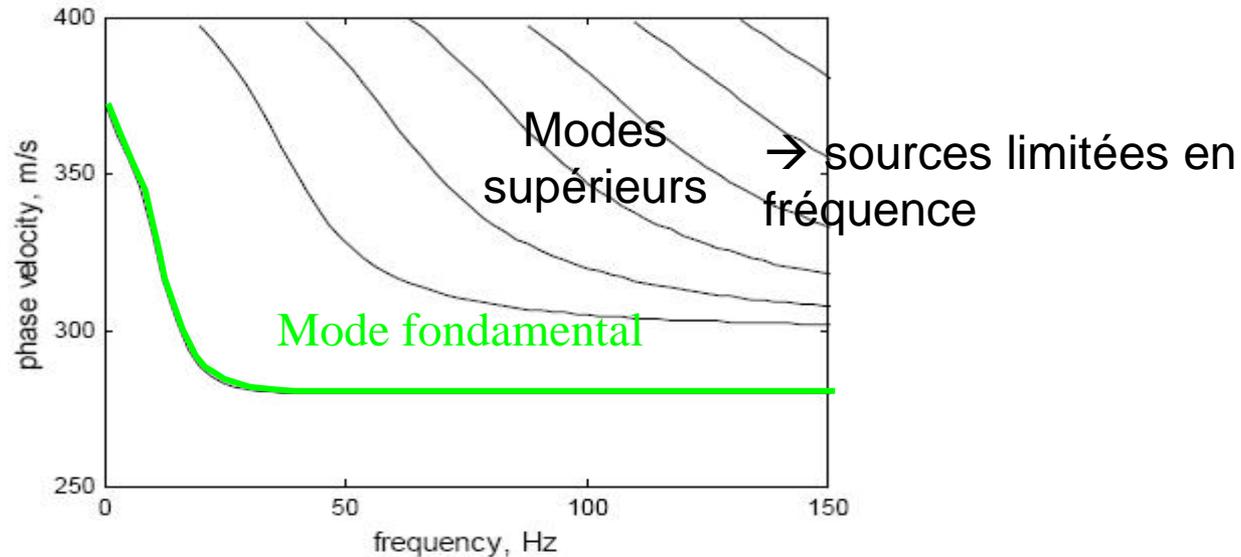
(Woods1968)

A élevée → Intéressant dans un contexte ballast très amortissant (vides)

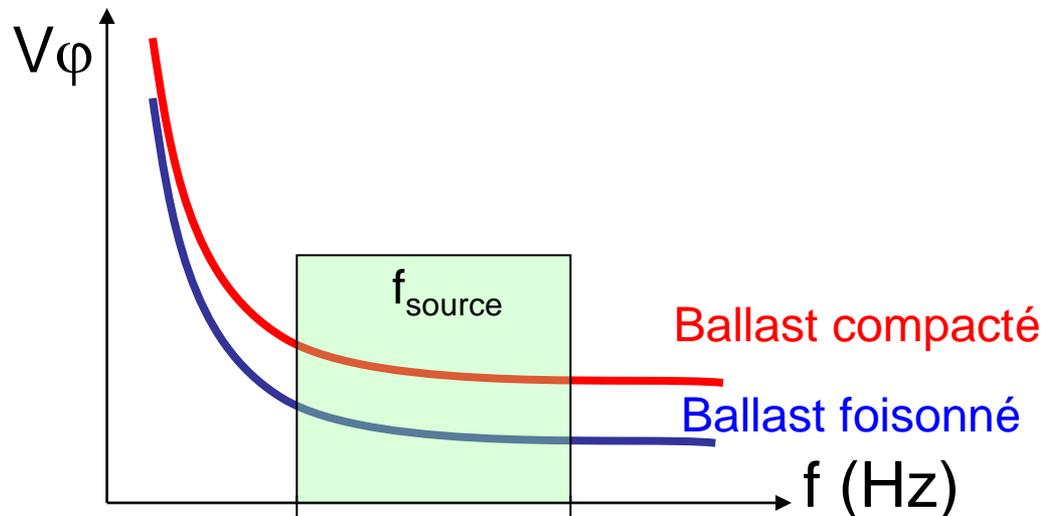
V et f plus faible → d(source/récepteur) suffisante pour que R soit développée

Propriétés dispersives de ces ondes ($V=f(f)$)

② Détermination de la courbe de dispersion



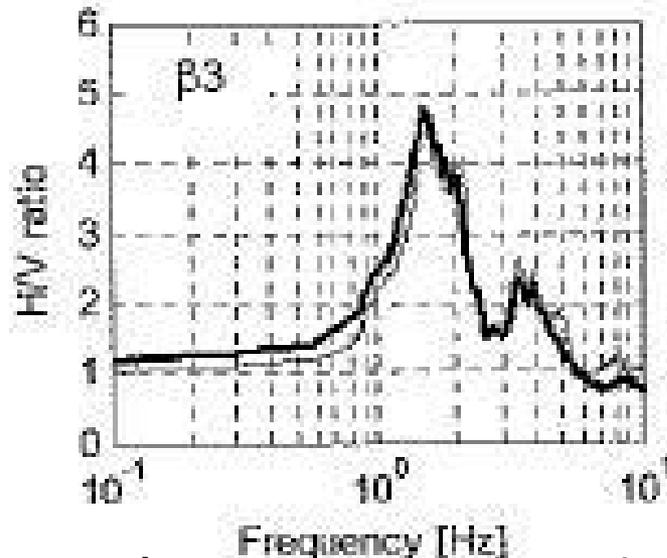
③ Comparaison expérimentale faisabilité OS pour déterminer variation de ρ



→ H/V

Rapport spectral des voies horizontales sur verticale du bruit sismique

f_0 caractéristique d'un site



— Avant travaux de compactage dynamique

— Après travaux de compactage dynamique

Résultat H/V avant et après compactage dynamique ([BRULE et JAVELAUD, 2010])

→ Apport expérimentation

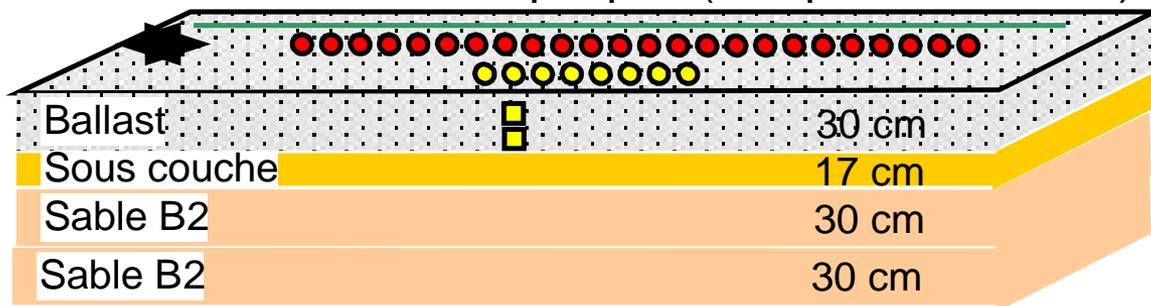
H/V événement

Application faible longueur d'onde, plus haute fréquence

Faisabilité dans ballast

EXPERIMENTATION – DISPOSITIF DE MESURE

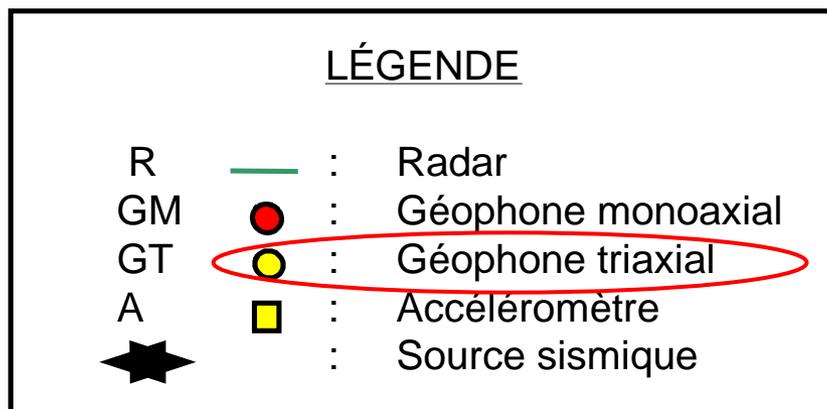
Essais sur chaque plot (compacté/foisonné)



Coupe structure type

Homogénéité de compacité en dessous du ballast →

variation méthodes uniquement au niveau du ballast

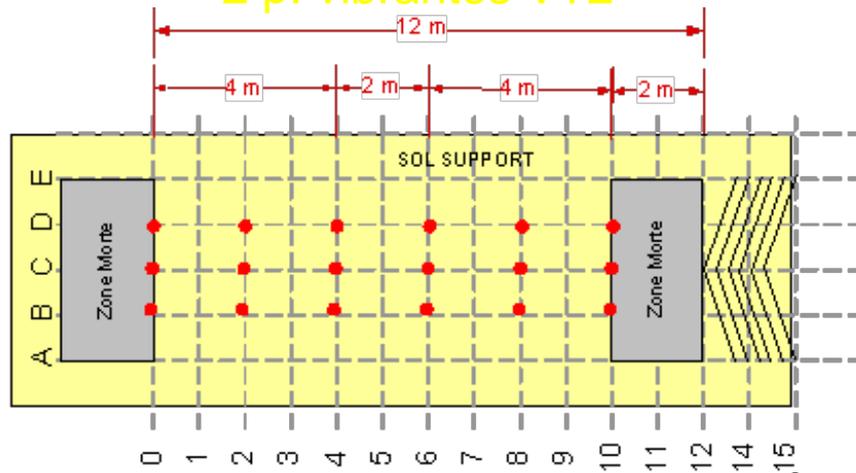


- 2 dispositifs sismiques, radar, accéléro
- Trois sources (marteau instrumenté, vibreur inertiel, vibreur pneumatique)
- Calage distance source/géophones (15 à 55cm)
- H/V → géophone triaxiaux
- Etude compacité avec radar (ERA23)

EXPERIMENTATION – MISE EN OEUVRE

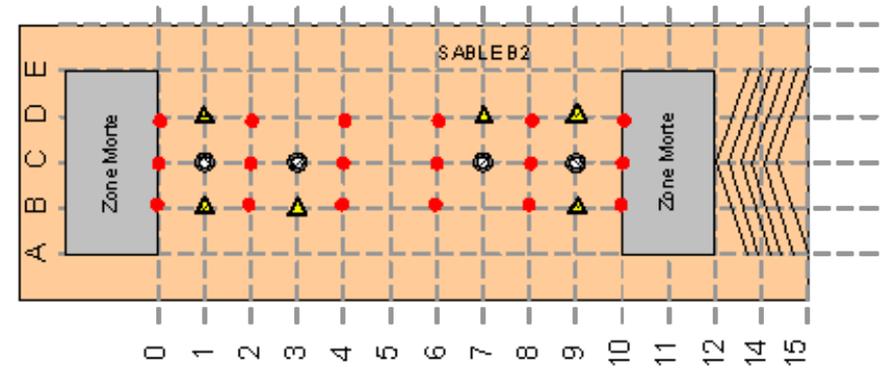
C0 - Sol support

2 p. vibrantes VT2



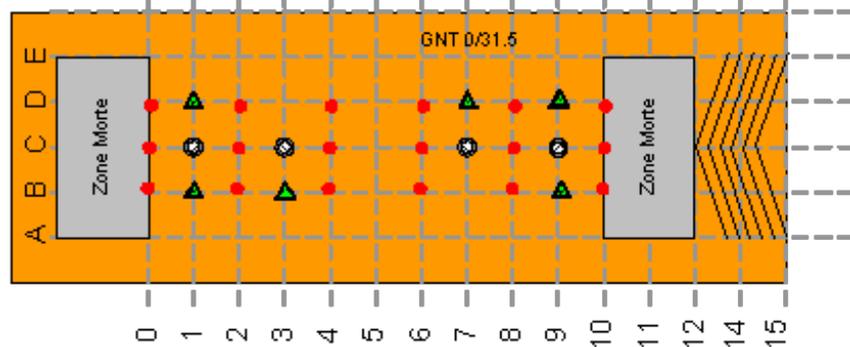
C1 et C2 - Sable B2

4 p. vibrantes VT2 – q3



C3 - GNT 0/31.5

12 p. vibrantes VT2 – q1



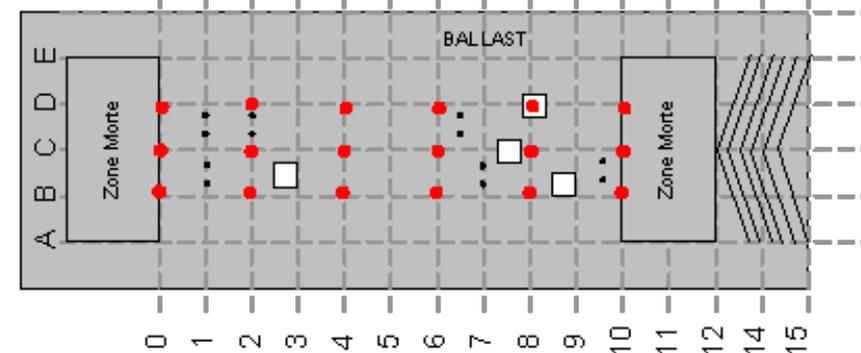
LÉGENDE

- GPV: GPV30
- GPV17.5
- NIV: Nivellement
- EV2: Essai de plaque
- DEN: Densité membrane
- GDS200

C4 - Ballast compacté

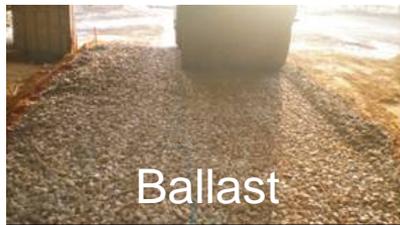
4 p. statiques VT2

4 p. vibrantes VT2



MISE EN ŒUVRE ET ESSAIS EN PHOTOS

Mise en œuvre - Essais



Tassement
de 4 à 10 cm

Estimation masse volumique ballast



Essais P/V



Sedidril - GDS200



EXPERIMENTATION – DISPOSITIFS SISMIQUES



Géophones posés scellés

L= 1.05m - 8 géophones triaxiaux

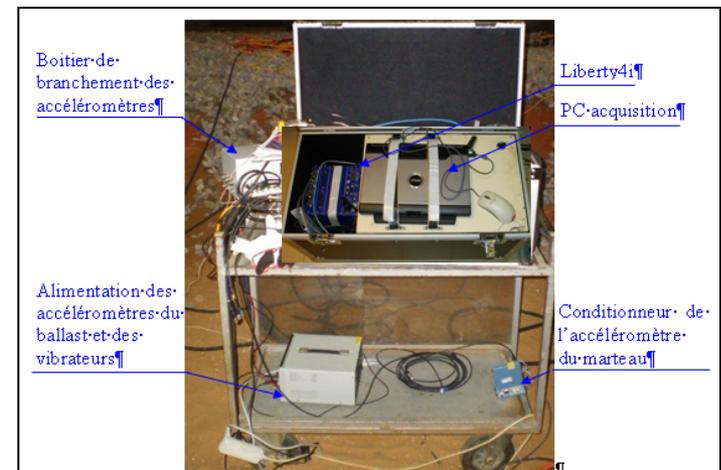
Espacement géophone 15 cm

Acquisition au liberty4i

L= 3.45m - 24 géophones monoaxiaux

Espacement géophone 15 cm

Acquisition avec géode



EXPERIMENTATION – SOURCES SISMIQUES

Marteau instrumenté



$f_p = 150\text{Hz}$

$F = 1\text{kN}$

100 - 500Hz

Vibrateur pneumatique



$f = 300\text{Hz}$ maxi

$F = 7\text{kN}$

Vibrateur inertiel



Rampe 200-1000Hz

$f = 300\text{ Hz}$

$f = 400\text{ Hz}$

$f = 500\text{ Hz}$

$F = 0.44\text{kN}$

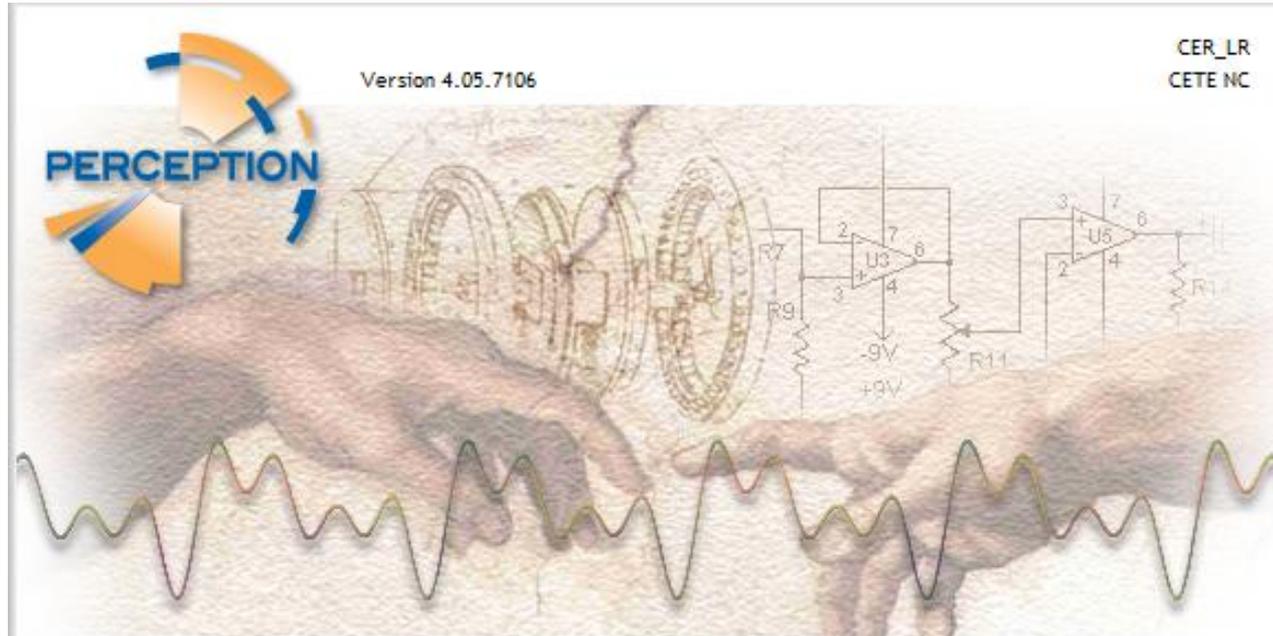
200 - 1000Hz

100 - 500Hz

EXPERIMENTATION – SOURCES SISMIQUES



- Acquisition



- Traitement de données



MASW
H/V

Nivellement – épaisseur de couches

Matériau	Couches	Epaisseur objectif (cm)	Zone foisonnée		Zone compactée		Deux zones	
			Epaisseur (cm)	Ecart-type (cm)	Epaisseur (cm)	Ecart-type (cm)	Epaisseur (cm)	Ecart-type (cm)
Sable B2	C1	30	29	1	31	2	30	2
Sable B2	C2	30	31	1	32	2	32	2
GNT 0/31.5	C3	17	23	1	17	3	20	4
Ballast	C4	30	32	3	37	3	34	4
Epaisseur totale		137	147		155		151	

sable ok

(+) zone foisonnée

(ok) zone compacté

(ok) zone foisonnée

(+) zone compacté

Essai de plaque

Couche	EV2 Moyenne 4 points (MPa)
C1 Sable B2	95±9
C2 Sable B2	80±11
C3 GNT0/31.5	84±9

50 > EV2 > 120 MPa

→ PF2.

GPV

Matériau	Couches	Objectif de compactage	Teneur en eau (%)	Masse volumique humide (t/m3)	Masse volumique sèche (t/m3)	Taux de compactage (%)
Sable B2	C1	q3	5.31±0.38	1.93±0.04	1.83±0.03	101.15±1.76
Sable B2	C2	q3	8.17±0.41	2.06±0.03	1.90±0.03	105.17±1.55
GNT 0/31.5	C3	q1	4.86±0.22	2.22±0.03	2.21±0.02	101.15±1.19

T(%) > 100%

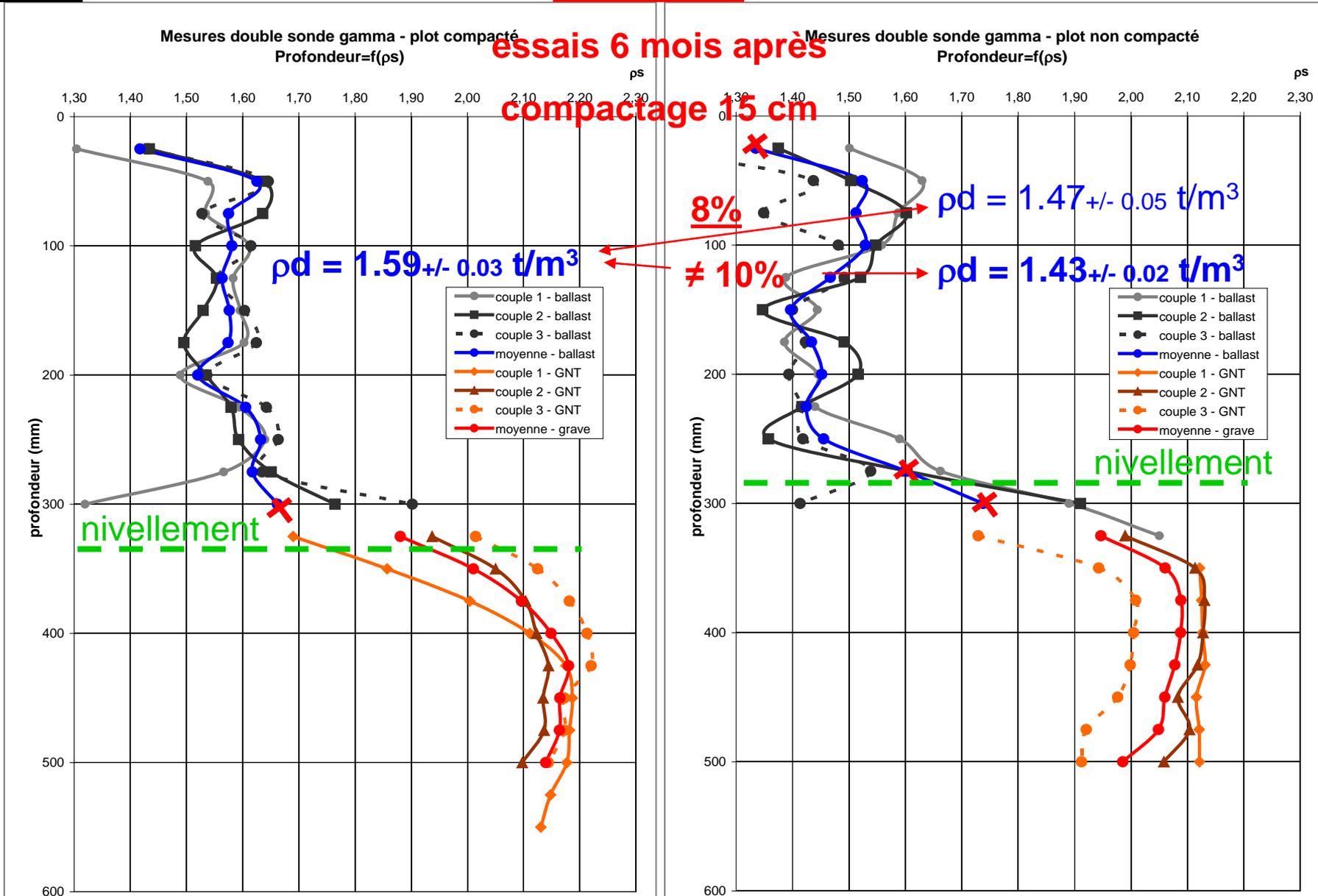
Objectif compactage atteint

EXPERIMENTATION – RESULTATS MEO

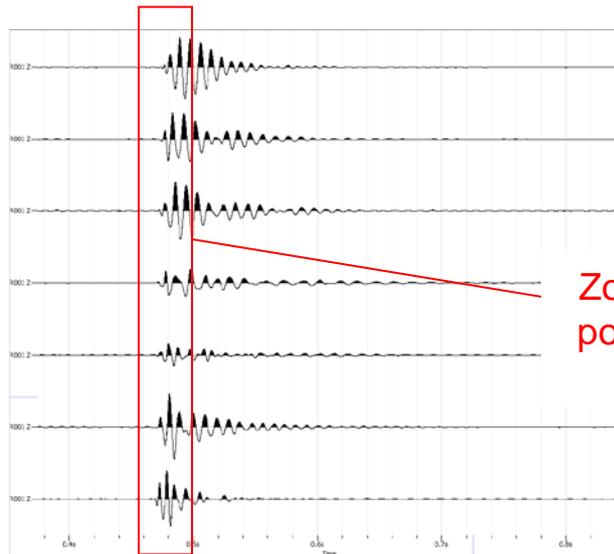
GDS200

Pb matériel :

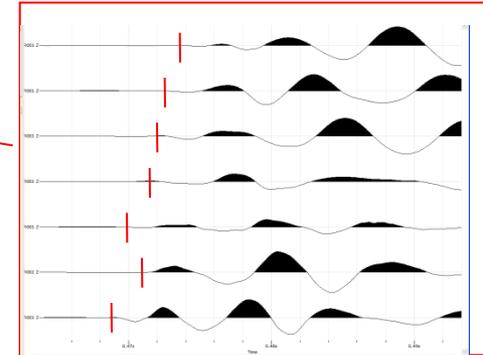
**essais 6 mois après
compactage 15 cm**



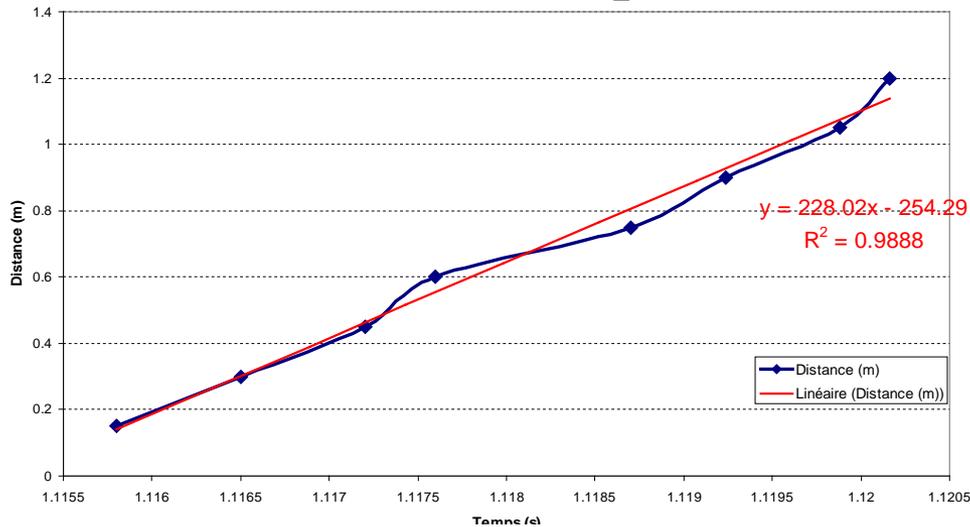
EXPERIMENTATION – RESULTATS PROPAGATION BALLAST



Zoom en amplitude pour pointer arrivée ondes



Ballast compacté - Géophones scellés
Vitesse d'onde P - marteau_15cm238



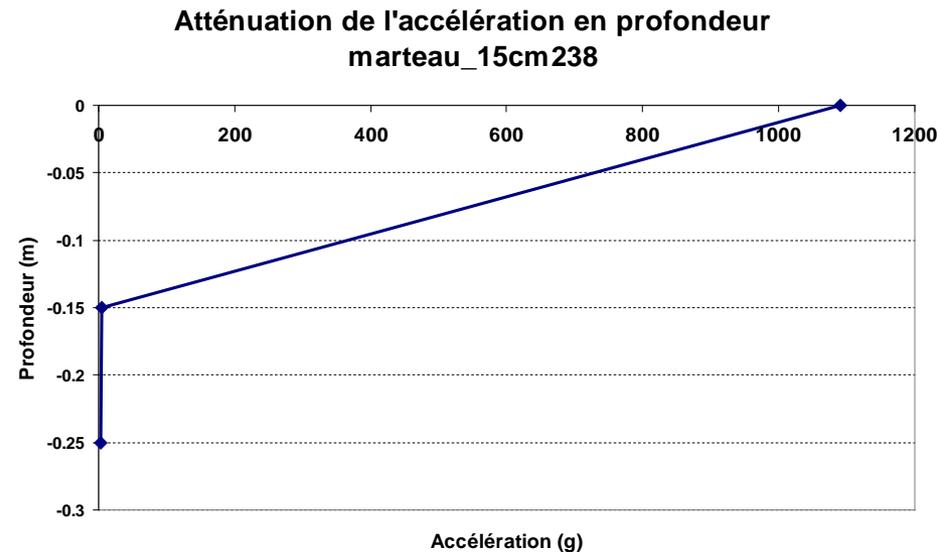
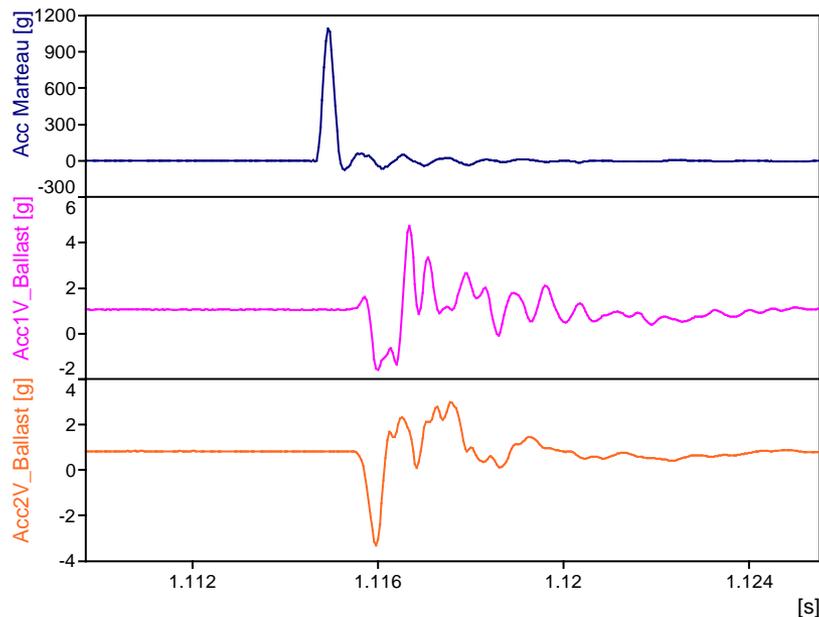
Géophone 100Hz = filtre HF des ondes P, Onde R uniquement

Pointage arrivées ondes → estimation V_a

Si V_r approxime 230m/s pour une fréquence prépondérante on ausculte 1m

Amortissement en profondeur

Ballast compacté – géophones scellés

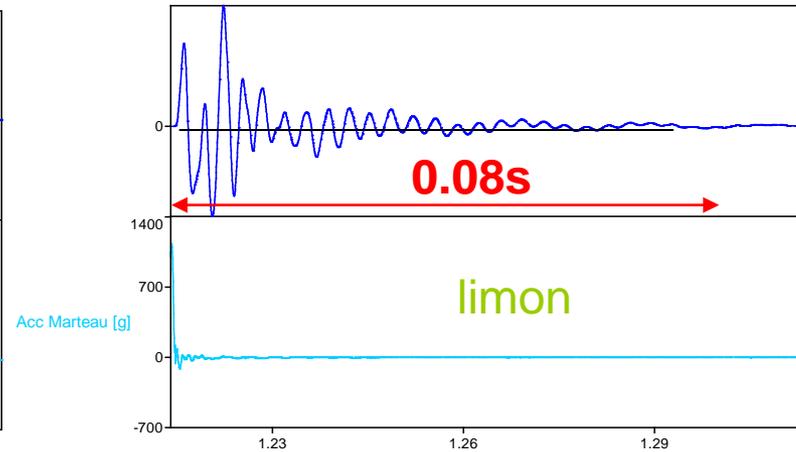
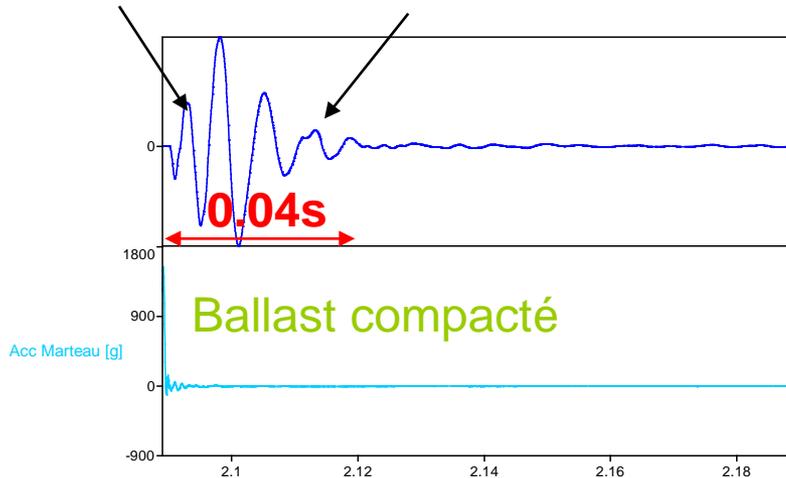


Milieu très amortissant → Atténuation importante avec la profondeur

Amortissement onde

Signal temporel indiquant une dispersion des ondes

(HF au départ et BF après)



mêmes conditions (distance source/géophone) →
amortissement 2x + rapide de l'onde dans ballast que dans
limon

Signaux - marteau

Zone étudiée : Ballast compacté
 Géophone : Triaxiaux 100 Hz scellés
 Distance source- G8 : 35 cm
 Source : Marteau

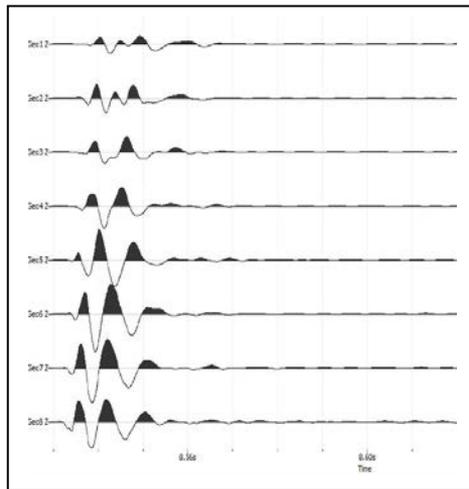


8 7 6 5 4 3 2 1

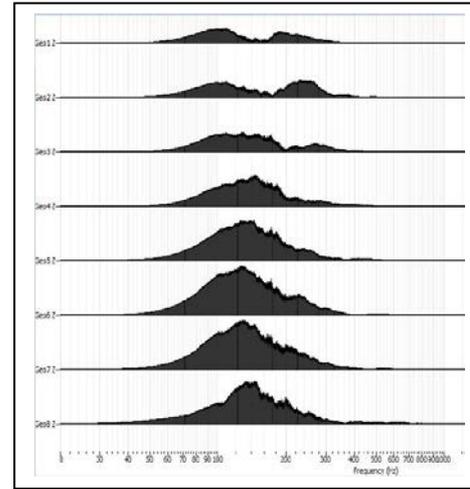
marteau_35cm182G_ST.JPG

marteau_35cm182G_SF.JPG
17/01/2012 18:38

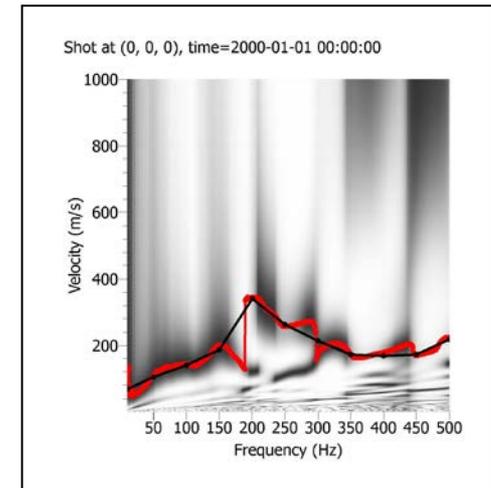
marteau_35cm182G.jpg



Vitesse apparente de
230 m/s



Champs fréquentiel du
marteau de 70 à
350Hz



Courbe de dispersion non
nette avec saut de
fréquence →

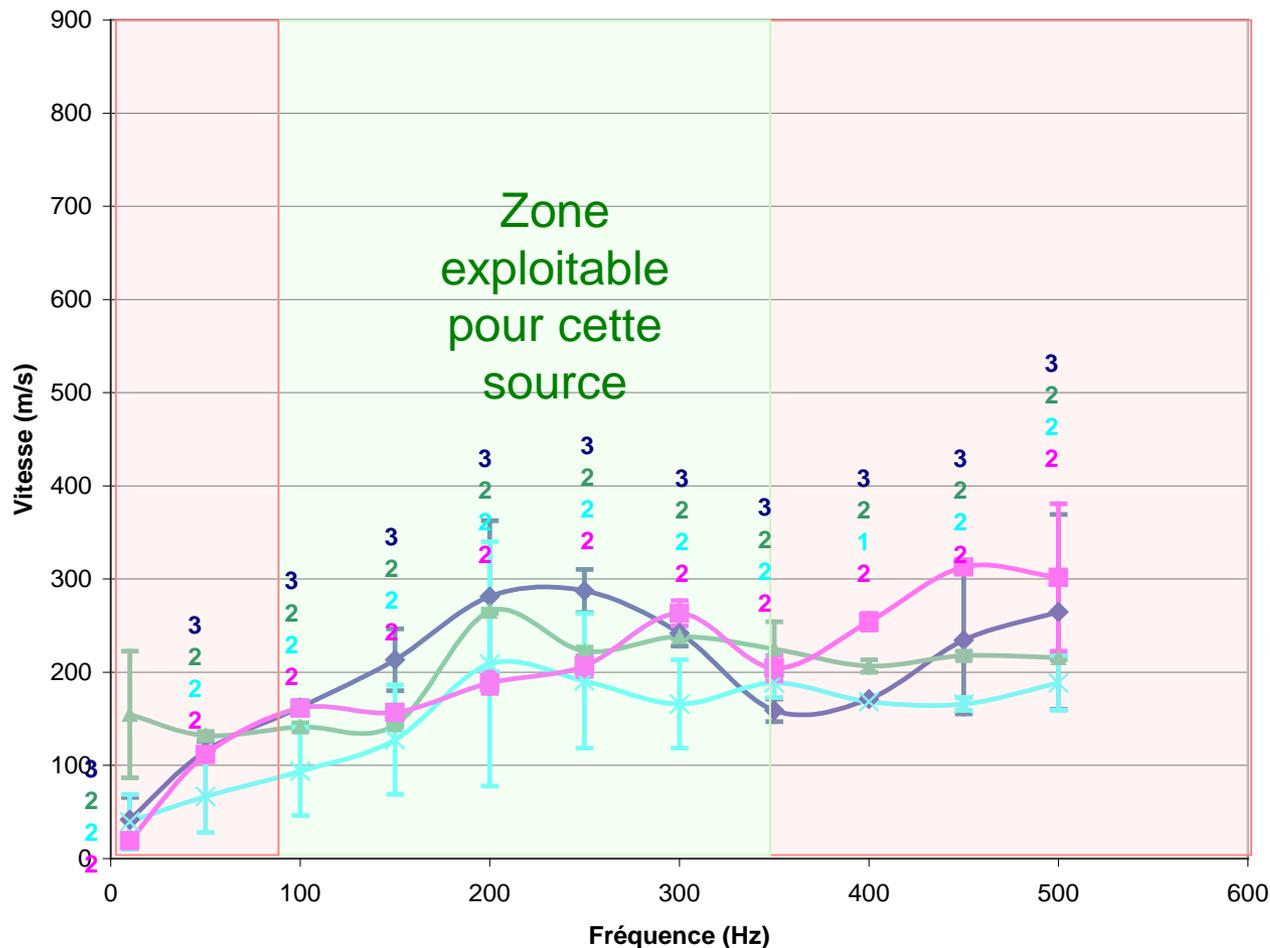
Influence milieu complexe
perturbant la courbe

Energie pas suffisante dans ce

milieu avec cette méthode

Dephne
JACQUELINE

Marteau_35cm



Importance pointage

Mesure non reproductible (courbes bleu foncé et verte)

- ◆ compacté posés répétabilité
- ▲ compacté posé reproductibilité
- * compacté scellé répétabilité
- foisonné scellé répétabilité

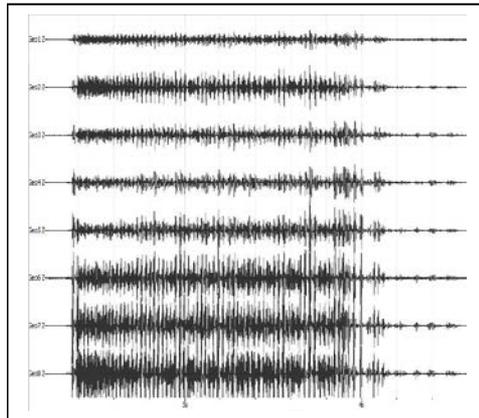
Comparaison plot compacté et foisonné avec géophones scellés → pas satisfaisant

Signaux – vibrateur Pneumatique

Zone étudiée	: Ballast compacté
Géophone	: Triaxiaux 100 Hz scellés
Distance source- G8	: 25 cm
Source	: Vibrateur pneumatique

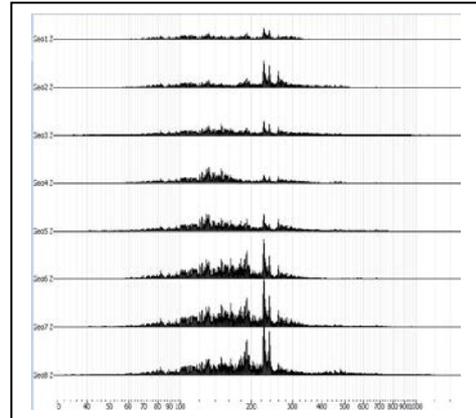


VibrateurP_25cm205G_ST.JPG



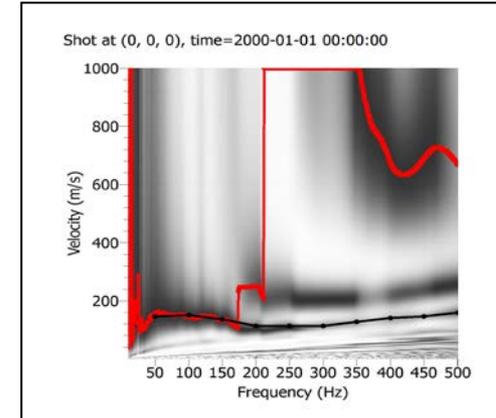
Vibration continue avec pics (rebonds vibrateur)

VibrateurP_25cm205G_SF.JPG
18/01/2012 09:32



Champs fréquentiel du vibrateur P de 70 à 350Hz

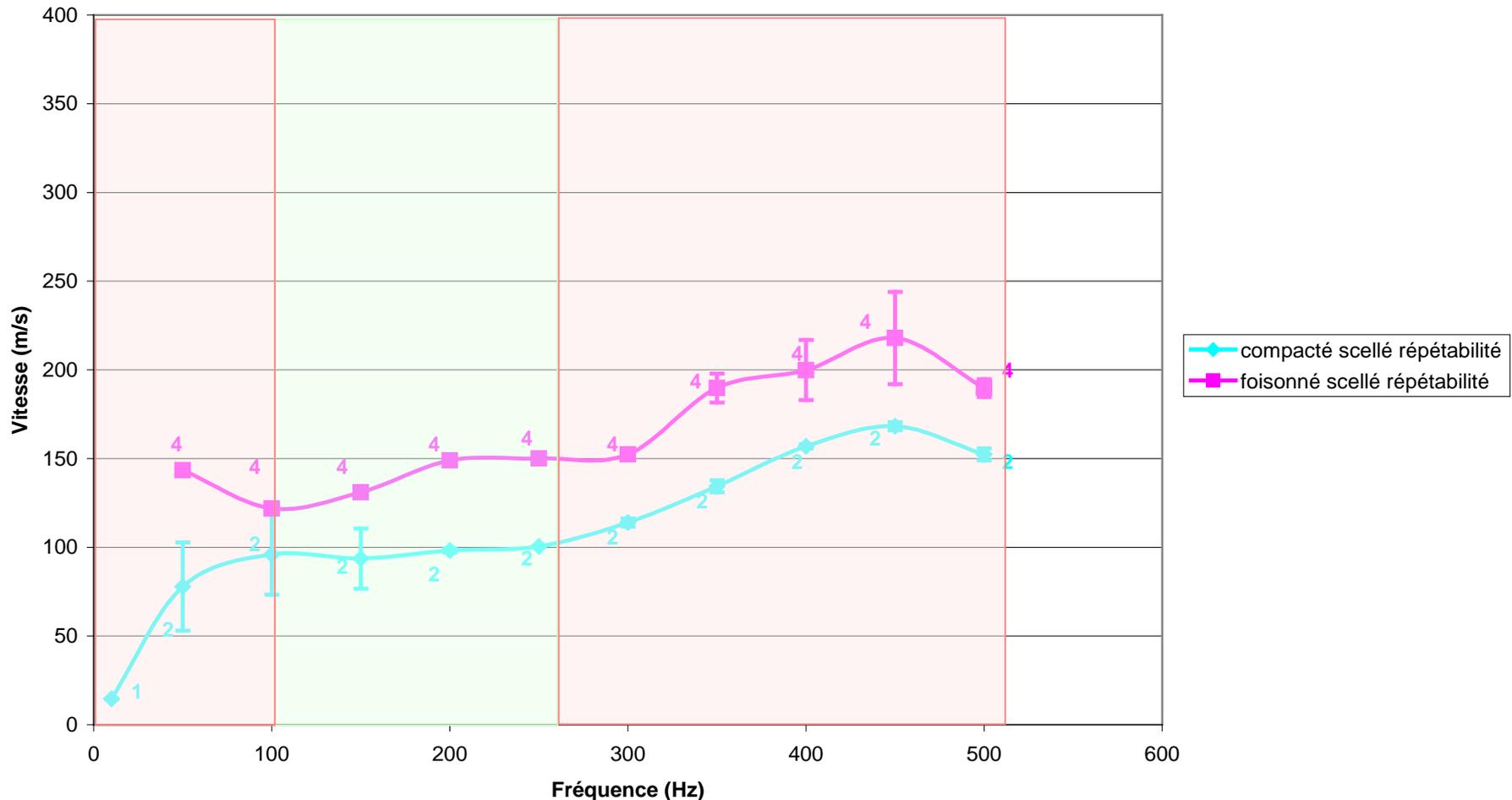
VibrateurP_25cm205G.JPG



Courbe de dispersion plus nette →

Influence énergie source
Autopick non utilisable

Vibrateur-Pneumatique 15cm



Pointage → Ecart-moyen des mesures élevé

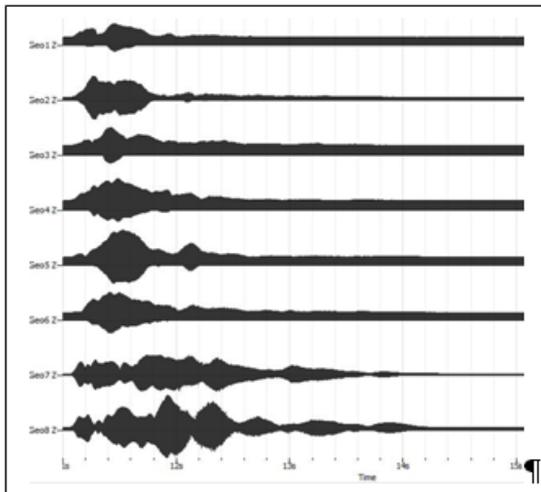
V ballast compacté < ballast foisonné → résultats incohérents

Signaux – vibrateur Inertiel

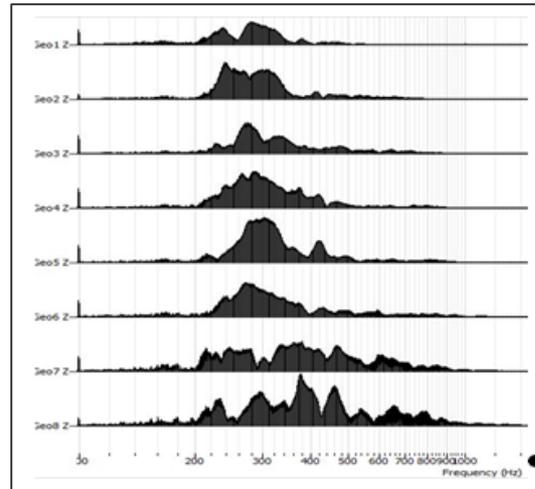
Zone étudiée	: Ballast foisonné
Géophone	: Triaxiaux 100 Hz scellés
Distance source- G8	: 25 cm
Source	: Vibrateur inertiel 200-1000Hz



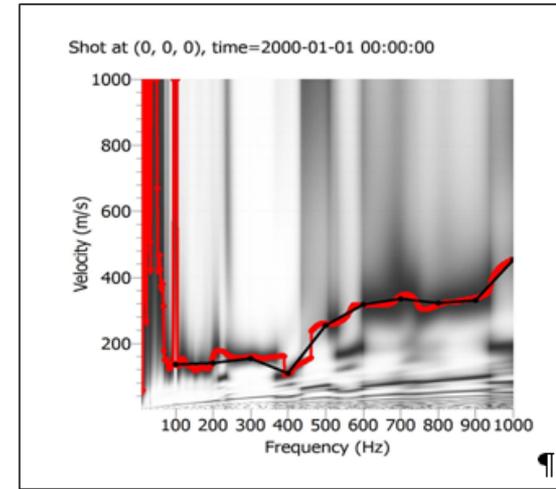
VibrateurI_200_1000Hz_25cm291G_ST.JPG → VibrateurI_200_1000Hz_25cm291G_SF.JPG →VibrateurI_200_1000Hz_25cm291G.JPG¶
18/01/2012...16:44¶



Vibration continue avec nœuds et ventres



Champs fréquentiel du vibrateur I de 200 à 900Hz



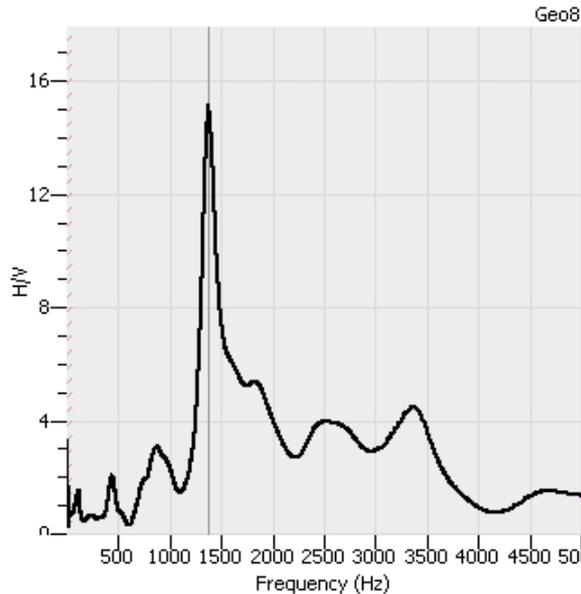
Courbe de dispersion pas très visible avec saut de fréquence →

Influence milieu complexe, faible énergie source

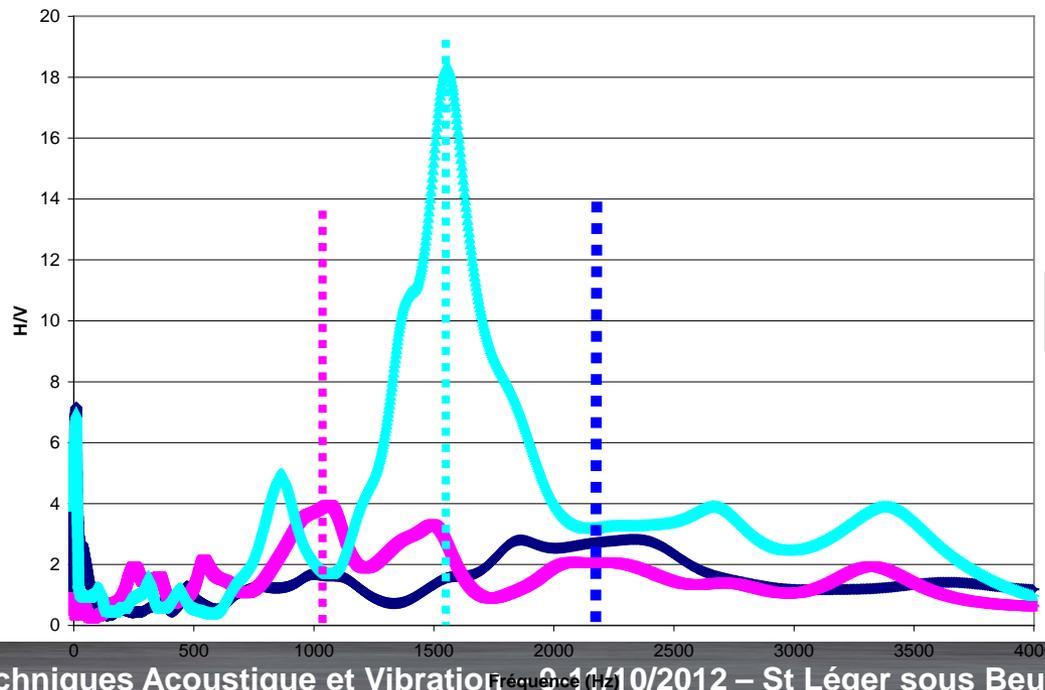
H/V – marteau

Exemple résultats H/V obtenu avec geopsy

ballast compacté 15cm
géophones scellés



Marteau_15cm_H/V



Courbe moyenne

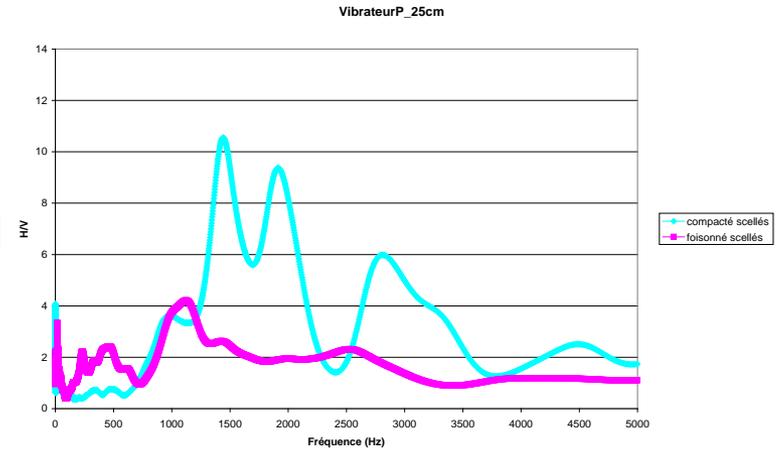
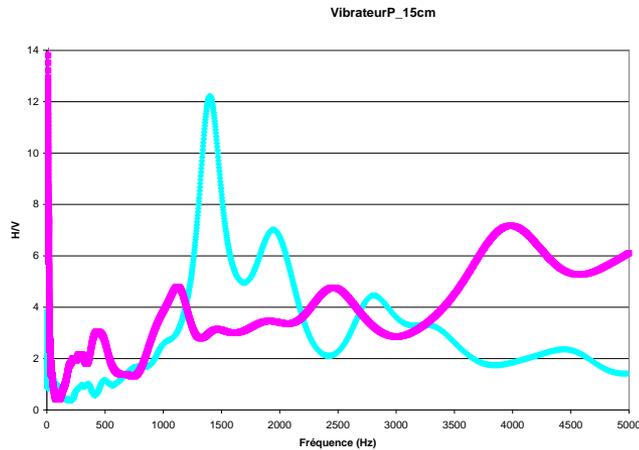
Résultats cohérents

F (ballast compacté) >
F (ballast foisonné)

F foisonné = 1000Hz

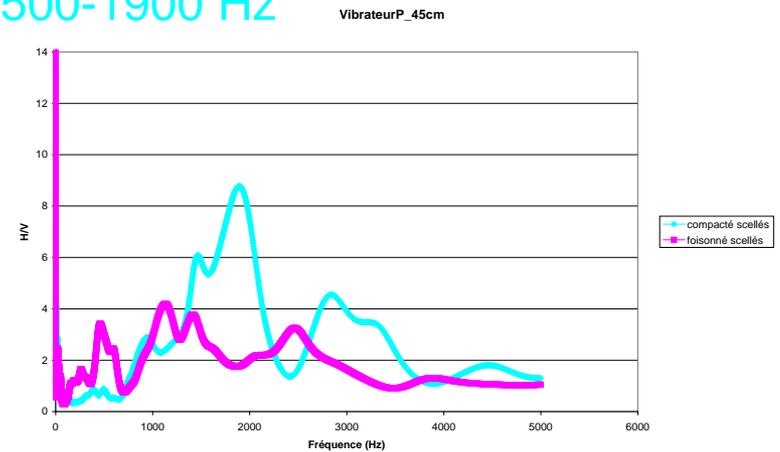
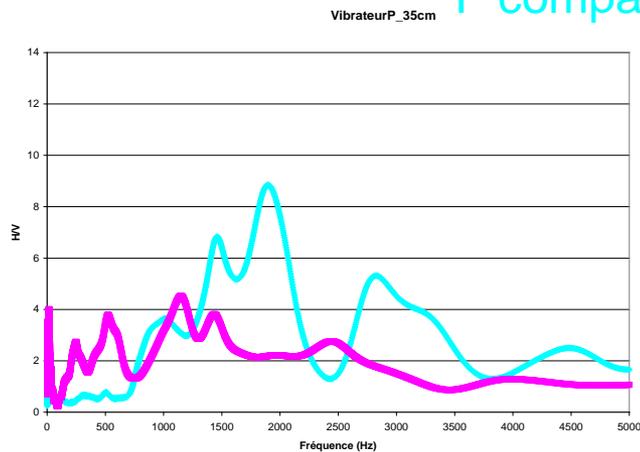
F compacté = 1550 Hz

H/V – vibrateur P

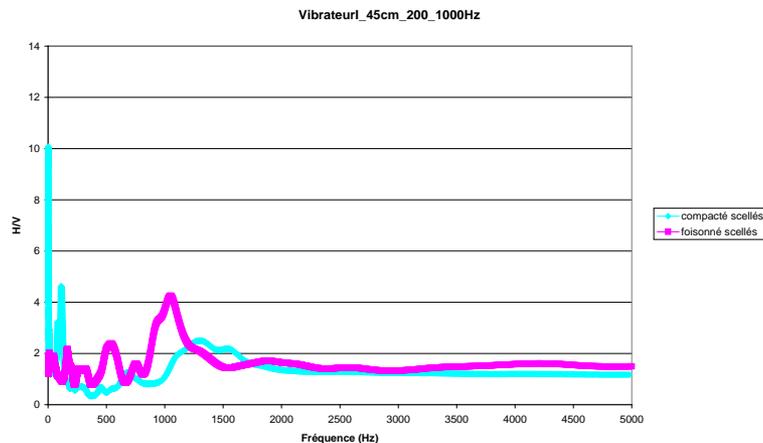
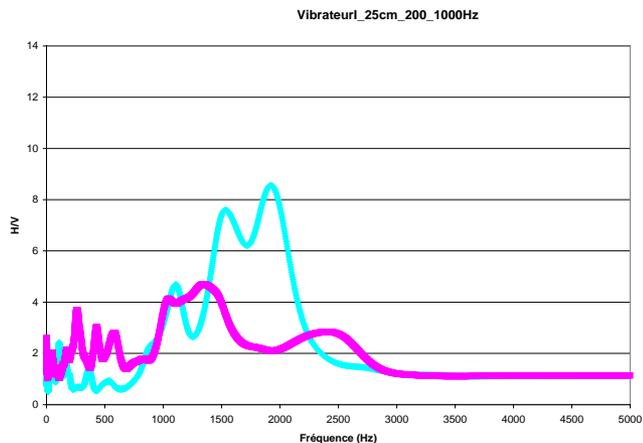


F foisonné = 1000Hz

F compacté = 1500-1900 Hz

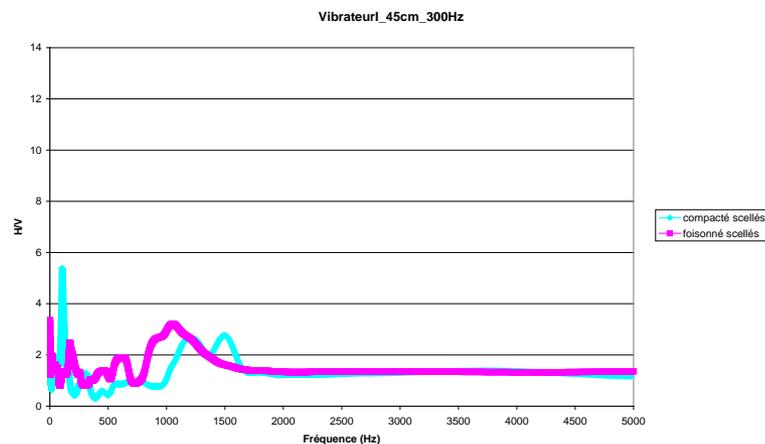
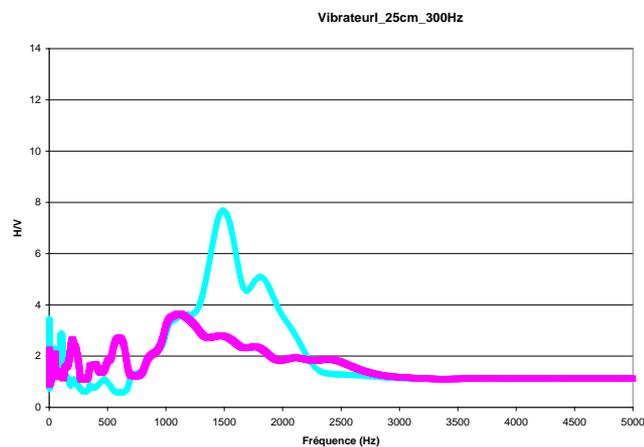


H/V – vibrateur I



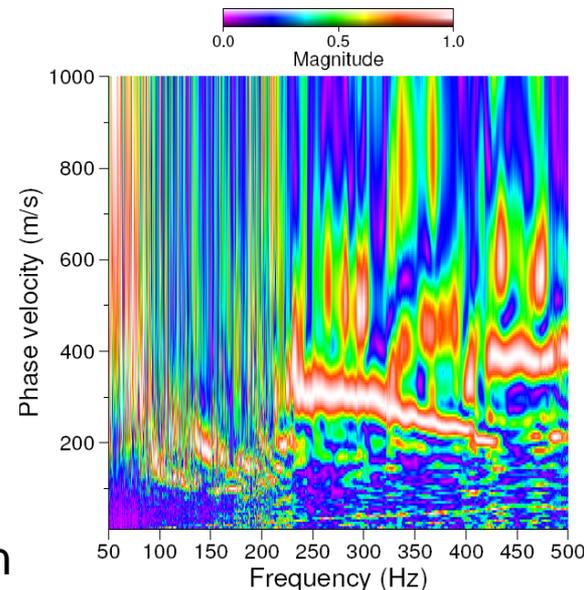
F foisonné = environ 1000Hz

F compacté = 1500-1900 Hz



CONCLUSIONS

- Essais OS complexes et fastidieux dans le dépouillement
- poursuite en cours du dépouillement (Essais ifsttar) et comprendre pourquoi ? (\neq dispositif, logiciel?)
- Résultats H/V évènement cohérent avec la faisabilité de comparer plot ballast compacté et foisonné
- Modélisation : Faire une approche avec modèle existant avec milieu équivalent pour voir effet géométrie, propagation milieu...
- Prochains essais :
 - Simplifier encore plus l'expérimentation (ballast sur + d'1 m)
 - Mesure en accélérométrie :
 - Instrumentation d'un élément de ballast
 - intéressant d'avoir une réponse en phase et en amplitude jusqu'à 2,5k€ (limitation Géophone 100Hz)
 - Recalage des voies si voie verticale décalée
 - essais envisagé fin d'année 2012



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



delphine.jacqueline@developpement-durable.gouv.fr