

Dégradation de la voie ferrée ballastée sous sollicitations cycliques

Laurent SCHMITT – Direction de l'Innovation et de la Recherche
K. SAB, P. de BUHAN, D. CLOUTEAU



CFMS – Paris, 7 avril 2006

donner au train des idées d'avance



Plan

- Les enjeux de la prévision de la dégradation
- La nature des sollicitations ferroviaires
- Le matériau ballast au laboratoire et en voie
- Recherche de lois de tassement
- Recherche de lois de comportement cyclique
- Outils de calcul
- Perspectives



2



Tout au long de sa vie, la voie ferrée subit :

- des sollicitations (statiques et dynamiques) importantes : charges, vibrations, etc.
LN1 : 70 000 tonnes/jour - 140 trains - 4000 essieux
- des agressions extérieures (météo, pollution, maintenance)

qui sont à l'origine d'usures, de pollutions, de perturbations, de réorganisations et qui engendrent, entre autres, des défauts de géométrie

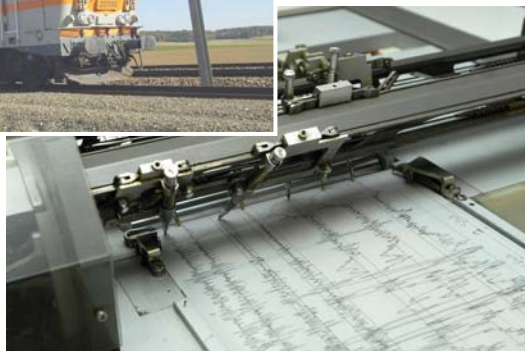


3

La correction des défauts de géométrie nécessite des inspections...



🔧 Tournée de la voiture
« Mauzin »



4

Les enjeux industriels

➡ Tournée de la voiture « Mélusine »



5

Les enjeux industriels

... et des actions lourdes de maintenance corrective.

➡ bourrage mécanique lourd



Photos Plasser & Theurer



6

Les enjeux industriels



➡ stabilisation dynamique



Photos Plasser & Theurer



7

Les enjeux industriels



Photos Plasser & Theurer

➡ réglage



8

Les enjeux industriels

ballastage, relevages



renouvellements de ballast



9

Les enjeux industriels



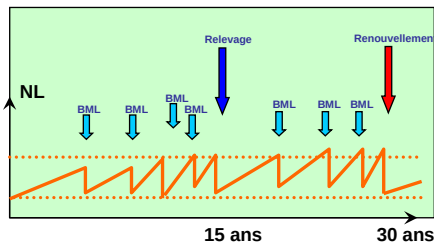
Train PUSCAL IV - photo « www.altenbekener-eisenbahnfreunde.de »

assainissements



10

Prévoir la dégradation des couches d'assises



La première ligne à grande vitesse a connu un renouvellement de ballast précoce.

Depuis la mise en service de la ligne Méditerranée, la vitesse de dégradation entre interventions à presque doublé sur certains tronçons.

Il est nécessaire :

- de comprendre les mécanismes de dégradation de la voie
- afin d'être en mesure de les anticiper pour mieux organiser la maintenance



11

Optimiser les opérations de maintenance



La voie est un système dont tous les composants interagissent.

Le ballast reste néanmoins la première cible des opérations de maintenance de la géométrie.

Il est nécessaire :

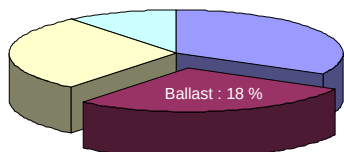
- de comprendre les interactions entre les composants de la voie
- afin de mieux cibler les opérations de maintenance
- et d'optimiser les méthodes de maintenance (bourrage, injections, ...)



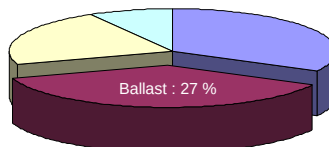
12

Les enjeux économiques

Maintenance courante

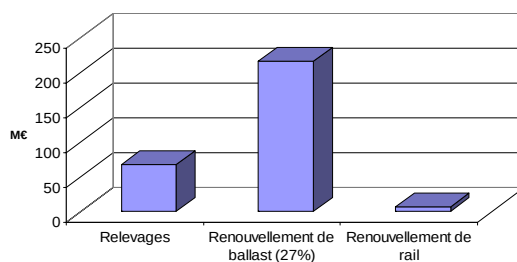


LGV Atl. – 17 ans



LGV PSE – 25 ans

Régénération (LGV PSE)



13

La nature des sollicitations ferroviaires



22,5 t ——— Charge à l'essieu ——— 17 t

80 – 200 km/h ——— Vitesse ——— 300-320 km/h

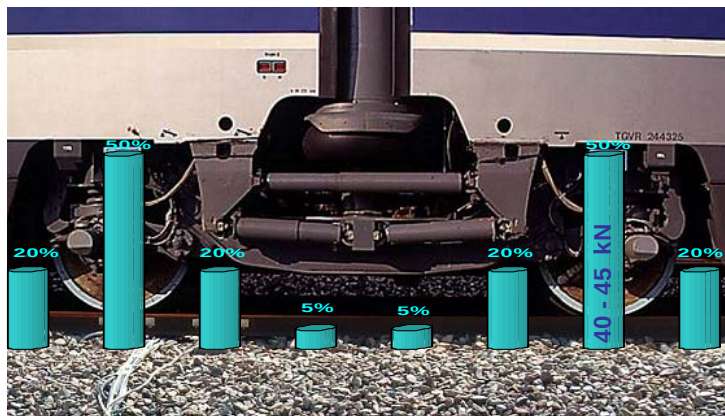
7 – 18 Hz ——— Fréquence de sollicitation ——— 28 – 30 Hz



14

La nature des sollicitations ferroviaires

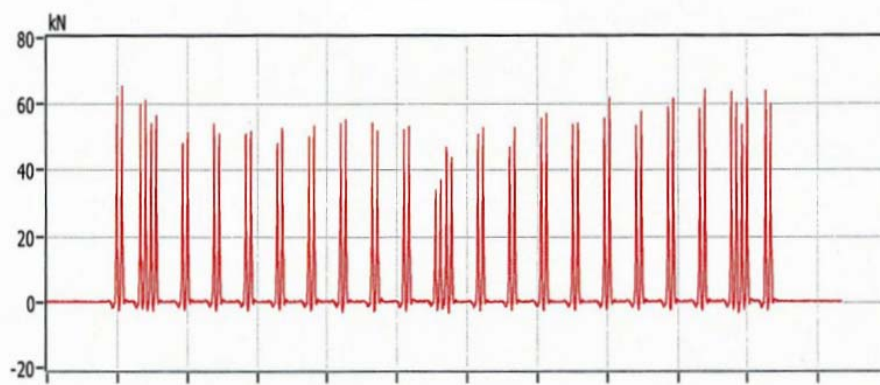
Répartition statique théorique de la reprise des charges



15

La nature des sollicitations ferroviaires

Dispersion des charges dynamiques sur traverses (TGV UM)



16

La nature des sollicitations ferroviaires

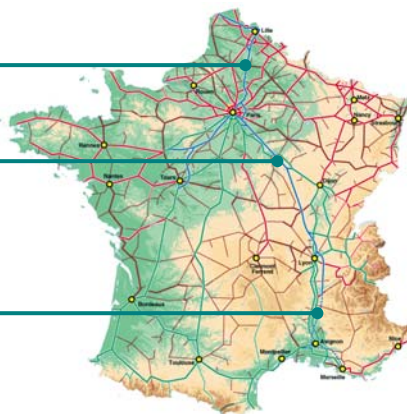


Sollicitations des principales lignes LGV

● LGV Nord : 59 000 t/j en 2004
3 500 cycles/jour
1 270 000 cycles/an

● LGV SE : 69 500 t/j en 2004
4 090 cycles/j
1 500 000 cycles/an

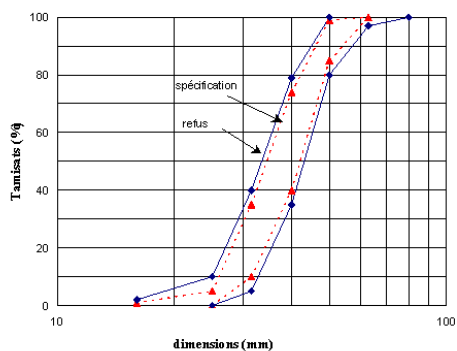
● LGV Méd : 35 000 t/j en 2004
2 000 cycles/j
750 000 cycles/an



17

Particularités du ballast

Fuseau granulométrique



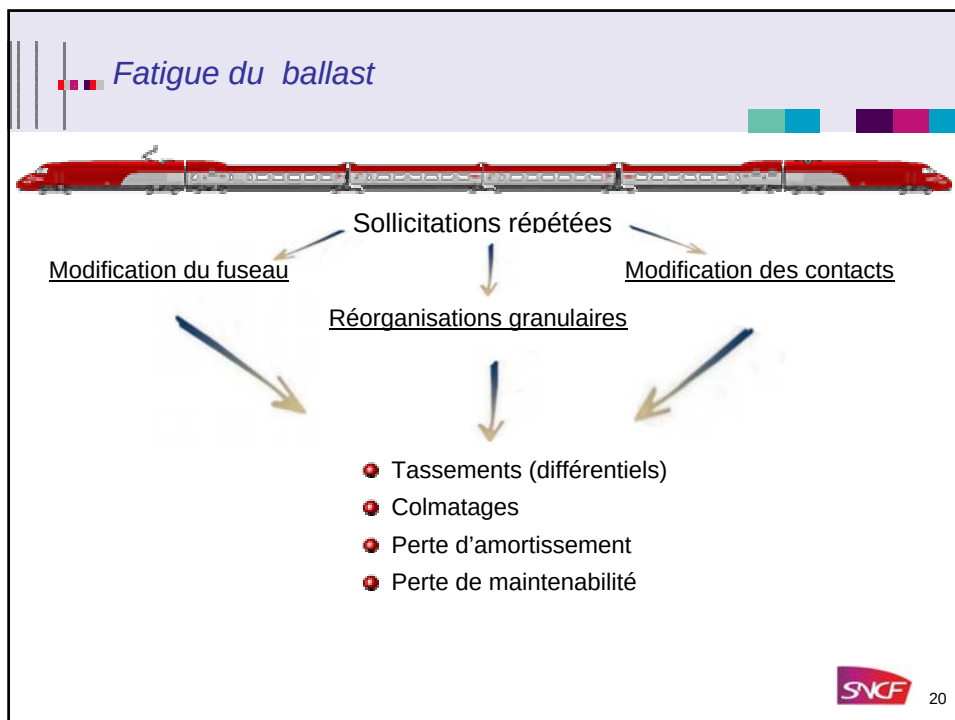
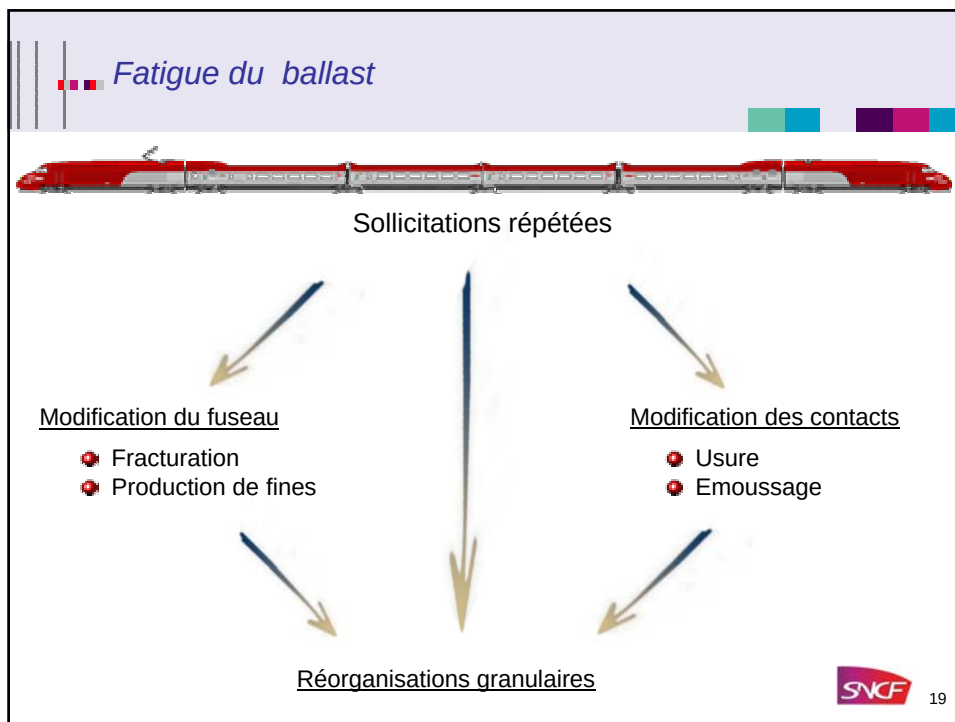
Propriétés de contact rugosité, angularité



Propriétés fonctionnelles : drainage, résistance, amortissement



18



Approche « granulaire » ou « continue » ?

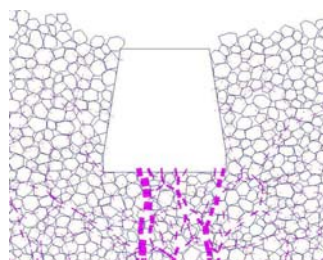
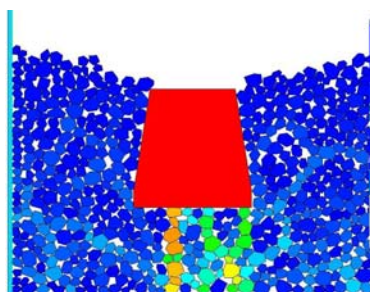


Rapport hauteur caractéristique / diamètre de grain très faible

Approche « granulaire » ou « continue » ?



⊗ Rapport hauteur caractéristique / diamètre de grain très faible



Transmission des efforts par structures rigides localisées

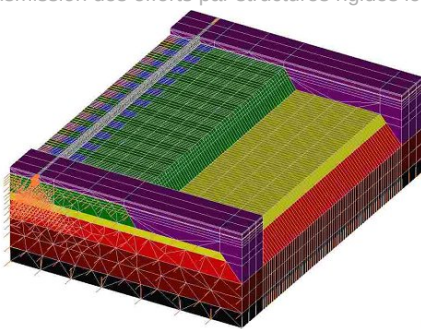
Approche « granulaire » ou « continue » ?



- Rapport hauteur caractéristique / diamètre de grain très faible



- Transmission des efforts par structures rigides localisées



En grandes dimensions, développement de modèles continus

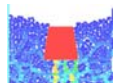


23

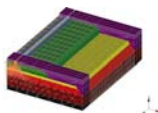
Approche « granulaire » ou « continue » ?



- Rapport hauteur caractéristique / diamètre de grain très faible



- Transmission des efforts par structures rigides localisées



- En grandes dimensions, développement de modèles continus



24

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50


25

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50



Réduction d'échelle


26

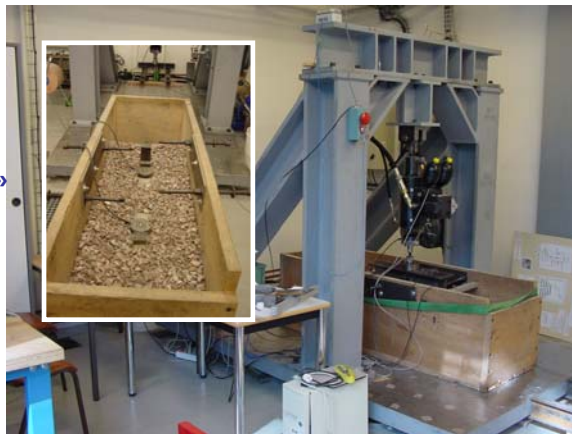
Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50

Réduction d'échelle

Banc « Microballast »
Banc « BETTER »
Echelle 1/3

N. Guérin (1997)
V. Bodin (2001)



27

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50

Réduction d'échelle

Banc 3 traverses
Echelle 1/3

Al Shaer (2005)



28

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50

Réduction d'échelle

Essais triaxiaux Echelle 1/3

- CETE St-Brieuc
- ECP LMSSMat
- CEDEX (2004)
- CERMES (2005)



29

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50

Réduction d'échelle

Dispositifs adaptés

Essais triaxiaux 1/3 Banc « BETTER » Banc « 3 traverses »



30

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50



Dispositifs adaptés

**Essais triaxiaux
Echelle 1**

- NGI



31

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50



Dispositifs adaptés

**Essais 1 blochet
Echelle 1**

- LCPC Nantes



32

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50



Dispositifs adaptés

Essais de structures voie

- CER Rouen
- CEDEX Madrid



33

Le ballast en laboratoire

Matériau grossier
granulométrie 25/50

Réduction d'échelle

Dispositifs adaptés

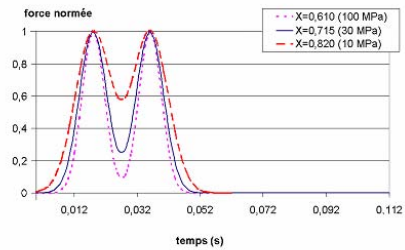
Essais triaxiaux 1/3
Banc « BETTER »
Banc « 3 traverses »

Essais triaxiaux 1/1
Banc échelle 1 LCPC Nantes
Essais de structures voie



34

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (N. Guérin, V. Bodin, K. Sab)



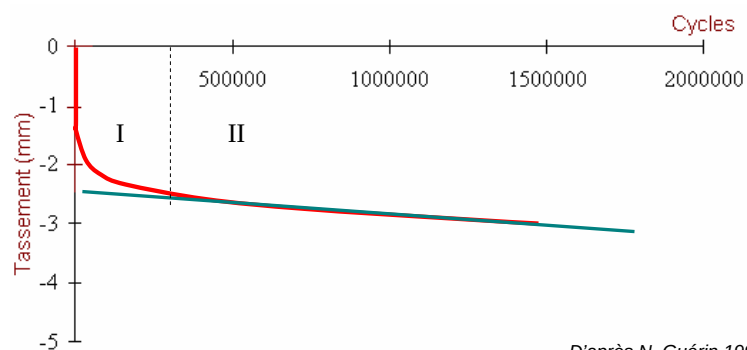
- Traverse : bi-bloc à échelle 1/3
- Ballast : 3 coupures (6/10 10/14 14/20 mm)
- Sol : simulé par une couche d'élastomère
- Similitude : Champs de contraintes (Guérin) – Accélérations (Bodin)



35

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (N. Guérin, V. Bodin, K. Sab)

Courbe de tassement au banc à échelle réduite



D'après N. Guérin 1996



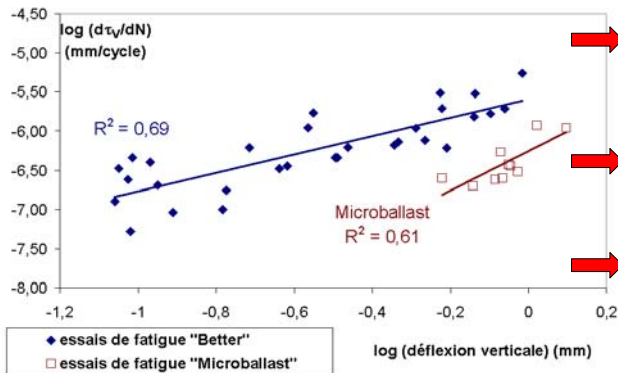
36

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (N. Guérin, V. Bodin, K. Sab)

- 3 sols (30, 90, 1000 MPa)
- charges à l'essieu de 14 à 23 tonnes
- vitesses de 100 à 220 km/h
- 29 essais

Loi de tassement vertical
à échelle 1/1 ($N > 250\,000$ cycles) :

$$\frac{d\tau_v}{dN} = 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot (\delta_v)^{1,17}$$



Dispersión naturelle malgré
les conditions de laboratoire

Influence de la raideur du sol
et de la charge dans la
déflexion verticale

Tassement très supérieur
à la loi Microballast
(Guérin et Sab, 96) :

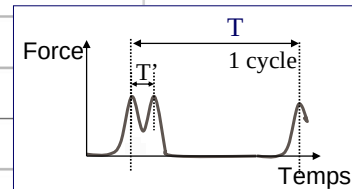
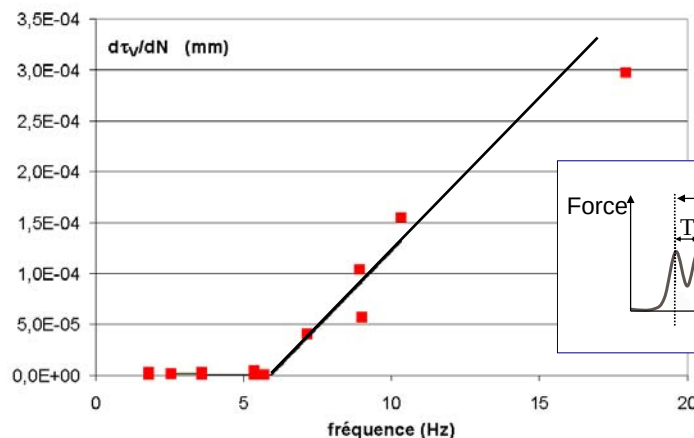
$$\frac{d\tau_v}{dN} = 9,2 \cdot 10^{-8} \cdot (\delta_v)^{2,5}$$



37

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (N. Guérin, V. Bodin, K. Sab)

Mise en évidence d'une fréquence critique



38

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (Al-Shaer, K. Sab, D. Duhamel)



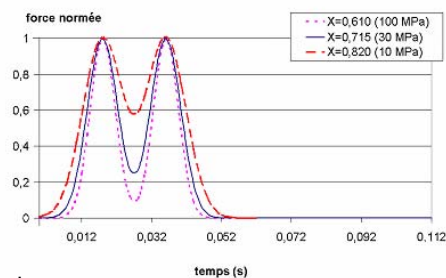
- Traverse : bi-bloc à échelle 1/3
- Micro-ballast
- Sol : réel (sable)
- Similitude : conservation de la masse volumique et des accélérations
- 3 vérins synchronisés pour simuler le passage d'essieux



39

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (Al-Shaer, K. Sab, D. Duhamel)

Essais à trois traverses : protocole expérimental



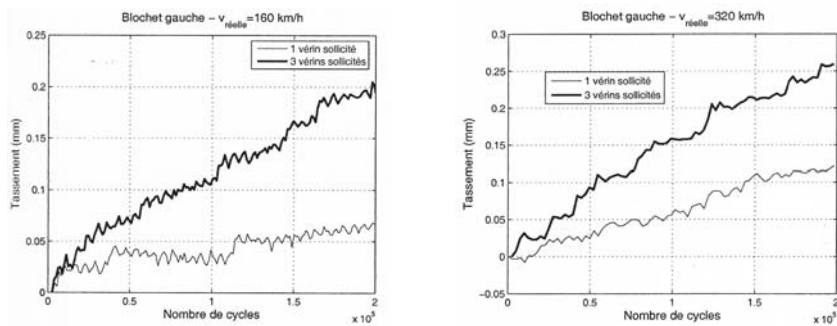
- Identification sol
- Identification système complet
- Alternance d'identifications et de séries de 200 000 cycles à 160, 200, 270, 320,



40

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3
(Al-Shaer, K. Sab, D. Duhamel)

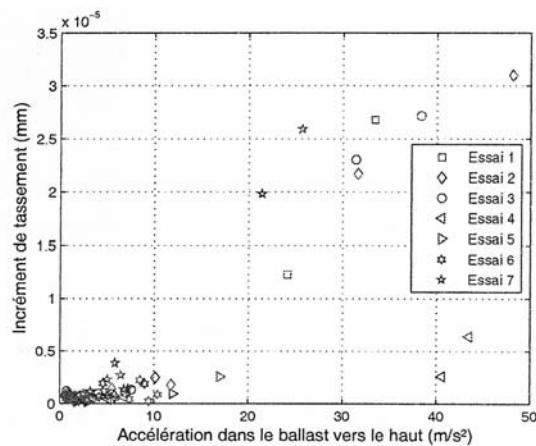
Evolution du tassement sur 200 000 cycles



41

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3
(Al-Shaer, K. Sab, D. Duhamel)

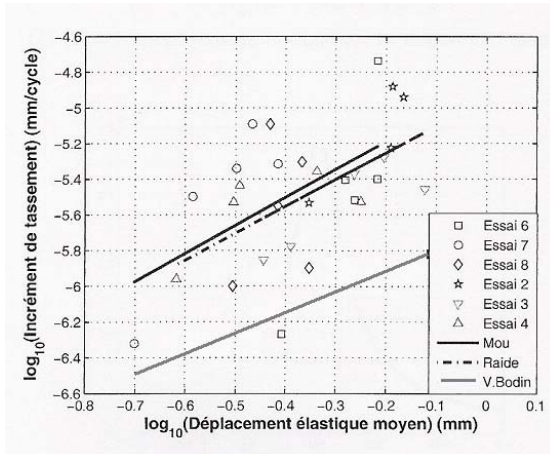
Incrément de tassement en fonction de l'accélération de la traverse



42

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (Al-Shaer, K. Sab, D. Duhamel)

Comparaison des lois de tassement 3 traverses et V. Bodin



Tassements très supérieurs avec charge roulante (banc 3 traverses)

$$\frac{d\tau}{dN} = 30,52 \cdot 10^{-6} d^{2,41}$$

$$\frac{d\tau}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-6} d^{1,17}$$



43

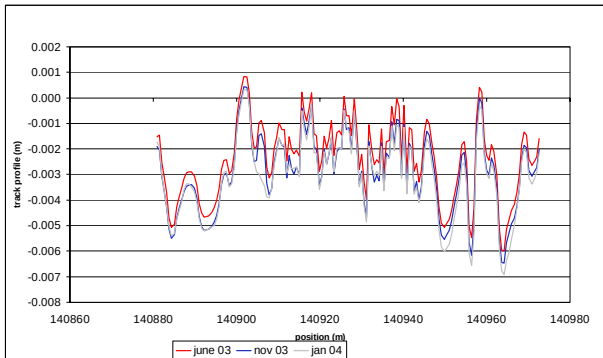
Tassement du ballast en voie

- L'importance est mise sur le **tassement différentiel**, qui génère de l'inconfort
 - Indicateur NL = écart type des défauts (base 12 m ou 23 m)
 - Pas de mesure systématique du tassement absolu
- Le tassement absolu reste très variable d'un site à l'autre
- Quelques mesures (difficiles) sont néanmoins disponibles



44

Tassement du ballast en voie



Trafc : 4500 cycles/jour
(approx 1.5 Mcycles/an)

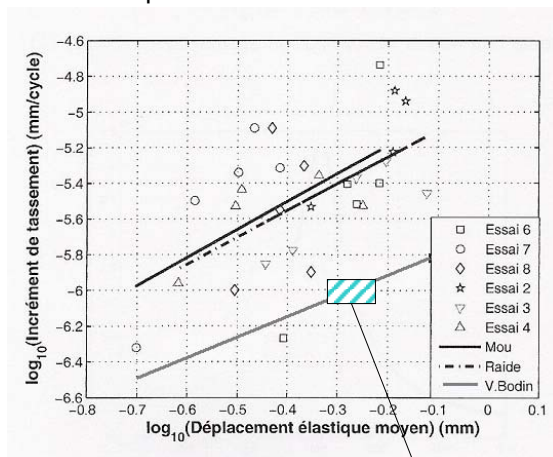
Tassement moyen : 0,7 mm en 7 mois



45

Recherche d'une loi de tassement : échelle 1/3 (Al-Shaer, K. Sab, D. Duhamel)

Comparaison des lois de tassement 3 traverses et V. Bodin



- Mesures LGV Nord

$$\frac{d\tau}{dN} = 30,52 \cdot 10^{-6} d^{2,41}$$

$$\frac{d\tau}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-6} d^{1,17}$$



46

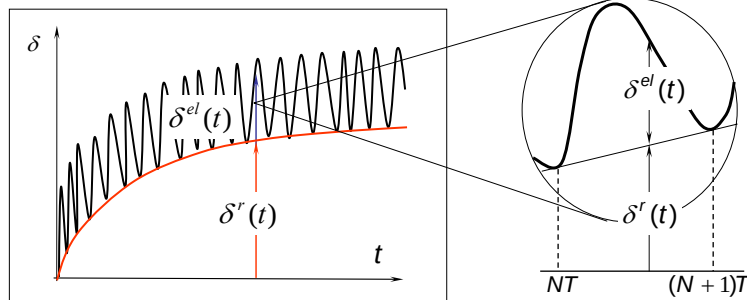
Recherche d'une loi de comportement cyclique
 LMSGC (M. Abdelkrim, P. de Buhon)

Description du tassement :
double échelle de temps

$$\delta(t) = \delta^{el}(t) + \delta^r(t)$$

Déflexion élastique
(variation "rapide")

Tassement résiduel
(variation "lente")

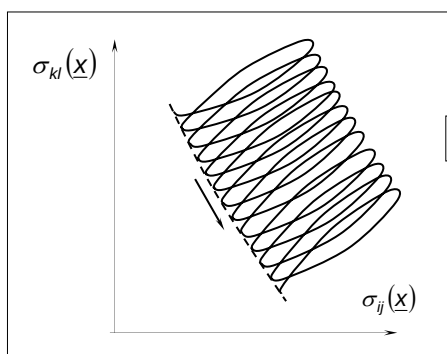


$$\delta^r((N+1)T) - \delta^r(NT) \ll \delta^{el}(t)$$



47

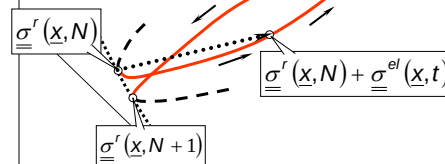
Recherche d'une loi de comportement cyclique
 LMSGC (M. Abdelkrim, P. de Buhon)



dérive

Cycle de contrainte

$$(\underline{\sigma}) (\underline{x}; N)$$



Contrainte **résiduelle** au
terme de N cycles

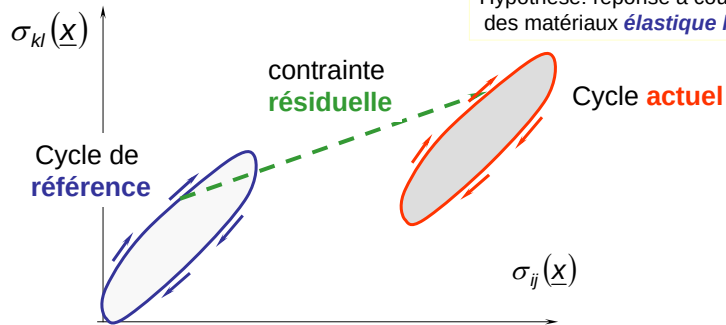
$$\|\underline{\sigma}^r(\underline{x}, N+1) - \underline{\sigma}^r(\underline{x}, N)\| \ll \text{Amplitude du cycle}$$



48

Recherche d'une loi de comportement cyclique

LMSGC (M. Abdelkrim, P. de Buhan)



$$\frac{d\varepsilon^p}{dN}(\underline{x}; N) = \mathbf{F} \left[\underline{\varepsilon}^p(\underline{x}; N), \underline{\sigma}^r(\underline{x}; N) + \left(\oint \underline{\sigma} \right)^{\text{ref}}(\underline{x}) \right]$$

Calcul élastique avec $\underline{\varepsilon}^p(\underline{x}; N)$ imposé

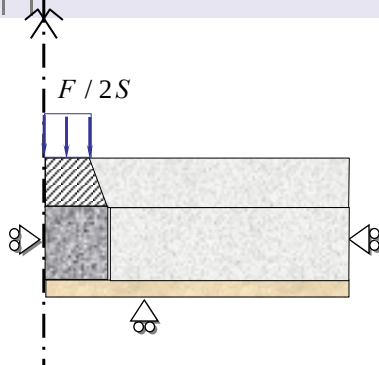
Calcul élastique (Boyce)



49

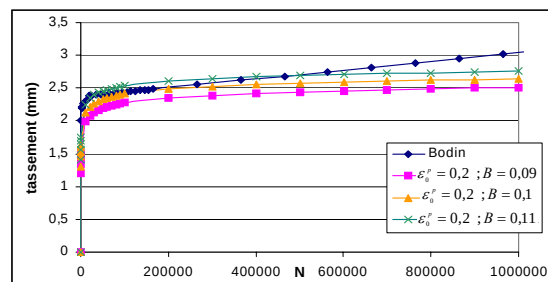
Recherche d'une loi de comportement cyclique

LMSGC (M. Abdelkrim, P. de Buhan)



Modélisation sous CESAR LCPC et calage de l'essai « Better »

Loi de comportement identifiée sur la grave de Poulmarch (Gidel et al. 2001)



50



Recherche d'une loi de comportement cyclique

LMSGC (M. Abdelkrim, P. de Buhan)



Avantages et limites

- Elaboration d'une méthode de calcul générale, indépendance vis-à-vis de la structure
- Nécessité de formulation d'une loi de comportement cyclique pour le ballast (CERMES ?)
- Intégration à des outils de calcul adaptés à la configuration réelle (3D)
- Signification physique de la notion de contrainte locale dans le ballast ?



51



Recherche d'une loi de comportement cyclique

ECP (D. Aubry – A. Modaressi – D. Clouteau - H. Chebli)



Modèle élasto-plastique incrémental multi-mécanismes de Hujeux (1985)

- 3 mécanismes de déformations plastiques planes dans trois plan orthogonaux
- 1 mécanisme de consolidation volumique
- **Surface de charge** : les limites du domaine d'élasticité sont indiquées par des critères de plasticité, sous la forme de fonctions de seuil, qui décrivent dans l'espace des contraintes une surface de charge
- **Ecrouissage** : les surfaces de charge évoluent avec les déformations plastique
- **Loi d'écoulement** : direction d'évolution des variables d'écrouissage (orthogonalité ou non à la surface de charge)

Couplage d'une loi d'endommagement faisant évoluer l'angle de frottement avec le travail cumulé au cours de la vie du matériau



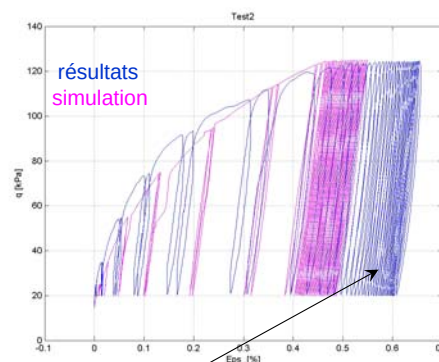
52

Modèle élasto-plastique incrémental multi-mécanismes de Hujeux (1985)

Paramètres

- **Paramètres élastiques** : E , ν , $n_{\text{élas}}$ (non-linéarité)
- **Paramètres plastiques** : angle de frottement, droite d'état critique, forme de la surface de charge
- **Paramètres d'écrouissage**

Calage des paramètres à partir d'essais triaxiaux LMSSMat puis NGI

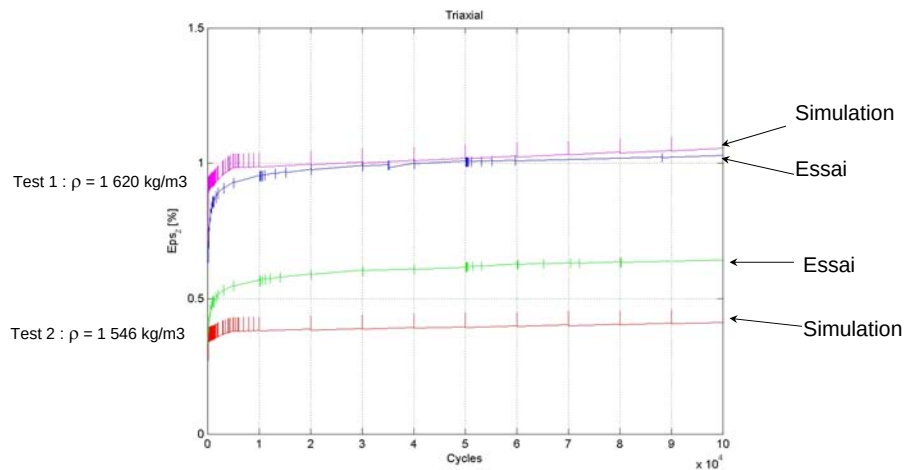


Resserrement des cycles (diminution de la plasticité)
➤ Variation des paramètres d'écrouissage

Recherche d'une loi de comportement cyclique

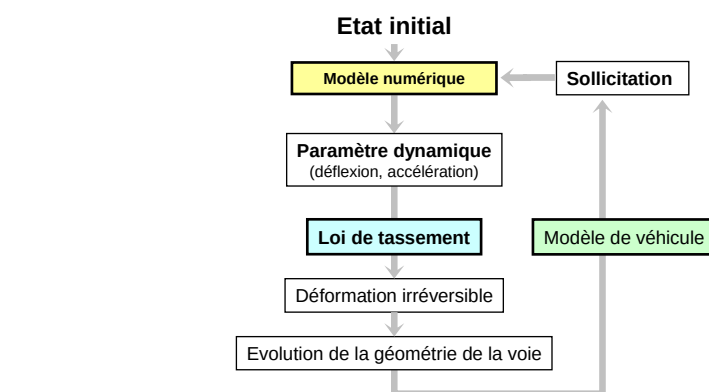
ECP (D. Aubry – A. Modaressi – D. Clouteau - H. Chebli)

Modélisation des déformations irréversibles cumulées (essai triaxial)



55

Approche numérique : modélisation dynamique continue



- Découplage du calcul dynamique et de la loi de tassement
- Calcul rapide sur de grands nombres de cycles (extrapolations)
- Modification des sollicitations avec la géométrie de la voie
- Difficulté d'identifier la loi de comportement du ballast

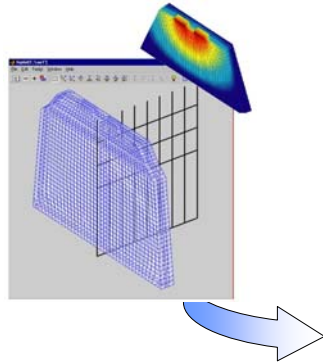


56

Approche numérique : modélisation dynamique continue

Modélisation éléments finis par tranches : Dynavoie

Modélisation par tranche
(modèle local de type éléments finis)

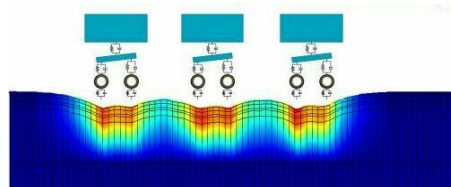


Principe de la périodicité de la voie

Lois de comportement linéaires

Représentation continue du ballast

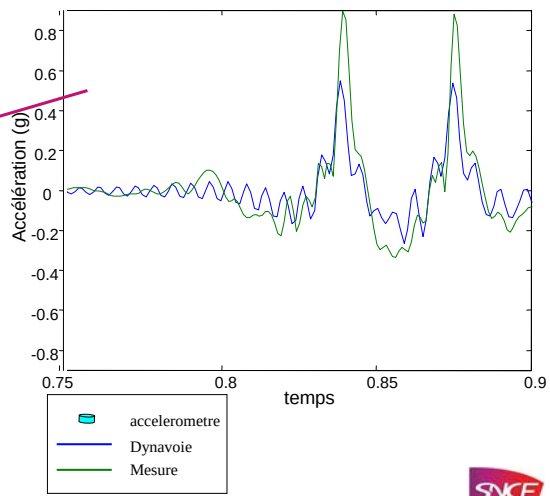
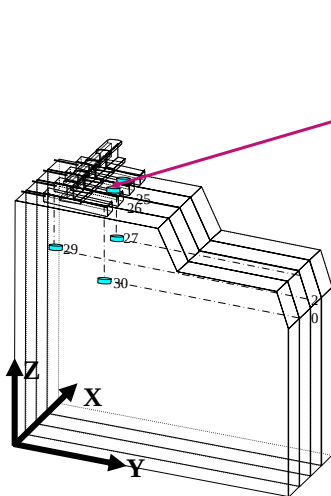
Modélisation masses-ressorts des véhicules



SNCF 57

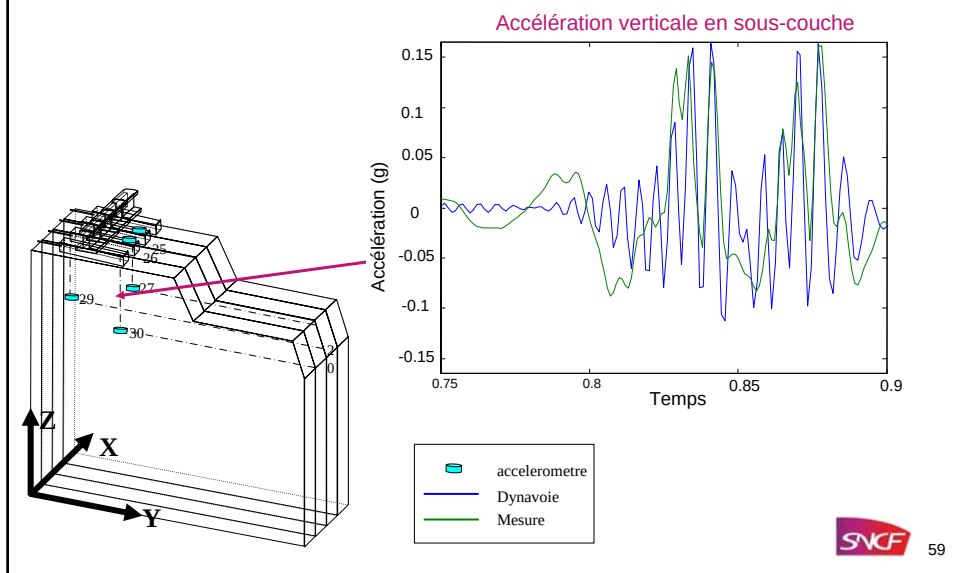
Approche numérique : modélisation dynamique continue

Accélération verticale de traverse



SNCF 58

Approche numérique : modélisation dynamique continue



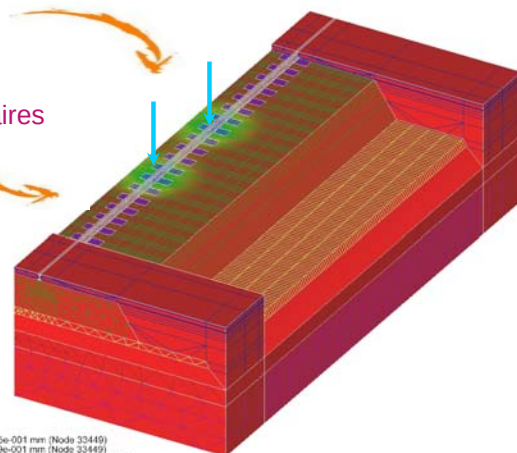
Approche numérique : modélisation dynamique continue

Modèle éléments finis CESAR LCPC

Introduction d'une double charge mobile

Introduction de LC non-linéaires

Introduction de limites absorbantes



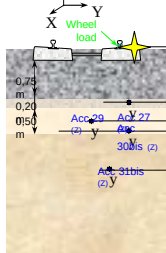
95e-001 mm (Node 33449)
09e-001 mm (Node 33449)
196e+001 MN/m2 (Node 35156)

60

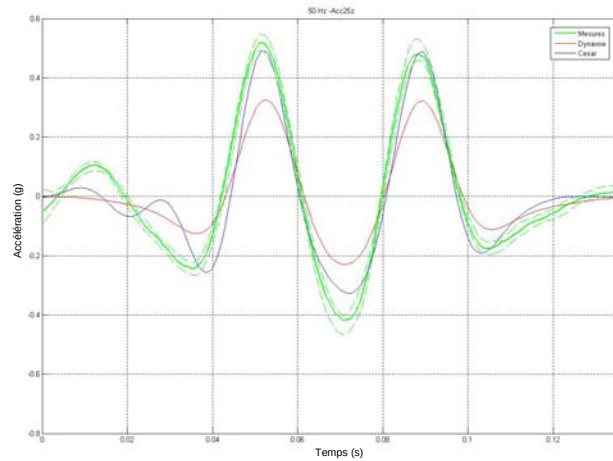
Approche numérique : modélisation dynamique continue

σ
 ϵ
Elastique linéaire
bi-latéral

Accélération
verticale de
traverse
(filtrage 50 Hz)

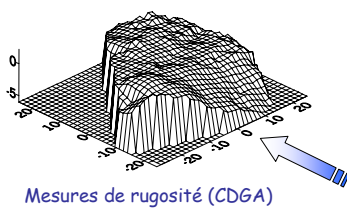


Modèle éléments finis CESAR LCPC :
comparaison calcul/mesure



61

Approche numérique : modélisation granulaire

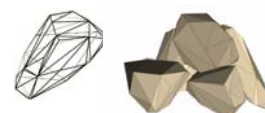


Propriétés de frottement

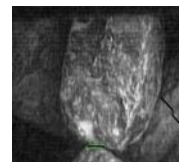


Équations mécaniques
+ loi de contact

Modélisation granulaire



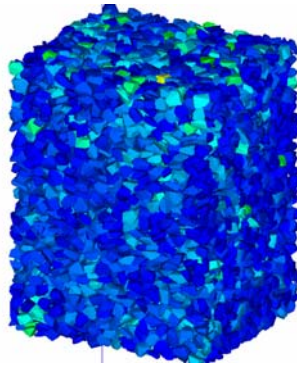
Analyse morphologique
et digitalisation



Etude in-situ des textures
et des contacts par
géoendoscopie et analyse
d'images (CUST)

SNCF 62

Approche numérique : modélisation granulaire

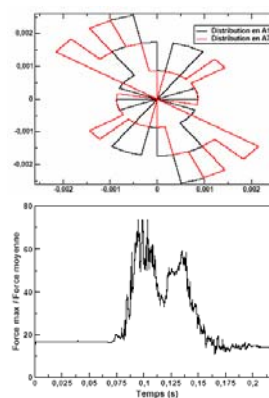
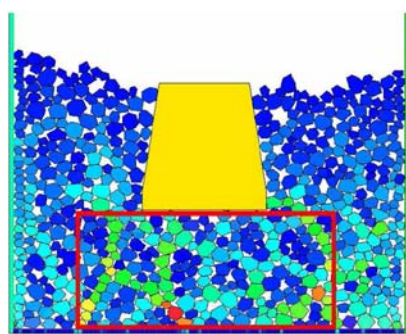


- Bonne représentativité du mécanisme de tassement par réarrangements granulaires
- Application des sollicitations cycliques très lente
- Pas d'adaptation des sollicitations aux modifications de géométrie de voie
- Pas (encore) d'endommagement



63

Approche numérique : modélisation granulaire



- Transmission des efforts par chaînes de forces privilégiées (SRL)
- Changements d'orientation des SRL
- La force au contact maximale sous le blochet atteint 60 la force moyenne : milieu très inhomogène, pertinence de la définition d'un tenseur de contrainte ?



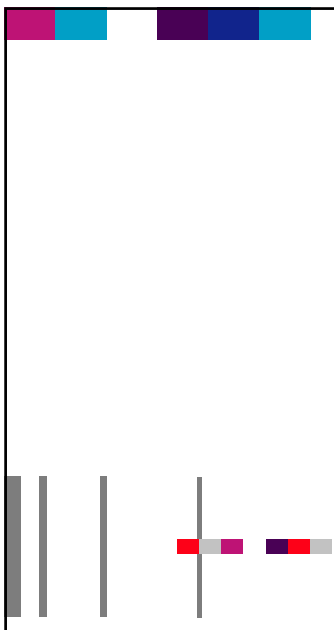
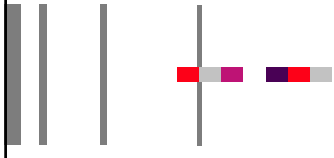
64

Perspectives

- Essais de laboratoire : nécessité de confirmation à échelle 1/1
- Poursuite recherche de lois de tassement
- Extension aux sous-couches
- Introduction de l'endommagement (usure, fracturation, pollution, rigidification)
- Evolution des modèles dynamiques : non-linéarités, domaines de fréquence,...



65











donner au train des idées d'avance



