

LES PLÉNIÈRES 2006 DU LCPC
Sciences et techniques
du **Génie Civil**

**JOURNÉES
TECHNIQUES ROUTES
1^{ER} ET 2 FÉVRIER 2006**

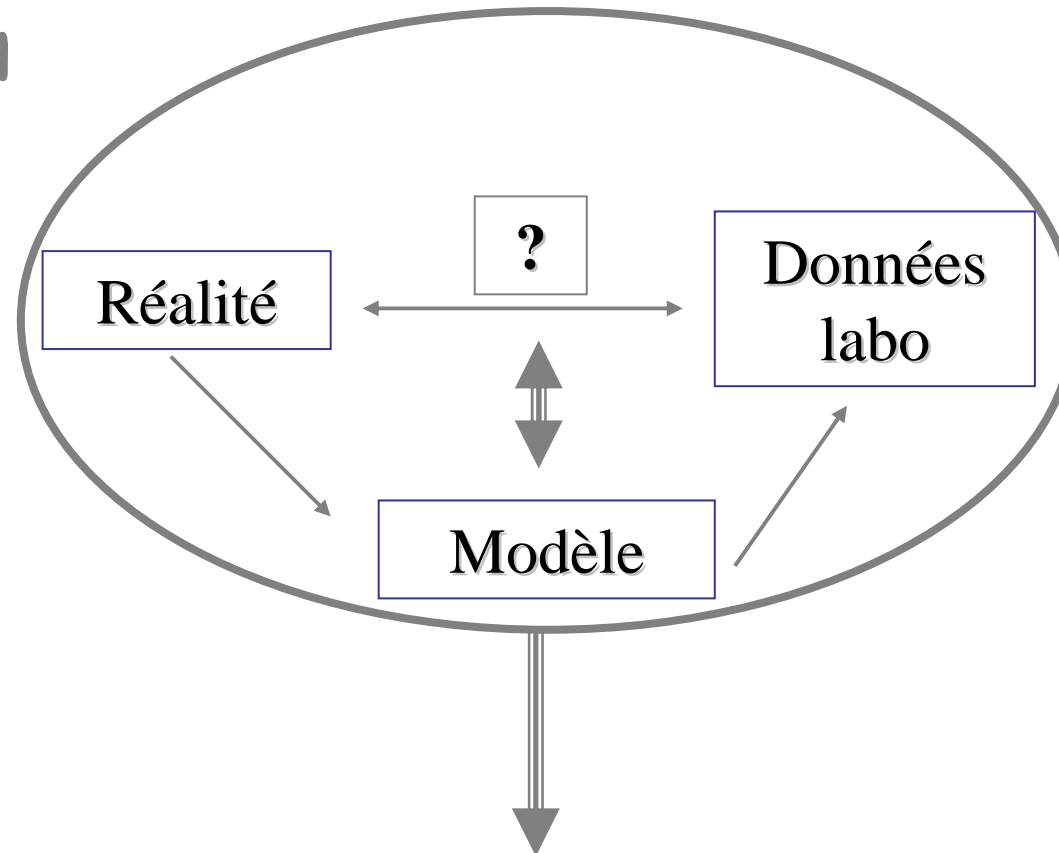
Modèle de calcul de structure de chaussées fissurées

Applications -> chaussées semi-rigides/ bétons ou composites

- ✓ remontées de fissure
- ✓ collage entre couche
- ✓ fissuration dalles BCMC



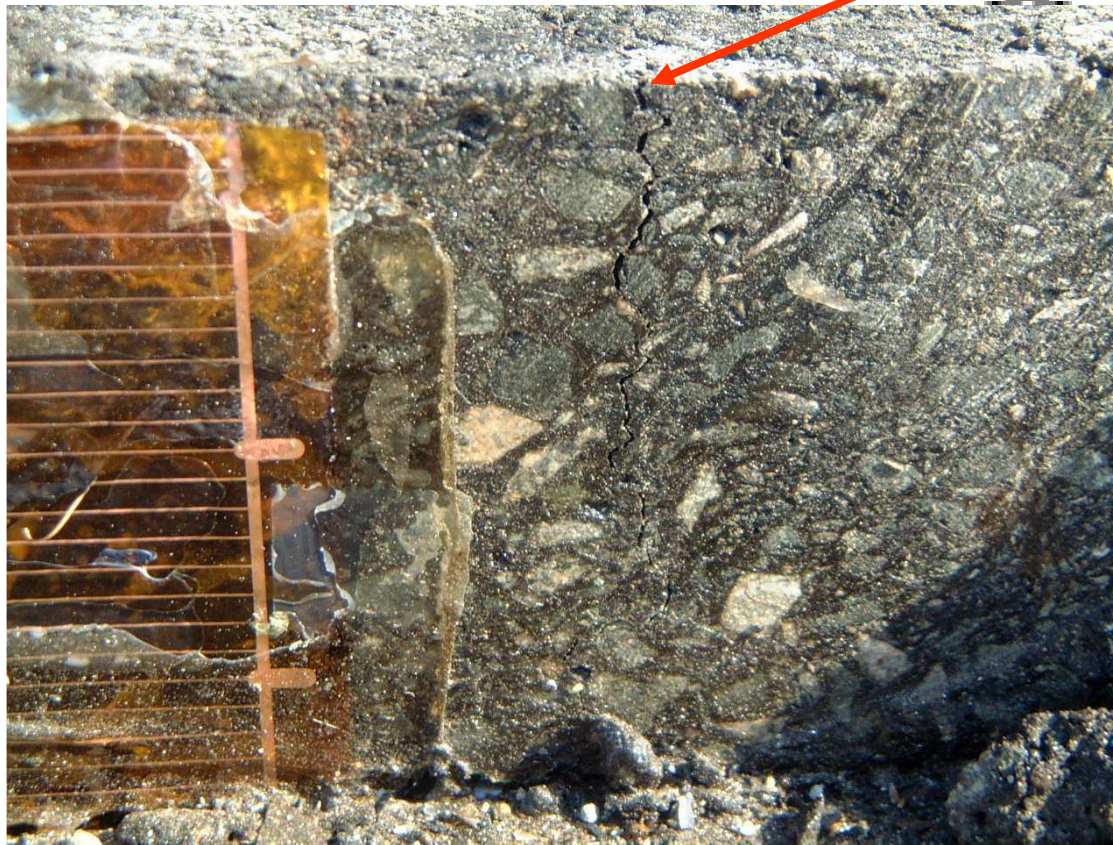
MOTIVATION



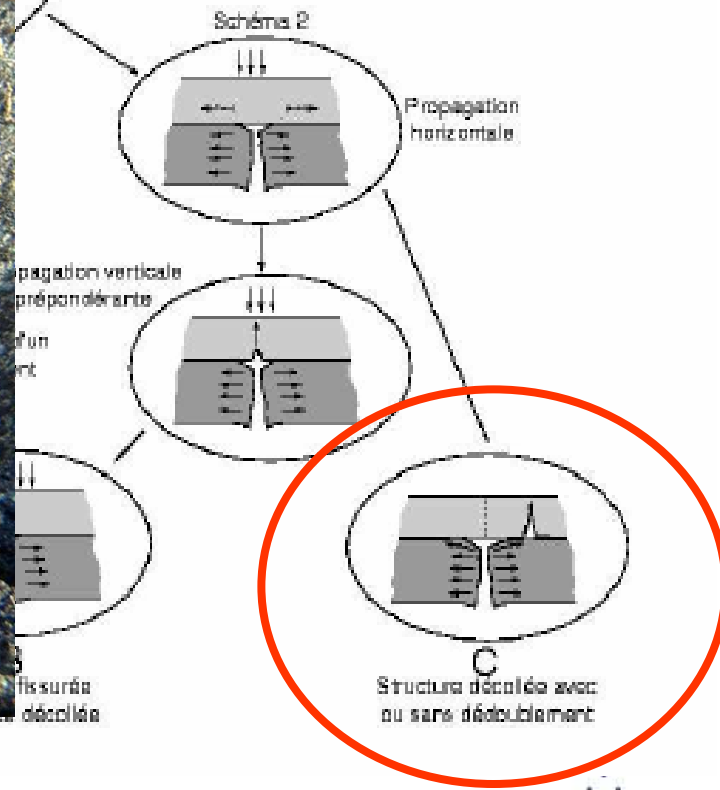
Objectif: Outil ingénieur

Réalité ... Pb de remontées de fissures...

[Marchand, 1984] [Goacolou, 1989]

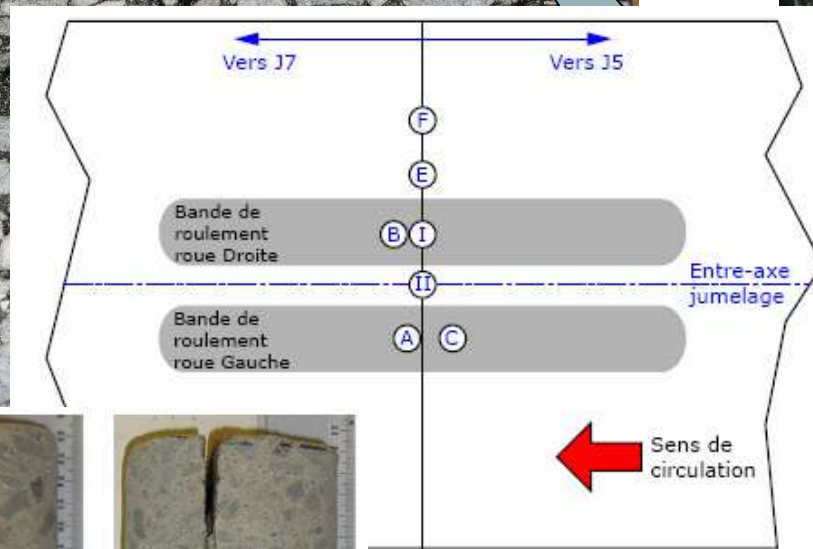


Structure partiellement fissurée
solicitée par le trafic et des
contraintes thermiques



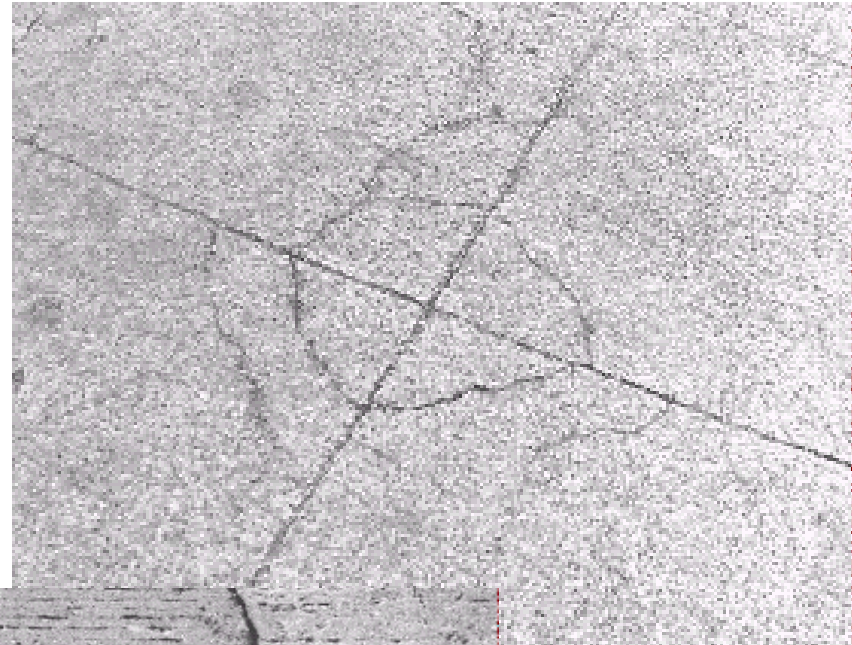
[Pérez, Balay, Tamagny, 2006]

Réalité ...Interface... Collage?....

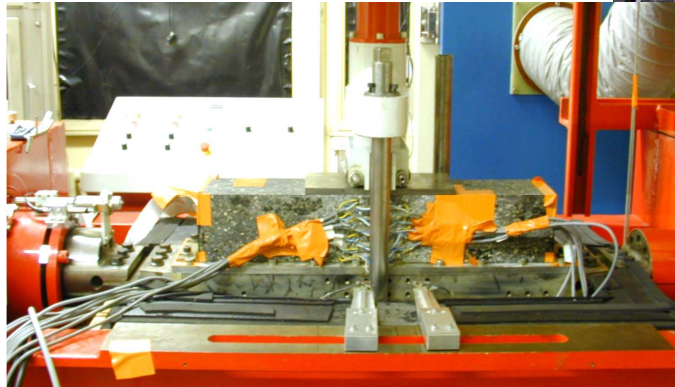
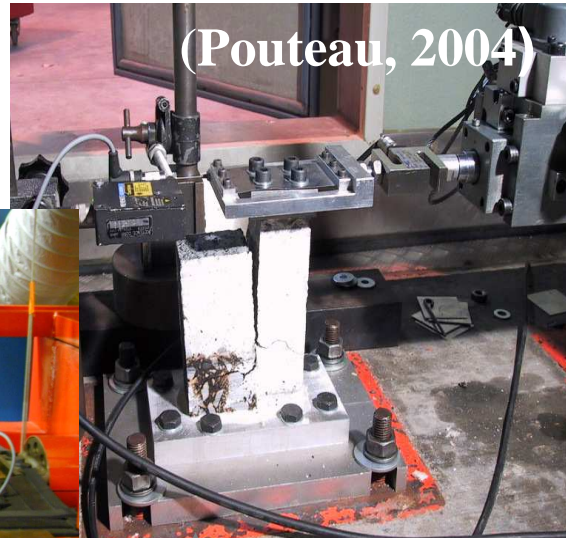


Armelle Chabot

Réalité ...fissuration de coin de dalle...



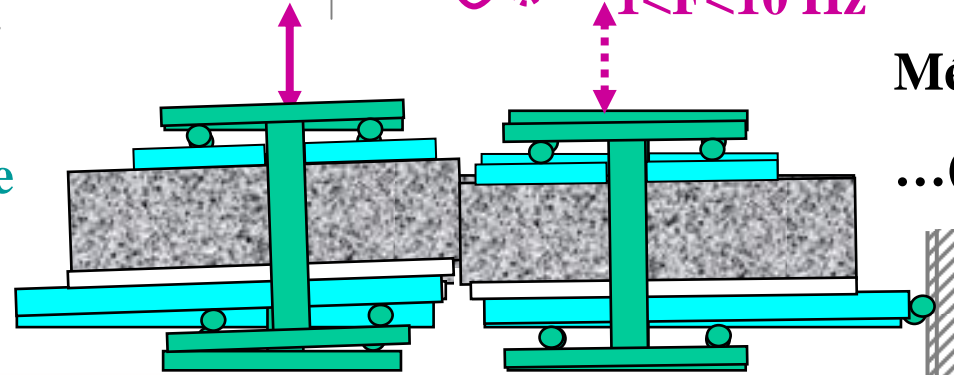
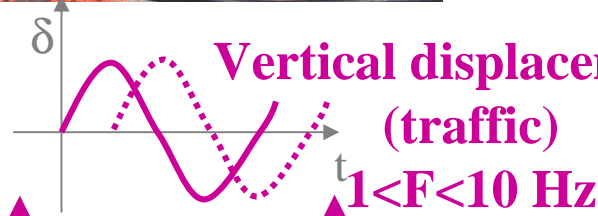
Données labo ...



Méfisto ERA d'Autun

...(Pérez, 2006)...

Thermal
shrinkage
 $F \ll 1$ Hz



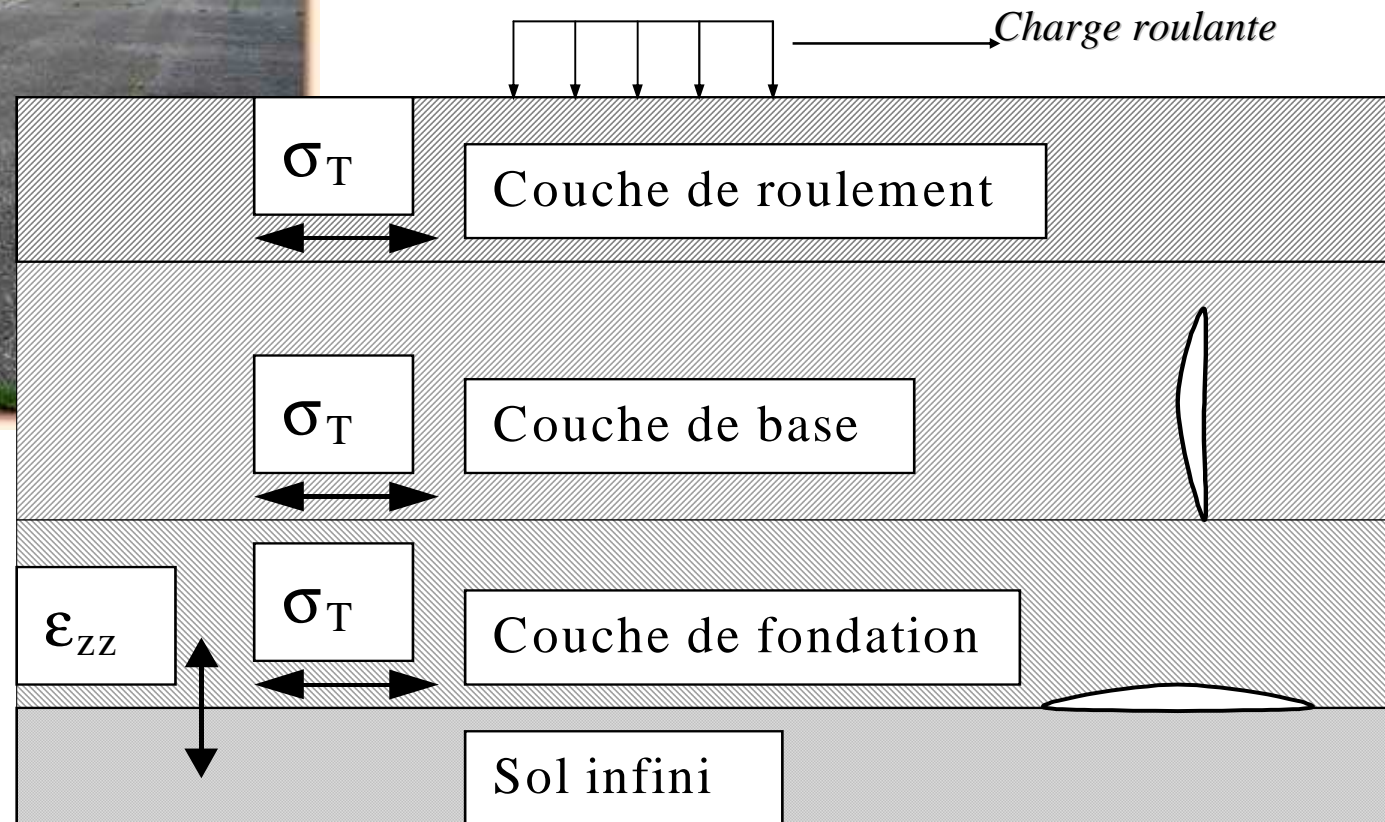
Méfisto ERA d'Autun

...(Pérez, 2006)...

Quel modèle choisir?



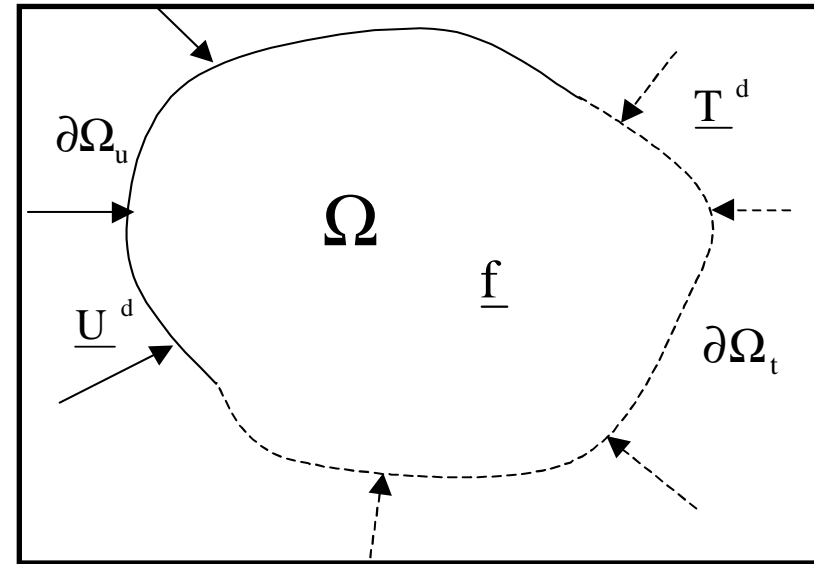
Multicouche
sur un
demi espace



Rappel Modèles Mécaniques

- ☐ Equations d'équilibre
- ☐ Conditions aux limites
- ☐ Lois de comportement

→ **Solution 3D ($\underline{U}, \underline{\sigma}$)?**



→ Choix d'approximations (modèles simplifiés)

☐ en déplacement

☐ **en contraintes**

☐ en comportement

€ géométries particulières

Théorèmes



Outils de résolution

☐ Analytiques

☐ Numériques

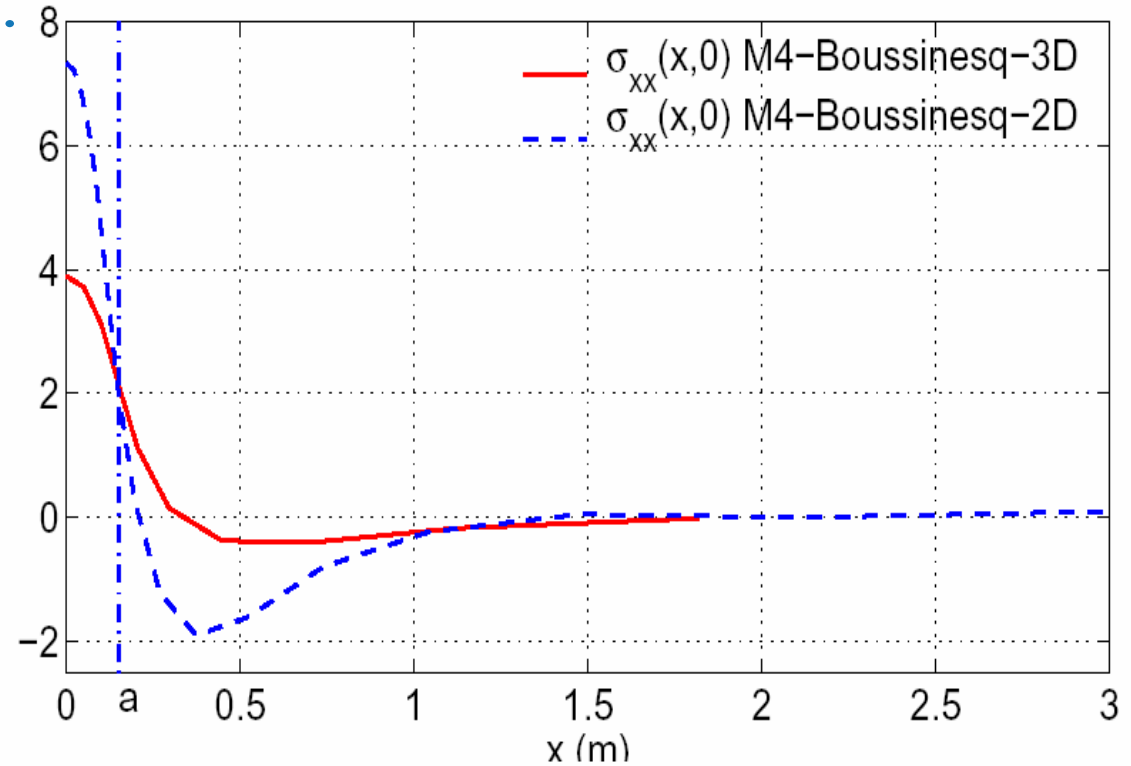
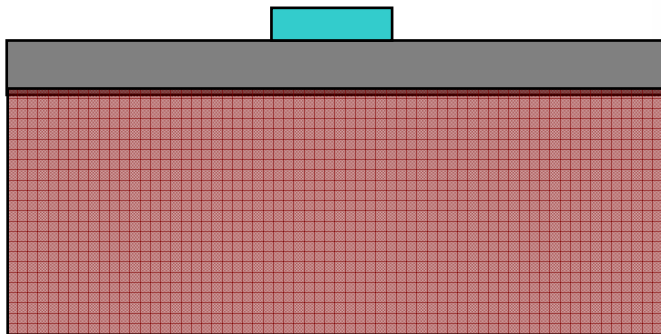
☒ EF

☒ Différences finies

☒ ...

Modèle ...Approximations?....

Comparaison 2D déf. Plane
3D, chaussée monocouche

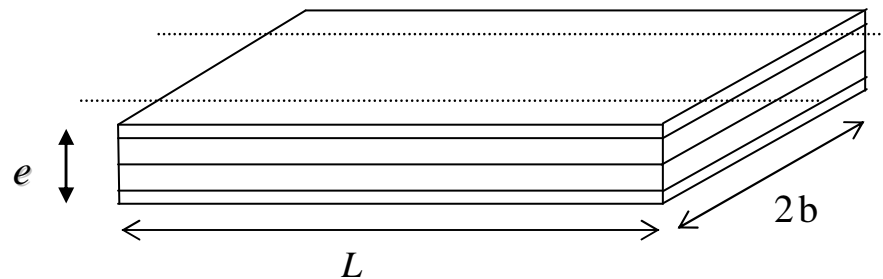


~~2D~~ 3D

- Différence de grandeur
- Différence de forme

Modèle ...Approximations?....

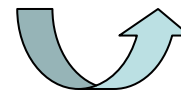
- Approximations 2D plaques (Love-Kirchhoff ou Reissner-Mindlin)



$$e \ll L$$

- Structures Multicouches → Structures complexes (empilement de plaques)
 - ⇒ Hétérogénéités de comportement suivant z
 - ⇒ Concentrations de contraintes 3D importantes aux interfaces près de bords ou de fissures

Autres modèles....





Modèles simplifiés de multicouches pour l'analyse des contraintes aux interfaces (ENPC - depuis 15 ans, + de 12 thèses soutenues)

Méthode d'élaboration de modèles de plaques multiparticulaires en 4 étapes (Chabot, 1997) (Chabot & Ehrlacher, 1998)

- choix d'un champ $\bar{\sigma}$ approché polynomial en z par couche
- fonctionnelle (Hellinger-Reissner, 1950) → déf. généralisées associées
- stationnarité/déf. associées → éq. d'équilibre + C. L.
- stationnarité/efforts généralisés → comportement

(Approximation de type plaque)

- Calculs simples 2D, calculs analytiques
- 2 modèles intéressants

✓ M4_(2n+1)

✓ M4_5n



Projet fissuroute (2001)

Problème de flexion -> le M4-5n à 5n champs cinématiques

- Choix de prise en compte des efforts généralisés ainsi définis
- Approximation polynomiale de degré 1 en z pour les champs de contraintes membranaires

$$\sigma_{\alpha\beta}^{5n}(x, y, z) = \frac{N_{\alpha\beta}^i(x, y)}{e^i} + \frac{12(z - \bar{h}^i)}{e^{i3}} M_{\alpha\beta}^i(x, y)$$

⇒ Equilibre

$$\sigma_{\alpha 3,3}(x, y, z) = -\sigma_{\alpha\beta,\beta}(x, y, z) \Rightarrow \sigma_{\alpha 3}^{5n}(x, y, z) \text{ degré 2 en } z$$

$$\sigma_{33,3}(x, y, z) = -\sigma_{\alpha 3,\beta}(x, y, z) \Rightarrow \sigma_{33}^{5n}(x, y, z) \text{ degré 3 en } z$$

Modèle : Le M4-5n à 5n champs cinématiques

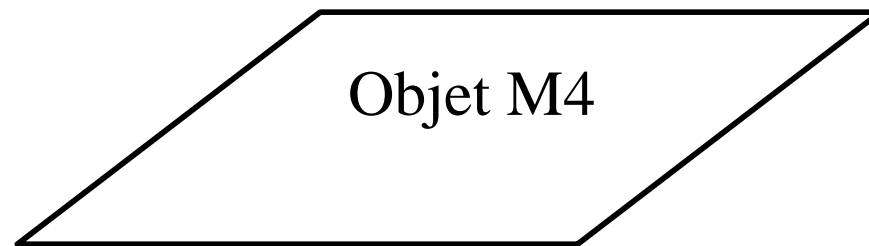
- Déplacements généralisés moyen par couche i

$$U_{\alpha}^i(x, y) = \int_{h_i^-}^{h_i^+} \frac{U_{\alpha}(x, y, z)}{e^i} dz \quad U_3^i(x, y) \quad \Phi_{\alpha}^i(x, y)$$

- Déformations généralisées associées:
 - de couche i
 - d'interface i,i+1

Modèle : Le M4-5n à 5n champs cinématiques

- 5 équations d'équilibre par couche ($i=1,n$)
- Conditions aux limites par couche ($i=1,n$) au bord de la surface (la fissure est un bord)
- Comportements de couche i et d'interface $i,i+1$

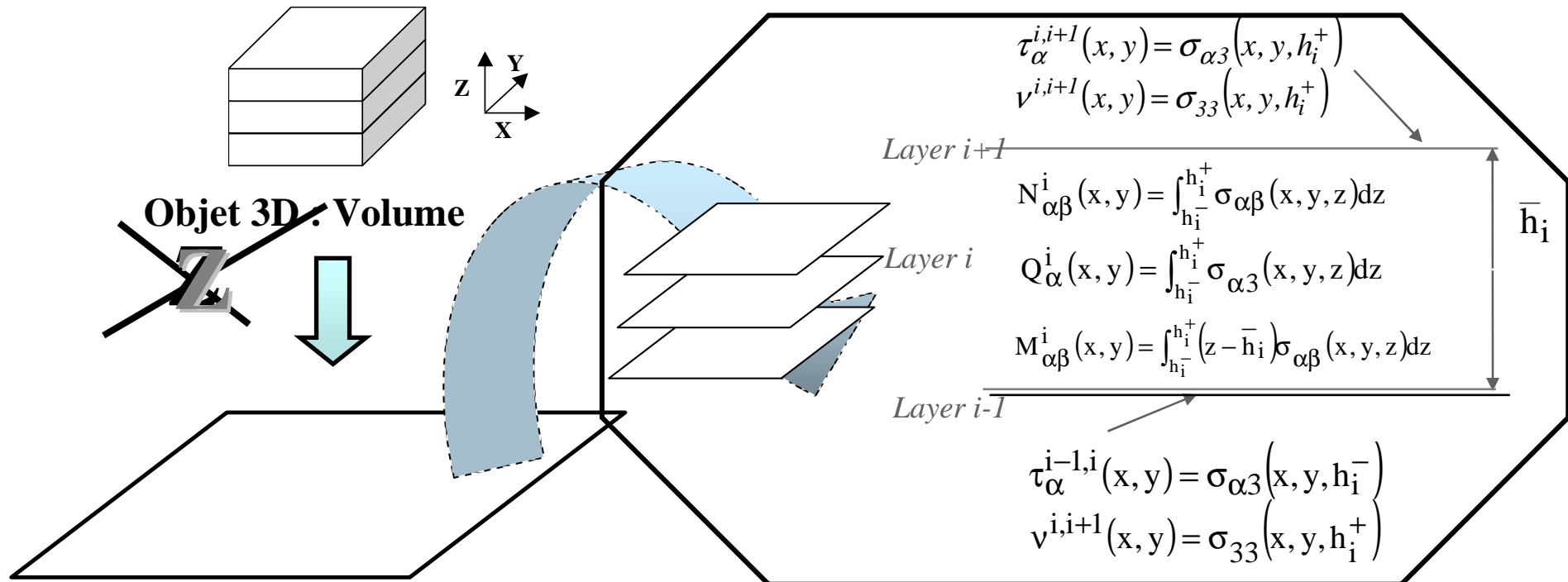




En d'autres termes...

Méthode de construction des M4 (Chabot, 1997)(Chabot & Ehrlacher, 1998)

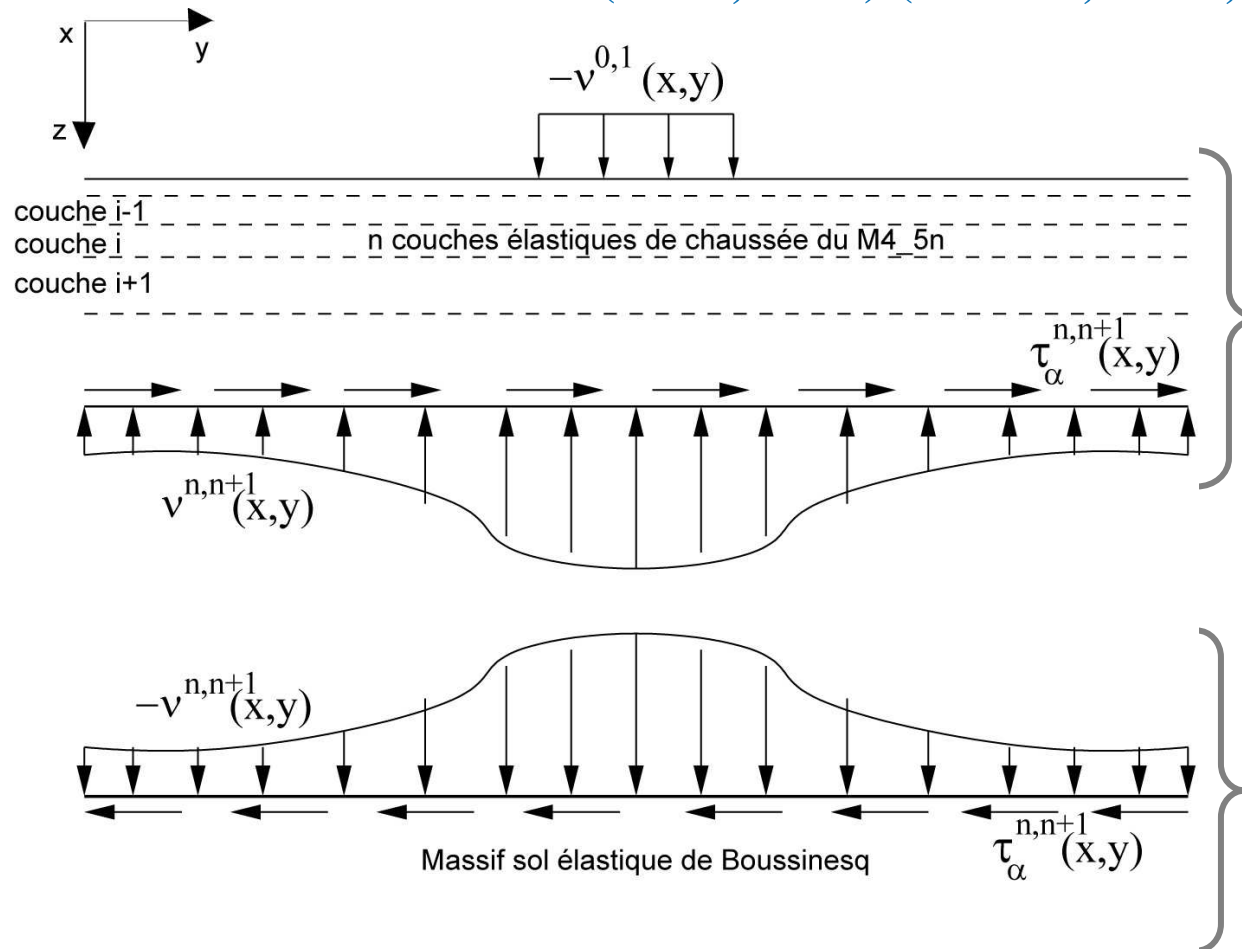
- Polynomial approximation per layer i in z for σ_{ij}
- Hellinger-Reissner formulation (Reissner, 1950)





Modèle M4-5nB

(Tran, 2004) (Chabot, Tran, Ehlacher, 2005)



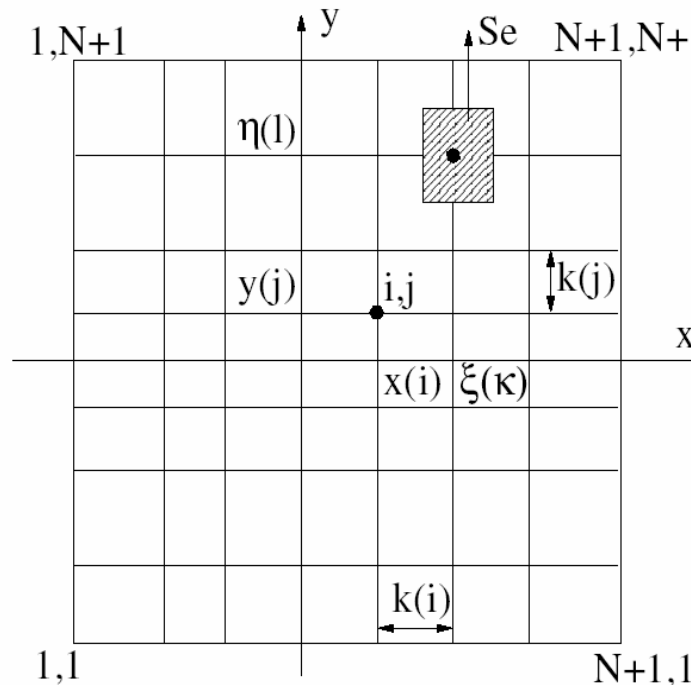
M4-5n

Sol de Boussinesq:
→ Équations analytiques

lien entre les contraintes de la
chaussées et les déplacements à
la surface du sol

Résolution fissuroute (Tran, 2004)

Approximation par différence finies pour les équations différentielles du M4-5n
Approximation par intégration semi-analytique pour les équations de Boussinesq



n couche de chaussée + massif de sol infini
11n inconnus statiques + 5n inconnus cinématiques

$$[N_{\alpha\beta}^i \ M_{\alpha\beta}^i \ Q_{\alpha}^i \ T_{\alpha}^{i,i+1} \ U^{i,i+1} \ U_{\alpha}^i \ \Phi_{\alpha}^i \ U_3^i]$$



Systeme différentiel à $(5n+3) (N+1)^2$ équations
-> Résolution et validation numériques (version recherche)
sous Matlab (Tran 2001-2004) (Guillo, 2004)

Discrétisation du M4-5B



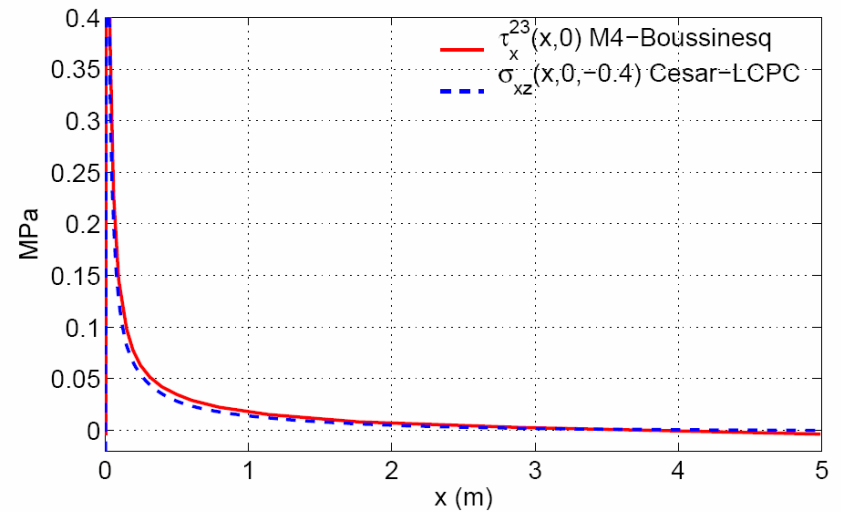
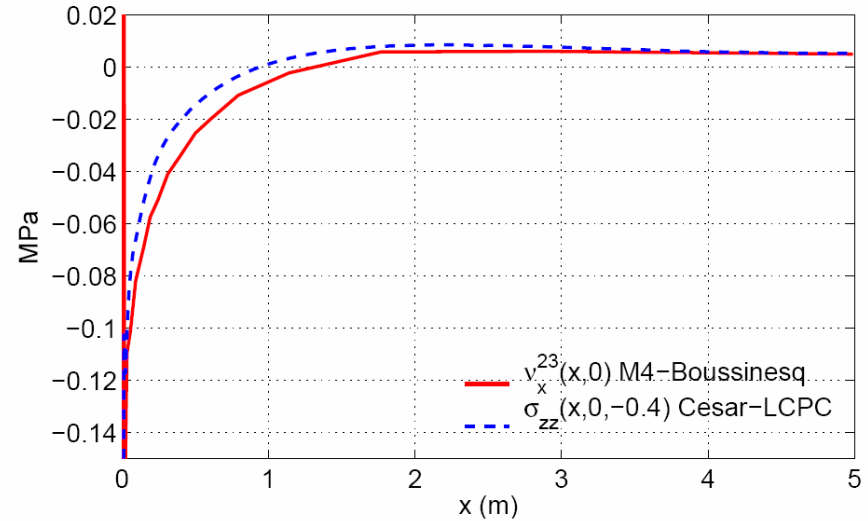
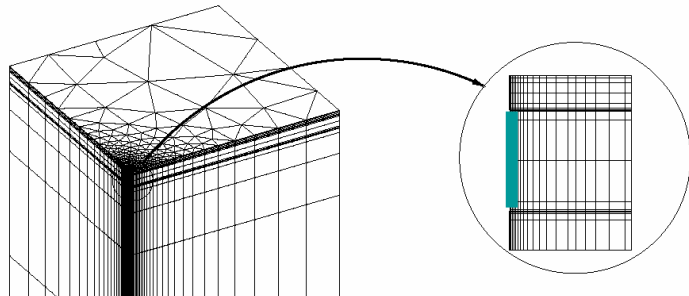
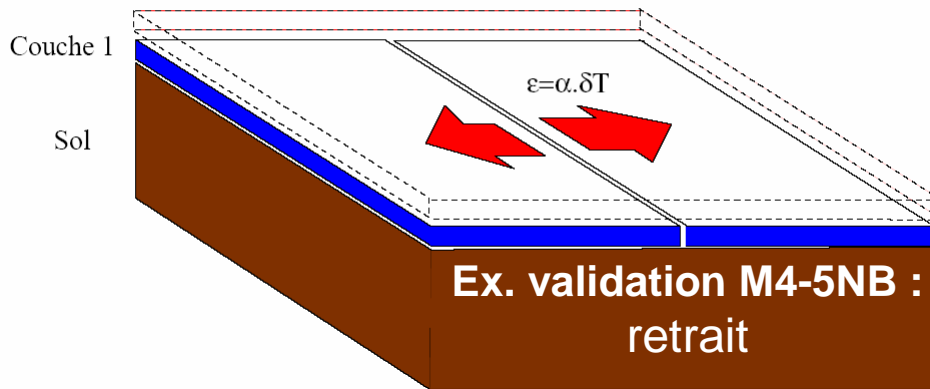
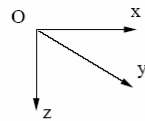
$$e_1 = 0.1m \quad E_1 = 9300 MPa \quad \nu_1 = 0.35$$

$$e_2 = 0.3m \quad E_2 = 23000 MPa \quad \nu_2 = 0.25$$

$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \quad \delta T = 10^\circ C$$

$$E_s = 50 MPa \quad \nu_s = 0.35$$

[Tran, 2004]



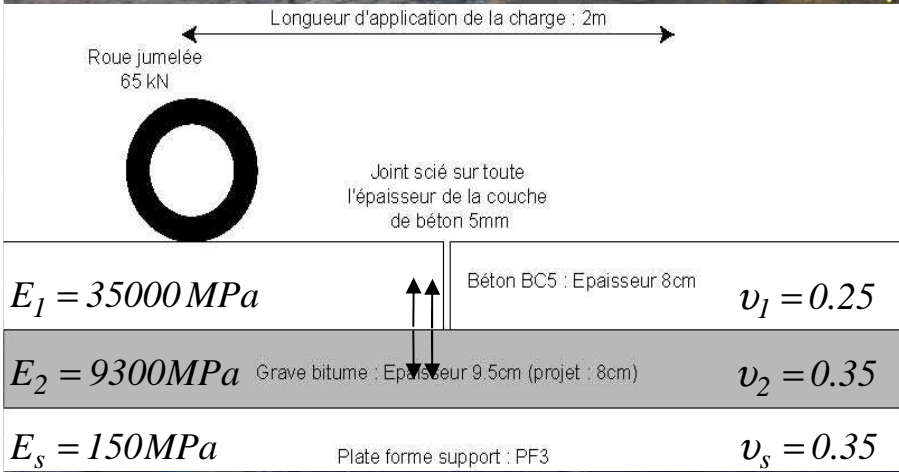
EF 3D (César-LCPC) -> 2h CPU

M4-B -> 15' CPU



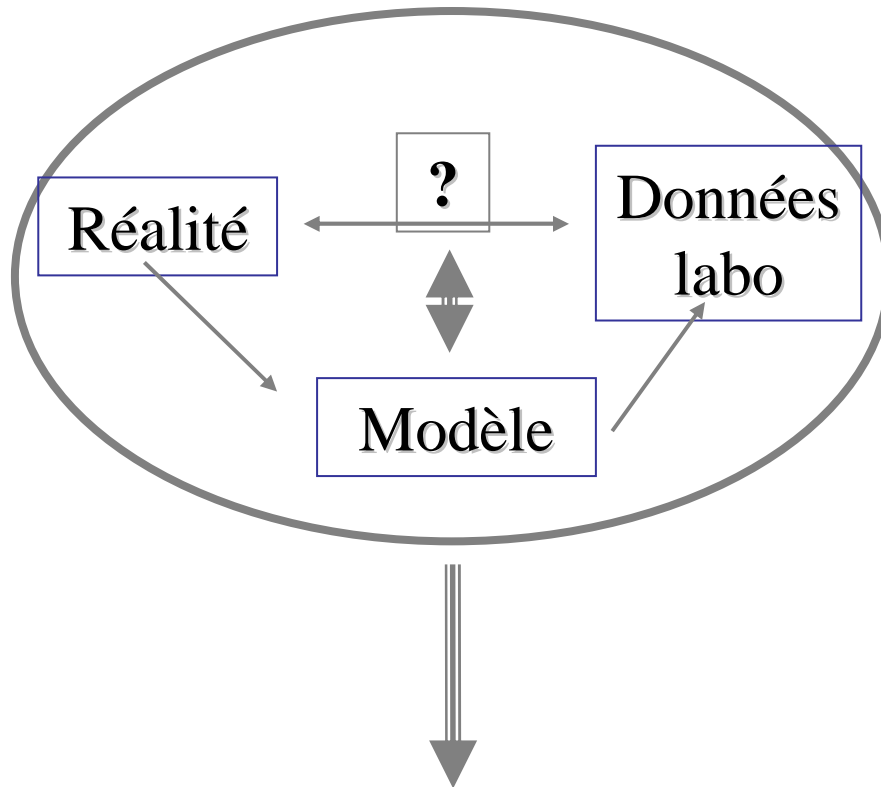
Exemple d'application du modèle M4-Boussinesq

Chaussées alternatives en béton de ciment sur enrobés bitumineux (Pouteau, 2004) (Chabot, De Larrard)



Contrainte normale à l'interface
béton/enrobés ->

Bilan - Projet fissuroute



Objectif: Outil ingénieur

⇒ **Modèle M4-5nB OK**

Théorie (décollement, retrait, gradient thermique), validation numérique

(Tran, 2004), stage (Guillo, 2004)

⇒ **Validations expérimentales, recherche de critères à suivre**

(Pouteau, 2004), (Florence, 2005), (Pérez, 2003-2006), (Lavigne, 2005-2008)...

⇒ **Outil numérique à développer**

(Lavigne, 2005-2008)...

- Décollement,
- Eau, viscoélasticité,...

Du plus...

BL N°258-259 (Chabot, Tran, Ehrlacher, 2005)
thèse de (Tran, 2004)

WWW.lcpc.fr/msc

Cifre ATILH (Pouteau, 2004)
Cifre Arcelor (Florence, 2005)

A suivre...
thèses

Pérez (2003-2006)
cifre ATILH Lavigne (2005-2008)

Formulation d'Hellinger-Reissner (1950)

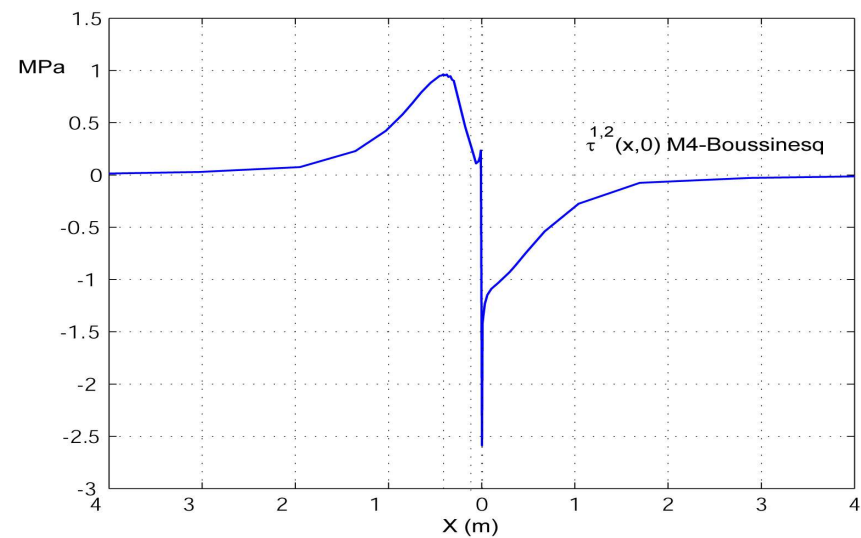
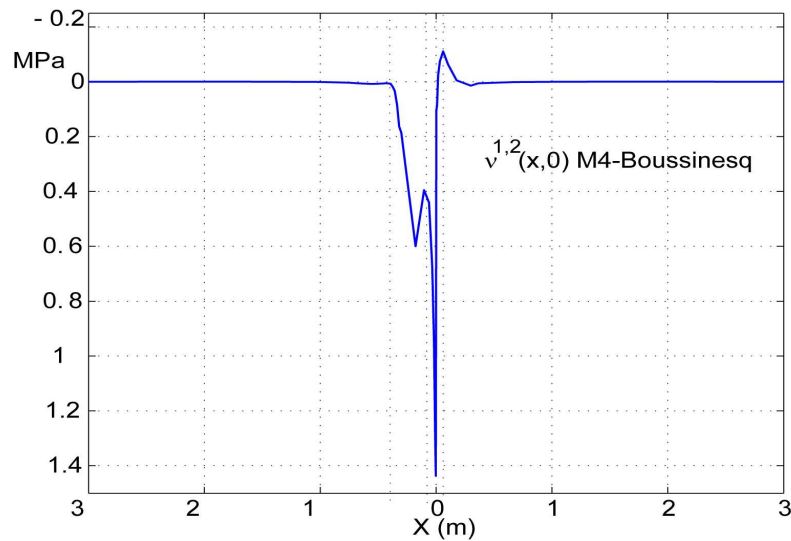
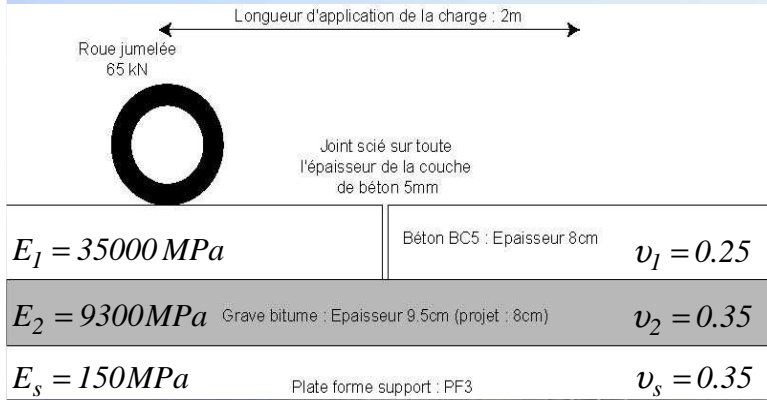
$$\begin{aligned}
 H.R.(\underline{U}^*, \overline{\overline{\sigma}}^*) = & \int_{\Omega} \left[\overline{\overline{\sigma}}^*(\underline{x}) : \overline{\overline{\varepsilon}}(\underline{U}^*(\underline{x})) - \underline{f}(\underline{x}) \cdot \underline{U}^*(\underline{x}) - \frac{1}{2} \overline{\overline{\sigma}}^*(\underline{x}) : \overline{\overline{S}}(\underline{x}) : \overline{\overline{\sigma}}^*(\underline{x}) \right] d\Omega \\
 & - \int_{\partial\Omega_U} (\overline{\overline{\sigma}}^* \cdot \underline{n})(\underline{x}) \cdot (\underline{U}^* - \underline{U}^d)(\underline{x}) dS - \int_{\partial\Omega_T} \underline{T}^d(\underline{x}) \cdot \underline{U}^*(\underline{x}) dS
 \end{aligned}$$

Théorème:

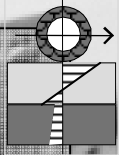
La solution du problème élastique est le couple $(\underline{U}^*, \overline{\overline{\sigma}}^*)$ qui rend stationnaire la fonctionnelle (FHR)

M4-Boussinesq model application Alternative concrete pavement (Pouteau et al., 2004)

Study of bond between Concrete and Asphalt layers initial 3D stress state

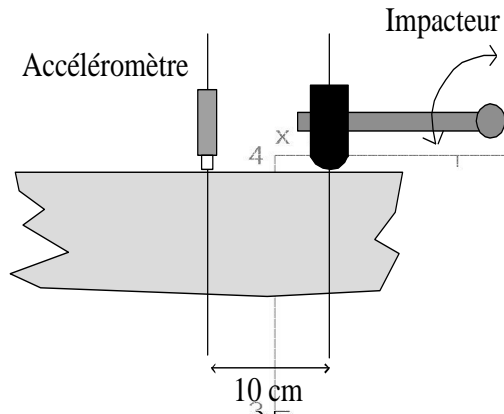
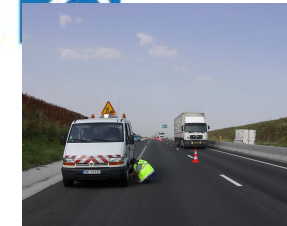


Suivi de la RN4 : étude en vrai grandeur du collage de chaussées composites (béton de ciment sur enrobés bitumineux)



Historique:

- Construction de la planche : 19 septembre 2001
- Première auscultation : fin octobre 2001
- Deuxième auscultation (avec BBTM) : juillet 2002
- Mise en circulation : 4 septembre 2002



Colibri indicator

$$I_c(a,b) = \frac{1}{b-a} \int_b^a T(f) df$$

- profil 1,00m
- profil 1,50m
- profil 2,00m
- profil 0,50m à t1
- profil 1,40m à t1
- profil 2,30m à t1

