

27 Janvier 2021

Chabot Armelle

Chataigner Sylvain

DOCTORAT

NE SCIENCES

POUR L'INGENIEUR

Redoc **SPI**   
Réseau National des Écoles Doctorales  
Sciences Pour l'Ingénieur

# Collage des matériaux et structures



Université  
Gustave Eiffel

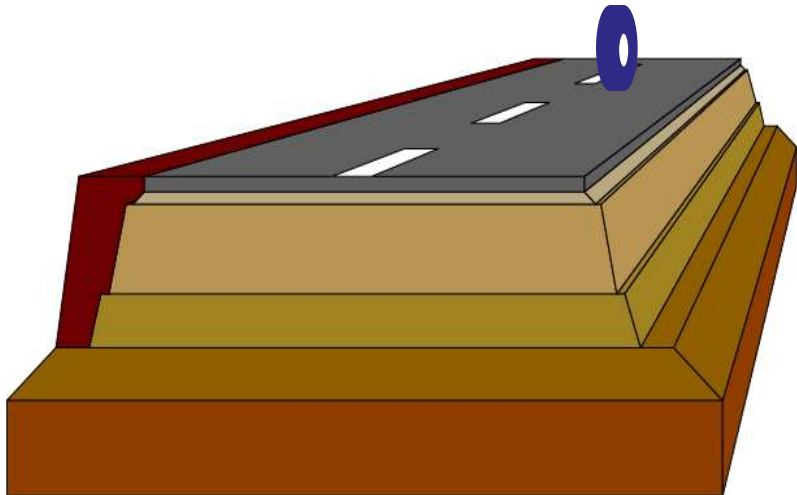
# **Séance 1: Analyse mécanique des assemblages collés**

Armelle Chabot & Sylvain Chataigner

Département MAST: équipes SMC & LAMES

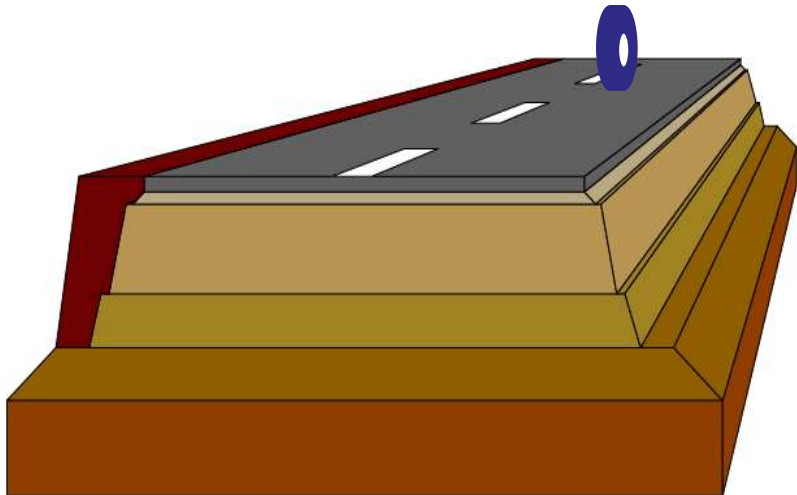
# Plan

1. **Modélisations multicouches / What for?** (A. Chabot)
2. **Essais de caractérisation / applications chaussées** (A. Chabot)
3. **Shear Lag / Concept de longueur d'ancrage** (S. Chataigner)
4. **Applications en Ouvrage d'Art** (S. Chataigner)



# Plan

- 1. Modélisations multicouches / What for?** (A. Chabot)
2. Essais de caractérisation / applications chaussées (A. Chabot)
3. Shear Lag / Concept de longueur d'ancrage (S. Chataigner)
4. Applications en Ouvrage d'Art (S. Chataigner)



# VERROU N°1: Modélisation

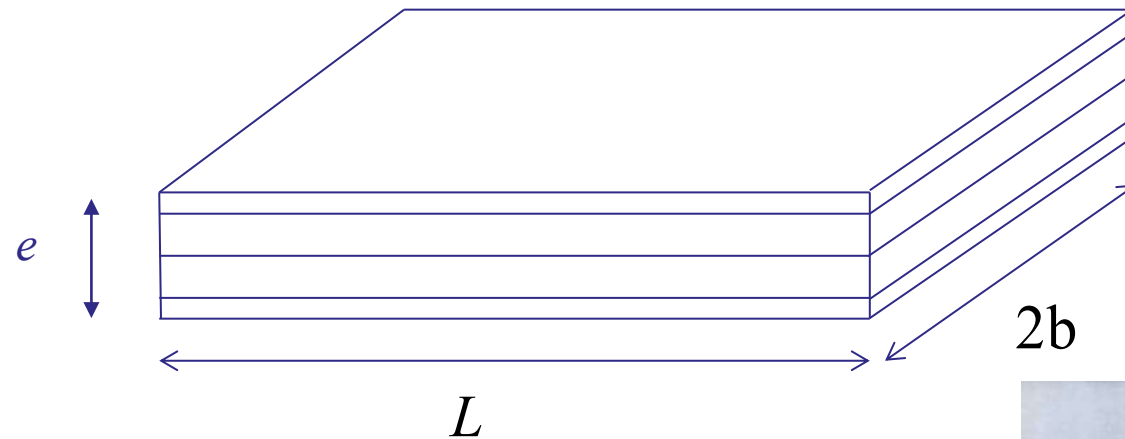
## Pourquoi un modèle ?

### Utilisation & Géométrie particulière

1. Appréhension du transfert des efforts (local/global)
2. Identification des zones critiques
3. Détermination des facteurs dimensionnants
4. Outils de prédiction de la rupture?

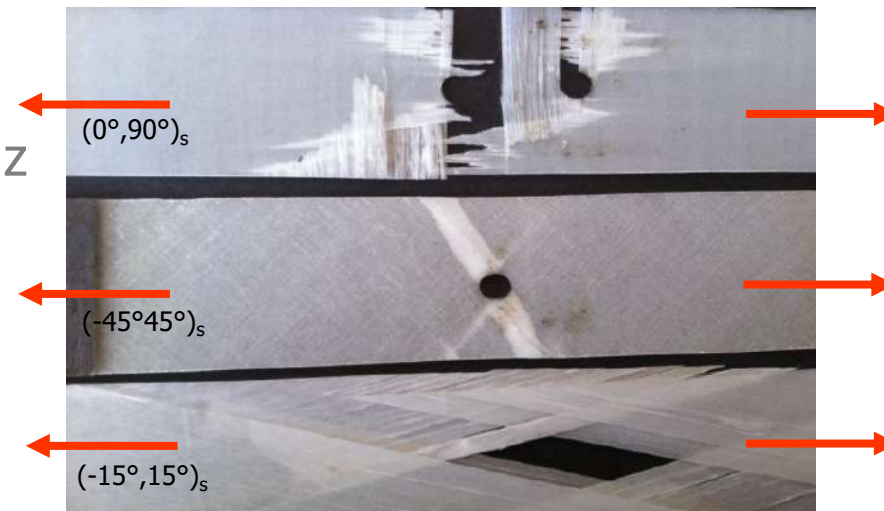
# Assemblages collés - Multicouches

**Structures Multicouches → Structures complexes**  
(empilement de plaques)



$$e \ll L$$

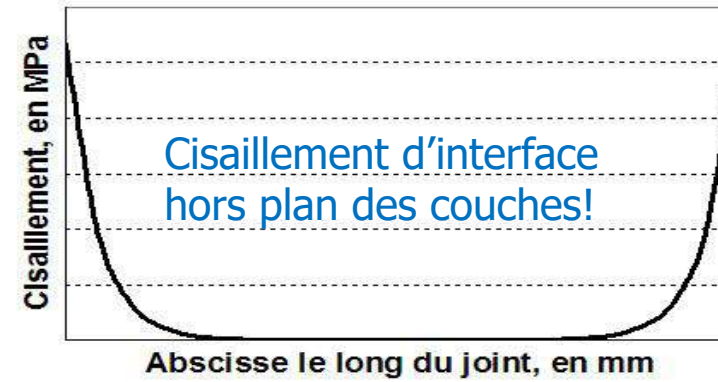
- Hétérogénéités de comportement suivant  $z$
- Concentrations de contraintes 3D importantes aux interfaces près de bords ou de fissures



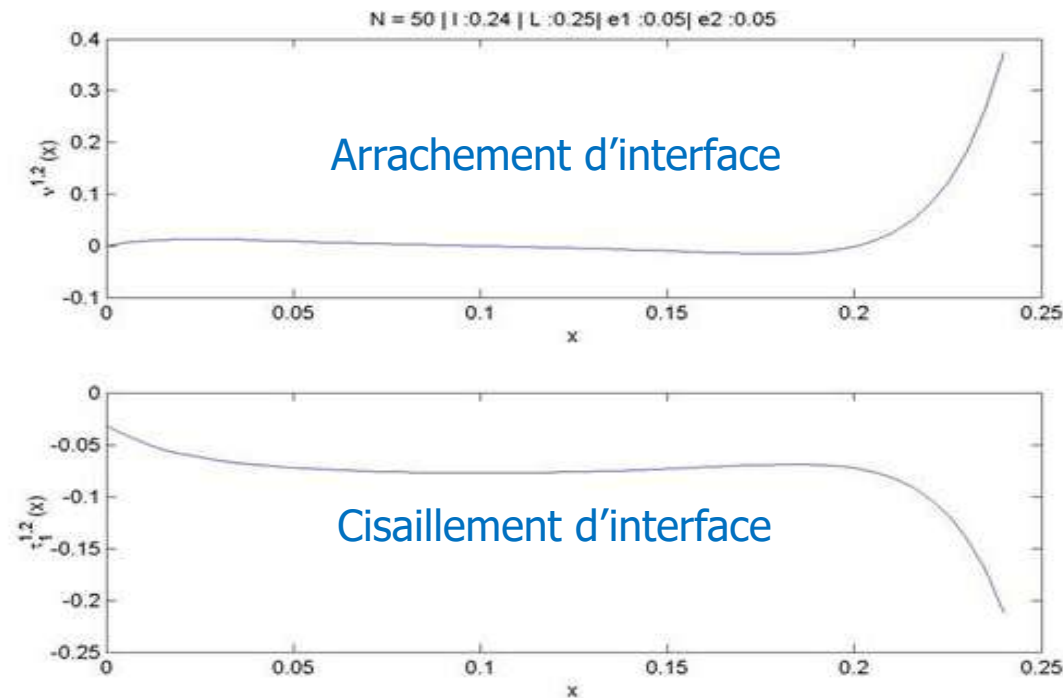
(TP composites ENPC, Chabot 1997)

# Concentration des contraintes d'interface aux bords

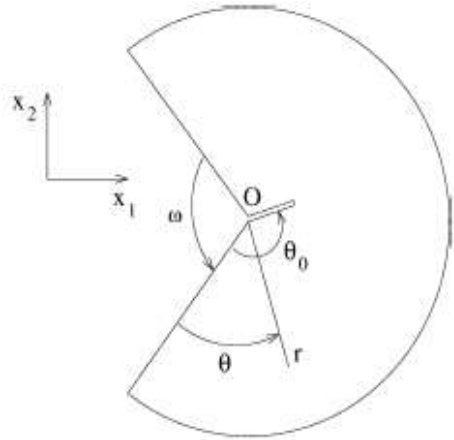
## Exemple problème tension



## Exemple problème flexion



# VERROU N°2: Critères (Mécanique de la rupture/élasticité)



## Cas du matériau homogène : $\lambda = 1/2$

$$\bar{\sigma} = \frac{K_I}{\sqrt{r}} f_I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{r}} f_{II}(\theta) + \dots$$

$$\underline{U}(x_1, x_2) = \underline{U}(O) + k r^\lambda \underline{u}(\theta) + \dots$$

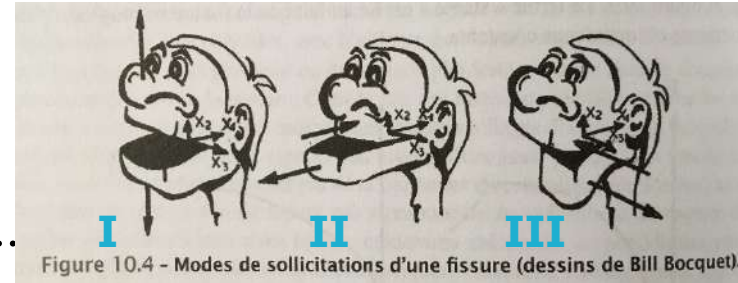
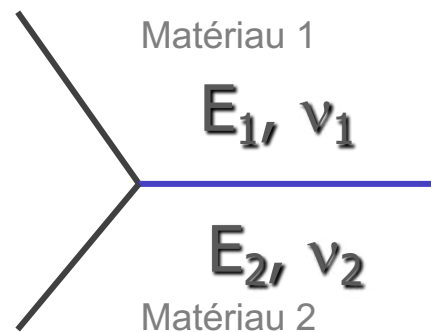


Figure 10.4 - Modes de sollicitations d'une fissure (dessins de Bill Bocquet).



The critical value  $k_c$  depends on the opening  $\omega$  of the notch, it must be experimentally determined. The factors  $k$  and  $k_c$  are strongly dependent of the singularity and in particular of the exponent  $\lambda$ . Units for

## Pour un bi-matériaux, $\lambda$ est un complexe! → Critères?



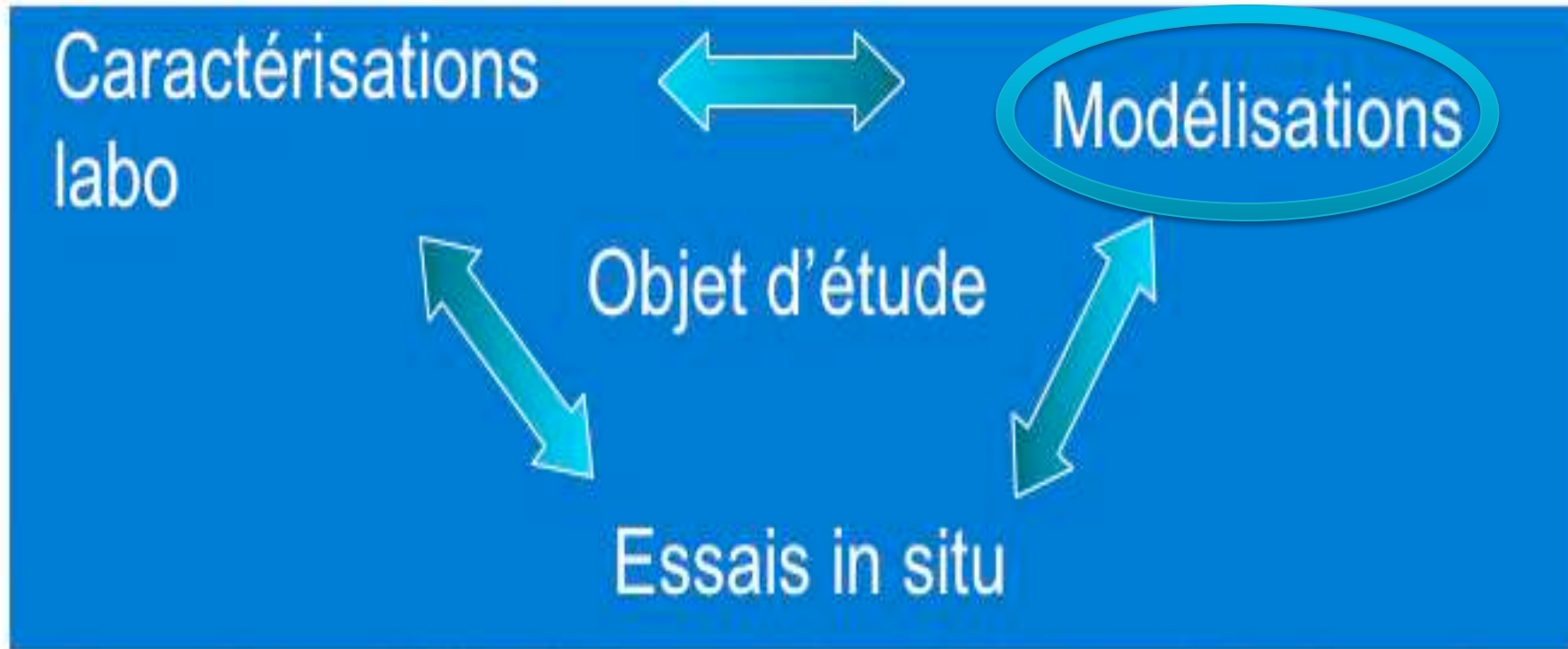
Point stress? → Intensité des contraintes?

Average stress? → Intégration des contraintes sur une longueur ?

Energy release rate → Oscillations .... fatigue...: Paris law?

$$G(\bar{\sigma}, \bar{u}) = - \frac{\partial E_p(\bar{\sigma}, \bar{u}, a)}{\partial a} \quad G < G_c$$





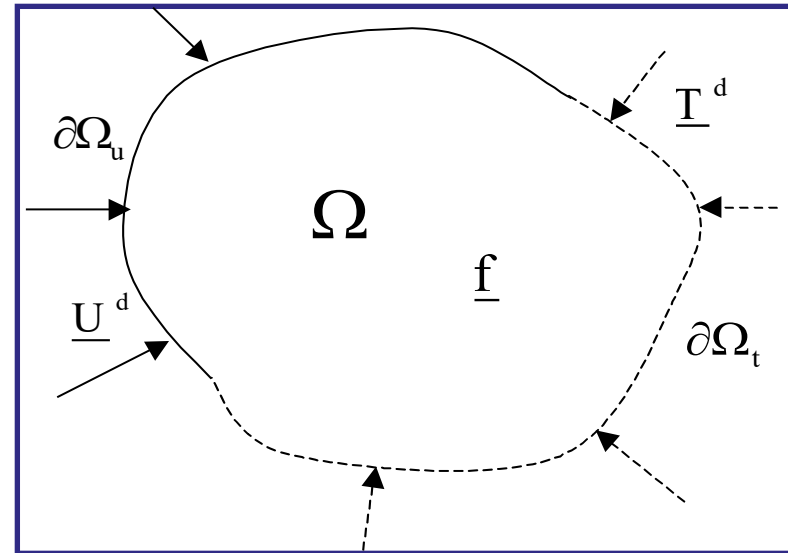
# Rappel résolution Modèles Mécaniques

Equations d'équilibre

Conditions aux limites

Lois de comportement

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



## Choix d'approximations (modèles simplifiés)

- en déplacements?
- en contraintes?
- en comportement?

**Théorèmes**



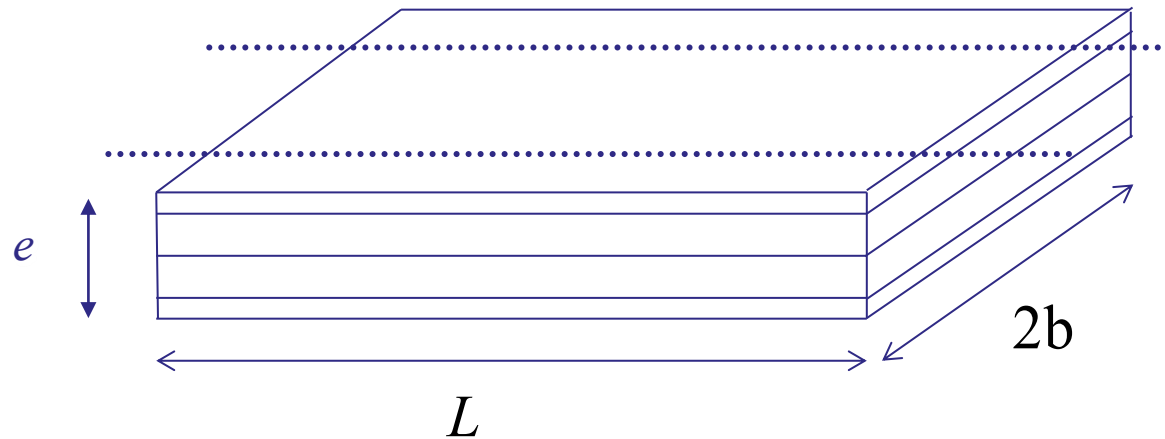
**Outils de résolution**

- Analytiques
- Numériques
  - Eléments Finis
  - Différences Finies
- ....

→ **Compromis € / géométries particulières**

# Modélisation délamination des multicouches

**Empilement de plaques** → Limite d'utilisation des modèles de plaques : Love-Kirchhoff (LK) ou Reissner-Mindlin (RM)



$$e \ll L$$

→ Modèles approx. en U de LK et RM ok pour l'intérieur mais Pb CL en  $\sigma$

**Quid des cisaillements hors plan et des contraintes d'arrachement?**

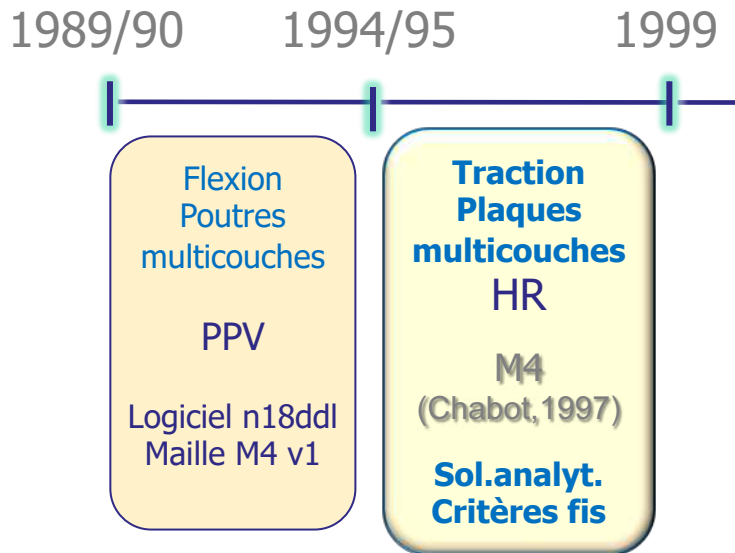
→ Besoin de modèles alternatifs pour modéliser **les effets de bords** (3D au bord et 2D à l'intérieur du multicouche)

# Outils M4 (approximations en $\sigma$ et en $U!$ ) - Origines



## Composites

ENPC : CERAM..... (CERMMO) → NAVIER



- Construction M4  $\Rightarrow$  analyse élastique contraintes d'interface (Chabot, 1997) (Chabot et Ehrlacher, 1998)  
 $\Rightarrow$  Avantages: réduction de 1D + intensité contraintes finies

- M4-(2n+1)  $\Rightarrow$  problème de traction
  - ✓ calculs analytiques simples de type ingénieur
  - ✓ critère de décohésion en effort d'interface maximal : Stage Master2 (Cantournet, 1999) (Chabot, et al. 2000)
- M4-5n  $\Rightarrow$  problème de flexion
  - ✓ champs M4-5n très proches des EF 3D
  - ✓ critère de décohésion en effort maximal (Carreira, Caron, Diaz-Diaz, 2001) (Caron, Diaz Diaz, Carreira, Chabot, Ehrlacher, 2006)

$\rightarrow$  Dév. analytiques et numériques possibles pour les **chaussées** depuis le stage DEA et la thèse ENPC/LCPC de Quang Dat Tran (Tran, 2001, 2004)



Famille M4 : thèse (Chabot, 1997) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00197853>  
HDR - 2013 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00848650>

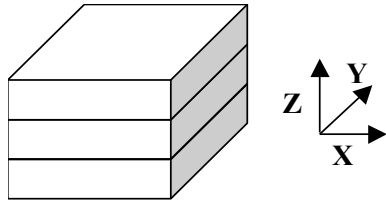


Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

12

# Modèle Multiparticulaire des Matériaux Multicouches

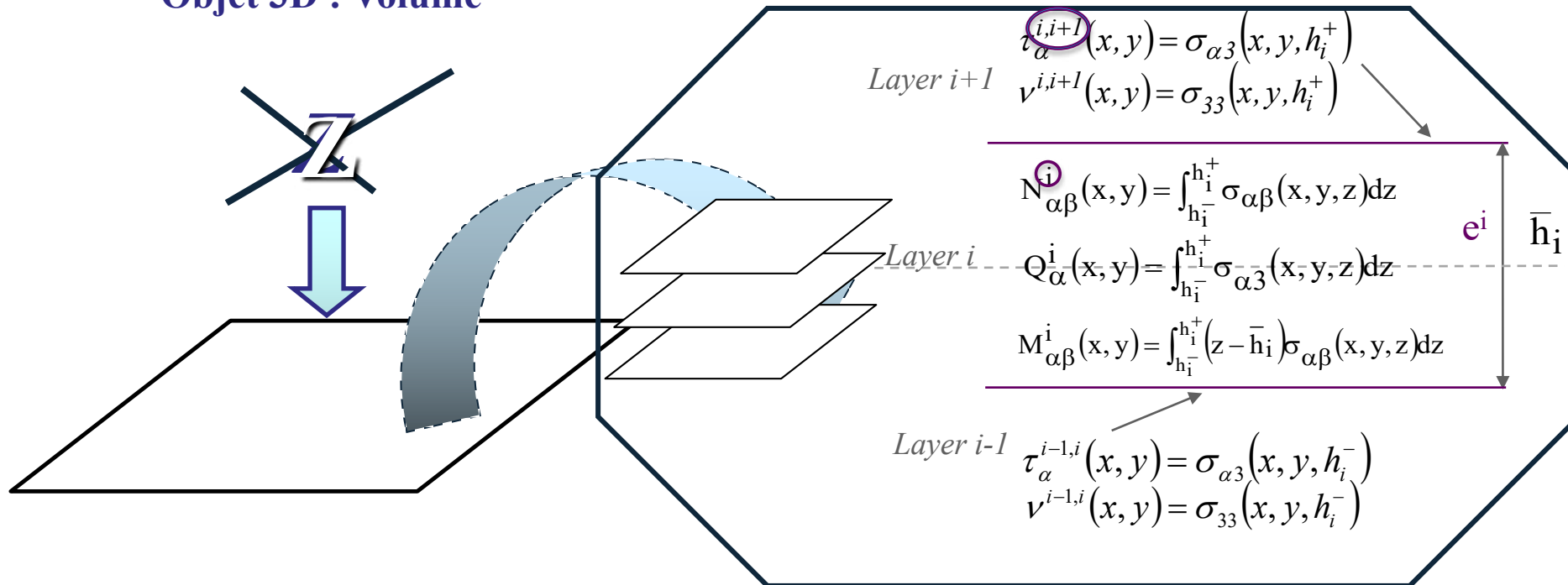
M4-5n → 5 équations d'équilibre par couche  $i$  ( $i=1,n$ ) (Chabot & Ehrlacher, JNC11, 1998)



Objet 3D : Volume

**Hyp.: élasticité, matériaux homogènes par couche**

- Approx. Polynom. en  $z$  par couche  $i$  des champs de contraintes
- Formulation mixte d'Hellinger-Reissner (Reissner, 1950)



Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

## Ex. du **M4 le plus riche**, le **M4-5n** à $5n$ champs cinématiques

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

↪:

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

$N^i$  : Effort membranaire couche  $i$

$M^i$  : Moment membranaire couche  $i$

⇒ **Equilibre:**

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

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



# M4-5n à 5n champs cinématiques

- **Déplacements généralisés moyen par couche i**

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

→  $U_{\alpha}(x, y, z) = U_{\alpha}^i(x, y) + (z - \bar{h}_i) \Phi_{\alpha}^i(x, y) + \Delta U_{\alpha}(x, y, z)$

- **Déformations généralisées associées:**

- ✓ de couche i
- ✓ d'interface i,i+1



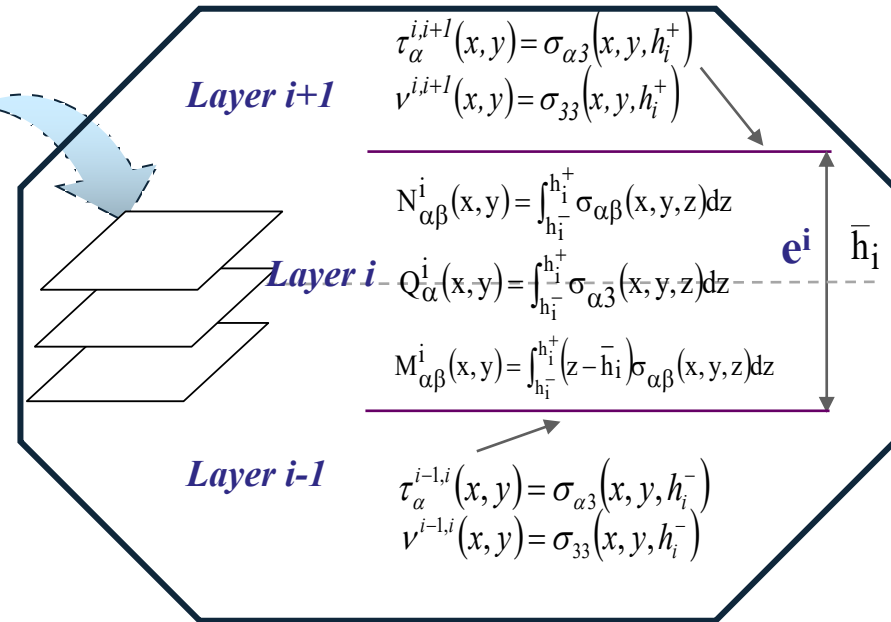
# Exemple de comportement du M4-5n à 5n champs cinématiques ( $i=1,n$ )

## Comportements de couche $i$

$$\varepsilon_{\alpha\beta}^i(x, y) = \frac{S_{\alpha\beta\delta\gamma}^i}{e^i} N_{\delta\gamma}^i(x, y); \dots$$

## Comportements d'interface $i, i+1$

$$\begin{aligned} D_{\alpha}^{i,i+1}(x, y) = & -\frac{1}{10} 4S_{\alpha 3\beta 3}^i Q_{\beta}^i(x, y) - \frac{1}{10} 4S_{\alpha 3\beta 3}^{i+1} Q_{\beta}^{i+1}(x, y) \\ & + \left(\frac{-e^i}{30}\right) 4S_{\alpha 3\beta 3}^i \tau_{\beta}^{i-1,i}(x, y) \\ & + \left(\frac{-e^{i+1}}{30}\right) 4S_{\alpha 3\beta 3}^{i+1} \tau_{\beta}^{i+1,i+2}(x, y) \\ & + \frac{2}{15} (e^i 4S_{\alpha 3\beta 3}^i + e^{i+1} 4S_{\alpha 3\beta 3}^{i+1}) \tau_{\beta}^{i,i+1}(x, y) \end{aligned}$$

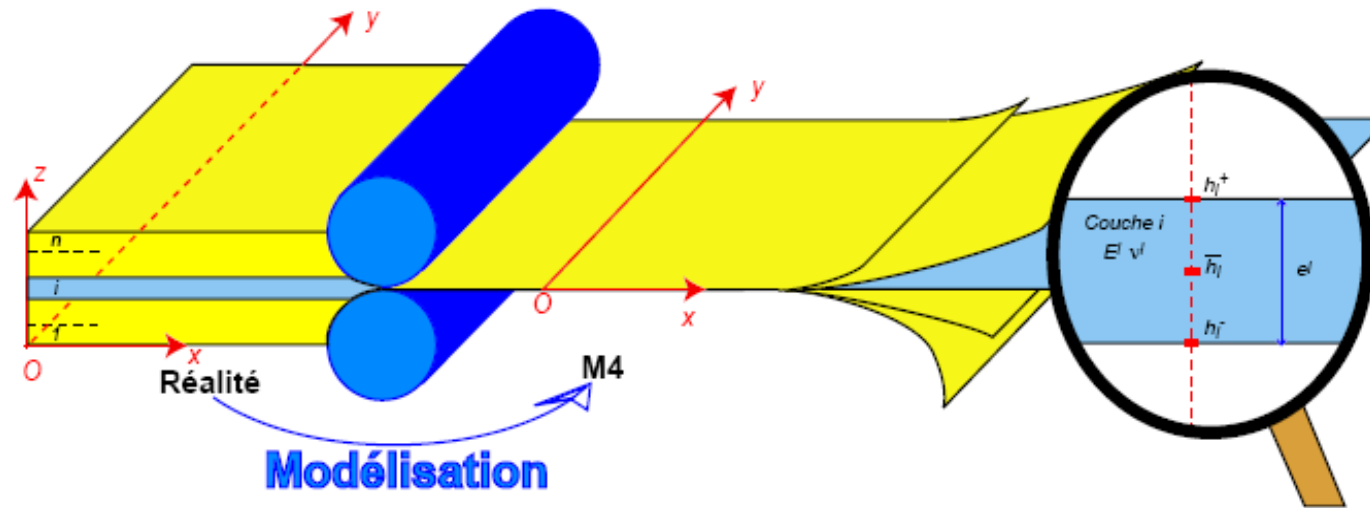




# M4-5n à 5n champs cinématiques ( $i=1,n$ )

Objet M4

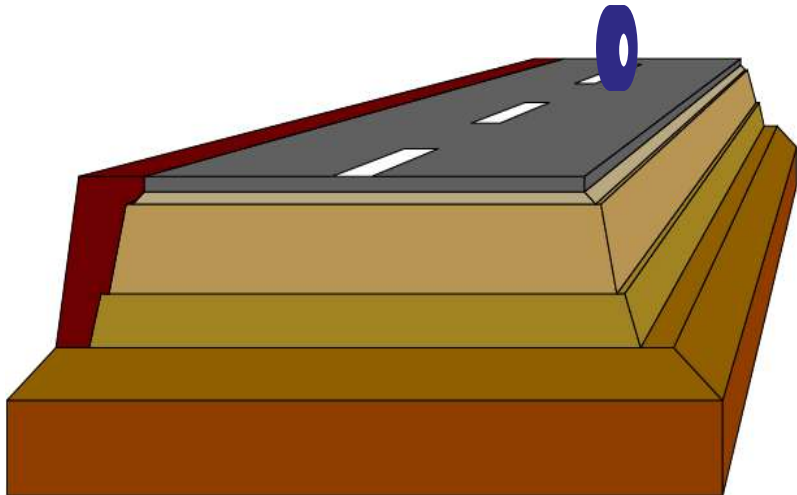
- 5 équations d'équilibre par couche  $i$
- Conditions aux limites par couche  $i$  au bord de la surface (une fissure verticale est similaire à un bord)
- Comportements de couche  $i$  et d'interface  $i,i+1$



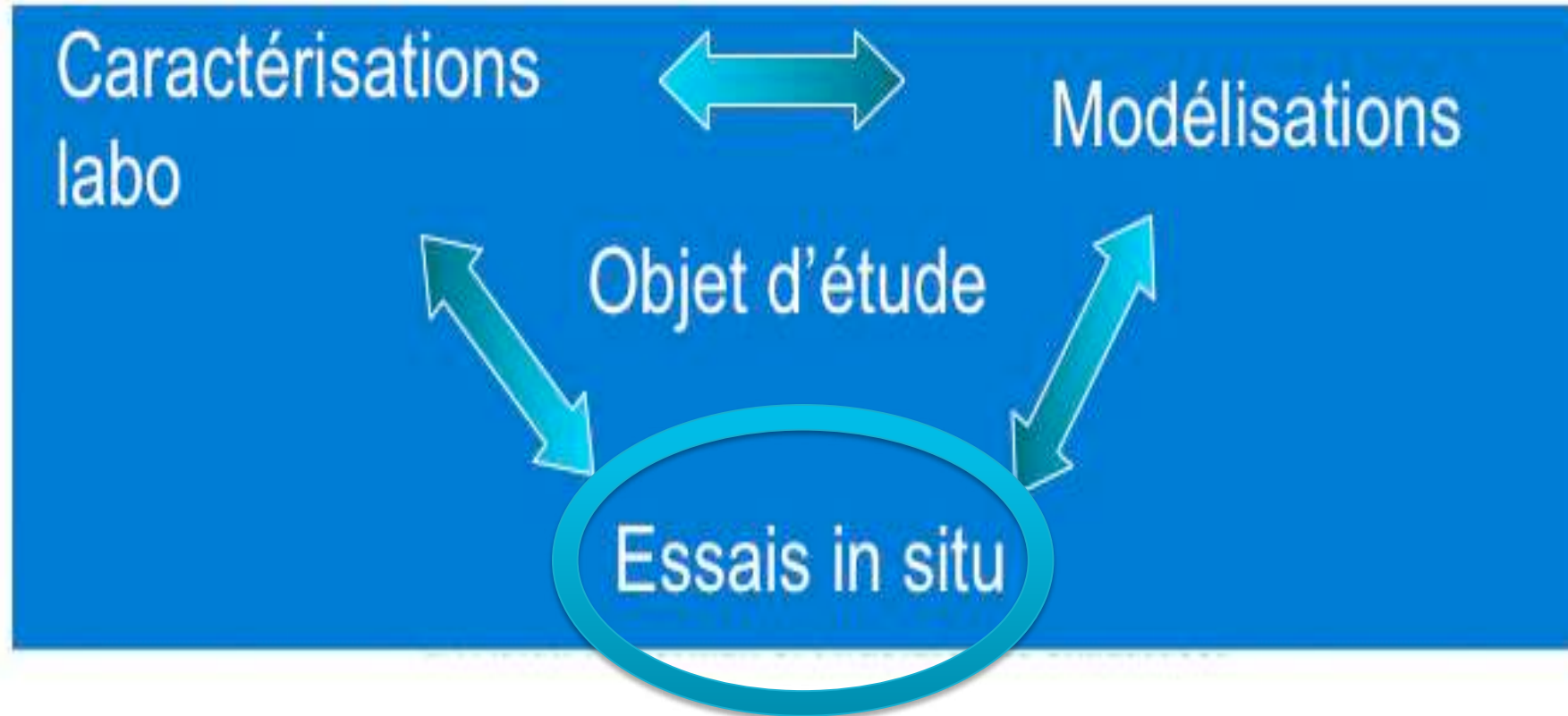
Shéma : thèse (Pouteau, 2004)

# Plan

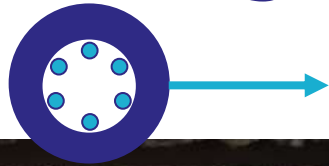
1. Modélisations multicouches / What for? (A. Chabot)
- 2. Essais de caractérisation / applications chaussées** (A. Chabot)
3. Shear Lag / Concept de longueur d'ancrage (S. Chataigner)
4. Applications en Ouvrage d'Art (S. Chataigner)



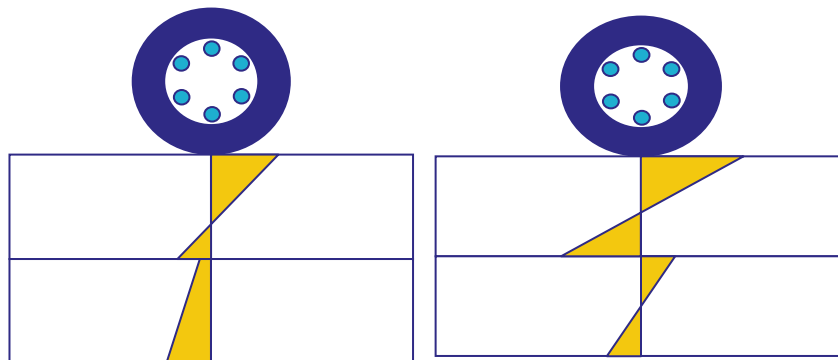
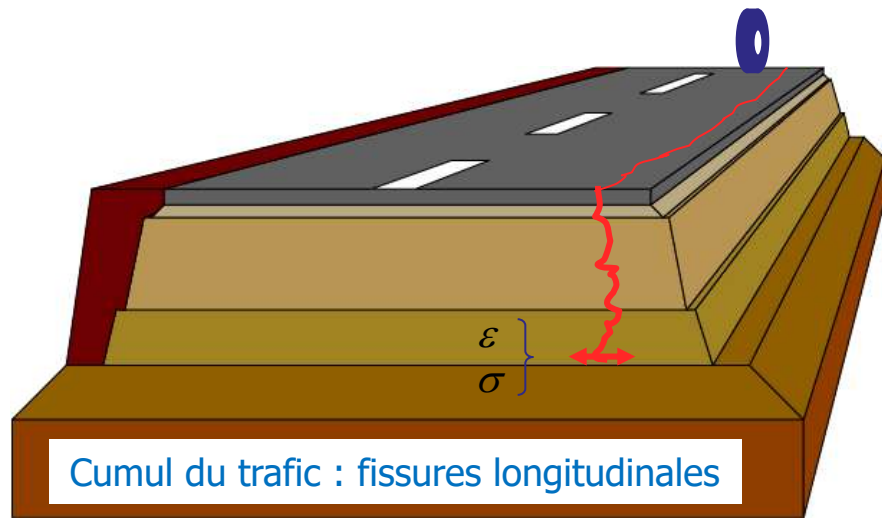
# NEEDS



# Problème de collage des interfaces de chaussées



# Intérêt du collage des couches de chaussée



Couches collées

Couches décollées

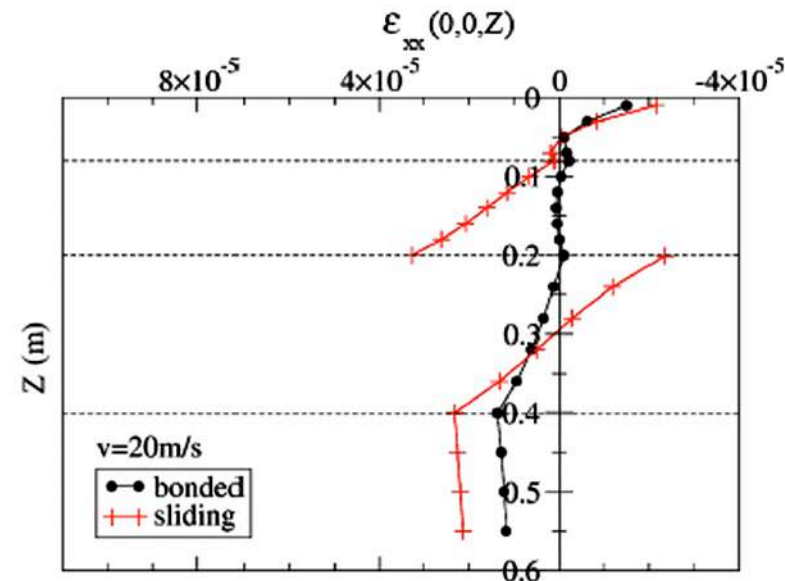
Schéma du diagramme des contraintes

Thèse (Pouteau, 2004)

## Collage DURABLE des couches

→ Comportement monolithique

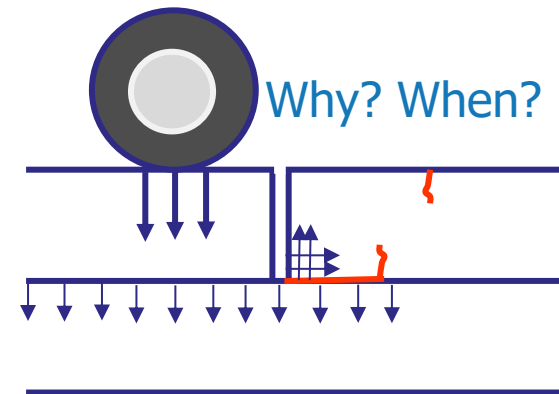
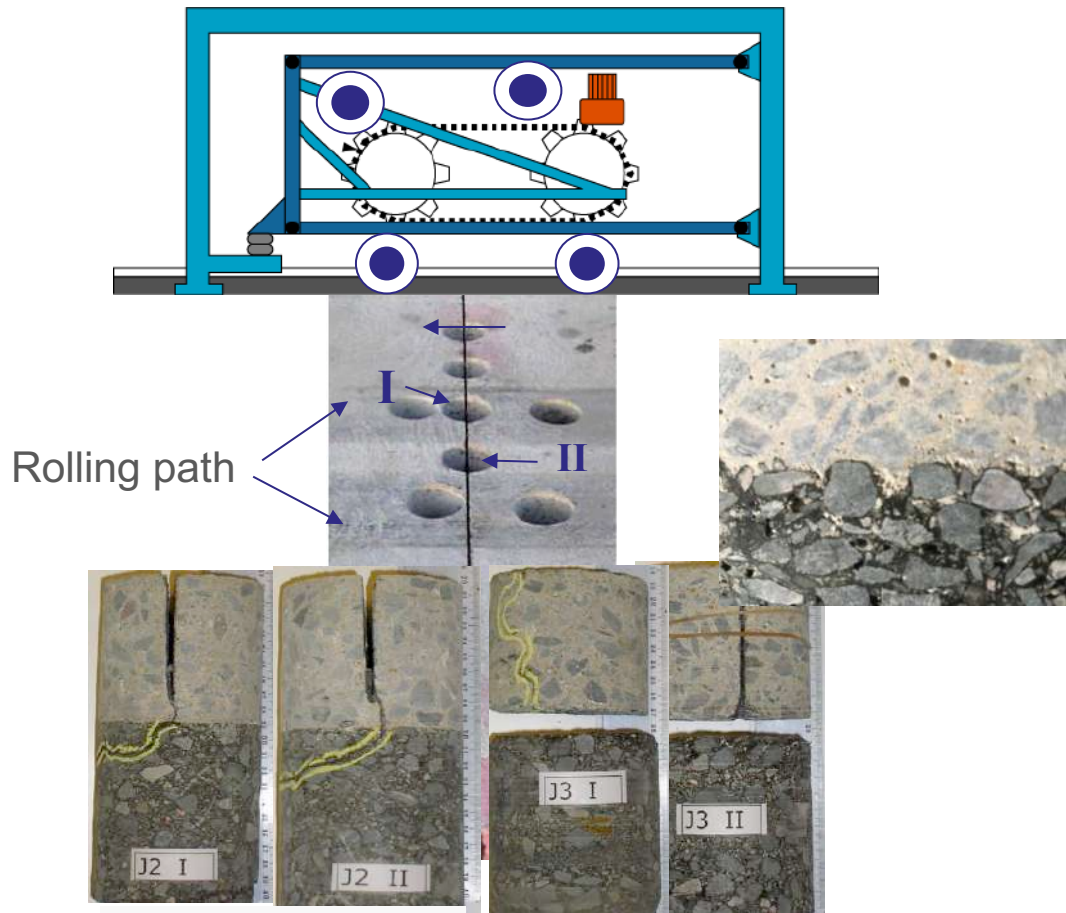
- Diminution des contraintes et déformations
- Augmentation de la durée de vie ou diminution des épaisseurs => **économie**



Profil vertical des déformations longitudinales

(Chupin et al., IJSS 2010)

# Bond ALT for urban French roads - Thèse (Pouteau, 2004)



**Cold T°C**  
**→ 3 materials?**

**Hot T°C:  $E_{cc} \gg E_{ac}$**



**“Contribution of accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation”**



6<sup>th</sup> international conference

September 27-29, 2021

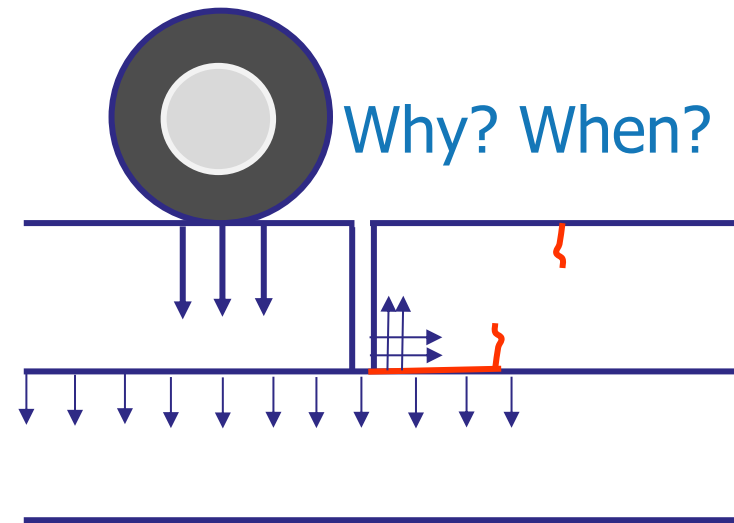
Nantes, FRANCE

Accelerated Pavement Testing



<https://apt2020.sciencesconf.org/>

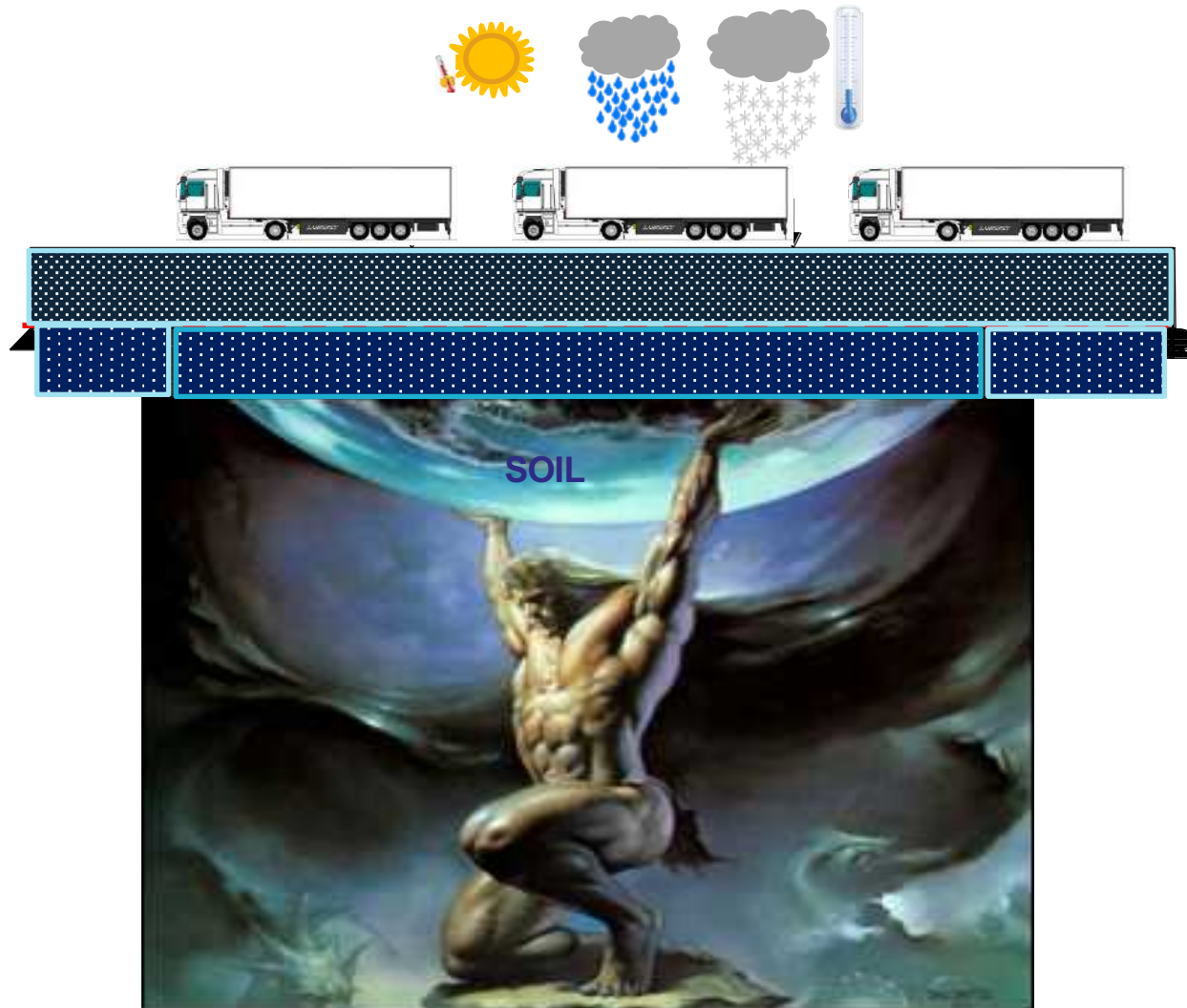
# VERROU N°1: Modèle structure fissurées 3D



**Modèle**  
...Approximations?....



# Bending case with Discontinuities and climate change



(Chabot, 2019)

<https://uwaterloo.ca/centre-pavement-transportation-technology/news/rilem-high-performance-asphalt-materials-symposium>

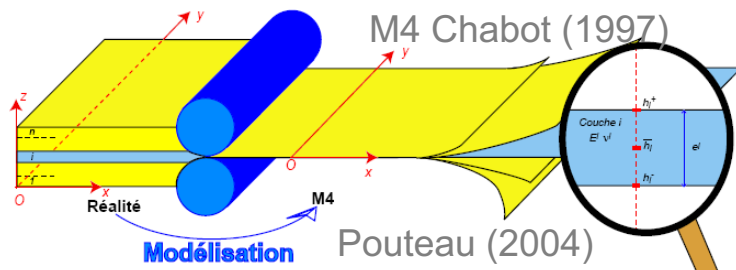
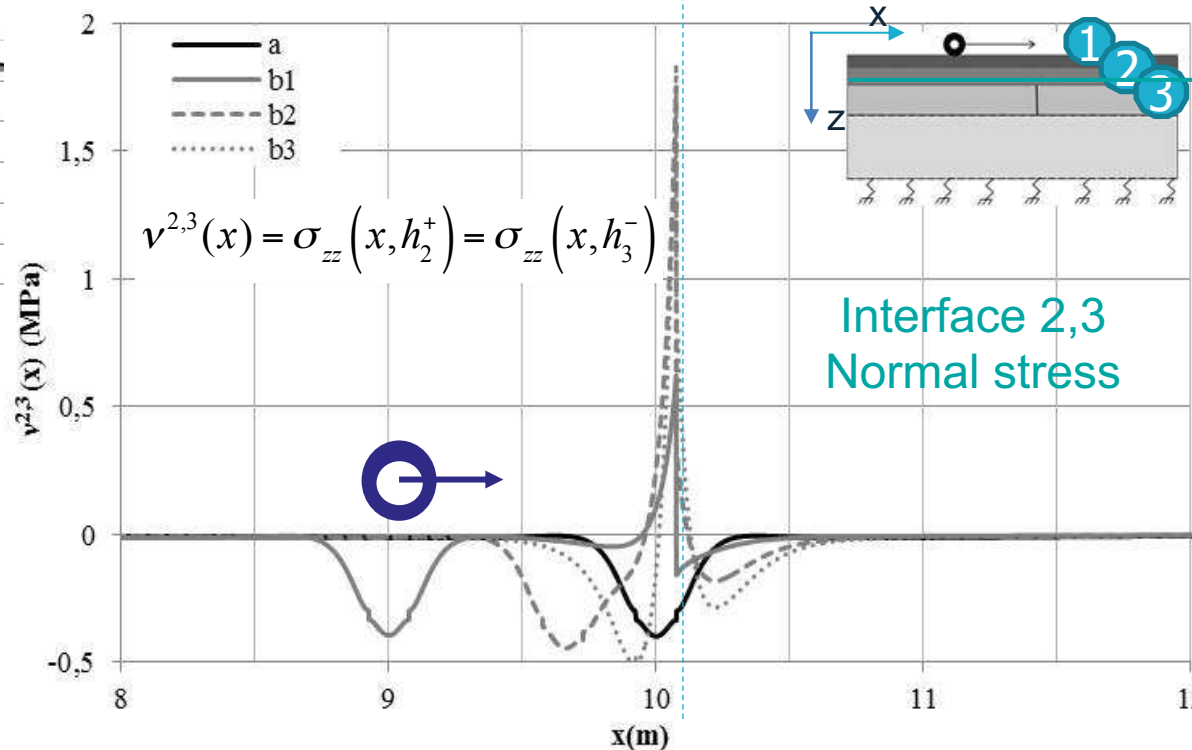
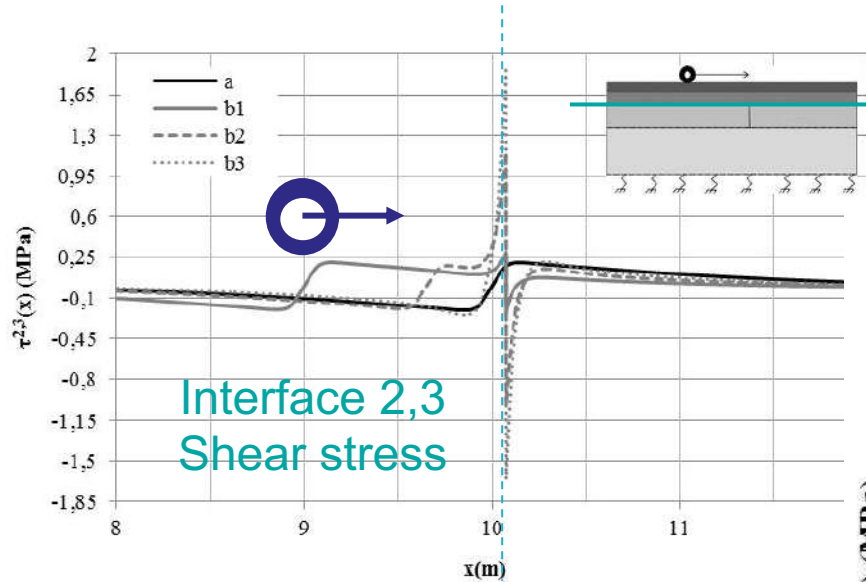
Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

25

# Dedicated pavement analysis : Application M4-5n + sol

Thèses (Tran, 2004) & (Nasser, 2016)

Material	Thickness (m)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
BBSG	$e^1=0.08$	$E^1=5400$	$\nu^1=0.35$
GB3	$e^2=0.15$	$E^2=9300$	$\nu^2=0.35$
GC3	$e^3=0.23$	$E^3=23000$	$\nu^3=0.25$
Soil	-	$E^s=120$	$\nu^4=0.35$

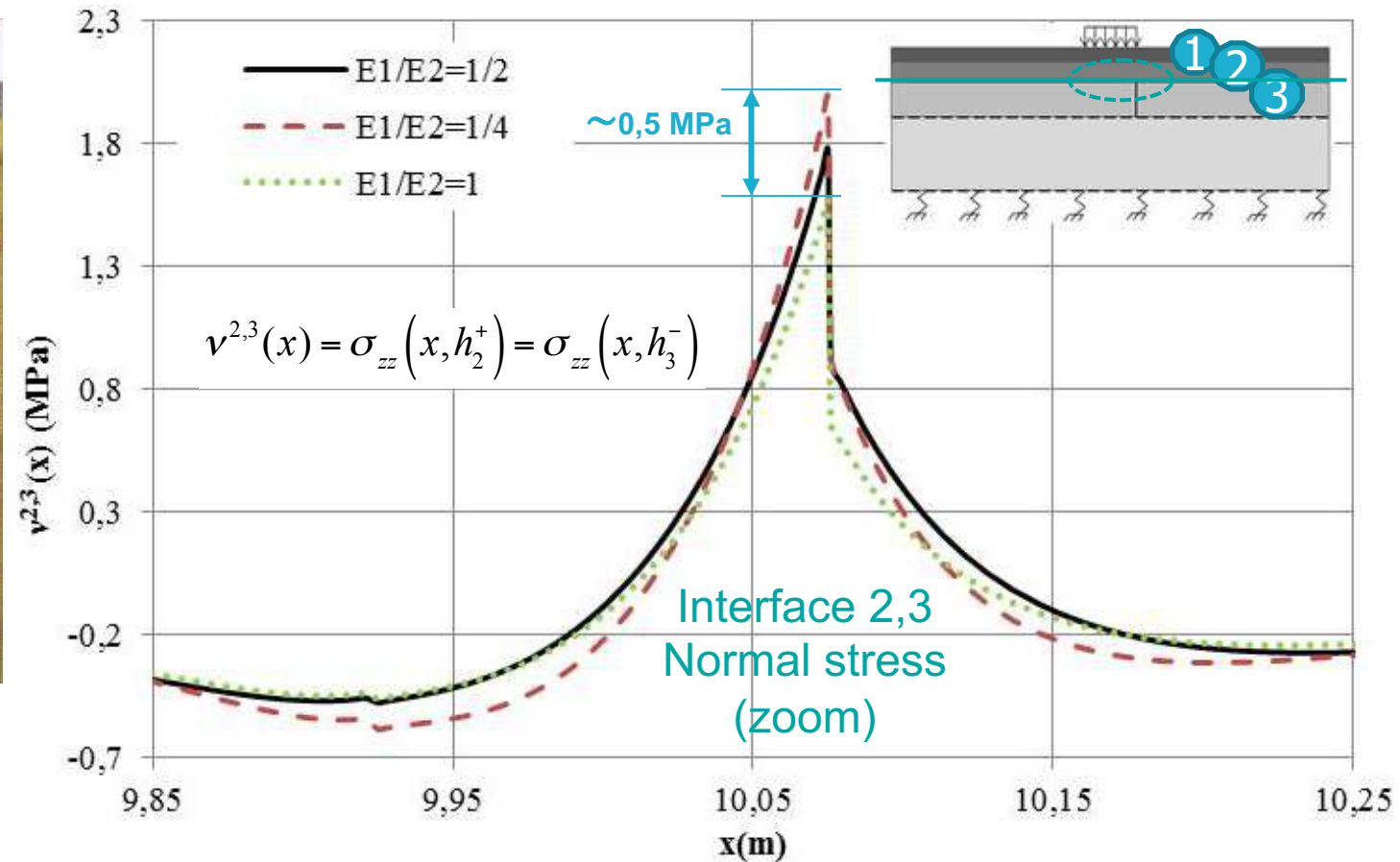


Chabot, A., Tran Q. D., Ehrlicher A., 2007. A modeling to understand where a vertical crack can propagate in pavements. In Proc. *Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials*, 1: 431-440.

Nasser H., Chabot A., 2018. A Half-analytical Elastic Solution for 2D Analysis of Cracked Pavements. *Advances in Engineering Software*, 117: 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.06.008>

# Dedicated M4-5nW analysis

≠T°C → Effect of ≠ E Ratio on Interface stresses

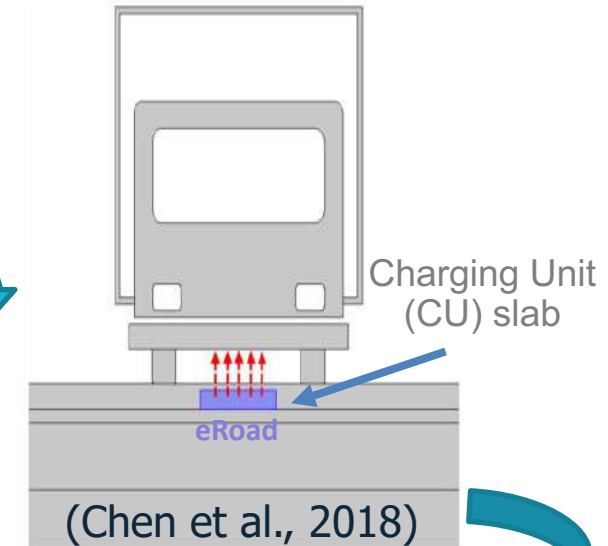


# eRoads examples

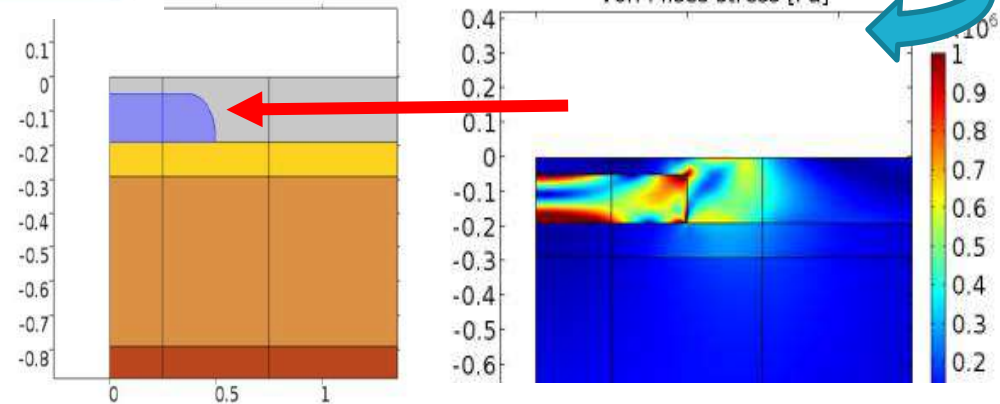
## Context and background

In order to attain the reduction of CO<sub>2</sub> emissions under the objectives of European Energy Agency (EEA 2016), one of the solutions proposed being is the electrified Roads (eRoad)

→ Challenge for 2030!



## One Geometrical Solution proposed by KTH (Chen, PHD 2016)

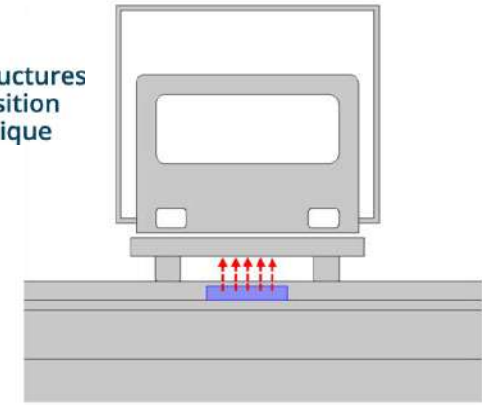


Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

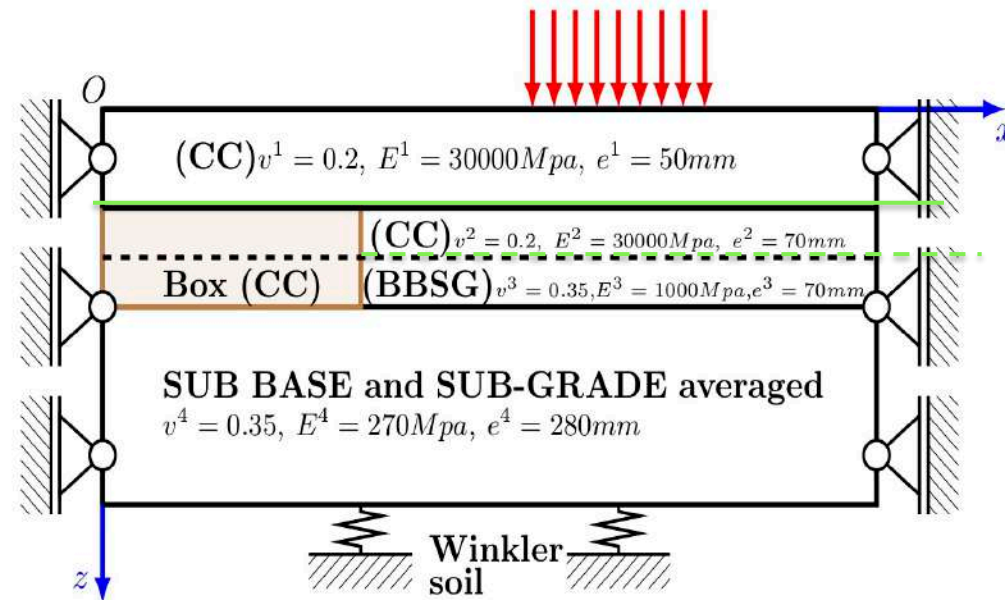
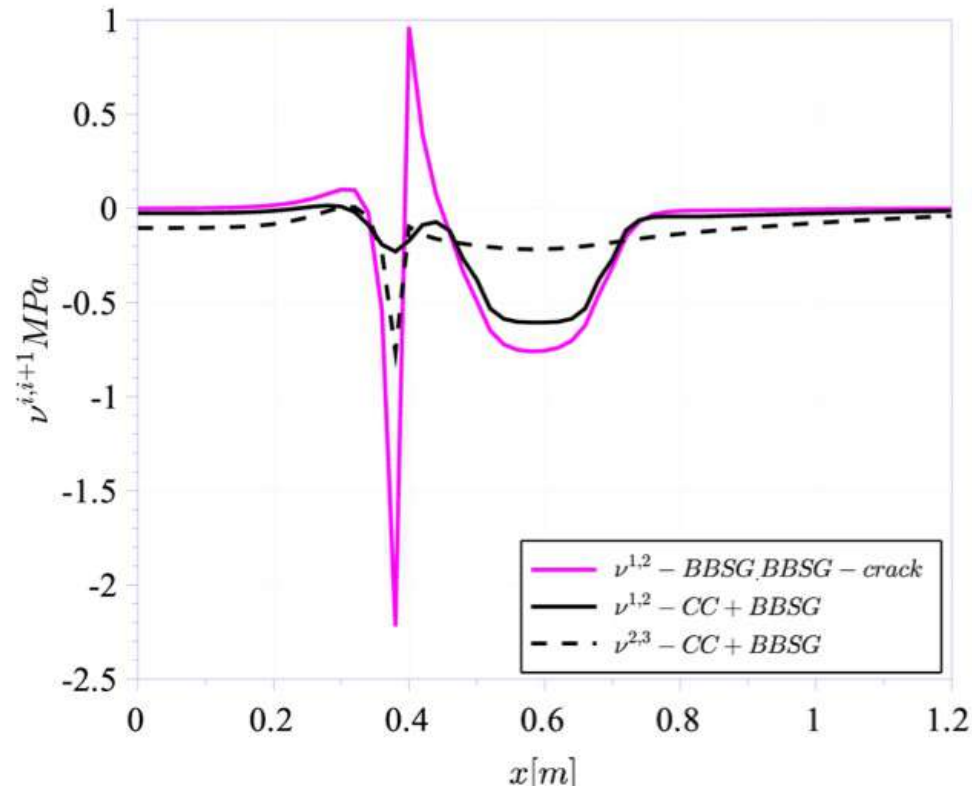
Chen, F., Balieu, R., Cordoba, E., & Kringos, N. (2018). Towards an understanding of the structural performance of future electrified roads: A finite element simulation study. *IJPE*, 20 (2): 204-215.

# eRoad composite system

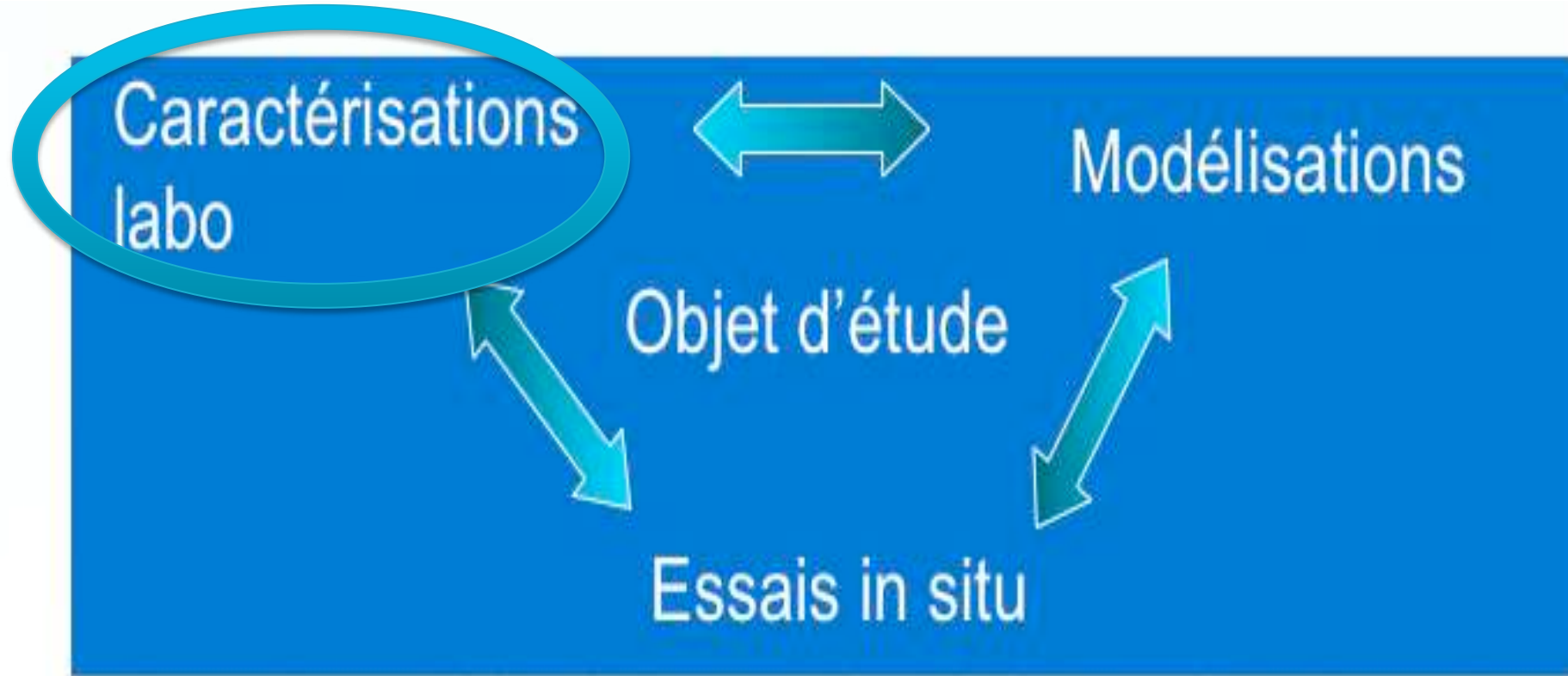
(Chabot & Deep, 2019)



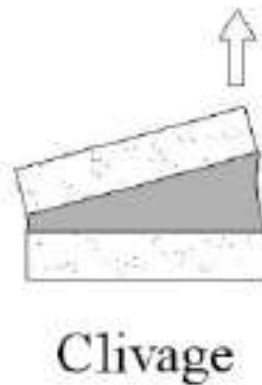
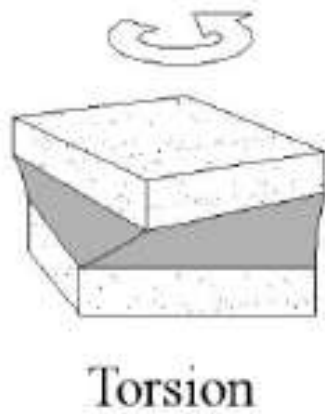
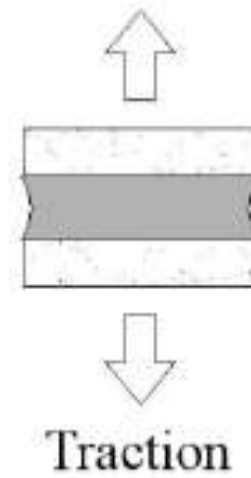
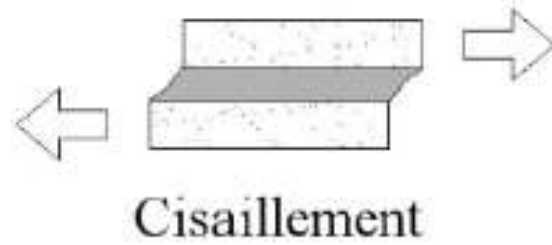
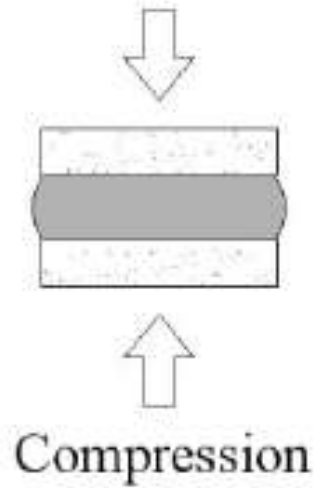
## High Bond Performance Needs!



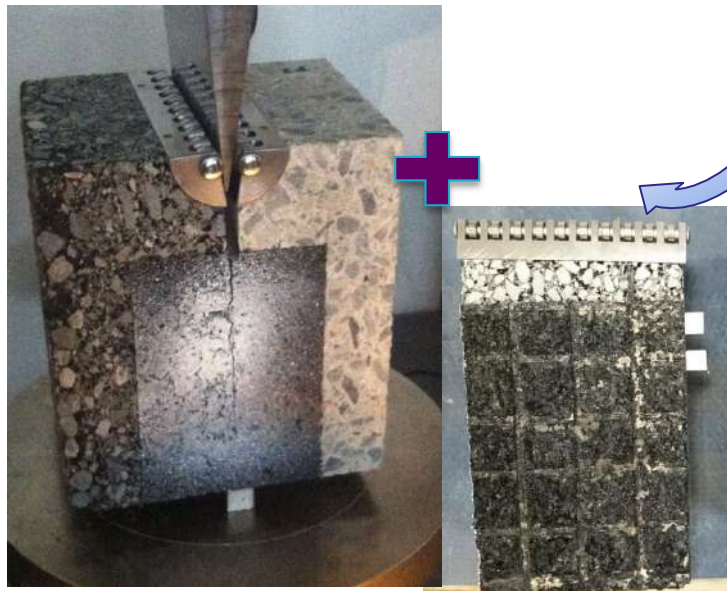
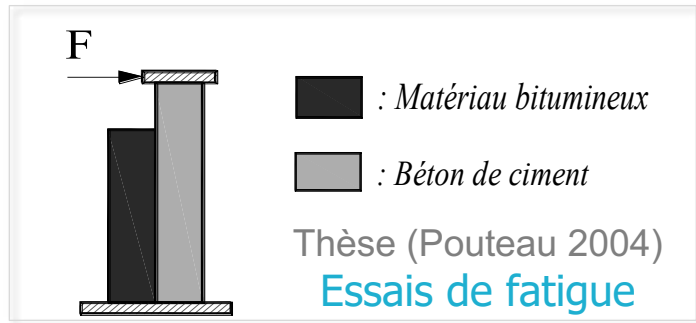
# NEEDS



# Tenue à divers modes de sollicitation



# VERROU N°2: Critère interfaces - Energies de Rupture?



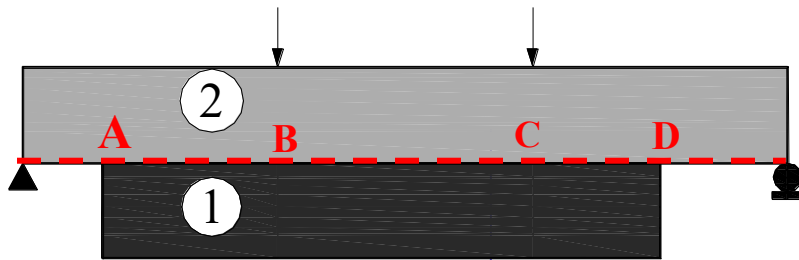
Thèse (Gharbi, 2018)  
Interfaces armées ou non de Grilles





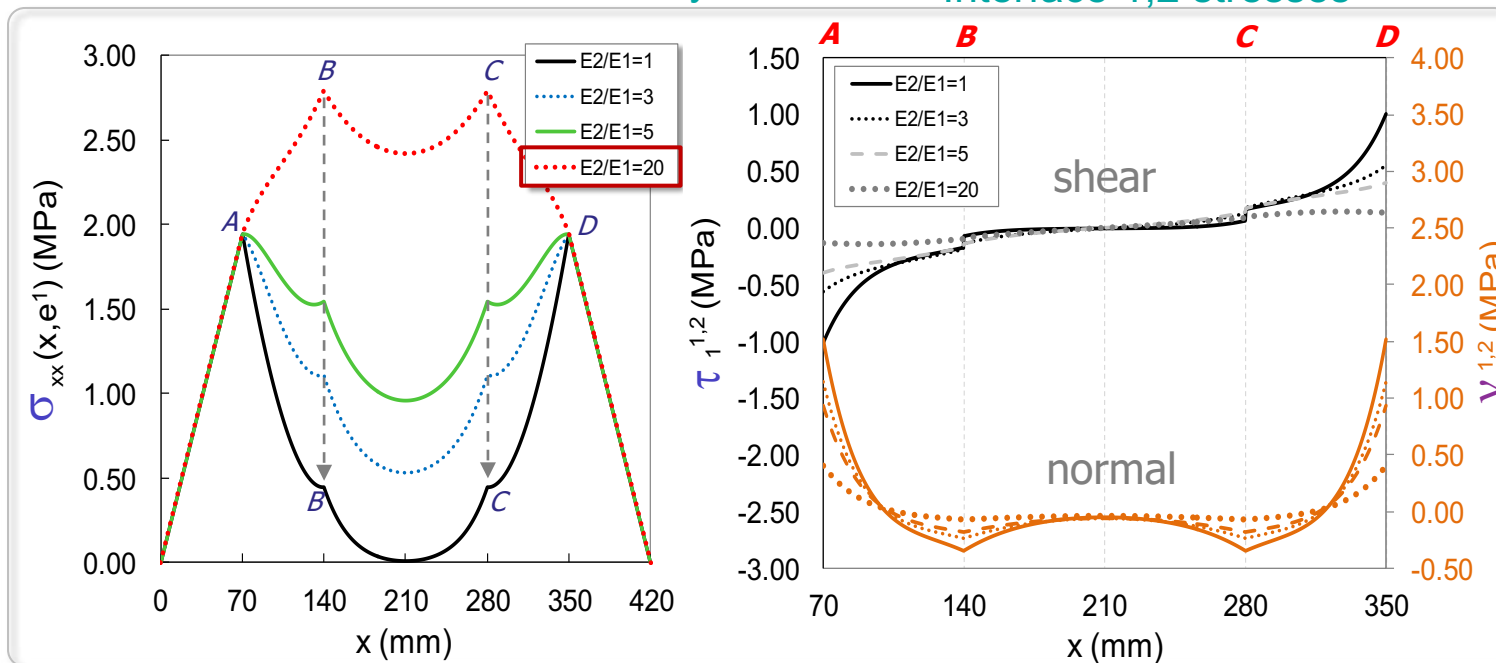
# Tests de flexion 4 points - Thèse Hun 2012

Influence du rapport de modules des matériaux:  $E_2/E_1$



Tension stress at the Bottom of layer2

Interface 1,2 stresses



## Taux de restitution d'énergie par VCCT, $G_{VCCT}$

(Chabot et al. 2000) (Caron et al. 2006)  
(Diaz Diaz et al. 2007)

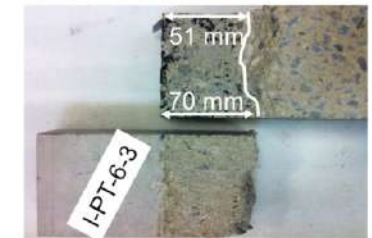
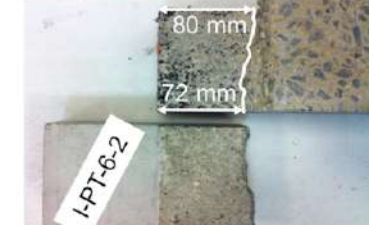
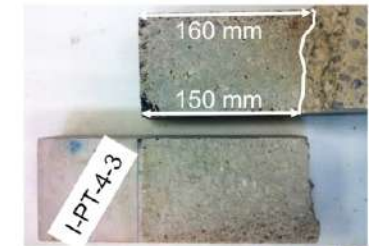
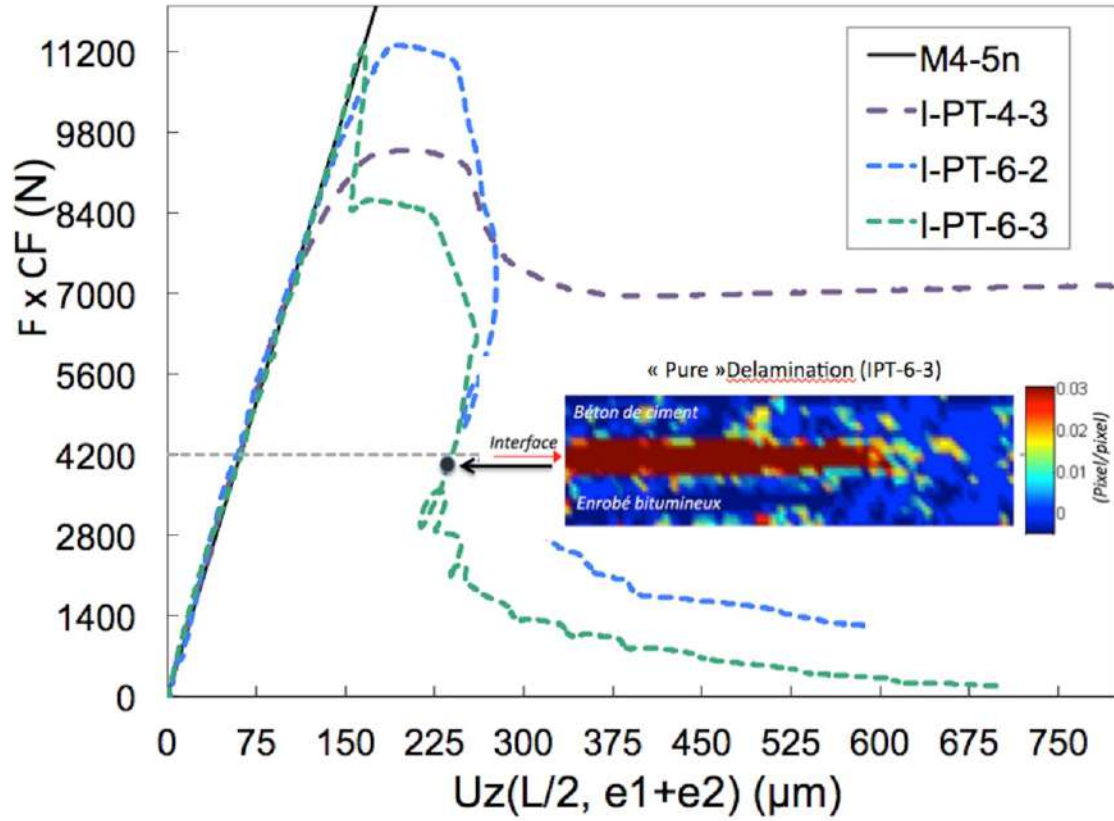
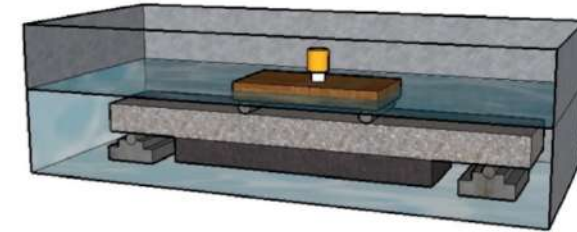
$$G_{VCCT}(a) = G_I(a) + G_{II}(a)$$

- $G_I$  en fonction de  $(v^{1,2}(x_a))^2$
- $G_{II}$  en fonction de :

$$(\tau_1^{1,2}(x_a))^2 \text{ et! } Q_1^1(x_a) \cdot \tau_1^{1,2}(x_a)$$

# Tests de flexion 4 points - Thèse Hun 2012

## Effet de l'eau sur le collage des interfaces B/N

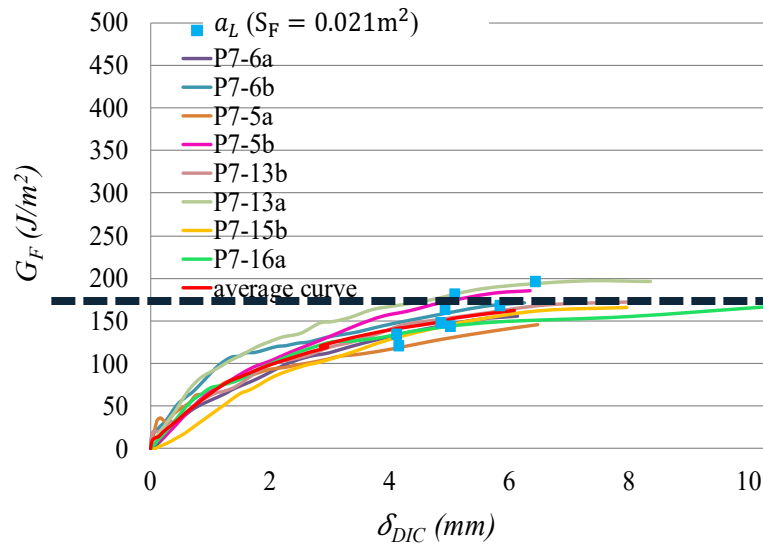
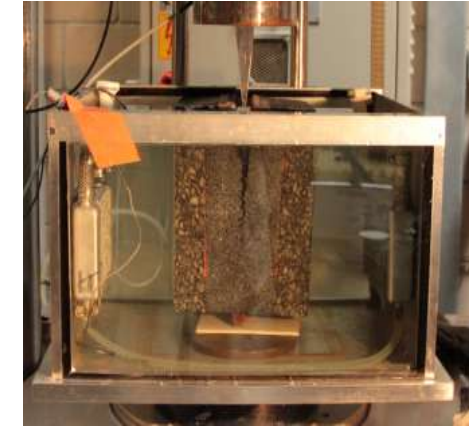
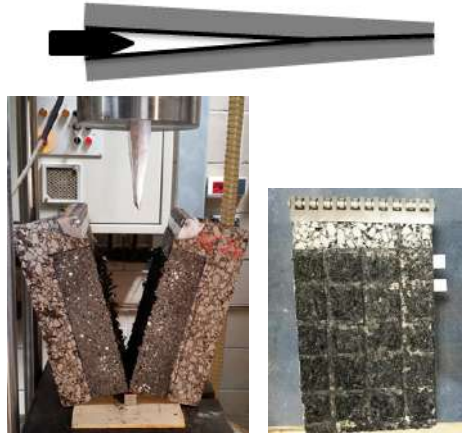


Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

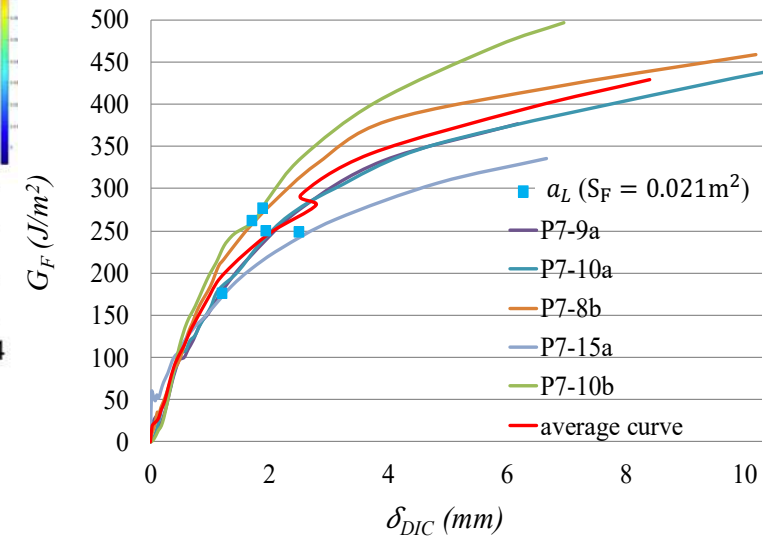
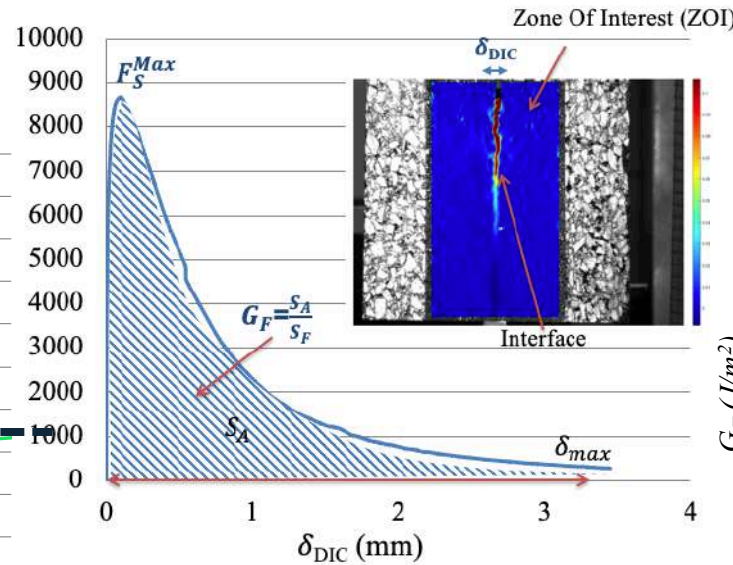
# Essais de fendage (WST) Thèse\* Gharbi 2018 - ANR SolDuGri

## Résultats essais $\neq T^{\circ}C$ : P7 (G4) testées sous eau

→ WST : données rupture des matériaux possibles pour utilisation dans les calculs structurels



**20°C** →  $G_F \approx 175 \pm 25 J/m^2$



**~7°C** →  $G_F > 400 \pm 100 J/m^2$

\*<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01962393/document>

illage ED602 SPI  
ot & S. Chataigner

35

# Conclusions parties 1 & 2

## 1. Besoin de modèle adapté pour déterminer les effets de bords dans les systèmes multicouches

## 2. Applications (ingénierie) / M4-5n → Chaussées (flexion)

- Utilisable en pré-dimen. : objets multicouches avec discontinuités (y compris pour les eRoads – Chabot & Deep, 2019)
- Possibilité, sur structures équivalentes (HYP. !!!), d'identifier des mécanismes de macro-ruptures avant ruine totale (M4-5nW 3D sur FreeFem++ - Chupin et al., 2020)

## → Essais de caractérisation collage chaussées - Attention !

- Aux fortes hétérogénéités / taille des éprouvettes testées
- Aux endommagements avant macro fissuration
- Aux effets environnementaux & vitesse d'essai
  - A. Viscoélasticité et thermo-susceptibilité des matériaux bitumineux
  - B. Effets de l'eau sur le collage des couches



Chupin O., Piau JM, Chabot A., Nasser H., Nguyen ML, Lefeuvre Y., 2020. Simulation of Damage Scenarios in a Bituminous Pavement Tested under FABAC ALT using M4-5n. LNCE 96: 516-525. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_40)

Buttlar et al. 2018. ([www.rilem.net/global/gene/link.php?doc\\_id=5586&fg=1](http://www.rilem.net/global/gene/link.php?doc_id=5586&fg=1)).

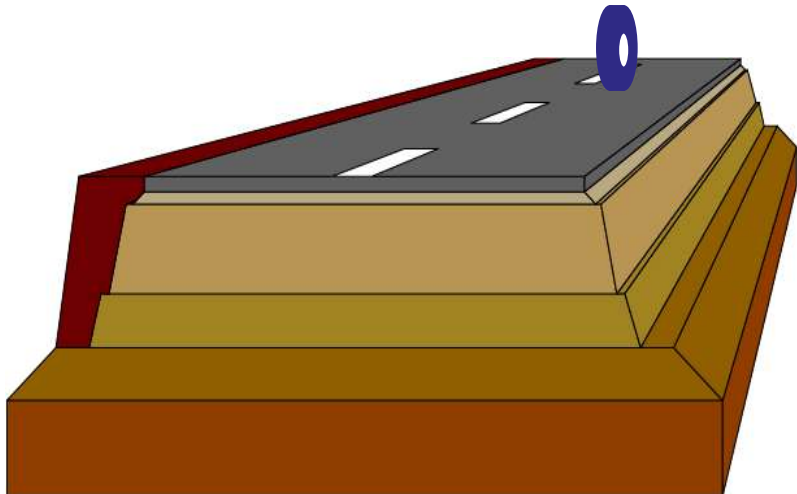
Petit et al., 2018. Materials and Structures, 51 (4): article 96, doi: 10.1617/s11527-018-1223-y

Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

36

# Plan

1. Modélisations multicouches / What for? (A. Chabot)
2. Essais de caractérisation / applications chaussées (A. Chabot)
- 3. Shear Lag / Concept de longueur d'ancrage** (S. Chataigner)
4. Applications en Ouvrage d'Art (S. Chataigner)



# Utilisation du collage en « ouvrage d'art »

## -> Transfert d'effort entre armatures et béton (béton armé)

- Bois lamellé-collé
- Joints de reprise de bétonnage ou de clavage
- Collage de revêtements d'étanchéité sur les ponts
- Collage de capteurs

## -> Transfert d'effort entre renforts externes collés et béton

## -> Transfert d'effort entre renforts externes collés et acier

## -> Réalisation de structures mixtes connectées par collage

## -> Collage d'équipements ou de connecteurs

## -> Ancrage de hauban par collage

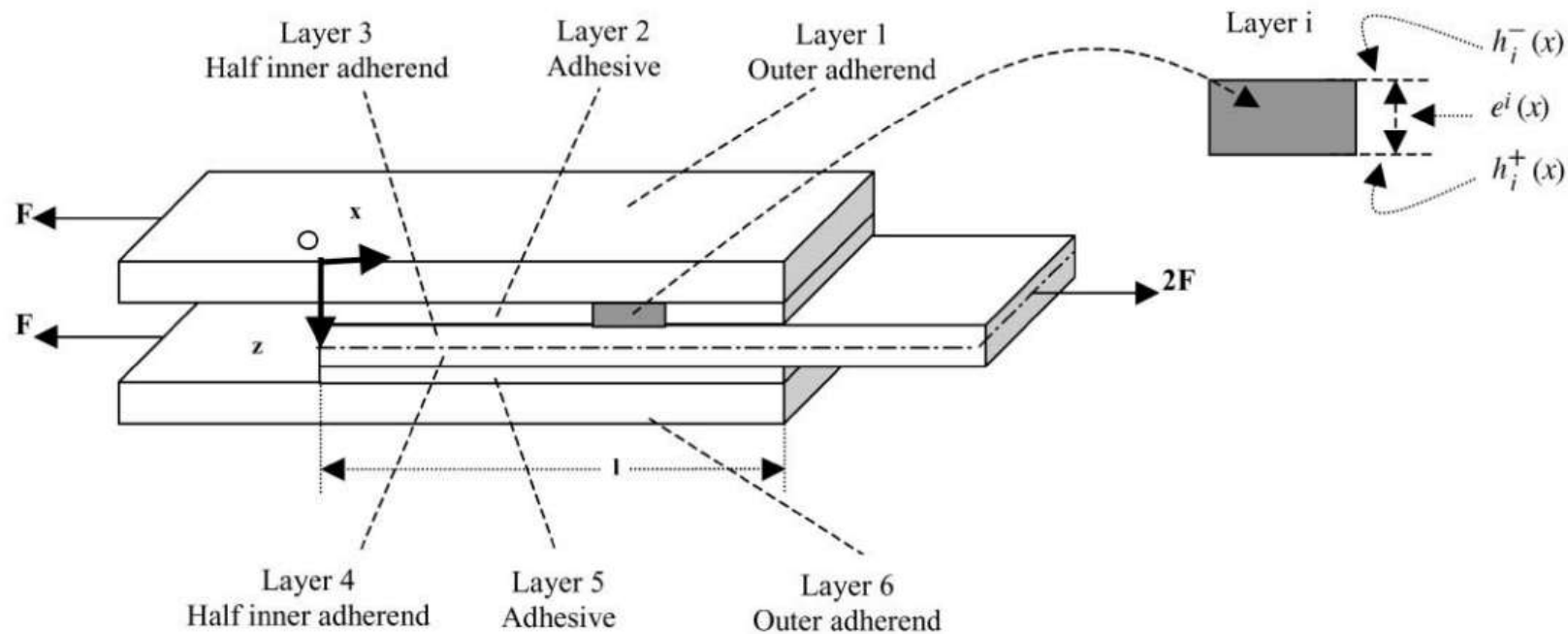
-> ...

=> Transfert des efforts par cisaillement majoritairement



*Niveau  
de  
maturité*

# Transfert d'effort par collage par cisaillement



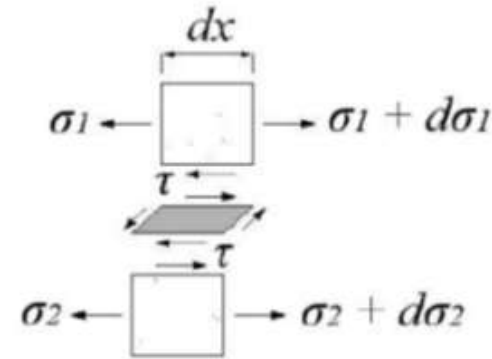
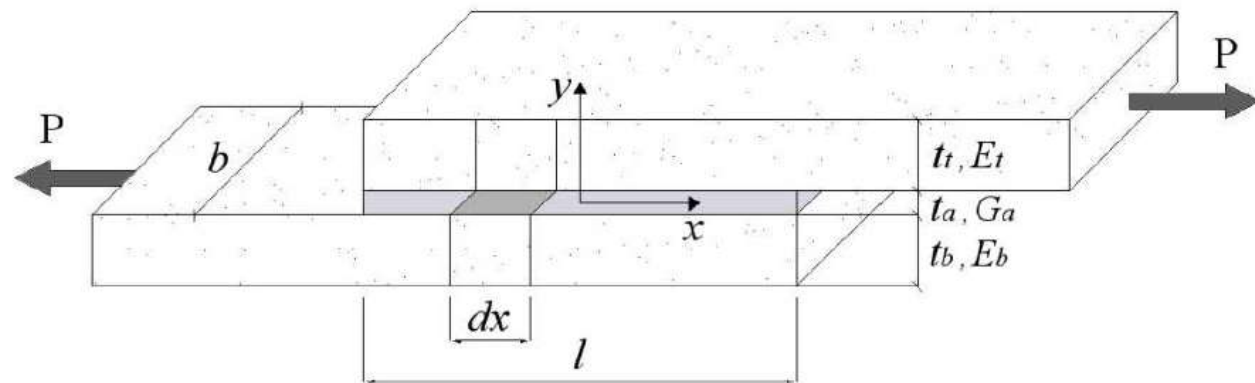
R. Hadj-Ahmed et al. (2001), International Journal of Adhesion and Adhesives

⇒ **Résolution du problème possible via les M4-(2n+1) et M4-5n**  
(M4-5n: Outil DEILAM, années 2000 - PostDoc DiazDiaz à l'ENPC)

Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

39

# Cas où : on néglige l'arrachement; les comportements des interfaces sont découplés entre interfaces ; matériaux isotropes → Shear Lag



## Analyse élastique de O. Volkersen (1938)

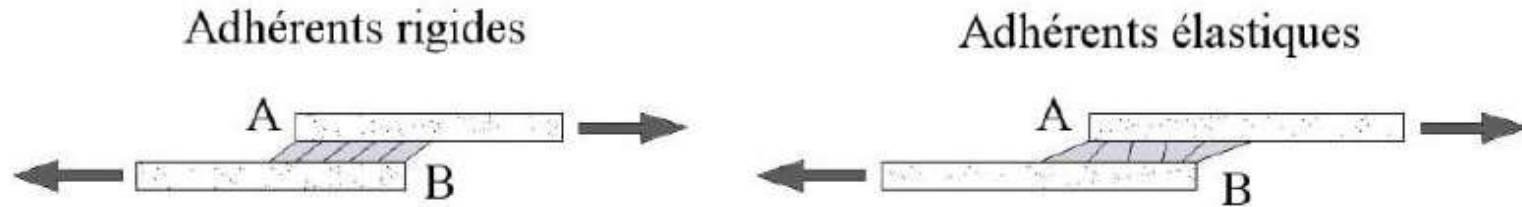
- Moments de flexion négligés,
- Contraintes axiales uniformes dans l'épaisseur des adhérents qui ne se déforment que dans cette direction,
- Déformation de la couche de colle en cisaillement seulement.

$$\tau = \frac{P\omega \cosh(\omega x)}{2b \sinh(\frac{\omega l}{2})} + \left( \frac{E_t t_t - E_b t_b}{E_t t_t + E_b t_b} \right) \left( \frac{\omega l}{2} \right) \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh(\frac{\omega l}{2})}$$

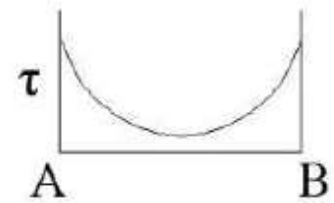
$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{E_t t_t t_a} \left( 1 + \frac{E_t t_t}{E_b t_b} \right)}$$



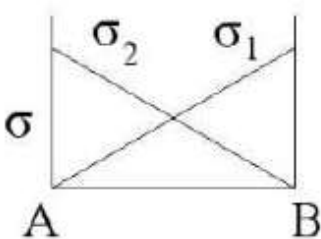
# Influence de la raideur de l'adhésif



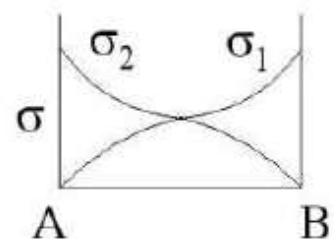
Cisaillement dans l'adhésif



$$\tau = \frac{P\omega \cosh(\omega x)}{2b \sinh(\frac{\omega l}{2})} + \left( \frac{E_t t_t - E_b t_b}{E_t t_t + E_b t_b} \right) \left( \frac{\omega l}{2} \right) \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh(\frac{\omega l}{2})}$$



Contrainte normale dans les adhérents



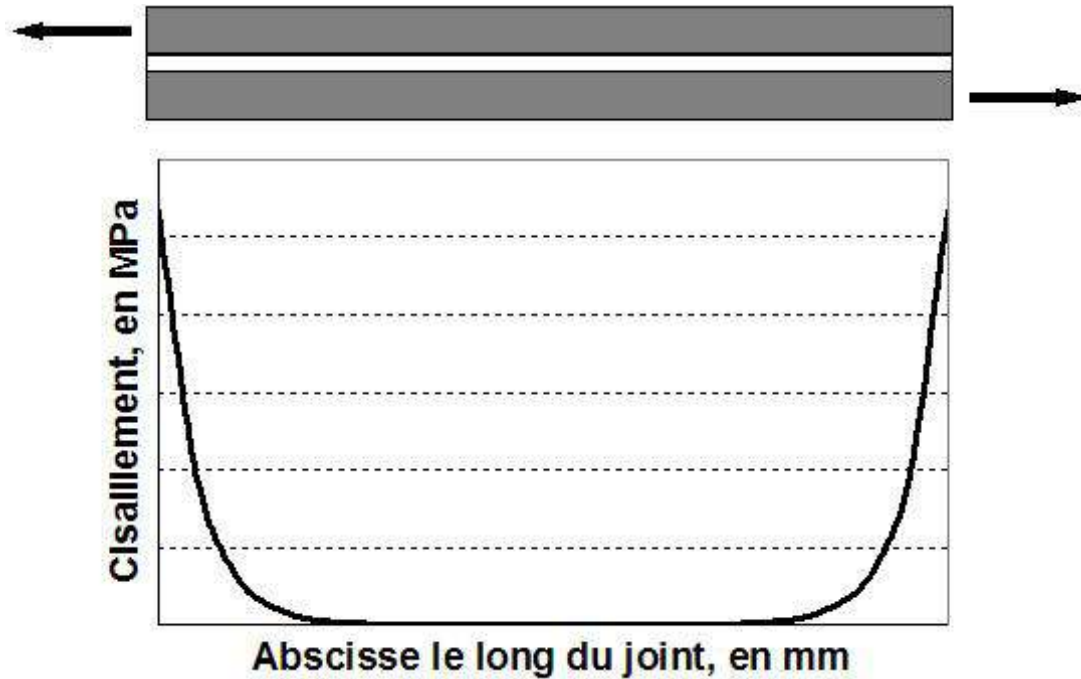
$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{E_t t_t t_a} + \frac{E_t t_t}{E_b t_b}}$$

= raideur de la résine négligeable vis-à-vis de la raideur des adhérents

= raideur de la résine non négligeable vis-à-vis de la raideur des adhérents

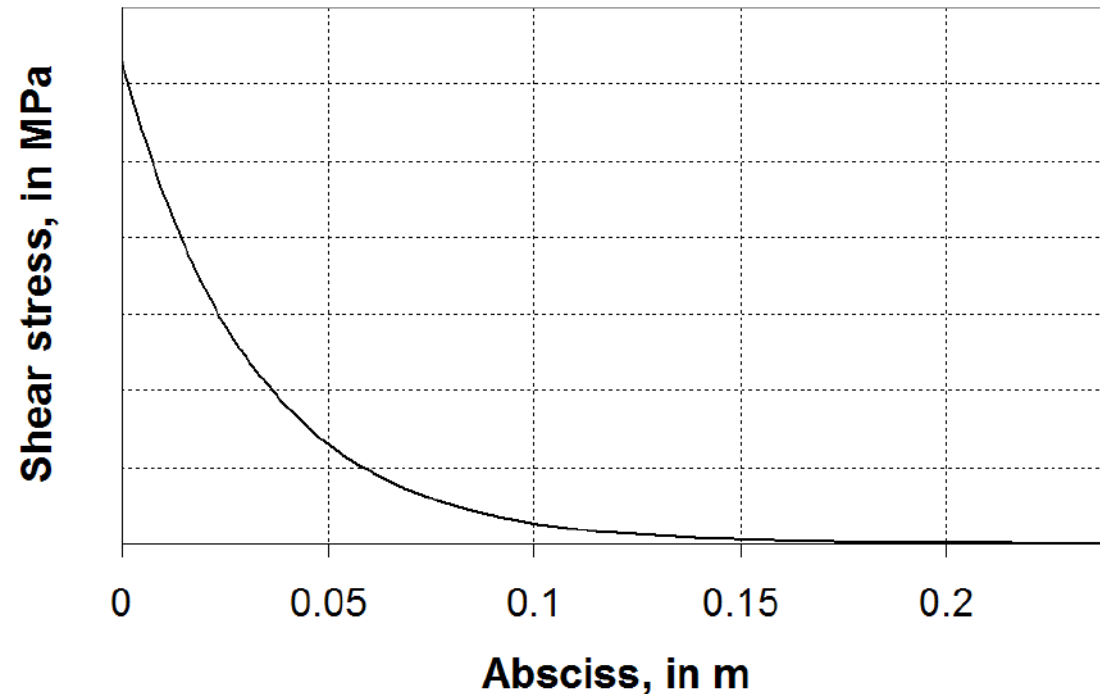
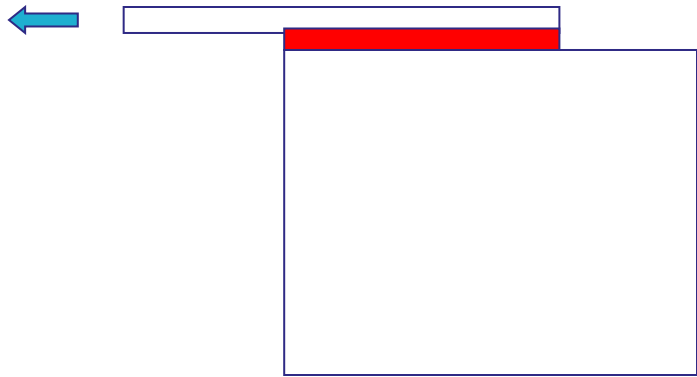
**Cas des colles « structurales »**

# Application pour un assemblage collé symétrique



- ⇒ **Concentration des transferts d'effort aux extrémités**  
(colle rigide et élastique)
- ⇒ **Existence d'un effort maximal transmissible**
- ⇒ **Existence d'une longueur d'ancrage**

# Application pour un assemblage collé asymétrique



- ⇒ **Concentration des transferts d'effort aux extrémités**  
(colle rigide et élastique)
- ⇒ **Existence d'un effort maximal transmissible**
- ⇒ **Existence d'une longueur d'ancrage**

# Effet sur la capacité maximale de l'assemblage: investigations expérimentales

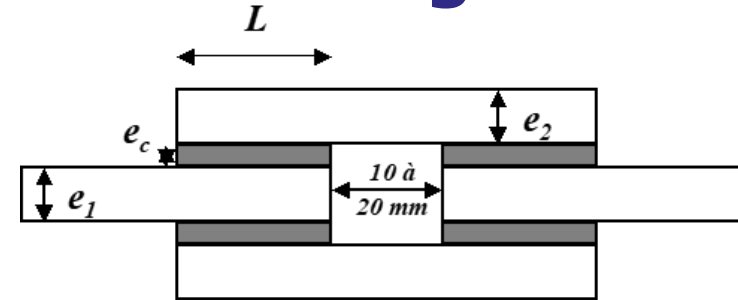
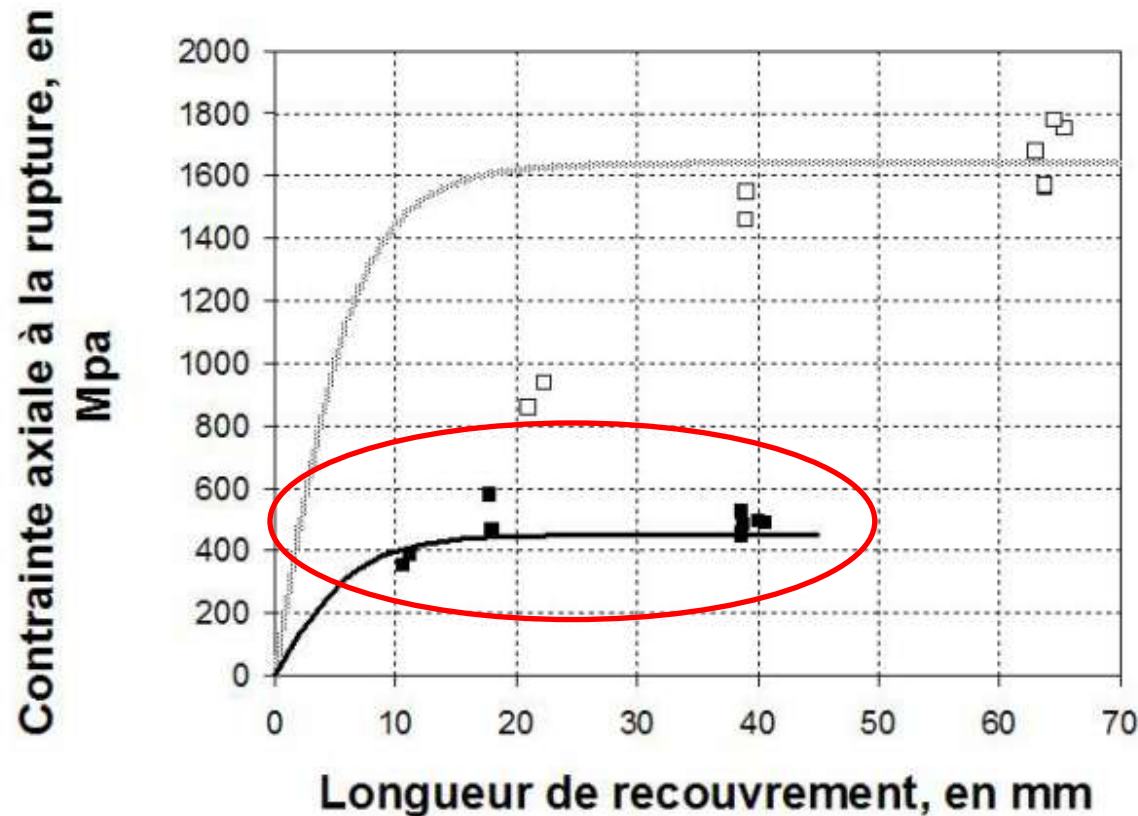
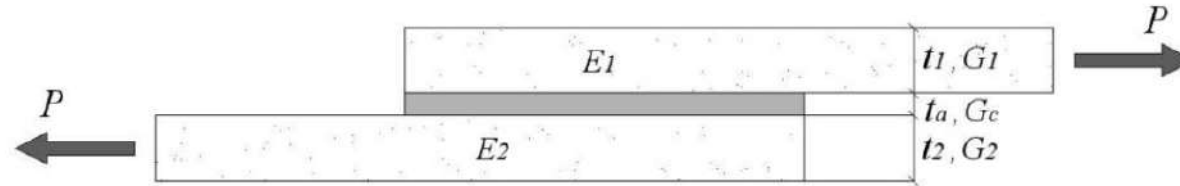


Schéma du joint à double recouvrement



- Résultats expérimentaux: DP460
- ⋯ Théorie de O. Volkersen
- Résultats Expérimentaux: Etacol 492
- Théorie de O. Volkersen

# Expression de la longueur d'ancrage dans le cas d'une résine élastique fragile



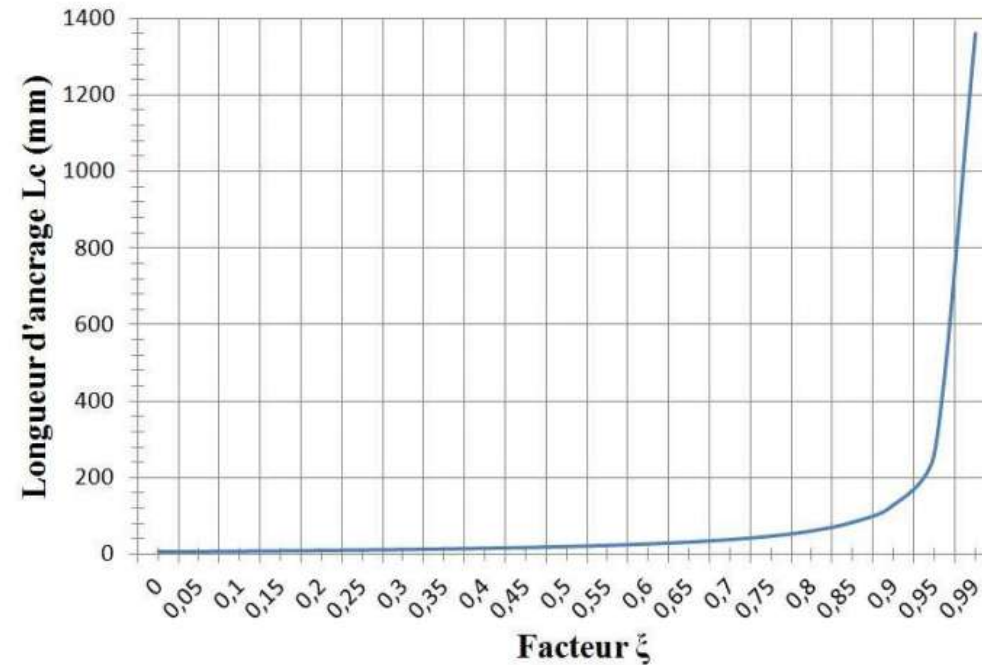
$$L_c = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \frac{1}{1-\xi} \left( \xi M + \sqrt{1 + \xi^2 \cdot (M^2 - 1)} \right) \right]$$

$$\lambda^2 = \frac{G_c}{e_c} \cdot \left( \frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)$$

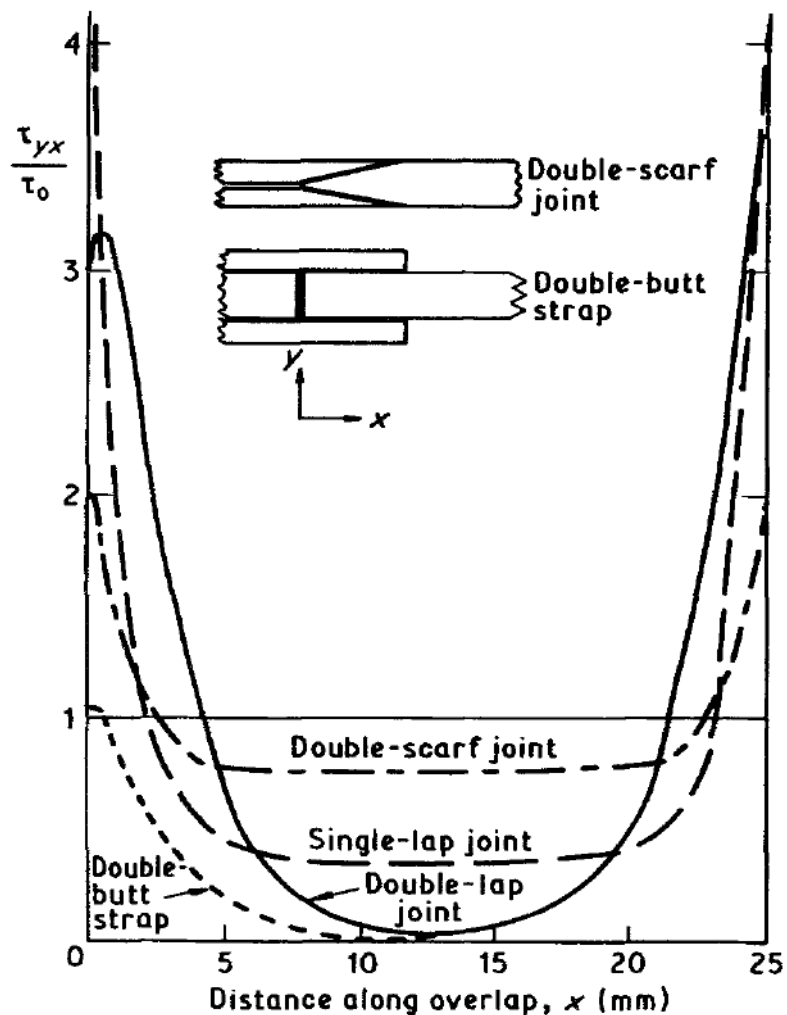
$$M = \min \left( \frac{E_2 e_2}{E_1 e_1}, \frac{E_1 e_1}{E_2 e_2} \right)$$

$$\xi = \frac{\sigma_{11}^1(x=0) (\text{pour } L = L_c)}{\sigma_{11}^1(x=0) (\text{pour } L \rightarrow +\infty)}$$

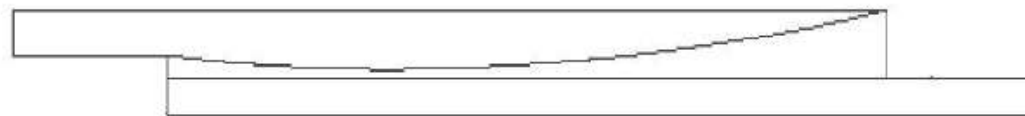
$$\sigma_{11}^1(x=0) = \frac{P}{b e_1}$$



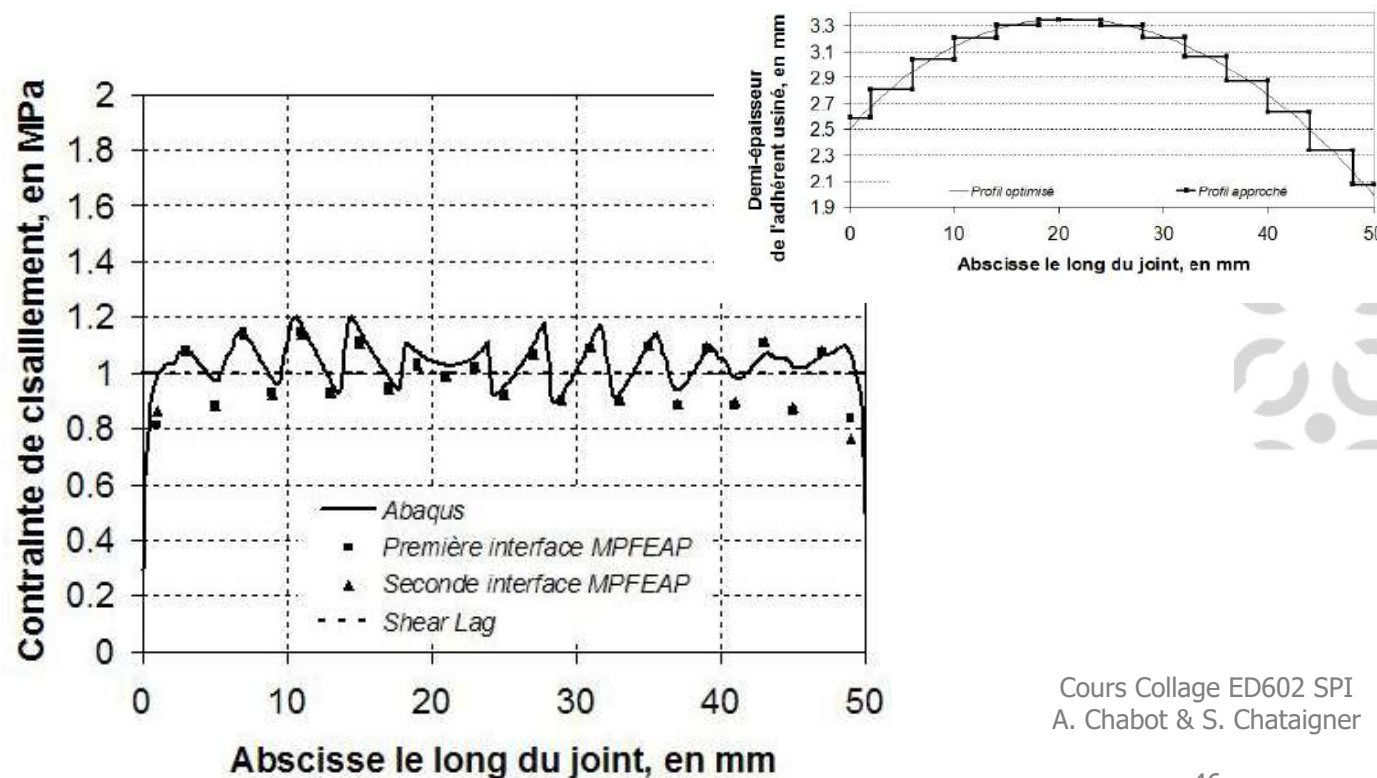
# Possibilité de modifier les profils de contrainte de cisaillement: Résine élastique fragile



Kinloch (1982), Journal of Materials Science.



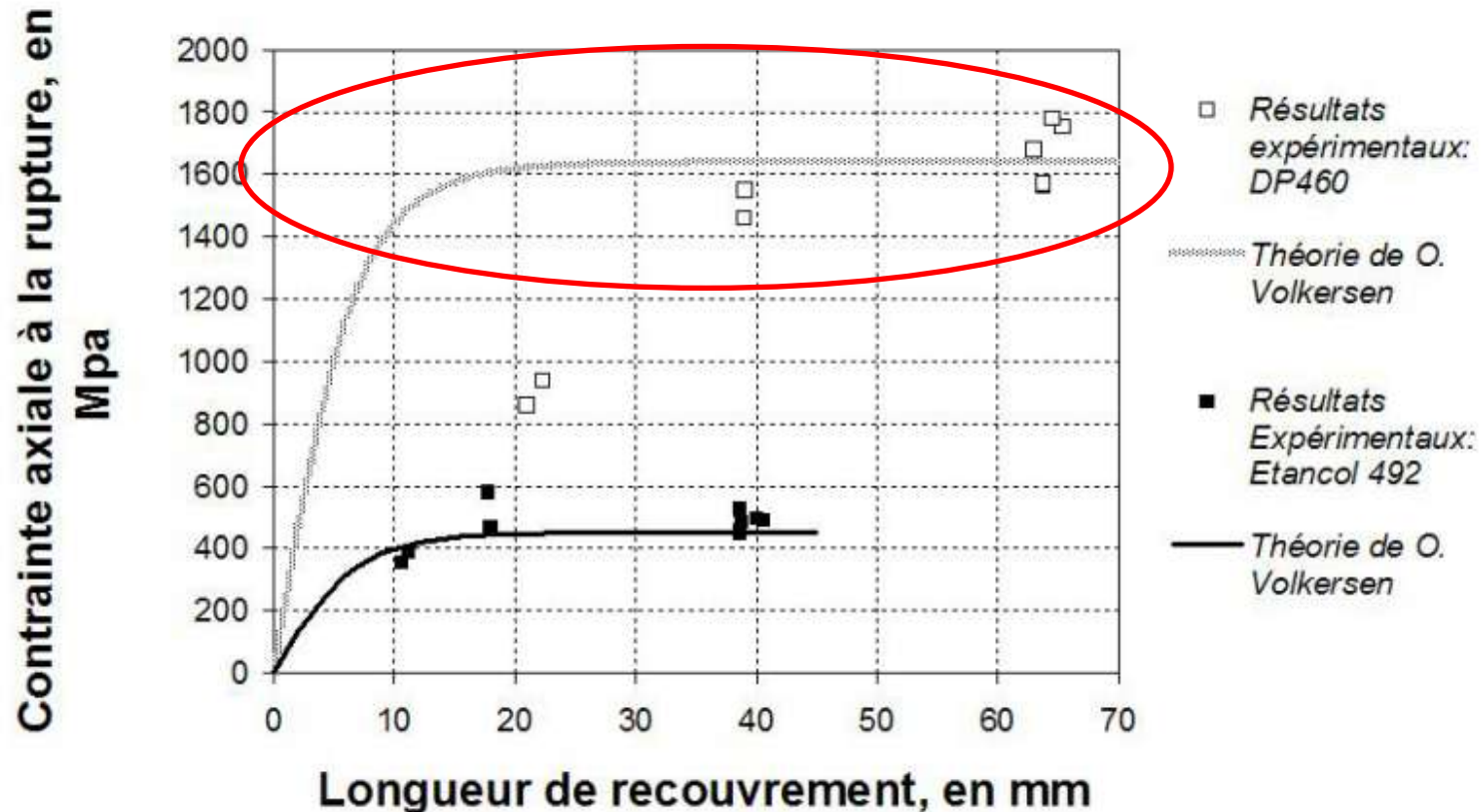
Diaz Diaz et al (2009), International Journal of Adhesion and adhesives



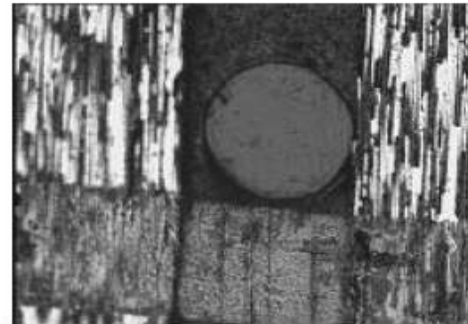
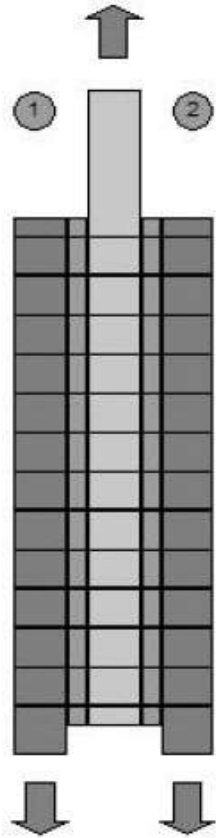
S. Chataigner, (2008)

Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

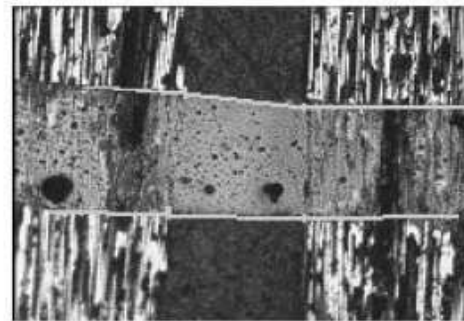
# Effet sur la capacité maximale de l'assemblage: investigations expérimentales: cas d'une résine élastoplastique



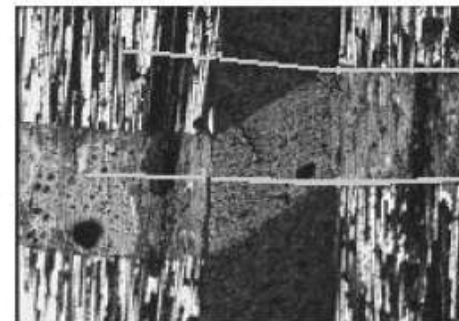
# Observation expérimentale de déformations rémanentes: plasticité de la résine



*Fil de pêche: Echelle  
(Diamètre du fil de 0.25 mm)*



*Avant chargement*

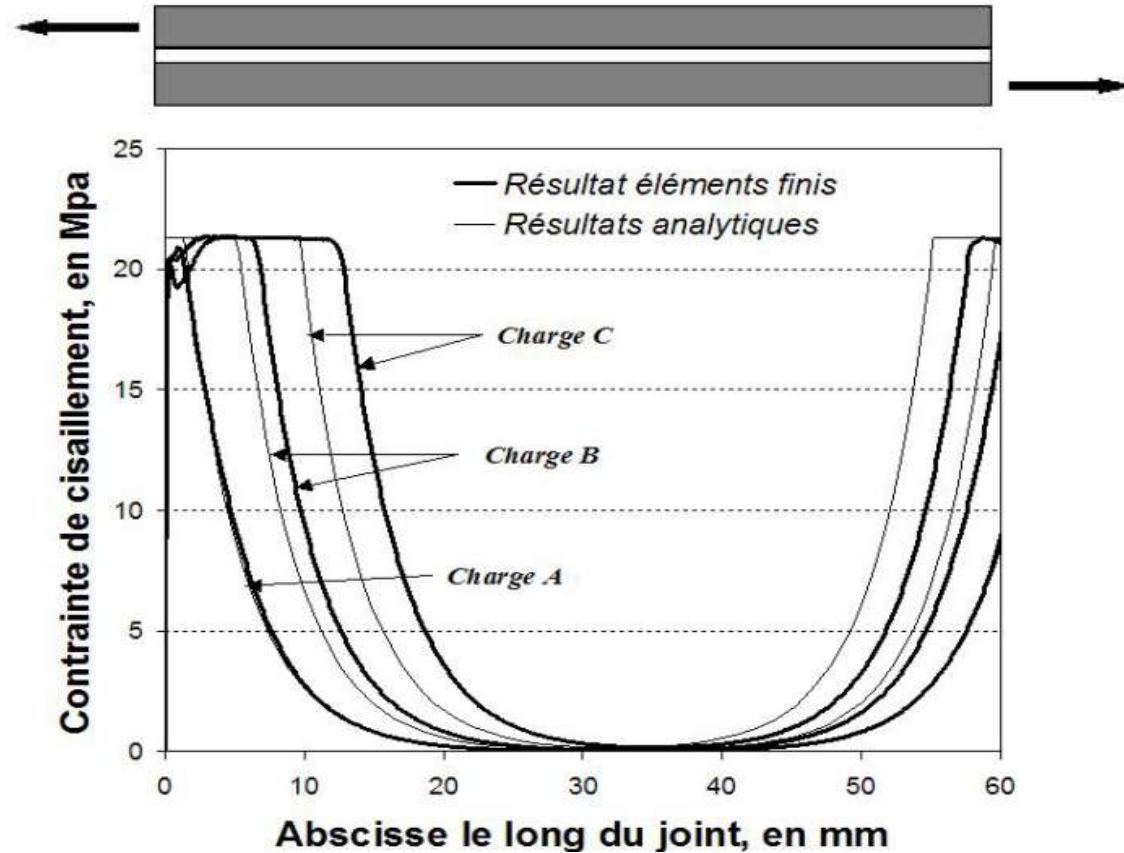


*Après chargement*

Dispositif d'observation des déformations de cisaillement dans le joint de colle

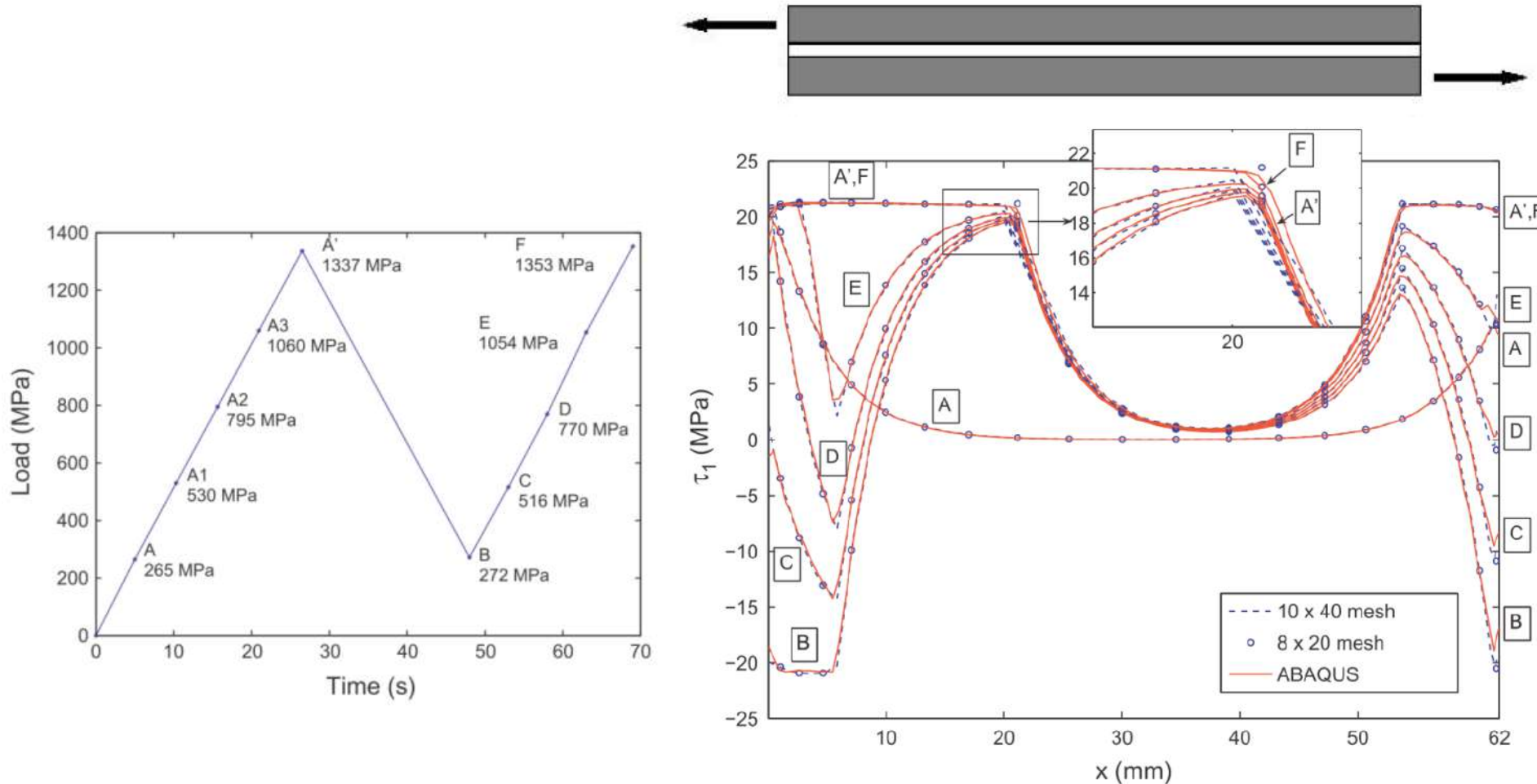


# Influence de la plasticité de la résine sur le transfert



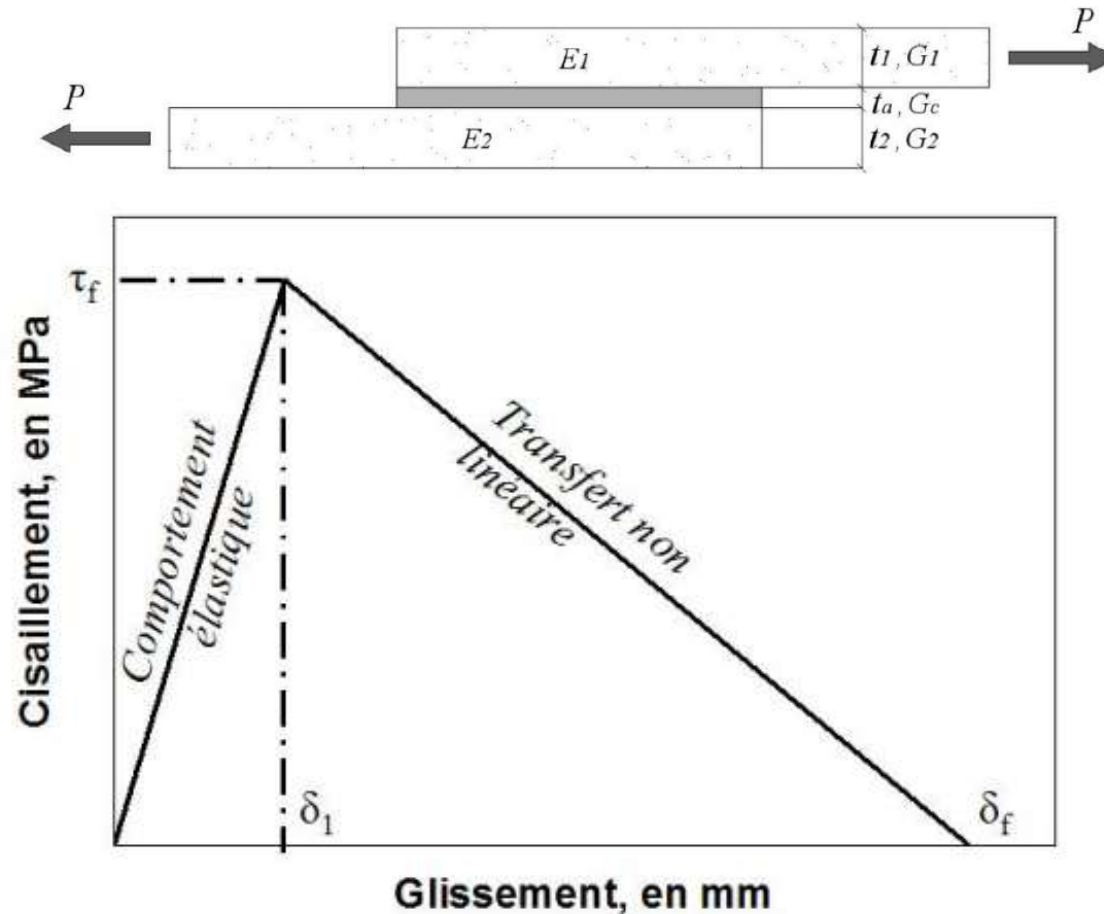
Profil de cisaillement le long d'un assemblage collé avec résine élastoplastique

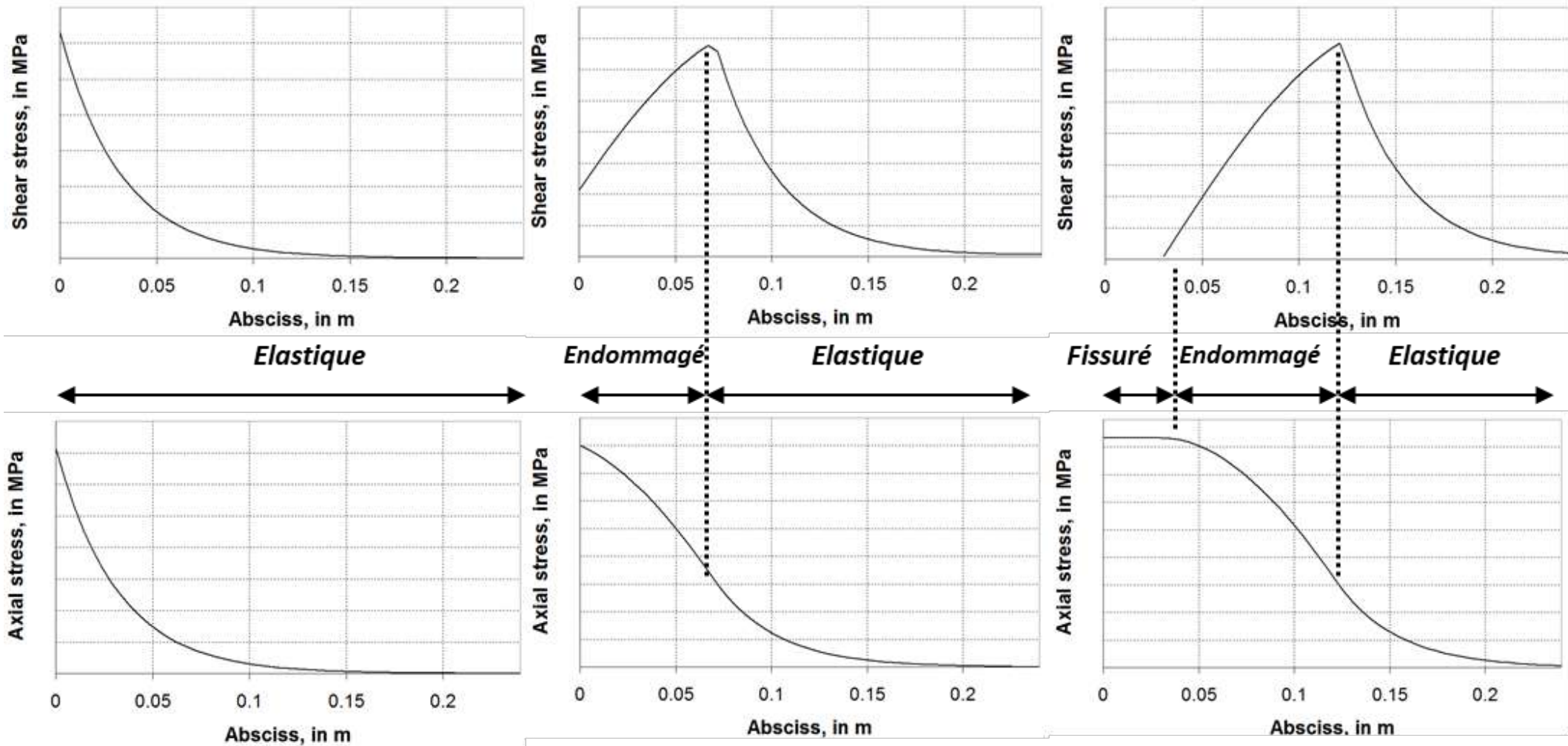
# Influence de la plasticité sur les charges-décharges



Profil de cisaillement le long d'un assemblage collé soumis à des cycles de charge-décharge

# Intégration d'endommagement dans la couche de colle ou l'interphase (en cisaillement): modèle de zone cohésive





**Augmentation de la charge appliquée**

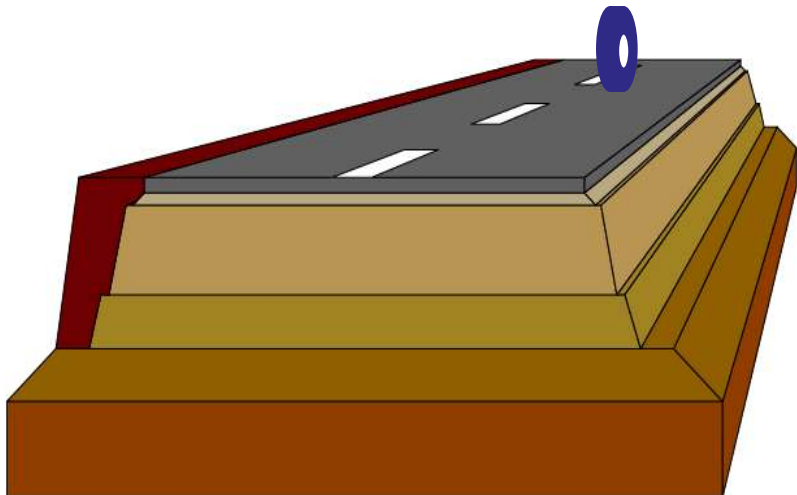
# Conclusion sur le Shear Lag/Longueur d'ancrage

- **Existence d'une longueur d'ancrage caractéristique: utile pour le dimensionnement,**
- **Existence d'une capacité maximale associée: nécessaire pour le dimensionnement,**
- **Théorie du Shear Lag adaptée pour des comportements linéaires => peut être adaptée pour prendre en compte des comportements non linéaires.**

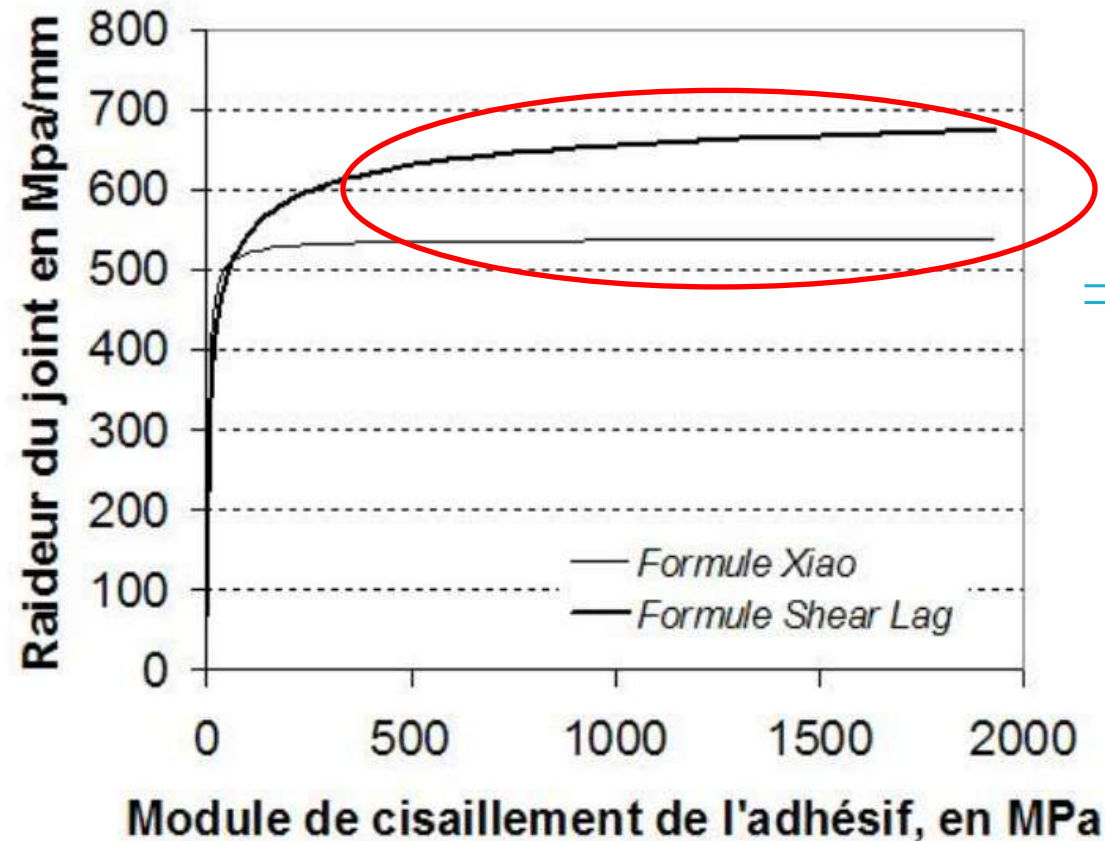
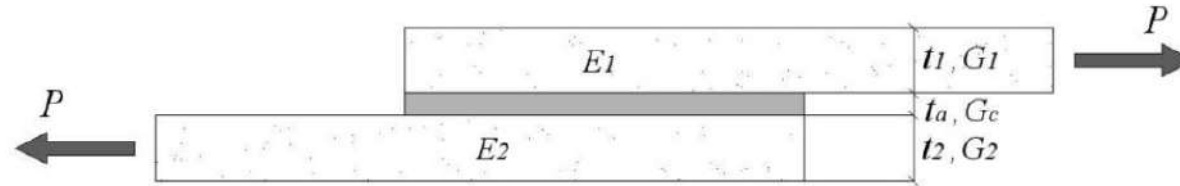
-> Pas de prise en compte de l'arrachement (limite les domaines d'applicabilité),

# Plan

1. Modélisations multicouches / What for? (A. Chabot)
2. Essais de caractérisation / applications chaussées (A. Chabot)
3. Shear Lag / Concept de longueur d'ancrage (S. Chataigner)
- 4. Applications en Ouvrage d'Art** (S. Chataigner)



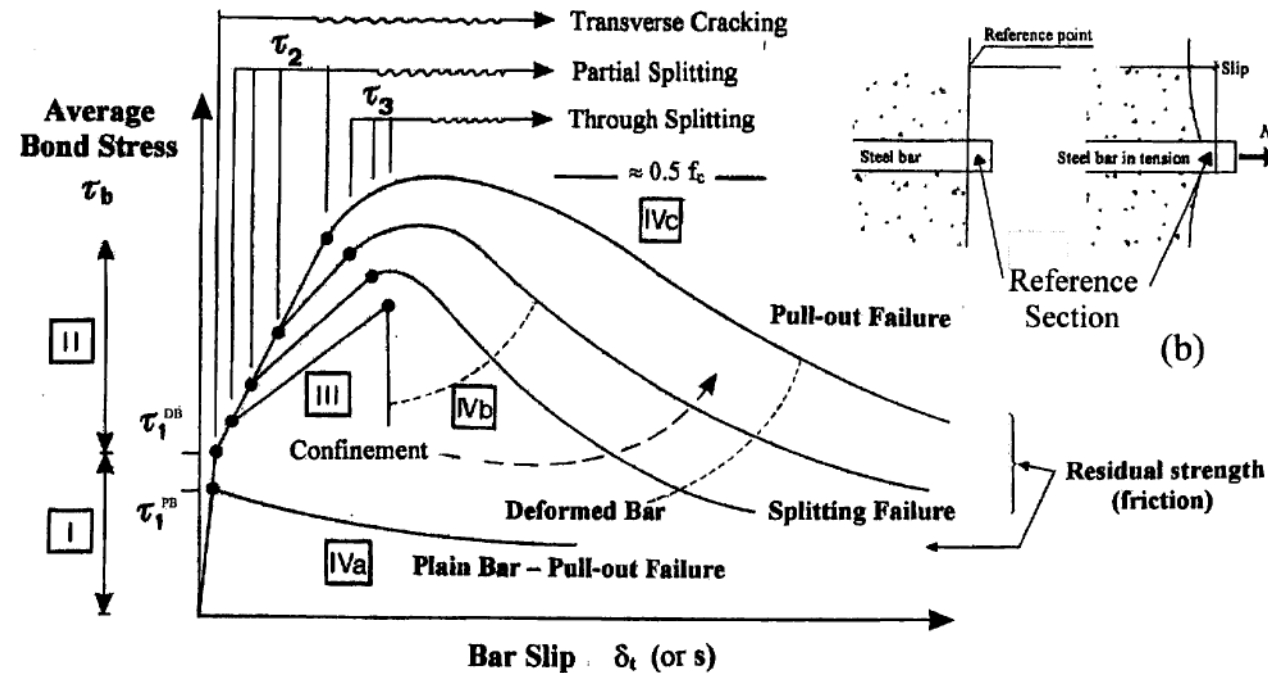
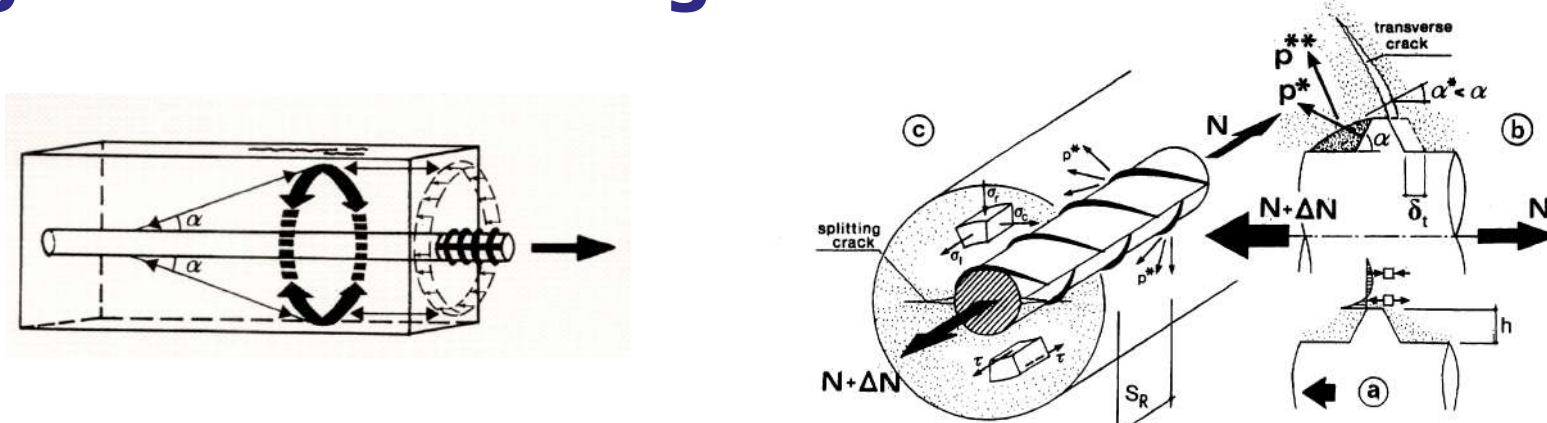
# Identificaton de la longueur d'ancrage: étude de la raideur d'un assemblage collé



**Besoin de recourir à des instrumentations locales**

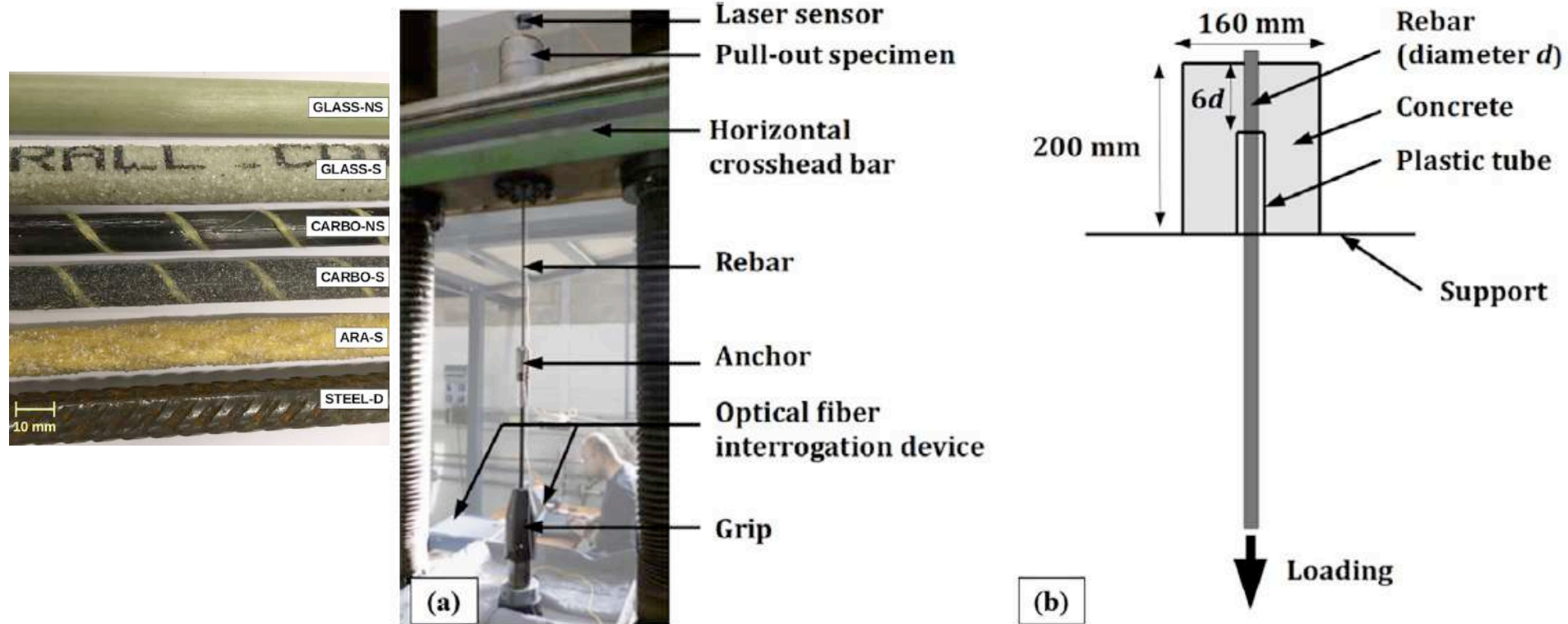
⇒ **Ne permet pas d'identifier la longueur d'ancrage ou « longueur mobilisée »**

# Investigations sur l'ancrage d'armatures dans le béton

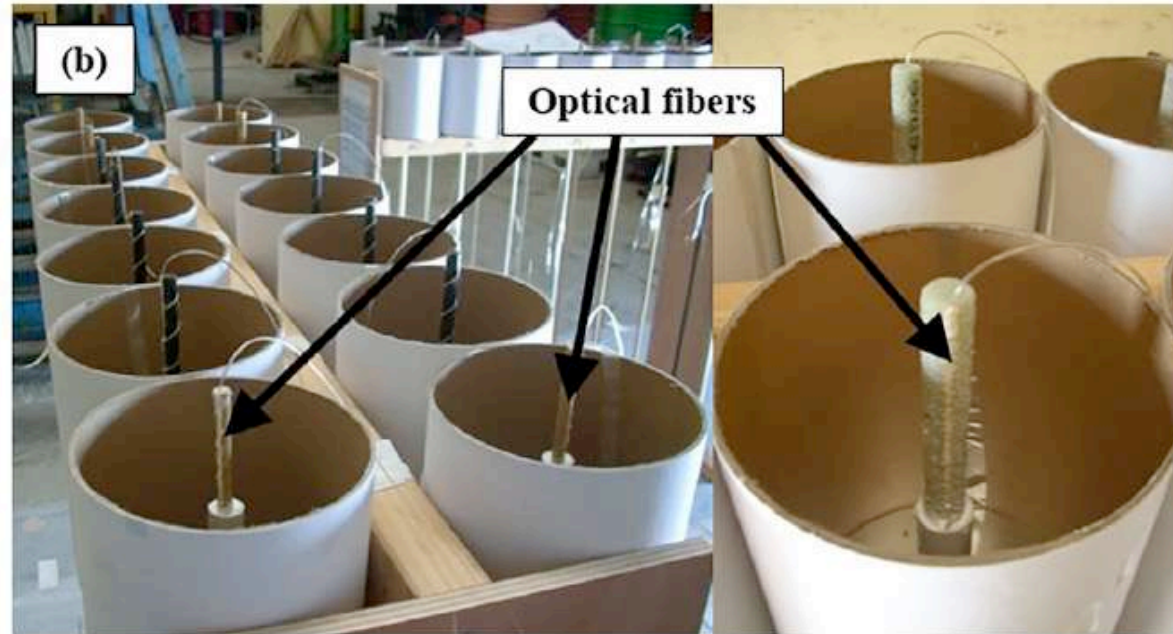
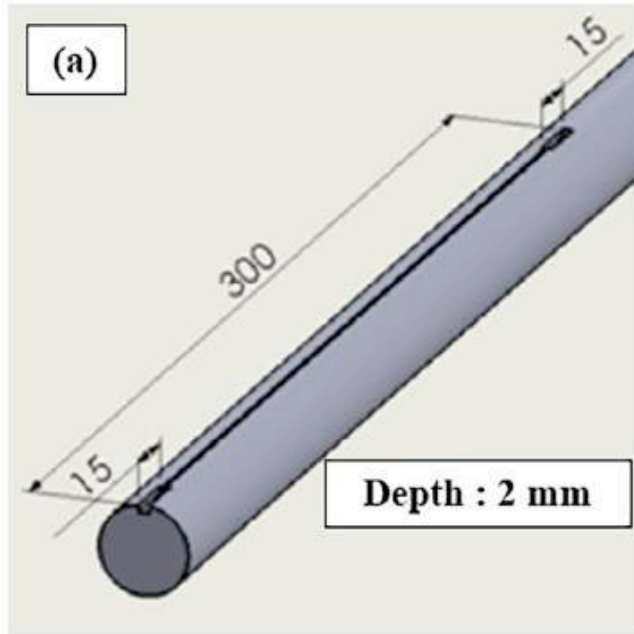




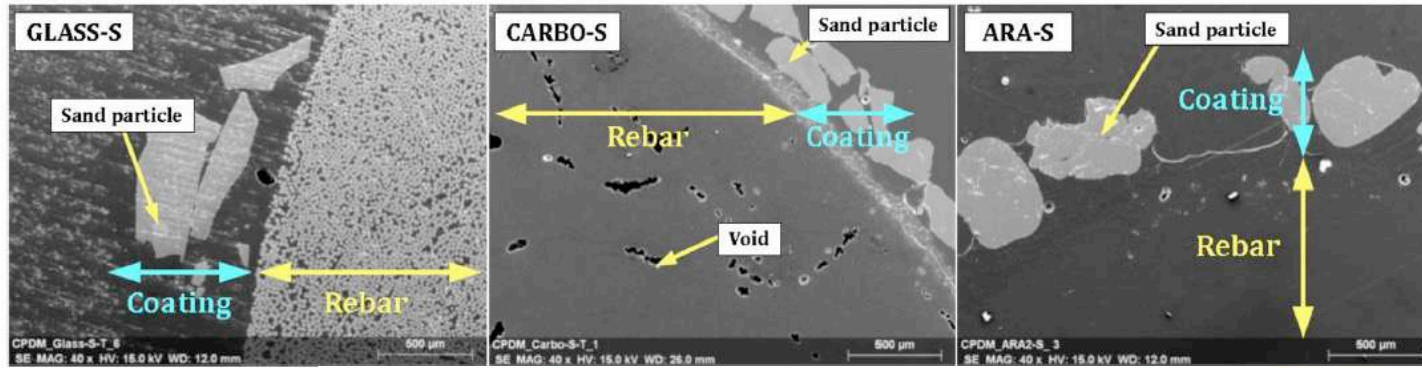
# Investigations sur l'ancrage d'armatures dans le béton



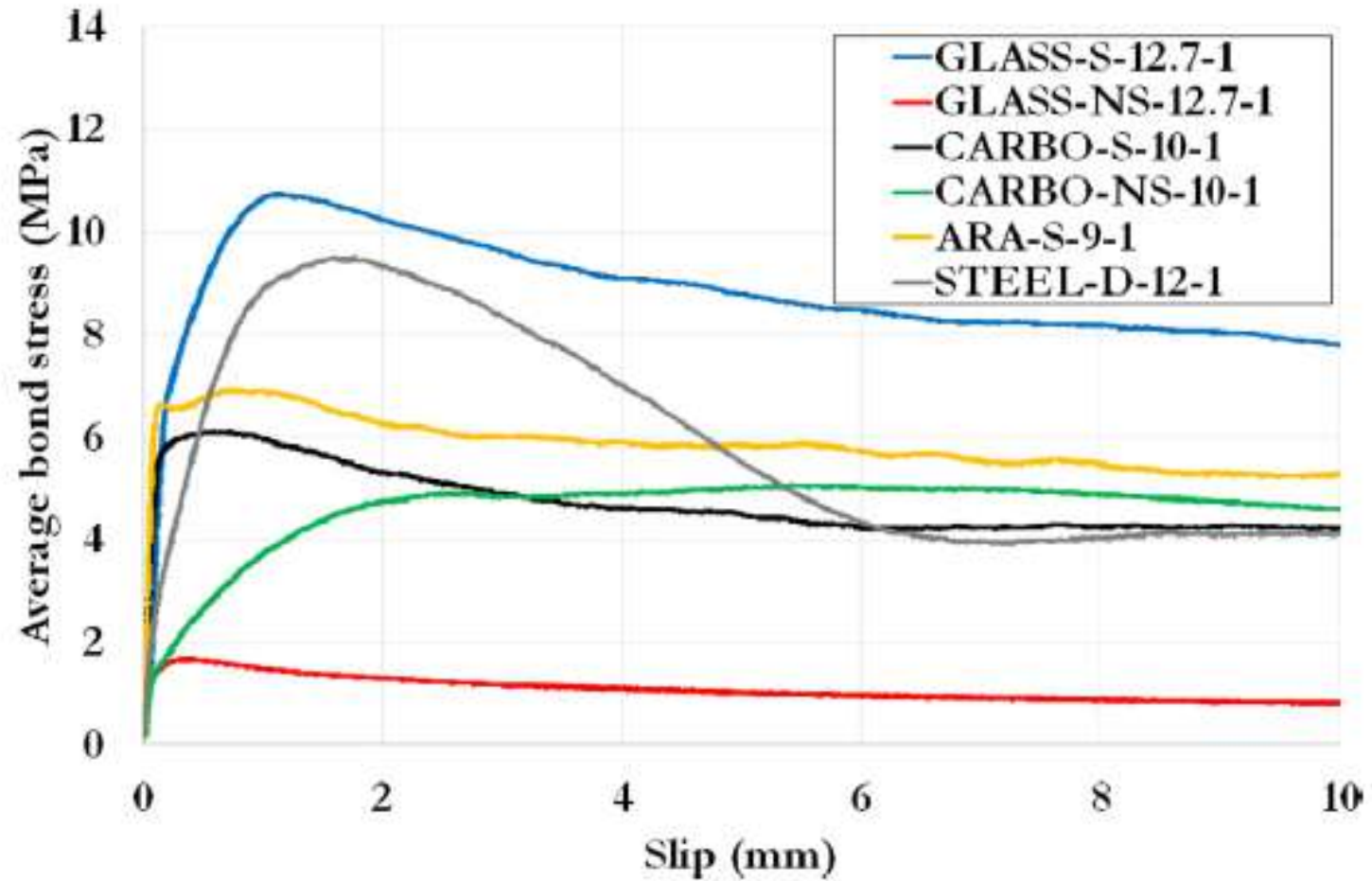
# Instrumentation locale



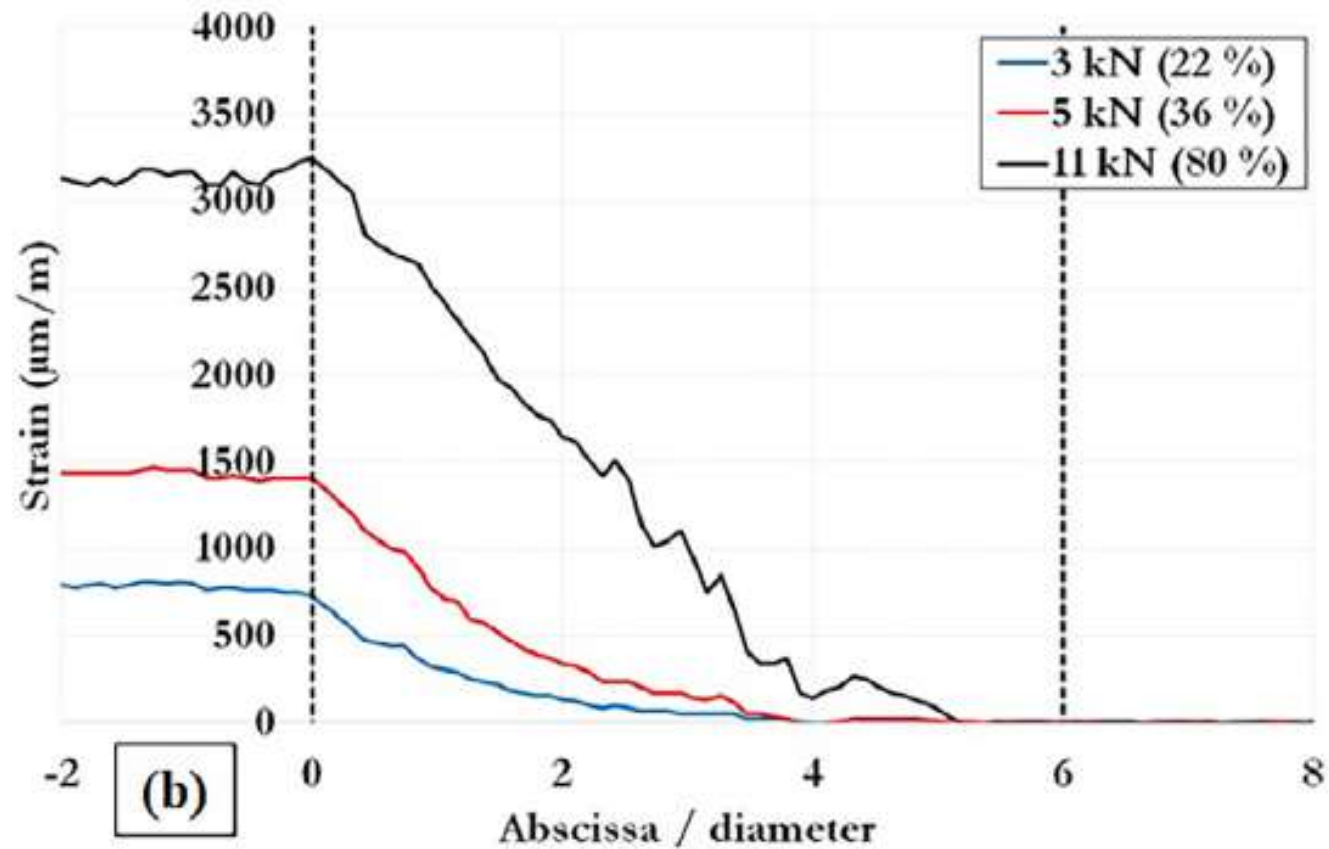
# Modes de rupture



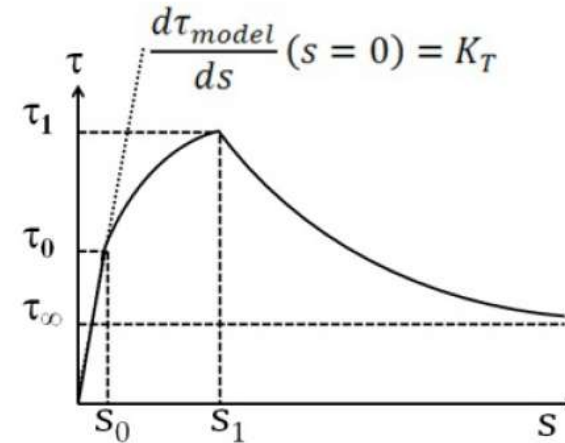
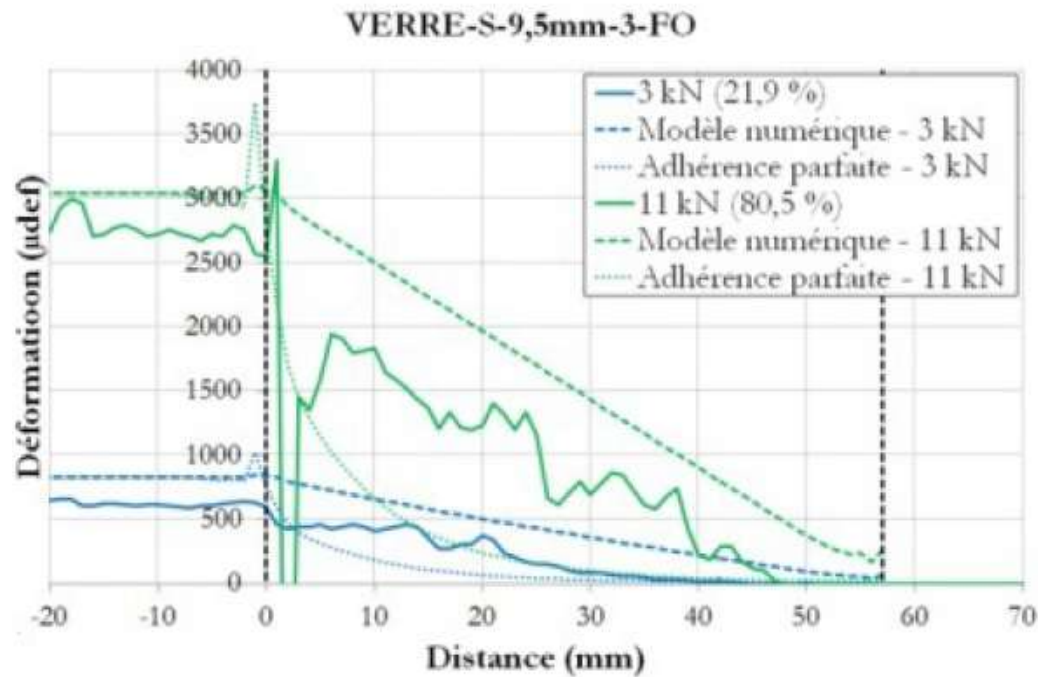
# Comportement global



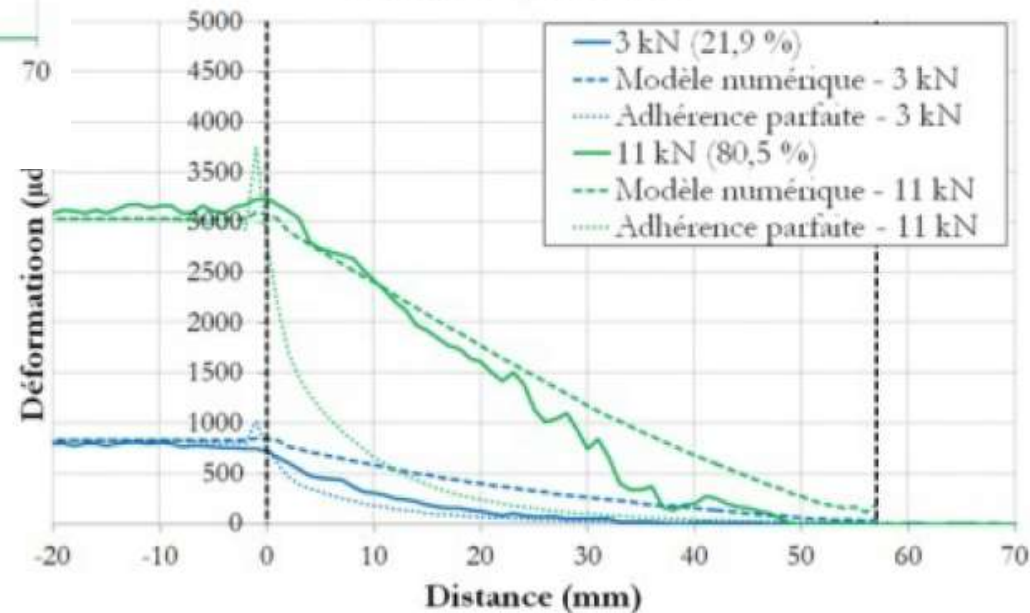
# Comportement local: interface (mesure)



# Comportement local: interface (modèle)



VERRE-S-9,5mm-4-FO



A. Rolland, Phd Thesis,  
Université Paris Est, 2018

Cours Collage ED602 SPI  
A. Chabot & S. Chataigner

# Investigations sur le collage de matériaux sur structures



Tissu sec imprégné sur site



Application sur le pont Jarama (projet FASSTbridge)



Plat composite pultrudé collé sur site



Application sur structure Offshore (©ColdPad)

# Investigations sur le collage de composites sur béton en laboratoire

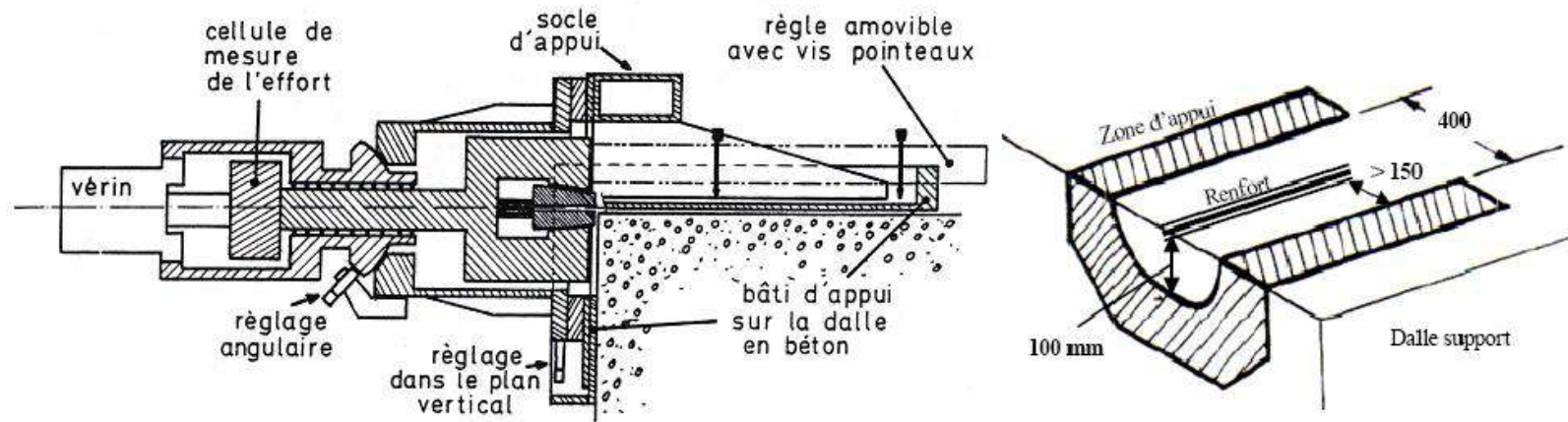


Schéma de la machine d'essai de cisaillement et de la zone d'appui

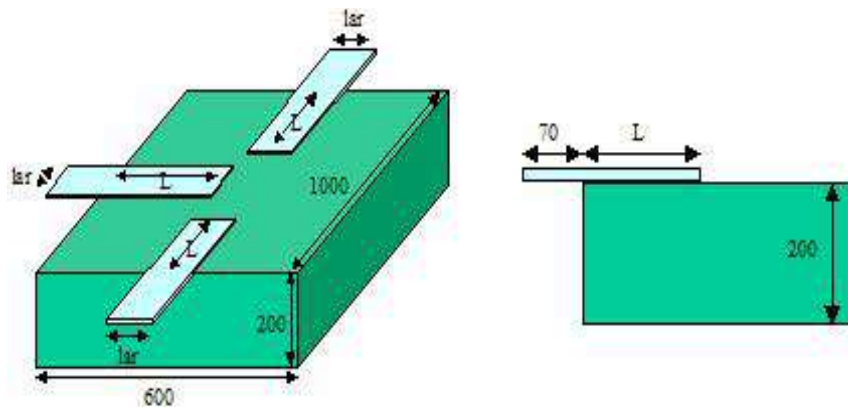


Schéma des éprouvettes d'essai

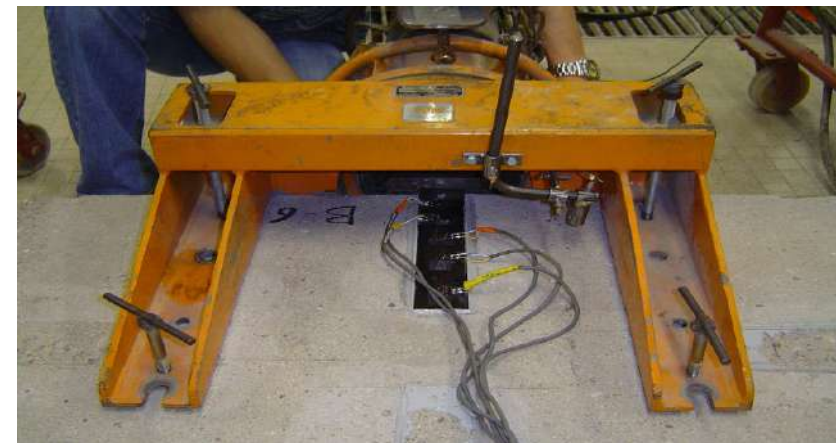
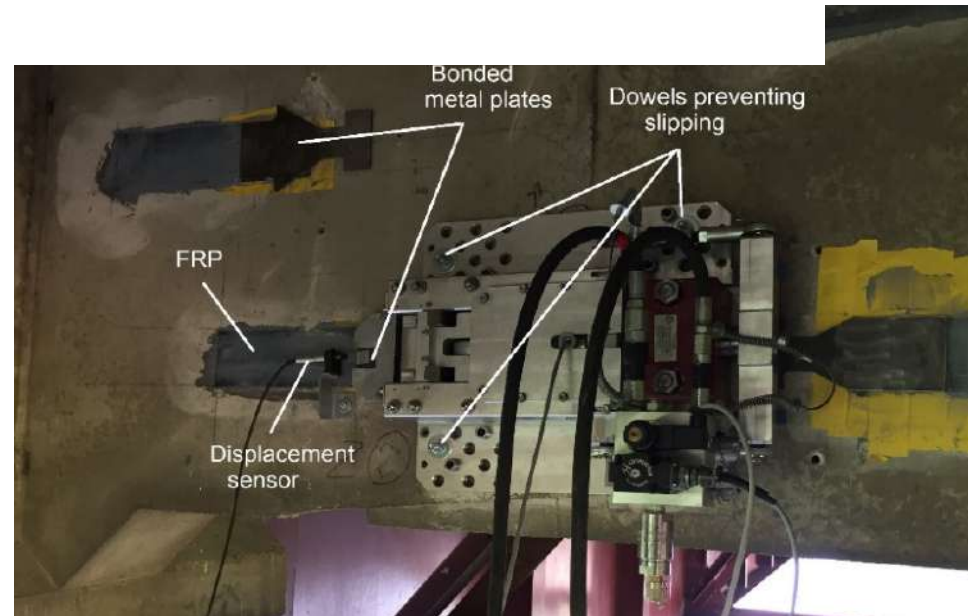
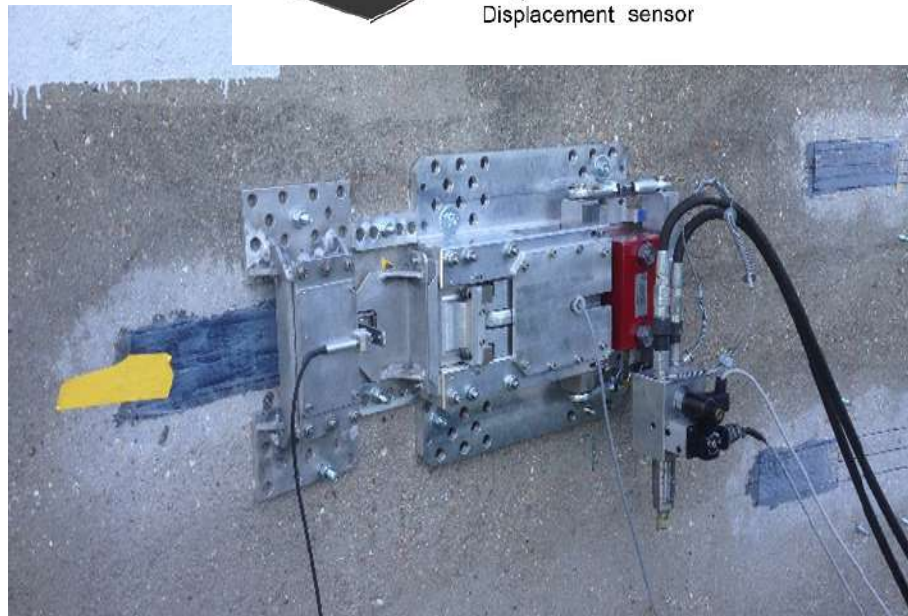
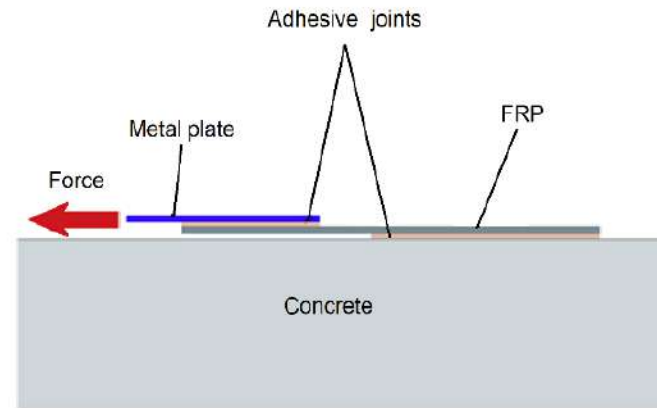
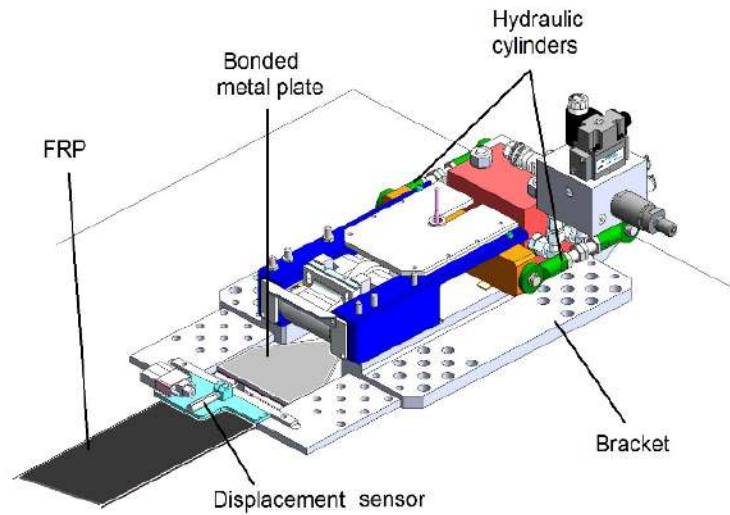


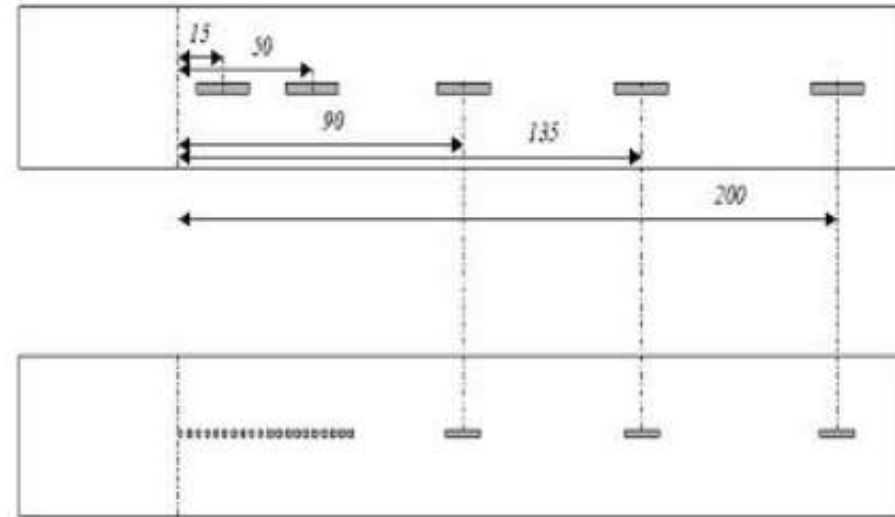
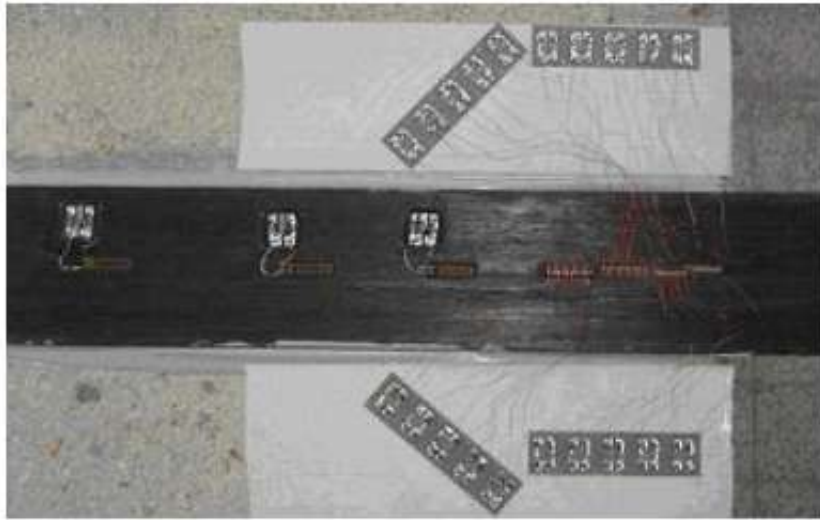
Photo de la machine d'essai en place



# Adaptation de l'essai sur site



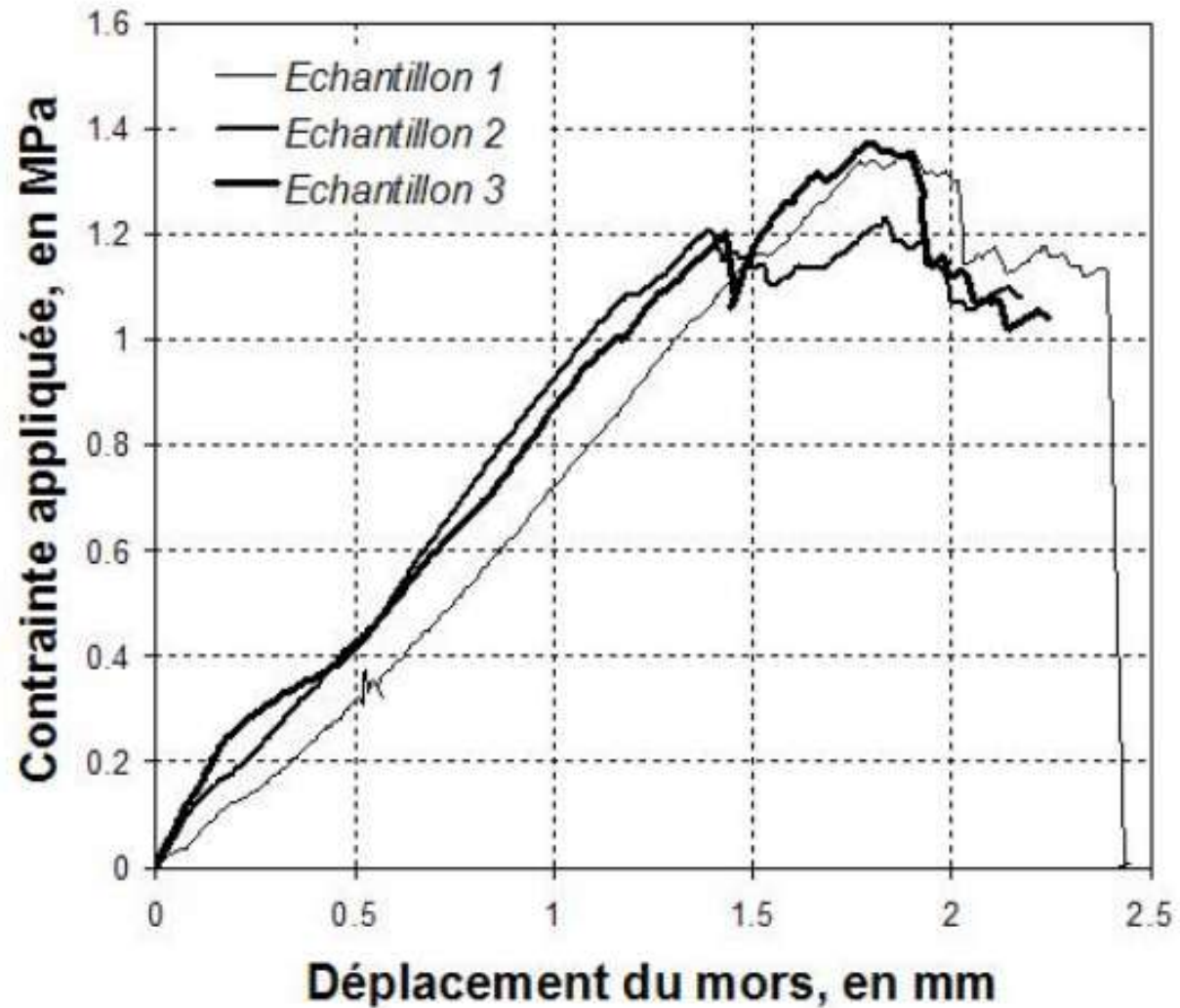
# Instrumentation locale



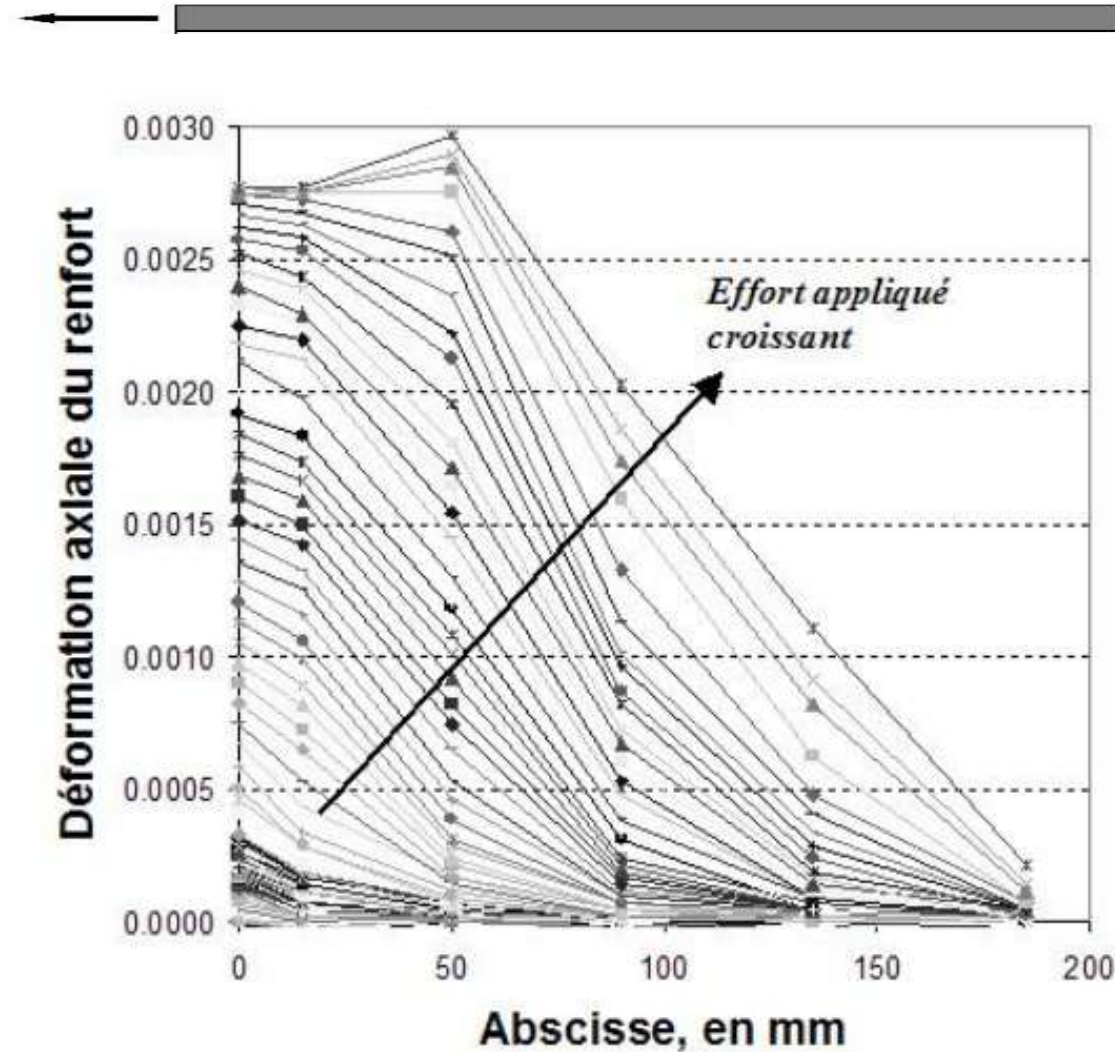
# Modes de rupture



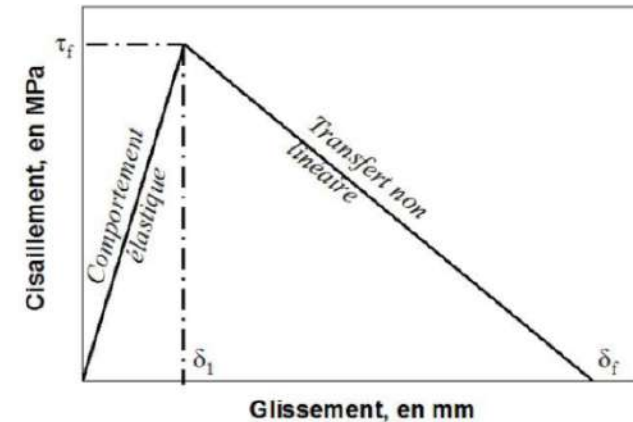
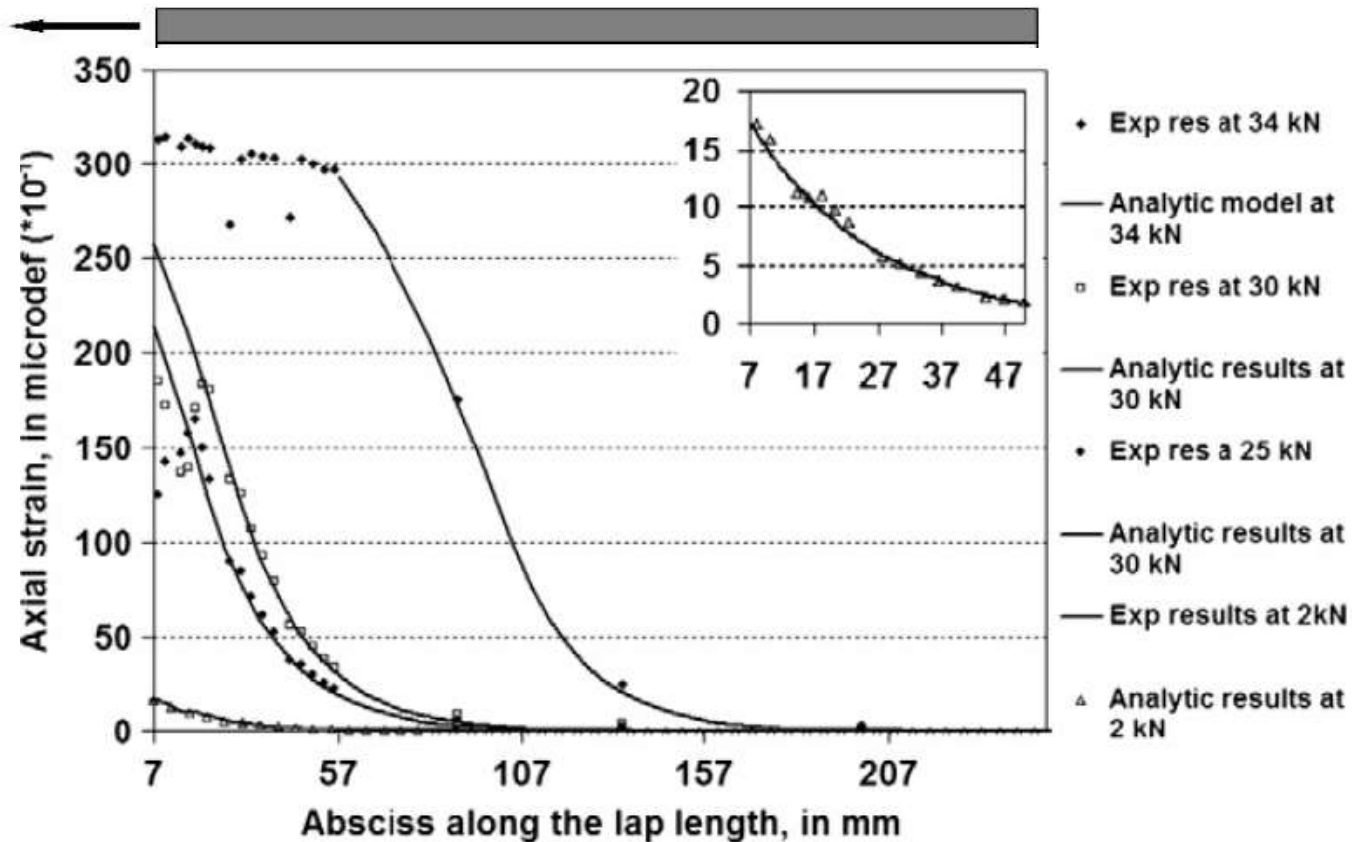
# Comportement global



# Comportement local (mesures)

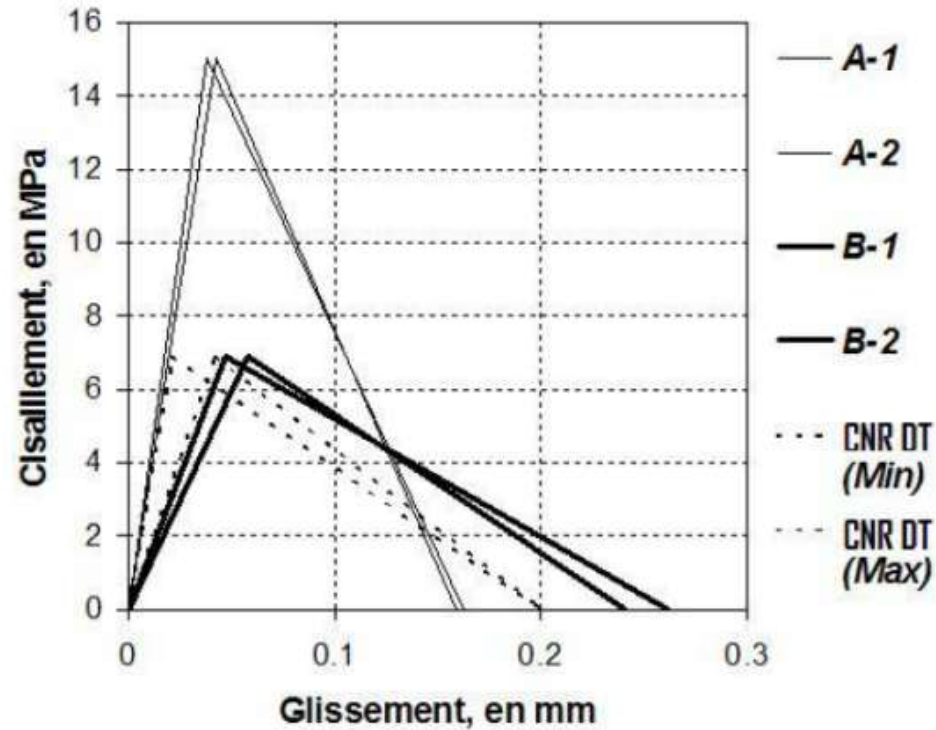


# Comportement local (modèle)

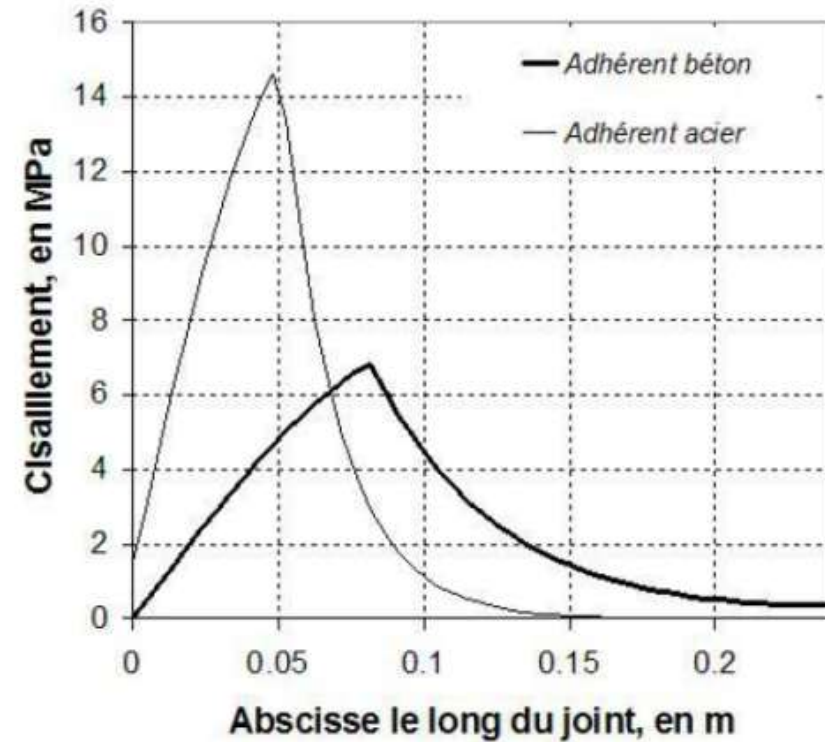


Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales (jauges de déformation)

# Support béton/support métallique

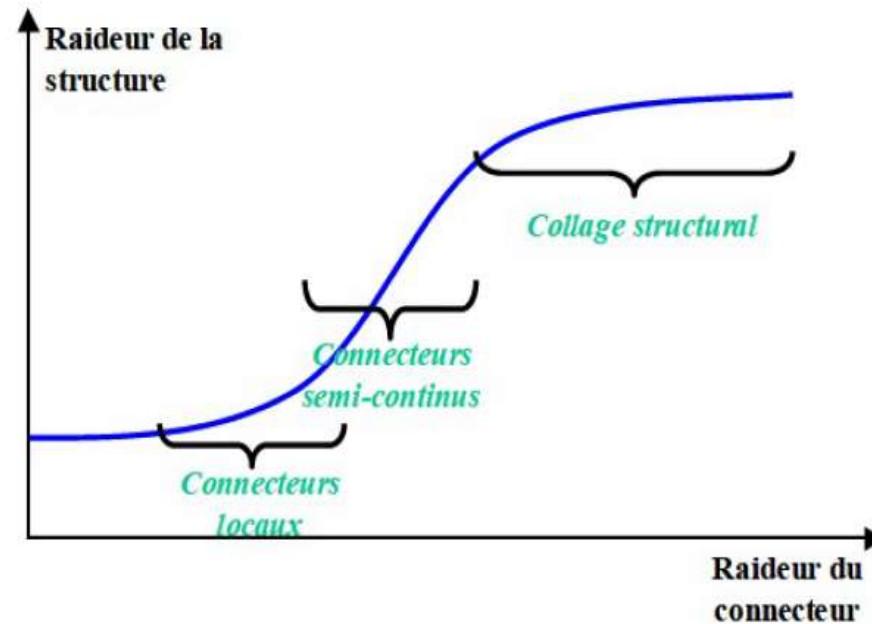
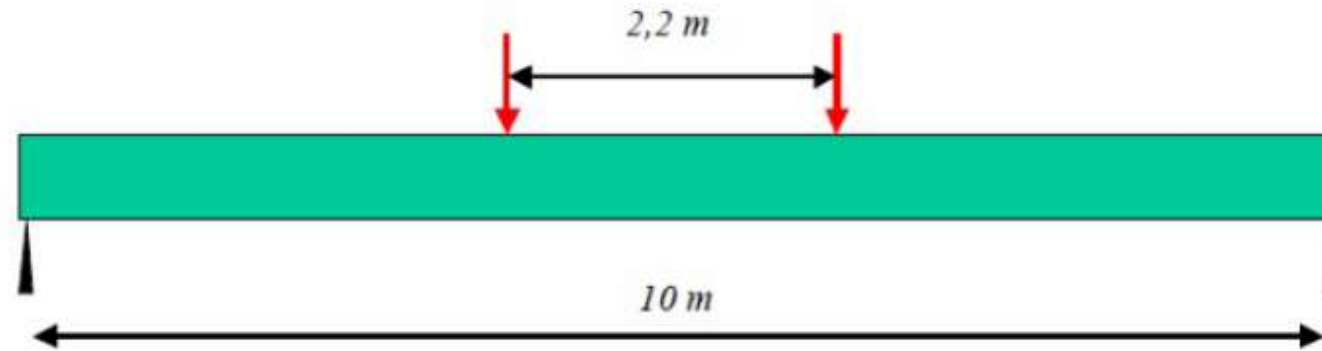
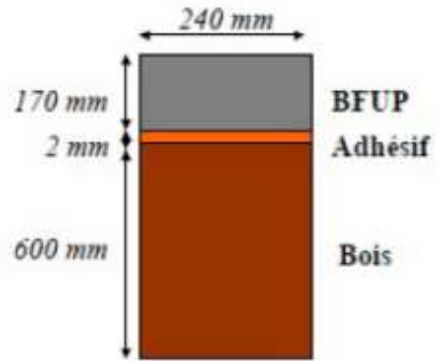


Modèles de zone cohésive obtenus sur béton et acier



Profils de cisaillement ultimes correspondants

# Autres cas d'application: collage bois sur béton



Meaud et al. (2014) IJAA, 54:131-142 ;  
Le Roy et al. (2009), EJECE.

Relation entre raideur de la structure et du connecteur



# Protocole d'essai et modes de rupture



Youssef et al. (2014), Construction and Building materials.

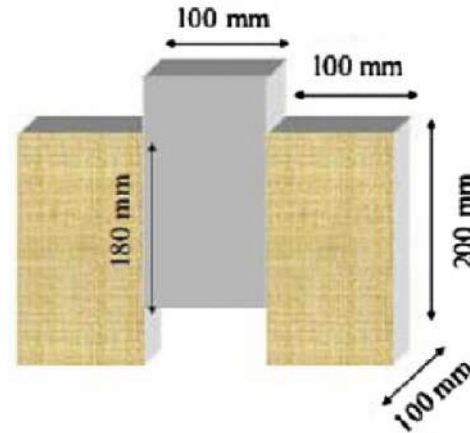
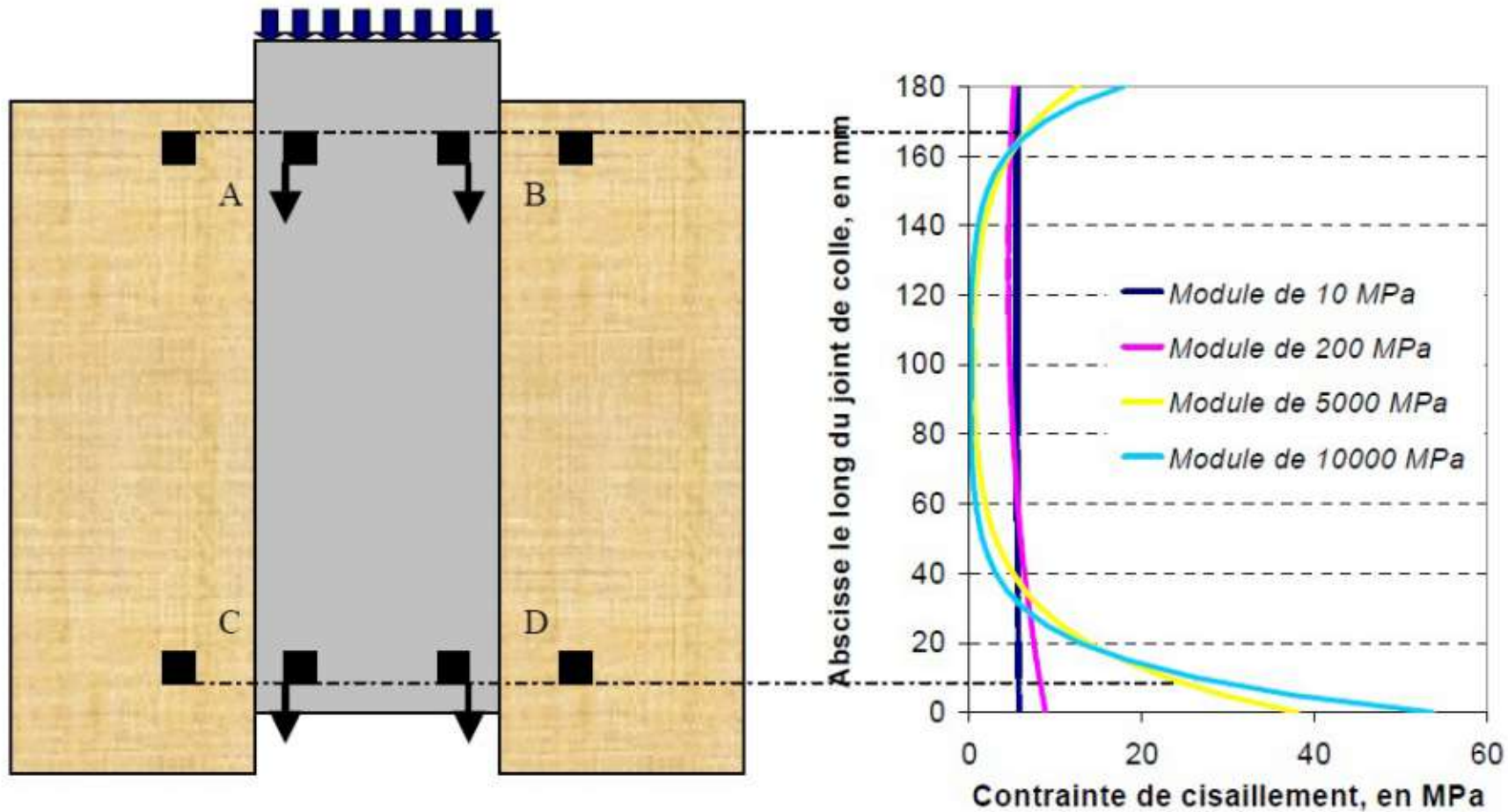


Schéma et photo d'une éprouvette Push-Out

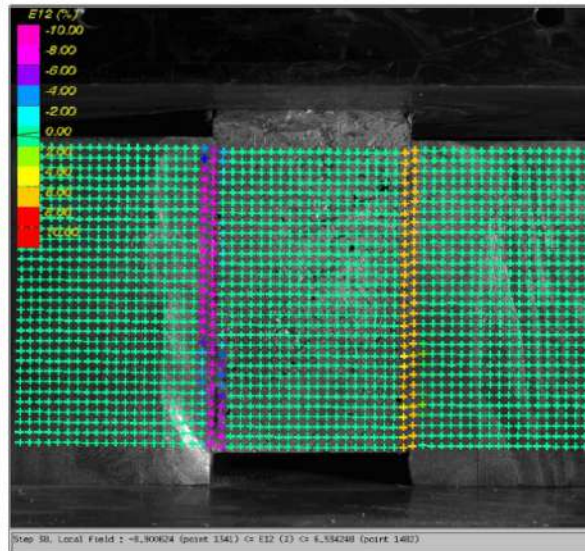
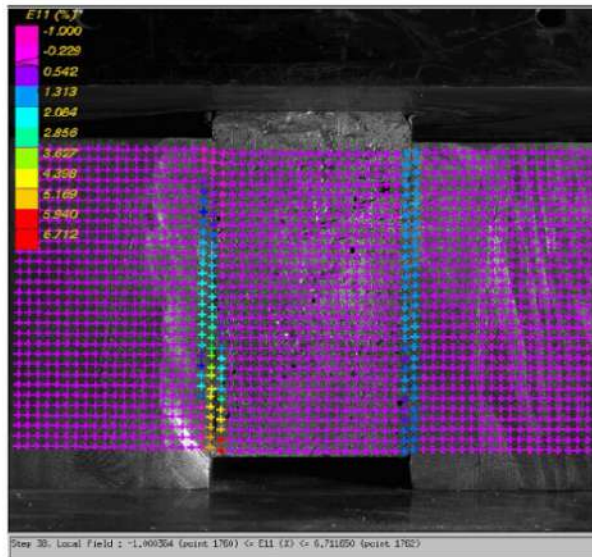


Photo des modes de rupture observés

# Profils de cisaillement long des assemblages pour différents adhésifs

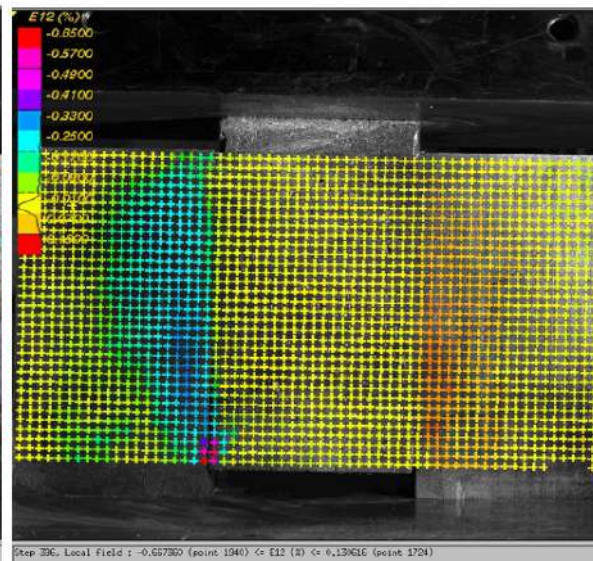
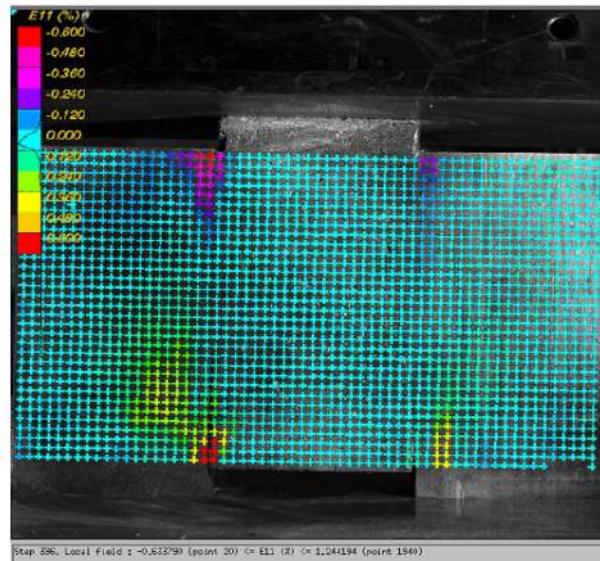


Youssef et al. (2014), Construction and Building materials.



Youssef et al. (2014),  
Construction and Building  
materials.

Résine polyuréthane très souple (arrachement à gauche et cisaillement à droite)



Résine époxy rigide (arrachement à gauche et cisaillement à droite)

## Conclusion sur la partie 4

- **Application (hors flexion) possible de théories simples uniquement basées sur le cisaillement :**

- ✓ Besoin de prendre en compte et d'identifier le comportement de l'interface ou interphase,
- ✓ Permet d'appréhender la capacité maximale (pilotage de la rupture, estimation expérimentale)
- ✓ Permet d'appréhender la longueur d'ancrage (instrumentation locale nécessaire).

Alimentation des codes de dimensionnement et des protocoles de caractérisation

- **Pour certaines applications, besoin de prendre en compte l'arrachement qui peut avoir un rôle non négligeable (cas d'adhérents épais)**

# Des questions ?

**Campus de Nantes**

[armelle.chabot@ifsttar.fr](mailto:armelle.chabot@ifsttar.fr)

[sylvain.chataigner@ifsttar.fr](mailto:sylvain.chataigner@ifsttar.fr)

