Bordeaux INP
AQUITAINE

Matériaux et structures composites

Endommagement interlaminaire

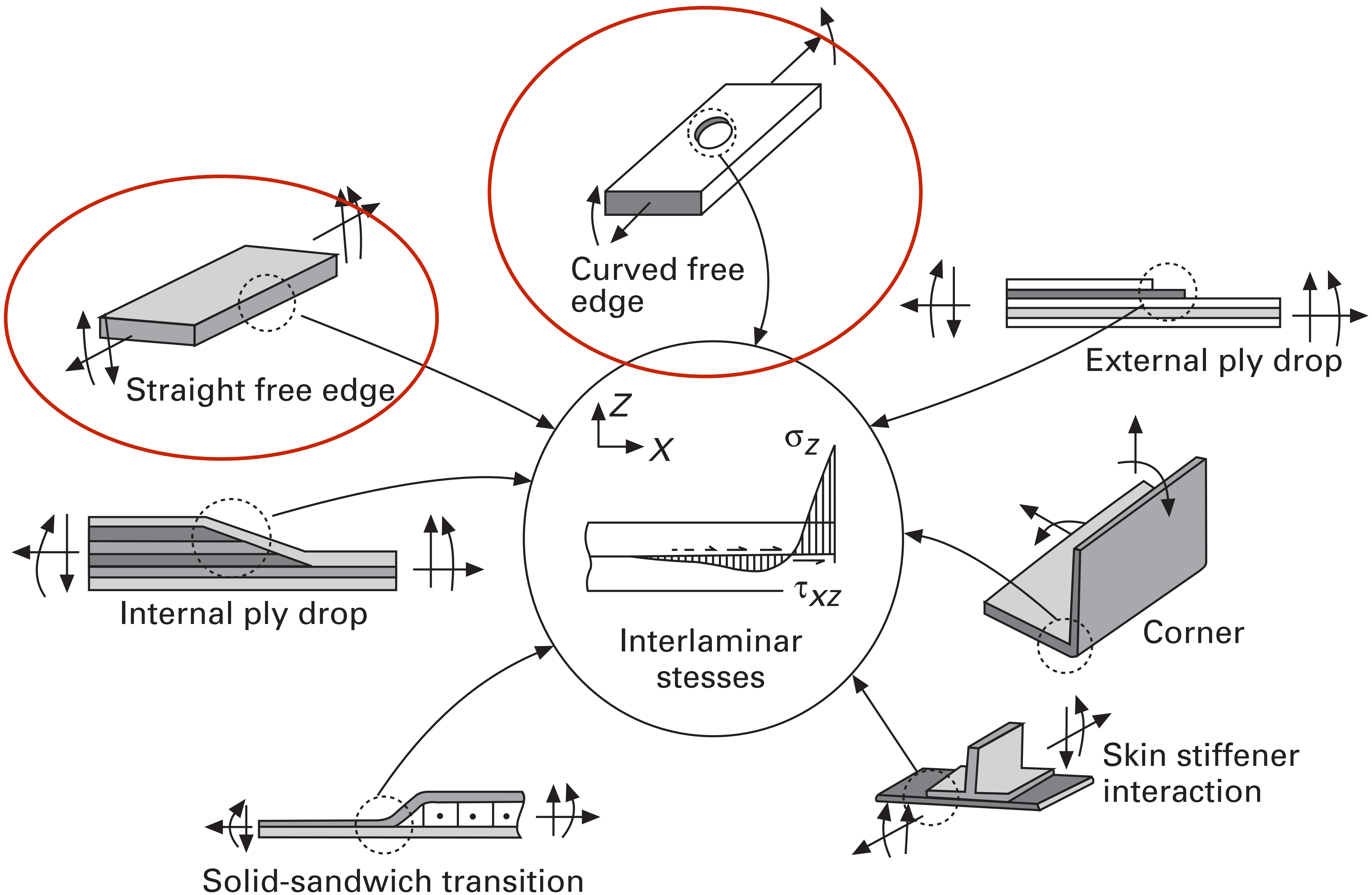
Guillaume Couégnat
couegnat@lcts.u-bordeaux.fr

Objectifs

- **Bords libres & contraintes hors-plan**
  - Effet Poisson 0/90
  - Cisaillement ±45
- **Modèle de zone cohésive**

Origines des contraintes interlaminaires

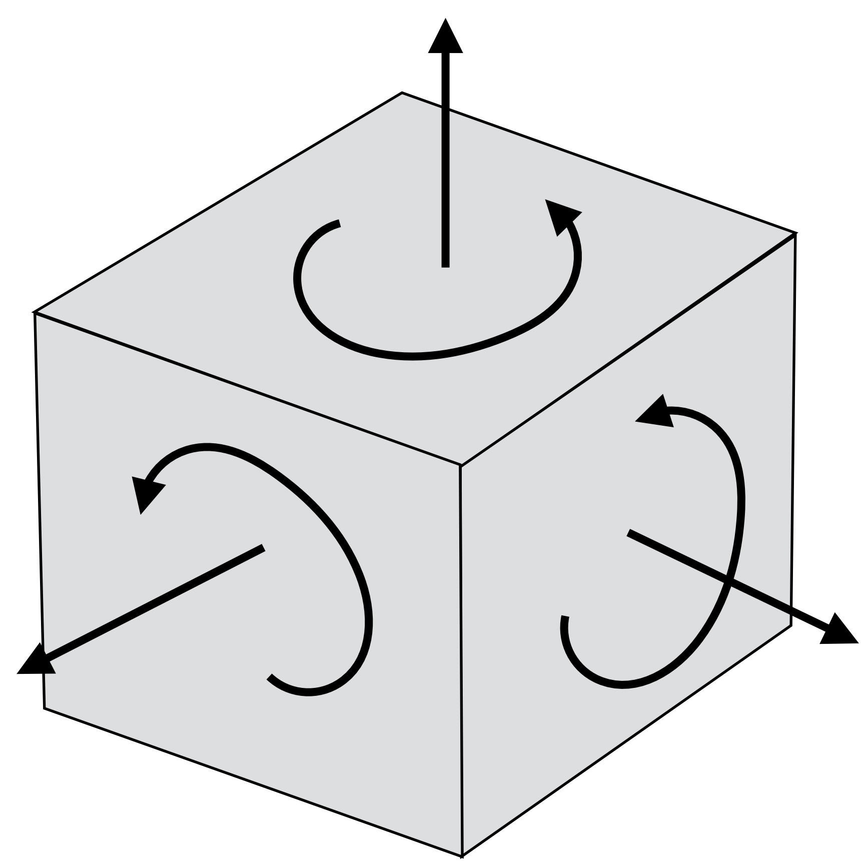
- Singularités géométriques et matériau
- Bords libres



[Sridharan08]

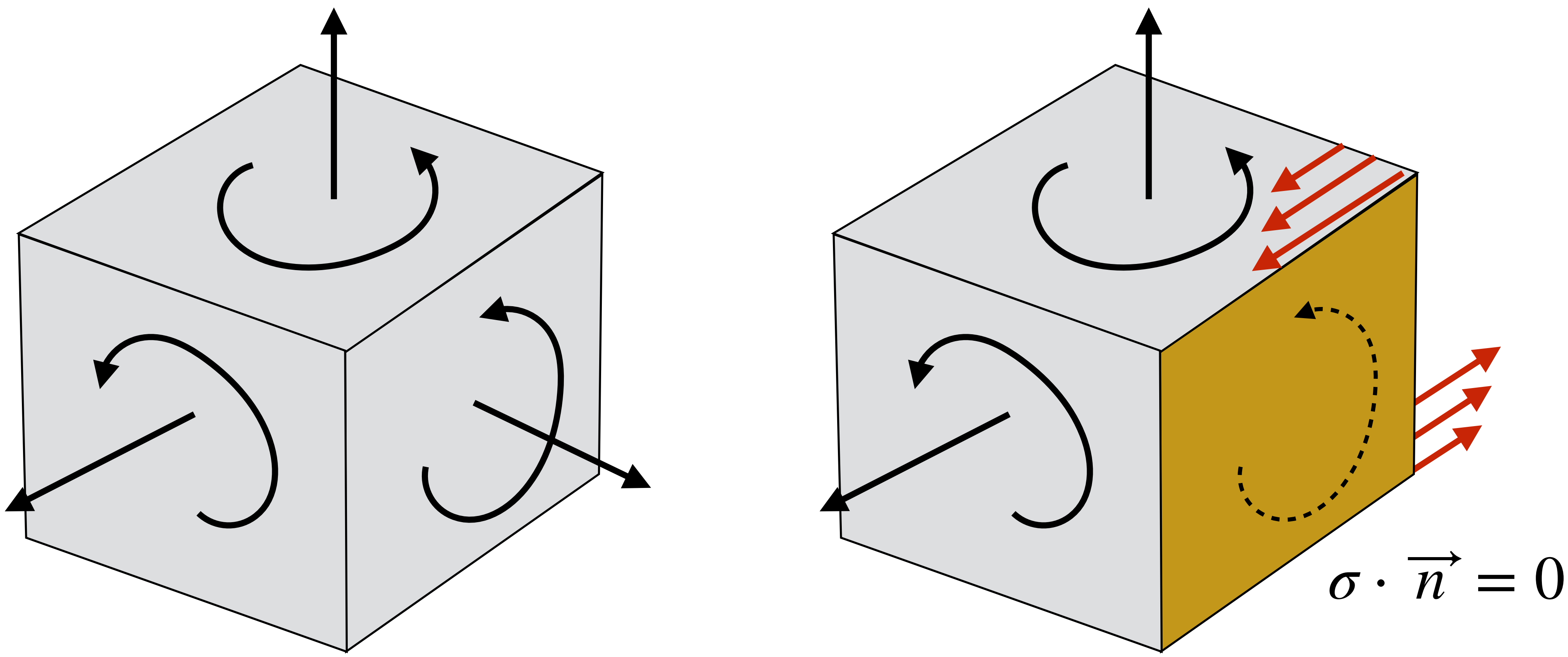
Théorie classique des stratifiés

- Equilibre statique d'un élément de volume
- Principe de Saint-Venant
- Milieu infini en *x-y*



Bords libres

- Eprouvettes, pièces de taille finie : bords physiques
- Mais aussi trou, entaille, fissure, …
- Contrainte normale nulle

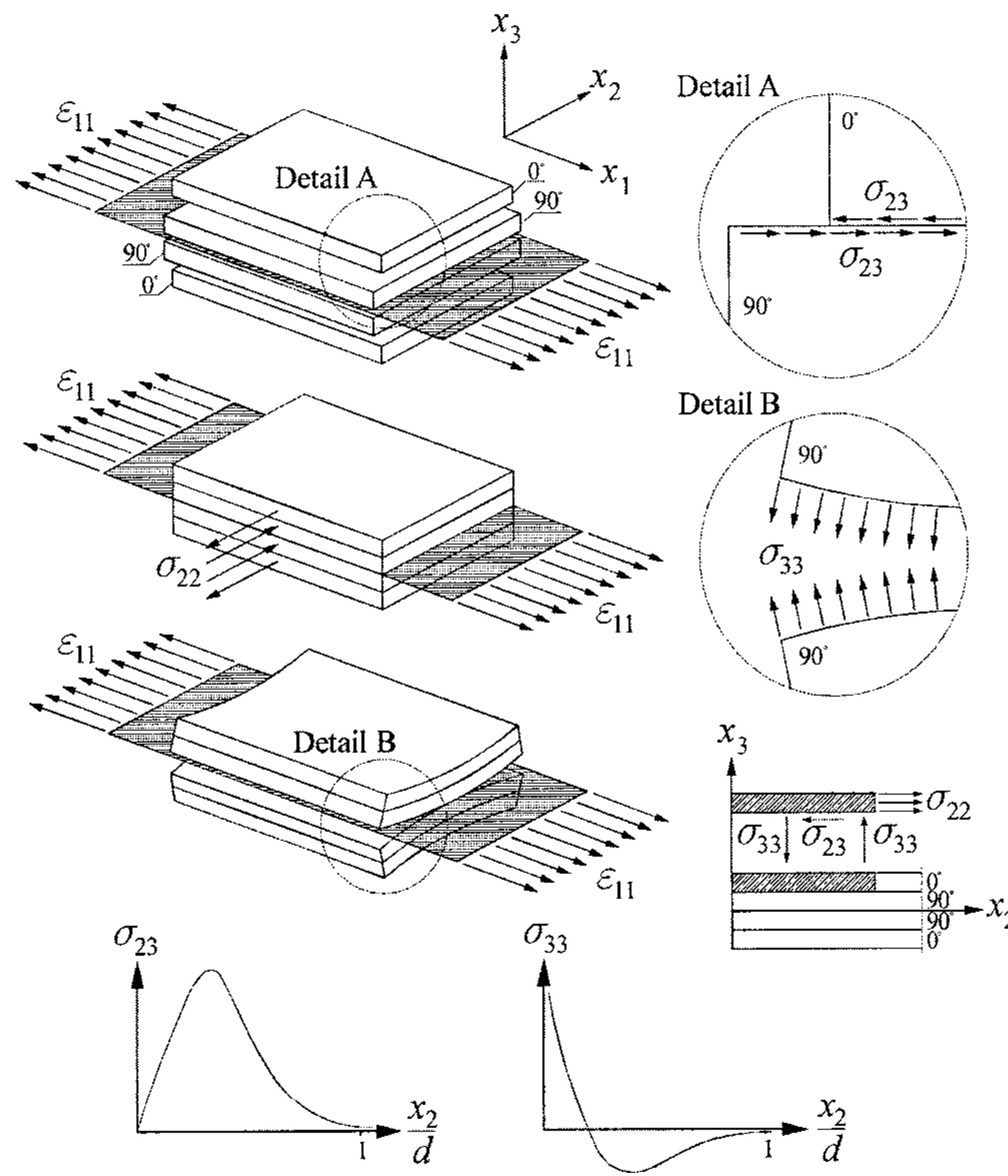


Modification du champ de contrainte local pour assurer l'équilibre

Interface plis 0/90

- Effet Poisson
- Différentiel de contraction en x_2
- Continuité du déplacement à l'interface

- **Contrainte hors-plan σ_{33}**
- **Contrainte de cisaillement inter-laminaire σ_{23}**

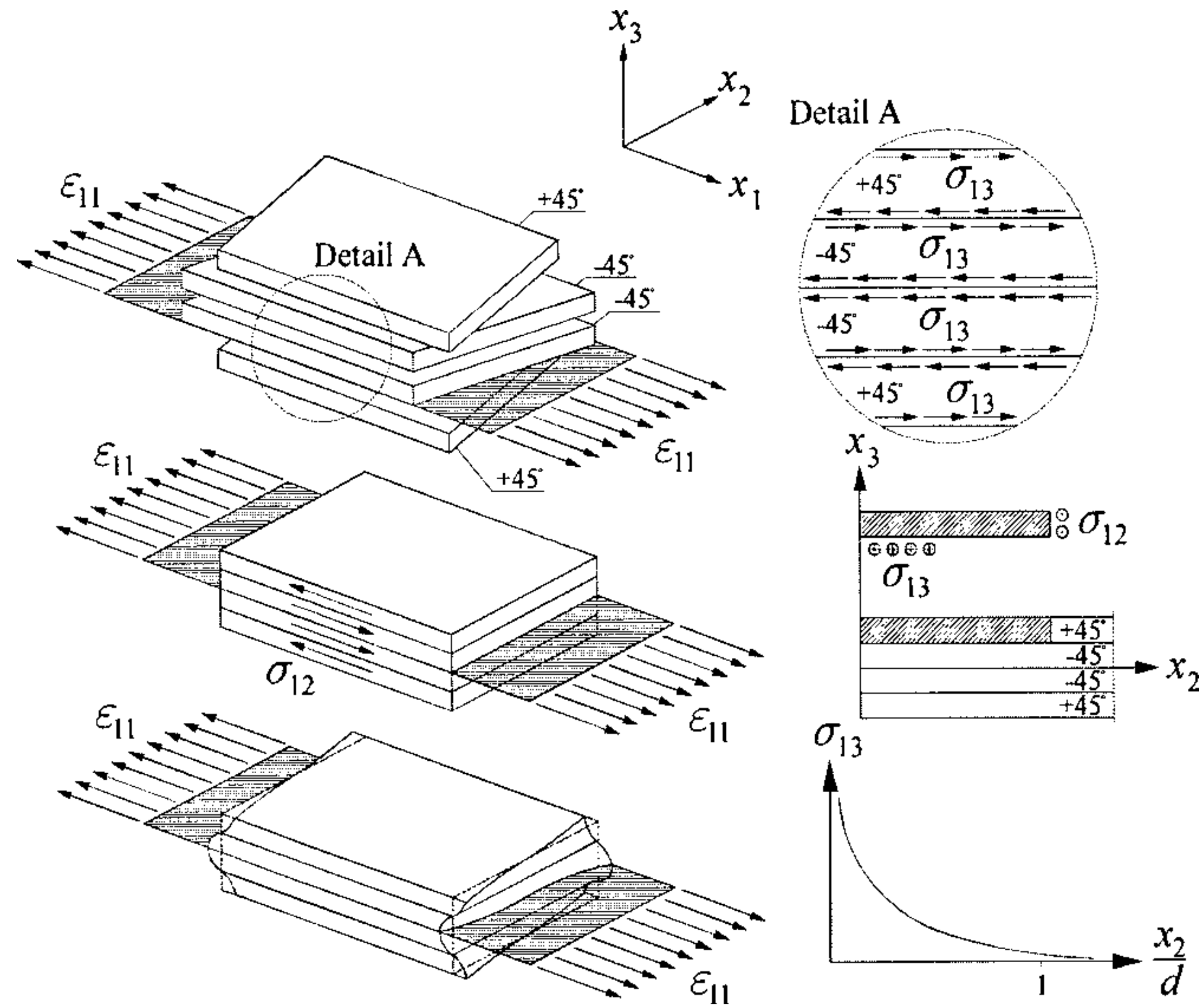


[Mittelstedt07]

Interface plis $\pm\theta$

- Les plis essaient de se réaligner avec le chargement
- Différentiel de cisaillement

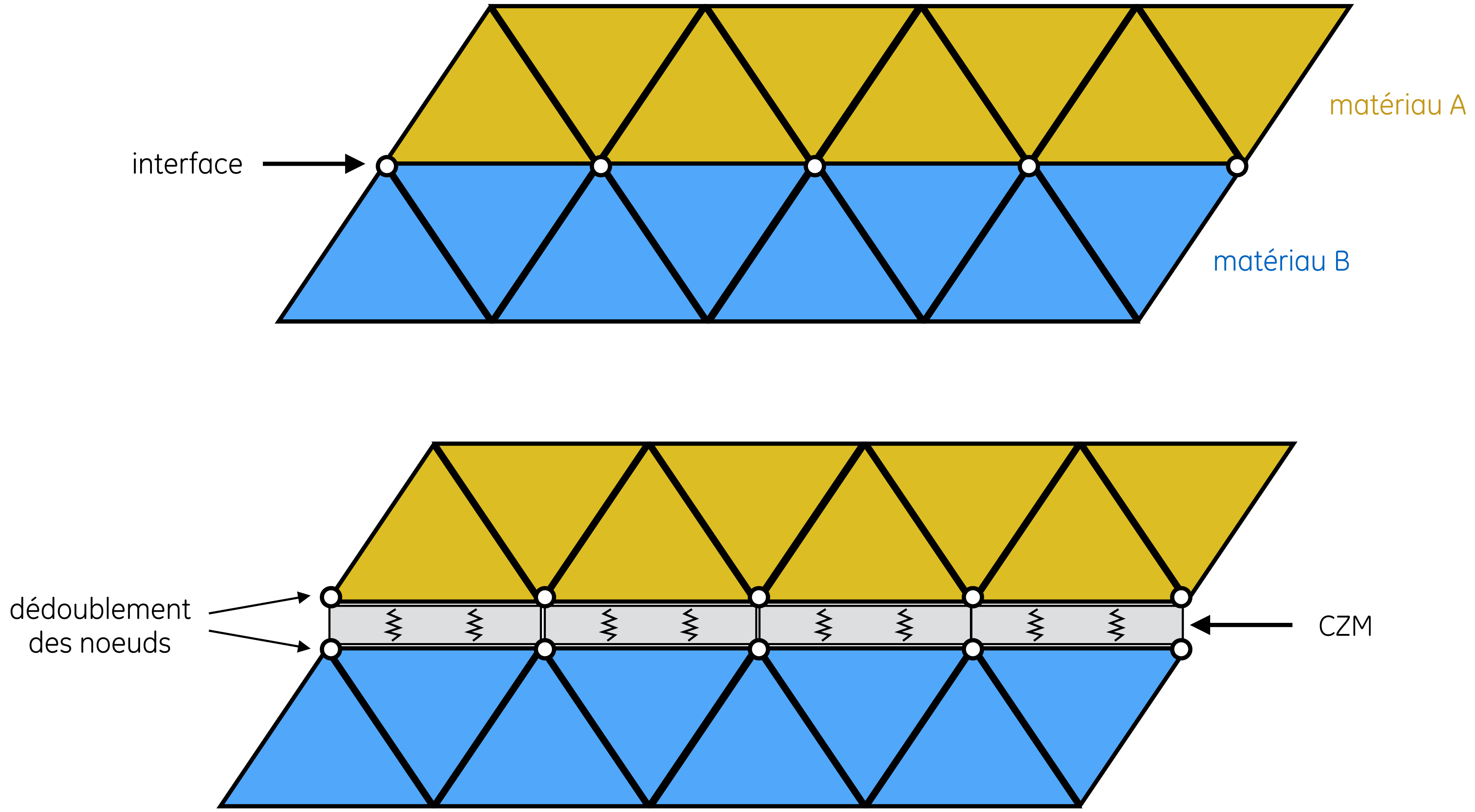
- **Contrainte de cisaillement inter-laminaire σ_{13}**



[Mittelstedt07]

Modèle de zone cohésive (CZM)

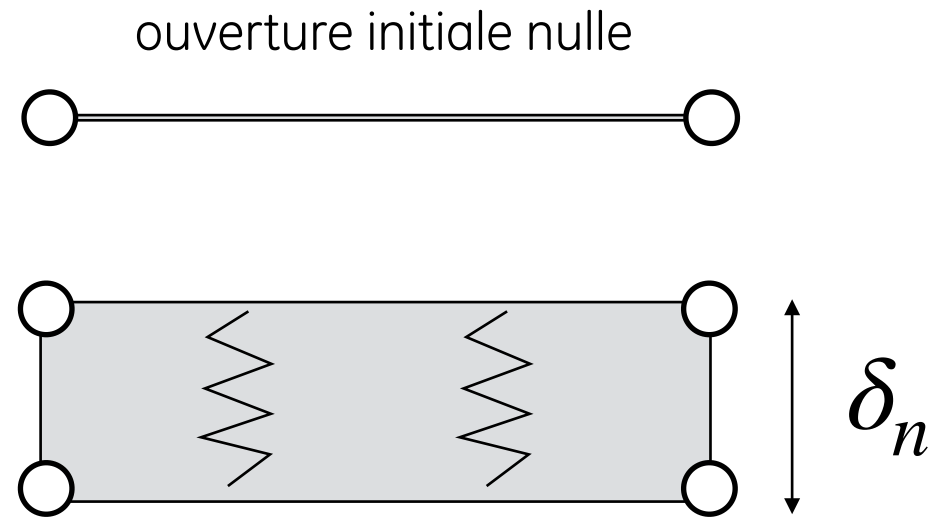
- Eléments d'interfaces

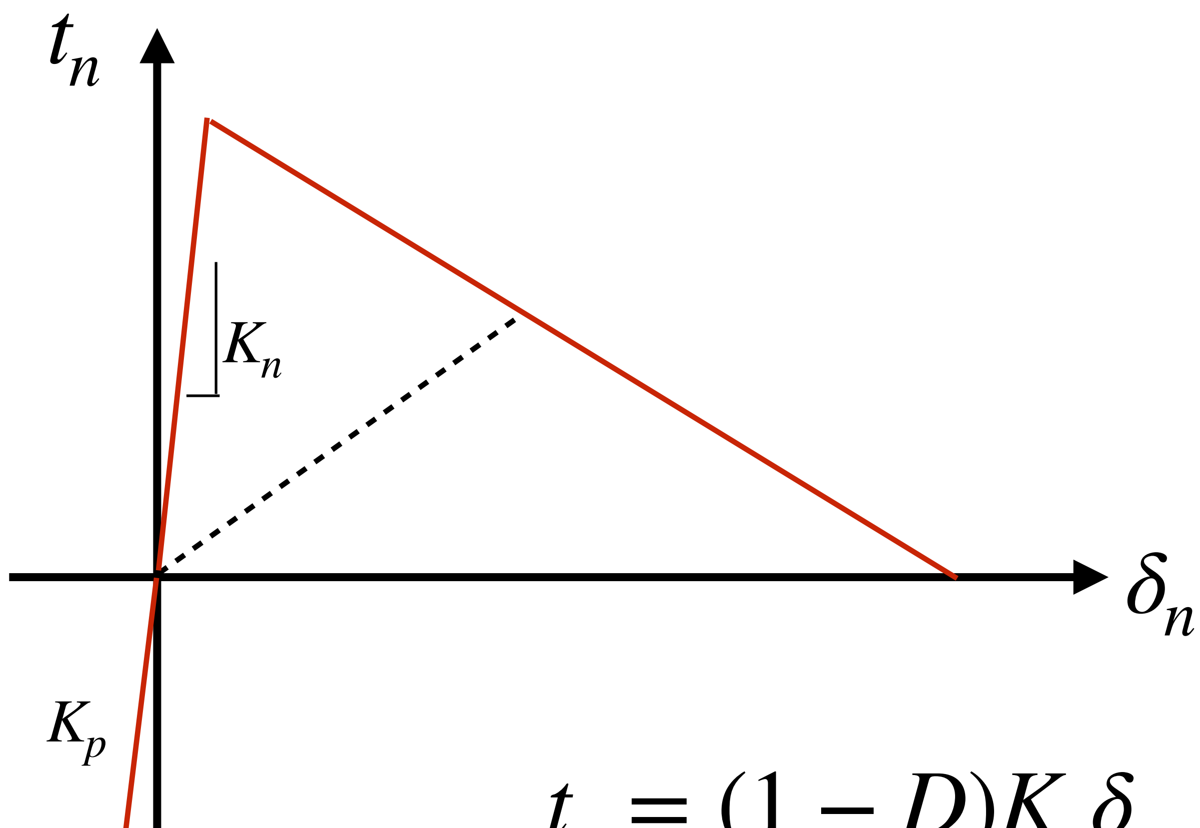


- CZM ~ "ressort volumique" endommageable

Modèle de zone cohésive

- Ouverture/fermeture normale

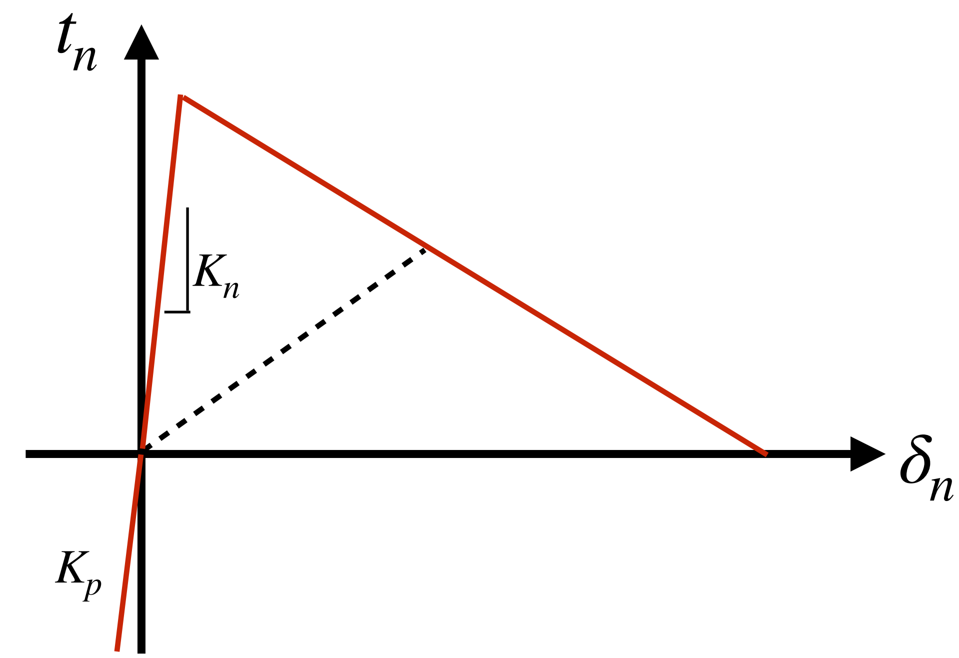




$$t_n = \begin{cases} (1 - D)K_n\delta_n & \delta_n > 0 \\ K_p\delta_n & \delta_n < 0 \end{cases}$$

Remarque : formulation en force/ouverture naturellement régularisée (≠ élément volumique)

Modèle de zone cohésive



Choix de la rigidité initiale K_n ?

$$K_n \propto E/h \quad h \to 0 \quad K_n \to \infty$$

Caractère unilatéral

$$\delta_n \geq 0 \implies K_p \to \infty$$

Si K_n trop faible : assouplissement de la structure
Si K_n trop élevé : problème précision machine (float/double précision finie)

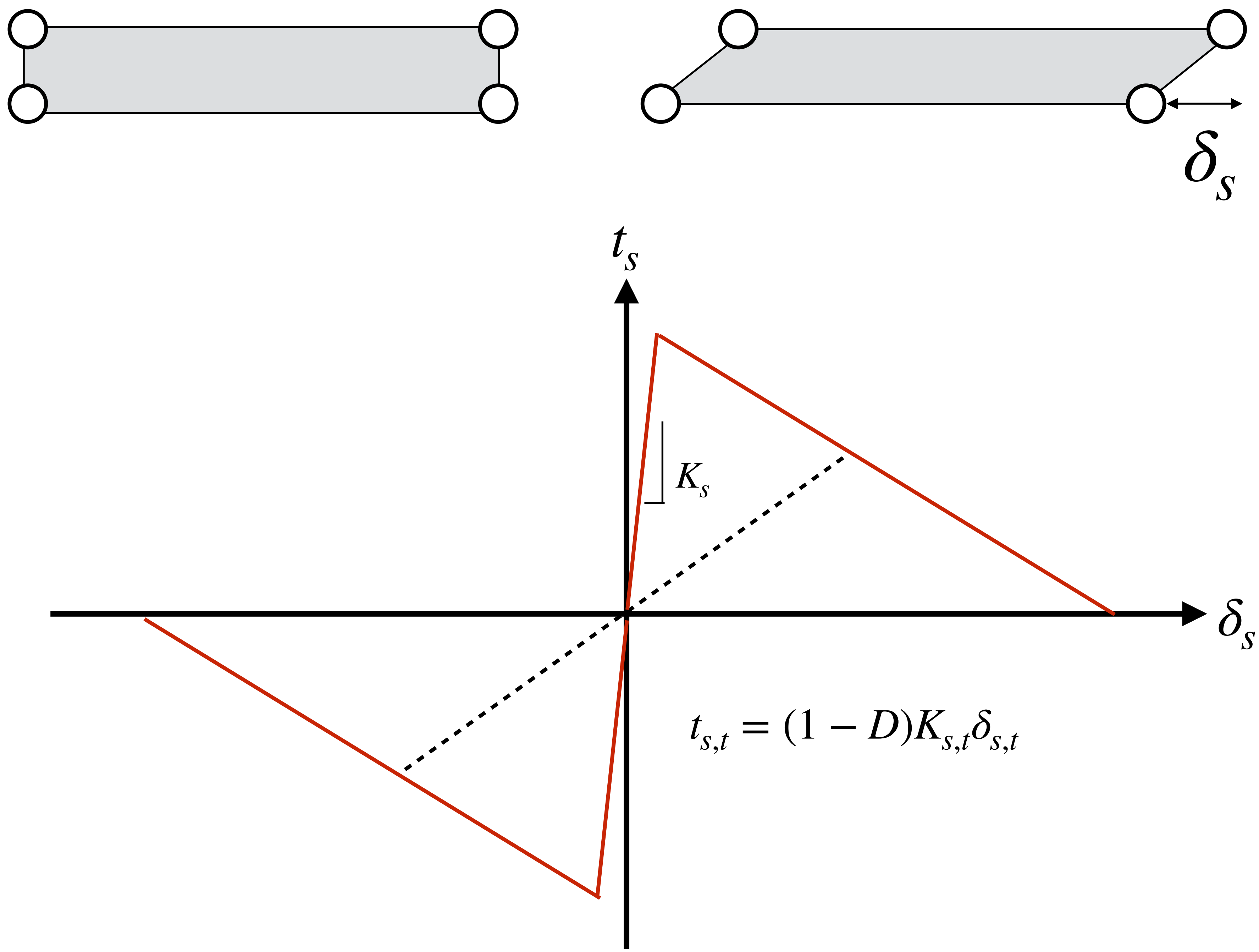
Numériquement, on se sait pas traiter (facilement) ∞

En pratique :

$$K_p = K_n > 10^3 - 10^4 K_{max}$$

Modèle de zone cohésive

- Cisaillement



Modèle de zone cohésive

- Formulation couplée/découplée

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix}$$

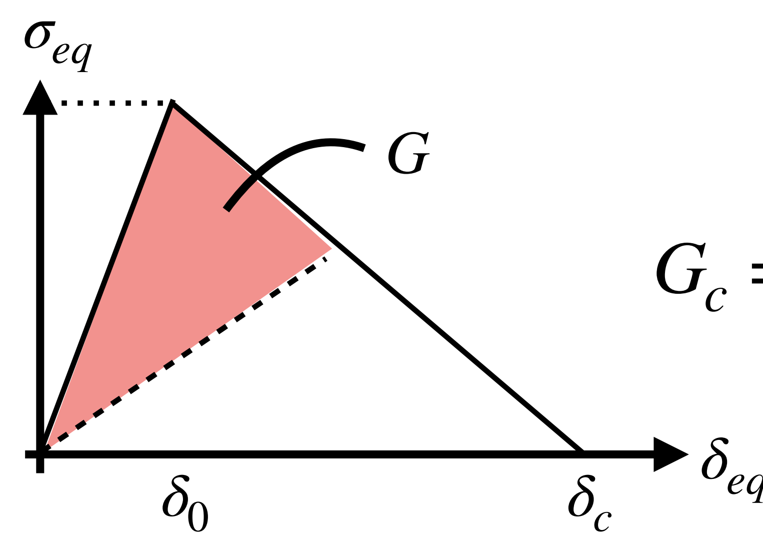
Modèle de zone cohésive

- Critère d'amorçage

$$F(t) = \left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 \leq 1$$

- Critère de propagation

$$\delta_{eq} = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2}$$



$$G_c = f(G_c^n, G_c^s)$$

- Effet de l'endommagement

$$t_n = \begin{cases} (1 - D)K_n\delta_n & \delta_n > 0 \\ K_n\delta_n & \delta_n < 0 \end{cases}$$

$$t_{s,t} = (1 - D)K_{s,t}\delta_{s,t}$$