



# Matériaux et structures composites

Endommagement intralaminaire

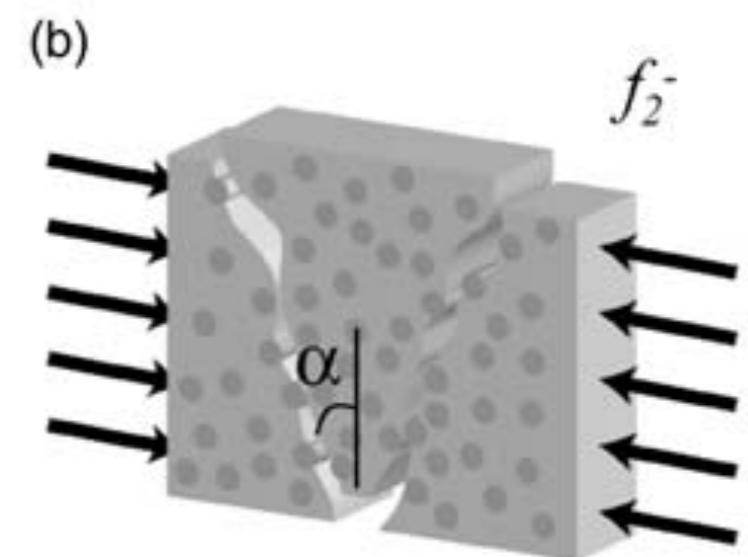
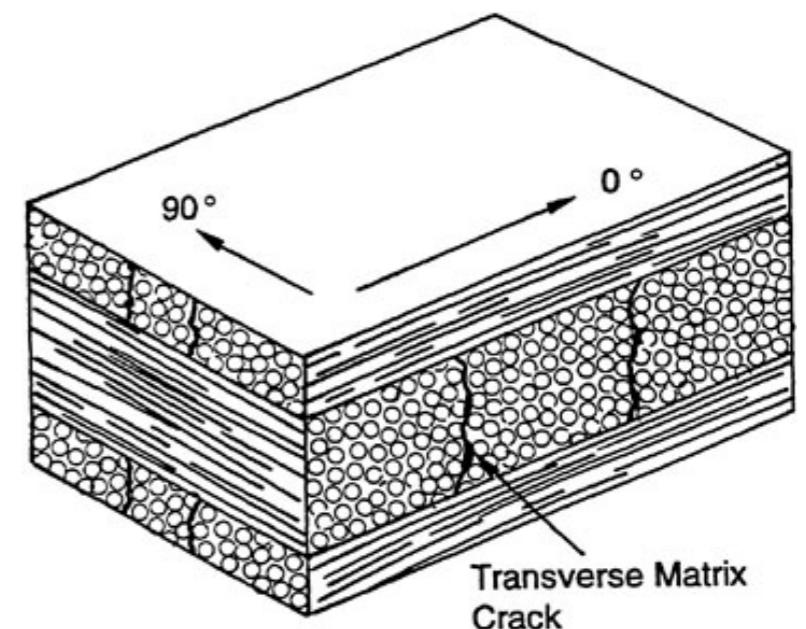
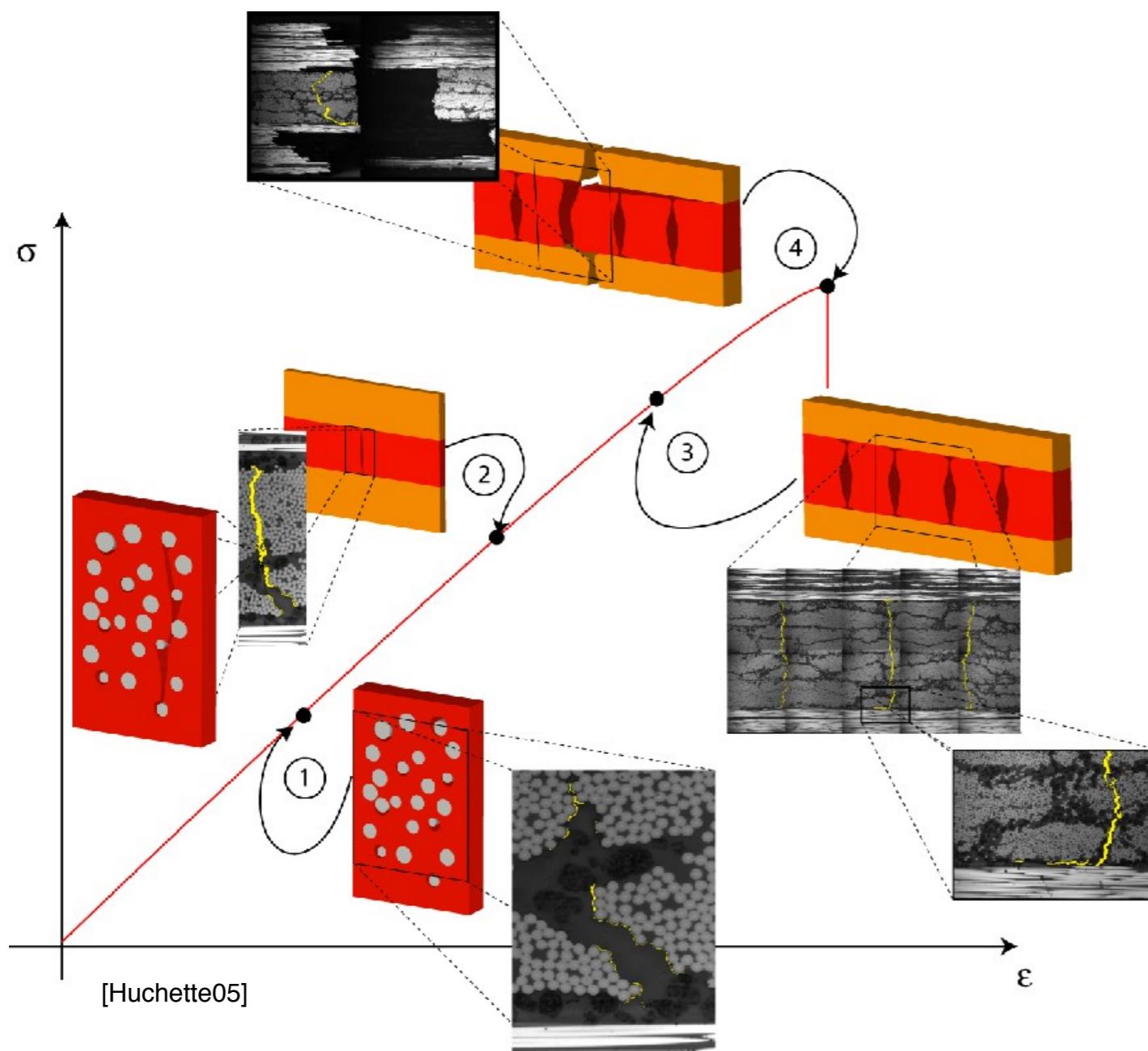
**Guillaume Couégnat**  
[couegnat@lcts.u-bordeaux.fr](mailto:couegnat@lcts.u-bordeaux.fr)

# Objectifs

- Phénoménologie de l'endommagement des stratifiés
- Ingrédients d'un modèle d'endommagement
  - Critère d'amorçage
  - Critère de propagation
  - Effet de l'endommagement
- Modèle de Hashin

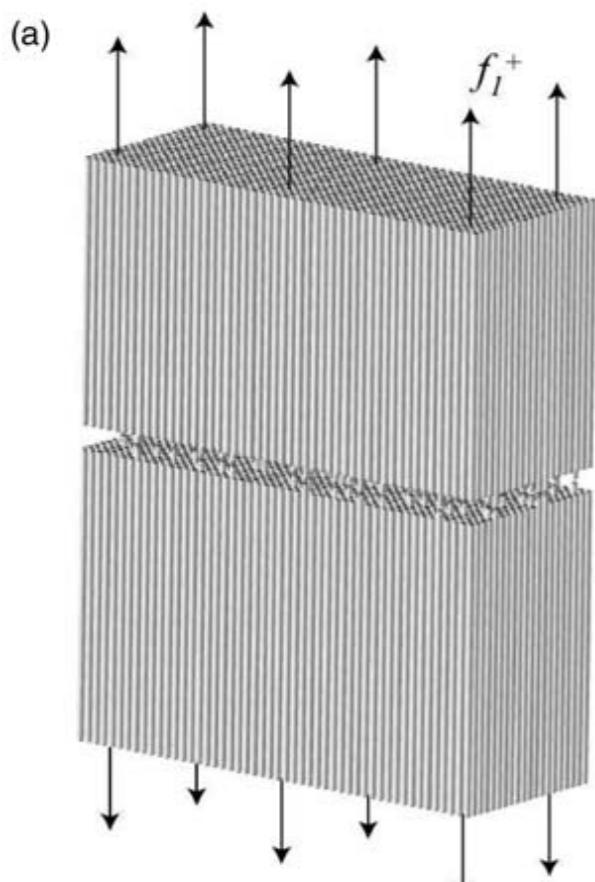
# Endommagement des stratifiés

- Plis à 90° : Décohésion fibres/matrice ; fissures transverses (+ micro-délaminage)

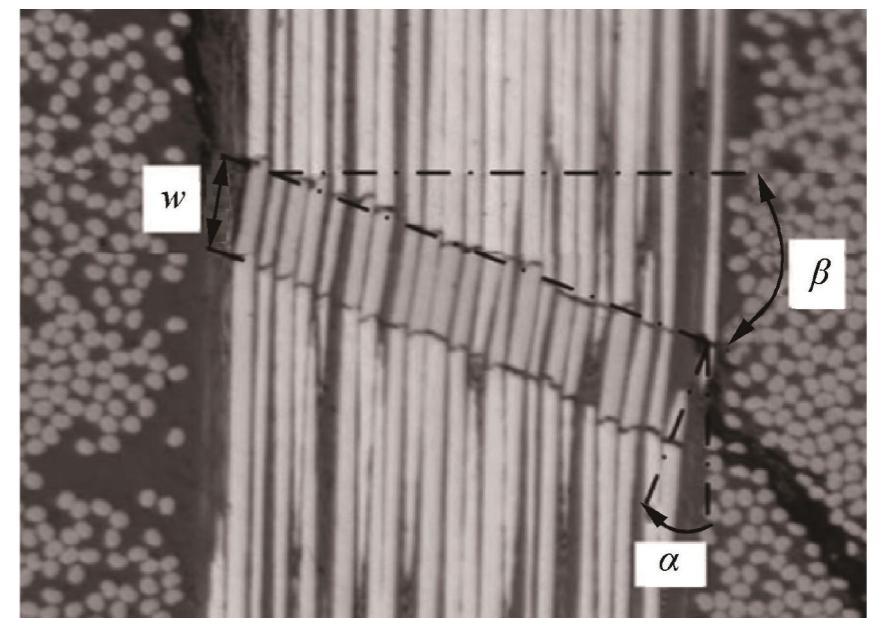
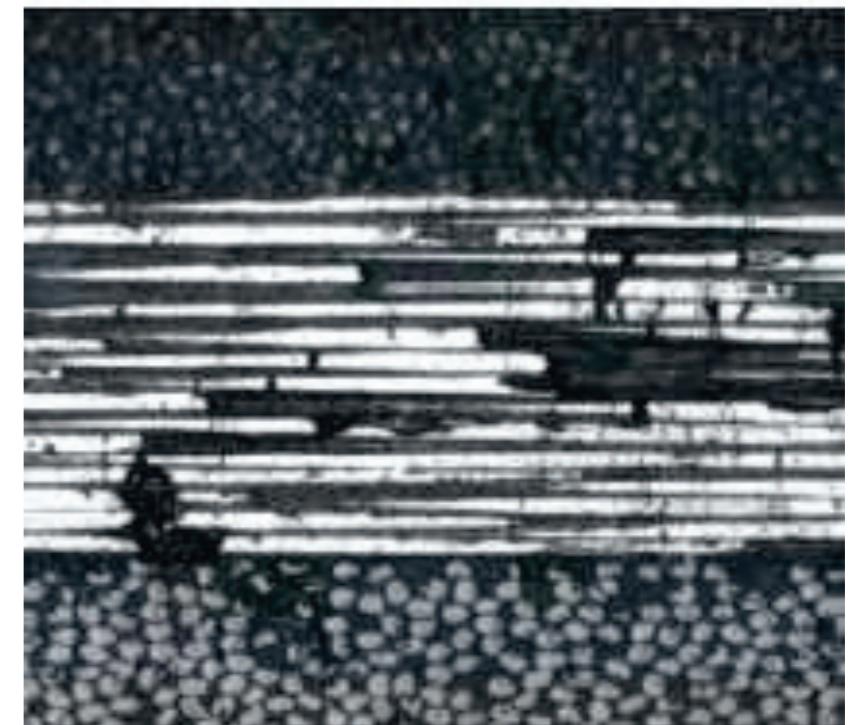


# Endommagement des stratifiés

- Plis à  $0^\circ$  : Rupture de fibres (traction) ; micro-flambement (compression)

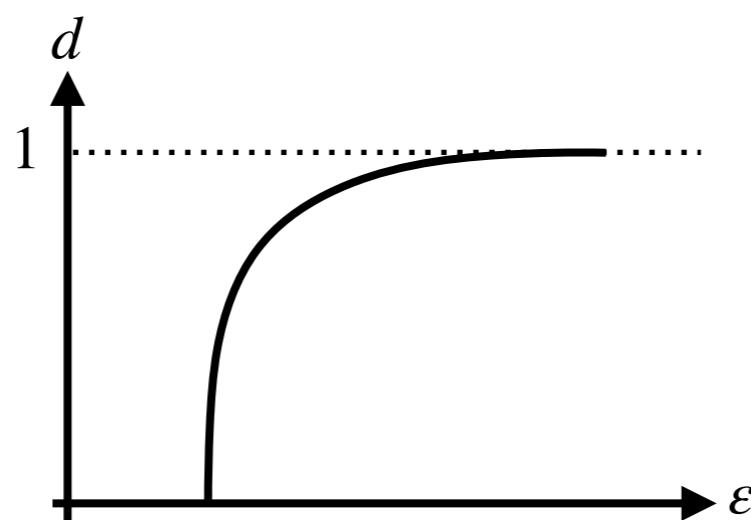
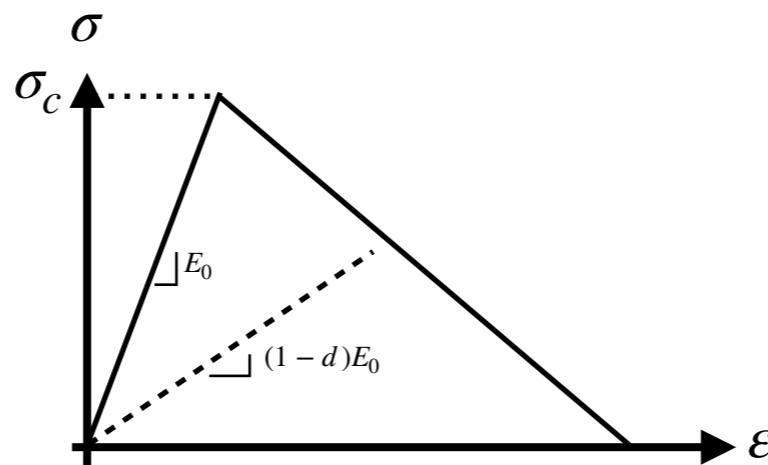


[Laurin13]



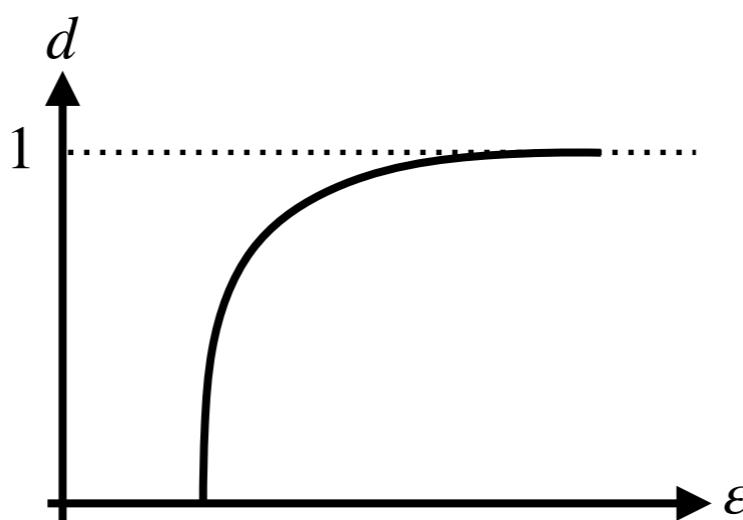
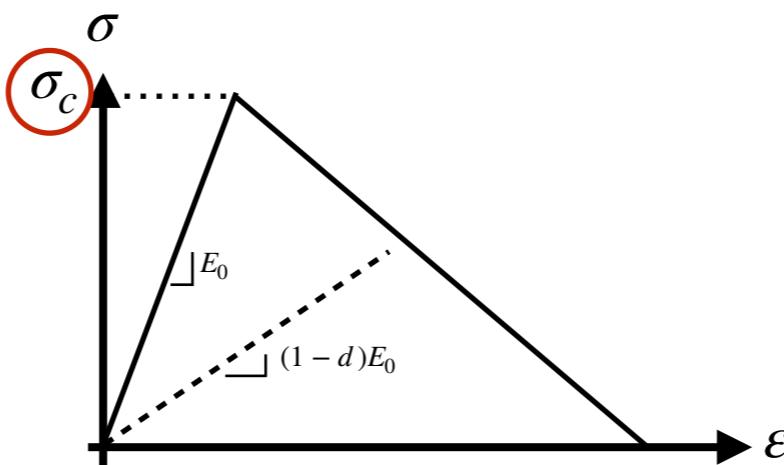
# Modèle d'endommagement

- Approche phénoménologique
- “Mesure” endommagement via perte de rigidité :  $E(d) = (1 - d)E_0$



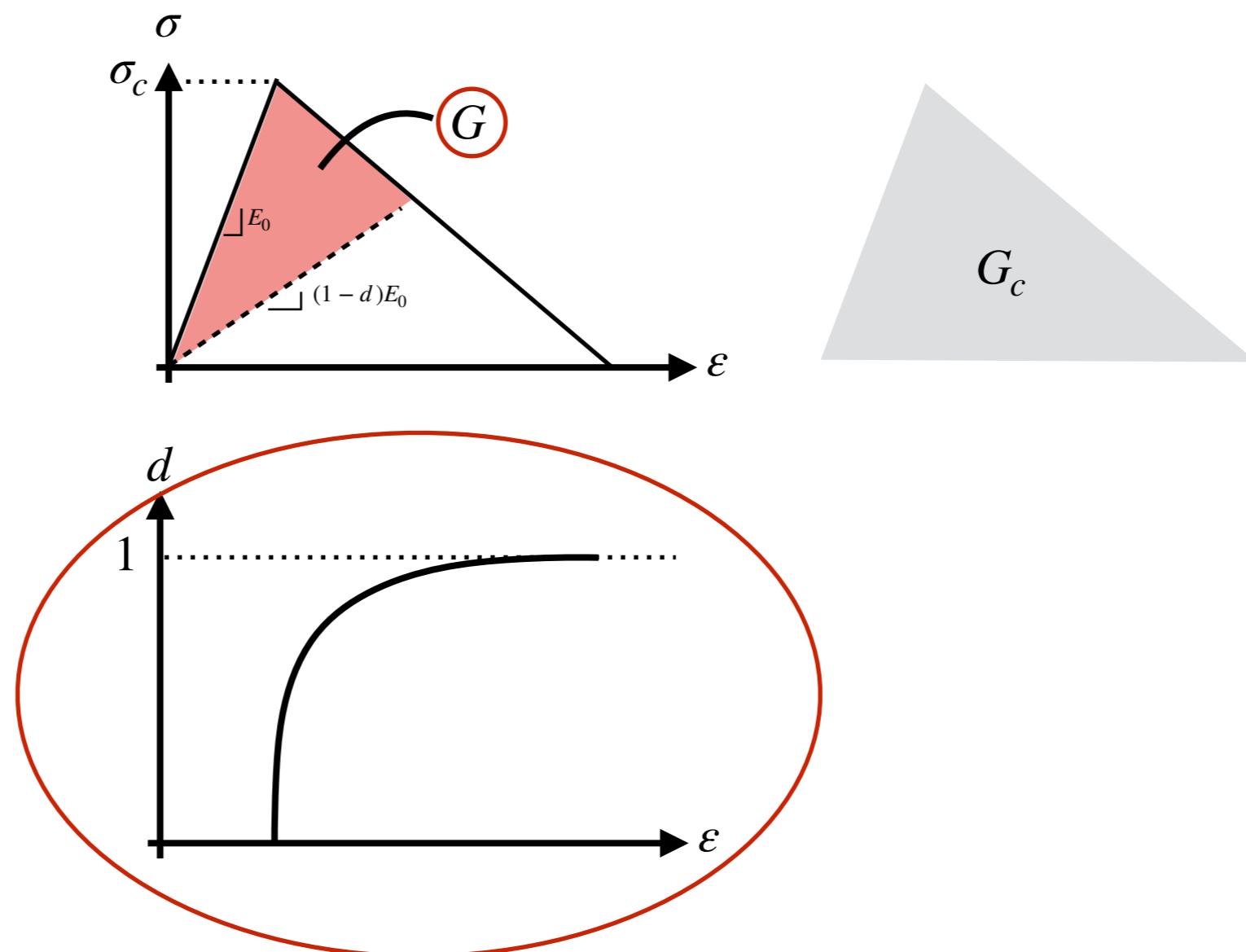
# Modèle d'endommagement

- 1. Critère d'amorçage
  - A partir de "quand" l'endommagement est actif ?  $F(\sigma) \geq 1$



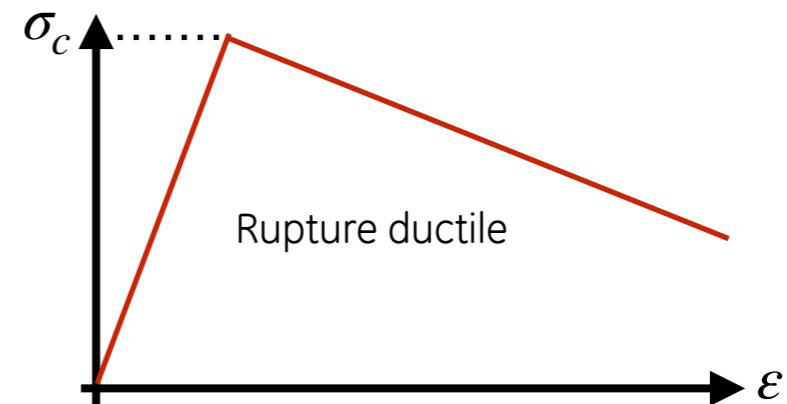
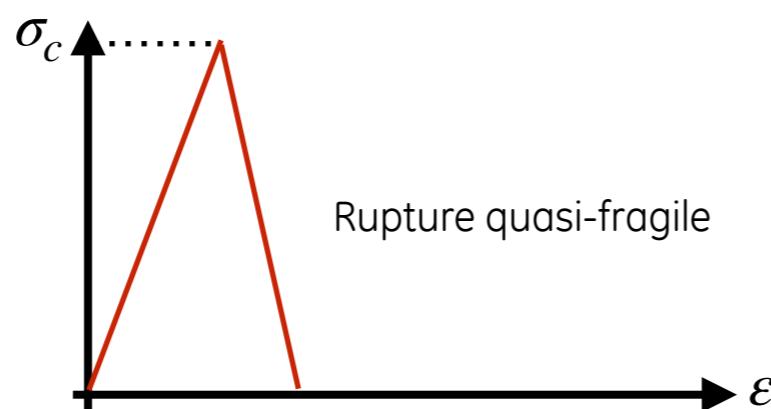
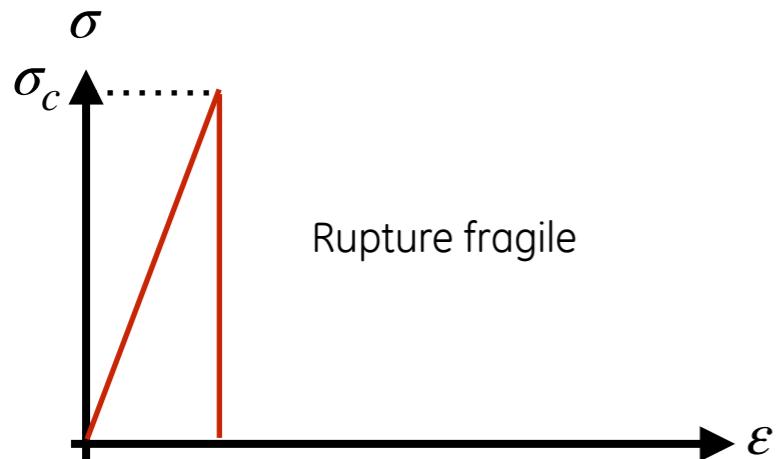
# Modèle d'endommagement

- 2. Critère de propagation
  - Comment se développe l'endommagement en fonction du chargement (jusqu'à la rupture finale) :  $d = f(G/G_c)$



# Modèle d'endommagement

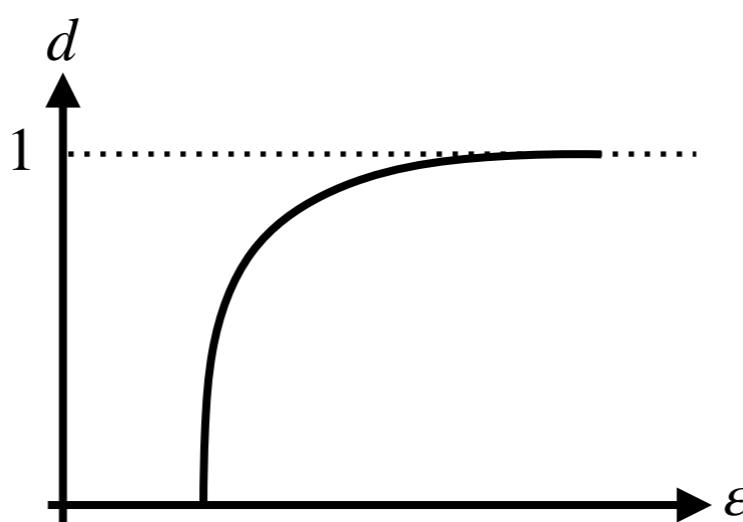
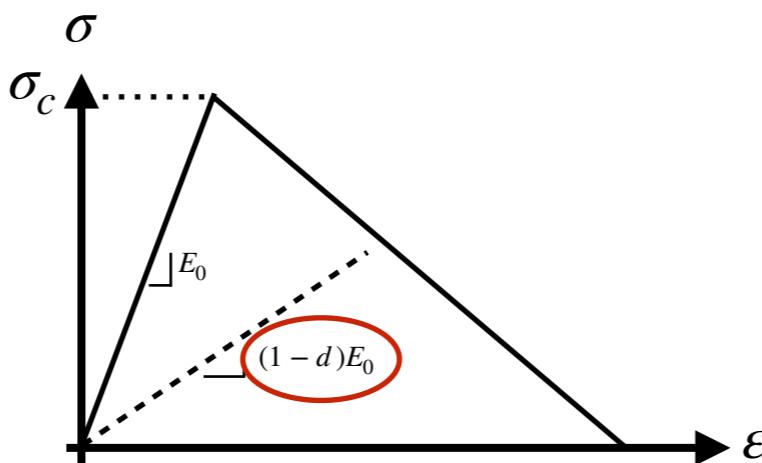
- Rupture fragile vs. rupture ductile



# Modèle d'endommagement

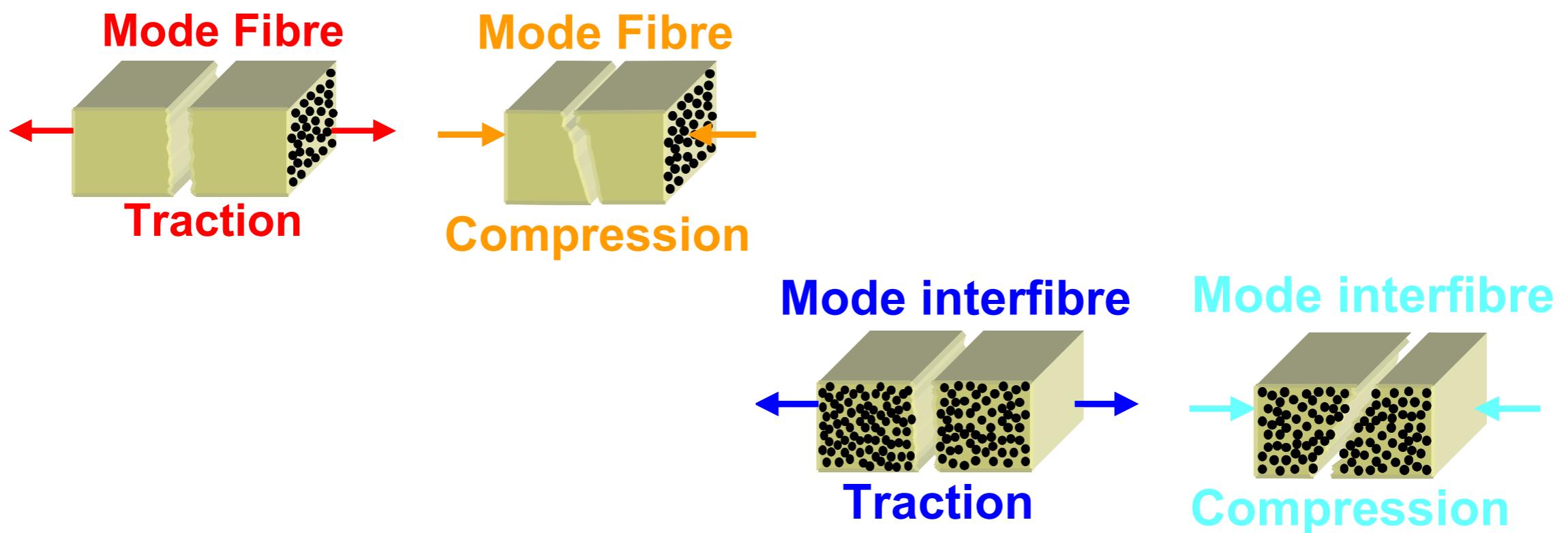
- 3. Effet de l'endommagement

- Quelles sont les propriétés résiduelles du matériau pour un état d'endommagement donné ?  $E = f(d)$



# Modèle de Hashin

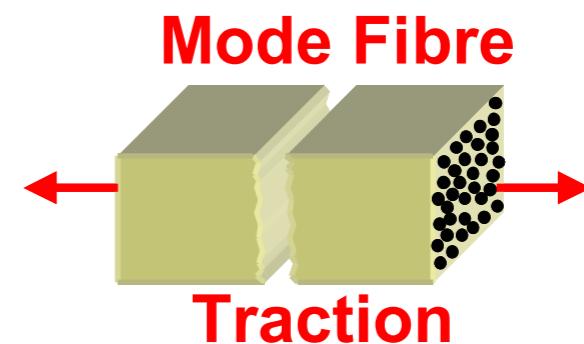
- Modèle endommagement pour composites fibres longues
- Hypothèse **contraintes planes**
- **4 modes** d'endommagement
  - Modes "fibre" en traction (FT) et compression (FC)
  - Modes "interfibre" en traction (MT) et compression (MC)



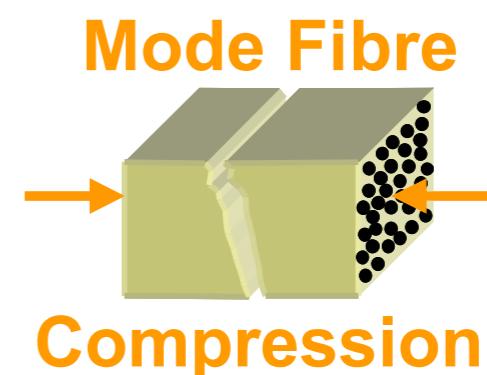
# Modèle de Hashin

- Pour chacun des modes
  - **Critère d'amorçage**, critère quadratique en **contraintes**  $F(\sigma)$
  - $F < 1$  : endommagement inactif,  $F \geq 1$  endommagement actif
- Exemple, modes FT :

$$F_{FT} = \left( \frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\sigma_{12}}{S_L} \right)^2$$



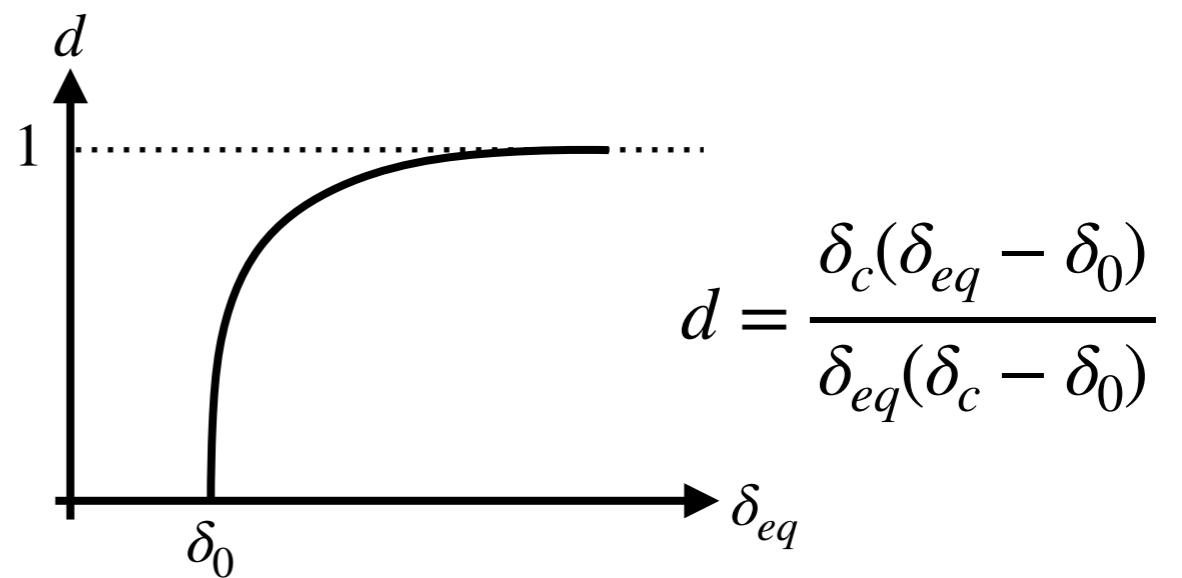
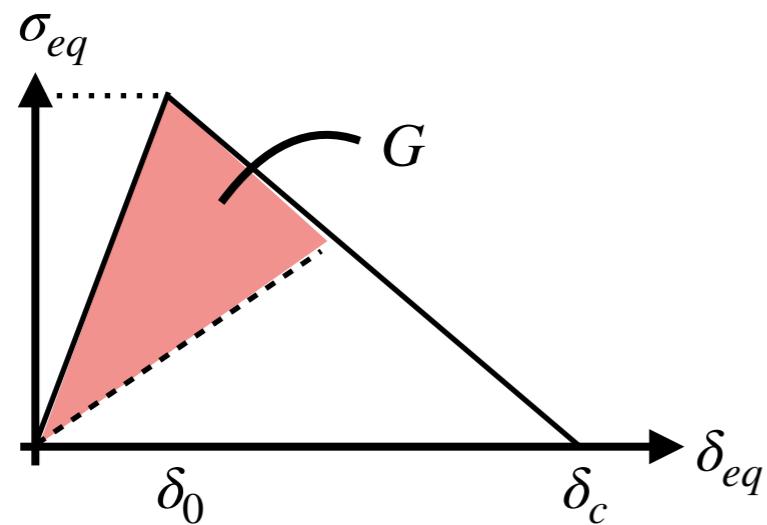
$$F_{FC} = \left( \frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2$$



Paramètres matériaux :  $X_T, X_C, Y_T, Y_C, S_L, S_T$

# Modèle de Hashin

- Critère de **propagation** en énergie dissipée :  $d = f(G/G_c)$



Paramètres matériaux :  $G_c^{FT}, G_c^{FC}, G_c^{MT}, G_c^{MC},$

# Modèle de Hashin

- **Energie** (grandeur extensive) : **longueur interne** “cachée”
  - *une surface 2x plus grande doit dissiper 2x d'énergie à rupture*
- Mais, formulation en contrainte/déformation : pas d'effet d'échelle, dissipe toujours la même énergie quelque soit la taille du modèle...

- Introduction d'une **longueur de régularisation**  $L_c$

$$\delta_{eq}^{FT} = L_c \sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}$$

- Modèle de Hashin :  $L_c$  = **taille élément**
- Résultat **indépendant de la taille** caractéristique du maillage (*mais il existe d'autres pathologies liées au maillage : orientation, localisation, etc.*)

# Modèle de Hashin

- Effet de l'endommagement
  - 4 variables d'endommagement scalaires :  $d_{FT}, d_{FC}, d_{MT}, d_{MC}$

$$\sigma = C_D : \varepsilon$$

$$C_D = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1 - d_F)E_1 & (1 - d_F)(1 - d_M)\nu_{21}E_1 & 0 \\ (1 - d_F)(1 - d_M)\nu_{12}E_2 & (1 - d_M)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & D(1 - d_S)G_{12} \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{ll} d_F = d_{FT} & \sigma_{11} > 0 \\ d_{FC} & \sigma_{11} < 0 \end{array} \quad \begin{array}{ll} d_M = d_{MT} & \sigma_{22} > 0 \\ d_{MC} & \sigma_{22} < 0 \end{array}$$

$$d_S = 1 - (1 - d_{FT})(1 - d_{FC})(1 - d_{MT})(1 - d_{MC})$$

$$D = 1 - (1 - d_F)(1 - d_M)\nu_{12}\nu_{21}$$