



Matériaux et structures composites

Endommagement intralaminaire

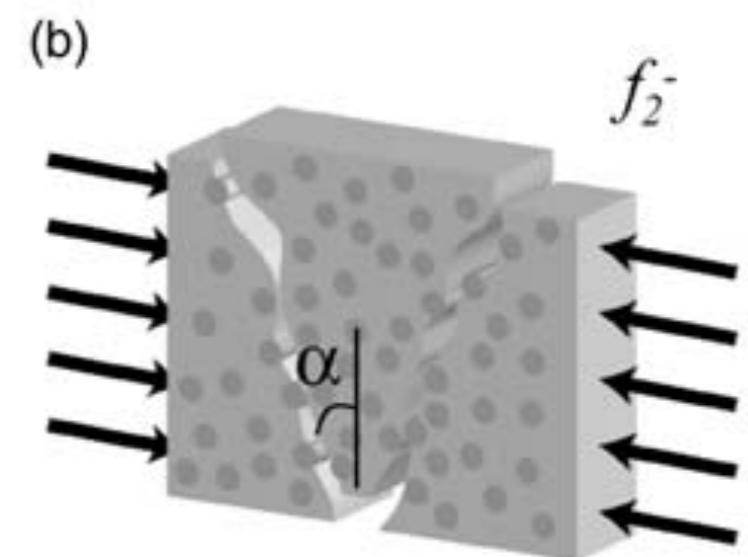
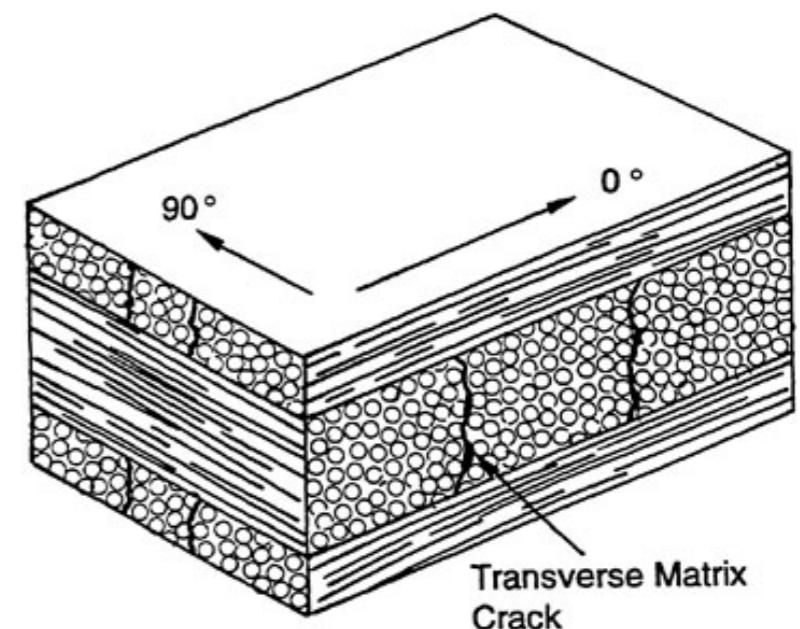
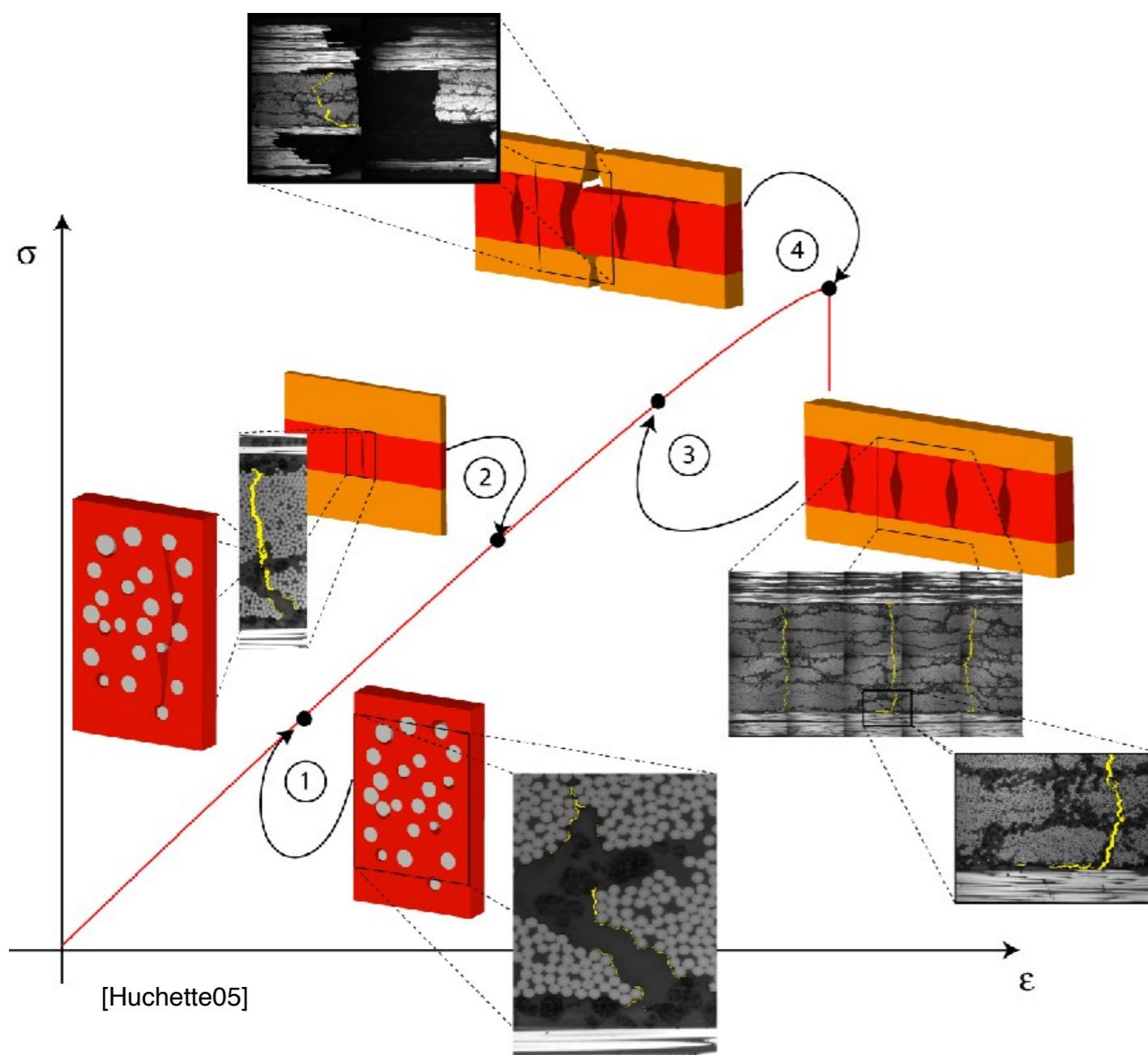
Guillaume Couégnat
couegnat@lcts.u-bordeaux.fr

Objectifs

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

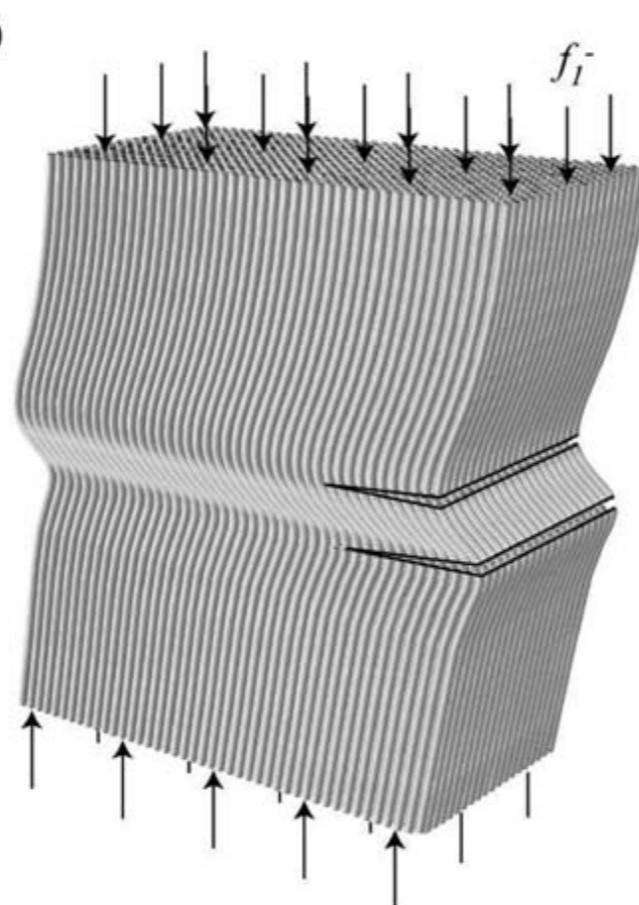
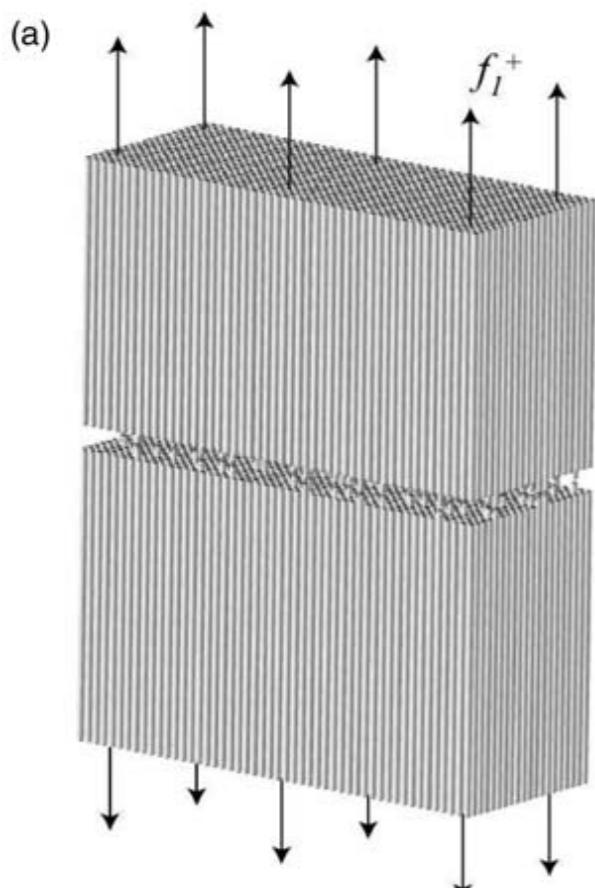
Endommagement des stratifiés

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

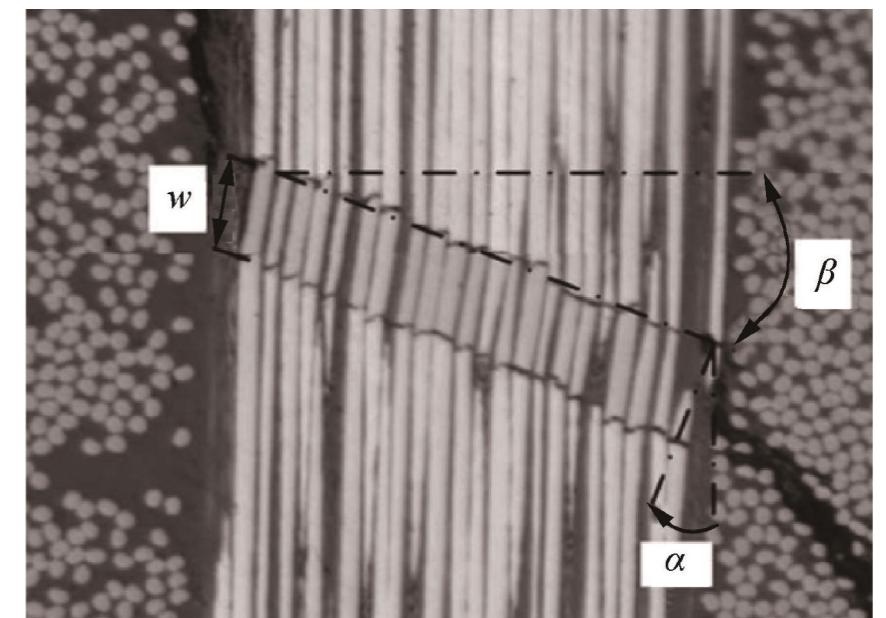
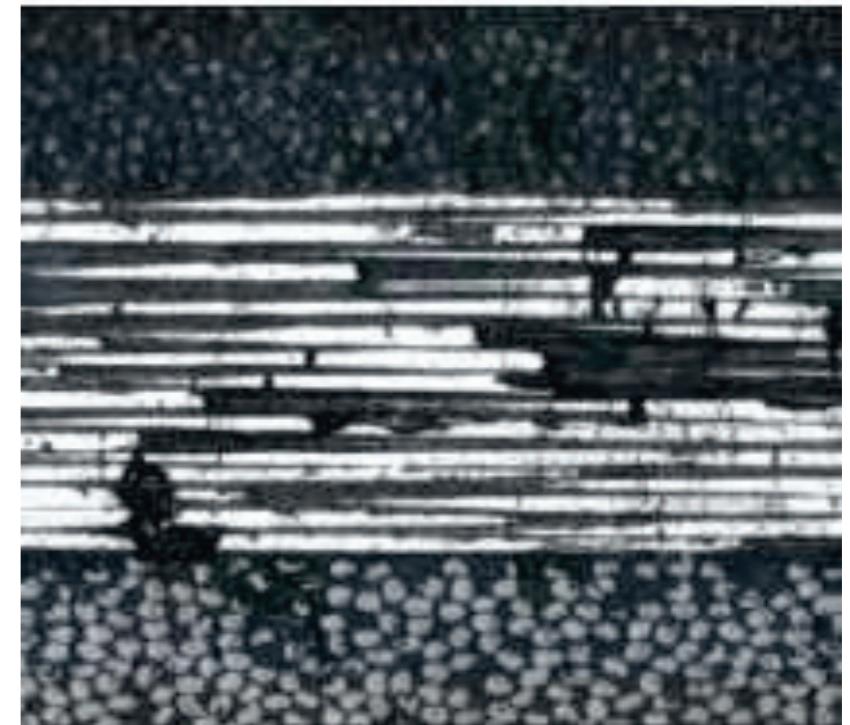


Endommagement des stratifiés

- Plis à 0° : Rupture de fibres (traction) ; micro-flambement (compression)

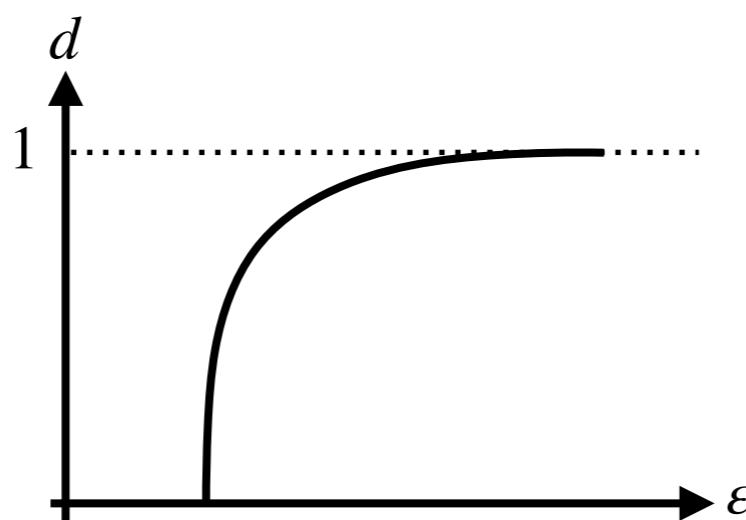
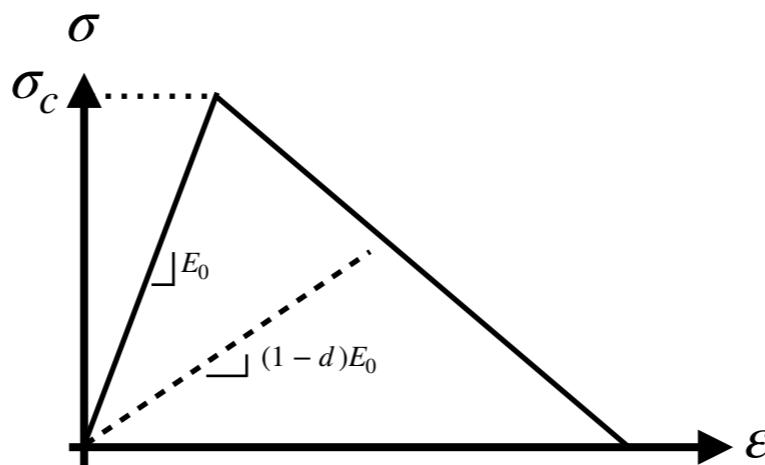


[Laurin13]



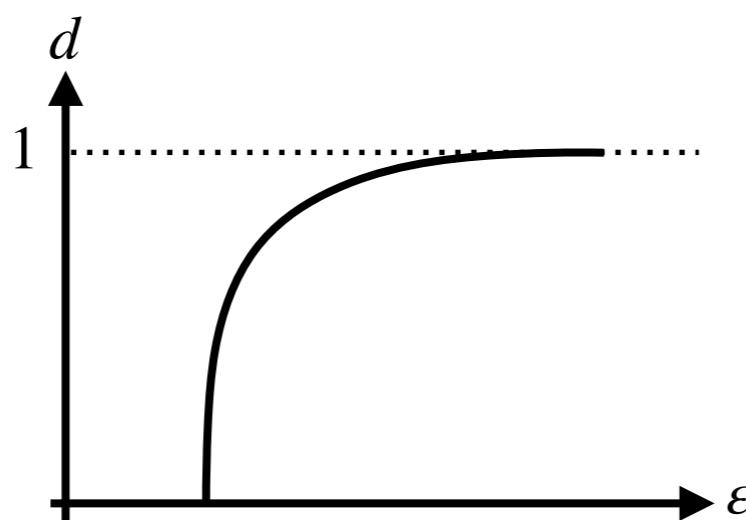
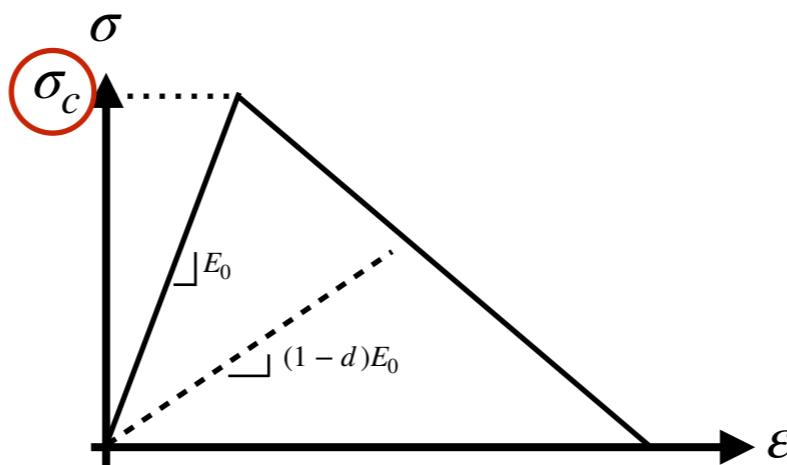
Modèle d'endommagement

- Approche phénoménologique
- “Mesure” de l'endommagement d via son effet (p. ex. perte de rigidité $C(d)$)



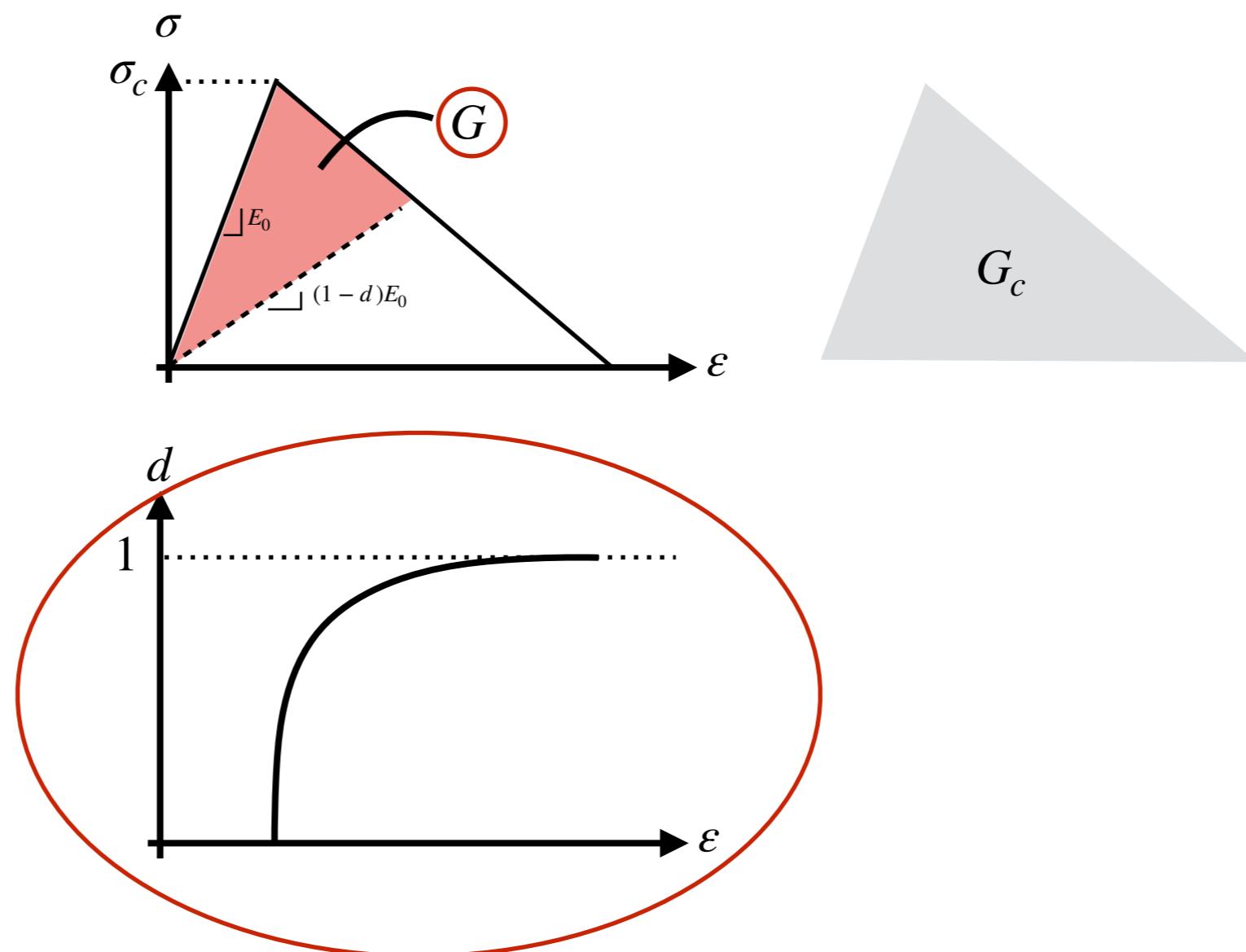
Modèle d'endommagement

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



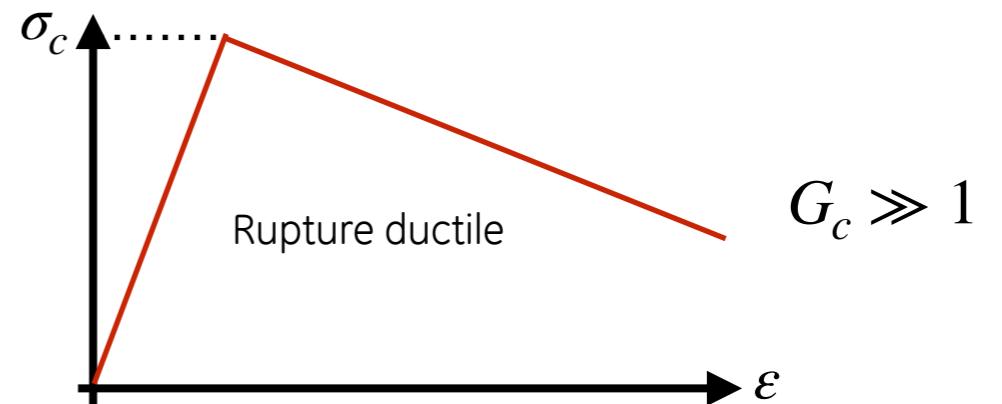
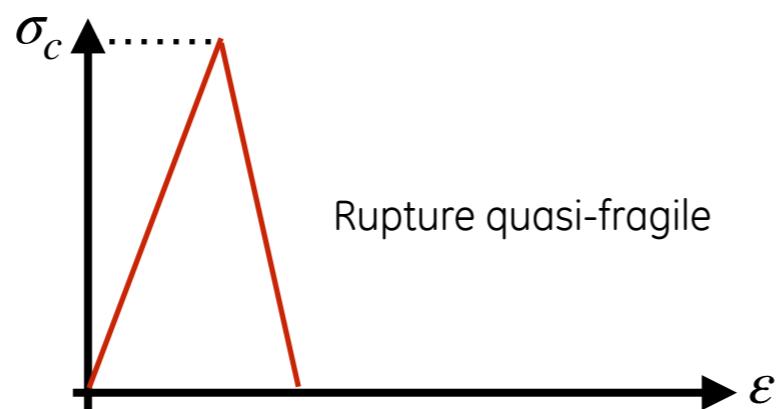
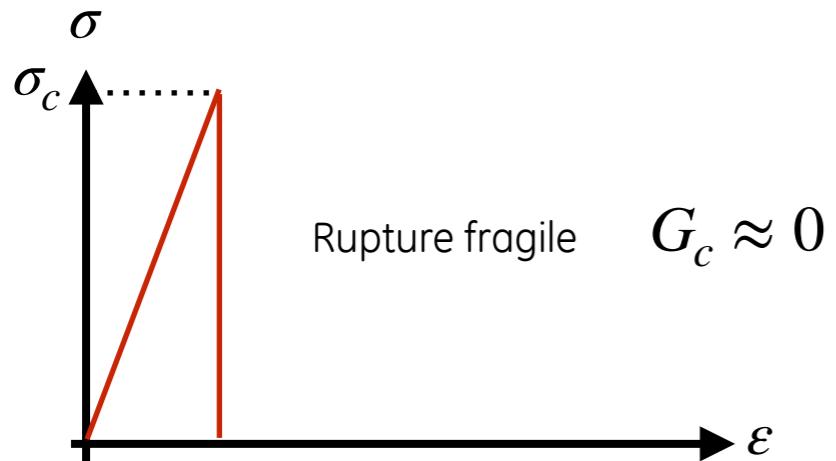
Modèle d'endommagement

- 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

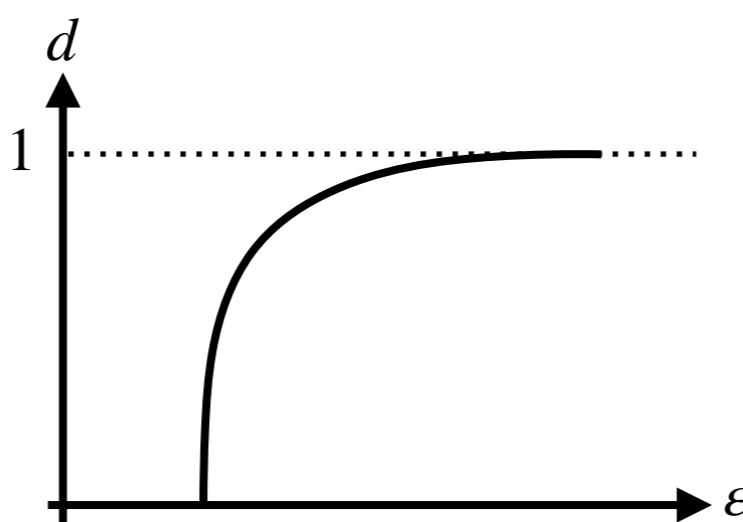
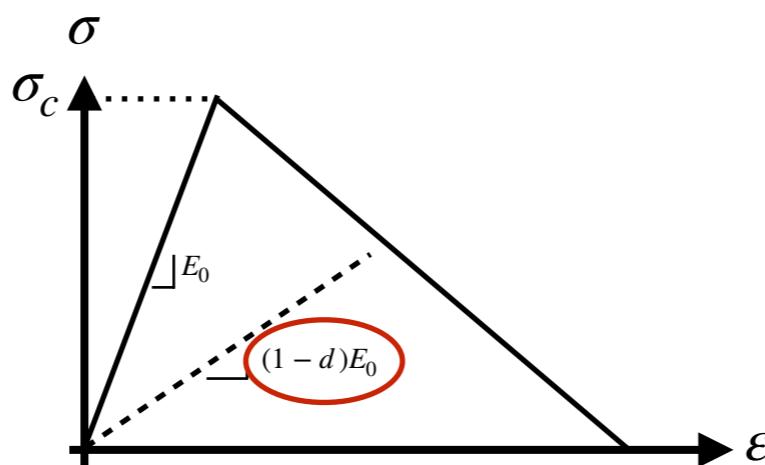
- Rupture fragile vs. rupture ductile



Modèle d'endommagement

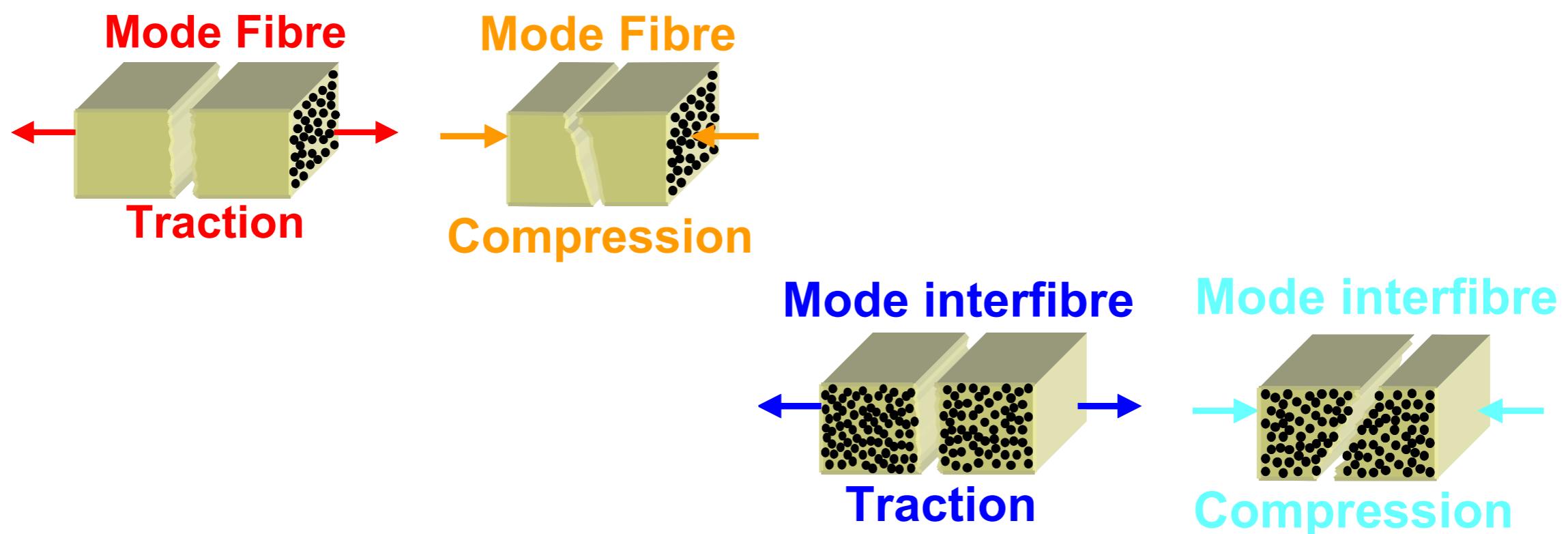
- 3. Effet de l'endommagement

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



Modèle de Hashin

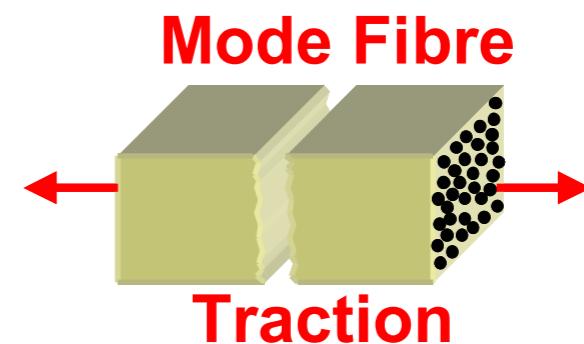
- Modèle endommagement pour composites fibres longues
- Hypothèse **contraintes planes**
- **4 modes** d'endommagement
 - Modes "fibre" en traction (FT) et compression (FC)
 - Modes "interfibre" en traction (MT) et compression (MC)



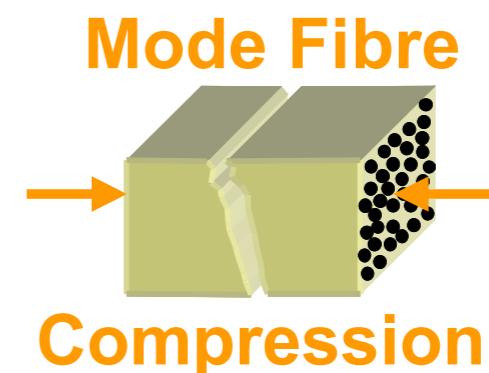
Modèle de Hashin

- 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 :

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



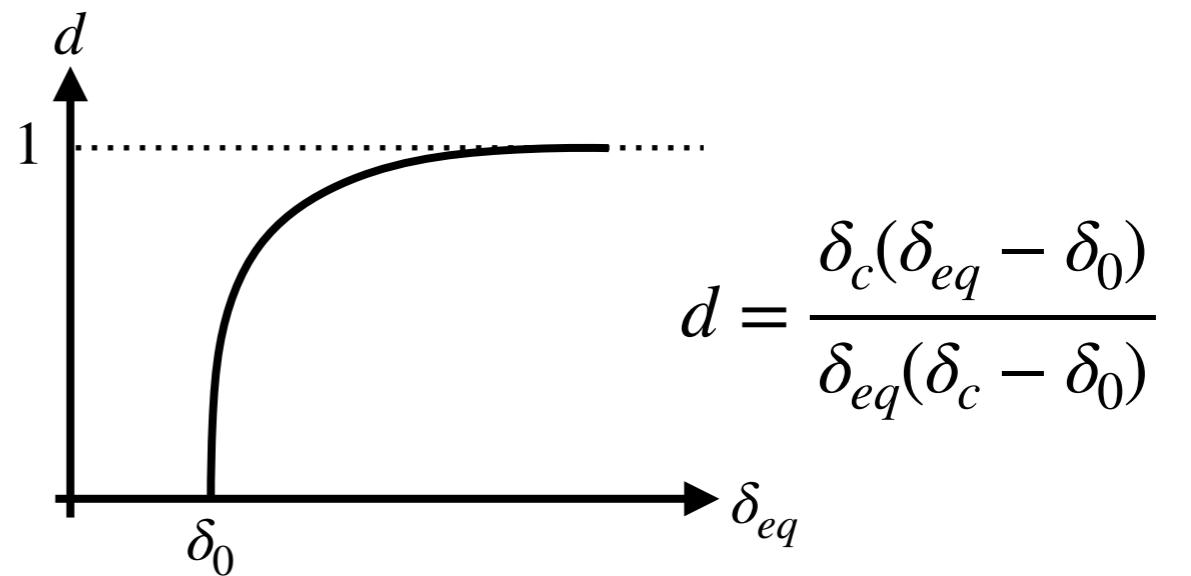
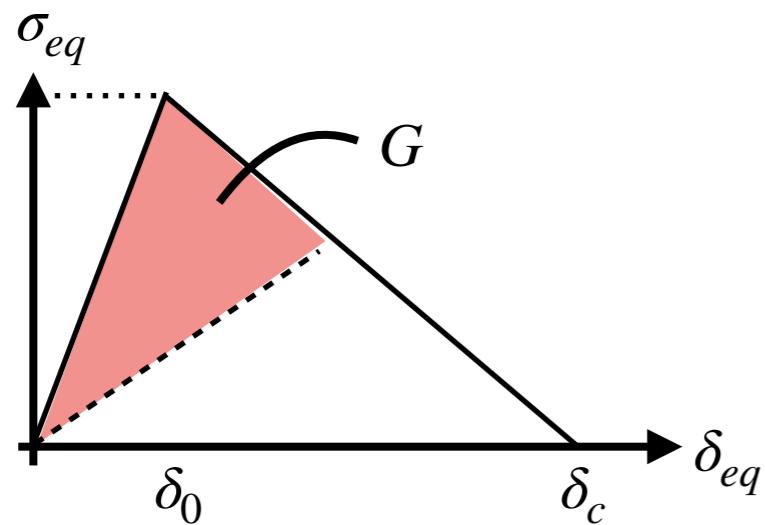
$$F_{FC} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2$$



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 : $d_{FT}, d_{FC}, d_{MT}, d_{MC}$

$$\sigma = C_D : \varepsilon$$

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

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

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

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