

REVUE DES MÉTHODES DE SIMULATION DU COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGES COLLÉS

J.P. Crété, O. Klinkova, T. Da Silva Botelho

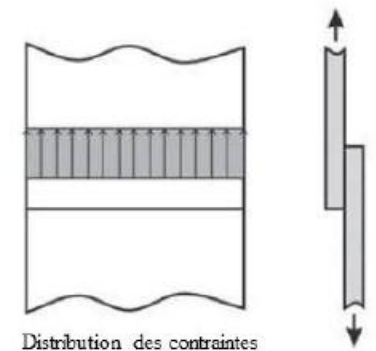
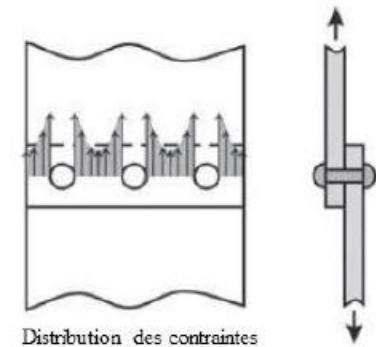
Supméca
Laboratoire Quartz (EA 7393)



INTRODUCTION

Intérêt des assemblages collés

- Contrainte homogène dans le joint (pas de concentration de contraintes)
- Masse réduite, inertie réduite, comportement vibratoire moins perturbé (masses additionnelles discrètes)



INTRODUCTION

Paramètres influents sur le comportement d'un assemblage collé

- **Géométrie** du joint
- **Préparation** des surfaces (nature chimique, mouillabilité, États de surface, ...)
- **Process** (hygrométrie, pression, température, temps de maintien, épaisseur de colle,...)
- Type de **sollicitations** (uniaxial, plan, 3D, statique, dynamique,...)
- Comportement des **matériaux** (non isotrope, non linéaire, ...)
- ...

CONTEXTE GÉNÉRAL

Un comportement mécanique complexe

Prédiction analytique difficile du comportement des assemblages collés [Volkersen, 1938] [Goland and Reissner, 1944]

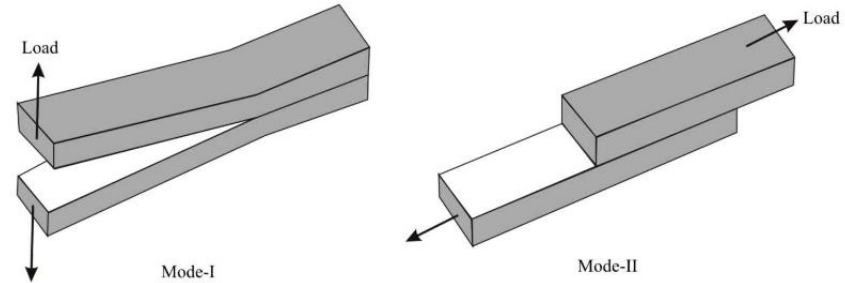
⇒ Campagnes d'essais dans les conditions réelles à l'échelle de la structure/du laboratoire

- **Coût** (matière, fabrication, essais)
- **Délai** (fabrication, essais, dépouillement, synthèse)
- **Représentativité** (éprouvette simplifiée, chargement simplifié, profil de vie incertain)

CONTEXTE GÉNÉRAL

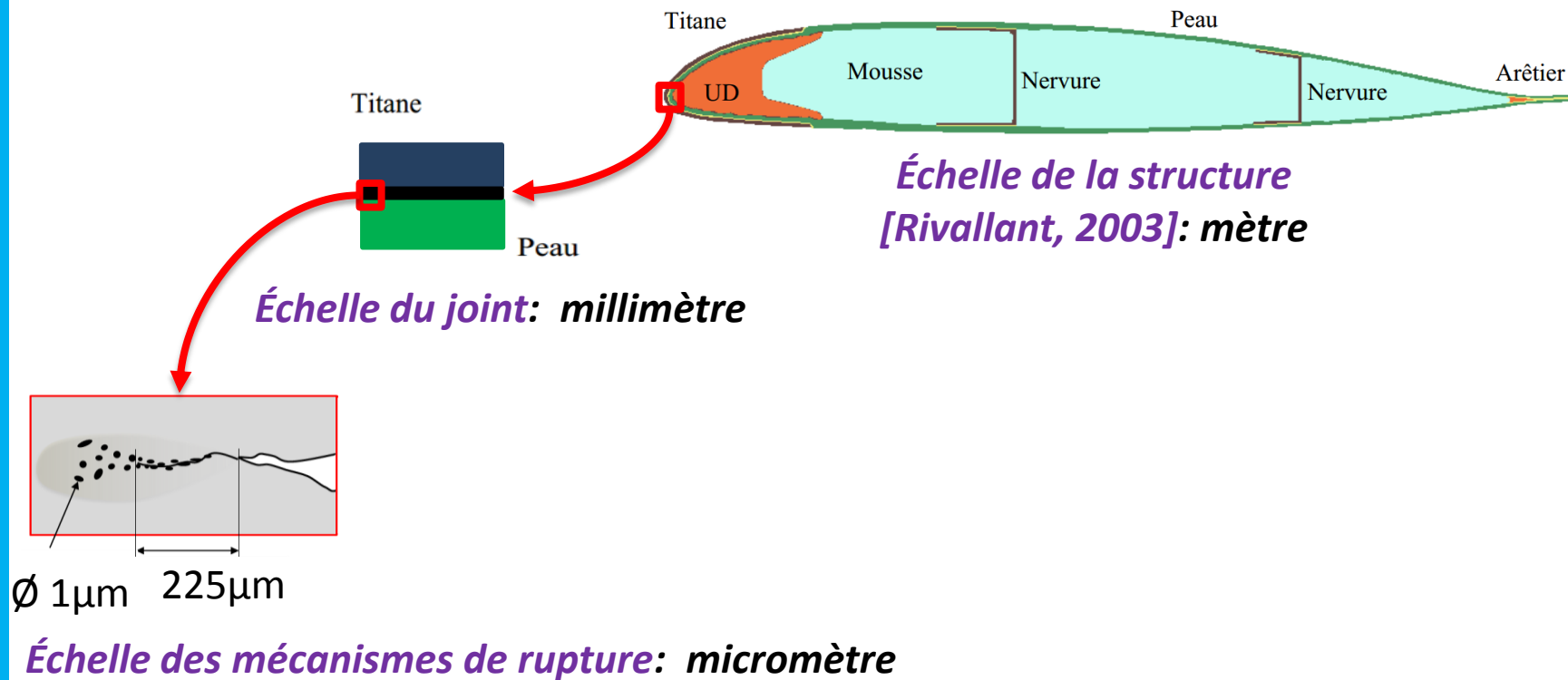
L'apport des simulations numériques

- Simuler les essais à l'échelle labo pour limiter le nombre d'essais physiques et identifier le comportement des joints collés
- Alimenter les modèles numériques de structures réelles



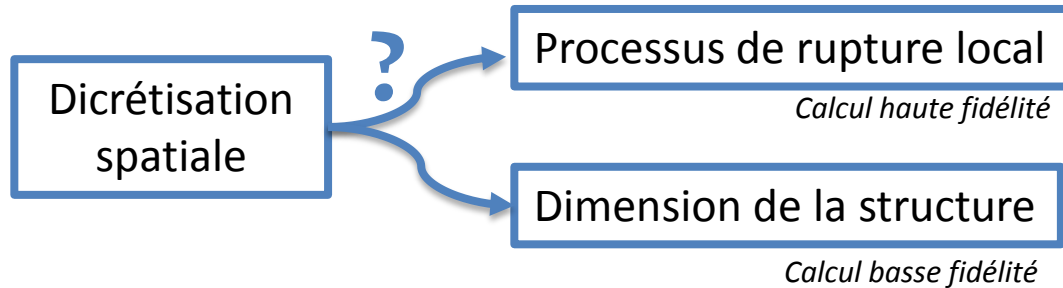
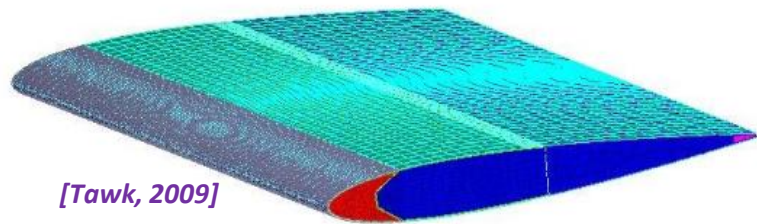
CONTEXTE GÉNÉRAL

Particularité: problème multi-échelle



CONTEXTE GÉNÉRAL

Particularité: problème multi-échelle



- Simuler par éléments finis le comportement et le processus d'endommagement/rupture des assemblages collés
- Maillage grossier pour la structure
- Approches spécifiques pour le collage:
 - Comportement du joint
 - Modèle d'endommagement
 - Mécanisme de rupture

SOMMAIRE

1. Comportement et endommagement/rupture de l'adhésif
2. Modélisation de l'assemblage
3. Modélisation de l'endommagement
4. Critères de rupture
5. Application

COMPORTEMENT DE L'ADHÉSIF

- Le film de colle peut être hétérogène et non linéaire
- Possible gradient de propriétés élastiques dans l'épaisseur [Possart et al., 2006] et présence de déformations [Geiss et al., 2011]
- Présence de porosités dans l'adhésif [Ben Salem, 2012]
- Sensibilité à l'environnement (humidité) [Costa et al., 2017]

ENDOMMAGEMENT / RUPTURE DE L'ADHÉSIF

- Ces mécanismes dépendent de:
 - Nature des substrats et de l'adhésif
 - Process de collage
 - Sollicitations et environnement
- Travaux récents concernant la tolérance au dommage d'assemblages métal/composite
[Zambelis et al., 2018] [Zambelis et al., 2019]

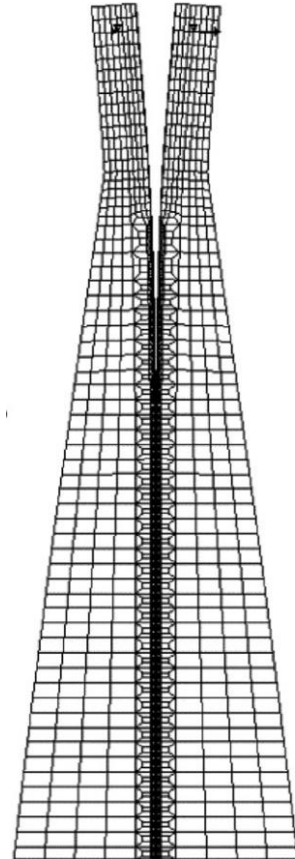
MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE

- Modélisation du film de colle
 - Éléments finis
 - Éléments cohésifs
 - Éléments finis étendus (XFEM)
- Comportement mécanique
 - Élastique
 - Élasto-plastique
- Endommagement
 - Dégradation des propriétés mécaniques
 - Critère d'activation/évolution (contraintes, déformations, taux de restitution de l'énergie,...)
- Rupture
 - Critère d'activation (taux critique de restitution de l'énergie, cumul de dommage,...)
 - Modélisation (debonding, element deletion,...)

MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE

APPROCHE 1: PAS DE MODÉLISATION EXPLICITE DU JOINT DE COLLE

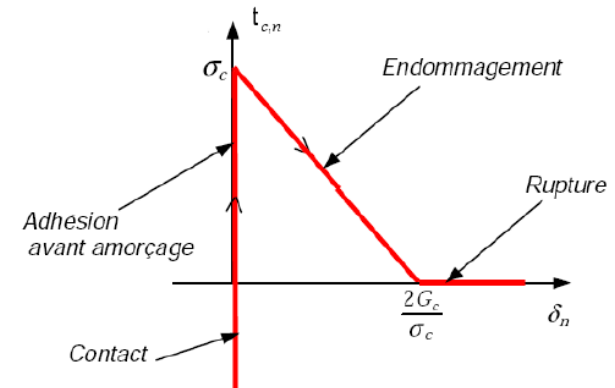
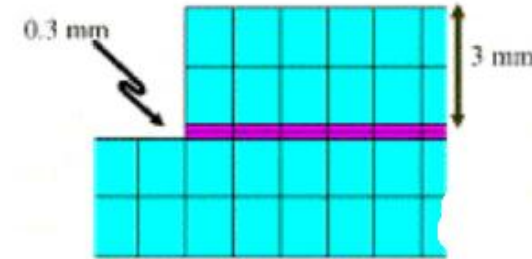
- Hypothèse
 - Joint rigide
- Modélisation
 - VCCT (Virtual Crack Extension Technique), approche énergétique
- Avantages
 - Pas de modélisation du joint de colle
 - Pas de maillage spécifique
- Inconvénients
 - Pas de modélisation du comportement du joint
 - Mauvaise estimation des contraintes à l'interface



MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE

APPROCHE 2: ÉLÉMENTS COHÉSIFS

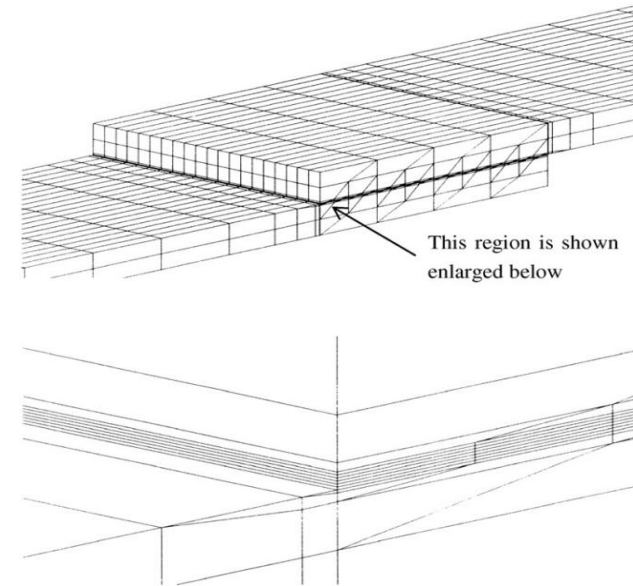
- Hypothèses
 - Comportement homogène dans le joint
 - Rupture cohésive
- Modélisation
 - Éléments sans épaisseur
 - Loi de type traction-séparation
- Avantages
 - Une seule ligne d'éléments
 - Modélisation du comportement du joint (non-linéarité, endommagement, ...)
- Inconvénients
 - Pas d'hétérogénéité
 - Pas de rupture adhésive
 - Structuration du maillage
 - Renseigner le comportement du joint



MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE

APPROCHE 3: ÉLÉMENTS FINIS

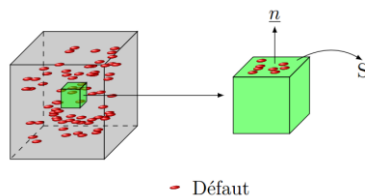
- Hypothèses
 - Comportement volumique du joint
- Modélisation
 - Éléments dans l'épaisseur du joint
- Avantages
 - Rupture adhésive ou cohésive
 - Modélisation du comportement du joint
 - Modélisation des hétérogénéités
- Inconvénients
 - Effort de maillage important
 - Différencier les ruptures adhésive/cohésive
 - Renseigner le comportement du joint



MODÉLISATION DE L'ENDOMMAGEMENT:

ÉVOLUTION DU COMPORTEMENT DE LA COLLE INDUIT PAR L'ENDOMMAGEMENT

- Types de comportement endommageable
 - Élastique endommageable
 - Élasto-plastique endommageable
- Modèles phénoménologiques (approche macro)
 - Dégradation des propriétés élastiques
 - Contrainte effective: $\sigma^D = \sigma(1 - D)$, avec D qui peut dépendre du taux des restitution de l'énergie, du saut de déplacement, des $[\varepsilon]/[\sigma]$
- Modèles micromécaniques (approche micro)
 - Pas de dégradation des propriétés élastiques
 - Potentiel de dissipation avec notion de porosité, f, représentant des vides initiaux, qui croissent et coalescent.



$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^2 + 2f \cosh \left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right) - 1 - f^2 = 0$$

CRITÈRES DE RUPTURE

- Prise en compte d'une variable d'endommagement dans le comportement de la colle

- Basé sur la variable d'endommagement D $\begin{cases} 0 \text{ état non endommagé} \\ 0 < D < D_c \text{ é} \\ D_c \leq D \text{ ruptur} \end{cases}$

- Pas de prise en compte de l'endommagement dans le comportement de la colle

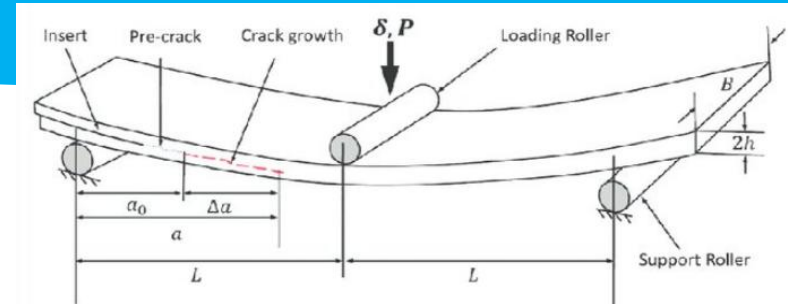
- Basé sur le taux de restitution d'énergie $\left(\frac{G^I}{G_c^I}\right)^{a_m} + \left(\frac{G^{II}}{G_c^{II}}\right)^{a_n} + \left(\frac{G^{III}}{G_c^{III}}\right)^{a_o} \geq 1$

- Basé sur les contraintes $\sqrt{\left(\frac{\hat{\sigma}^n}{\sigma_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau^1}{\tau_c^1}\right)^2 + \left(\frac{\tau^2}{\tau_c^2}\right)^2} \geq 1$

- Basé sur les déformations élastiques/plastiques $\varepsilon^p \geq \varepsilon_c^p$

APPLICATION: ESSAI ENF

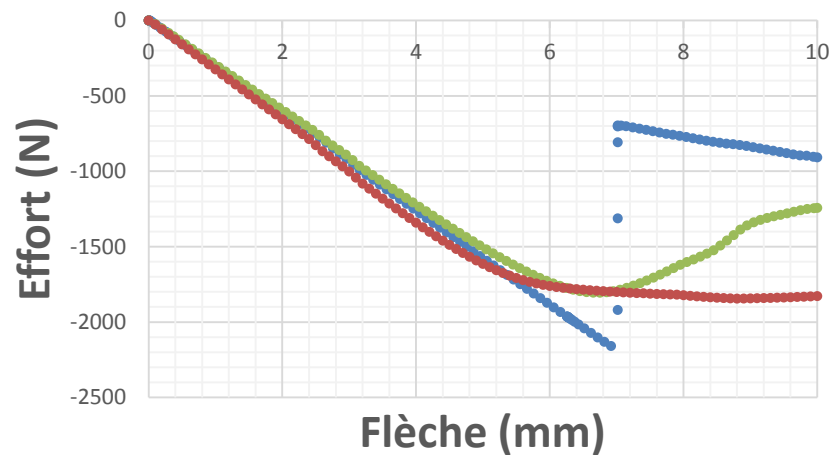
[ASTM D7905]



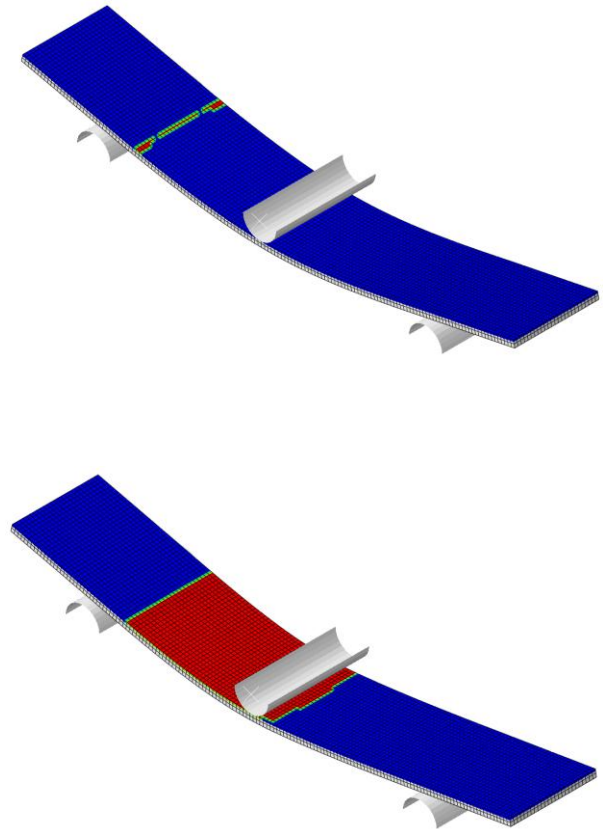
- Simulation sous Abaqus
 - Grandes déformations
 - Substrats: Composite
 - Comportement élastique orthotrope
- Comparaison des 3 approches
 - VCCT
 - Critère de rupture basé sur le taux de restitution de l'énergie
 - Pas de modélisation de l'endommagement
 - Éléments cohésifs
 - Critère d'amorçage en contraintes
 - Loi de traction-séparation bi-linéaire
 - Éléments finis
 - Modélisation phénoménologique de l'endommagement
 - Comportement élastique endommageable

APPLICATION: ESSAI ENF

- VCCT
 - Propagation instantanée du front de fissure
- Éléments cohésifs
 - Propagation continue du front de fissure
- Éléments finis
 - Propagation continue du front de fissure



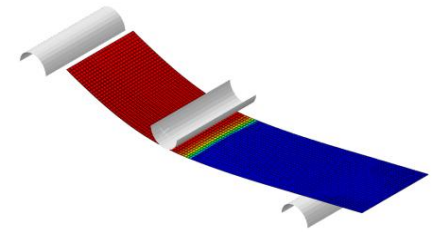
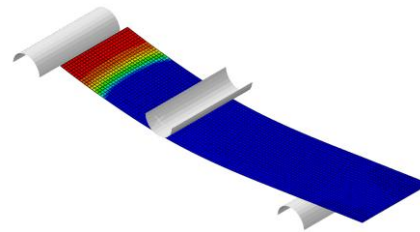
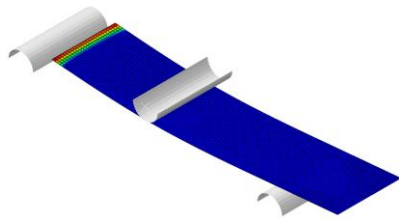
• VCCT • Loi bi-linéaire • Éléments finis



APPLICATION: ESSAI ENF

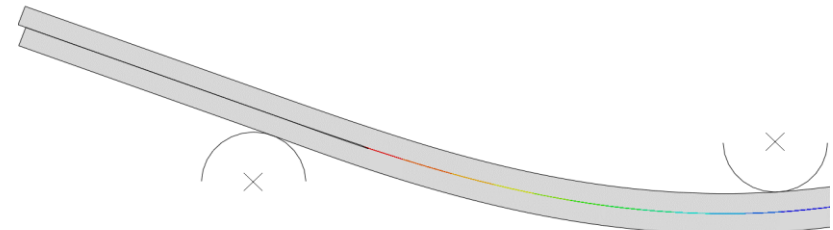
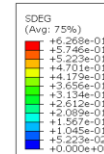
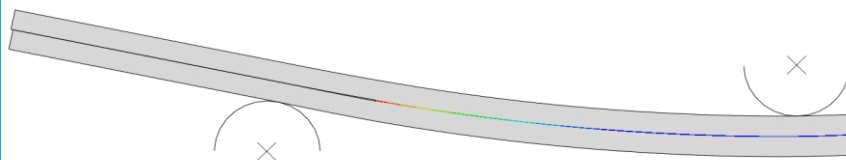
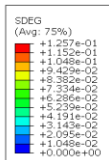
- Éléments cohésifs

- Propagation du front de fissure pour des flèches de 3.2mm, 5.5mm et 10mm



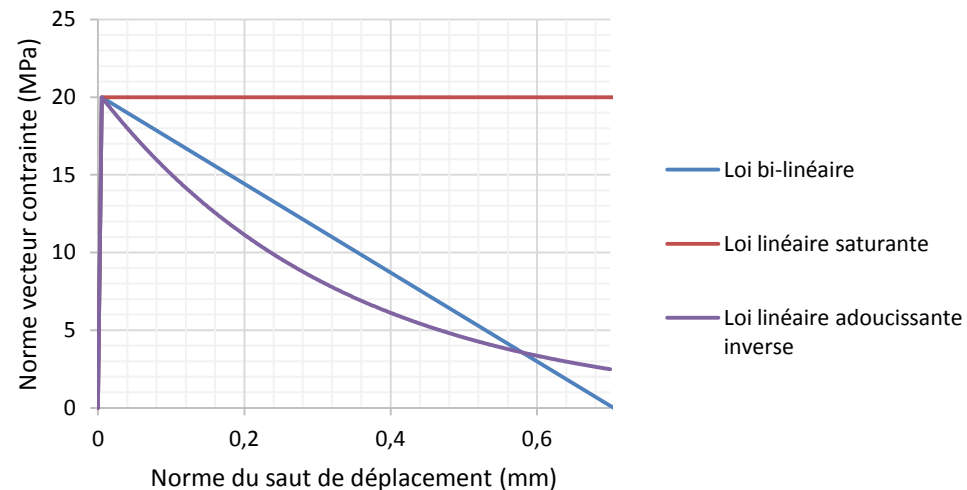
- Éléments finis

- Avancement de l'endommagement dans le joint pour des flèches de 5.5mm et 10mm



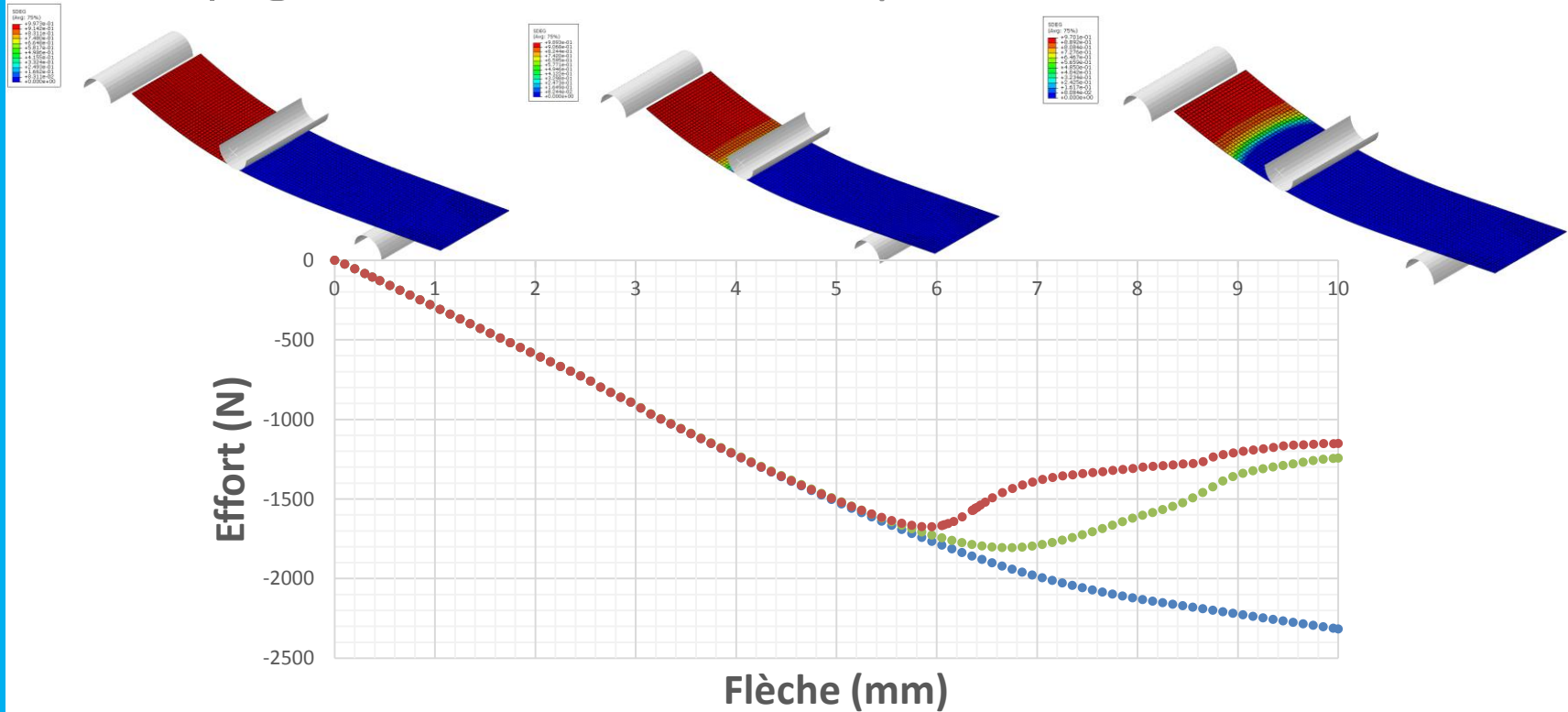
APPLICATION: ESSAI ENF

- Simulation sous Abaqus
 - Grandes déformations
 - Substrats: Composite
 - Comportement élastique orthotrope
 - Éléments cohésifs
- Comparaison de 3 lois cohésives



APPLICATION: ESSAI ENF

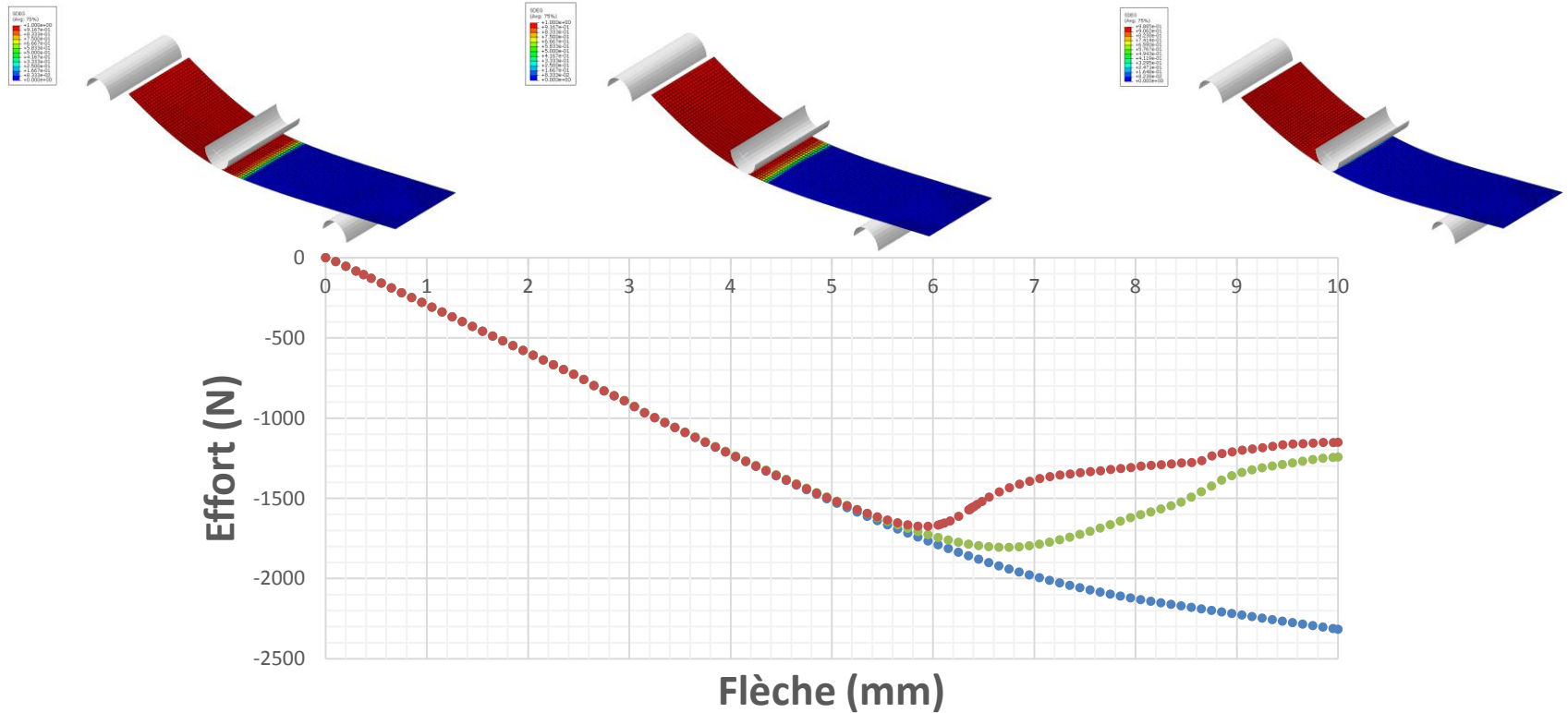
- Propagation du front de fissure pour une flèche de 7mm



- Loi linéaire saturante • Loi bi-linéaire • Loi linéaire adoucissante inverse

APPLICATION: ESSAI ENF

- Propagation du front de fissure pour une flèche de 10mm



- Loi linéaire saturante • Loi bi-linéaire • Loi linéaire adoucissante inverse

CONCLUSIONS

L'approche la plus utilisée: éléments cohésifs

- **Avantages**
 - Modélisation explicite du joint par éléments surfaciques
 - Modélisation du comportement du joint
 - Peu de ddl en plus (faible coût numérique)
- **Inconvénients**
 - Nécessite une campagne d'essais (comportement colle)
 - Pas de prise en compte d'hétérogénéités, ni de rupture adhésive
- **Extension**
 - Propagation de défaut: Loi de Paris
 - Comportements plus complexes (couplage thermique, humidité,...)

PERSPECTIVES:

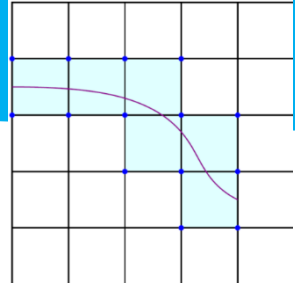
MODÉLISER CHAQUE CONSTITUANT COMME UN CORPS DISTINCT

- **Motivations**
 - Meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement / Rupture
- **Avantages**
 - Prise en compte des hétérogénéités et du gradient de propriétés mécaniques dans l'épaisseur
 - Modélisation des vides par un modèle micro-poreux (Gurson, Rousselier, ...)
 - Analyse du champ de contraintes et évolution du taux de restitution de l'énergie
- **Inconvénients**
 - Caractérisation du comportement de la colle, de sa structure, et des gradients de propriétés
 - Complexité numérique supplémentaire
- **Extension**
 - Approche multi-échelle

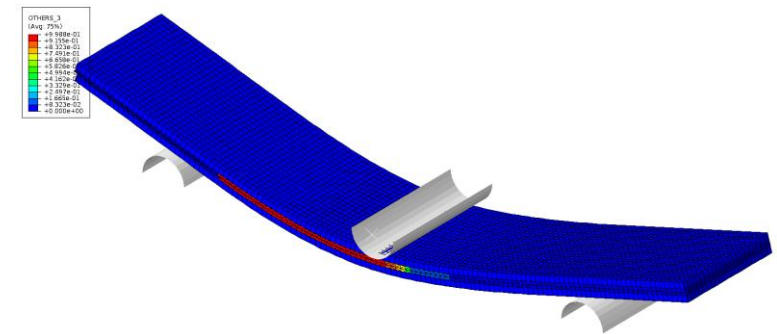
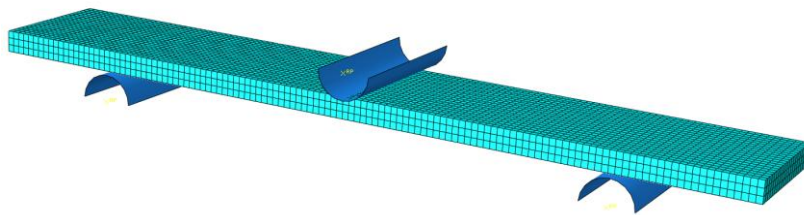
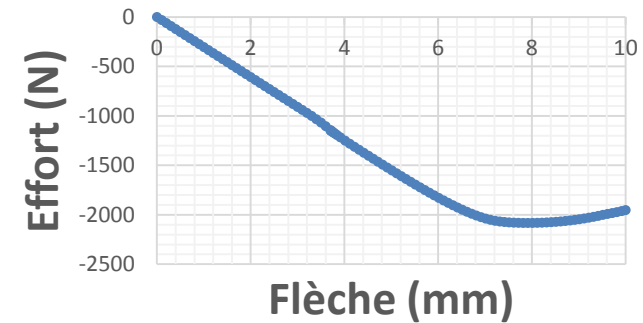
PERSPECTIVES:

MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ÉTENDUS (XFEM)

- Crack path
- Discontinuous enrichment
- Asymptotic enrichment



- **Motivations**
 - Similaire aux éléments cohésif mais sans maillage spécifique
- **Avantages**
 - Maillage plus classique de la structure
 - Modélisation du comportement du joint
- **Inconvénients**
 - Comportement homogène
 - Caractérisation du comportement du joint
 - Pas de rupture adhésive
 - ddl supplémentaires



REVUE DES MÉTHODES DE SIMULATION DU COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGES COLLÉS

J.P. Crété, O. Klinkova, T. Da Silva Botelho

Supméca
Laboratoire Quartz (EA 7393)