



Endommagement à l'échelle mésoscopique et son influence sur la tenue mécanique des matériaux composites tissés

Aurélien Doitrand (MAS/DMSC/MC²)

Directeur de thèse: Nicolas Carrère (LBMS puis Safran Composites)

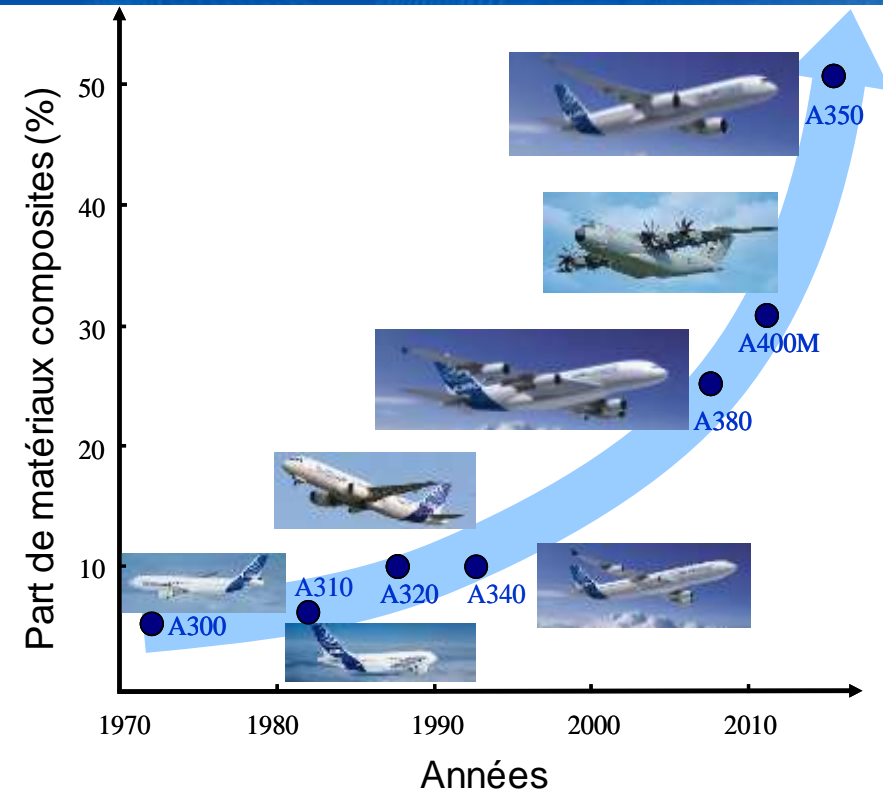
Encadrants Onera: Martin Hirsekorn, Christian Fagiano

Séminaire de remise des prix des Doctorants
07/04/2016



retour sur innovation

Contexte et challenges

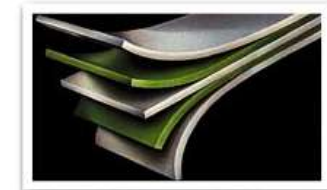


Besoin des industries aéronautique et automobile:

- Réduction des émissions de gaz à effets de serre
- Réduction des masses des structures



Structure en sandwich



Stratifié de pli d'unidirectionnels

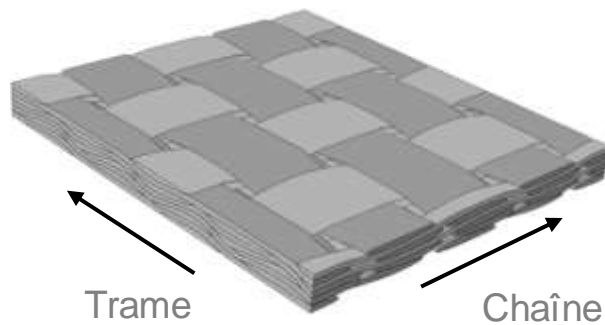
Matériaux composites:

- Bonnes propriétés mécaniques
- Faible densité
- Flexibilité dans la conception

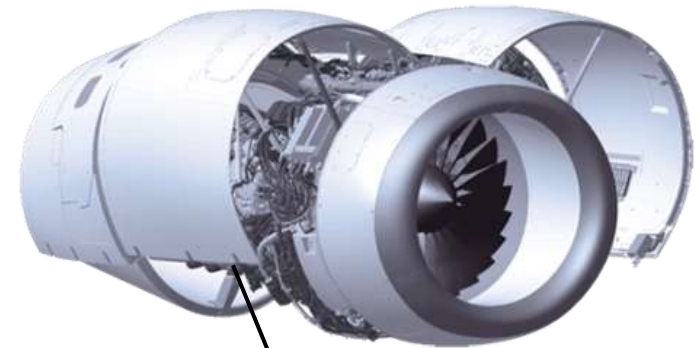
Composites tissés

- + Variété dans le choix du renfort
- + Réduction des opérations d'assemblage fragilisant les structures

Challenge: exploiter le potentiel de ces matériaux

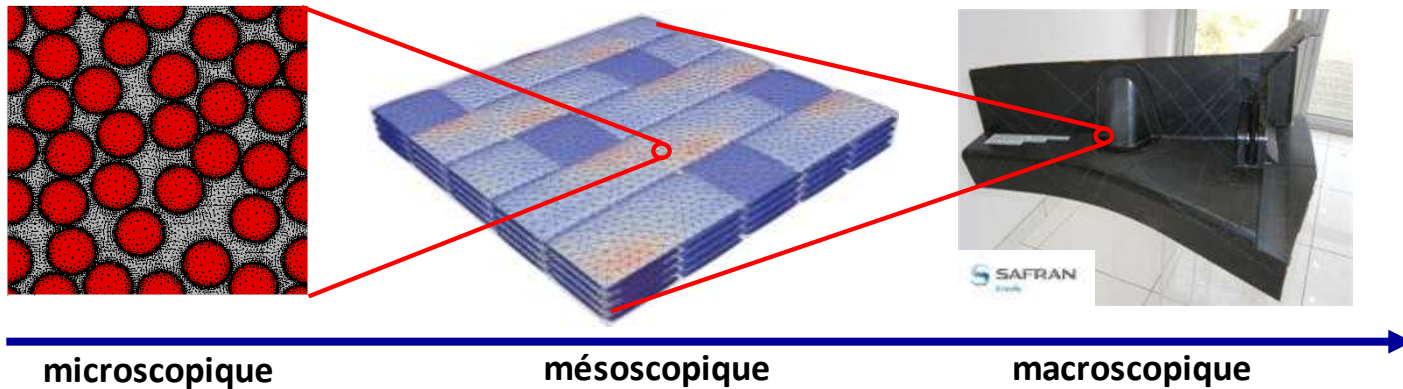


Architecture d'un renfort
de fibres Taffetas



satin de 5 carbone-époxy

Contexte et challenges

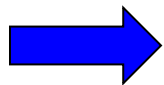


- Modèles phénoménologiques basés sur des variables représentant les effets de l'endommagement

Composites tissés 3D (Onera Damage Model)
 [Maire 1997]
 [Marcin 2010] [Rakotoarisoa 2013]
 [Hurmane 2015] [Elias 2015]

- Identification des paramètres longue et coûteuse

Composites tissés 2D
 [Hochard 2001] [Barbero 2005] [Tollon 2009]



Besoin de modèles prédictifs prenant en compte l'architecture du renfort
Intérêt de l'échelle mésoscopique

Objectifs :

- **Caractérisation de l'endommagement à l'échelle mésoscopique**
- **Modélisation des mécanismes d'endommagement observés expérimentalement**
- **Effets de l'endommagement sur le comportement macroscopique des composites tissés**

- Introduction
- **Observations expérimentales**
- Procédure de modélisation
 - Géométrie et maillage
 - Modélisation discrète de l'endommagement et effets sur le comportement macroscopique
 - Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement
- Conclusions et perspectives

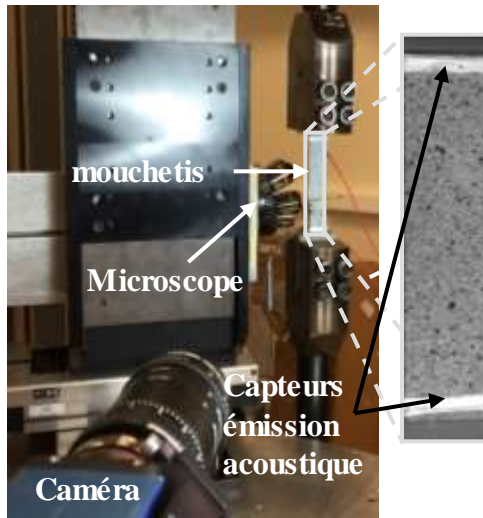
Observations expérimentales

Matériau étudié*:

- 4 couches de taffetas
- Fibres de verre
- Matrice époxy

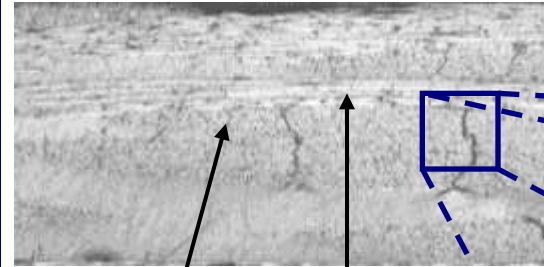
*Plaque réalisée à l'Onera avec R. Agogué et découpée par P. Nunez

*Essais réalisés par A. Mavel



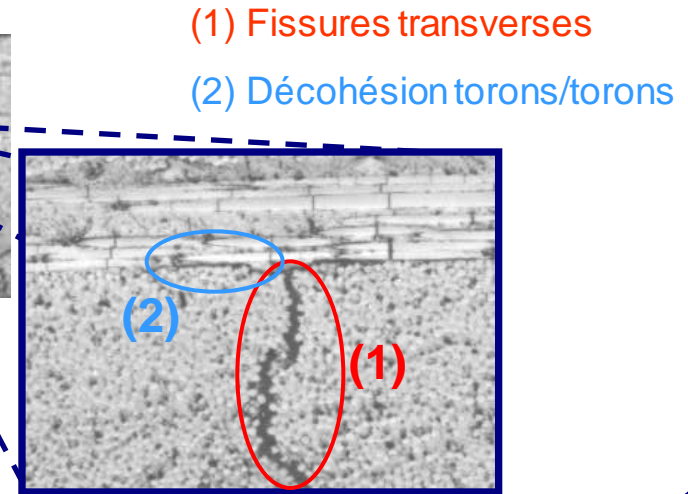
Montage de traction

Caractérisation et suivi de l'endommagement



Toron de trame Toron de chaîne

Observation au microscope

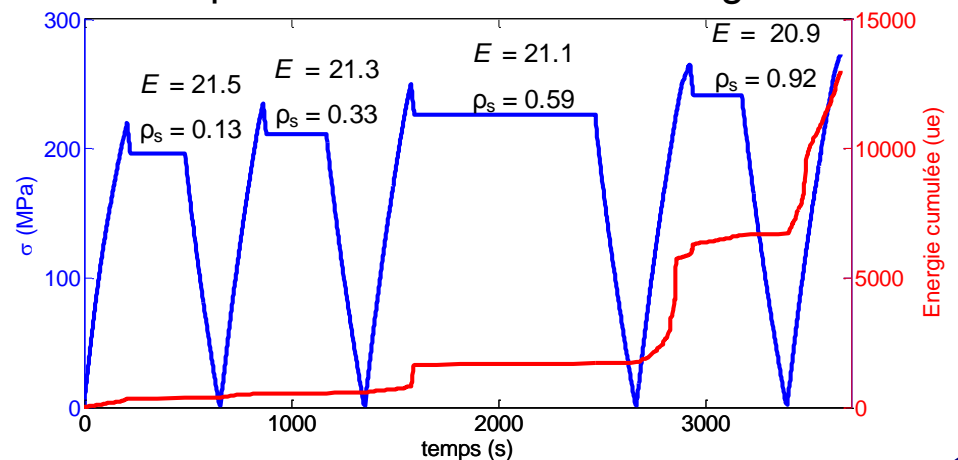


(1) Fissures transverses

(2) Décohésion torons/torons

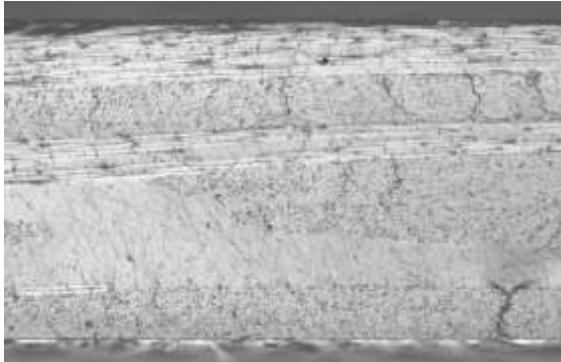
Évolution du comportement avec l'endommagement

E: module de Young [GPa]
 ρ_s : densité de fissures [fissures.mm⁻²]



Détection de fissures par corrélation d'images

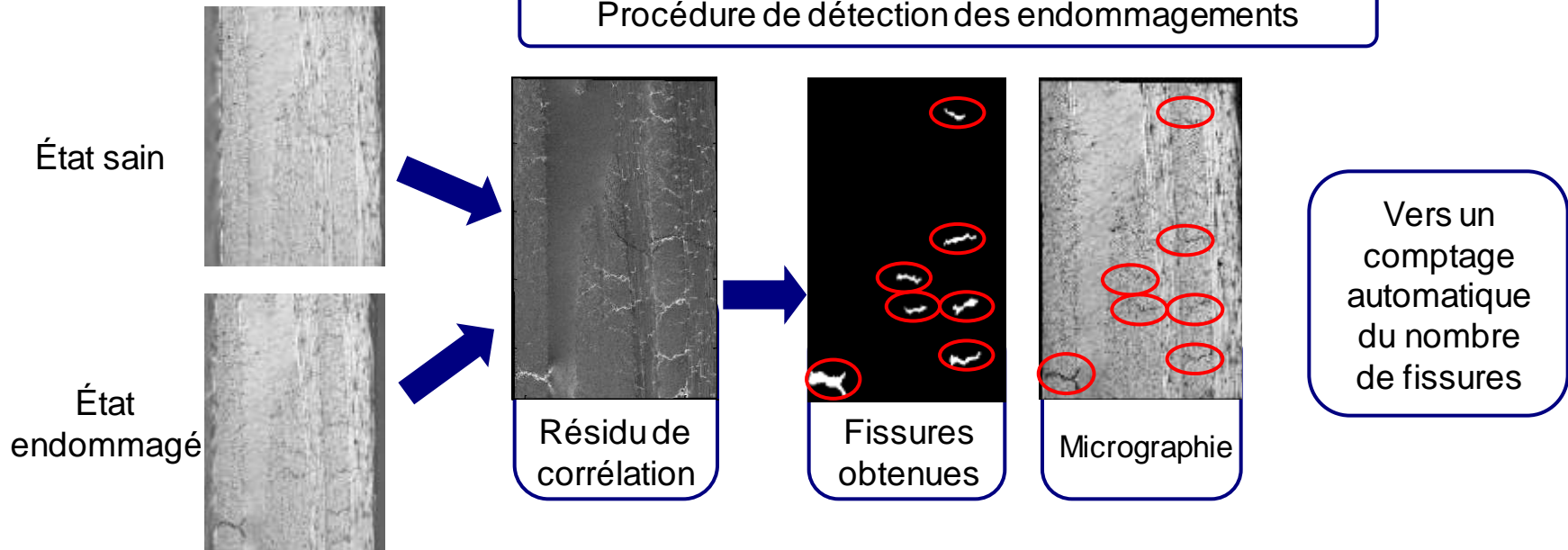
Nombre de fissures?



Problématique : Détection de l'endommagement à partir d'observations au microscope

- Corrélation d'images pour la détection de l'endommagement (Correli RT3 - Collaboration avec F. Hild (LMT Cachan))
- Régularisation mécanique pour la mise en évidence de l'endommagement

Procédure de détection des endommagements

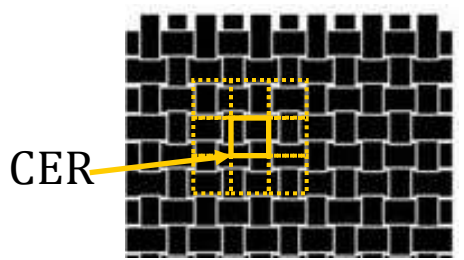


- Introduction
- Observations expérimentales
- **Procédure de modélisation**
 - **Géométrie et maillage**
 - Modélisation discrète de l'endommagement et effets sur le comportement macroscopique
 - Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement
- Conclusions et perspectives

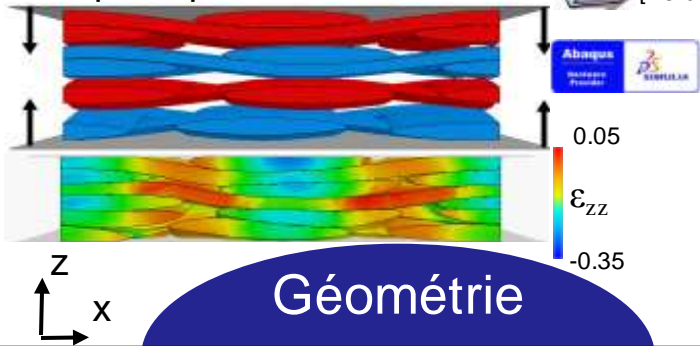
Maillage d'une cellule élémentaire représentative

1^{ère} étape: Maillage d'une géométrie représentative du composite

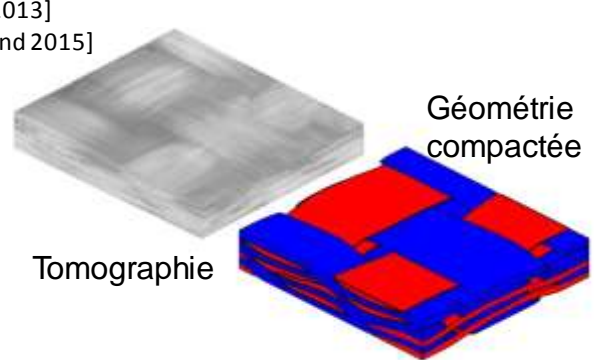
➤ Périodicité du tissu :
Cellule élémentaire représentative (CER)



➤ Simulation de la compaction du tissu avant injection de la résine avec Abaqus implicit



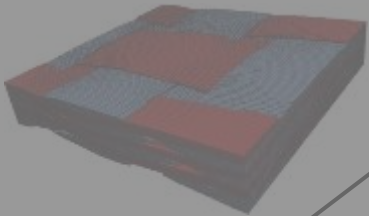
➤ Géométrie obtenue similaire au renfort de fibre réel



Géométrie

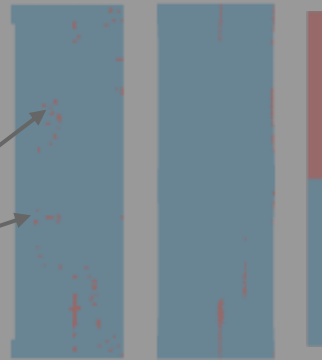
Maillage voxel

- Kim 2003
- Schneider 2009
- Potter 2012
- De Carvalho 2012
- Koumpias 2014
- Zeng 2014
- Green 2014



- Propriétés homogénéisées
- ➖ Localisation incertaine de l'endommagement*

Maillage

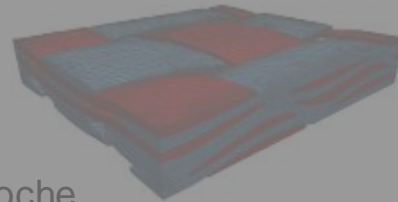


Maillage voxel Maillage conforme

Zone endommagée
Zone non endommagée

Maillage conforme

- Grail, 2013

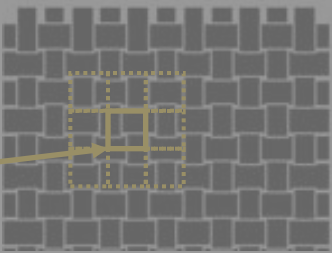


- Maillage proche de la géométrie initiale
- Maillage plus adapté pour la modélisation de l'endommagement

Maillage d'une cellule élémentaire représentative

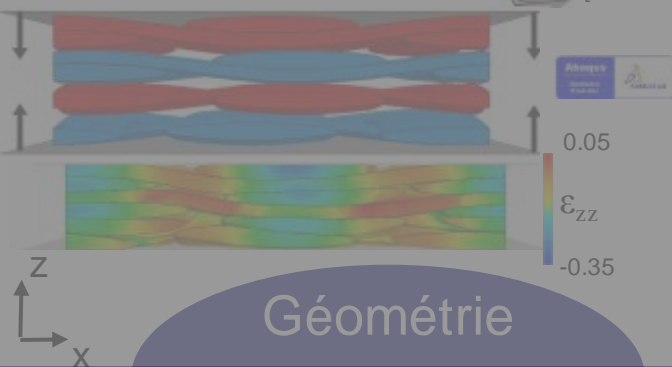
1^{ère} étape: Maillage d'une géométrie représentative du composite

➤ Périodicité du tissu:
Cellule élémentaire représentative (CER)



CER

➤ Simulation de la compaction du tissu avant injection de la résine

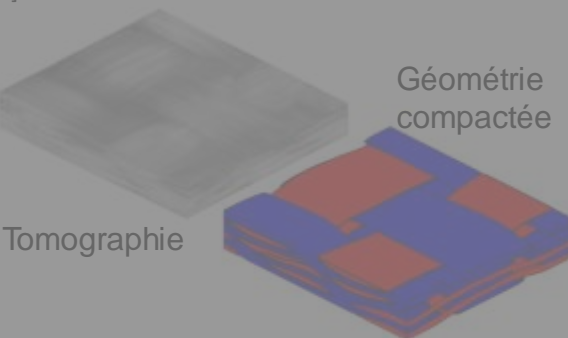


ϵ_{zz}

0.05

-0.35

➤ Géométrie obtenue similaire au renfort de fibre réel



Tomographie


Géométrie compactée

Maillage voxel

- Kim 2003
- Schneider 2009
- Potter 2012
- De Carvalho 2012
- Koumpias 2014
- Zeng 2014
- Green 2014

➤ Propriétés homogénéisées

➖ Localisation incertaine de l'endommagement*




Maillage

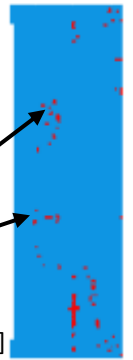
Maillage conforme

Grail, 2013


➤ Maillage proche de la géométrie initiale

➤ Maillage plus adapté pour la modélisation de l'endommagement





Maillage voxel



Maillage conforme

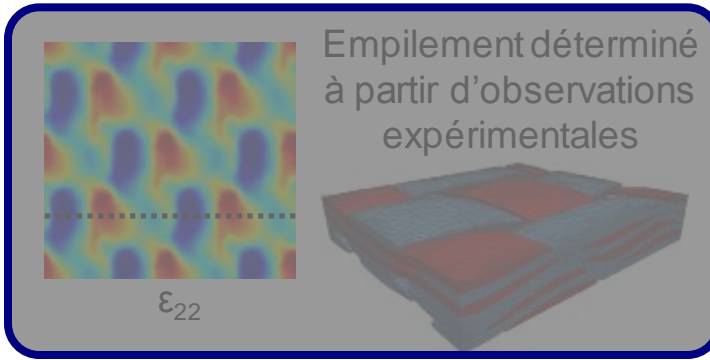
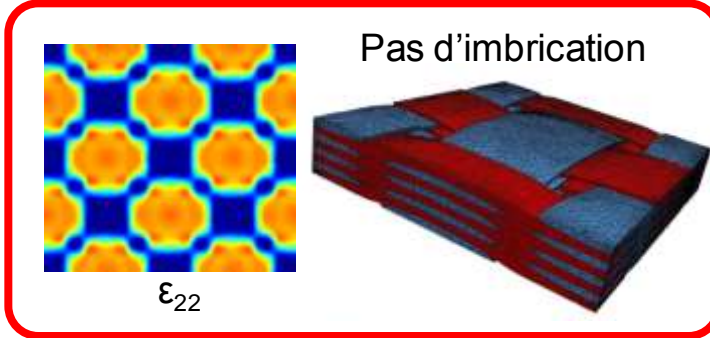
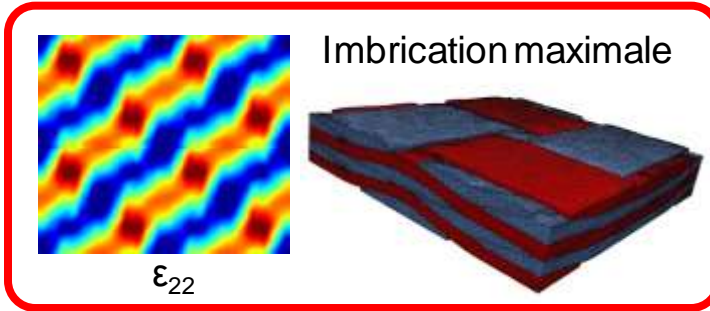
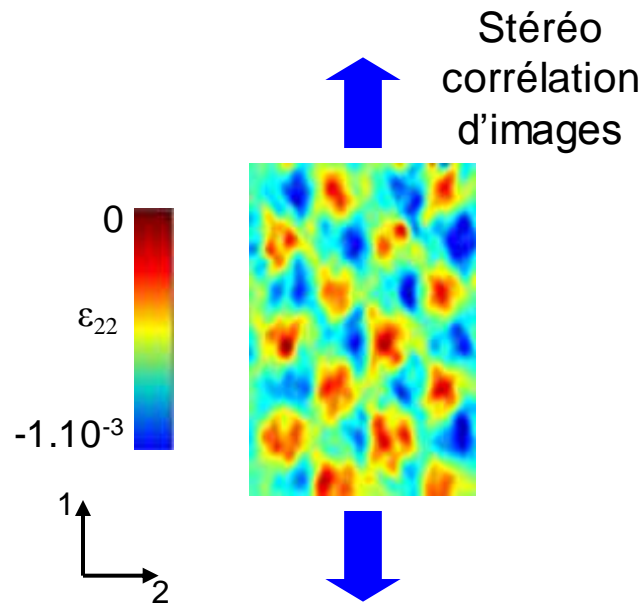
Zone endommagée

Zone non endommagée

[Doitrand 2015]

CER adaptée à la modélisation de l'endommagement

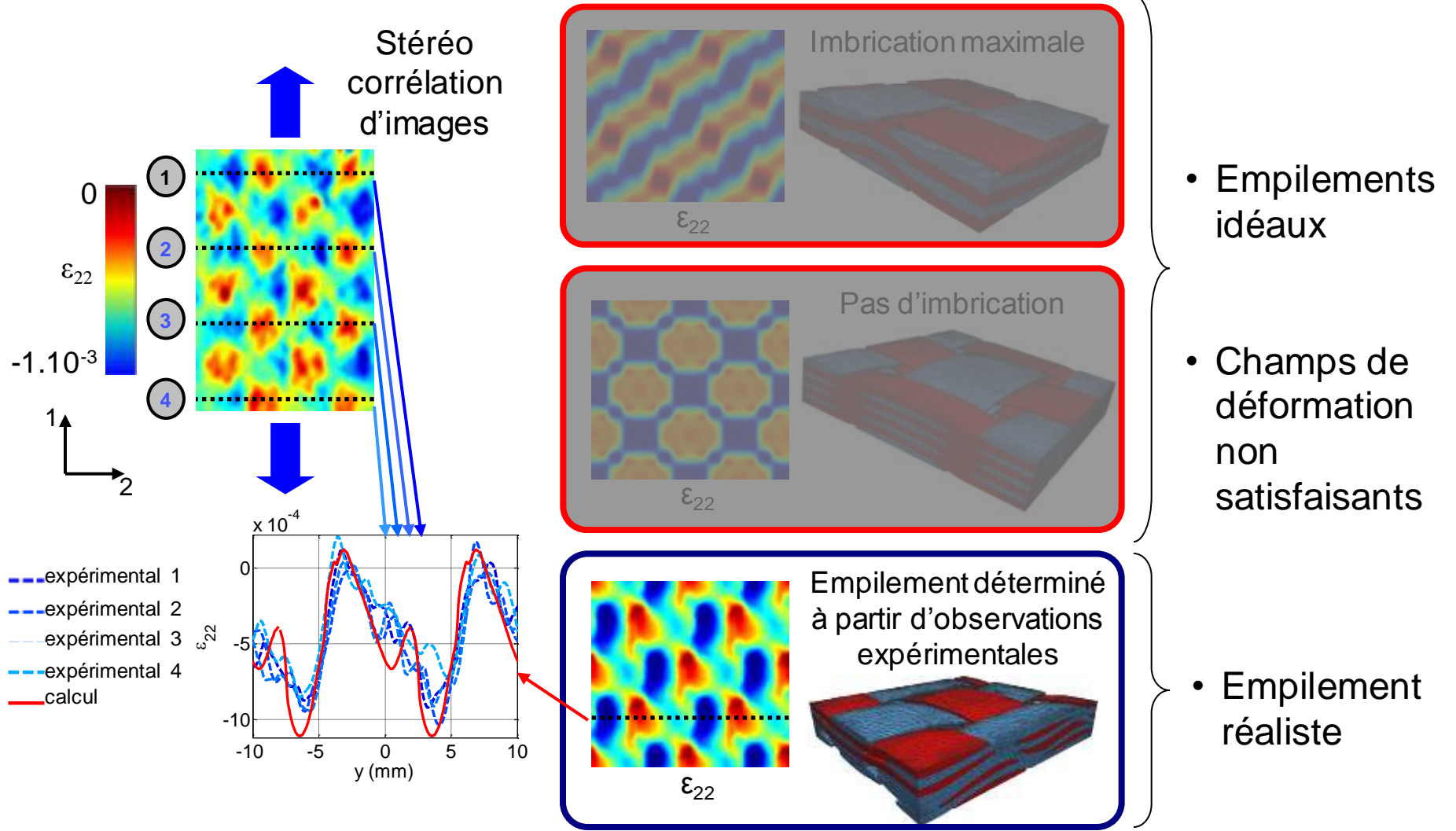
Influence du décalage des couches sur les champs de déformation*



- Empilements idéaux
- Champs de déformation non satisfaisants
- Empilement réaliste

CER adaptée à la modélisation de l'endommagement

Influence du décalage des couches sur les champs de déformation*



- Introduction
- Observations expérimentales
- **Procédure de modélisation**
 - Géométrie et maillage
 - **Modélisation discrète de l'endommagement et effets sur le comportement macroscopique**
 - Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement
- Conclusions et perspectives

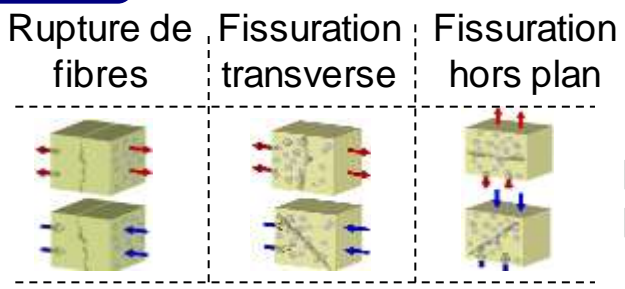
Localisation de l'endommagement

2nde étape: Localisation de l'endommagement dans la cellule élémentaire représentative

Localisation de l'endommagement

Torons

Critère de rupture de pli UD



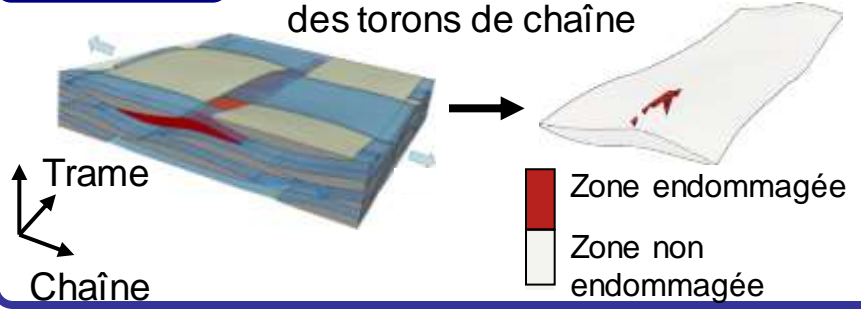
[Laurin 2007]
[Charrier 2013]

Matrice

Critère en contrainte principale maximale [Chaboche 1994]

Exemple

Traction dans la direction des torons de chaîne



Modélisation de l'endommagement

Loi continue d'endommagement

- Directions de propagation de l'endommagement [Zako 2003]
- [Gorbatikh 2007]



[Melro 2012]
[Lomov 2007]

Modélisation discrète

- Modélisation des mécanismes d'endommagement observés expérimentalement [Couegnat 2008]
- Variables physiques représentatives de l'endommagement (densité de fissures, longueur de décohésion) [Obert 2014]

Localisation de l'endommagement

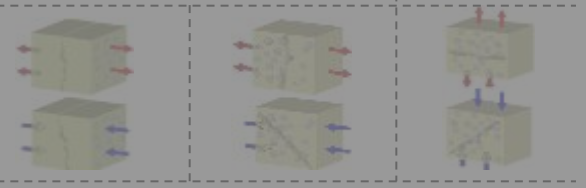
2^{de} étape: Localisation de l'endommagement dans la cellule élémentaire représentative

Localisation de l'endommagement

Torons

Critère de rupture de pli UD

Rupture de fibres Fissuration transverse Fissuration hors plan



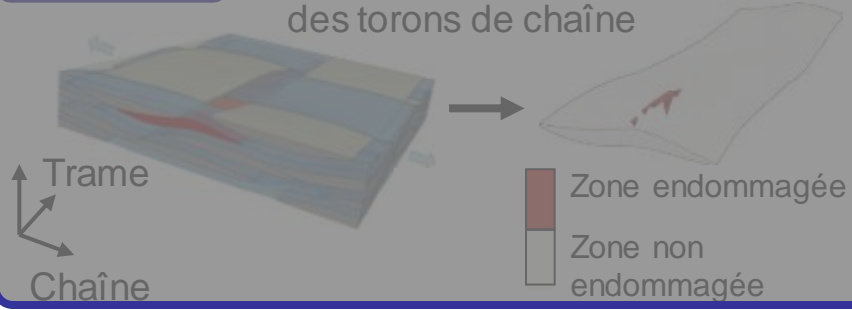
[Laurin 2007]
[Charrier 2013]

Matrice

Critère en contrainte principale maximale [Chaboche 1994]

Exemple

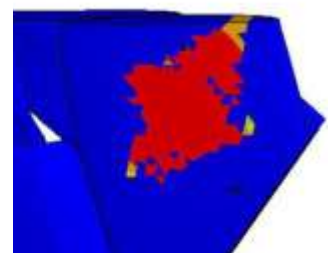
Traction dans la direction des torons de chaîne



Modélisation de l'endommagement

Loi continue d'endommagement

- Directions de propagation de l'endommagement [Zako 2003]
[Gorbatikh 2007]
[Melro 2012]



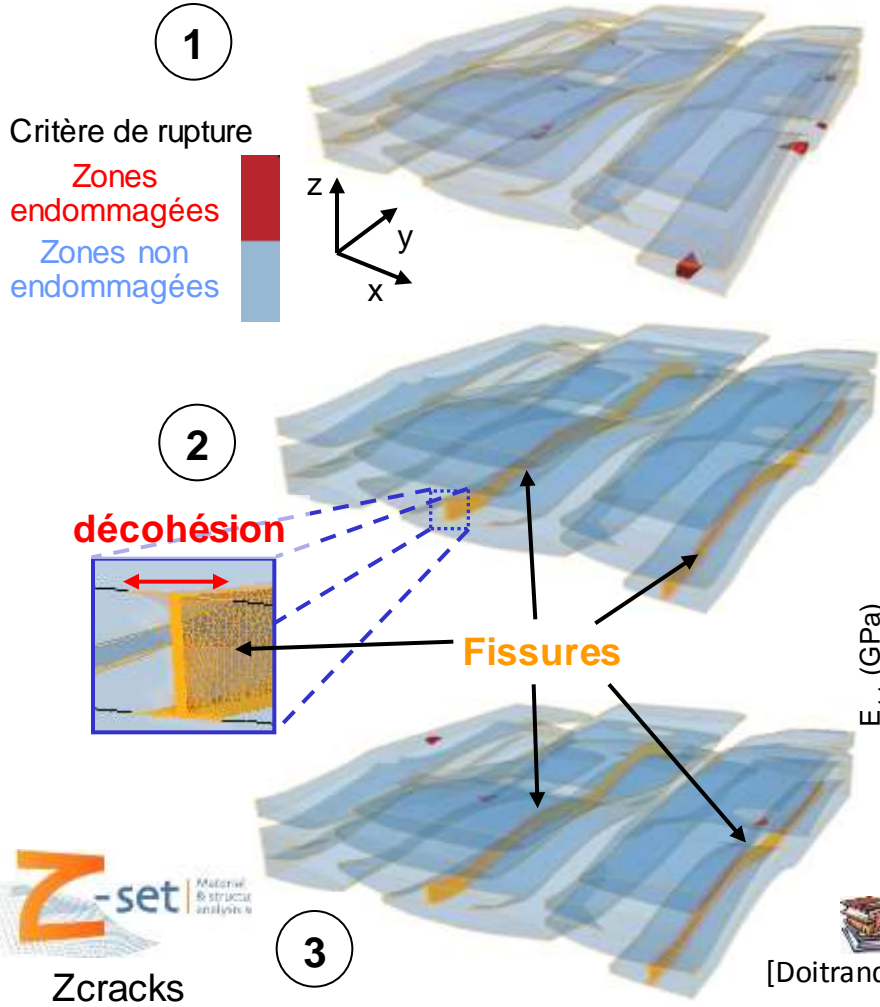
[Lomov 2007]

Modélisation discrète

- Modélisation des mécanismes d'endommagement observés expérimentalement [Couegnat 2008]
- Variables physiques représentatives de l'endommagement (densité de fissures, longueur de décohésion) [Obert 2014]

Modélisation discrète de l'endommagement

3^{ème} étape: Modélisation discrète de l'endommagement*



Collaboration avec V. Chiaruttini (DMSM)

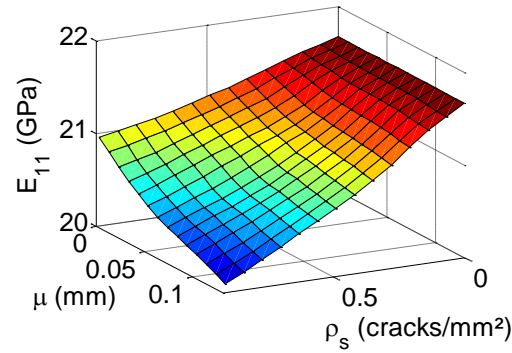
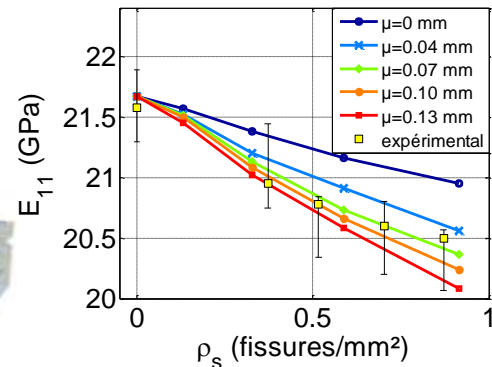
• Algorithmme

- ① Localisation des premières fissures
- ② Insertion des fissures
- ③ Localisation de nouvelles fissures

• Hypothèses

- Fissure traversant le toron
- Longueur de décohésion constante

• Évolution des propriétés macroscopiques



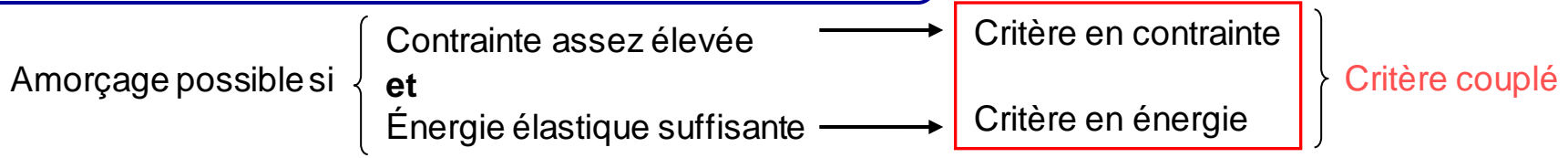
➔ Alimentation d'un modèle d'endommagement macroscopique

[Doitrand 2015]

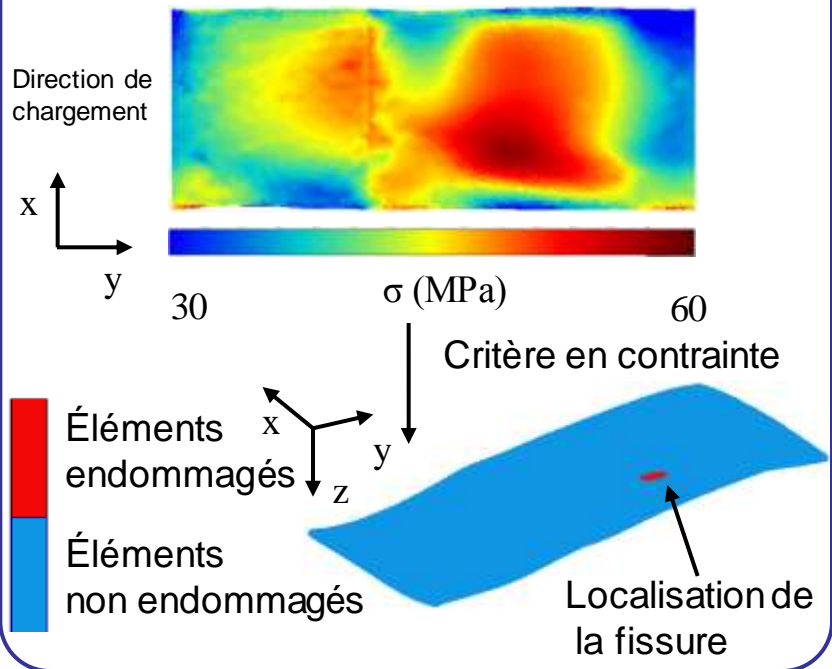
- Introduction
- Observations expérimentales
- **Procédure de modélisation**
 - Géométrie et maillage
 - Modélisation discrète de l'endommagement et effets sur le comportement macroscopique
 - **Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement**
- Conclusions et perspectives

Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement

Amorçage de l'endommagement

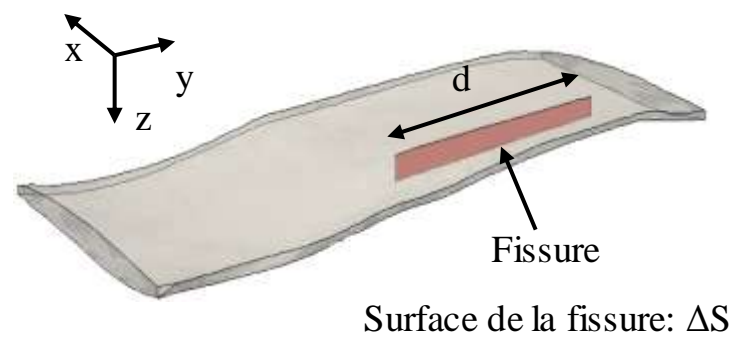


Localisation de l'endommagement :
Critère en contrainte [Doitrand 2015] [Faes 2015]



Hypothèses sur la fissure à l'amorçage :

- Orientée dans la direction des fibres
- Traversant l'épaisseur du toron

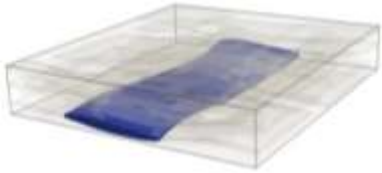


- Un seul paramètre varie: la longueur de la fissure d

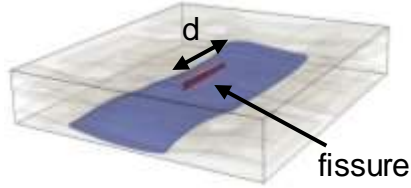
Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement

Critère en énergie

État non endommagé

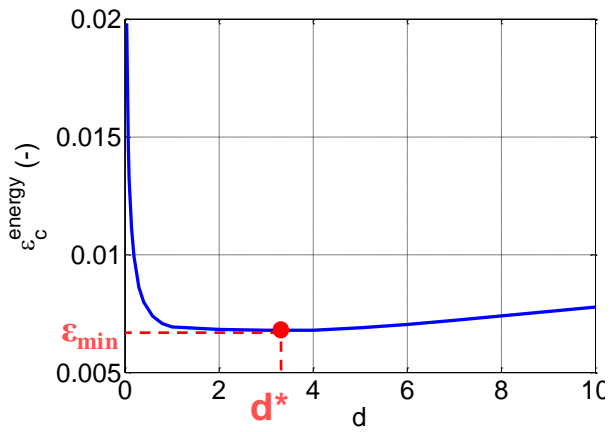


État endommagé



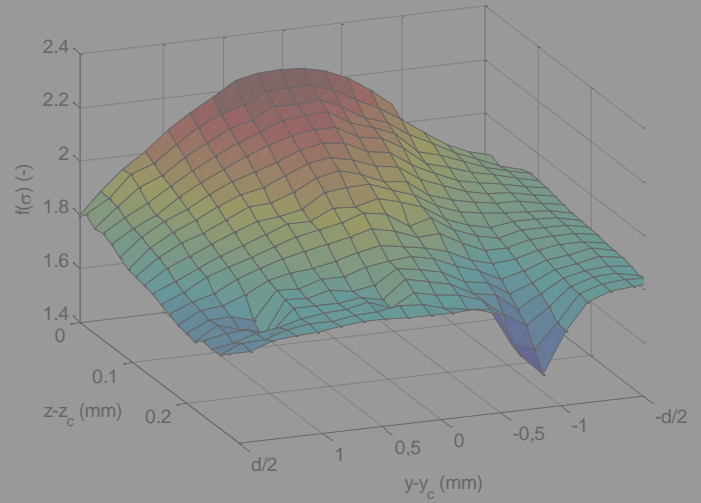
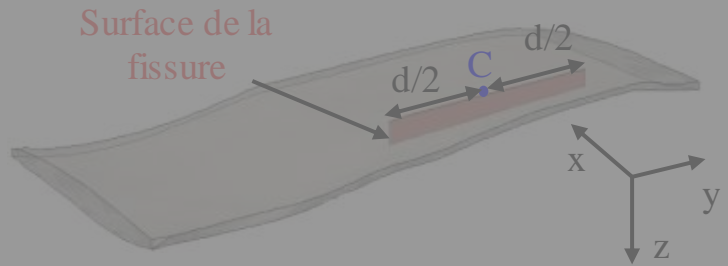
Énergie potentielle: $W(0)$ Énergie potentielle: $W(d)$

- Déformation à l'amorçage d'une fissure



- Borne inférieure de la déformation à l'amorçage

Critère en contrainte



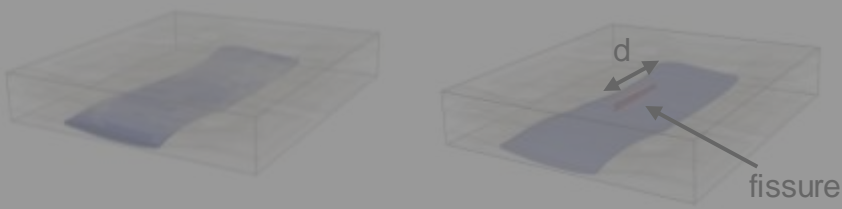
- Critère en contrainte atteint sur toute la surface de la fissure

Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement

Critère en énergie

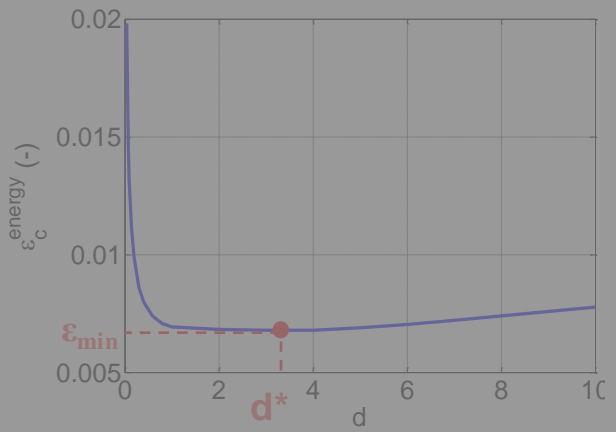
État non endommagé

État endommagé



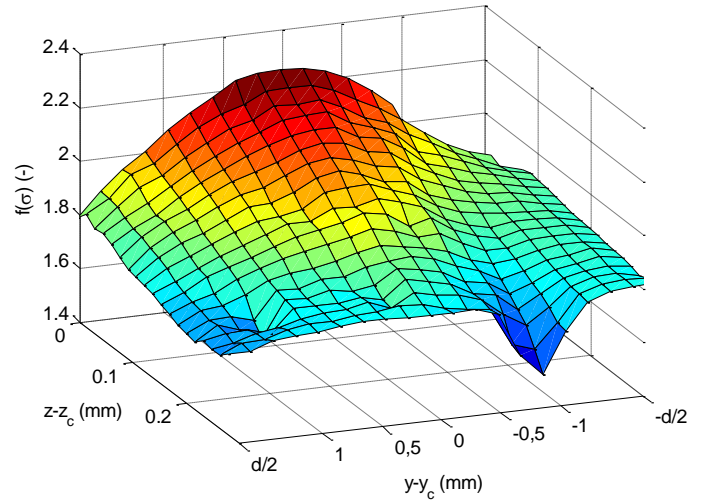
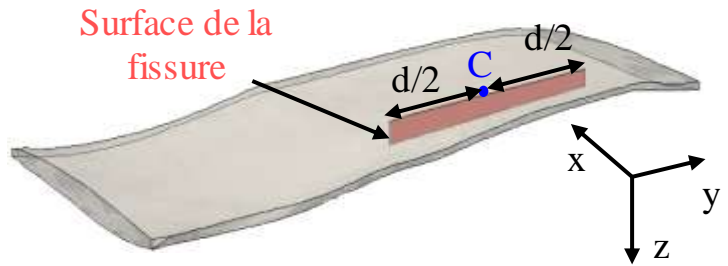
Énergie potentielle: $W(0)$ Énergie potentielle: $W(d)$

- Déformation à l'amorçage d'une fissure



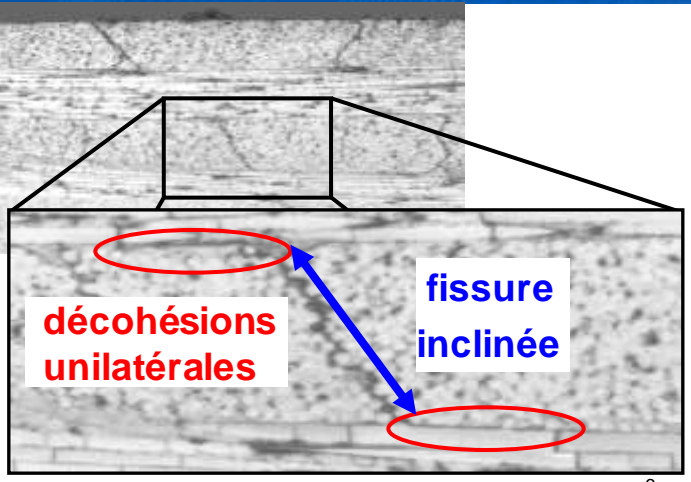
- Borne inférieure de la déformation à l'amorçage

Critère en contrainte

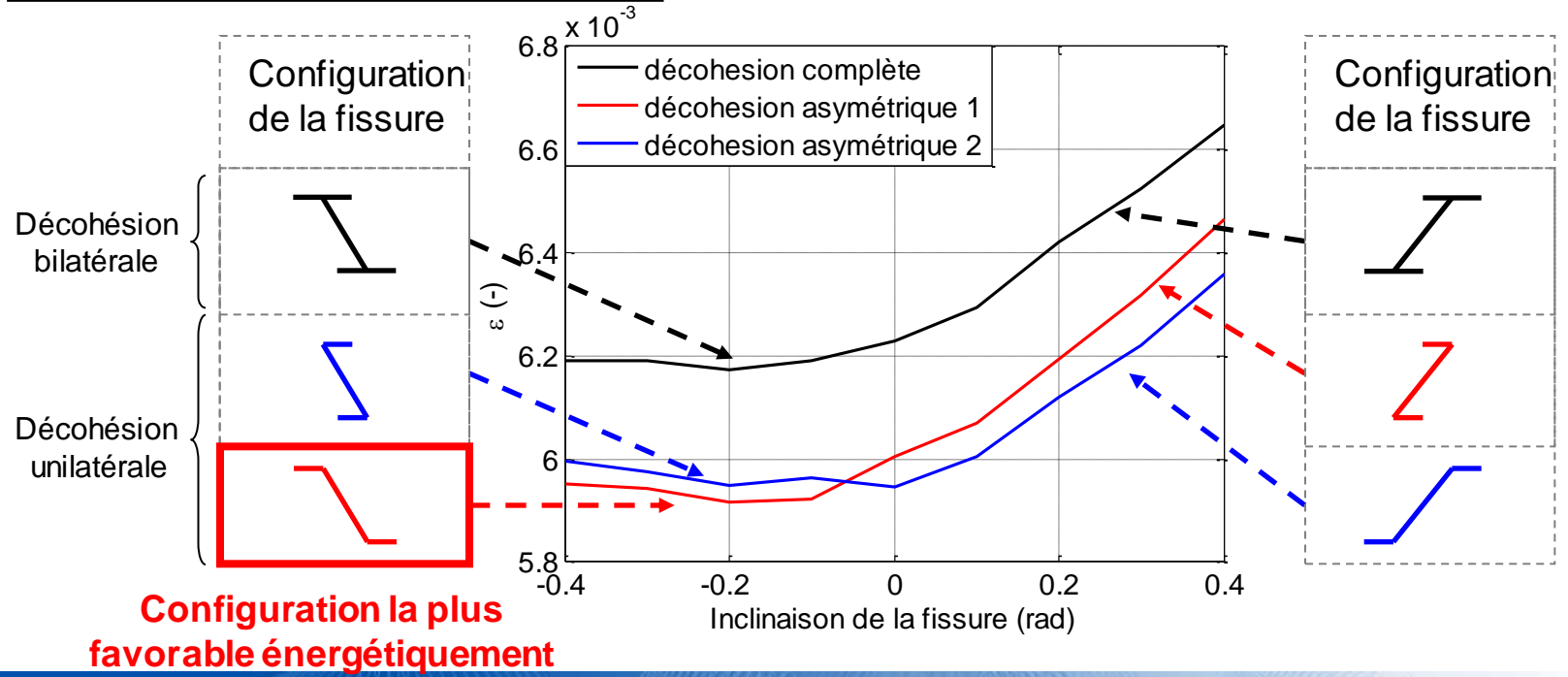
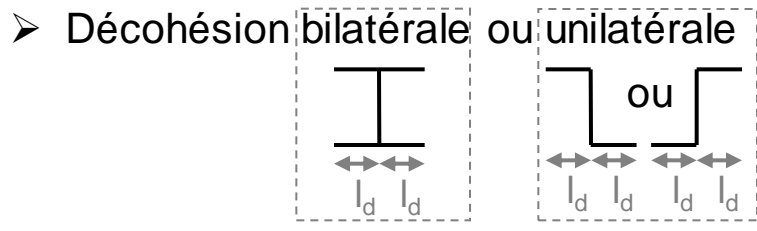


- Critère en contrainte atteint sur toute la surface de la fissure

Orientation de la fissure et décohésions



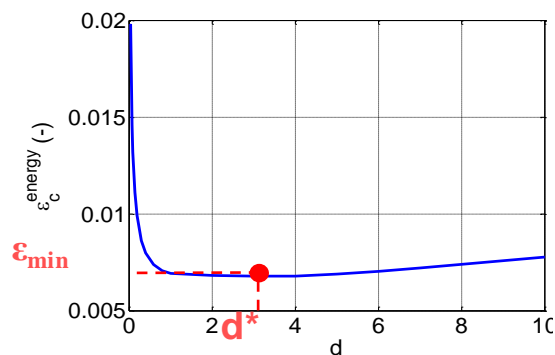
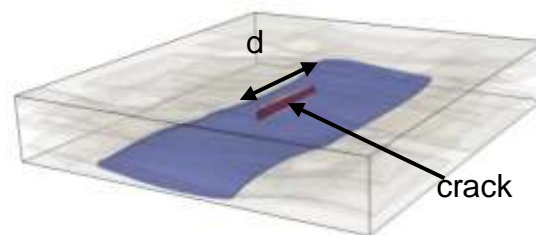
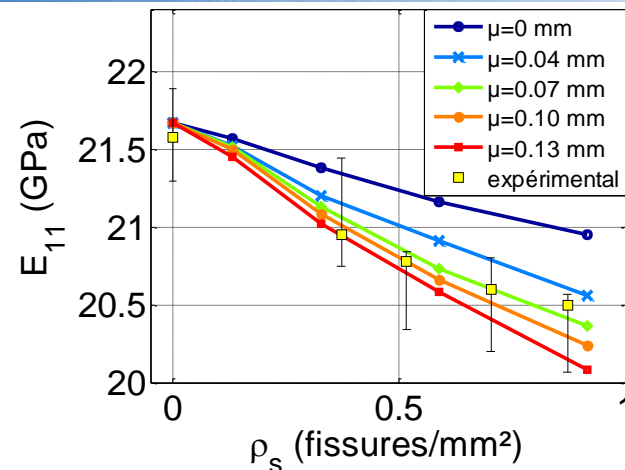
- Critère en énergie pour plusieurs configurations :
 - Prise en compte de l'inclinaison



- Introduction
- Observations expérimentales
- Procédure de modélisation
 - Géométrie et maillage
 - Modélisation discrète de l'endommagement
 - Effets de l'endommagement sur le comportement macroscopique
 - Critère couplé pour l'amorçage de l'endommagement
- **Conclusions et travaux de dernière année**

Conclusions

- Évolution des propriétés mécaniques en fonction de l'endommagement en bon accord avec les résultats expérimentaux
- Critère couplé permet de déterminer:
 - La localisation de la fissure
 - La configuration de la fissure
 - La longueur de la fissure
 - La déformation à l'amorçage



Travaux de dernière année



- Exploitation des essais de caractérisation de l'endommagement au cœur du matériau (Thermographie infrarouge, émission acoustique, tomographie)
- Utilisation du critère couplé pour déterminer une cinétique d'endommagement
 - Lien avec un modèle d'endommagement macroscopique
- Rédaction du manuscrit

Production scientifique

Communications :

- ODAS 2014, Cologne, “Experimental characterization and numerical modeling of damage at the mesoscopic scale of woven composites”.
- JNC 19, Lyon 2015, “Modélisation discrète de l’endommagement des composites tissés à matrice organique à l’échelle mésoscopique”.
- ICCS 18, Lisbonne 2015, “Numerical procedure for mesoscopic scale damage modeling of woven polymer matrix composites”.
- MechComp 2, Porto 2016, “Damage analysis in woven composites at the mesoscopic scale”.

Publications :

- A. Doitrand, C. Fagiano, FX. Irisarri, M. Hirsekorn. “Comparison between voxel and consistent meso-scale models of woven composites”. Composite Part A 2015;73:143-54.
- A. Doitrand, C. Fagiano, V. Chiaruttini, FH. Leroy, A. Mavel, M. Hirsekorn. "Experimental characterization and numerical modeling of damage at the mesoscopic scale of woven polymer matrix composites". Composites Science and Technology 2015;119:1-11.
- A. Doitrand, C. Fagiano, FH. Leroy, A. Mavel, M. Hirsekorn. “On the influence of fabric layer shifts on the strain distributions in a multi-layer woven composite”. Composite Structures. 2016;145:15-25.
- A. Doitrand, C. Fagiano, N. Carrère, V. Chiaruttini, M. Hirsekorn. “Damage onset modeling in woven composites based on a coupled stress and energy criterion”. En cours de rédaction.



Merci pour votre attention!

Endommagement à l'échelle mésoscopique et son influence sur la tenue mécanique des matériaux composites tissés

Aurélien Doitrand

Directeur de thèse: Nicolas Carrère (LBMS puis Safran Composites)

Encadrants Onera: Martin Hirsekorn, Christian Fagiano

Séminaire de remise des prix des Doctorants

07/04/2016

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation