

Vers une MEF fiable du procédé de déroulage



21 Novembre 2023 – Limoges, France

12^{ème} journées scientifiques du GDR Sciences du bois

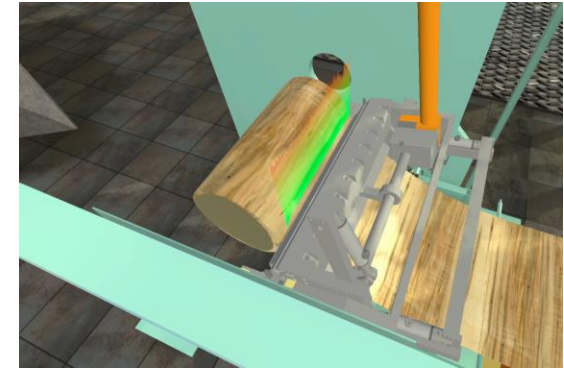
Mariem YAICH, Louis DENAUD, Joffrey VIGUIER

Projet **JENII** financé par l'**ANR**



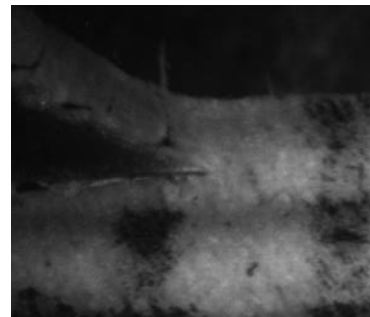
anr®

- Support pédagogique en complément des cours et des TP et favorisant l'apprentissage immersif
- Reproduire _ Simplifier des phénomènes physiques complexes mis en jeu
 - Outil numérique Simple et Rapide
 - Diffusion des savoirs
 - Compréhension des interactions entre Paramètres de coupe – Matériau – Qualité des placages
 - Dissociation de l'effet des différents paramètres
 - Choix des paramètres de coupe

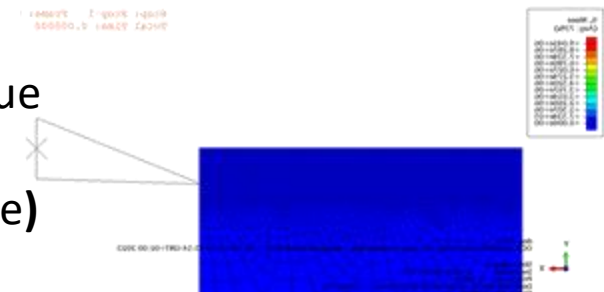


[R. FRAYSSINHES 2020]

**Base de données
expérimentales**



**Modélisation
numérique**
(méso-scopique
/
microscopique)



Contexte
général

Objectifs

Matériels
&
Méthodes

Résultats
&
Discussion

Motivations à la MEF



Produit final (Placage)

- Qualité supérieure
- Prop. Méca. maîtrisées



Matériau (Bois vert)

- Forte variabilité
- Nœuds
- Cernes de croissance
- Orientation des fibres

Travail d'expérimentation CONSÉQUENT

Procédé (Déroulage)

- Cond. Dyn.
- Interactions C. / B. / B.P.
- Réglages machine (Param. de coupe, Pression, Angles couteau)

V, H, T, Ep,
Nœuds...



Ligne de déroulage instrumenté
à l'échelle industrielle

Contexte
général

Objectifs

Matériels
&
Méthodes

Résultats
&
Discussion

Motivations à la MEF



Produit final (Placage)

- Qualité supérieure
- Prop. Méca. maîtrisées



Matériau (Bois vert)

- Forte variabilité
- Nœuds
- Cernes de croissance
- Orientation des fibres

Travail d'expérimentation CONSÉQUENT

Procédé (Déroutage)

- Cond. Dyn.
- Interactions C. / B. / B.P.
- Réglages machine (Param. de coupe, Pression, Angles couteau)

Modélisation numérique FIABLE

Valeurs locales et instantanées (ϵ , σ , T, d)

Compréhension de la formation/fissuration des placage

Dissociation des effets couplés Matériau / Procédé

Étude d'adéquation d'autres conditions de déroulage

Contrôle des paramètres de coupe

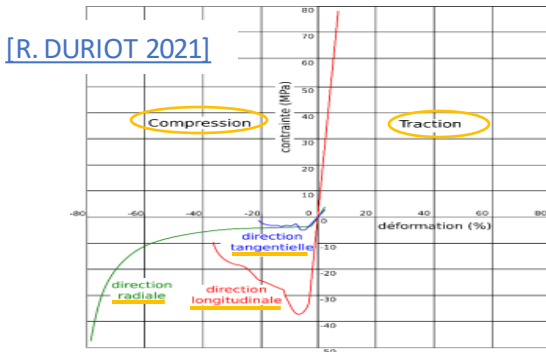
Contexte général

Objectifs

Matériels & Méthodes

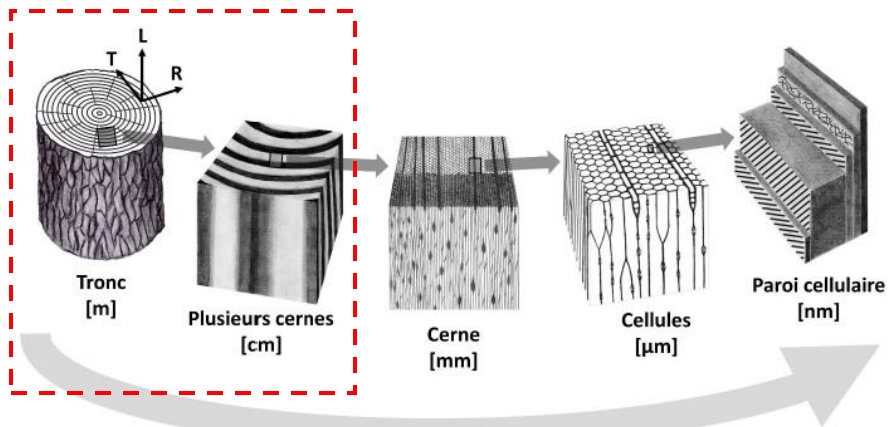
Résultats & Discussion

Définition du matériau



- Type de chargement
- Direction du chargement (L, R, T)

1) Forte variabilité



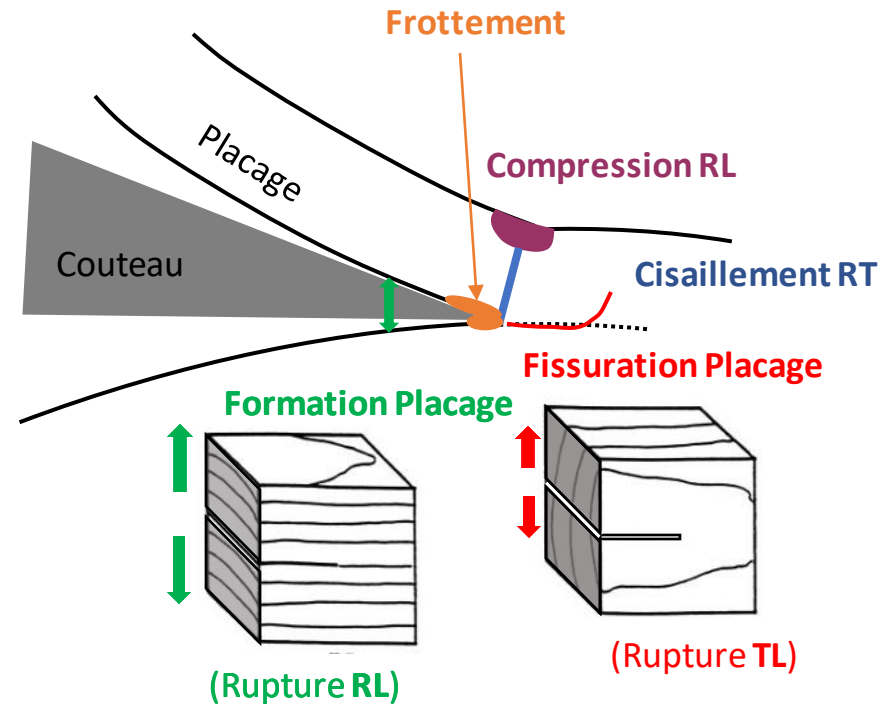
[M. Bonnet 2017]

2) Élasticité Orthotrope

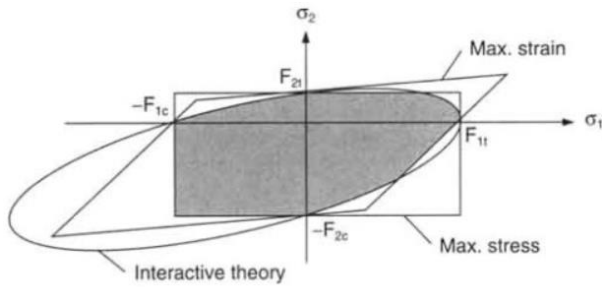
$$\begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_R \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_0)E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{(1-d_{RR})E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{(1-d_{TT})E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{LR})G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{LT})G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{RT})G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{RT} \end{bmatrix}$$

3) Initiation et propagation de l'endommagement :

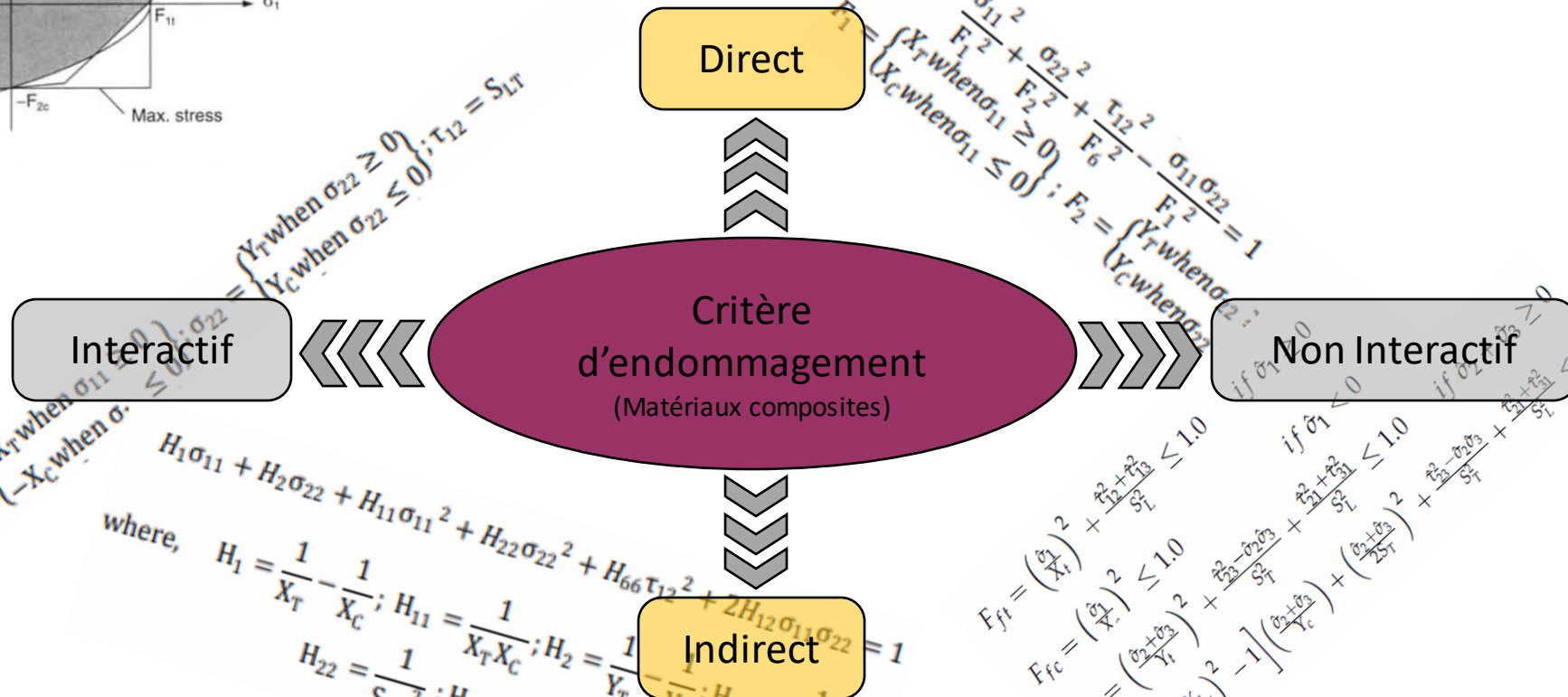
- Plans / Modes de rupture



Critère d'endommagement



[Daniel,1994]



$$F_1 = \begin{cases} X_T \text{ when } \sigma_{11} \geq 0 \\ X_C \text{ when } \sigma_{11} \leq 0 \end{cases}; F_2 = \begin{cases} Y_T \text{ when } \sigma_{22} \geq 0 \\ Y_C \text{ when } \sigma_{22} \leq 0 \end{cases}; \tau_{12} = S_{LT}$$

$$\frac{\sigma_{11}^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{F_2^2} + \frac{\tau_{12}^2}{F_6^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{F_1 F_2} = 1$$

$$F_{ft} = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{\sigma_2^2 + \tau_{23}^2}{S_{LT}^2} \leq 1.0$$

$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \leq 1.0$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3}{S_T^2} + \frac{\sigma_1^2 + \tau_{31}^2}{S_{LT}^2} \leq 1.0$$

$$F_{mc} = \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_C}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3}{S_T^2} + \frac{\sigma_1^2 + \tau_{31}^2}{S_{LT}^2} \leq 1.0$$

if $\sigma_1 > 0$

if $\sigma_1 < 0$

if $\sigma_2 + \sigma_3 > 0$

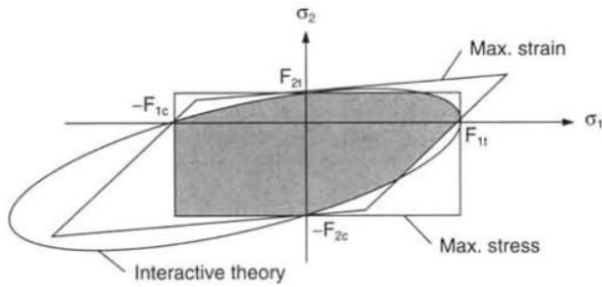
if $\sigma_2 + \sigma_3 < 0$

$$H_1\sigma_{11} + H_2\sigma_{22} + H_{11}\sigma_{11}^2 + H_{22}\sigma_{22}^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} = 1$$

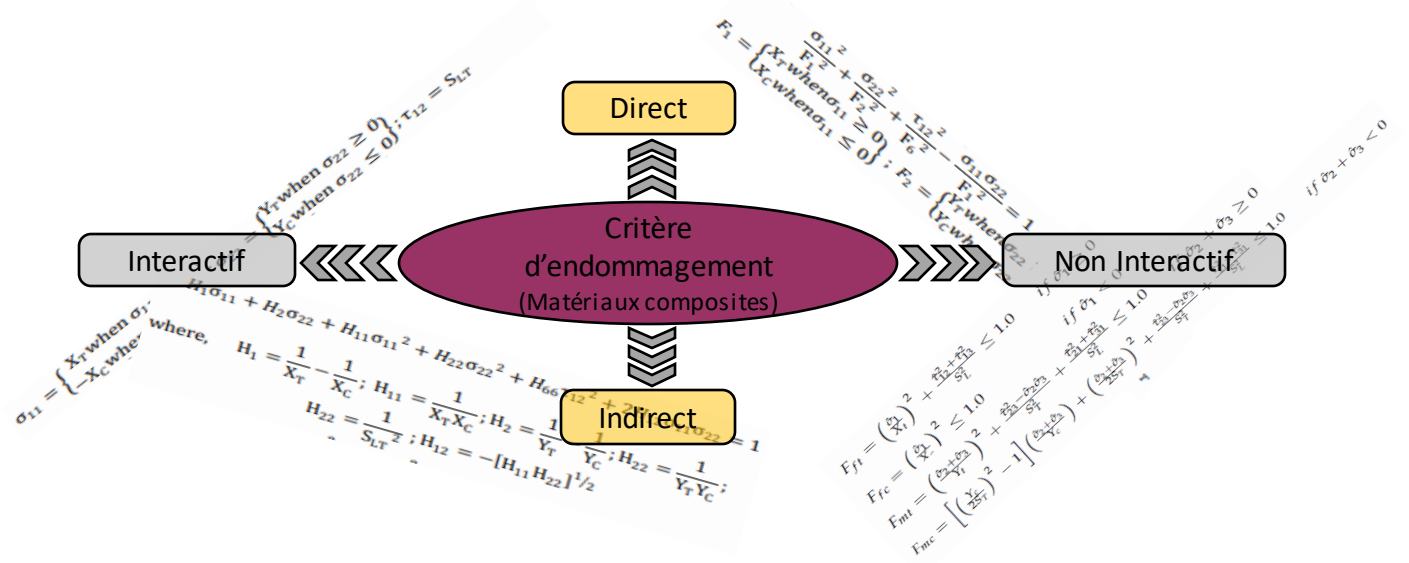
where, $H_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}$; $H_{11} = \frac{1}{X_T X_C}$; $H_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}$; $H_{22} = \frac{1}{S_{LT}^2}$; $H_{12} = -[H_{11} H_{22}]^{1/2}$

- Contexte général
- Objectifs
- Matériels & Méthodes**
- Résultats & Discussion

Critère d'endommagement



[Daniel,1994]

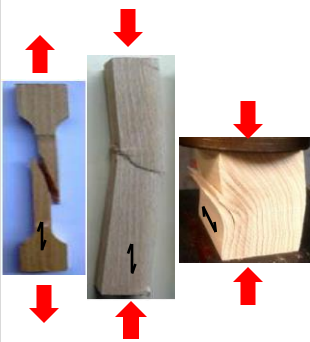


Contexte général

Objectifs

Matériels & Méthodes

Résultats & Discussion



Critère d'endommagement	Contrainte Maxi. (Dir. / Non Inter.)	Tsai Wu (Indir. / Inter.)	Hashin (Dir. / Inter.)
Direction de chargement (L, T, R)	-	+	+
Orientation des fibres	-	+	++
Type de chargement (Tr., Comp....)	+	+	++
Origine de la rupture (en f ^{ct} du type de chargement)	-	-	+
Interaction entre les modes d'end.	-	-	+

Critère d'endommagement

1) Initiation d'endommagement: Hashin (Hashin 1980)

$$F_{t_0^\circ} = \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_L^2}\right) \leq 1 \quad (\text{si: } \sigma_1 \geq 0)$$

$$F_{c_0^\circ} = \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \leq 1 \quad (\text{si: } \sigma_1 < 0)$$

$$F_{t_{90^\circ}} = \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_t}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 + \sigma_2\sigma_3}{S_T^2} + \frac{\tau_{21}^2 + \tau_{31}^2}{S_L^2} \leq 1$$

(si: $\sigma_2 + \sigma_3 \geq 0$)

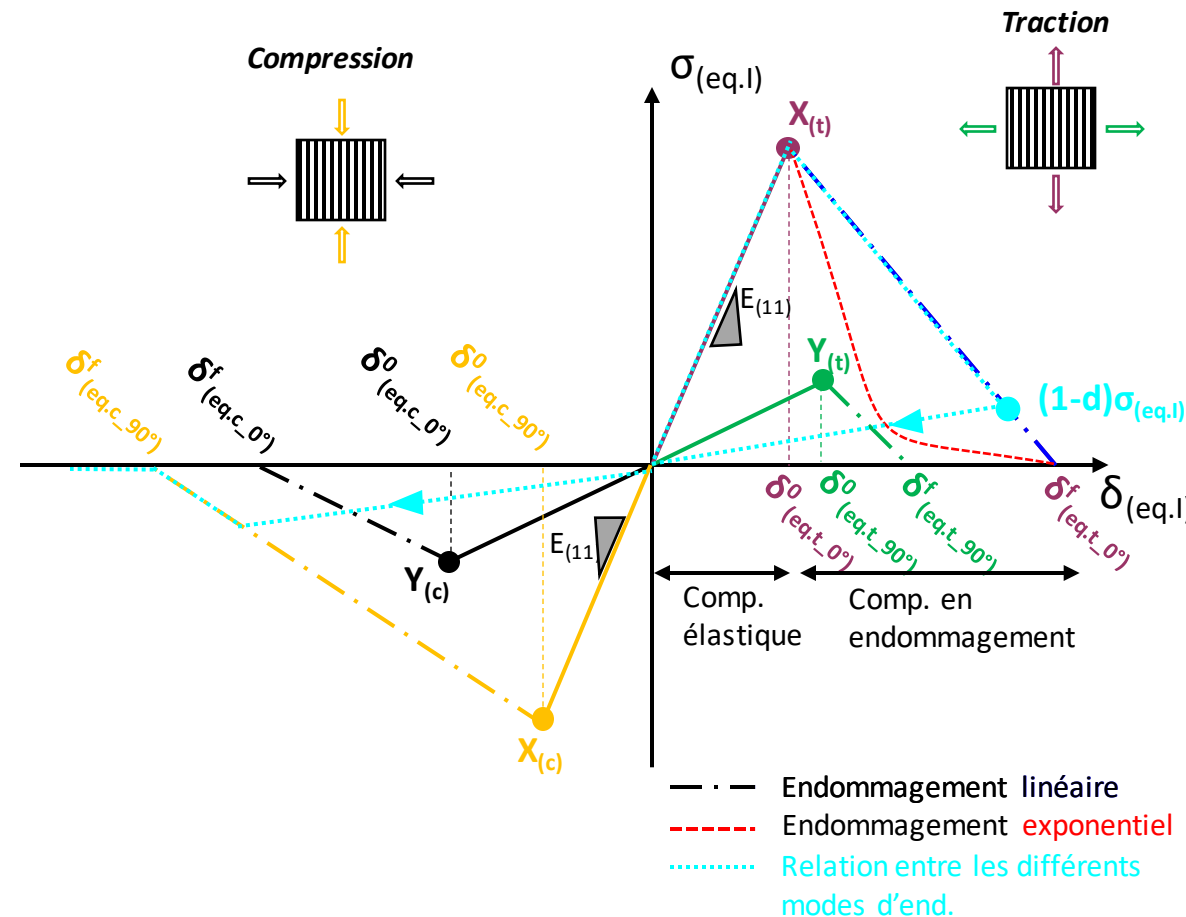
$$F_{c_{90^\circ}} = \left[\left(\frac{Y_c}{2S_t}\right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_c}\right) + \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2S_t}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 + \sigma_2\sigma_3}{S_T^2} + \frac{\tau_{21}^2 + \tau_{31}^2}{S_L^2} \leq 1 \quad (\text{si: } \sigma_2 + \sigma_3 < 0)$$

2) Évolution d'endommagement

Loi **linéaire**:
$$d_I = \frac{\delta_{I,eq}^f (\delta_{I,eq} - \delta_{I,eq}^0)}{\delta_{I,eq} (\delta_{I,eq}^f - \delta_{I,eq}^0)}$$

Loi **exponentielle**:
$$d_I = \frac{1 - e^{-\alpha(\delta_{I,eq}/\delta_{I,eq}^f)}}{1 - e^{-\alpha}}$$

où $d_I \in [0, 1]$; $I = tr0, c0, tr90, c90$



Modélisation numérique / Interaction Abaqus-Subroutine

Contexte général

Objectifs

Matériels & Méthodes

Résultats & Discussion

Abaqus

1) Modèle .cae

- Modèle Géométrique
- Prop Matériau (élasticité / initiation / évolution d'endommagement)
- Maillage
- Conditions initiales
- chargements
- Interactions
- Variables liés à la VUMAT (N^{bre} total/ sdv contrôlant la suppression des EF)

2) Creation of Input File (.inp)

SOLVER
(Explicit / Implicit)

SUBROUTINE

	Mechanical Constants
1	13000
2	860
3	860
4	0.39
5	0.39
6	0.33
7	810
8	810
9	59
10	41
11	45
12	1
13	14.2
14	1
15	14.2
16	6.9
17	6.9
18	0.5
19	1E-06
20	100
21	0.71
22	1.2
23	0.6
24	1
25	3
26	2
27	

Paramètres
d'entrée à
la VUMAT

Material Behaviors
Density
Depvar
User Material

Variables
de sortie de
la VUMAT

Depvar

Number of solution-dependent state variables: 60

Variable number controlling element deletion: 5

Modélisation numérique / Interaction Abaqus-Subroutine

SOLVER
(Explicit / Implicit)

SUBROUTINE



Calcul explicite / Implicit:

- DLOAD / VDLOAD
- DISP / VDISP
- UINTER / VUINTER
- UHARD / VUHARD
- UMAT / **VUMAT**

Étapes:

- Mat. Orthotrope 2D/3D
- Tenseur de rigidité
- État de contrainte
- Initiation d'end.
- Évolution d'end.
- Rupture
- MÀJ des SDV / σ / Ener.

Contexte général

Objectifs

Matériels & Méthodes

Résultats & Discussion

****Solution Dependent Variables****

Parameter	Description
state(*,1:4)	Damage initiation coefficients(tensile/compression _ 0F/90F)
state(*,5)	Variable controlling the FE deletion
state(*,6:13)	Equivalent stress/displacement at damage initiation (tensile/compression _ 0F/90F)
state(*,14:17)	damage evolution coefficients (tensile/compression _ 0F/90F)
state(*,18:21)	verification of damage initiation
state(*,22)	beta dumping state
state(*,23:28)	strain tensor components
state(*,29:34)	stress damping tensor components
state(*,37:40)	Characteristic FE length in different directions at damage initiation
state(*,41:44)	Equivalent displacement in different directions at total fracture
state(*,45)	Characteristic FE length
state(*,46)	damage initiation criterion
state(*,47:54)	current values of stress/displacement (tensile/compression _ 0F/90F)
state(*,60)	total number of required SDV

****Orthotropic Material Constants****
****Read VUMAT inputs (material properties)****

Material Prop.	N° of User Mat. Prop.	Description
E_L	1	Longitudinal elastic Young's modulus(Fiber: 11 axis)
E_R	2	Radial elastic Young's modulus (Matrix: 22 axis)
E_T	3	Tangential elastic Young's modulus (Interlaminar: 33 axis)
xnu_LR_MAT	4	Poisson ratio (1-2 plane)
xnu_LT_MAT	5	Poisson ratio (1-3 plane)
xnu_RT_MAT	6	Poisson ratiion (2-3 plane)
G_LR_MAT	7	Elastic Shear Modulus (1-2 plane)
G_LT_MAT	8	Elastic Shear Modulus (1-3 plane)
G_RT_MAT	9	Elastic Shear Modulus (2-3 plane)
f0t_MAT	10	Tensile strength (Sig11_tr)
f0c_MAT	11	Compressive strength (Sig11_Comp)
f90Rt_MAT	12	Tensile strength (Sig22_Tr)
f90Rc_MAT	13	Compressive strength (Sig22_Comp)
f90tT_MAT	14	Tensile strength (Sig33_tr)
f90tC_MAT	15	Compressive strength (Sig33_Comp)
fLRs_MAT	16	Shear Strength (1-2 plane)
fLTs_MAT	17	Shear Strength (1-3 plane)
fRTs_MAT	18	Shear Strength (2-3 plane)
betaDamp_MAT	19	Damping proportional to the strain rate
Gft_MAT	20	Fracture energy (fiber tension mode)
Gfc_MAT	21	Fracture energy (fiber compression mode)
Gmt_MAT	22	Fracture energy (matrix tension mode)
Gmc_MAT	23	Fracture energy (matrix compression mode)
verif_MAT	24	Verification of plane stress case (NDIR==3 .and. NSHR==1)
Longi_Dir	25	N° of principal dir. corresponding to Longitudinal dir.
Rad_Dir	26	N° of principal dir. corresponding to Radial dir.
Tang_Dir	27	N° of principal dir. corresponding to Tangential dir.

```

- 3D Orthotropic Elasticity with Hashin 3d Failure criterion are defined
subroutine vumat(
c Read only -
1 nblock, ndir, nshr, nstatev, nfieldv, nprops, lanneal,
2 stepTime, totalTime, dt, curname, coordMp, charLength,
3 props, density, strainInc, relSpinInc,
4 tempOld, stretchOld, defgradOld, fieldOld,
5 stressOld, stateOld, enerInternOld, enerInelasOld,
6 tempNew, stretchNew, defgradNew, fieldNew,
c Write only -
7 stressNew, stateNew, enerInternNew, enerInelasNew )
c
include 'vaba_param.inc'
c
character*80 curname

integer ndi, nshr, ntens, nstatv, nprops
real*8 props(nprops), density(nblock), coordMp(nblock,*)
real*8 charLength(*), strainInc(nblock,ndir+nshr)
real*8 relSpinInc(nblock,nshr), tempOld(nblock)
real*8 stretchOld(nblock,ndir+nshr)
real*8 defgradOld(nblock,ndir+nshr+nshr)
real*8 fieldOld(nblock,nfieldv), stressOld(nblock,ndir+nshr)
real*8 stateOld(nblock,nstatev), enerInternOld(nblock)
real*8 enerInelasOld(nblock), tempNew(*)
real*8 stretchNew(nblock,ndir+nshr)
real*8 defgradNew(nblock,ndir+nshr+nshr)
real*8 fieldNew(nblock,nfieldv), stressNew(nblock,ndir+nshr)
real*8 stateNew(nblock,nstatev)
real*8 enerInternNew(nblock), enerInelasNew(nblock)

..... Définir les variables locales
..... Définir les propriétés matérielles
!..... Code pour le calcul de la matrice de rigidité et des contraintes
!..... Code pour la vérification de l'initiation de l'endommagement et son évolution
!..... Mise à jour de la matrice de régidité, des contraintes et de l'état d'endommagement

return
end
    
```

Modélisation numérique / Interaction Abaqus-Subroutine

Abaqus

1) Modèle .cae

- Modèle Géométrique
- Prop Matériau (élasticité / initiation / évolution d'endommagement)
- Maillage
- Conditions initiales
- chargements
- Interactions
- Variables liés à la VUMAT (N^{bre} total/ sdv contrôlant la suppression des EF)

2) Creation of Input File (.inp)

SOLVEUR

(Explicit / Implicit)

Processus d'Analyse

Pour chaque incrément / EF

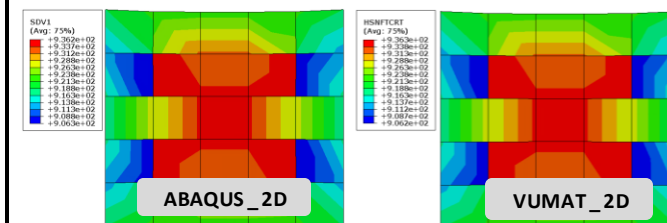
- Stabilité
- Déf. incrémentale
- Initiation d'end.
- Évolution d'end.
- Rupture totale
- Contraintes et énergies

Post-traitement

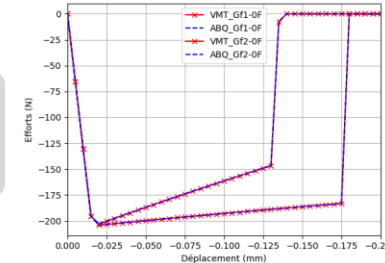
Résultat final (.odb)
Compileur (.log)

VUMAT

- Mat. Orthotrope 2D/3D
- Tenseur de rigidité
- État de contrainte
- Initiation d'end.
- Évolution d'end.
- Rupture
- MàJ des SDV / σ / Ener.



Essai de traction selon L



1. Initiation d'end:
 - Critère de Hashin
2. Évolution d'end:
 - Loi linéaire

Contexte
général

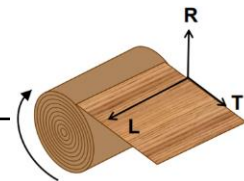
Objectifs

Matériels
&
Méthodes

Résultats
&
Discussion

Motivations à la VUMAT

Paramètres	Subroutine VUMAT	Abaqus
Type des calculs	Explicit (2D / 3D)	Implicit / Explicit (2D contrainte plane)
Initiation d'end	(Hashin and Rotem 1973) ; (Hashin 1980); autres...	(Hashin and Rotem 1973) ; (Hashin 1980)
Modifications	Oui	Non
Compatibilité au déroulage	Oui	Non



Contexte général

Objectifs

Matériels & Méthodes

Résultats & Discussion

$$F_{t_{0^\circ}} = \left(\frac{\sigma_1}{X_t} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}^2 + \gamma \tau_{13}^2}{S_L^2} \right) \leq 1 \quad (\text{si: } \sigma_1 \geq 0)$$

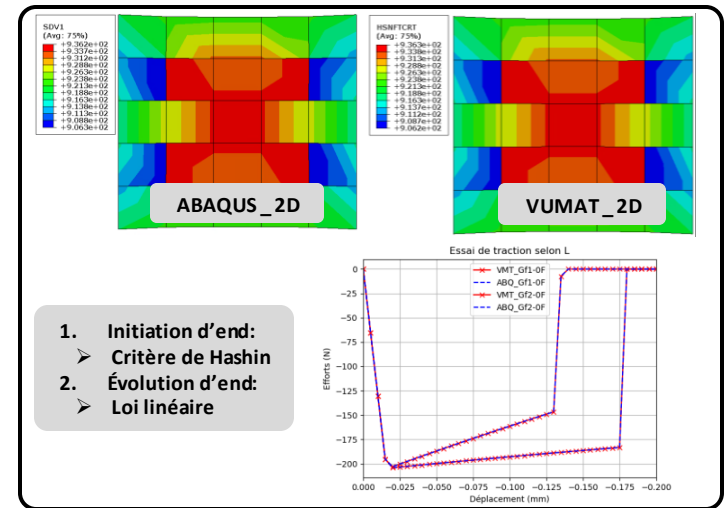
$$F_{c_{0^\circ}} = \left(\frac{\sigma_1}{X_c} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{si: } \sigma_1 < 0)$$

Longitudinal Tensile Strength	Longitudinal Compressive Strength	Transverse Tensile Strength	Transverse Compressive Strength	Longitudinal Shear Strength	Transverse Shear Strength
X_t	X_c	Y_t	Y_c	S_L	S_T

$$F_{t_{90^\circ}} = \left(\frac{\sigma_2 + \gamma \sigma_3}{Y_t} \right)^2 + \gamma \frac{\tau_{23}^2 + \sigma_2 \sigma_3}{S_T^2} + \frac{\tau_{21}^2 + \gamma \tau_{31}^2}{S_L^2} \leq 1 \quad (\text{si: } \sigma_2 + \sigma_3 \geq 0)$$

$$F_{c_{90^\circ}} = \left[\left(\frac{Y_c}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\sigma_2 + \gamma \sigma_3}{Y_c} \right) + \left(\frac{\sigma_2 + \gamma \sigma_3}{2S_T} \right)^2 + \gamma \frac{\tau_{23}^2 + \sigma_2 \sigma_3}{S_T^2} + \frac{\tau_{21}^2 + \gamma \tau_{31}^2}{S_L^2} \leq 1$$

(si: $\sigma_2 + \sigma_3 < 0$)

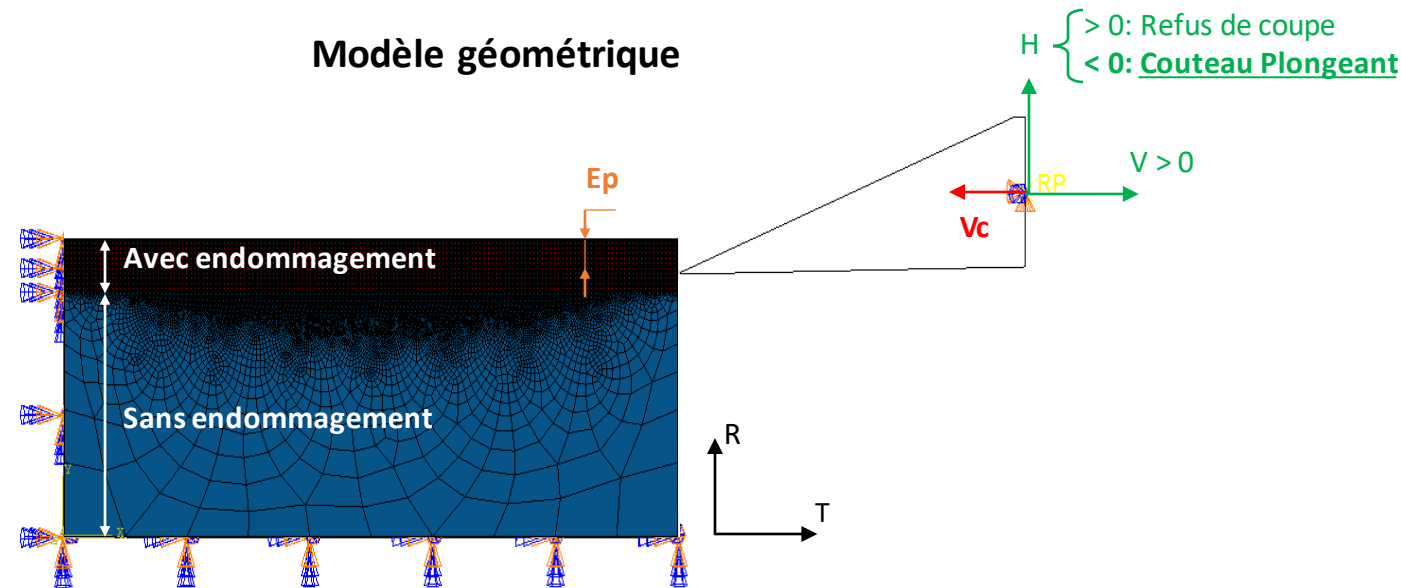


Modélisation du déroulage

Conditions de coupe	
Vitesse de coupe (V_c)	1,5 m/s
Angle couteau (α)	18°
Angle talonnage (γ)	3°
Coeff. de frottement (ν)	0,3
Température billon (T)	20 °C
Pas de barre de pression	
Hêtre	



Modèle géométrique



Paramètre étudié:

Epaisseur placage

$Ep_1 = 0,6 \text{ mm}$

$Ep_2 = 2 \text{ mm}$

Contexte
général

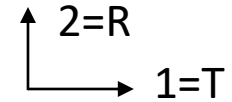
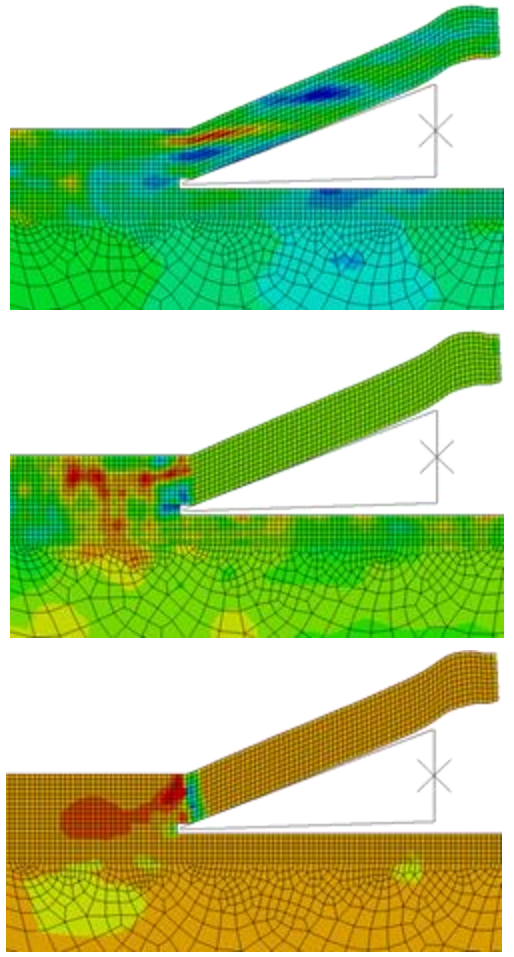
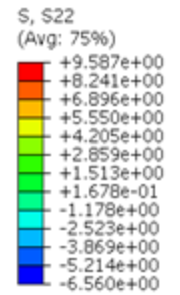
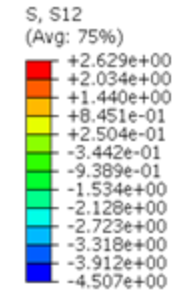
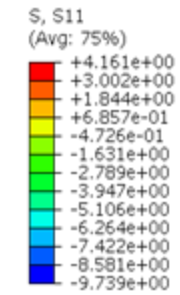
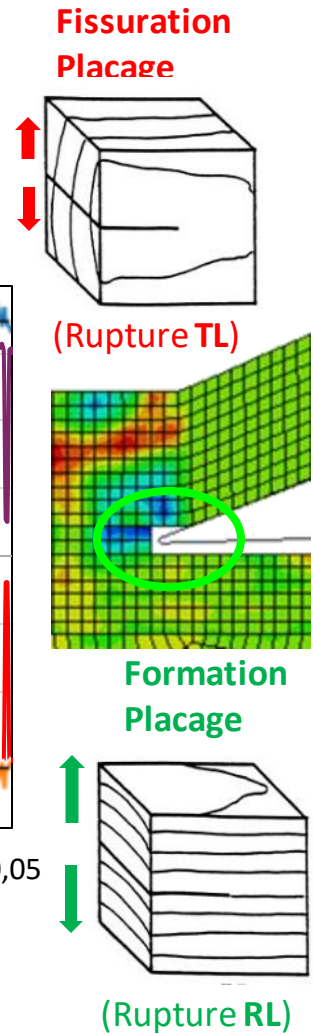
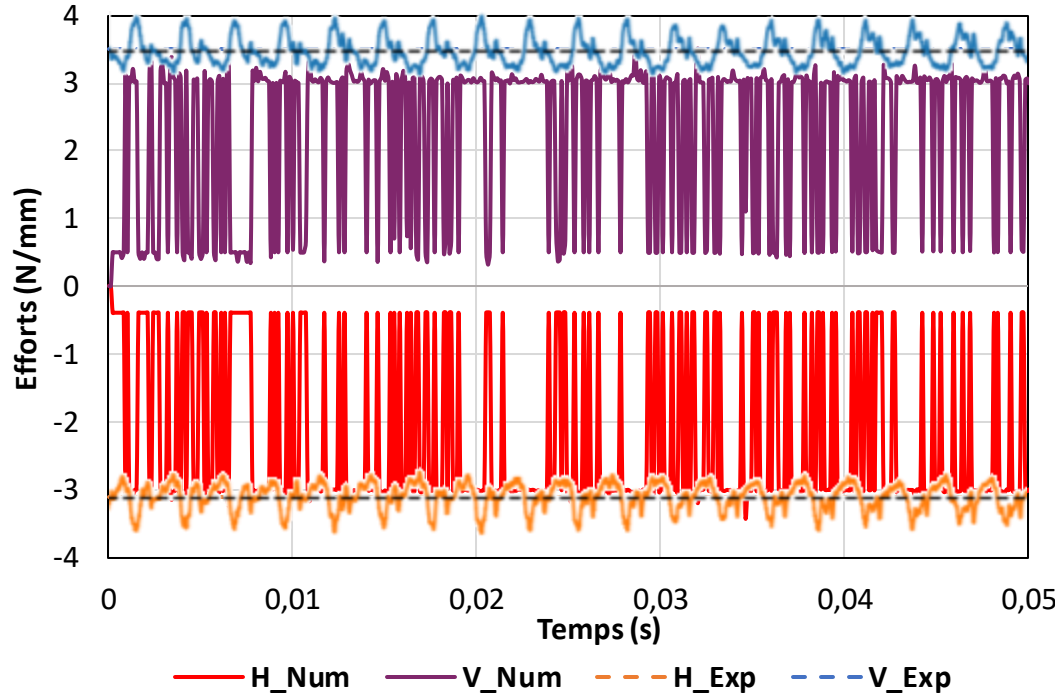
Objectifs

Matériels
&
Méthodes

Résultats
&
Discussion

Modélisation du déroulage

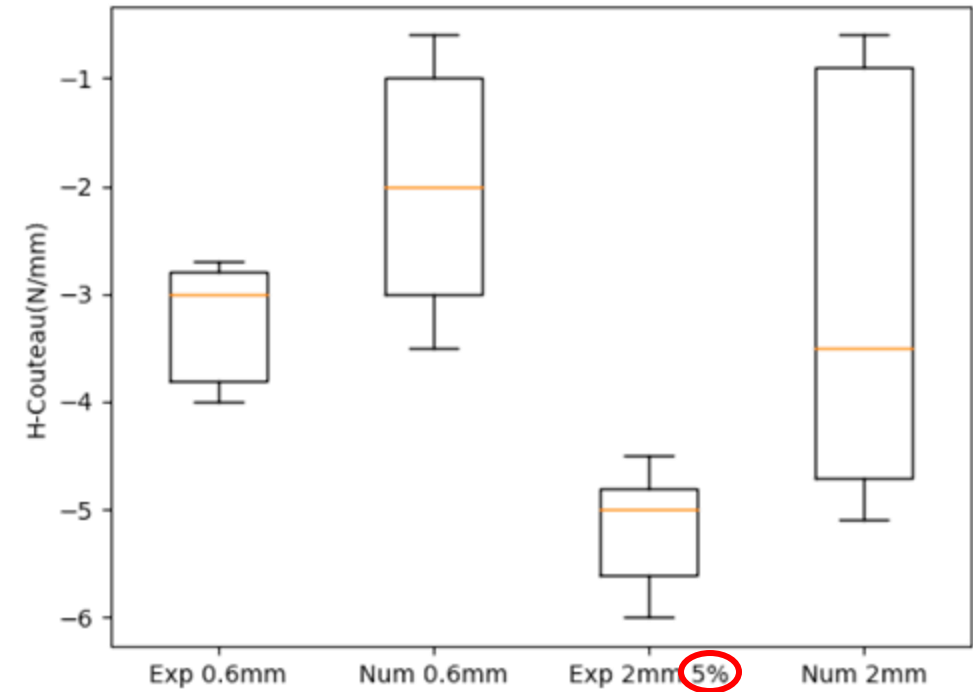
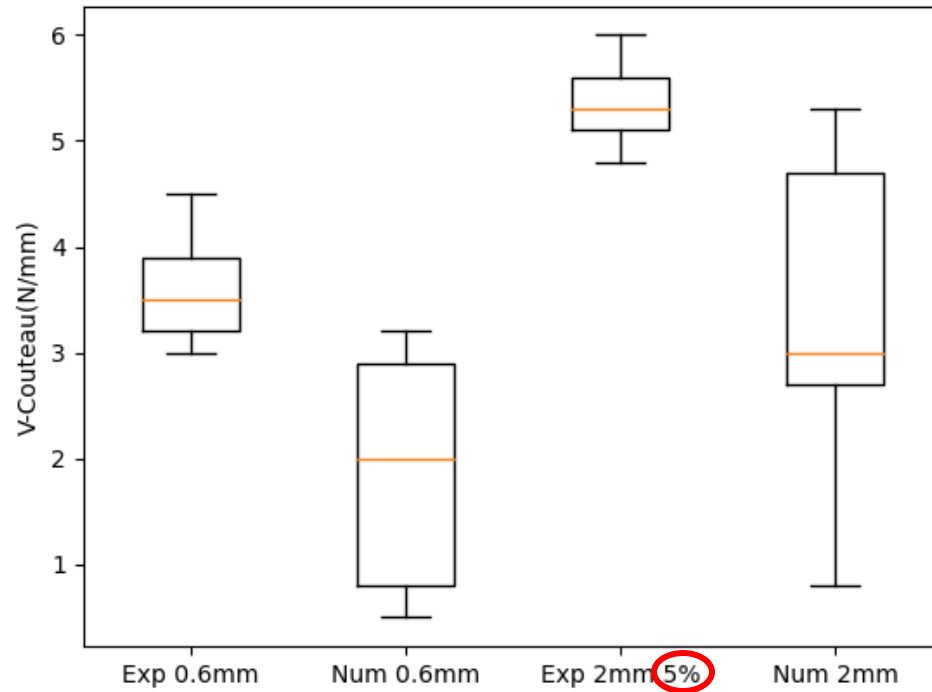
Ep = 0,6 mm:



- Contexte général
- Objectifs
- Matériels & Méthodes
- Résultats & Discussion

Contexte
général

Objectifs

Matériels
&
MéthodesRésultats
&
Discussion

À suivre....