



Modélisation numérique de l'interface collée pultrudé - béton

Ibrahim ALACHEK^{*1}, Nadège REBOUL¹ et Bruno JURKIEWIEZ¹

**Ibrahim.alachek@univ.lyon1.fr*

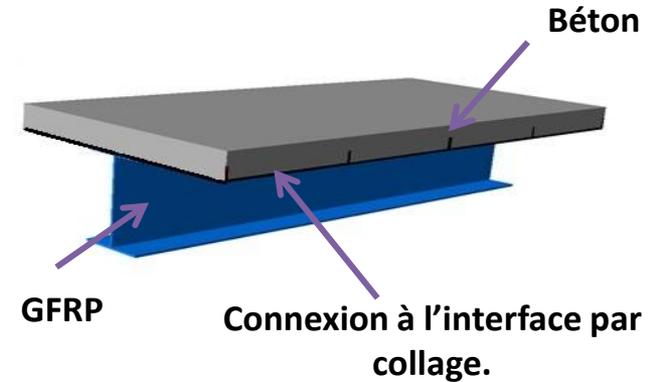
¹Université Claude Bernard Lyon1, laboratoire des matériaux composites pour la construction



Le 25 novembre 2016

Club Cast3M 2016

Contexte & Enjeux



Avantages

- Rapidité de mise en œuvre
- Résistance contre la corrosion
- Rapport résistance-poids élevé
- Réduction des coûts
- Moindre incidence des intempéries sur le déroulement du chantier
- Environnement contrôlé pour la production de béton

Objectifs

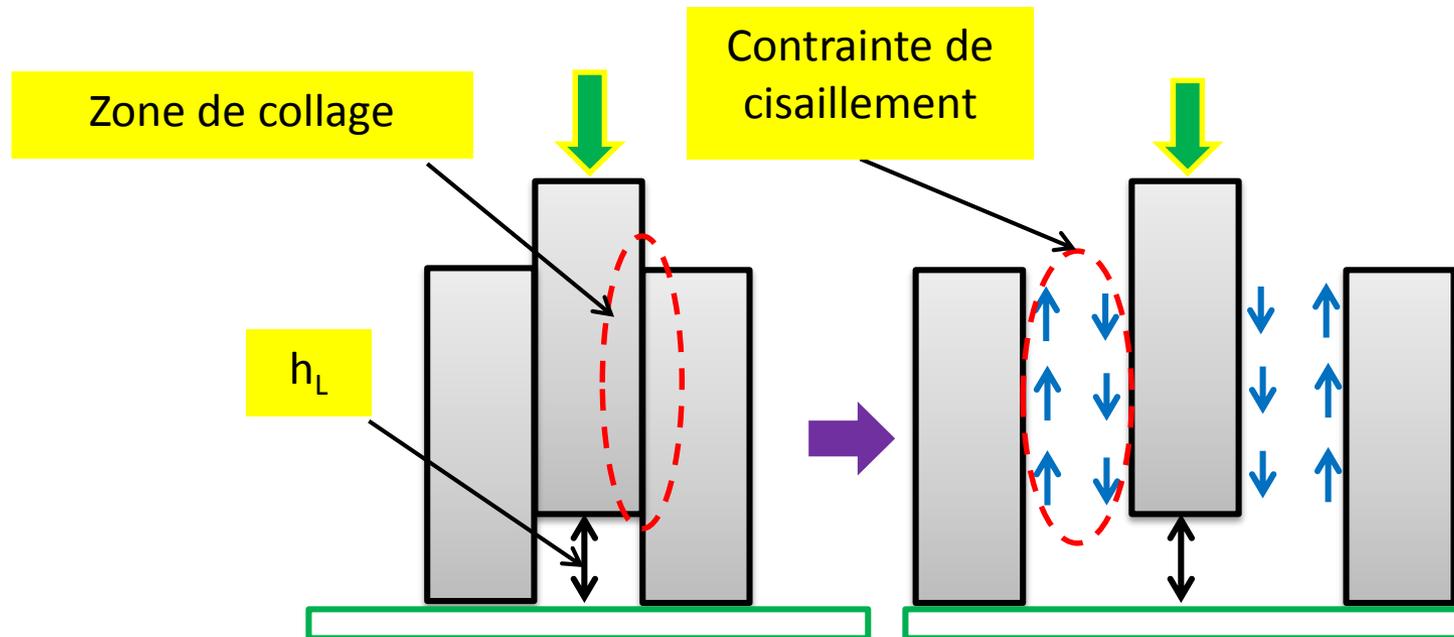


Objectifs

L'étude vise à:

- Garantir la qualité, la fiabilité.....
- Améliorer la performance mécanique des assemblages béton-GFRP
- Étudier la distribution des contraintes à l'interface
- Améliorer les connaissances sur le comportement instantané de ce type d'assemblage

Essai de caractérisation



Essai de poussée « Push out »

- C'est un essai de cisaillement pour caractériser le joint et tester sa capacité de transférer les efforts
- Cet essai convient pour traduire le plus fidèlement possible l'état de sollicitation du joint (traction/cisaillement)

Sommaire

I. Modèle numérique

I.1 Géométrie

I.2 Stratégie de maillage

I.3 Principales hypothèses

I.4 Défis de simulation

II. Pré-simulations élastiques

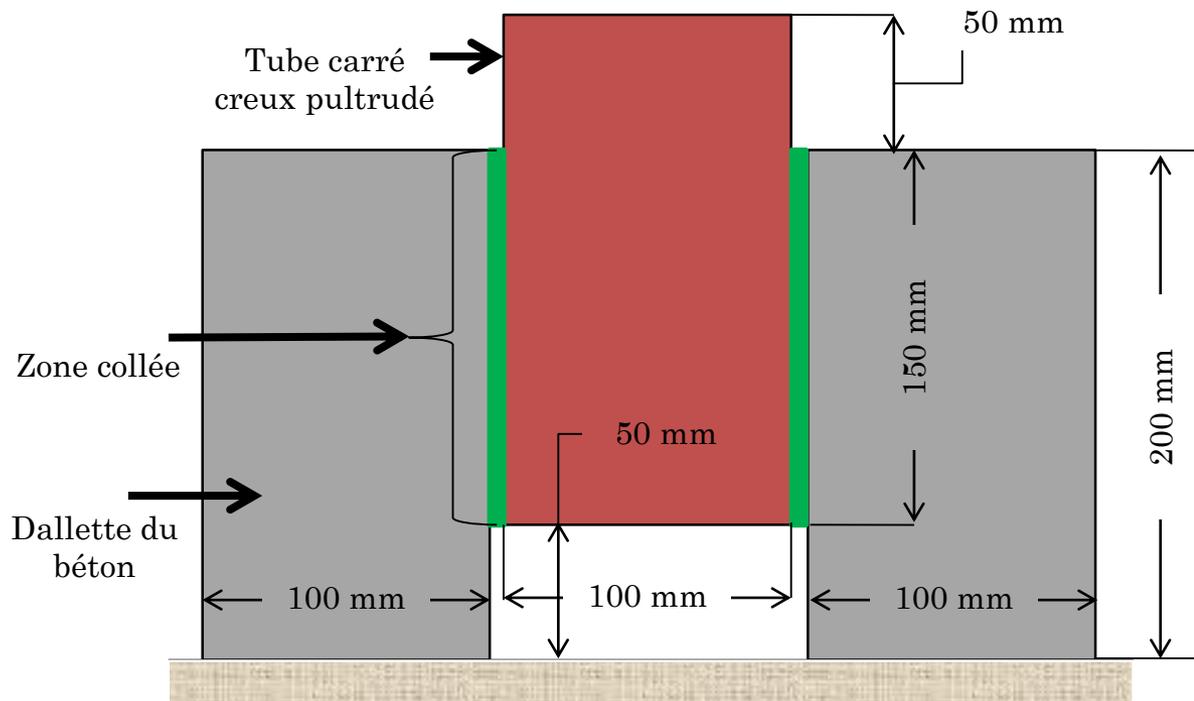
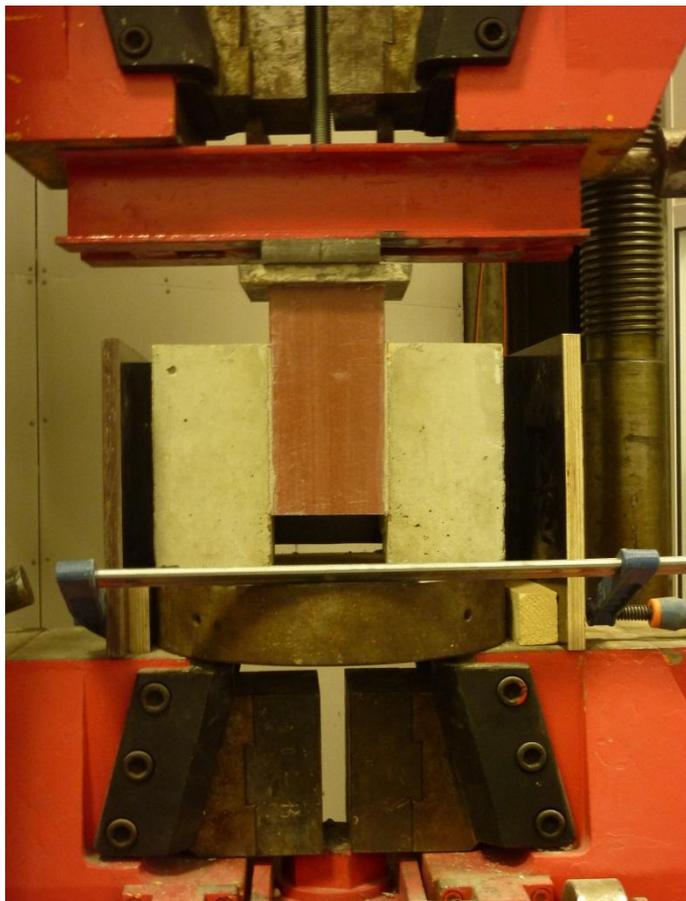
III. Simulations dans le domaine non linéaire

III.1 Modèles retenus

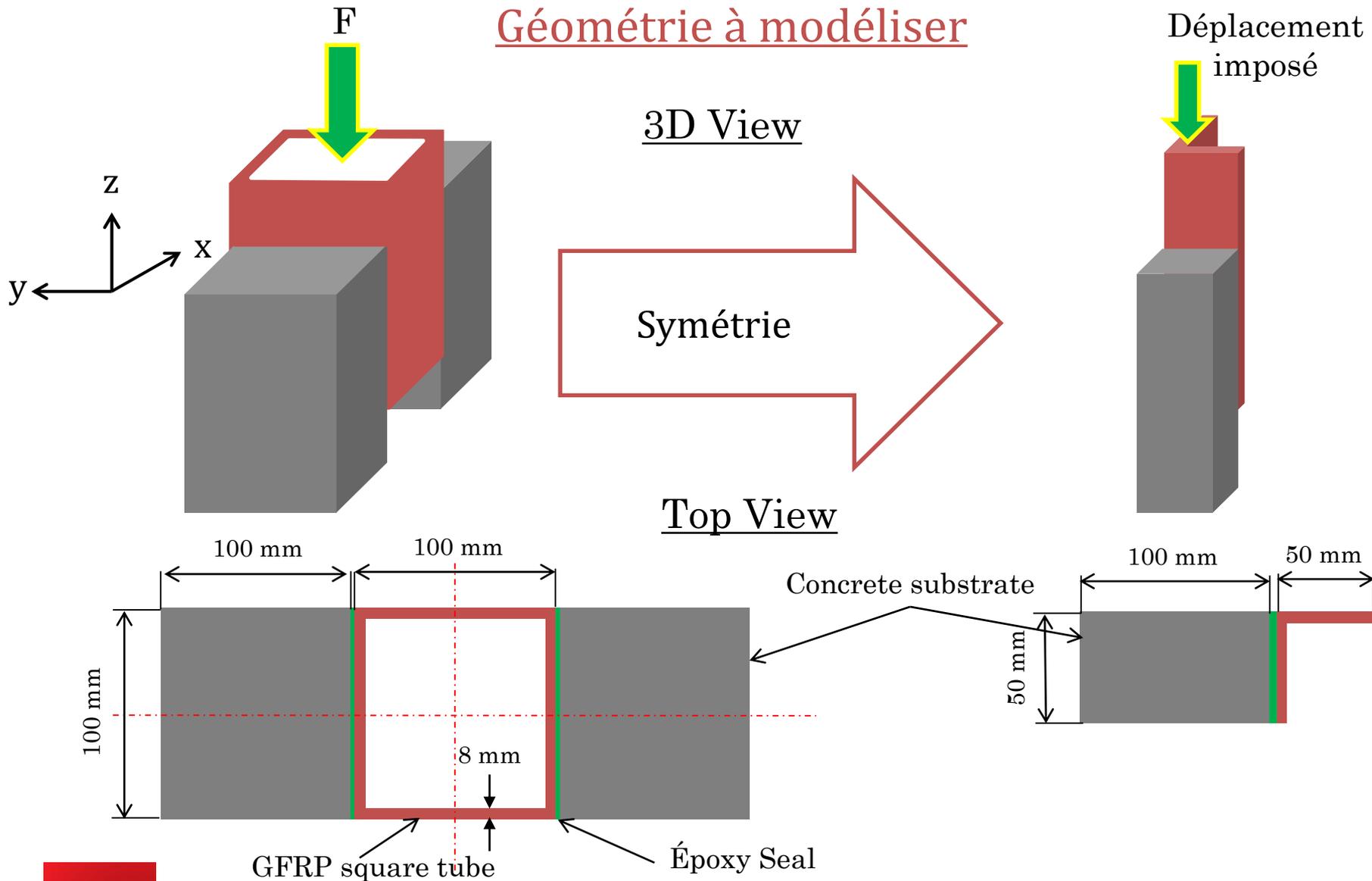
III.2 Résultats et discussion

IV. Conclusions & Perspectives

Géométrie



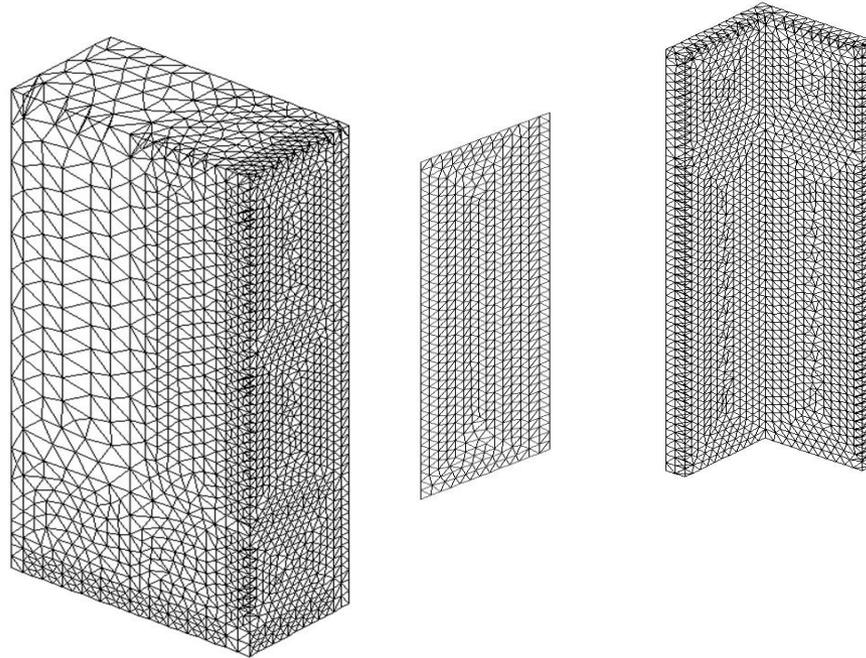
Géométrie à modéliser



Stratégie de maillage

Maillage très fin
autour de l'interface

La contrainte est très importante autour et dans la zone à proximité du joint collé



Maillage
moins
serré

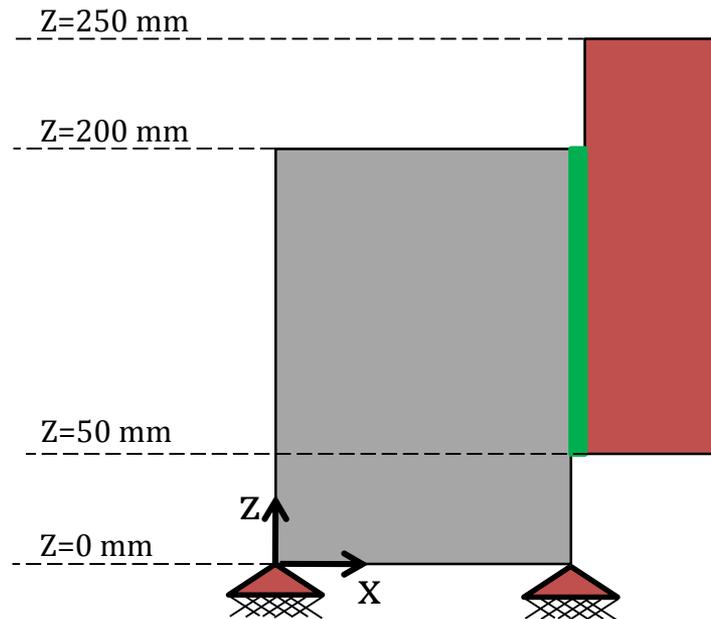
Dans les zones où les chargements ou les conditions limites sont imposés afin de limiter au maximum les effets de concentration et gradients de contraintes.

Principales hypothèses

Hypothèse n°1

Il existe du frottement entre le bloc du béton et la plaque de presse

Tous les déplacements en pied de bloc ($z = 0$) sont bloqués pour tenir compte du frottement possible des blocs sur la presse.



Hypothèse n°2

La longueur caractéristique est de trois fois la taille de la plus grande hétérogénéité [Bazant & Pijaudier-Cabot, 1989], soit $L_c = 3 \times 8 = 24$ mm

Défis de simulation

Difficultés du problème

- Un nombre trop important de nœuds, pénalisant en terme d'utilisation de la mémoire vive
- Non-linéarité du comportement du béton, due de la fissuration par traction du béton principalement
- la construction de la matrice de connectivité nécessite des capacités mémoires considérables, elle limite la génération du maillage et le choix de la longueur caractéristique

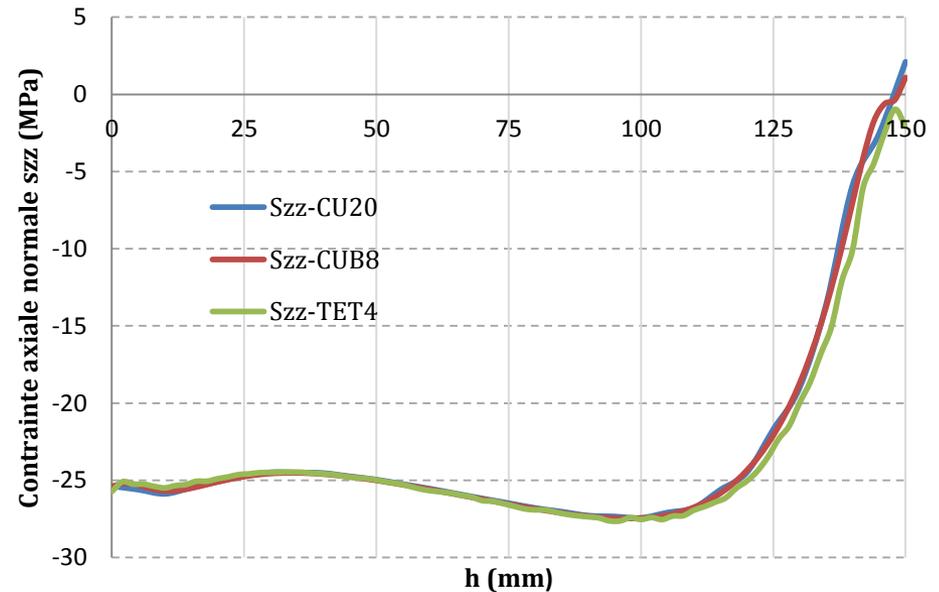
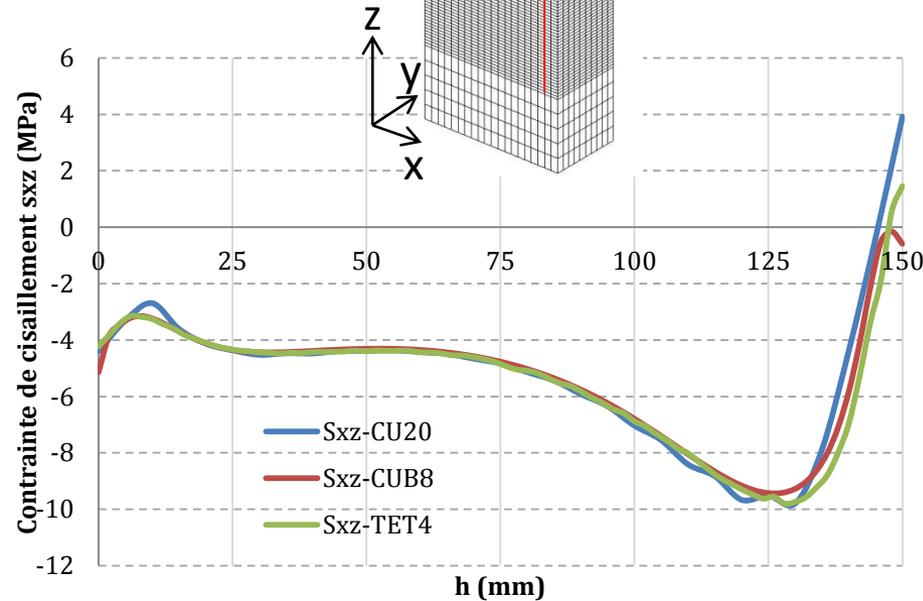
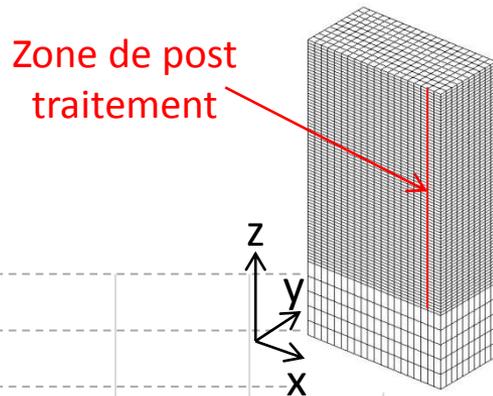
Problème non-linéaire

- Méthode itérative découplée de type Newton-Raphson approché
- Code de calcul aux éléments finis Cast3M [Cast3M, 2015] 

Pré-simulations élastiques

Pré-simulations élastiques

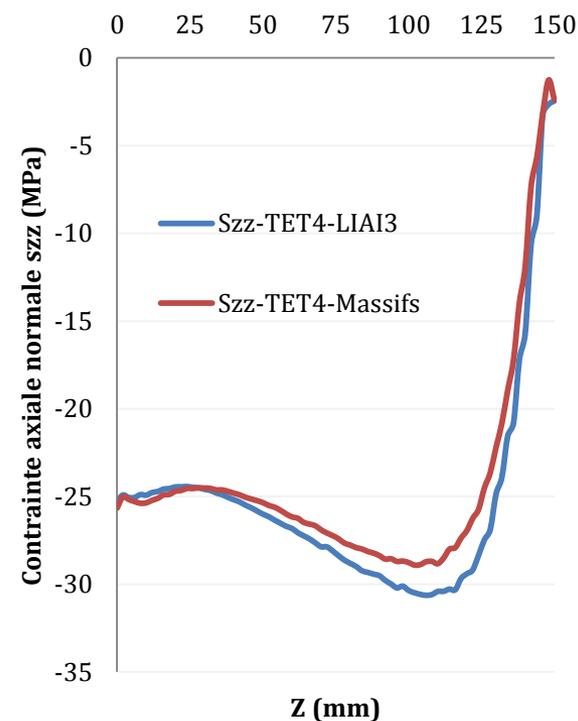
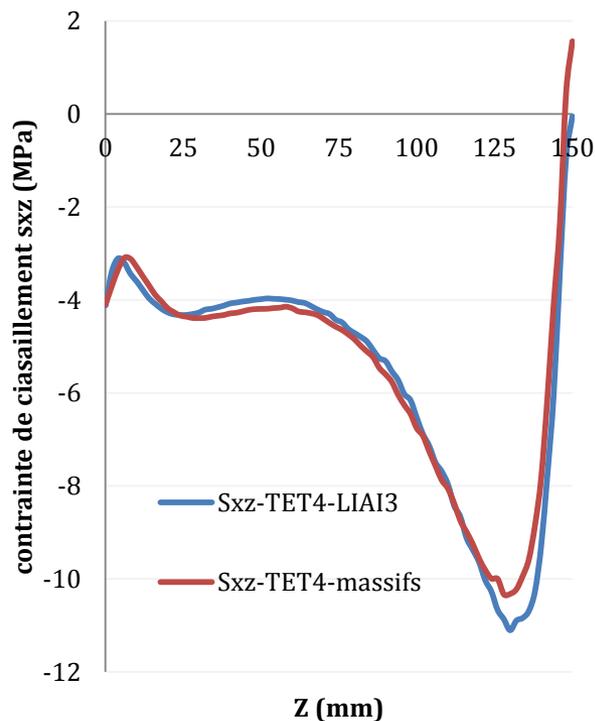
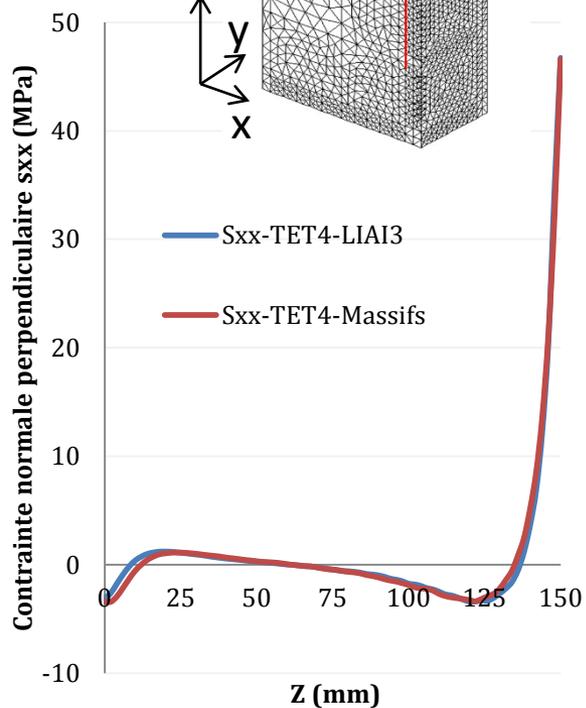
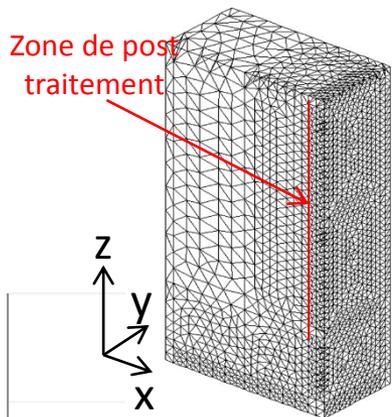
Comparaison entre les éléments tétraédriques et hexaédriques



- Les courbes ont les mêmes allures générales et sont presque confondues
- Les éléments d'interpolation linéaire réduisent le temps de calcul

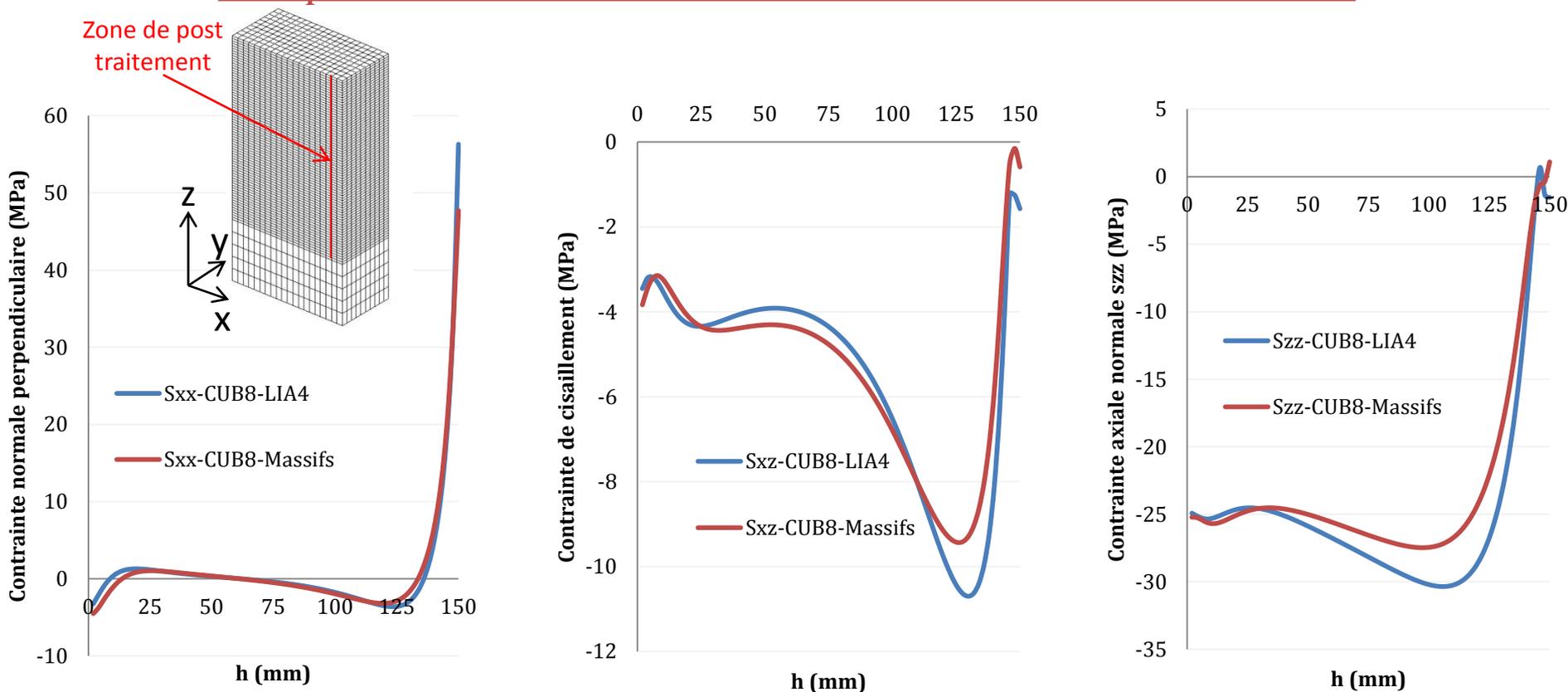
Pré-simulations élastiques

Comparaison entre éléments massifs et éléments d'interface



Pré-simulations élastiques

Comparaison entre éléments massifs et éléments d'interface

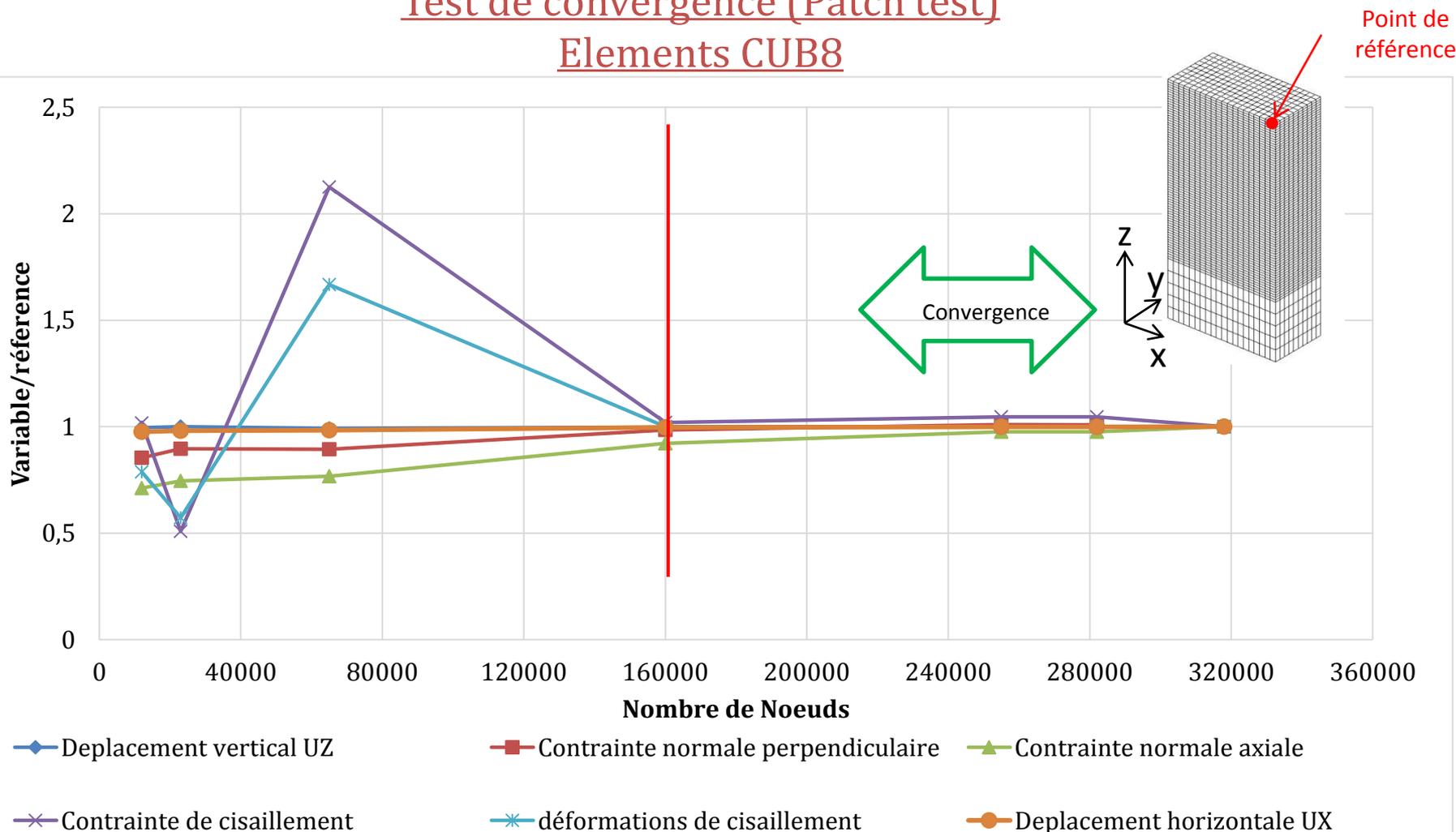


Les éléments joints réduisent de façon considérable les temps de calcul: on divise par environ 2 le nombre de nœuds et obtient des résultats similaires au calcul massique classique.

Pré-simulations élastiques

Test de convergence (Patch test)

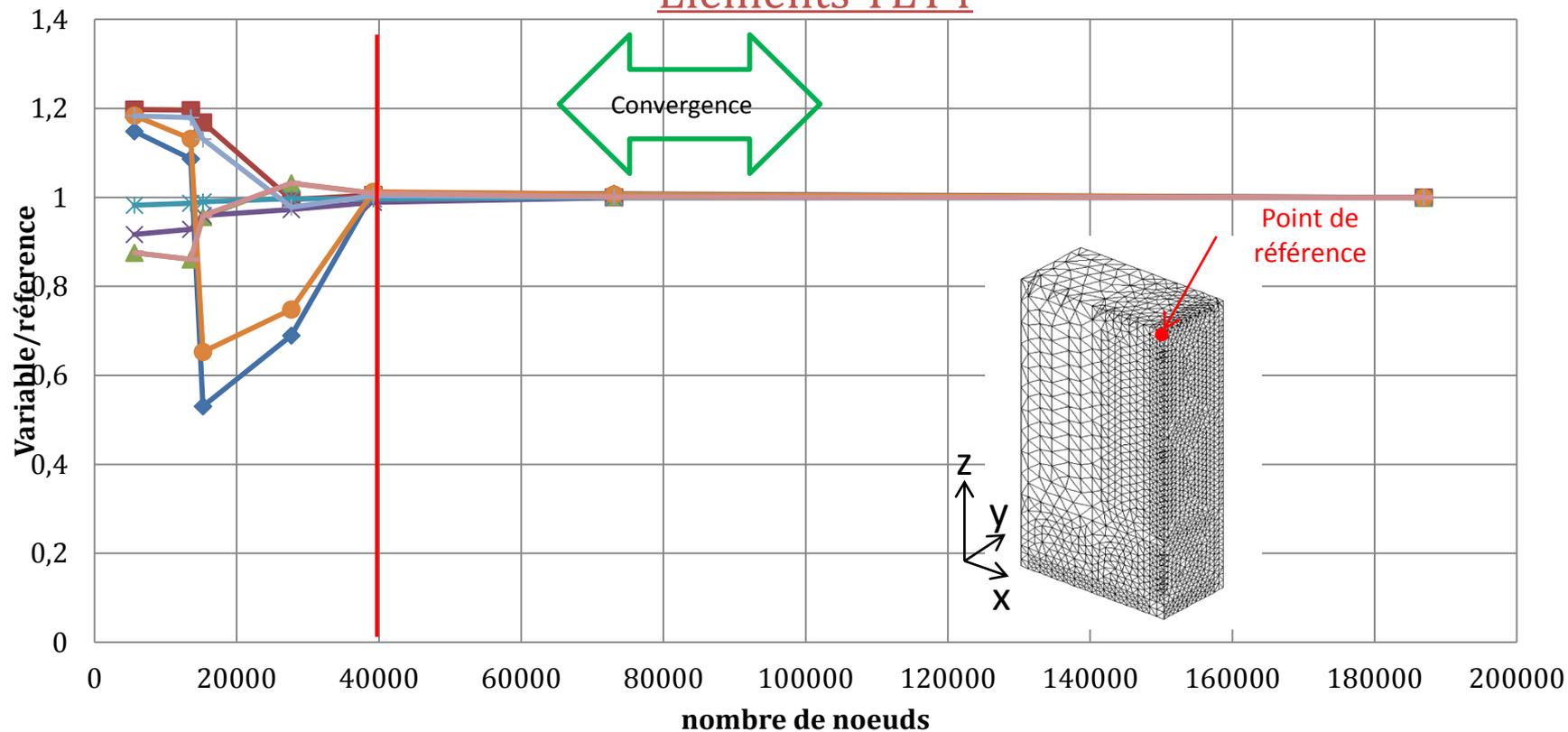
Elements CUB8



Pré-simulations élastiques

Test de convergence (Patch test)

Elements TET4



- ◆ Contrainte normale perpendiculaire
- ◆ Déplacement horizontal UX
- ◆ Déformations verticales

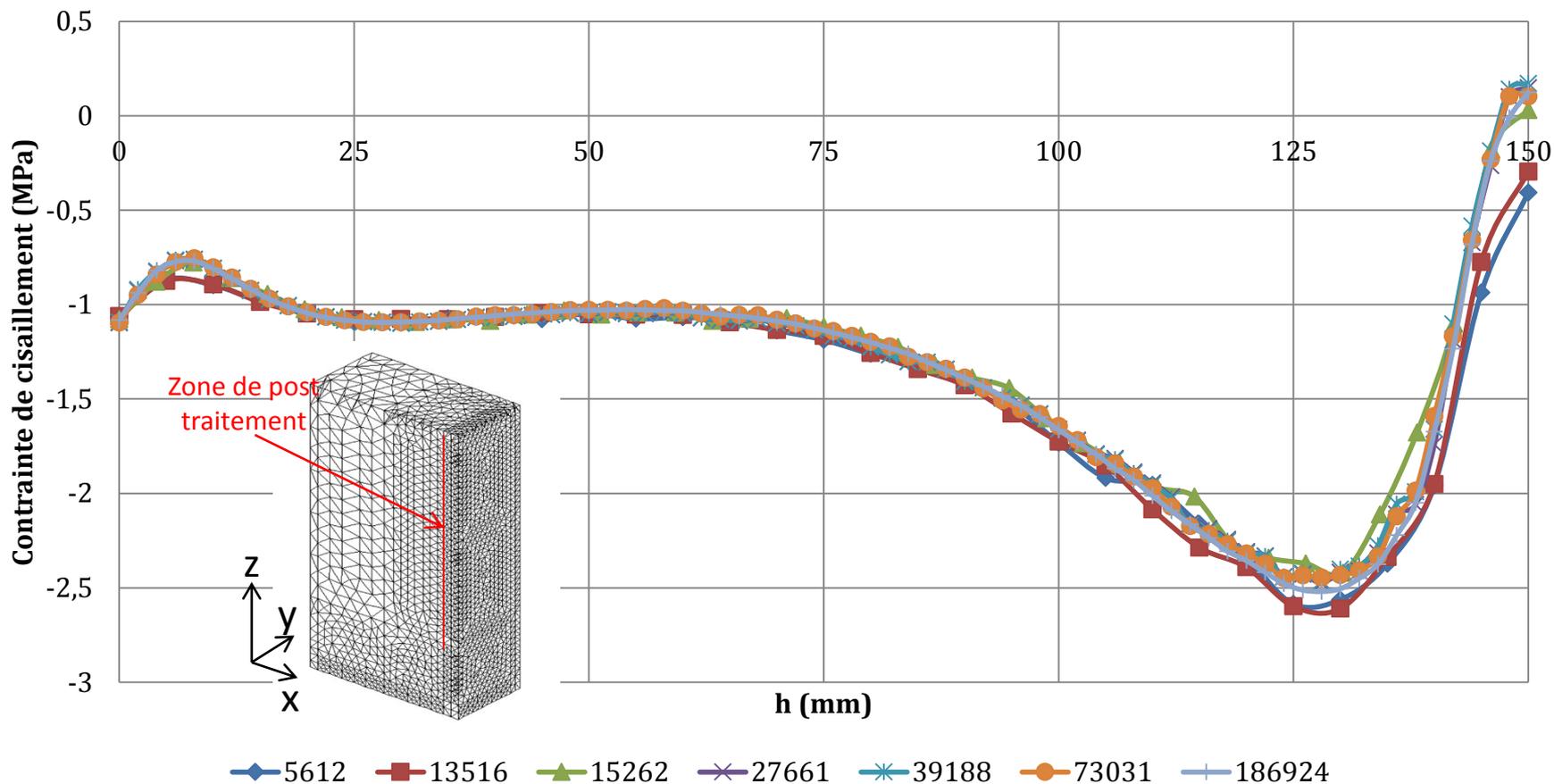
- Contrainte normale axiale
- ◆ Déplacement vertical UZ
- Déformations de cisaillement

- ◆ Contrainte de cisaillement
- Déformations perpendiculaires

Pré-simulations élastiques

Test de convergence (Patch test)

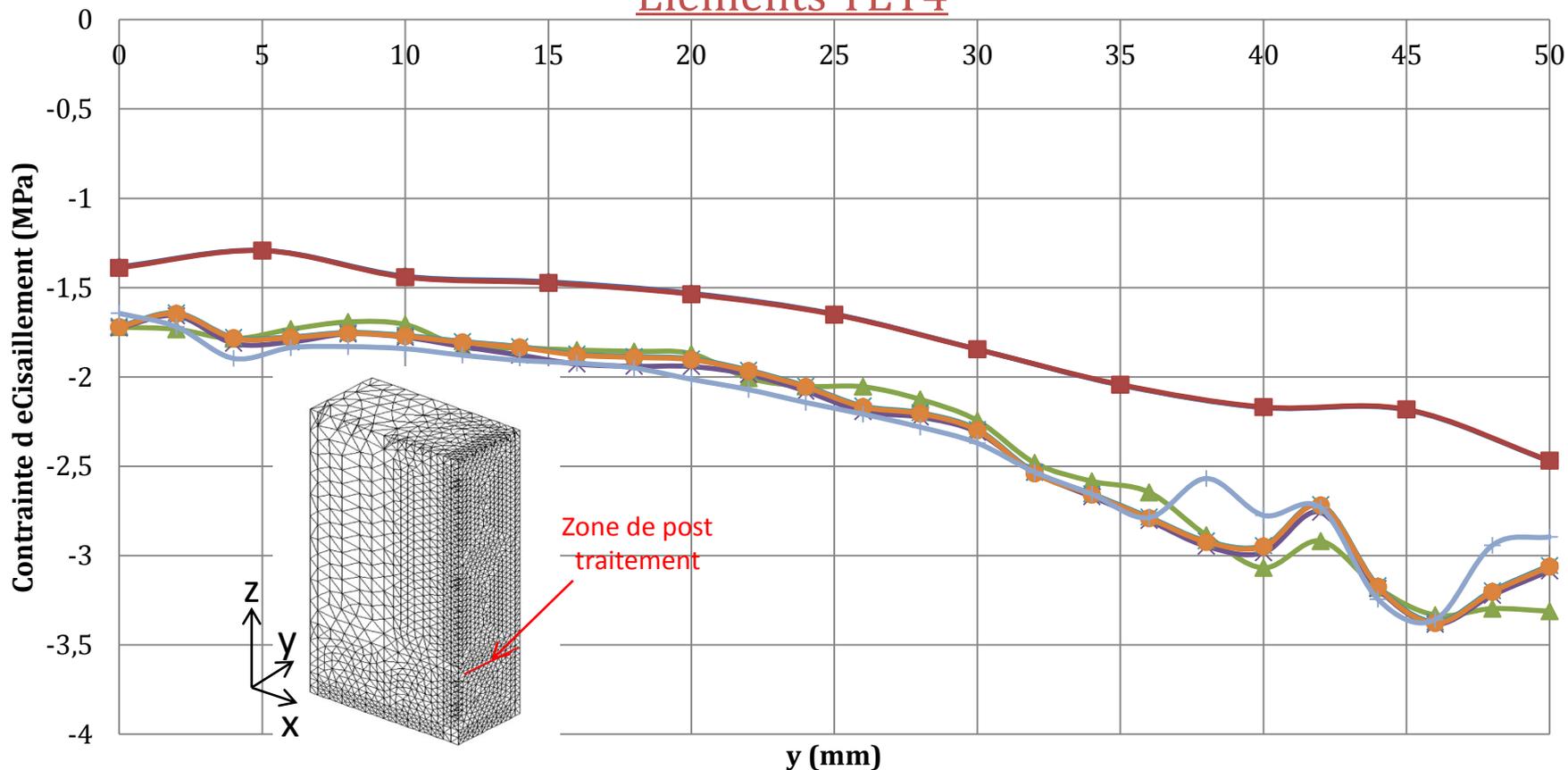
Elements TET4



Pré-simulations élastiques

Test de convergence (Patch test)

Elements TET4

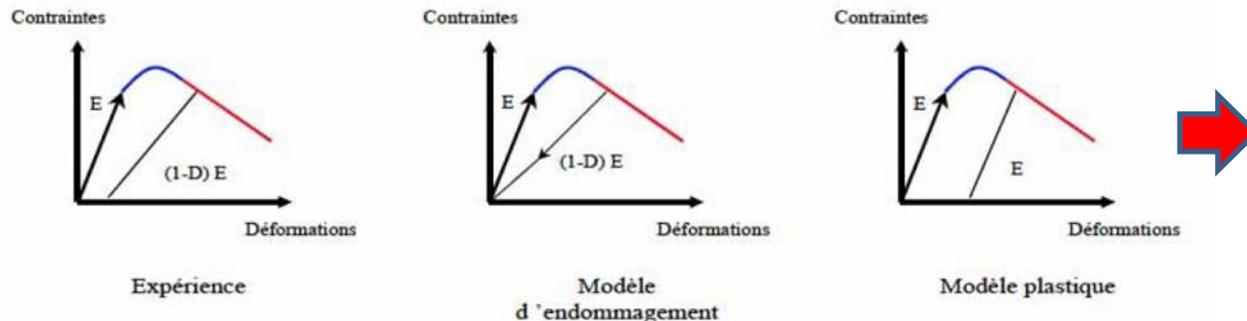


◆ 5612 ■ 13516 ▲ 15262 ✕ 27661 ✖ 39188 ● 73031 + 186924

simulation
dans le domaine
non linéaire

Modèle numérique Béton

Comportement du béton



Couplage
endommagement et
plasticité

Concept de la contrainte effective

Surface endommagée
(vides, fissures)

$$\hat{S} = S - S_D$$

contrainte effective

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \Rightarrow \hat{E} = E(1 - D)$$

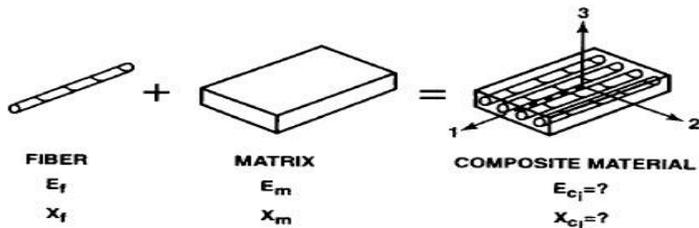
Surface effective Surface totale

A_c	A_t	B_c	B_t	ε_{D_0}	r_c	r_t	γ
1,37	0,92	1404	13012	1,2 E-4	130	13	0,99
	p	a	A_h	B_h	C_h	α	k_0
	0,3	-1	7E-5	3E-3	3E-6	0,5	0,1

Modèle numérique

Comportement du profilé GFRP

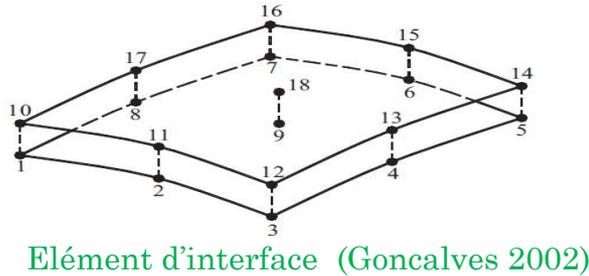
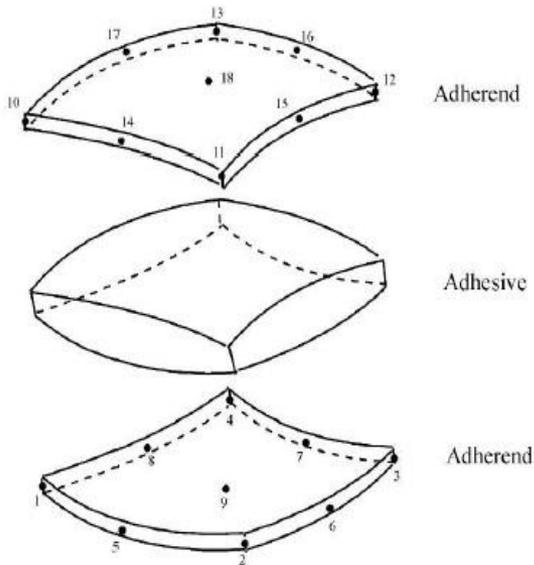
Comportement élastique orthotrope



$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & & & \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & & & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{TR}} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ & & & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TR} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix}$$

E_L	$E_T=E_R$	G	ν_{LT}	$\nu_{TR}=\nu_{LR}$
25 GPa	7 GPa	3 GPa	0,28	0,12

Simulation avec des éléments finis Spéciaux

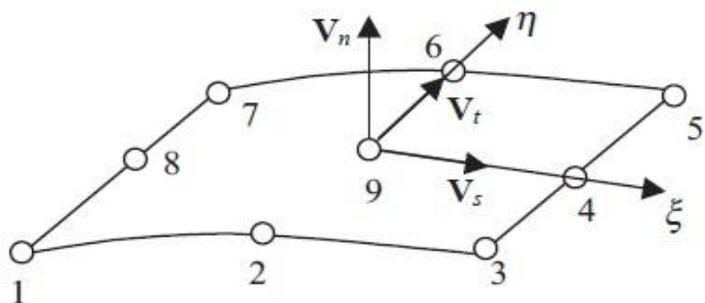


continuité des déplacements à l'interface

$$\sigma = D\delta = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_t \\ \delta_n \end{Bmatrix}$$

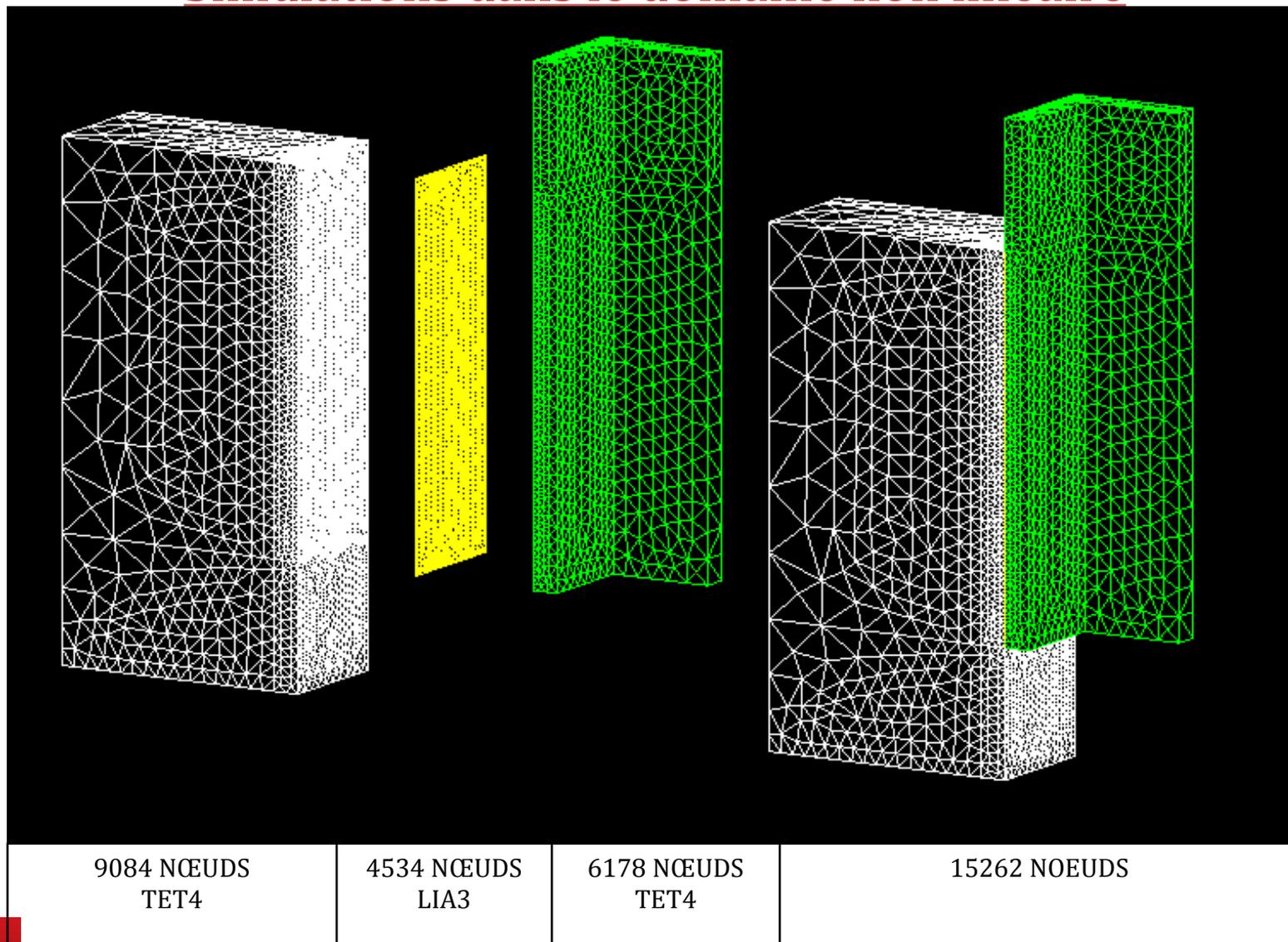
$$k_s = k_t = \frac{E}{2e(1+\nu)} \text{ et } k_n = \frac{E}{e} \quad (\text{KN/m}^3)$$

k_s et k_t	k_n
2,65 KN/mm ³	6,9 KN/mm ³



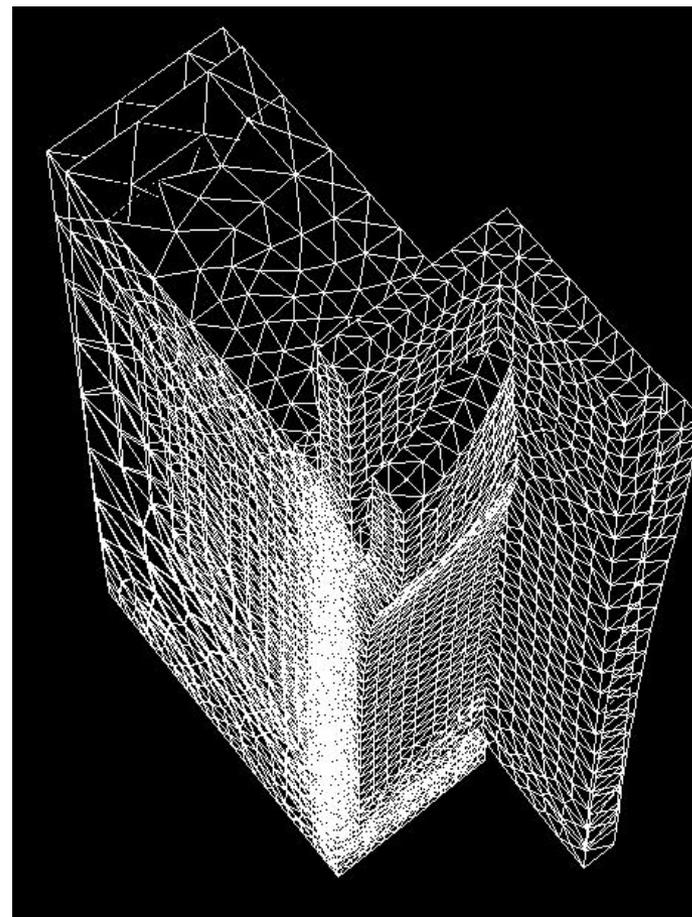
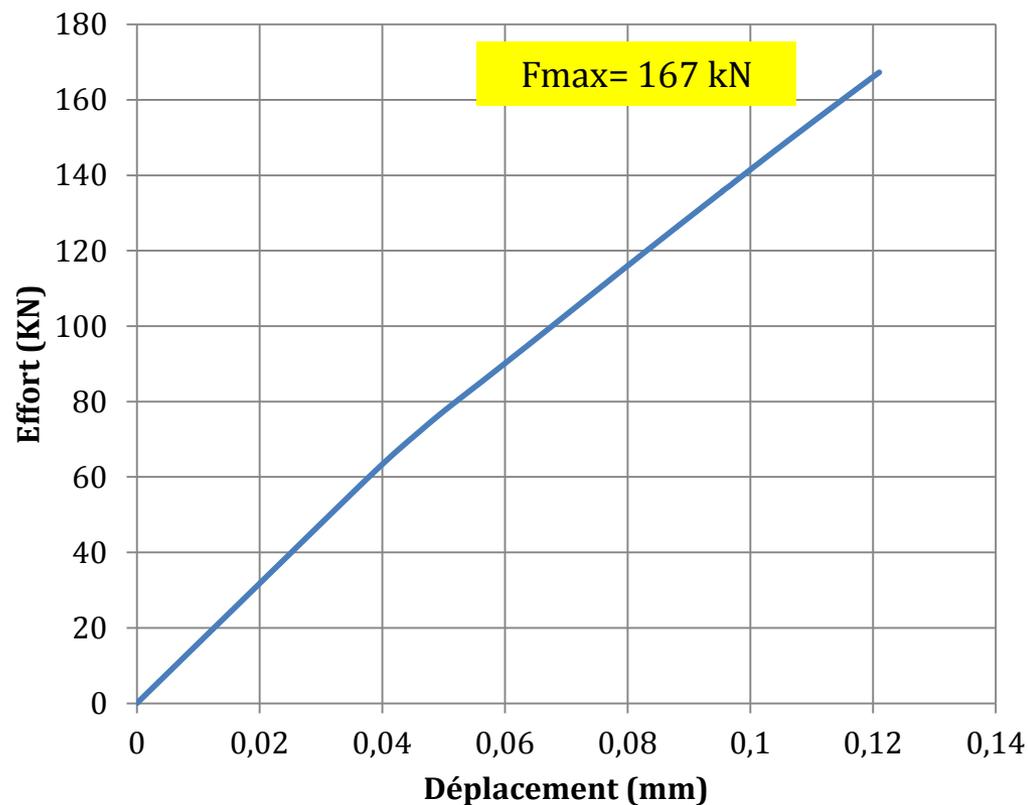
Pour le joint d'adhésif: Eléments joint à 3 nœuds (LIA3)

Simulations dans le domaine non linéaire



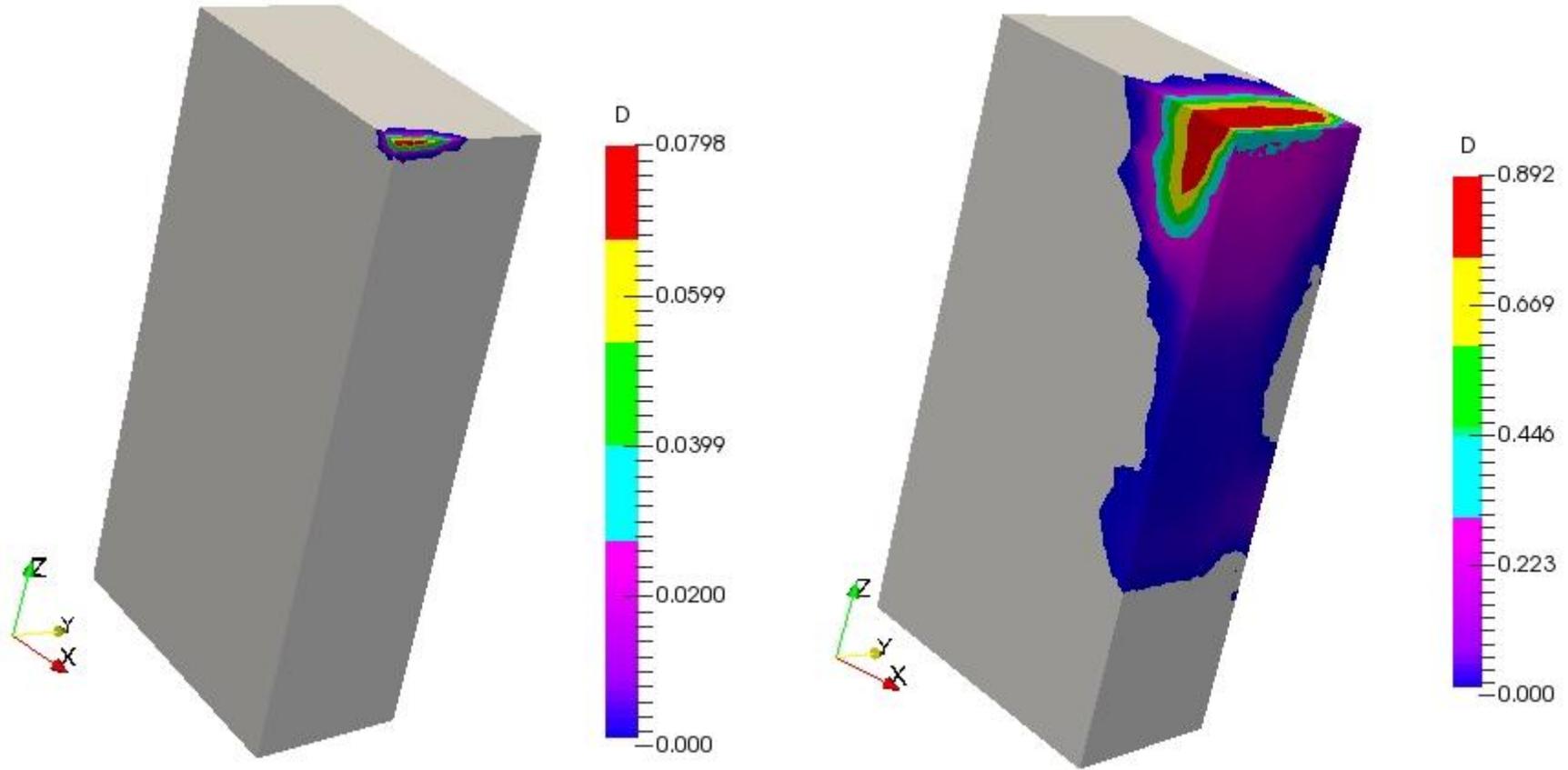
Simulations dans le domaine non linéaire

Courbe Force déplacement imposé



Maillage déformé

Simulations dans le domaine non linéaire Cartographie de l'endommagement

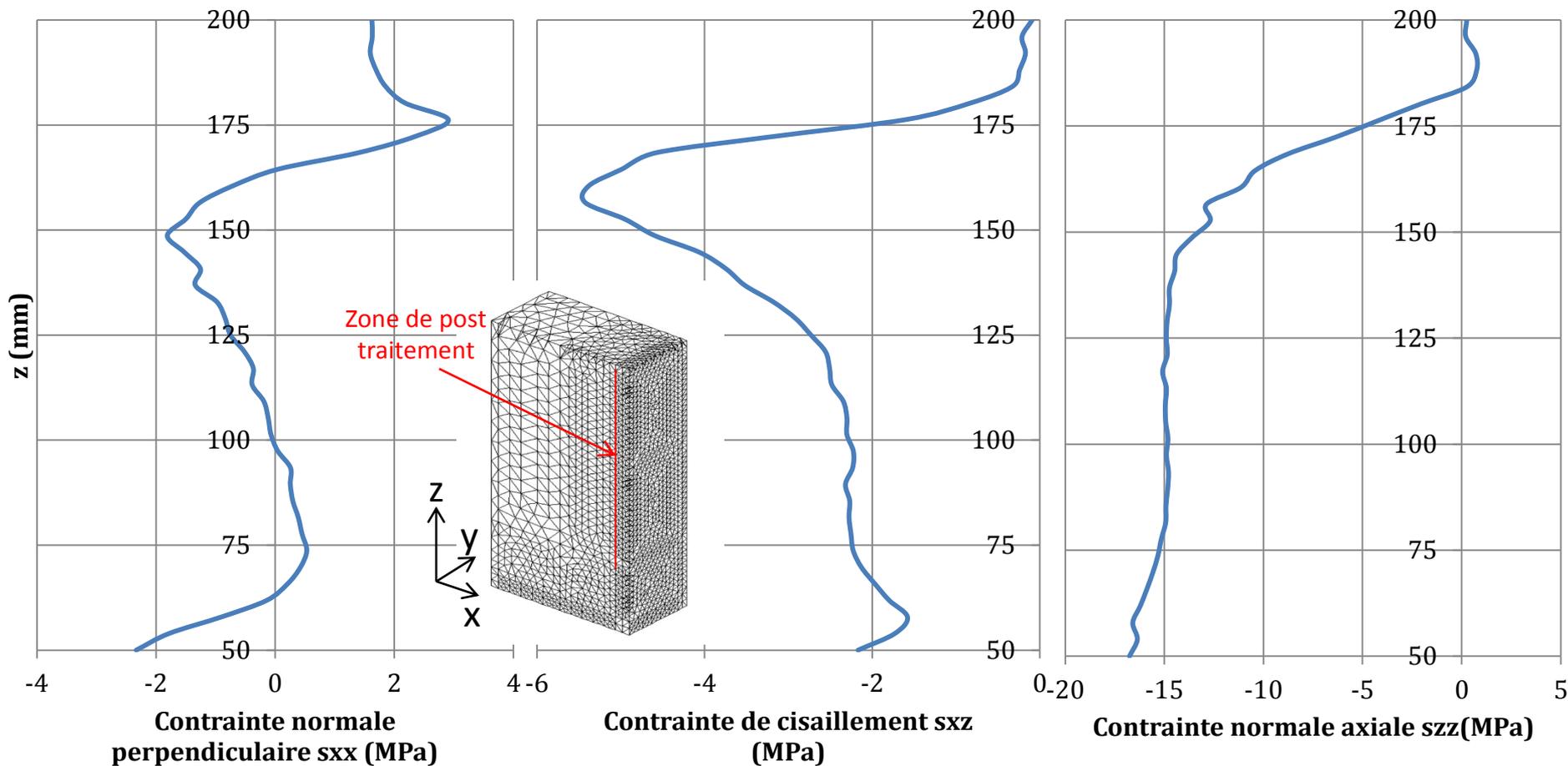


$F = 61 \text{ kN}$ (37% F_{max})

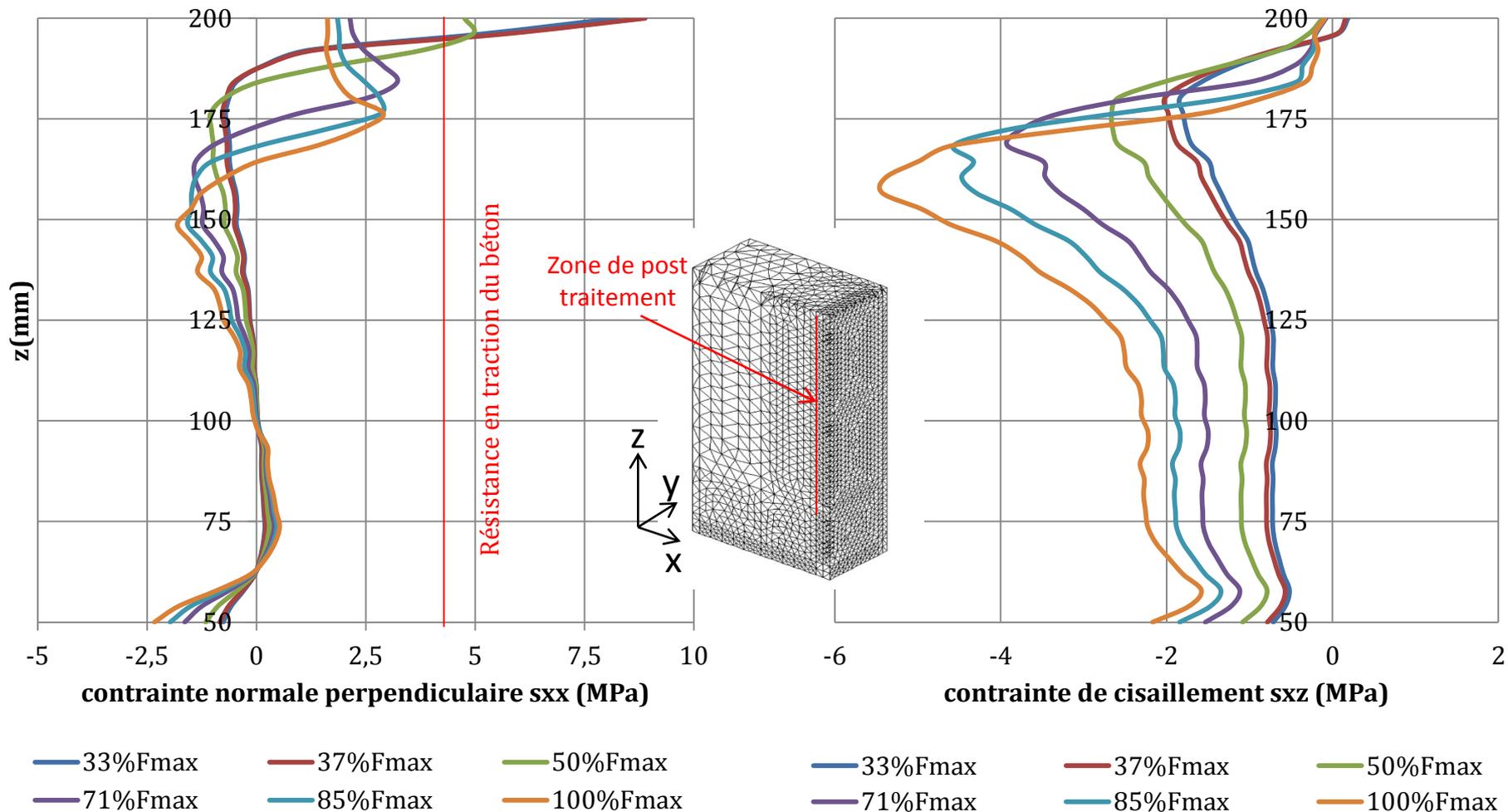
$F = 167 \text{ kN}$ (100% F_{max})



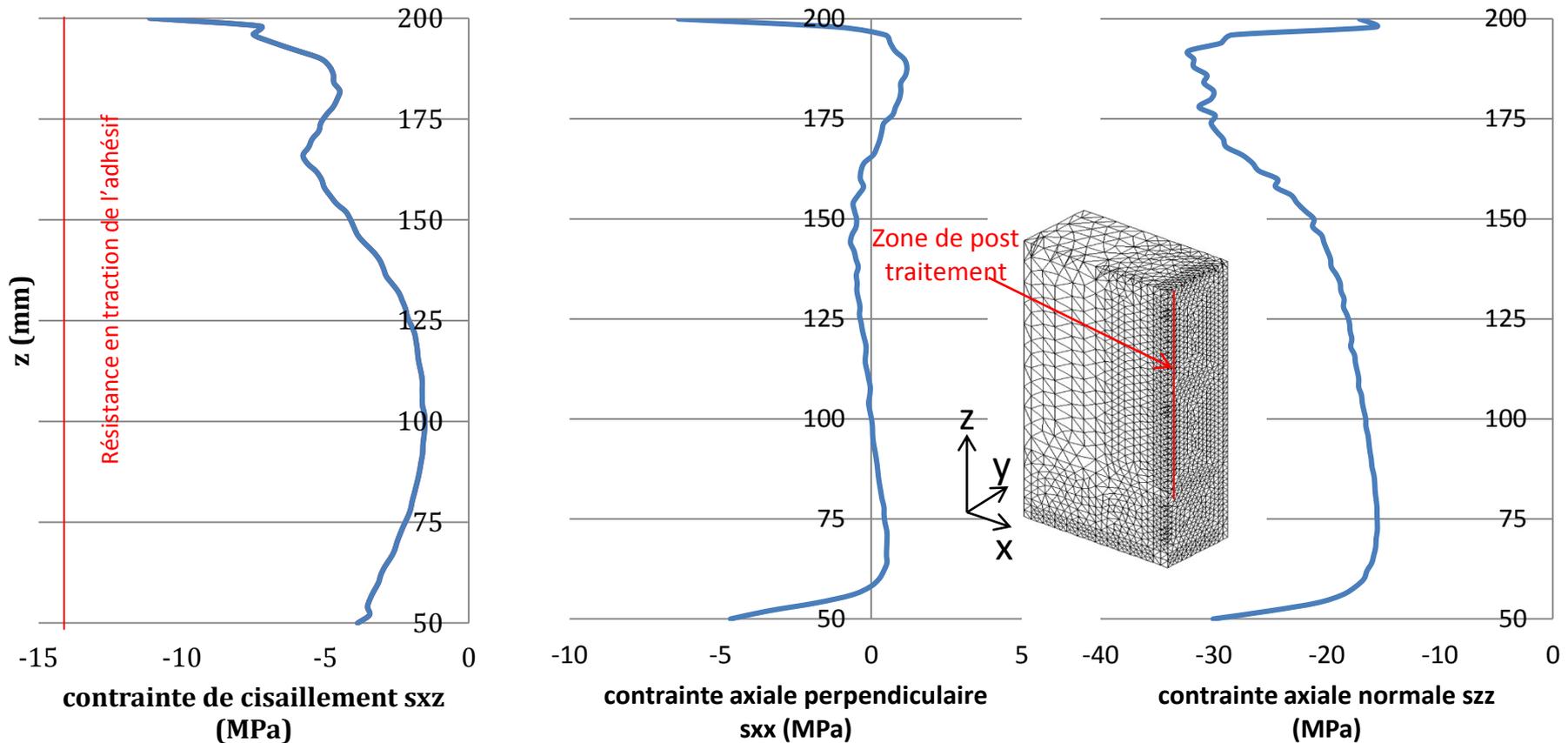
Distribution des contraintes dans le béton proche de l'interface à Fmax



Distribution, au cours du chargement des contraintes dans le béton proche de l'interface



Distribution des contraintes à l'interface collé pour F_{max}



- *La contrainte de cisaillement à rupture supérieure à la résistance en traction du béton*
- *Le joint d'adhésif n'est pas un point de faiblesse.*

Conclusions & Perspectives

- ❑ *Mise en œuvre d'un modèle numérique efficace dans Cast3M pour étudier le comportement non-linéaire des assemblages collés;*
- ❑ *le modèle permet de prédire le mode et la charge de ruine;*
- ❑ *Quelques données expérimentales utiles pour aller de l'avant...*
 - *Caractérisation expérimentale des matériaux constituant de l'assemblage*
 - *Confrontation avec les résultats expérimentaux*
- ❑ *Modélisation des comportements différents des structures collées;*
- ❑ *Développement des règles de dimensionnement de structures en se basant sur les résultats expérimentaux et numérique;*

Références

- [1] L. Jason, «Relation endommagement perméabilité pour les bétons applications aux calculs de structures,» Thèse, École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, Nantes, France, 2004.
- [2] G. Pijaudier-Cabot et Z. P. Bazant, «Nonlocal damage theory,» *Journal of engineering mechanics*, vol. 113, n° 110, pp. 1512-1533, 1987.
- [3] M. Chambart, «Endommagement anisotrope et comportement dynamique des structures en béton armé jusqu'à la ruine,» École normale supérieure de Cachan, Cachan, 2009.
- [4] R. S. Crouch et B. Tahar, « Application of a stress return algorithm for elasto-plastic hardening-softening models with high yield surface curvature,» chez *In Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS*, Barcelona, 2000.
- [5] Krayani, «Approche non locale d'un modèle d'élasto-plastique endommagable pour le calcul des structures en béton,» Thèse, École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, Nantes, France, 2007.
- [6] C. Meaud, «Analyse multi-échelle des connexions par collage application aux éléments structuraux multi-matériaux fléchis,» Thèse, Université Claude Bernard Lyon1, Lyon, France, 2012.
- [6] J. P. M. Goncalves, M. F. S. F. De Moura et P. M. S. T. De Castro, «A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints,» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 22, n° 15, pp. 357-365, 2002.
- [7] D. Castagnetti et E. Dragoni, « Standard finite element techniques for efficient stress analysis of adhesive joints,» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, n° 12, pp. 125-135, 2009.



Merci de votre
attention



Club Cast3M
25 nov. 2016