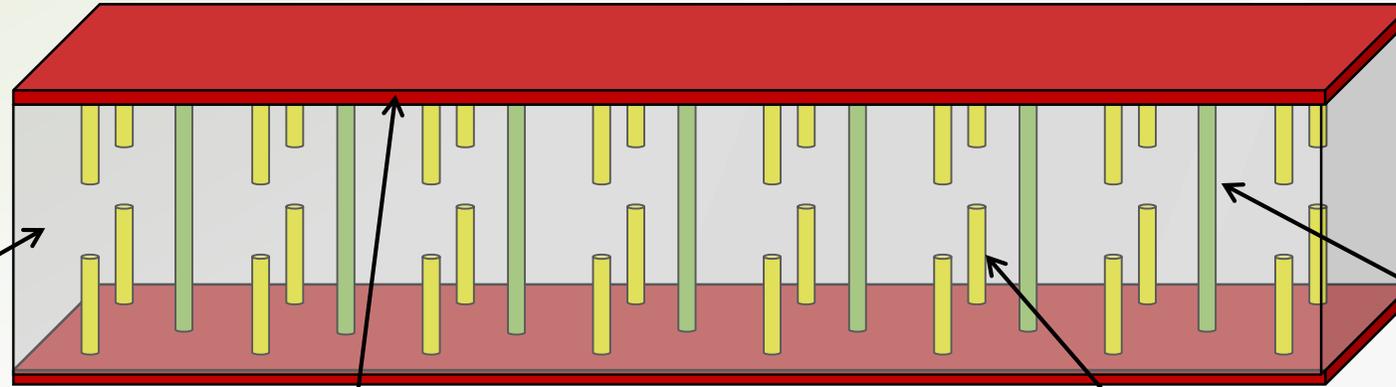


Simulation du comportement de structures « Steel-Concrete-Steel » sous chargement mécanique

Robine CALIXTE



Les structures Steel-Concrete-Steel (SCS)



Cœur de Béton

- Matériau résistant et rigidifiant
- Bonnes performances en compression
- Reprise de l'effort tranchant

Plaque d'acier

- Renfort du béton
- Etanchéité de la structure
- Coffrage perdu du béton

Connecteur de cisaillement

- Liaison entre le béton et les plaques
- Autorise un glissement interfacial

Tirant

- Facilité l'installation
- Reprise de l'effort tranchant



(Burgan & Bingham, 2017)



(Wright Runstad & Company, 2021)

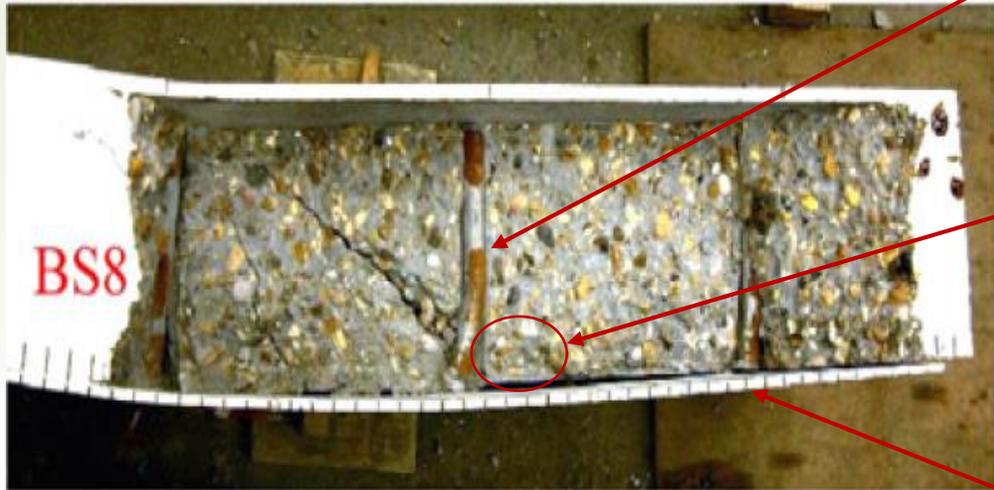


(Lohani, 2016)



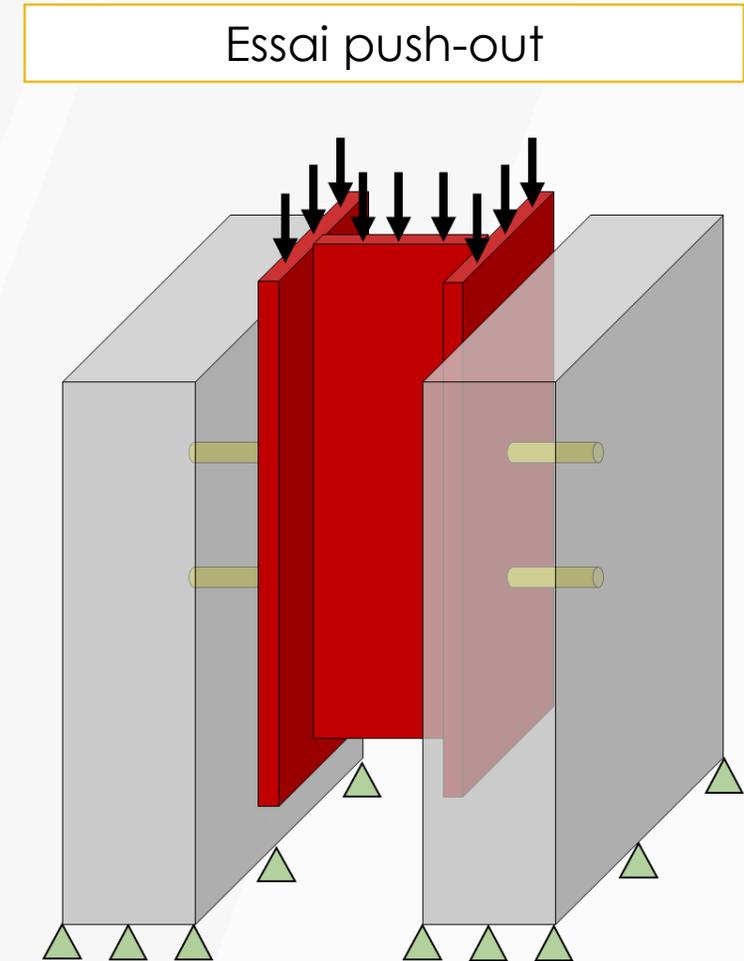
(Calatrava, 2013)

Réponse locale du système de connexion



Ruine d'une poutre SCS Bi-steel en flexion (Foundoukos, 2005)

- Flexion et cisaillement des connecteurs
- Écrasement et arrachement du cœur de béton autour des connecteurs
- Poinçonnement des plaques d'acier au niveau de la soudure des connecteurs



Objectifs & Plan

- ▶ Développement d'un modèle de simulation numérique de structures élémentaires SCS applicable à des structures plus grandes et plus complexes et permettant l'analyse de leur comportement
- ▶ Proposer un lien entre une approche fine et une approche globale de modélisation numérique visant une application plus opérationnelle de la méthodologie

Développement d'une stratégie de modélisation fine – étude d'un essai push-out

Applications industrielles et modélisations simplifiées

Comportement en cisaillement du système de connexion

Compression locale du béton

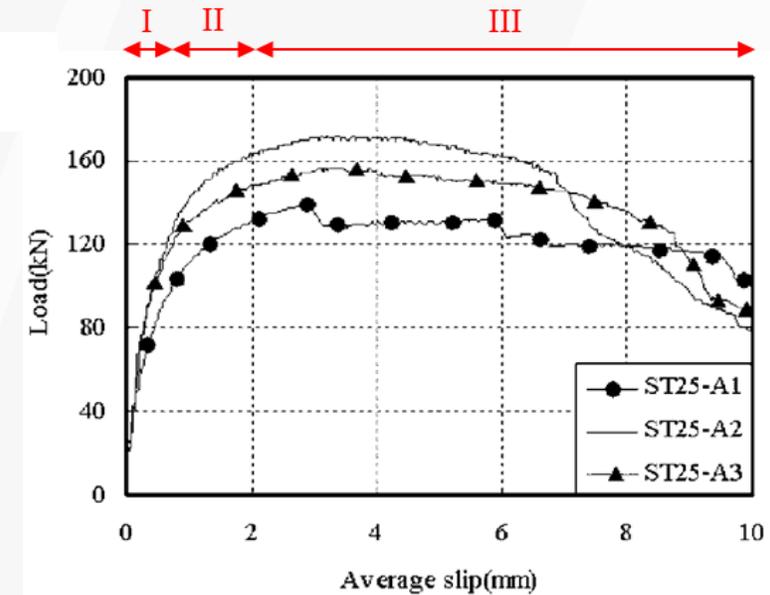
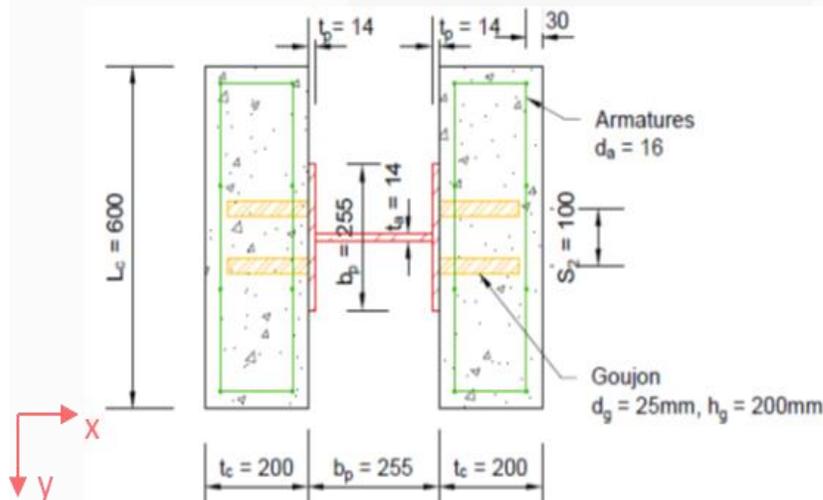
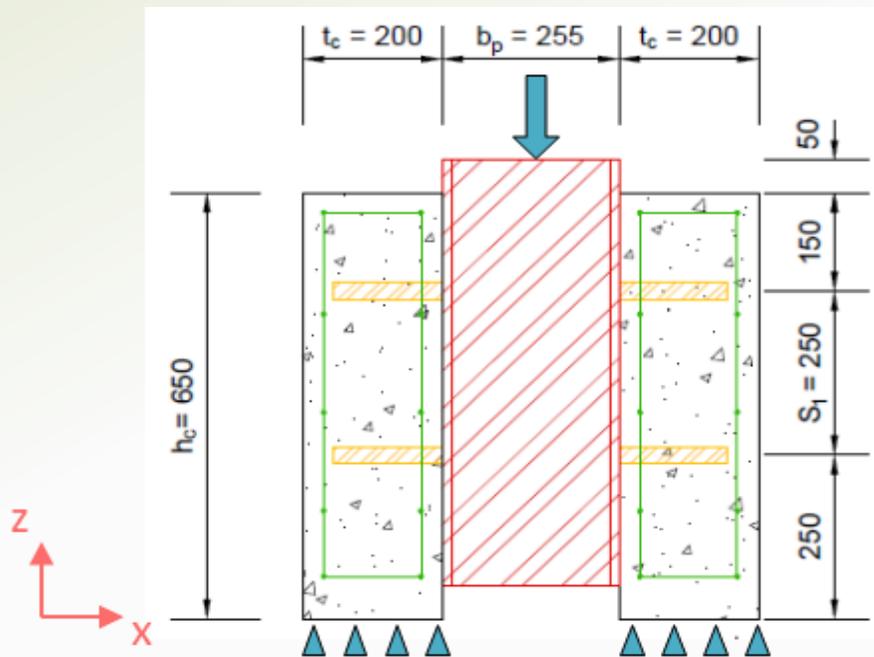
Cisaillement d'un connecteur soudé à une plaque

Poutres SCS en flexion

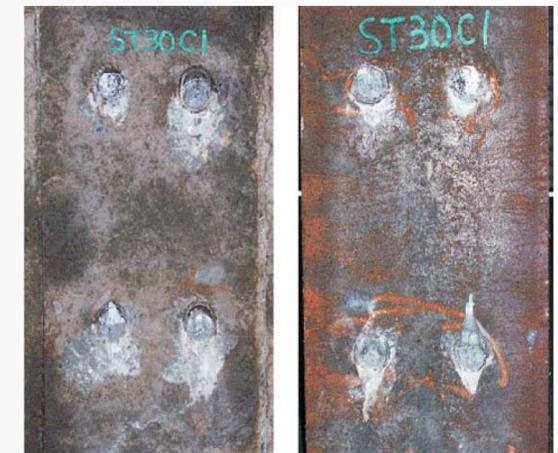
Développement d'une modélisation simplifiée

Jonction d'ossature SCS

Présentation



Courbes effort – glissement des essai ST25-A (Shim, et al., 2004)



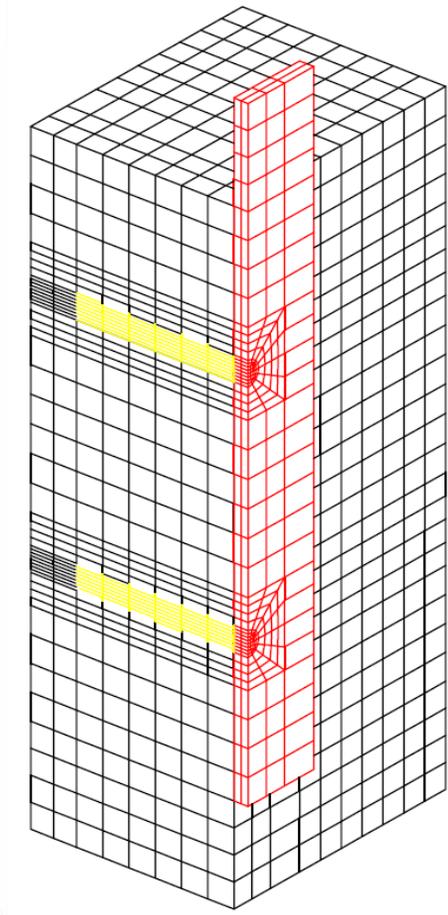
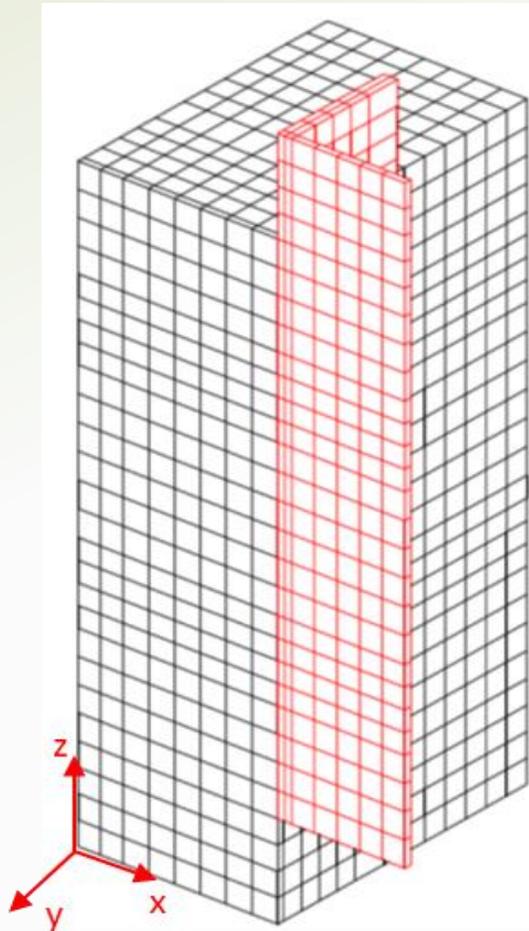
Faciès de ruine par rupture en cisaillement des tiges des goujons (Shim, et al., 2004)

- Essai push-out de (Shim, et al. 2004)
- Mise en cisaillement du système de connexion
- Ruine en cisaillement de la tige des goujons

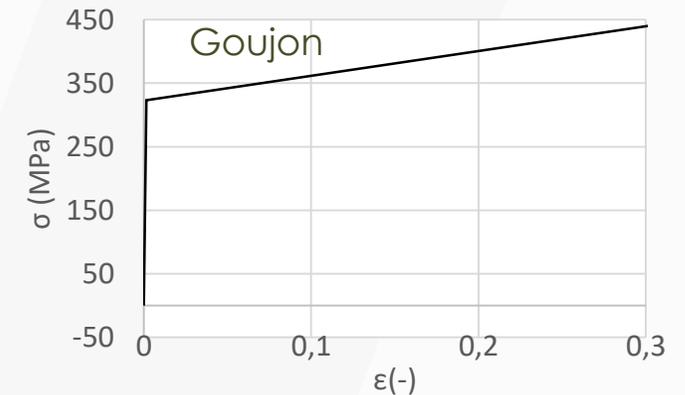
Modélisation

Maillage

Matériaux



- Béton, connecteurs et profilé en éléments finis massifs cubiques linéaires à 8 nœuds
- Coïncidence des nœuds des maillages aux interfaces
- Dimensions des éléments variables de 1,83 mm à 25 mm

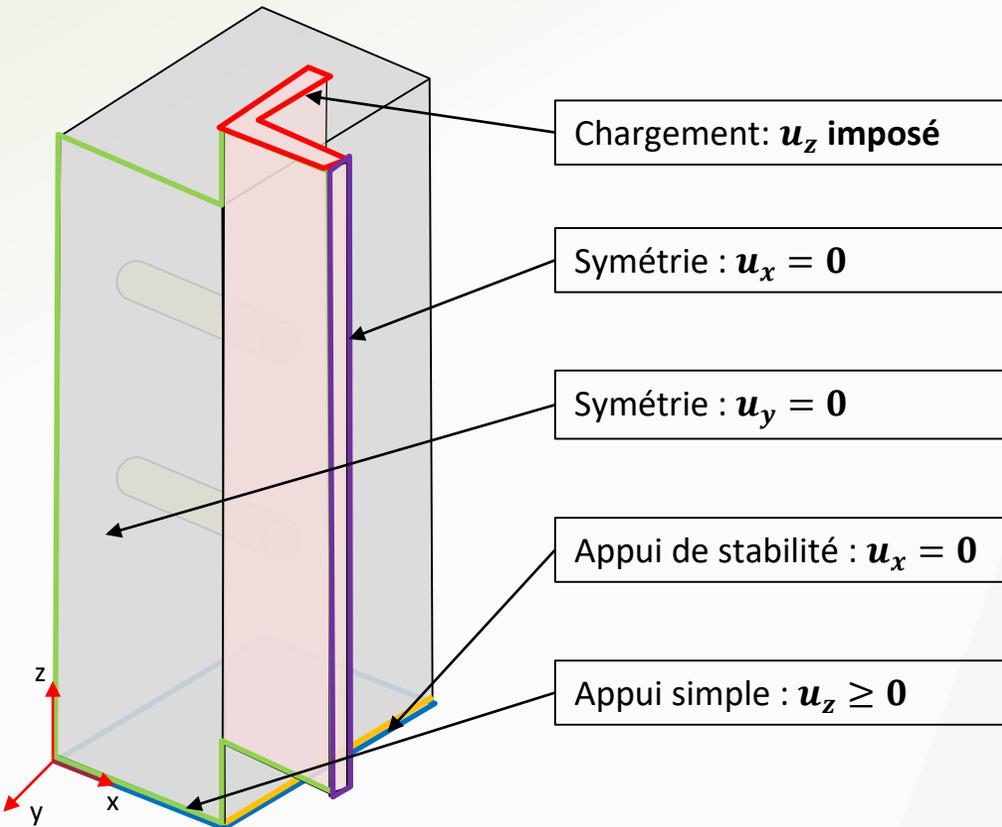


Modèle de Mazars modifié en traction

$\sigma_{ij} = (1 - D)C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$
$D = \max(\bar{d}; 0)$
$\bar{d}(\varepsilon) = \alpha_t(\varepsilon)^\beta D_t(\varepsilon_{eq}) + \alpha_c(\varepsilon)^\beta D_c(\varepsilon_{eq})$
$D_t = 1 - \frac{\kappa_0}{\varepsilon_{eq}} \exp\left(\frac{l_e \cdot f_{ct}}{G_{ft}} (\kappa_0 - \varepsilon_{eq})\right)$
$D_c = 1 - \frac{\kappa_0(1 - A_c)}{\varepsilon_{eq}} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\varepsilon_{eq} - \kappa_0)]}$

Modélisation

Conditions limites

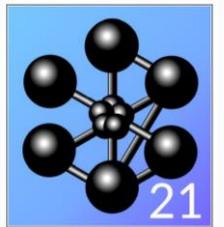


Conditions de liaison

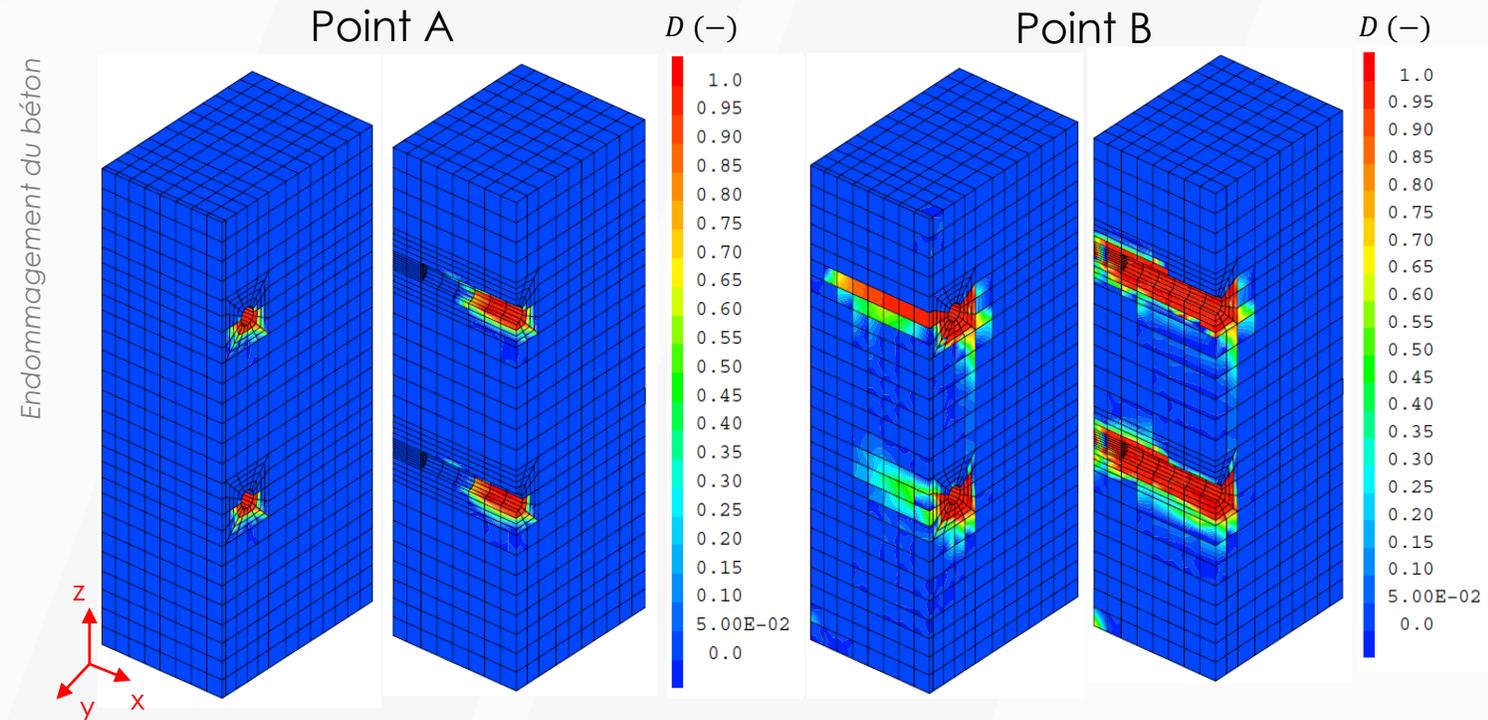
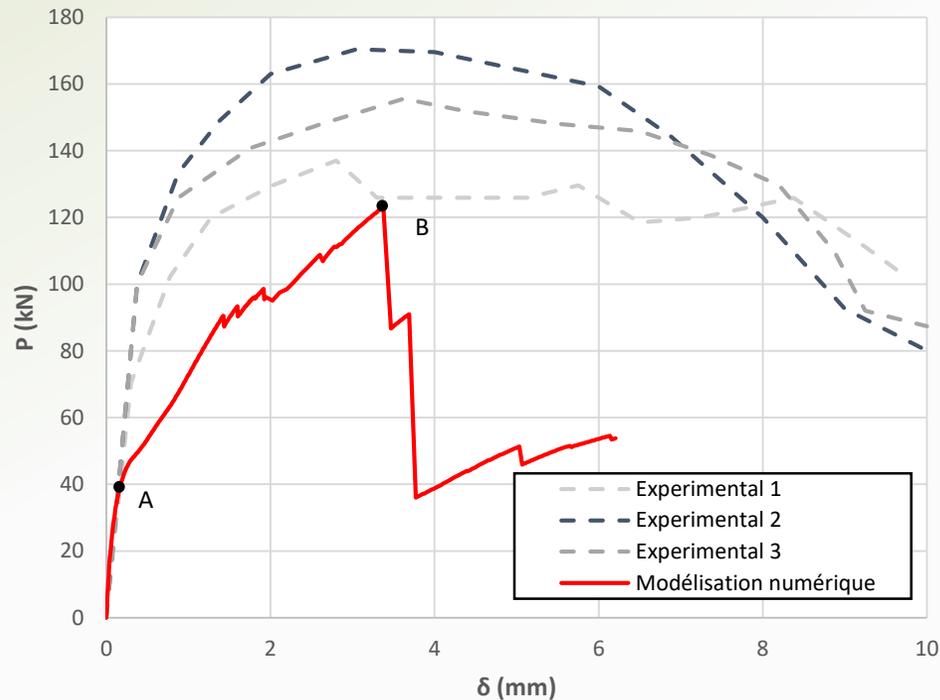


Résolution

- Chargement en déplacement imposé
- Méthode implicite d'éléments finis dans Cast3M (CEA, 2021)

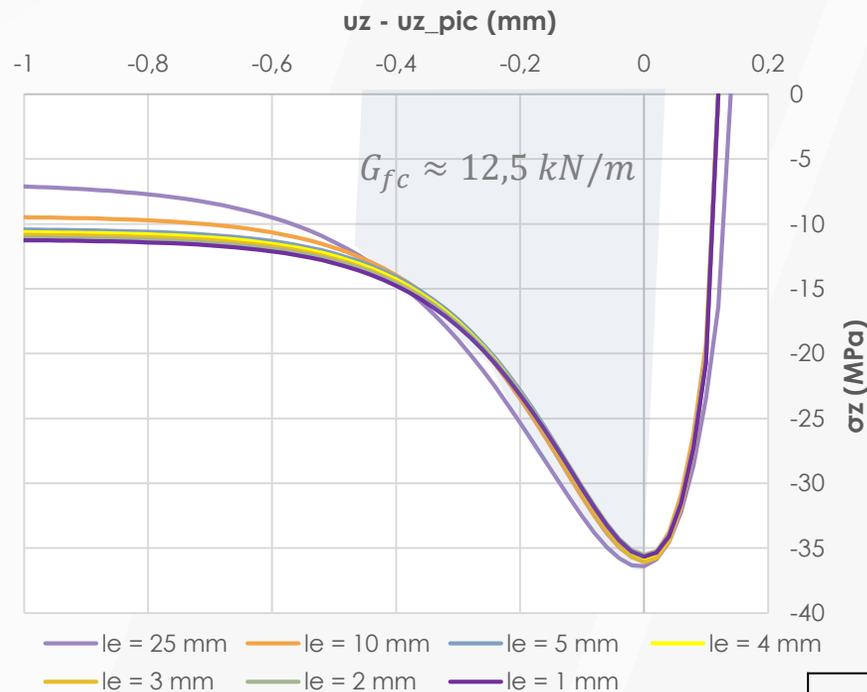
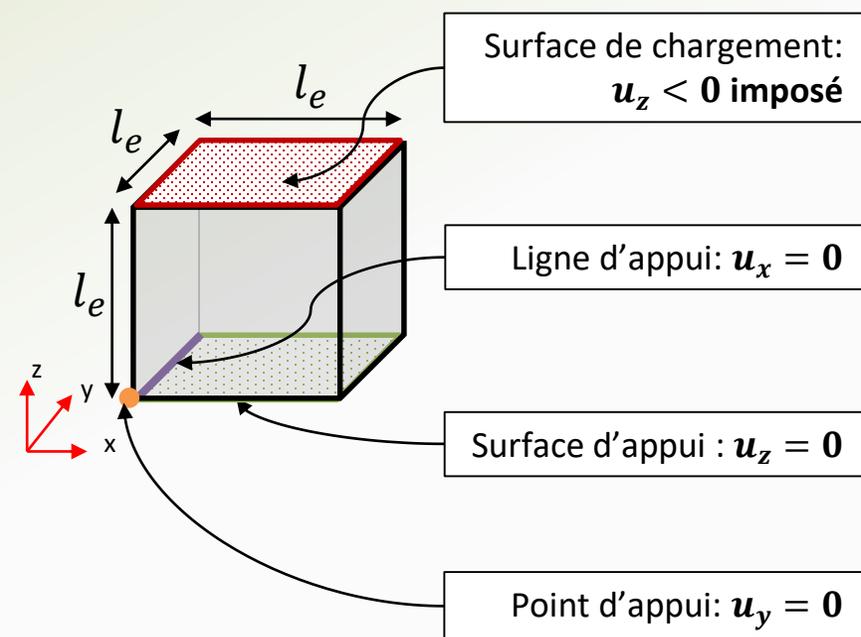


Résultats et analyses



- Sous-estimation de la résistance et ruine prématurée et fragile du système
- Localisation de l'endommagement du béton dans les éléments en contact direct avec les goujons
- Ruine du système par rupture en cisaillement des connecteurs non reproduite

Proposition d'une méthode de régularisation en compression



l_e (mm)	A_c (-)	B_c (-)
25	0,4	600
10	0,18	285
5	0,09	150
4	0,072	120
3	0,054	90
2	0,035	60
1	0,0175	30

$$D_c = 1 - \frac{\kappa_0(1 - A_c)}{\varepsilon_{eq}} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\varepsilon_{eq} - \kappa_0)]}$$

$$A_c = -111,91 \cdot l_e^2 + 18,864 \cdot l_e - 0,0017$$

$$B_c = -310276 \cdot l_e^2 + 31842 \cdot l_e - 2,1143$$

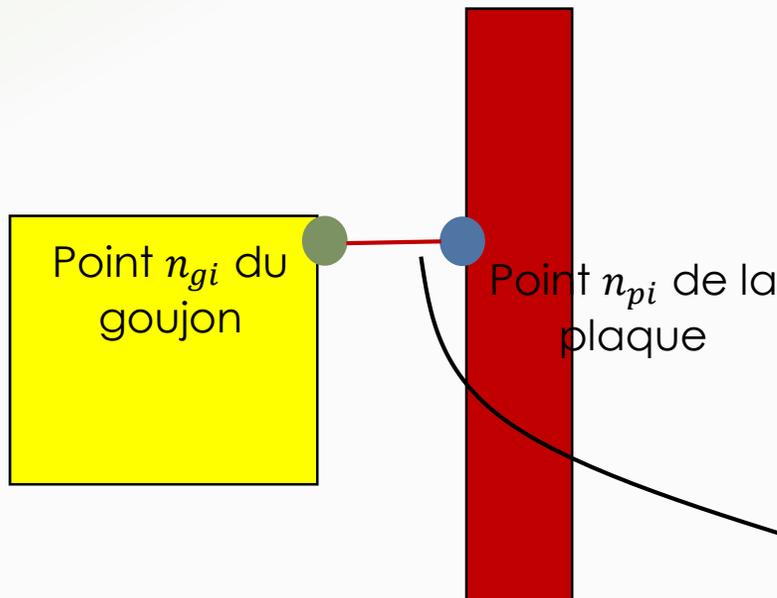
$$\text{Avec } l_e = \sqrt[3]{V_e}$$

- Identification des paramètres A_c et B_c pour avoir une conservation de l'énergie de fissuration en compression G_{fc} selon (van Mier, 1984)

Proposition d'une stratégie de modélisation de la liaison goujon - plaque

Ajout d'éléments de jonction en interface goujon – plaque représentant:

- 1) La soudure entre ces deux éléments avant la ruine → **phase élastique** de raideur importante
- 2) La limitation des efforts transmis en cas de rupture par cisaillement de la tige du goujon → **plateau plastique**



Élément de jonction i de dimension nulle

Comportement élasto-plastique couplé en cisaillement

Critère de plasticité :

$$f(\overrightarrow{\sigma}_i^{\text{élast}}, X_{y,i-1}, X_{z,i-1}) = \sqrt{(F_y^{\text{élast}} - X_{y,i-1})^2 + (F_z^{\text{élast}} - X_{z,i-1})^2} - P_{ult}$$

$$P_{ult} = 0,8f_{ug}A_g$$

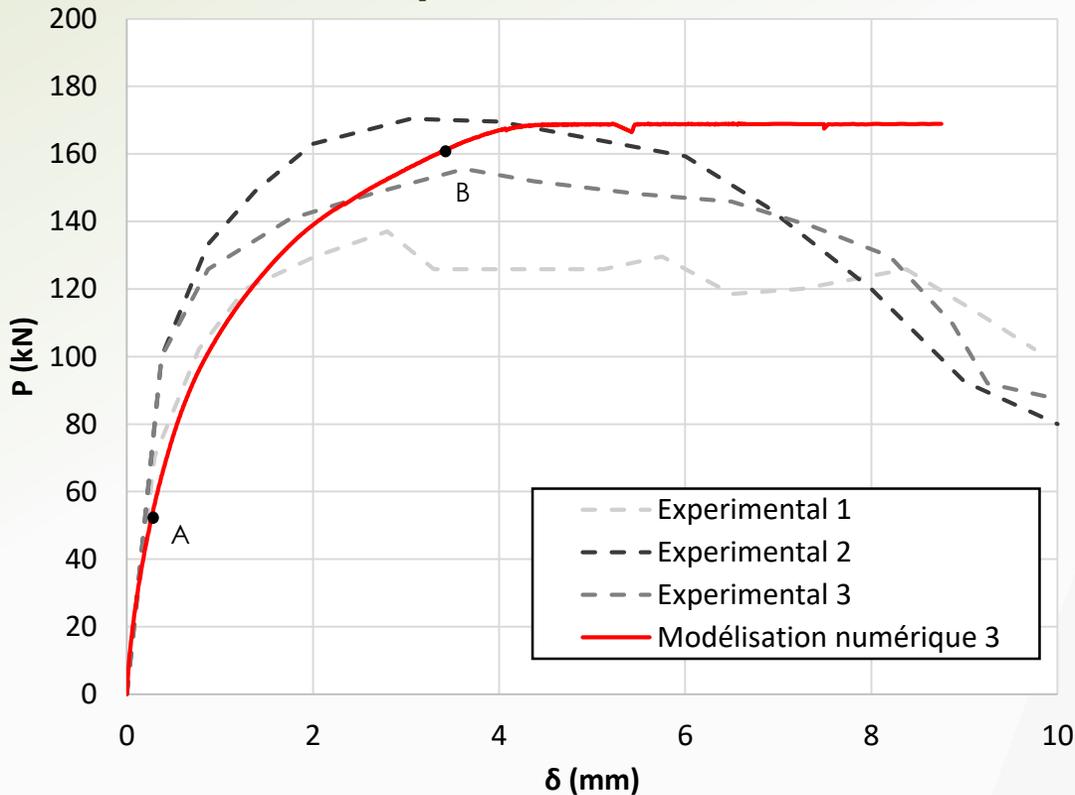
$$\overrightarrow{\sigma}_i^{j+1} = \begin{cases} F_{y,i}^{j+1} = F_{y,i}^j - H_1^j d\lambda_i^j \\ F_{z,i}^{j+1} = F_{z,i}^j - H_2^j d\lambda_i^j \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{y,i}^{p,j+1} = \varepsilon_{y,i}^{p,j} + d\varepsilon_{y,i}^{p,j} \\ \varepsilon_{z,i}^{p,j+1} = \varepsilon_{z,i}^{p,j} + d\varepsilon_{z,i}^{p,j} \end{cases}$$

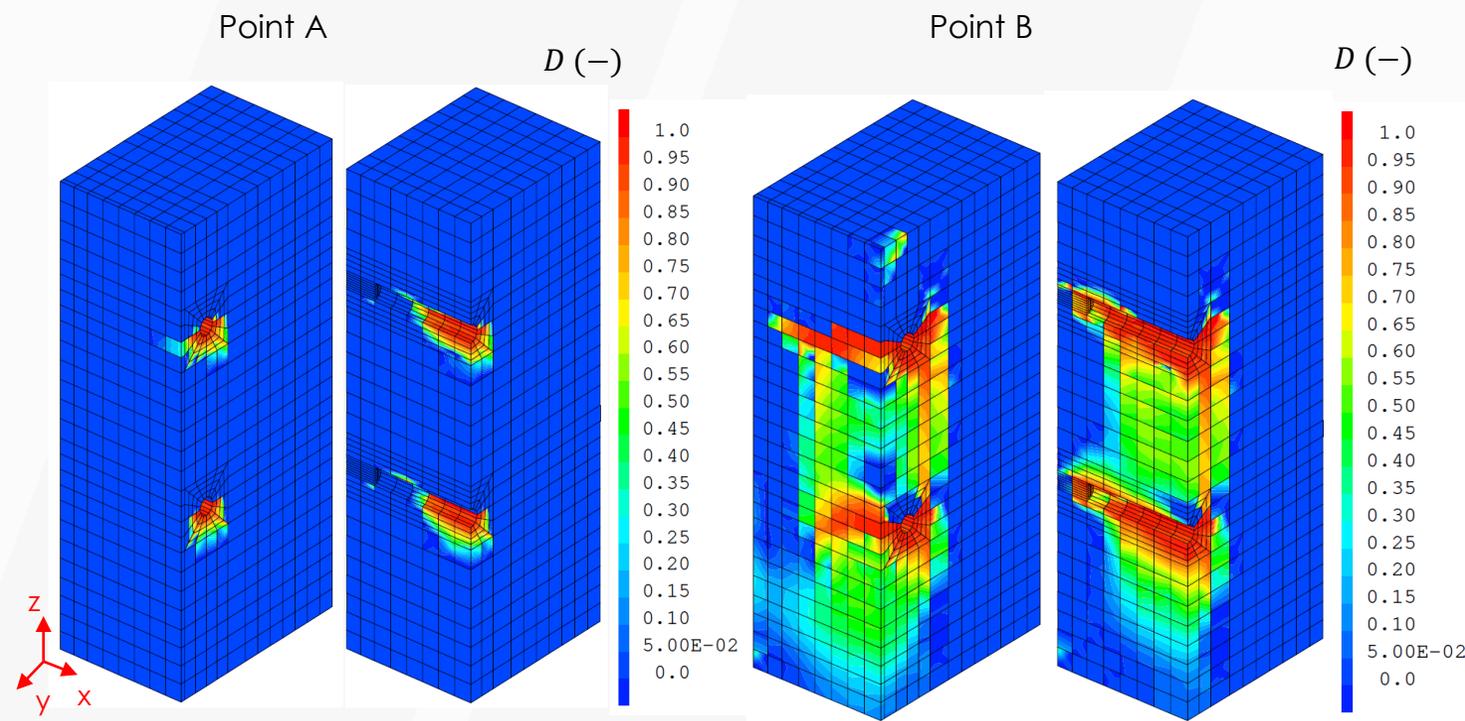
$$\begin{cases} X_{y,i}^{j+1} = X_{y,i}^j + K_{pla} d\varepsilon_{y,i}^{p,j} \\ X_{z,i}^{j+1} = X_{z,i}^j + K_{pla} d\varepsilon_{z,i}^{p,j} \end{cases}$$

Avec $d\lambda_i^j = \frac{f^j}{H_1^j \left(\frac{F_{y,i}^j - X_{y,i}^j}{F_{eq}^j} \right) + H_2^j \left(\frac{F_{z,i}^j - X_{z,i}^j}{F_{eq}^j} \right) + K_{pla}}$, $H_1^j = \frac{K_{s1}(F_{y,i}^j - X_{y,i}^j)}{F_{eq}^j}$, $H_2^j = \frac{K_{s2}(F_{z,i}^j - X_{z,i}^j)}{F_{eq}^j}$ et $\varepsilon_{y,i}^{p,j} = d\lambda_i^j \times \frac{F_{y,i}^j - X_{y,i}^j}{F_{eq}^j}$, $d\varepsilon_{z,i}^{p,j} = d\lambda_i^j \times \frac{F_{z,i}^j - X_{z,i}^j}{F_{eq}^j}$

Résultats et analyses

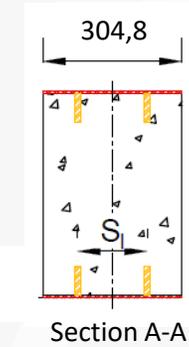
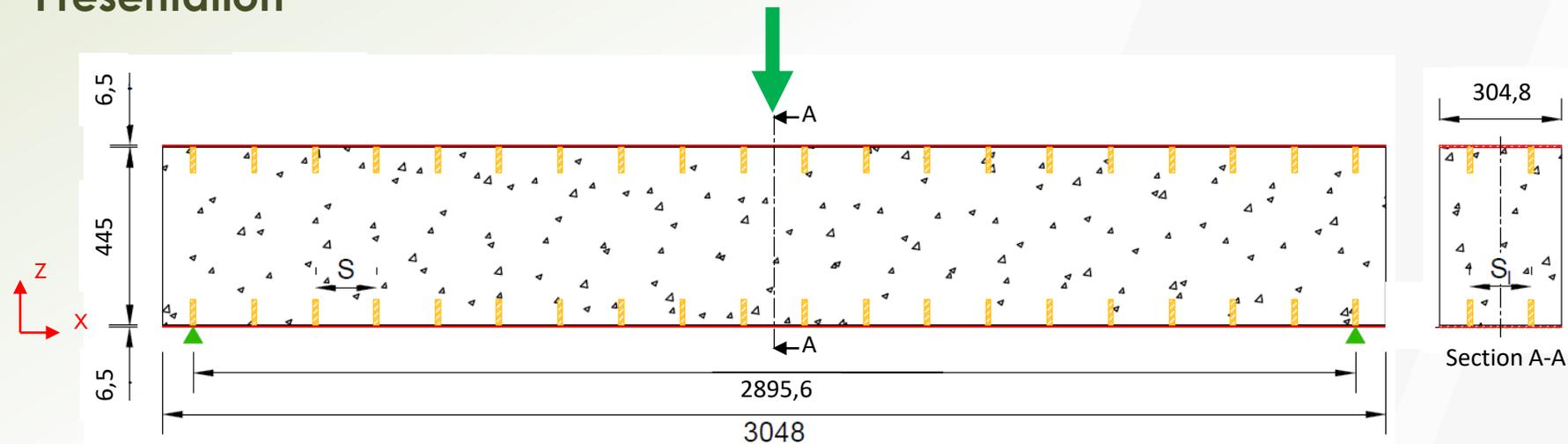


$$P_{ult} = 0,8f_{ug}A_g = 167,3kN$$



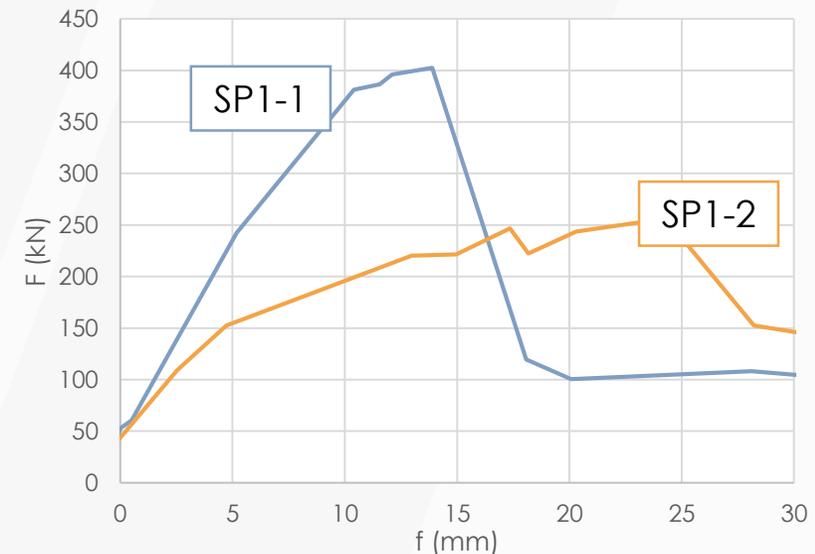
- Bonne estimation des efforts, écrasement et arrachement du béton retrouvés
- Plafonnement des efforts repris par le système à la résistance théorique, ruine du système par ruine en cisaillement des goujons soudés au profilé

Présentation

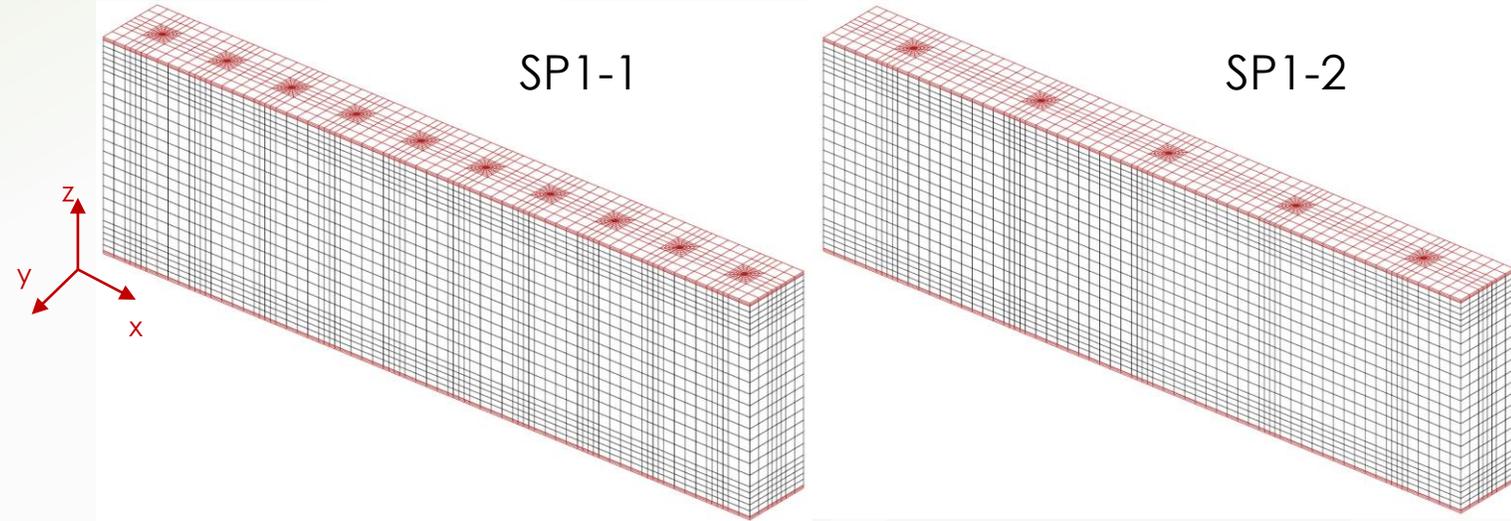
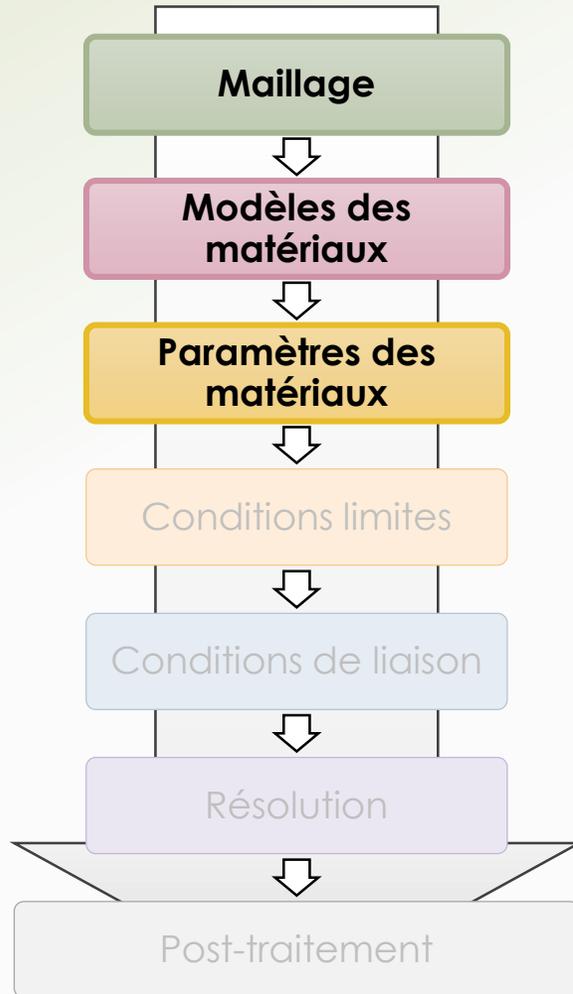


	Nombre de goujons par plaque n_g (-)	Espacement des goujons S (mm)
SP1-1	40	152,4
SP1-2	20	304,8

- Essais de flexion 3 points sur des poutres SCS de (Sener, et al. 2016)
- Poutre SP1-1 à action composite complète
- Poutre SP1-2 à action composite partielle



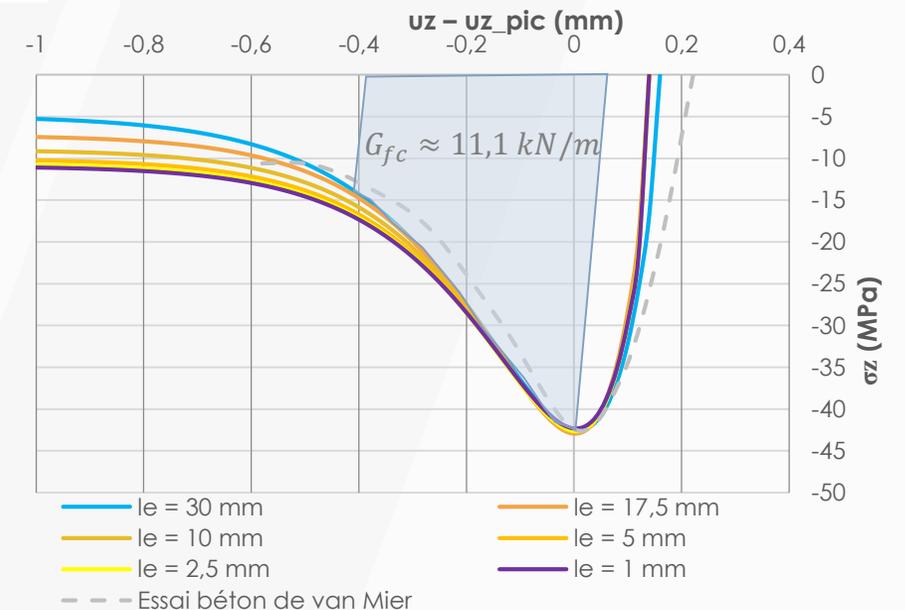
Modélisation (1/2)



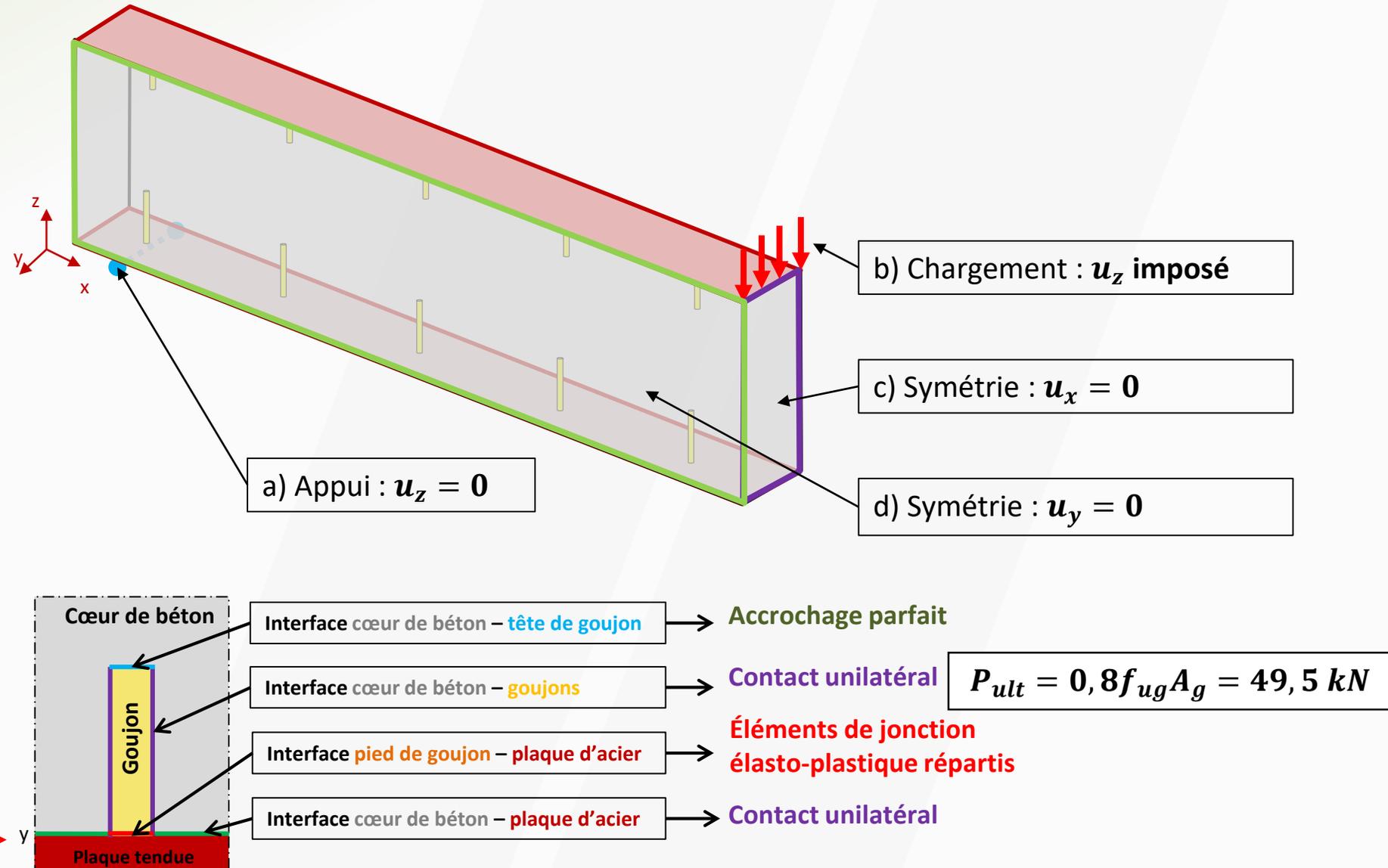
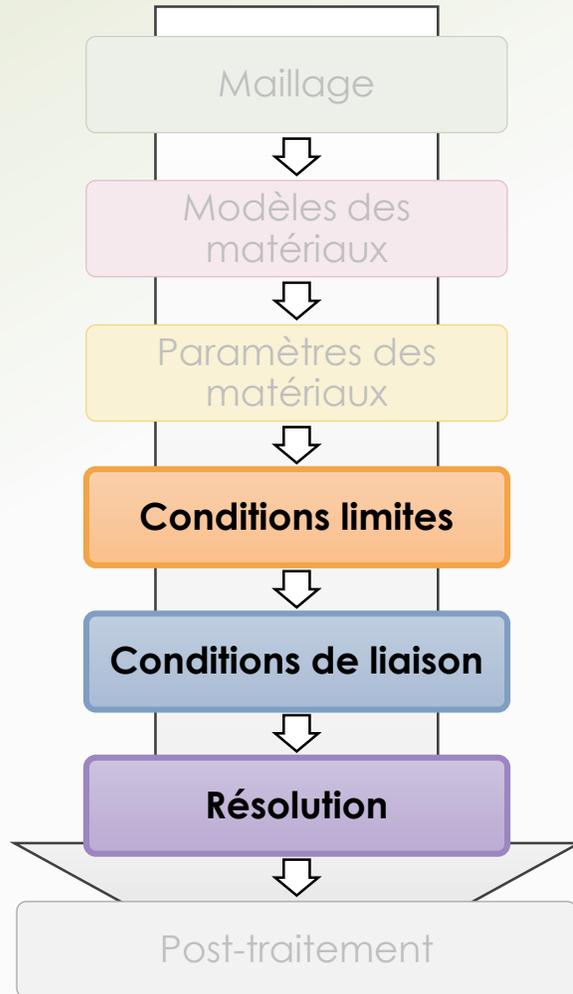
- Acier élasto-plastique
- Béton à endommagement isotrope régularisé en traction et compression

$$A_c = 67,598l_e^2 + 18,853l_e - 0,0006$$

$$B_c = 25713l_e - 1,068$$



Modélisation (2/2)



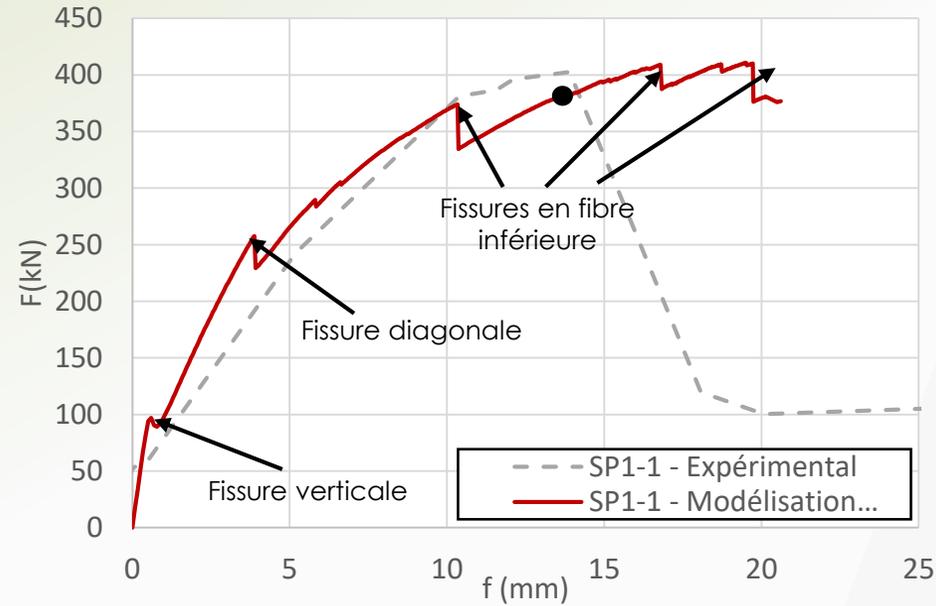
Poutres SCS en flexion

Développement d'une modélisation simplifiée

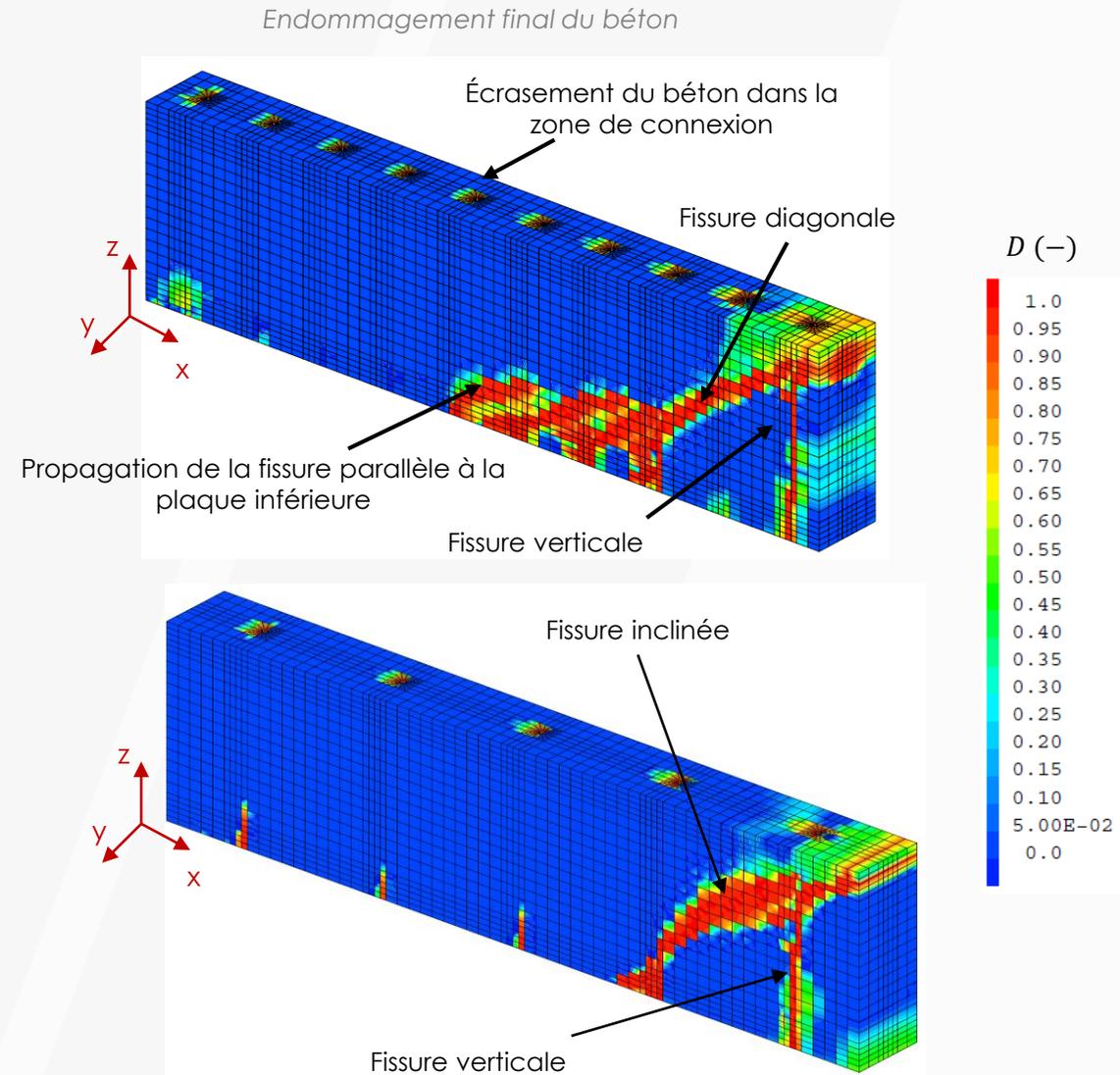
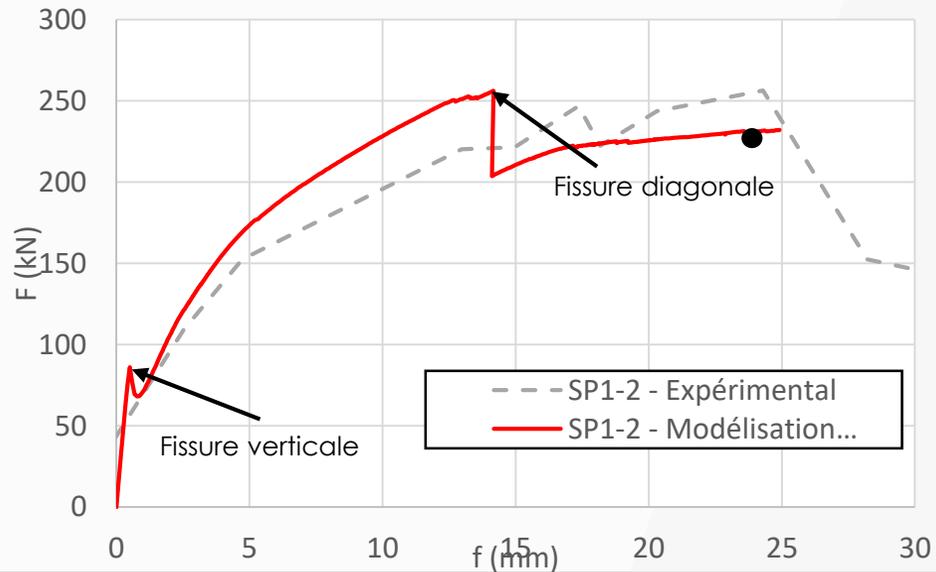
Jonction d'ossature SCS

Résultats

SP1-1

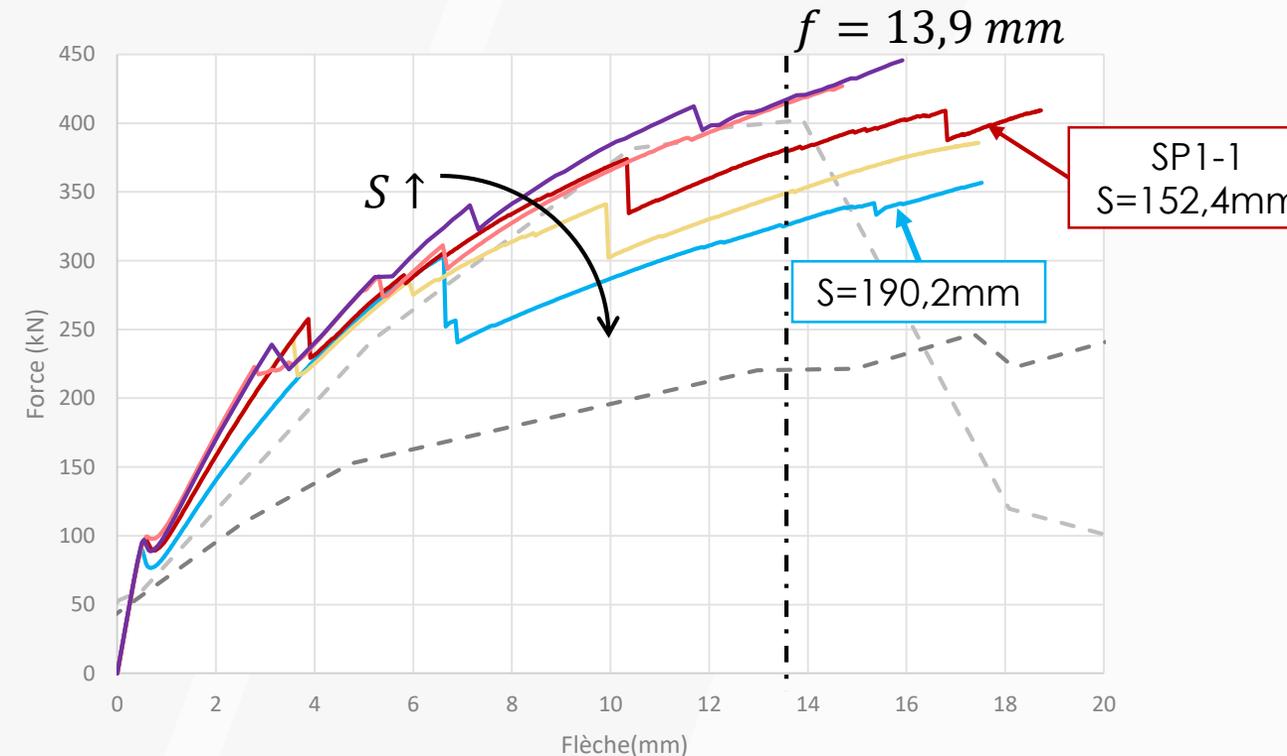
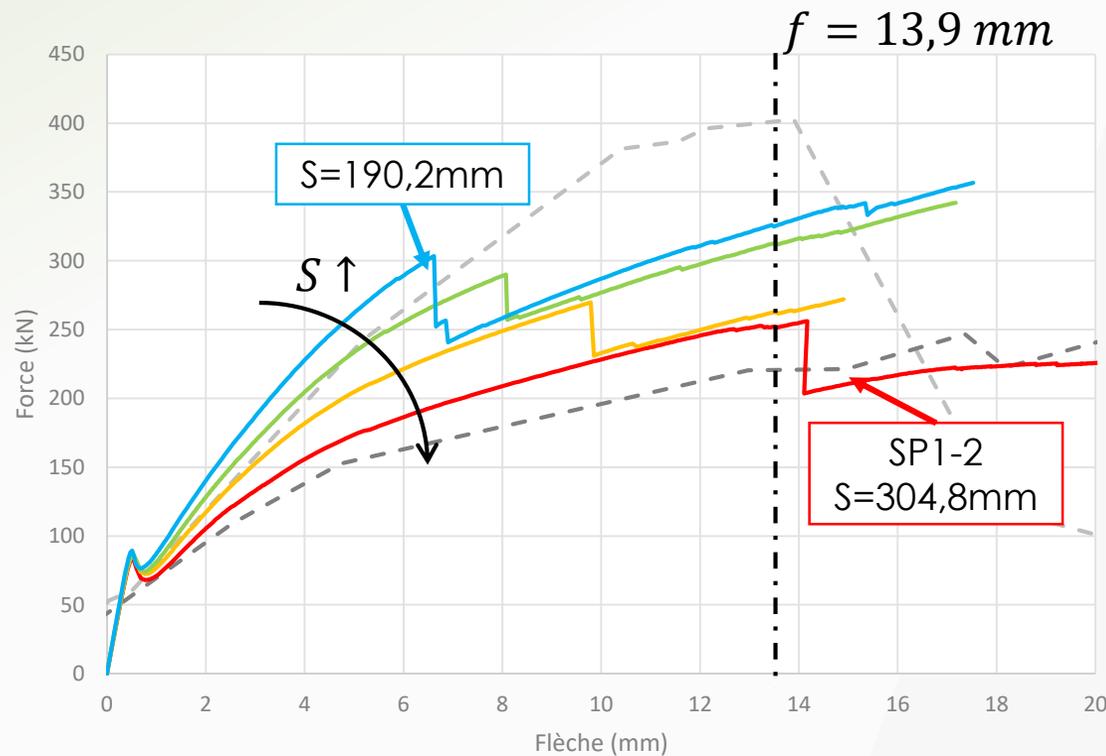


SP1-2



Influence de l'espacement des connecteurs

Comportement global

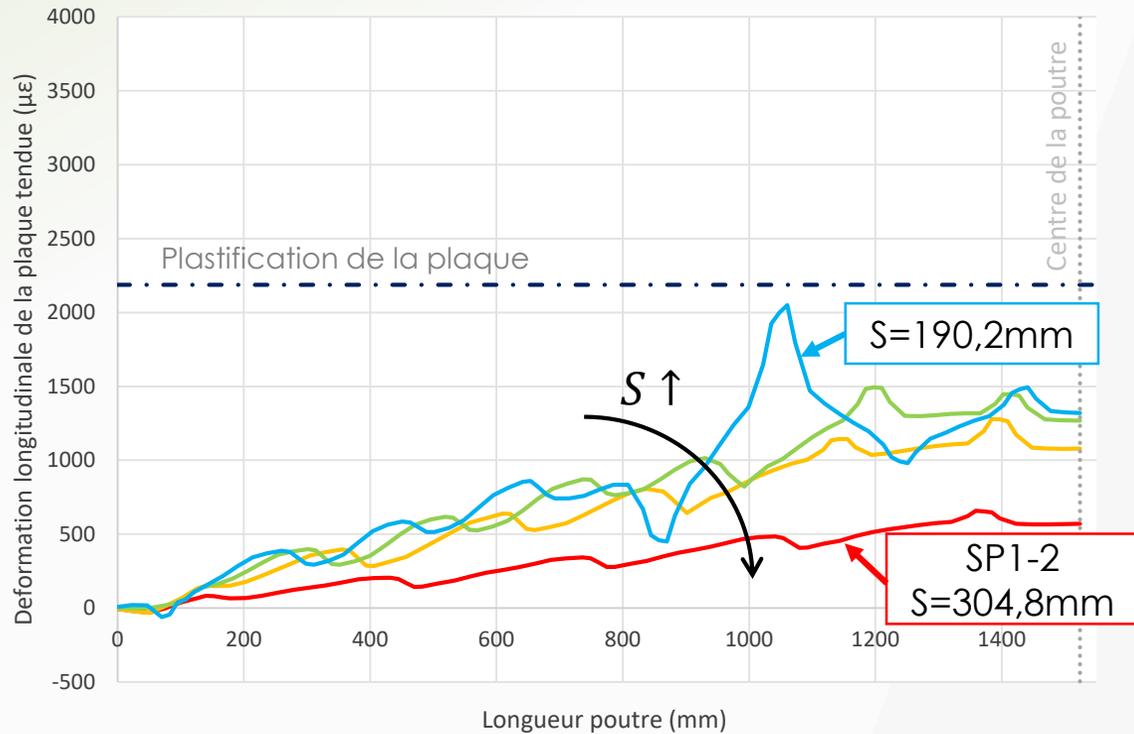


- **Dispersion importante des courbes** en fonction de l'espacement des connecteurs

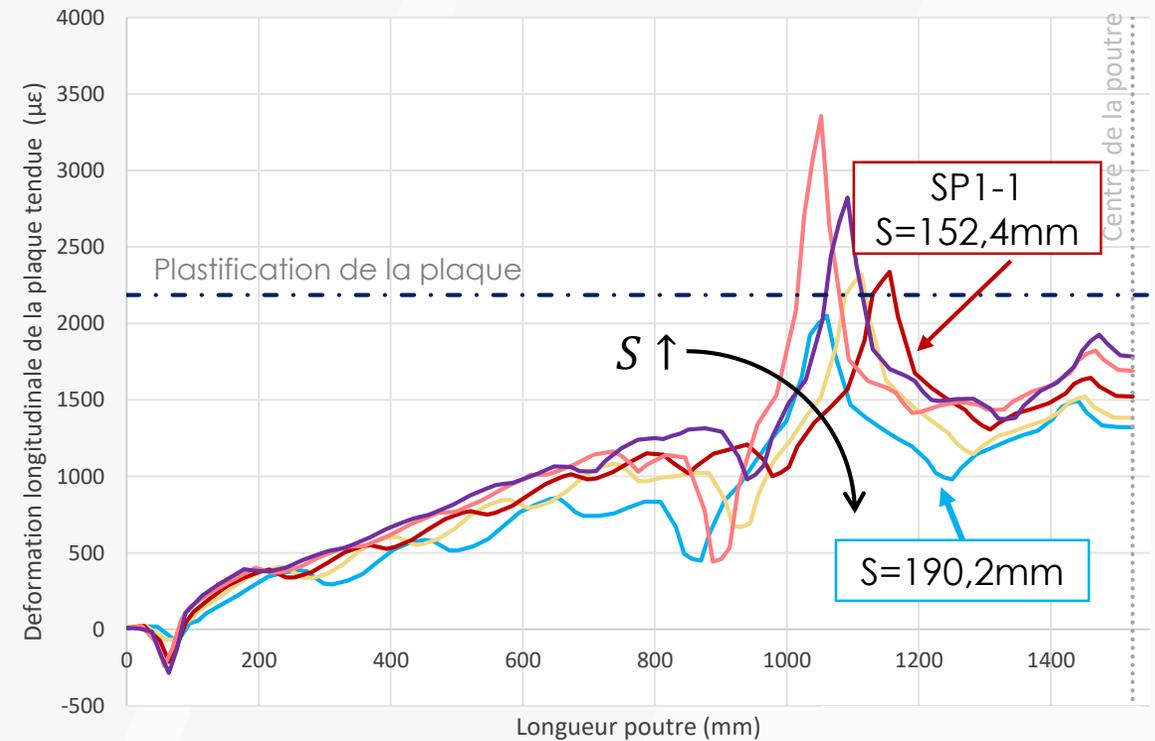
- **Dispersion moins importante des courbes** en fonction de l'espacement des connecteurs

Influence de l'espacement des connecteurs

Plastification plaque inférieure



- Pas de rupture de la plaque tendue



- Rupture de la plaque tendue

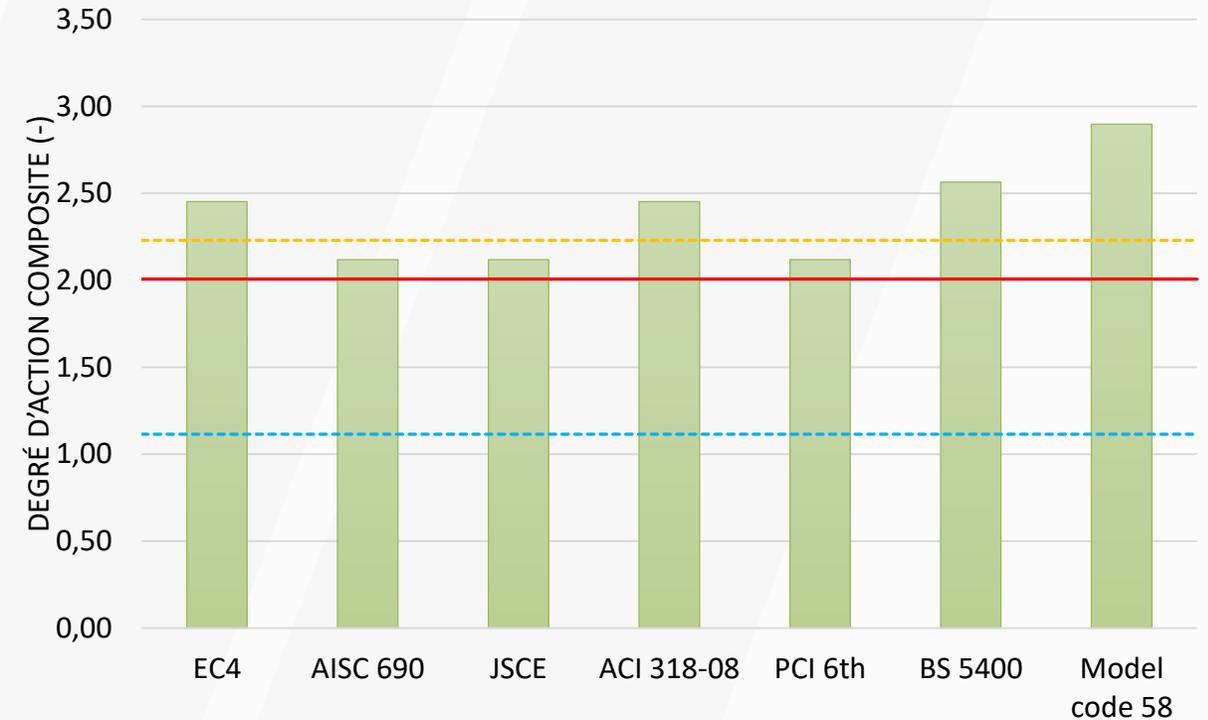
Influence de l'espacement des connecteurs

	Action composite complète	Action composite partielle
Comportement global	<ul style="list-style-type: none"> • Haute résistance et rigidité • Faibles variations du comportement quand $S \downarrow$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance et rigidité plus basses • Importantes variations du comportement quand $S \downarrow$
Mode de ruine	<ul style="list-style-type: none"> • Plastification de la plaque • Fissure sous effort tranchant du béton 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de plastification de la plaque • Fissure de flexion du béton

Critère d'action composite complète : $S_{num} = 169,3 \text{ mm}$

Degré d'action composite:

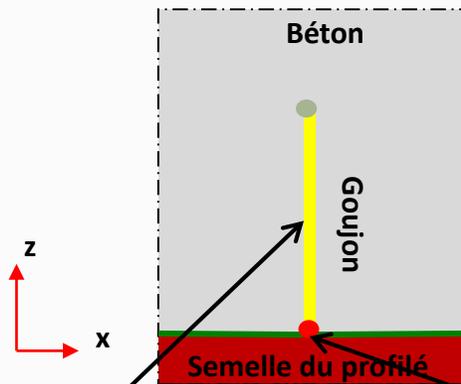
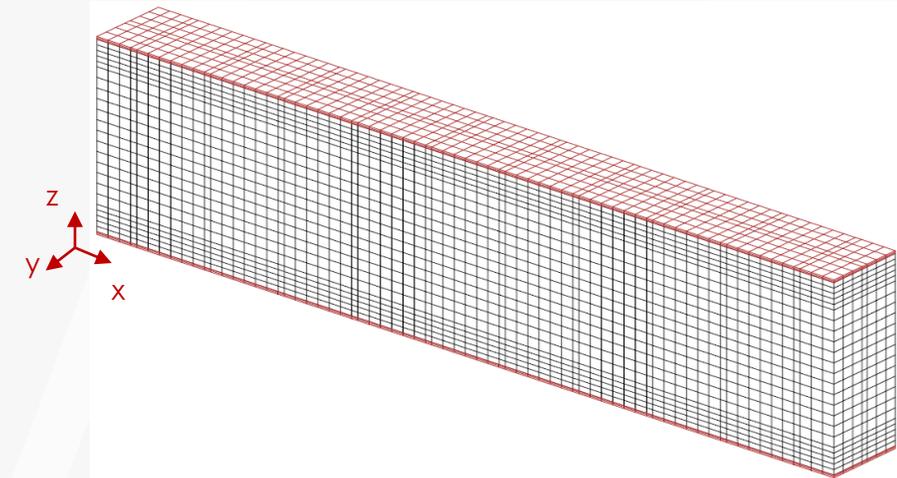
$$\eta_{SC,num} = \frac{2LP_{Rd}}{S_{num}f_{yp}A_{plaque}} = 2,01$$



- Marges potentielles de dimensionnement des structures SCS selon les normes

Proposition d'une stratégie simplifiée

- Représentation des connecteurs par des éléments finis 1D Poutre
- Simplification du maillage du cœur de béton et des plaques
- Loi de comportement des éléments de jonction de (Ollgaard, et al. 1971)



Interface cœur de béton – goujons

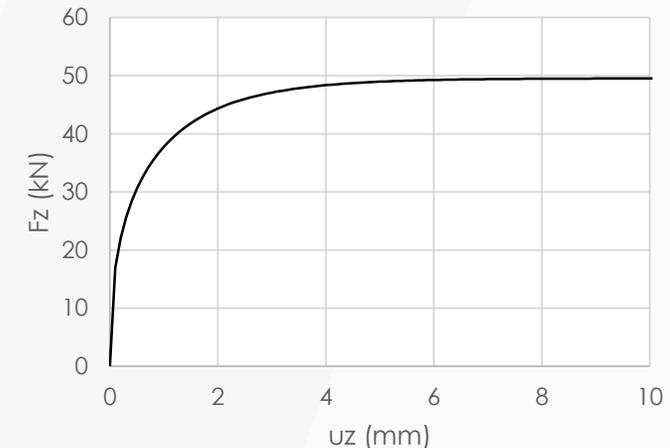
Interface pied de goujon – profilé métallique

Accrochage parfait

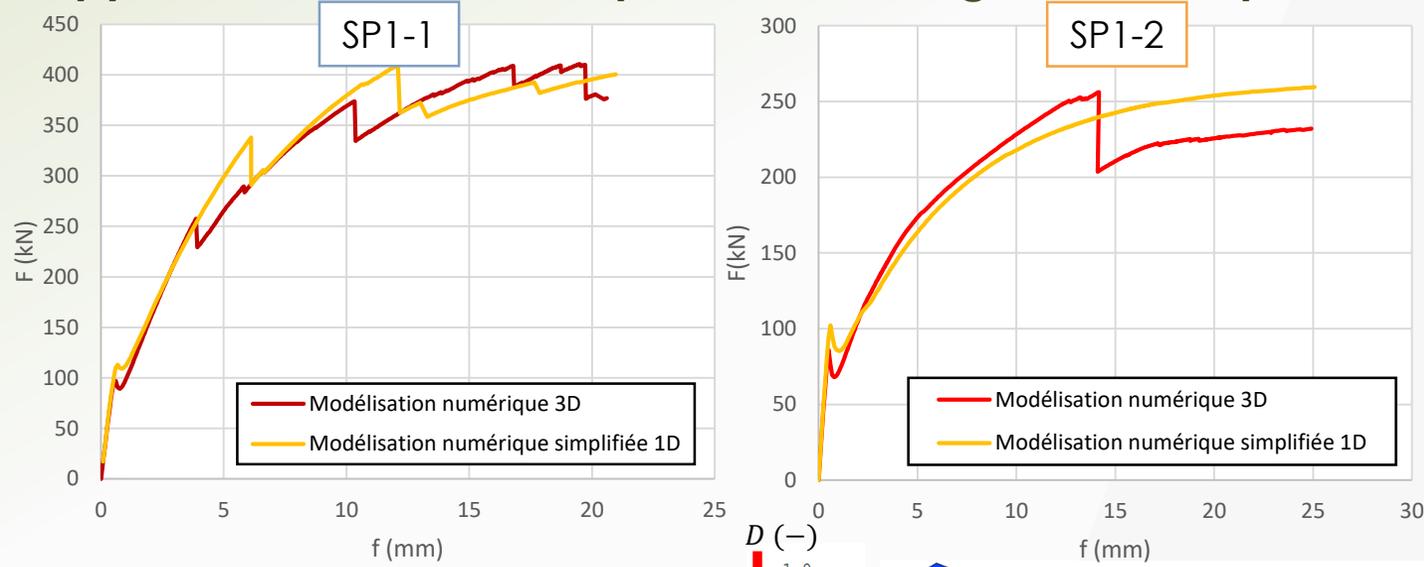
Élément de jonction non-linéaire

$$P = P_{Rd} \left(1 - e^{-\frac{18}{25.4}\delta}\right)^{\frac{2}{5}}$$

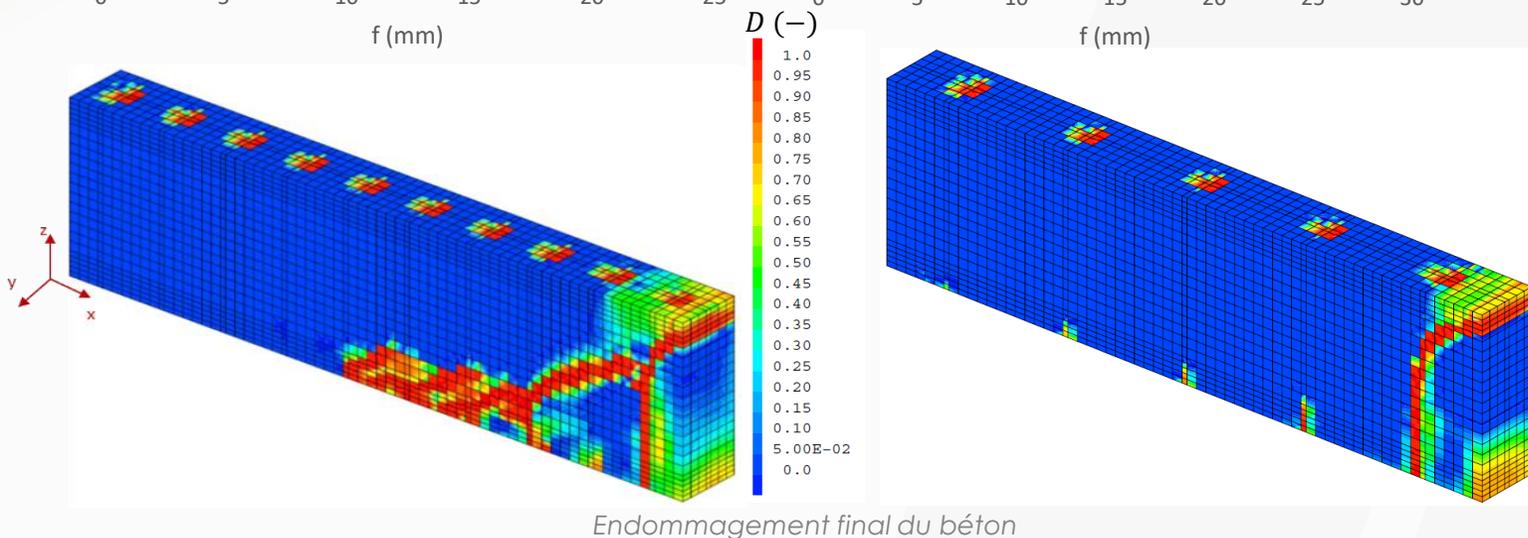
$$P_{Rd} = \min(0,8A_{gouj}f_{ug}; 0,5A_{gouj}\sqrt{f_c E_c})$$



Application à l'étude de poutres SCS et gain de temps de calcul

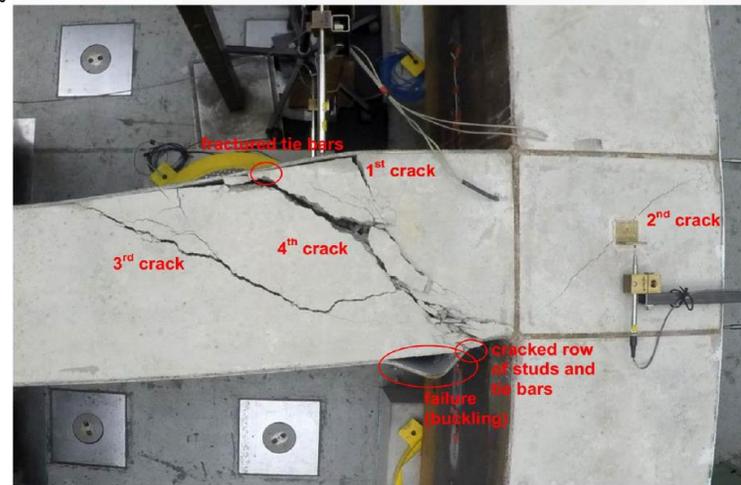
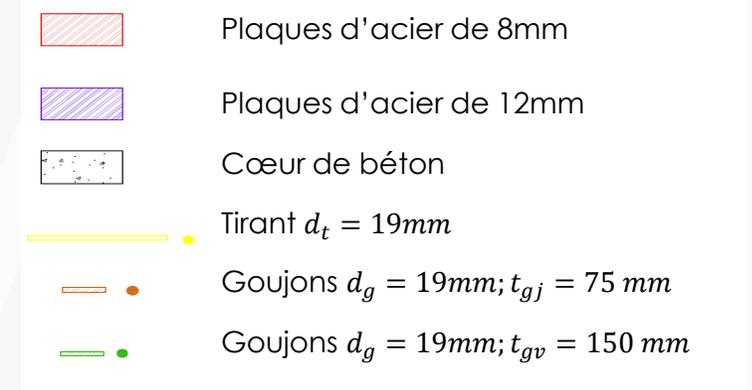
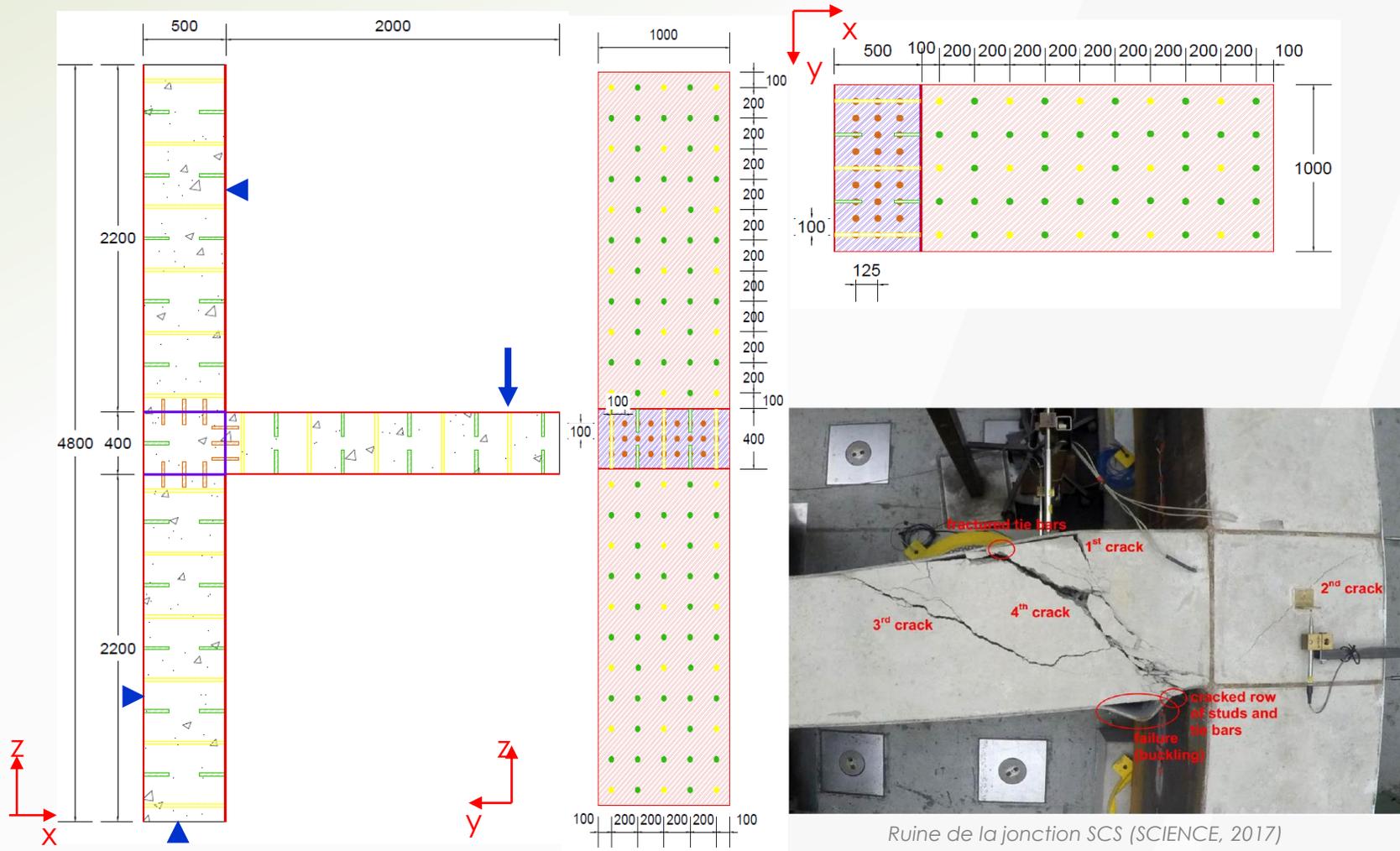


	SP1-1		SP1-2	
	Temps de calcul	Nombre de nœuds total	Temps de calcul	Nombre de nœuds total
Modélisation fine 3D	334,0 h	51 410	258,3 h	34 940
Modélisation simplifiée 1D	77,5 h	17 160	69,9 h	15 900



- Comportements global et modes de ruine retrouvés
- Écart dans la propagation de l'endommagement du béton
- Réduction importante du temps de calcul

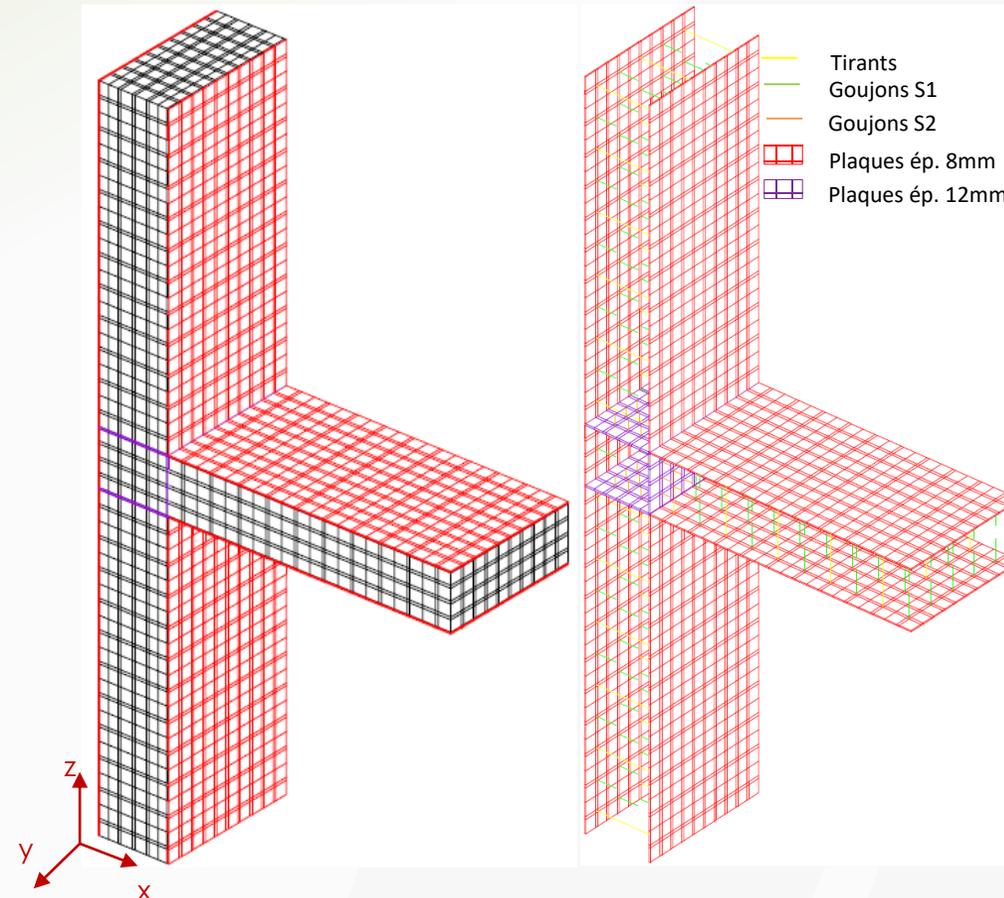
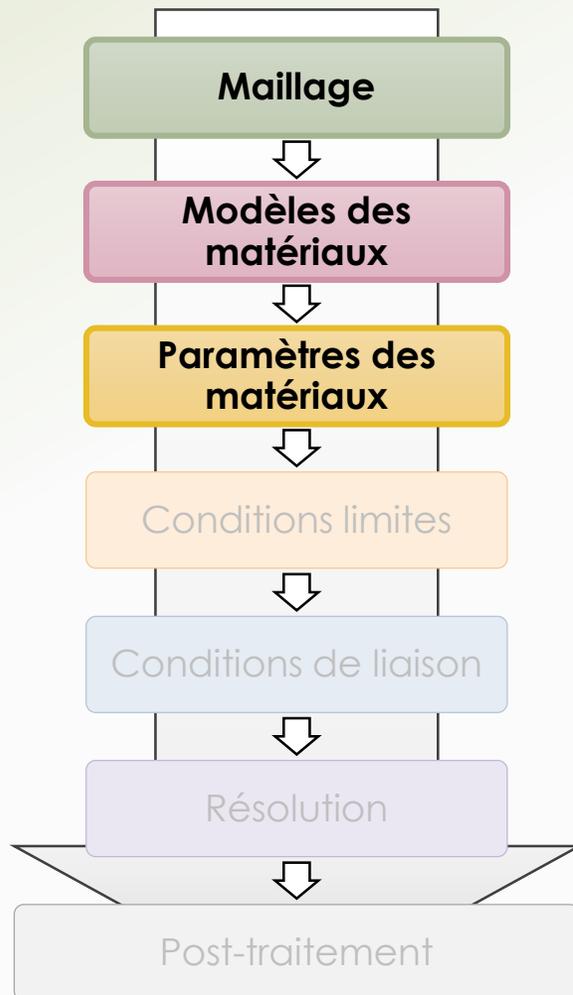
Présentation



Ruine de la jonction SCS (SCIENCE, 2017)

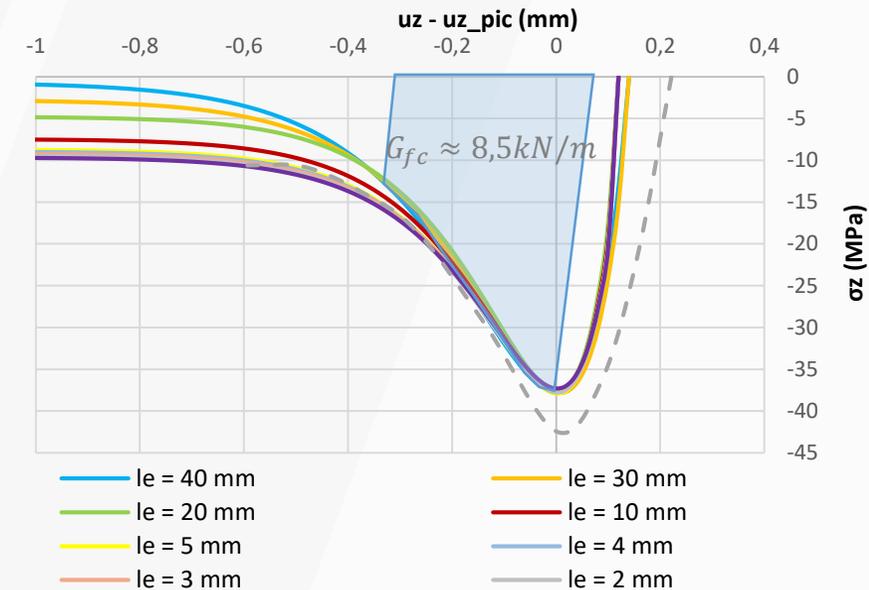
- Essai de jonction du projet (SCIENCE, 2017)
- Mise en flexion d'une jonction SCS voile-voile
- Dimensionnée pour assurer la résistance de la jonction après la ruine du voile SCS le plus faible

Modélisation (1/2)



- Béton et plaques d'acier en éléments 3D
- Connecteurs en éléments 1D Poutres

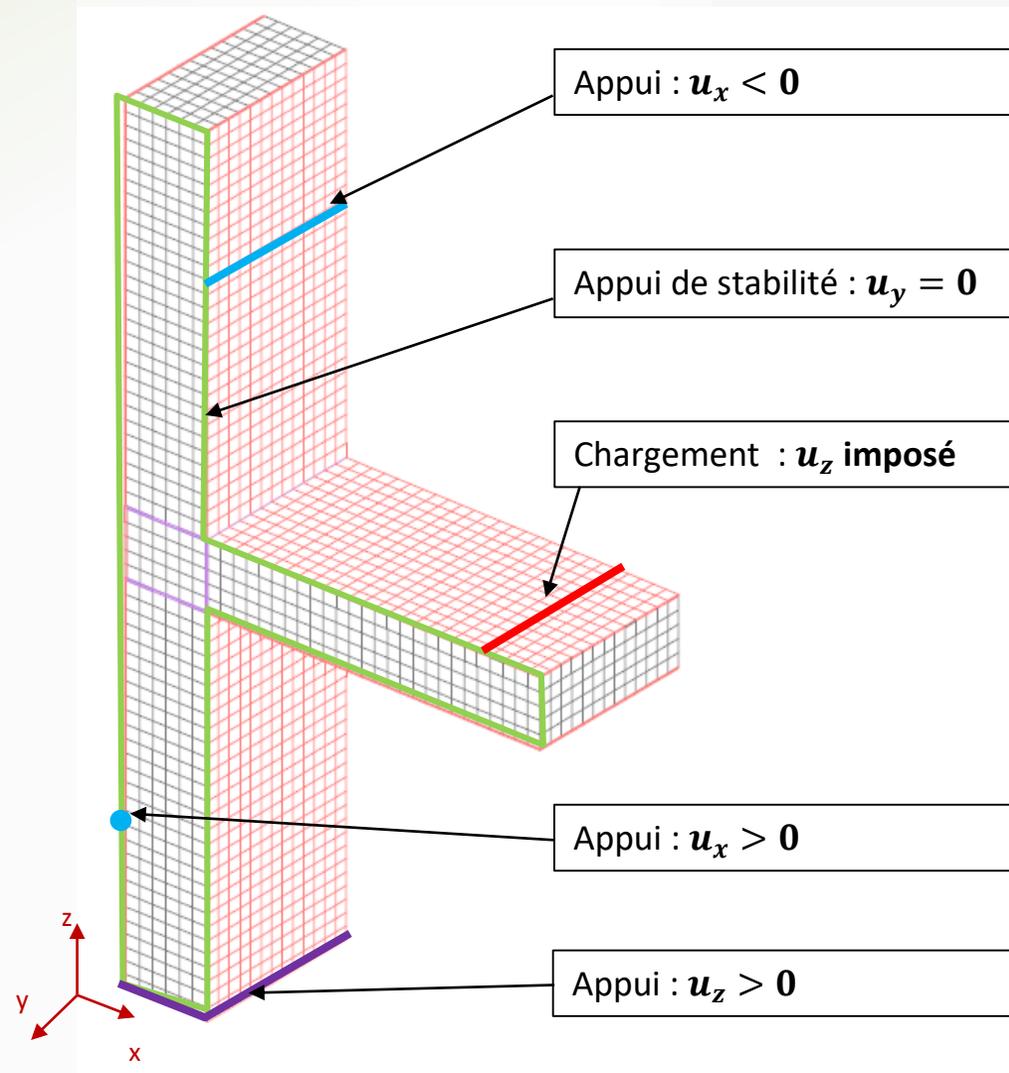
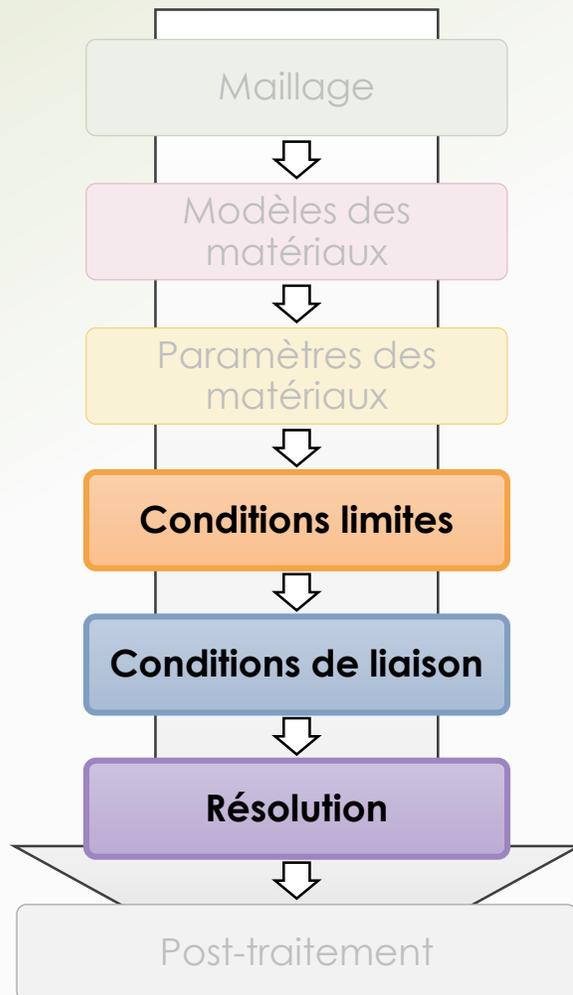
- Acier élasto-plastique
- Béton à endommagement isotrope régularisé en traction et compression



$$A_c = -104,5l_e^2 + 27,701l_e - 0,0113$$

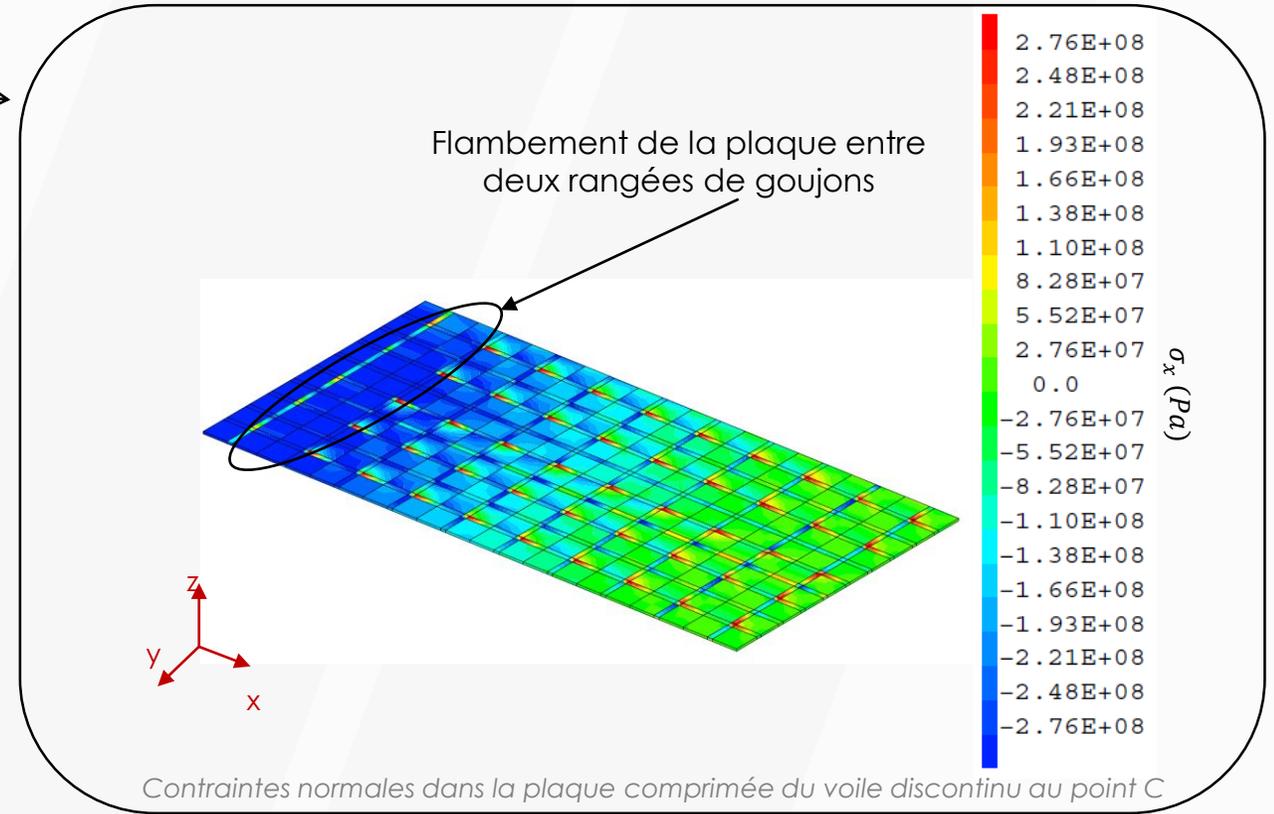
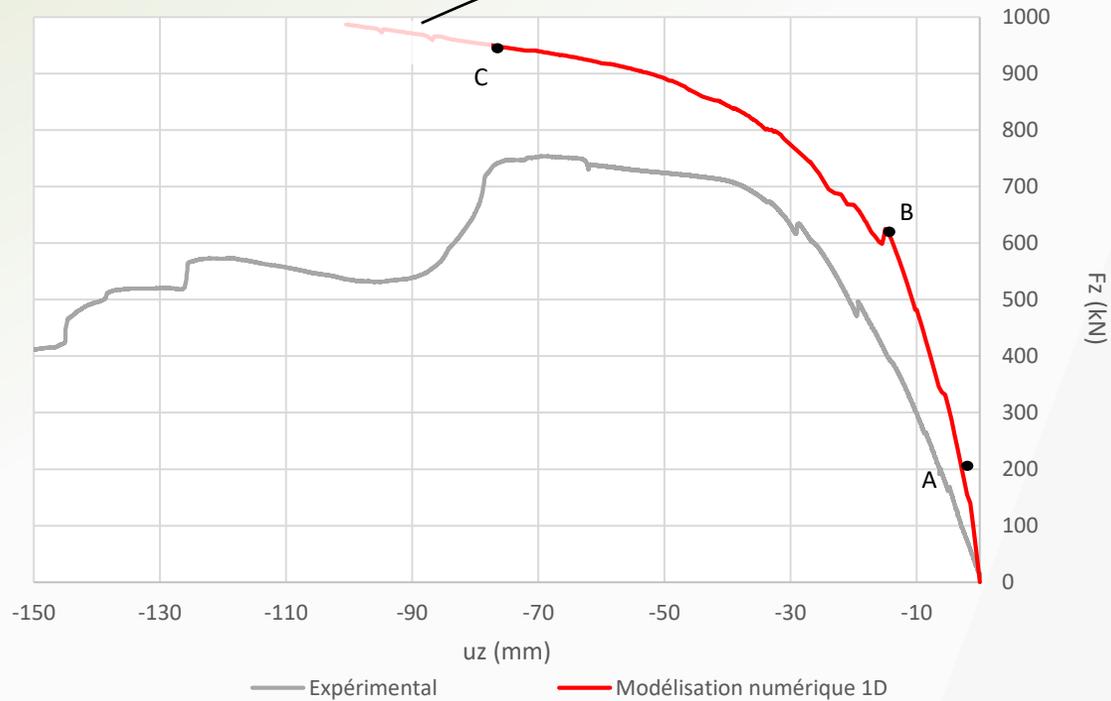
$$B_c = -221548l_e^2 + 34030l_e - 9,6231$$

Modélisation (2/2)



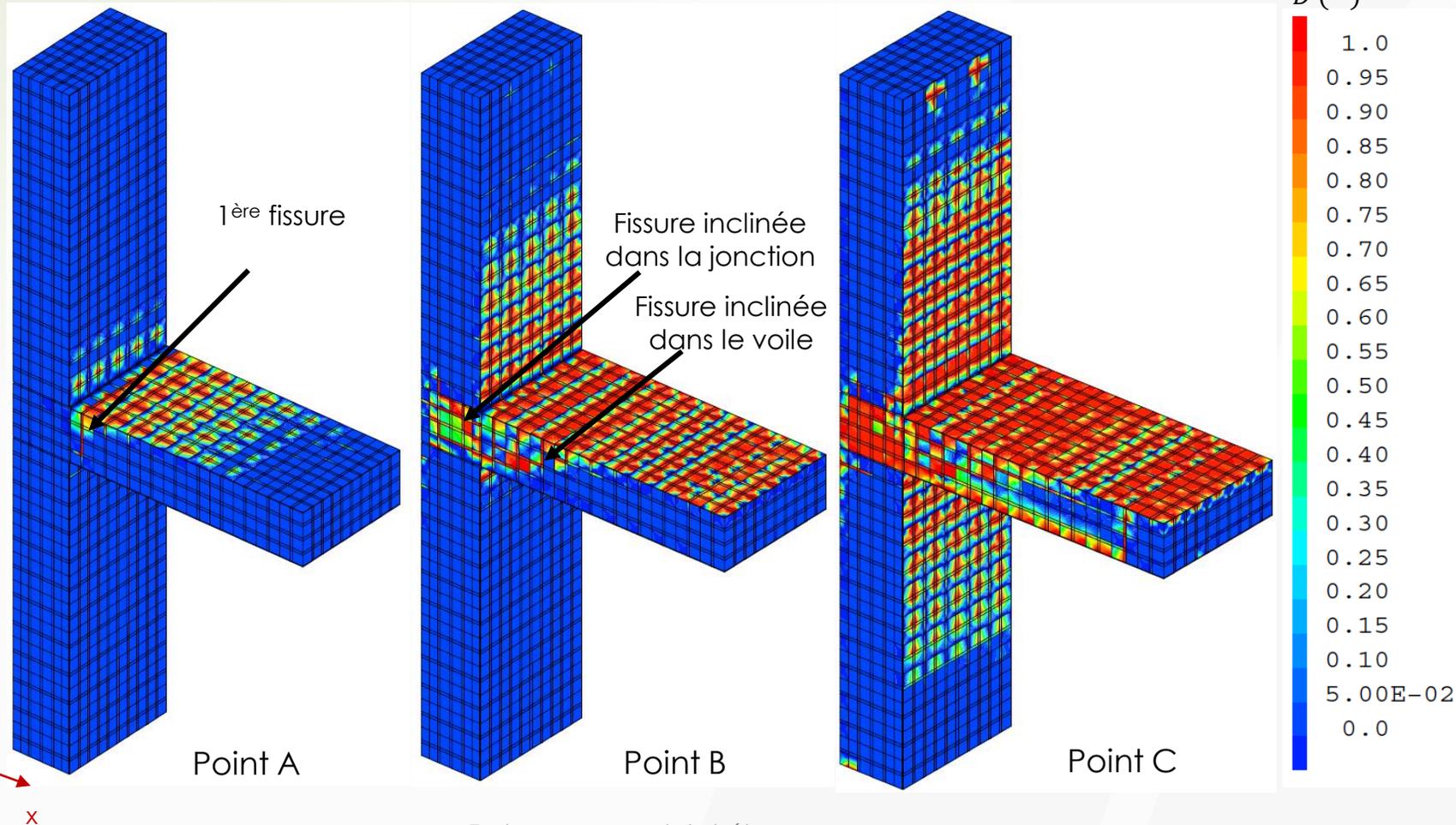
	$P_{Rd} \text{ (kN)}$ $\min(0,8A_{gouj}f_{ug}; 0,5A_{gouj}\sqrt{f_cE_c})$
Tirants	128,4
Goujons S1 ($h_g = 150\text{mm}$)	113,4
Goujons S2 ($h_g = 75\text{mm}$)	123,2

Résultats et analyses (1/3)

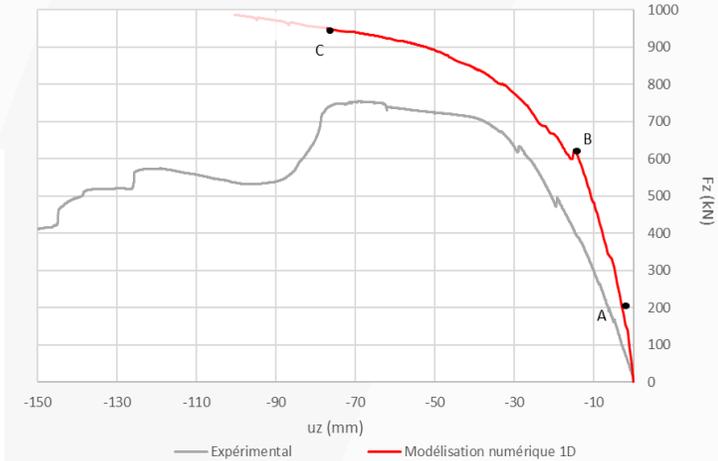


- Les différentes phases du comportement sont retrouvées
- Flambement de la plaque comprimée du voile discontinu visible
- Surestimation de la résistance du système

Résultats et analyses (2/3)

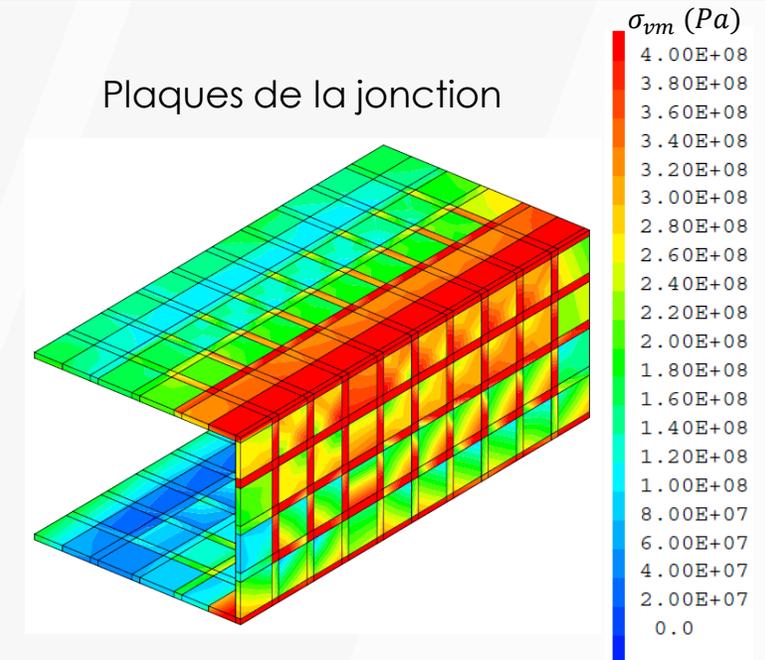
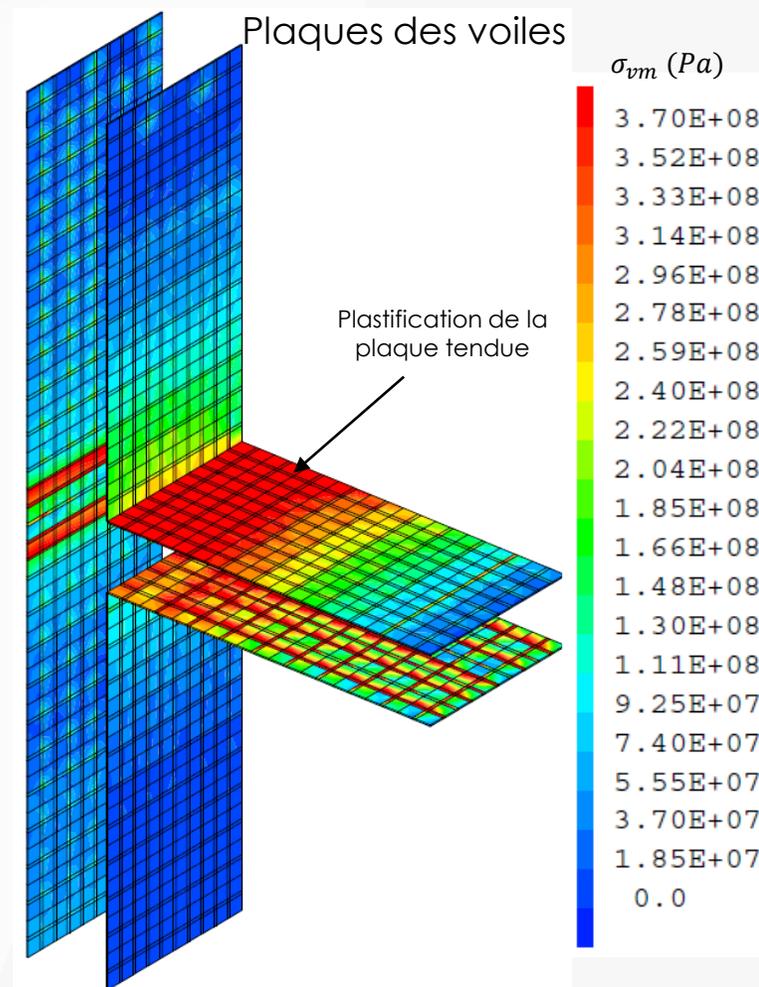
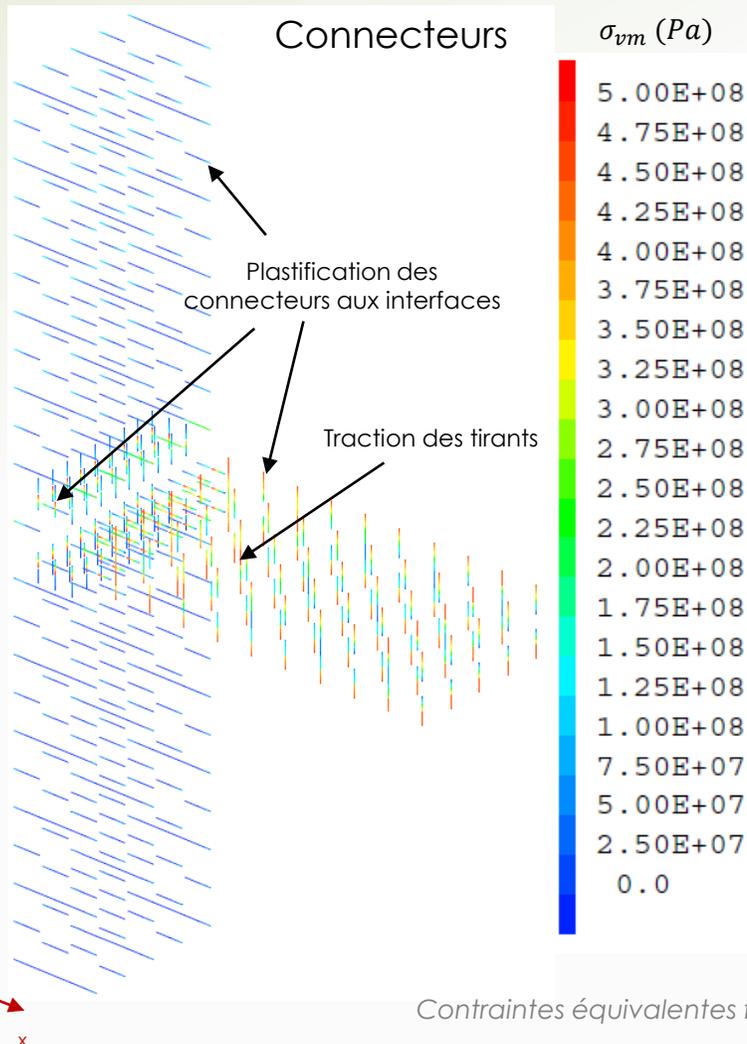


Endommagement du béton



- Endommagement local du béton au niveau des connecteurs
- Ruine sous effort tranchant du voile discontinu
- Bielle de compression dans la jonction

Résultats et analyses (3/3)

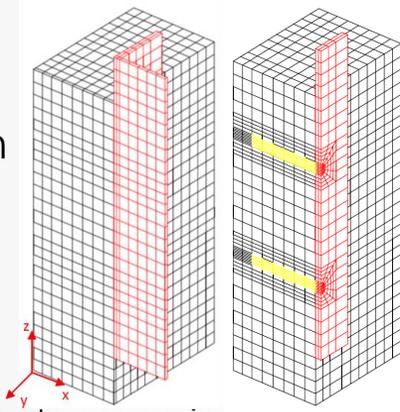


- Cisaillement des connecteurs
- Traction des tirants
- Plastification de la plaque tendue du voile discontinu
- Plastification aux angles des plaques de la jonction

Contraintes équivalentes finales de von Mises

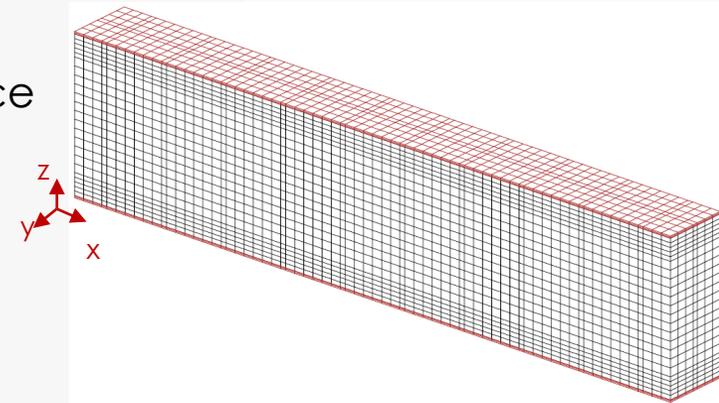
➤ Développement d'une stratégie de modélisation fine

- Nouveau modèle de comportement du béton incluant une régularisation en compression
 - Nouveaux éléments de jonction à comportement élasto-plastique répartis en interface
- Etude d'essai push-out → Développement et validation de la stratégie et analyse du comportement local du système de connexion
 - Etude de poutres SCS en flexion → Réponses retrouvées et analyse du comportement
 - Analyse de l'influence du degré d'action composite → Identifications des variations fines de comportement



➤ Développement d'une stratégie de modélisation simplifiée

- Nouveaux éléments de jonction à comportement non-linéaire en interface
- Etude de poutres SCS en flexion → Gain de temps de calcul important ($\approx \div 4$)
 - Etude d'une jonction d'ossature SCS voile-voile → Comportements retrouvés



- ▶ **Améliorer la prédiction du comportement de structures SCS**
- ▶ **Analyses et développements complémentaires**
 - Modèle de comportement du béton intégrant les localisations de déformation en compression
 - Comportement des éléments de jonction goujon – plaque intégrant la dégradation plastique de l'acier
 - Stratégies de modélisations simplifiées (sans représentation explicite des connecteurs, par macro-éléments, ...)
- ▶ **Nouvelles applications à d'autres structures industrielles**



*Rainer Square Tower à Seattle
(Wright Runstad & Company, 2021)*