

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



**CONCYC : UN NOUVEAU
MODELE D'ENDOMMAGEMENT
POUR DECRIRE LE COMPORTEMENT
CYCLIQUE DU BETON**

Benjamin Richard

CEA, DEN, DM2S, SEMT, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique

Maxime Vassaux

CEA, DEN, DM2S, SEMT, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique
Laboratoire de Mécanique et Technologie/ENS Cachan/Université Paris Saclay/
CNRS

Frédéric Ragueneau

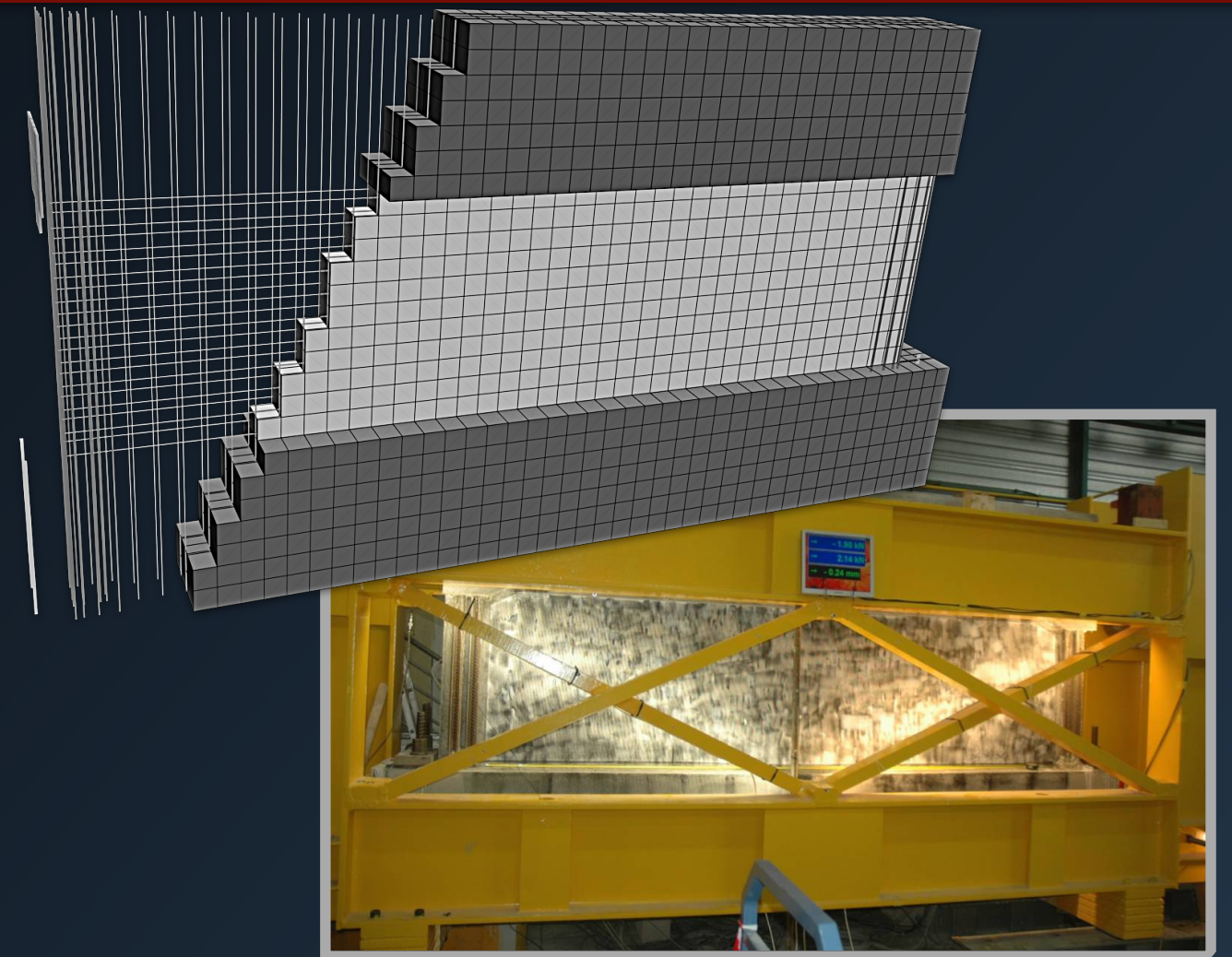
Laboratoire de Mécanique et Technologie/ENS Cachan/Université Paris Saclay/
CNRS

Alain Millard

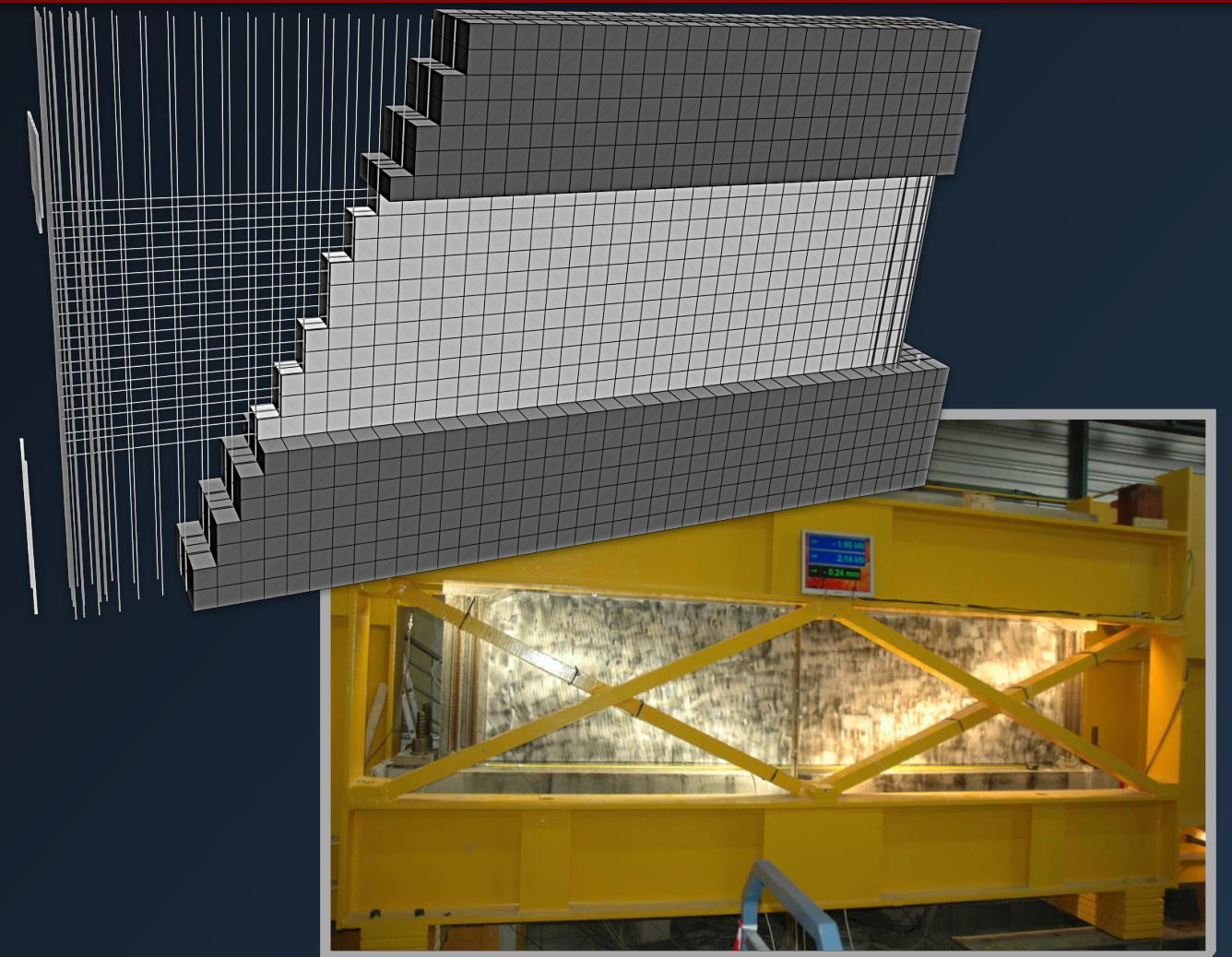
CEA, DEN, DM2S, SEMT, Laboratoire de Modélisation et Simulation des
Structures

Contexte et objectifs

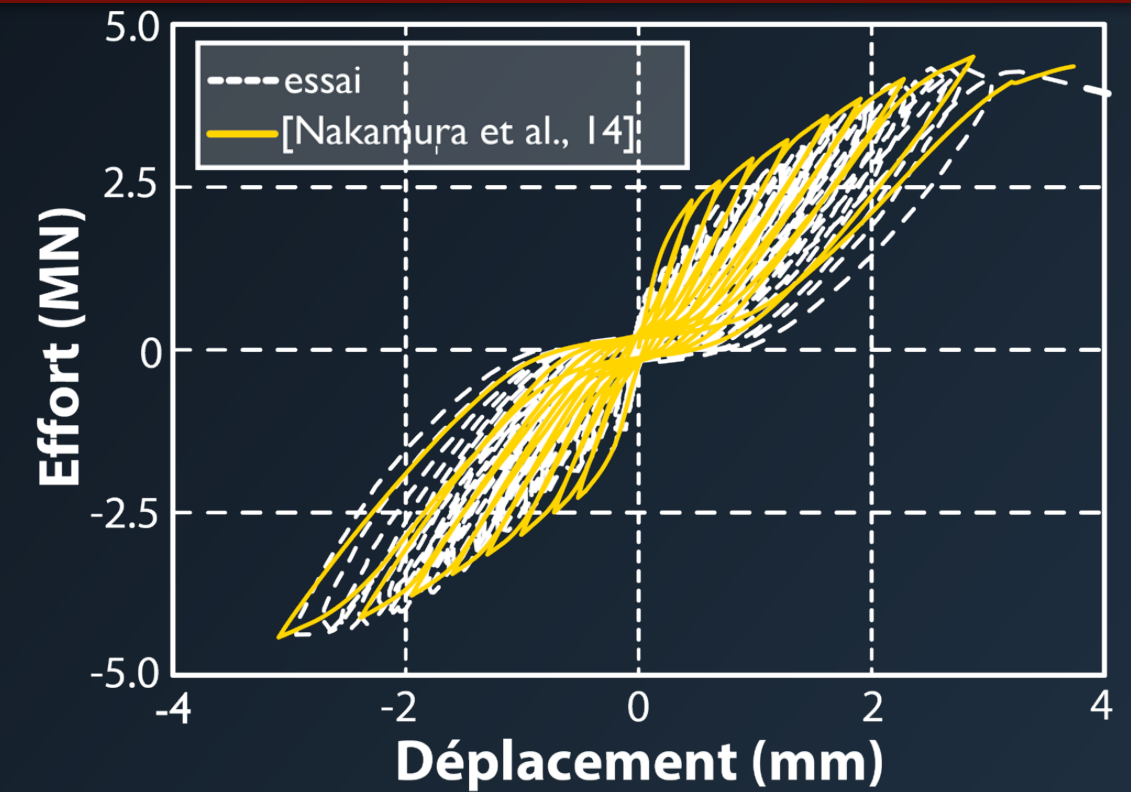
- Benchmark international [CEOS.fr, I I]



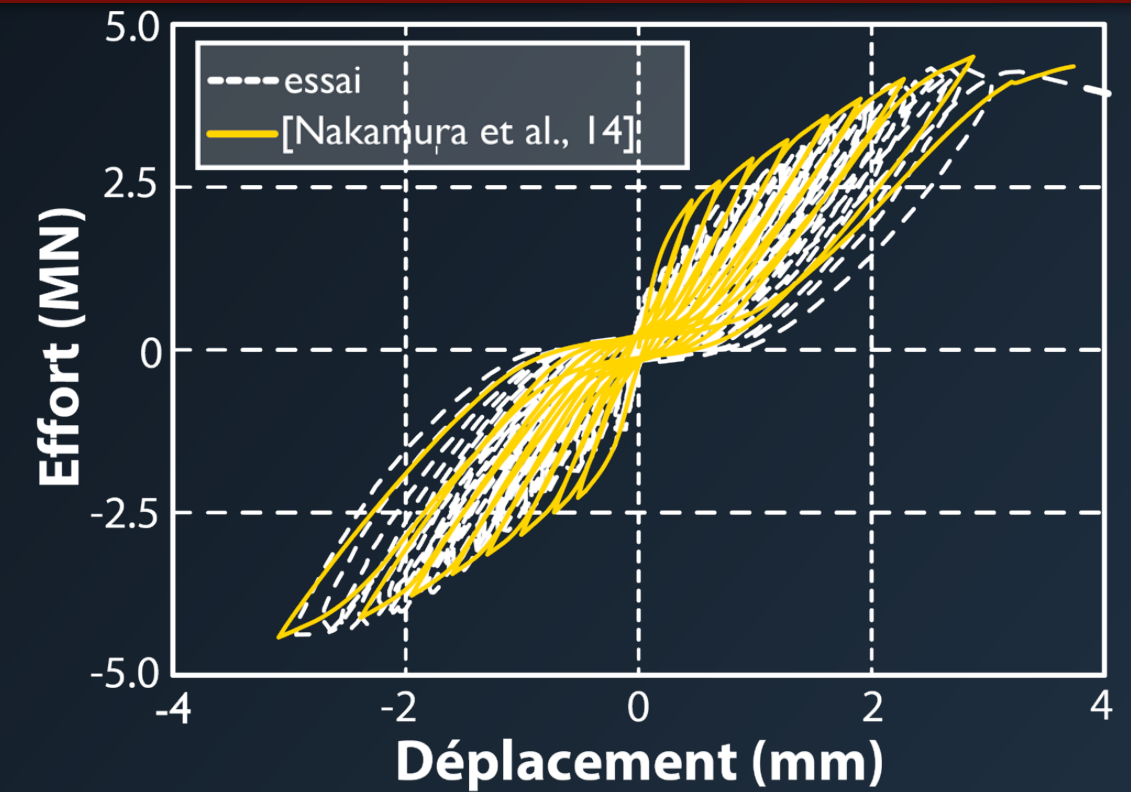
- Benchmark international [CEOS.fr, I I]
- 33 équipes
- 18 réponses fournies



- Benchmark international [CEOS.fr, 11]
 - 33 équipes
 - 18 réponses fournies
 - 1 réponse complète fournie (MED)

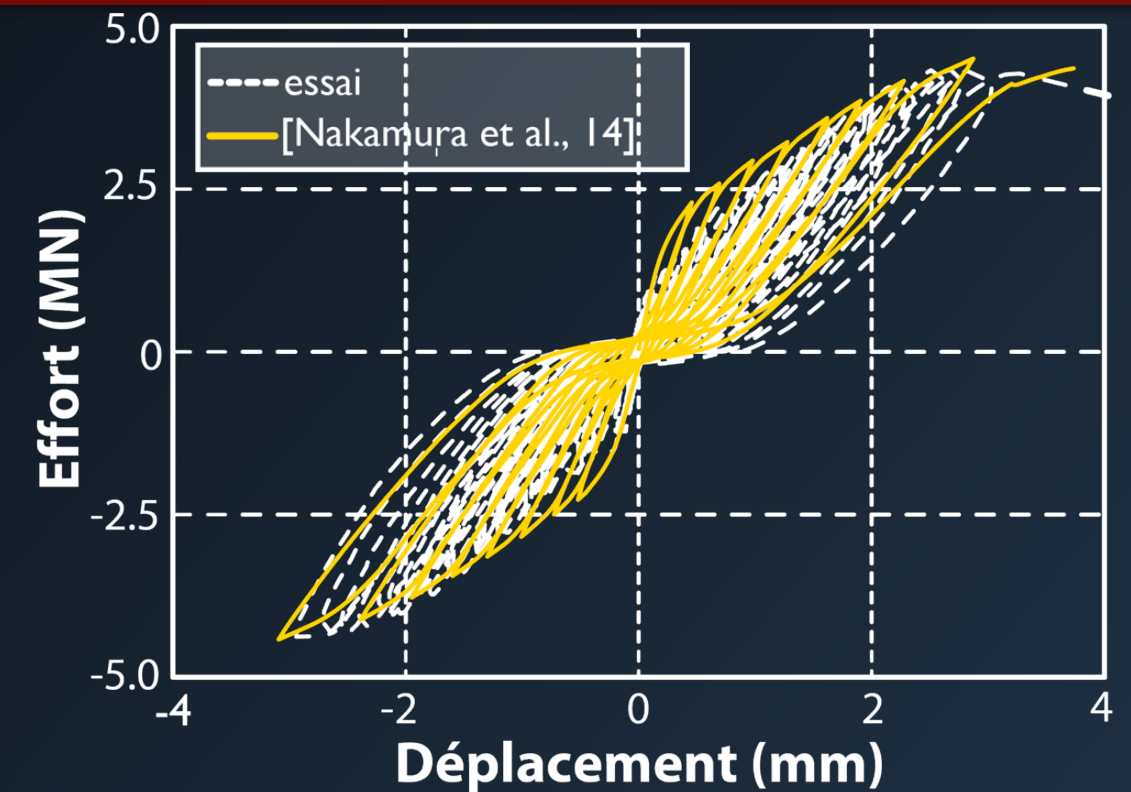


- Benchmark international [CEOS.fr, 11]
 - 33 équipes
 - 18 réponses fournies
 - 1 réponse complète fournie (MED)



► Manque de régularité dû à la fissuration

- Benchmark international [CEOS.fr, 11]
 - 33 équipes
 - 18 réponses fournies
 - 1 réponse complète fournie (MED)



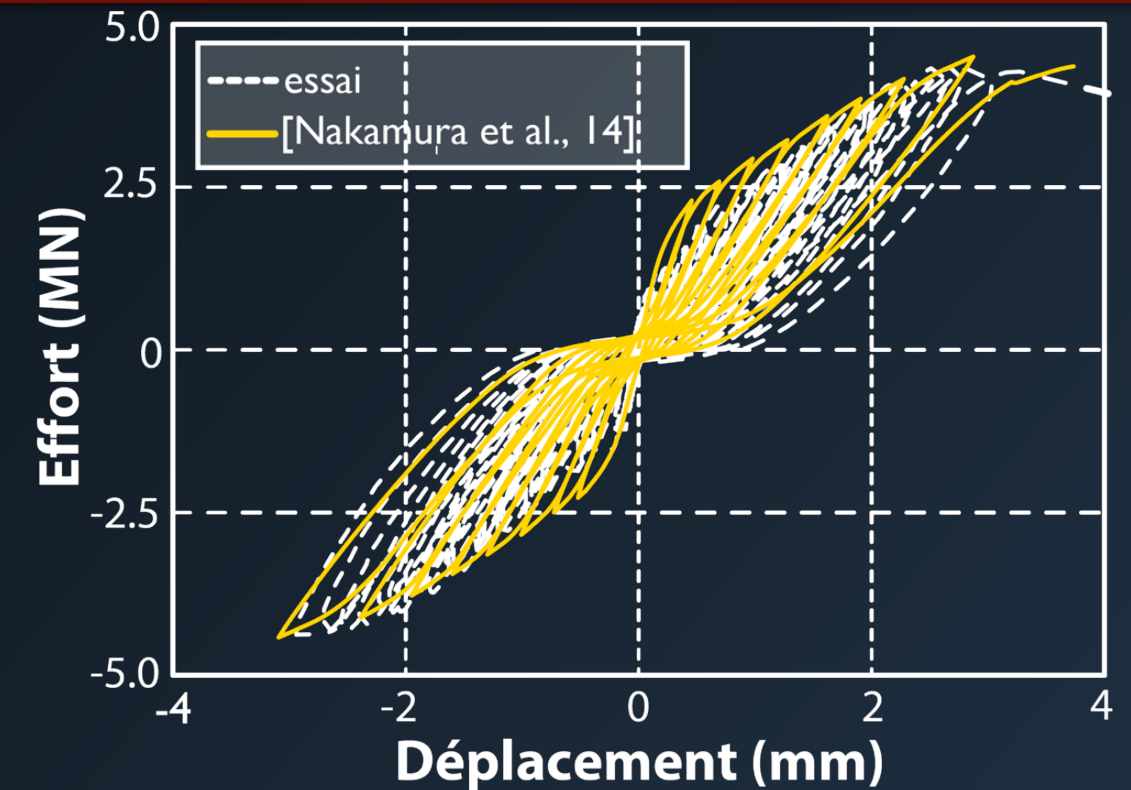
▶ Manque de régularité dû à la fissuration

▶ Description de l'effet unilatéral non satisfaisant



Lois macroscopiques non satisfaisantes

- Benchmark international [CEOS.fr, 11]
 - 33 équipes
 - 18 réponses fournies
 - 1 réponse complète fournie (MED)



▶ Manque de régularité dû à la fissuration

▶ Description de l'effet unilatéral non satisfaisant

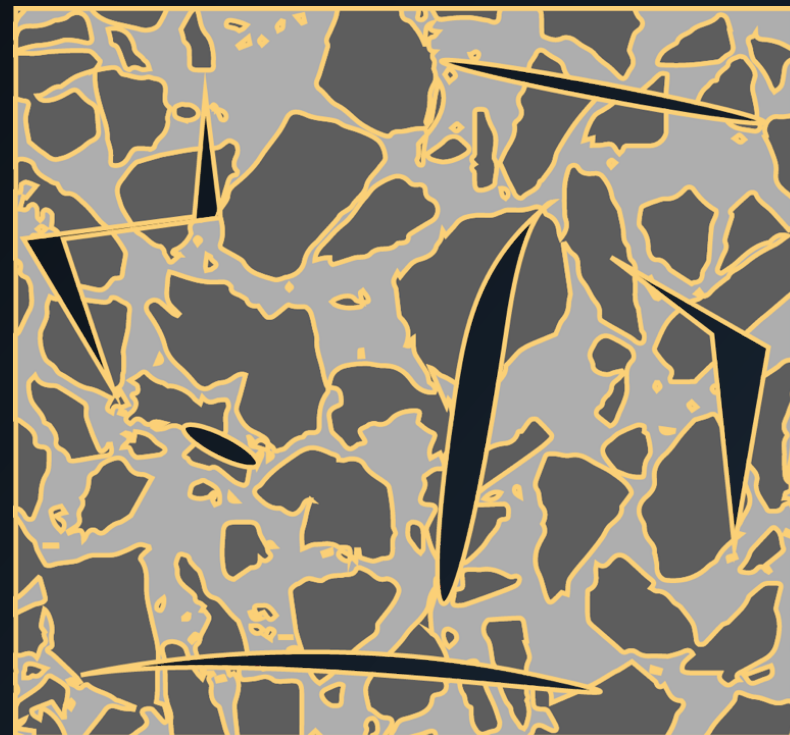
* Formuler une loi constitutive capable de simuler le comportement cyclique de structures en béton armé sujettes à des chargements cycliques

1. Formulation
2. Identification
3. Résultats locaux
4. Exemple structural
5. Conclusions et voies d'amélioration

Formulation

- Séparation des comportements
 - Matrice
 - Fissures

$$\sigma = \sigma^m + \sigma^f$$



- Séparation des comportements
 - Matrice
 - Fissures

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}^m + \underline{\underline{\sigma}}^f$$

- Description de la matrice
 - ▶ Mécanique de l'endommagement isotrope

$$\underline{\underline{\sigma}}^m = (1 - D)\mathbf{C} : \underline{\underline{\epsilon}}$$

- Description des fissures et de l'effet unilatéral

- Description des fissures et de l'effet unilatéral
 - élasticité non linéaire pour le phénomène d'ouverture/fermeture

- Description des fissures et de l'effet unilatéral
- élasticité non linéaire pour le phénomène d'ouverture/fermeture
- les contraintes dans la fissure dépendent :
 - déformations locales

$$\underline{\sigma}^f = f \left(\underline{\epsilon}^f \right)$$

$$\epsilon^f = \epsilon - \epsilon^{el} = D \epsilon$$

- Description des fissures et de l'effet unilatéral
- élasticité non linéaire pour le phénomène d'ouverture/fermeture
- les contraintes dans la fissure dépendent :
 - déformations locales
 - propriétés élastiques du matériau
 - fonction continue variant de 1 à 0

$$\underline{\underline{\sigma}}^f = f \left(\underline{\underline{\epsilon}}^f \right)$$

$$\epsilon^f = \epsilon - \epsilon^{el} = D \epsilon$$

$$\frac{\partial \underline{\underline{\sigma}}^f}{\partial \underline{\underline{\epsilon}}^f} = \vartheta \mathbf{C}$$

- Description des fissures et de l'effet unilatéral
- élasticité non linéaire pour le phénomène d'ouverture/fermeture
- les contraintes dans la fissure dépendent :
 - déformations locales
 - propriétés élastiques du matériau
 - fonction continue variant de 1 à 0

$$\underline{\underline{\sigma}}^f = f \left(\underline{\underline{\epsilon}}^f \right)$$

$$\epsilon^f = \epsilon - \epsilon^{el} = D\epsilon$$

$$\frac{\underline{\underline{\partial \sigma}}^f}{\underline{\underline{\partial \epsilon}}^f} = \vartheta C$$

- Régularisation d'un problème de contact
- ▶ A caractériser

- Description des fissures et de l'effet unilatéral
 - élasticité non linéaire pour le phénomène d'ouverture/fermeture
 - les contraintes dans la fissure dépendent :
 - déformations locales
 - propriétés élastiques du matériau
 - fonction continue variant de 1 à 0
- Plasticité parfaite pour décrire les effets hystériques
 - conséquences des frottement locaux entre les lèvres des fissures
 - critère de Drucker-Prager appliqué aux contraintes traversant les fissures

$$\varphi^f = \sqrt{J_2 \left(\underline{\underline{\sigma}}^f \right) + \mu_0 I_1 \left(\underline{\underline{\sigma}}^f \right)} \leq 0$$

Identification

Identification de la fonction ϑ

- “Surface active des fissures” = proportion de fissures fermées

[Mihai et al.,
2011]

$$\frac{\partial \sigma^f}{\partial \epsilon^f} = \vartheta C$$

Identification de la fonction ϑ

- “Surface active des fissures” = proportion de fissures fermées

[Mihai et al.,
2011]

► Expérimentation numérique

- “nombre de contact” / “nombre de fissures”
- cycles à différents niveaux de déformation

$$\frac{\partial \sigma^f}{\partial \epsilon^f} = \vartheta C$$

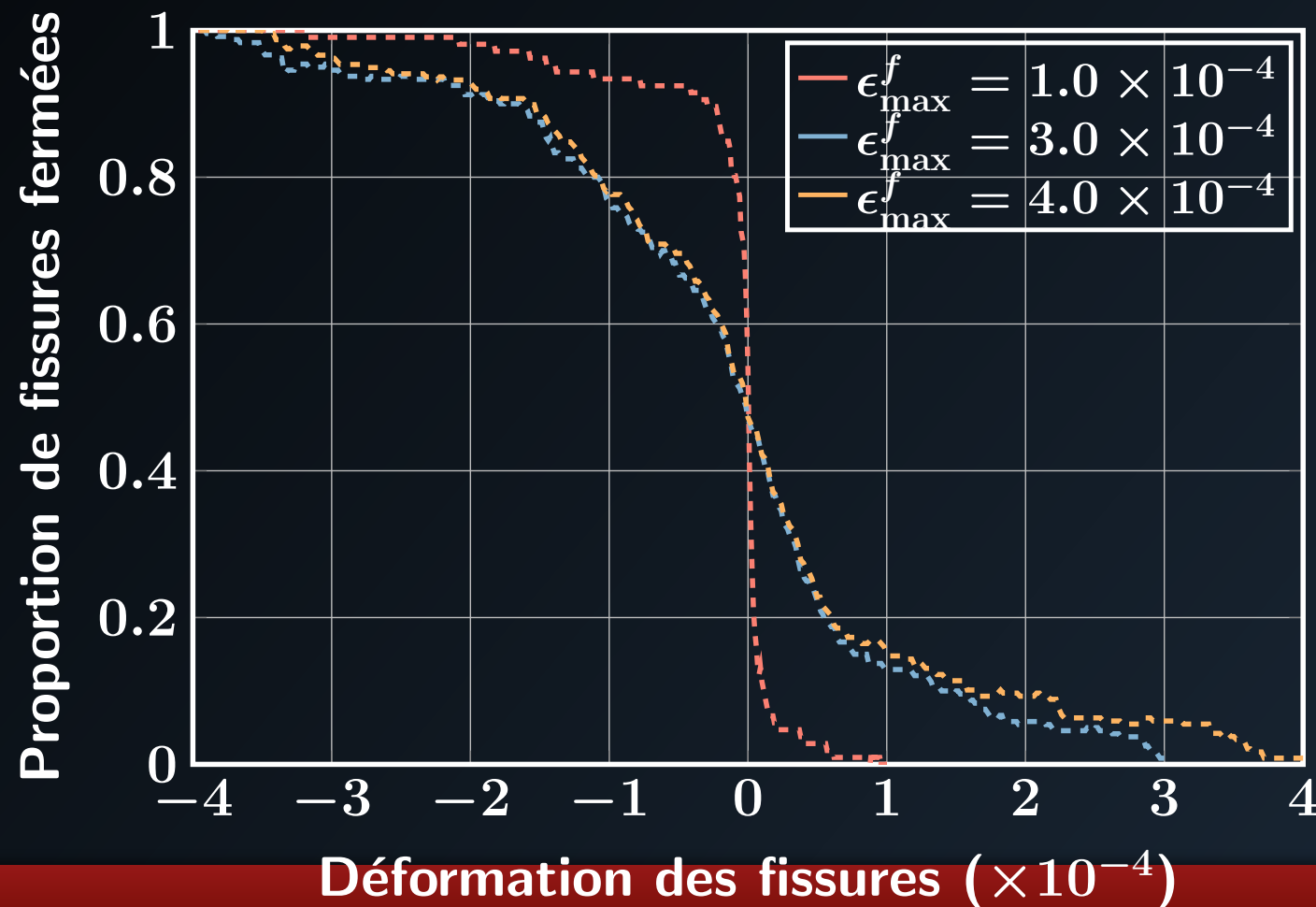
Identification de la fonction ϑ

- “Surface active des fissures” = proportion de fissures fermées

[Mihai et al.,
2011]

► Expérimentation numérique

- “nombre de contact” / “nombre de fissures”
- cycles à différents niveaux de déformation



$$\frac{\partial \sigma^f}{\partial \epsilon^f} = \vartheta \mathbf{C}$$

Identification de la fonction ϑ

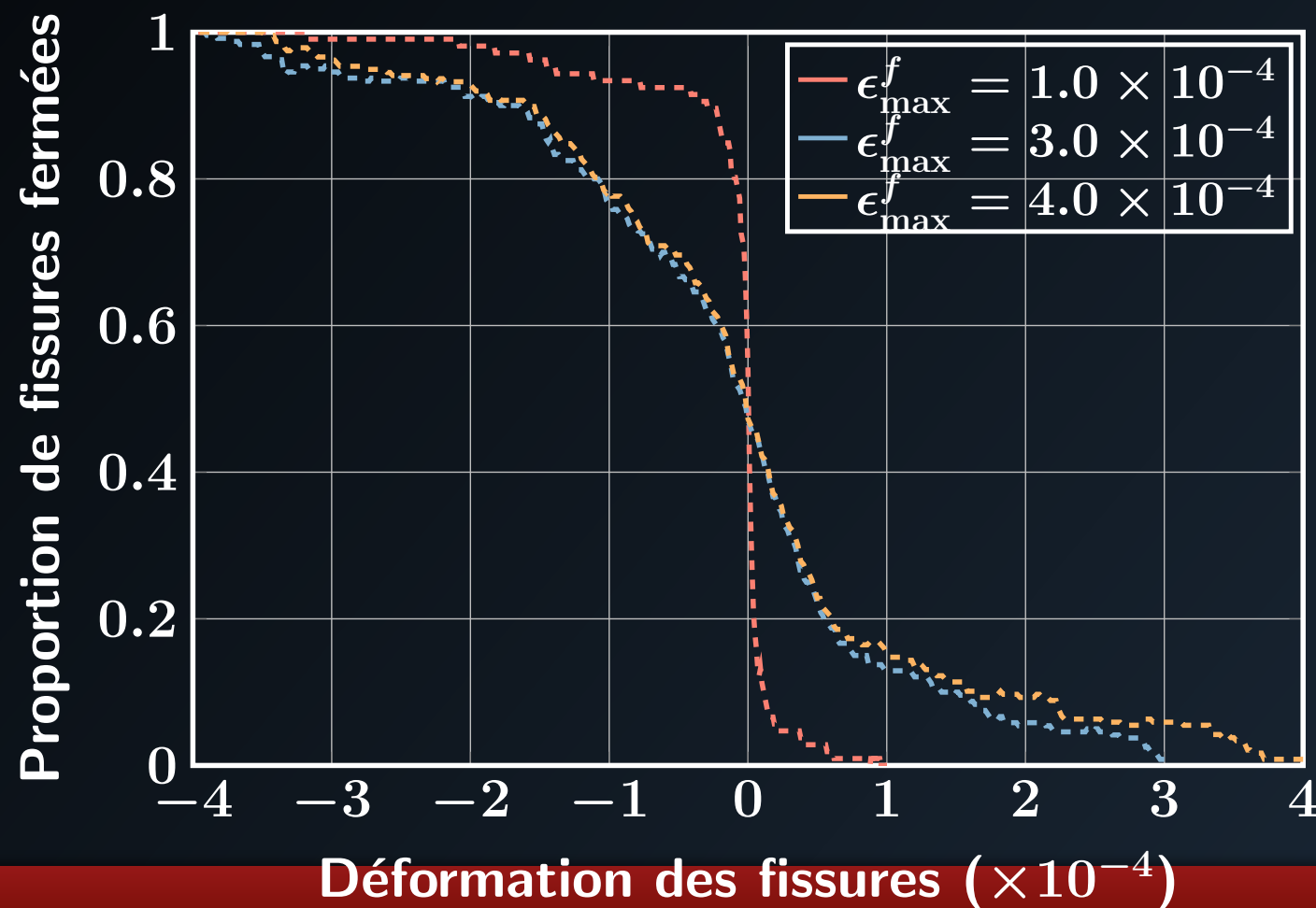
- “Surface active des fissures” = proportion de fissures fermées

[Mihai et al., 2011]

$$\vartheta = f \left(I_1 \left(\underline{\underline{\epsilon^f}} \right), \bar{\sigma}, \bar{\sigma} \right)$$

$\sigma_0 \times \max_{\forall t} \left[I_1 \left(\underline{\underline{\epsilon^f}} \right) \right]$

$$\frac{\partial \sigma^f}{\partial \epsilon^f} = \vartheta \mathbf{C}$$



- événement “une fissure est fermée à un certain niveau de déformation”
- processus Gaussien
 - ▶ Estimation de la moyenne $\epsilon^f = 0$
 - ▶ Variance dépendant de la déformation maximale ϵ_{\max}^f

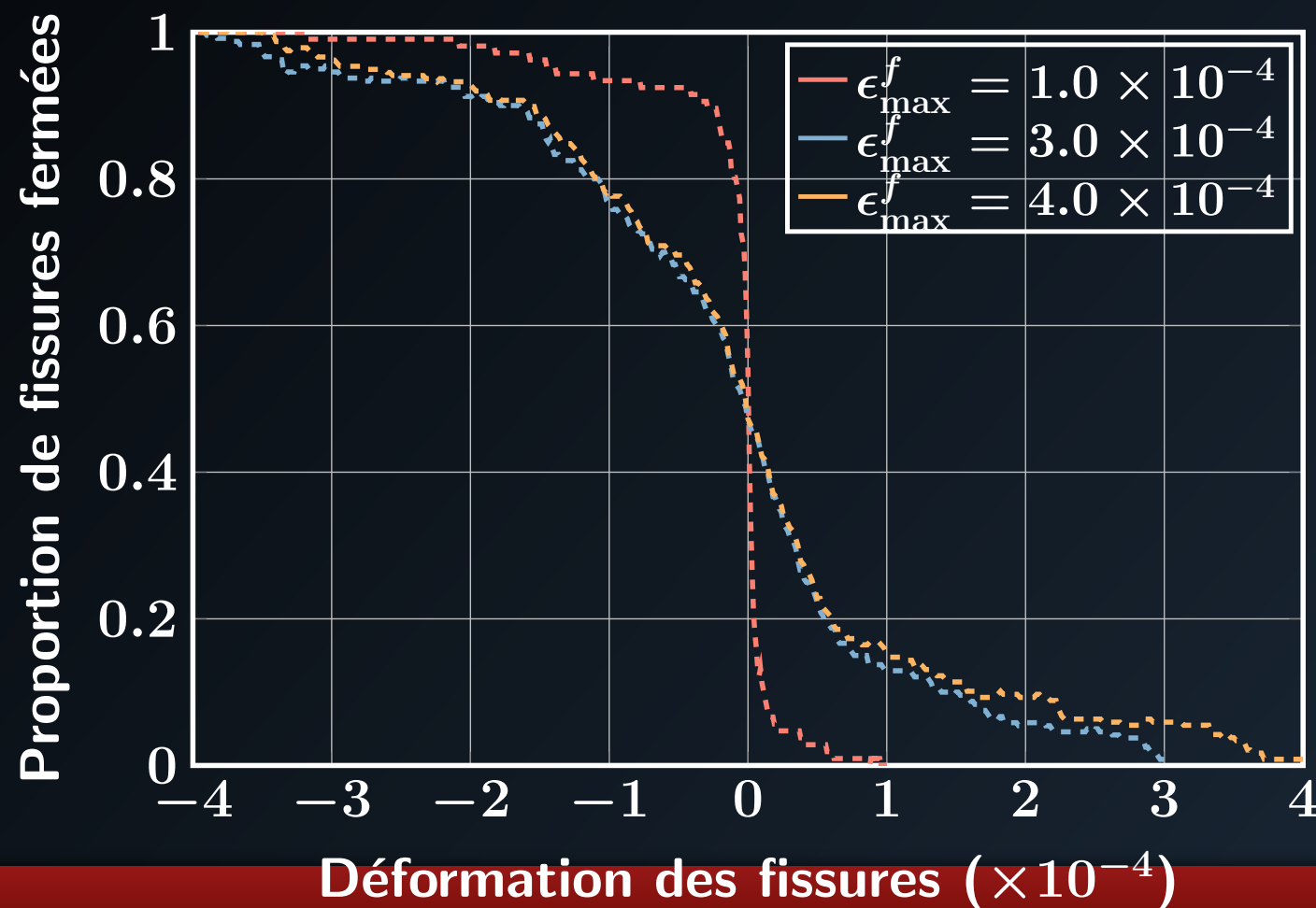
Identification de la fonction ϑ

- “Surface active des fissures” = proportion de fissures fermées

[Mihai et al., 2011]

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{1 + \exp \left[- \frac{I_1(\underline{\underline{\epsilon}}^f)}{\sigma_0 \max_{\forall t} [I_1(\underline{\underline{\epsilon}}^f)]} \right]}$$

$$\frac{\partial \sigma^f}{\partial \epsilon^f} = \vartheta \mathbf{C}$$



- événement “une fissure est fermée à un certain niveau de déformation”
- processus Gaussien
 - ▶ Estimation de la moyenne $\epsilon^f = 0$
 - ▶ Variance dépendant de la déformation maximale ϵ_{\max}^f
 - ▶ $\vartheta \rightarrow$ Fonction de répartition

Identification de la fonction ϑ

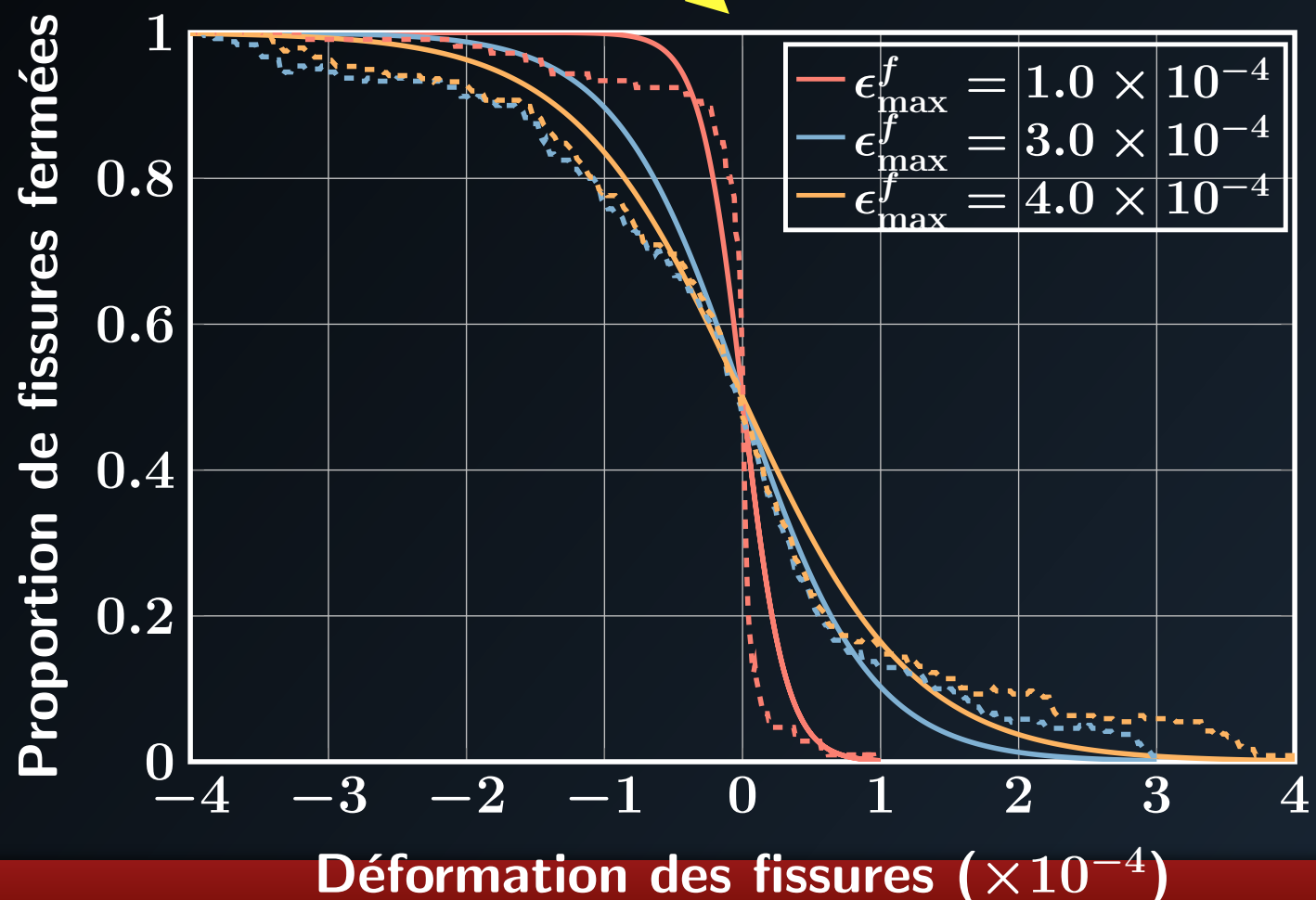
- “Surface active des fissures” = proportion de fissures fermées

[Mihai et al., 2011]

pour $\sigma_0 = 0.15$

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{1 + \exp \left[- \frac{I_1(\underline{\underline{\epsilon}}^f)}{\sigma_0 \max_{\forall t} [I_1(\underline{\underline{\epsilon}}^f)]} \right]}$$

$$\frac{\partial \sigma^f}{\partial \epsilon^f} = \vartheta \mathbf{C}$$

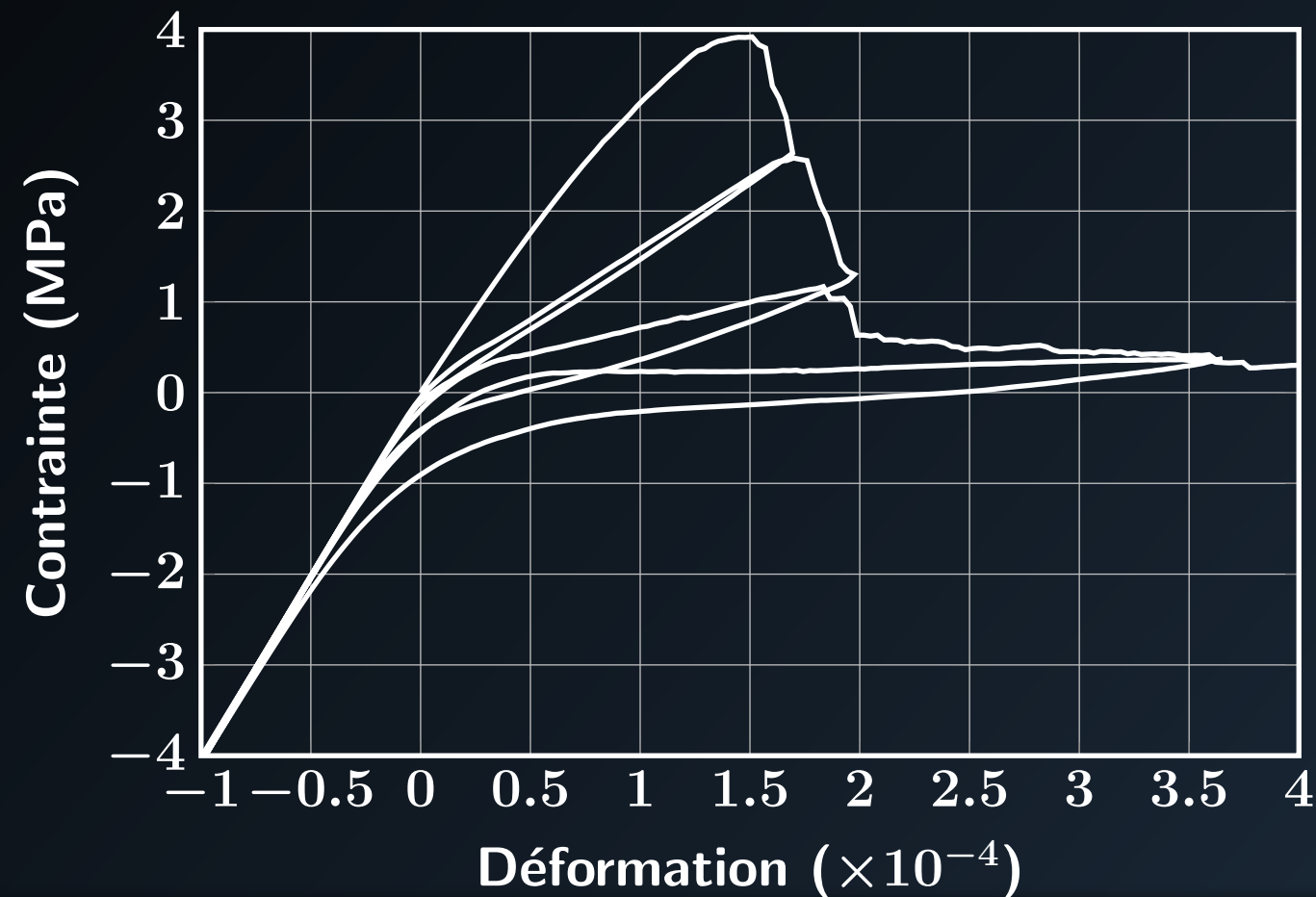


- événement “une fissure est fermée à un certain niveau de déformation”
- processus Gaussien
 - ▶ Estimation de la moyenne $\epsilon^f = 0$
 - ▶ Variance dépendant de la déformation maximale ϵ_{\max}^f
 - ▶ $\vartheta \rightarrow$ Fonction de répartition

Identification de la dissipation hystérique

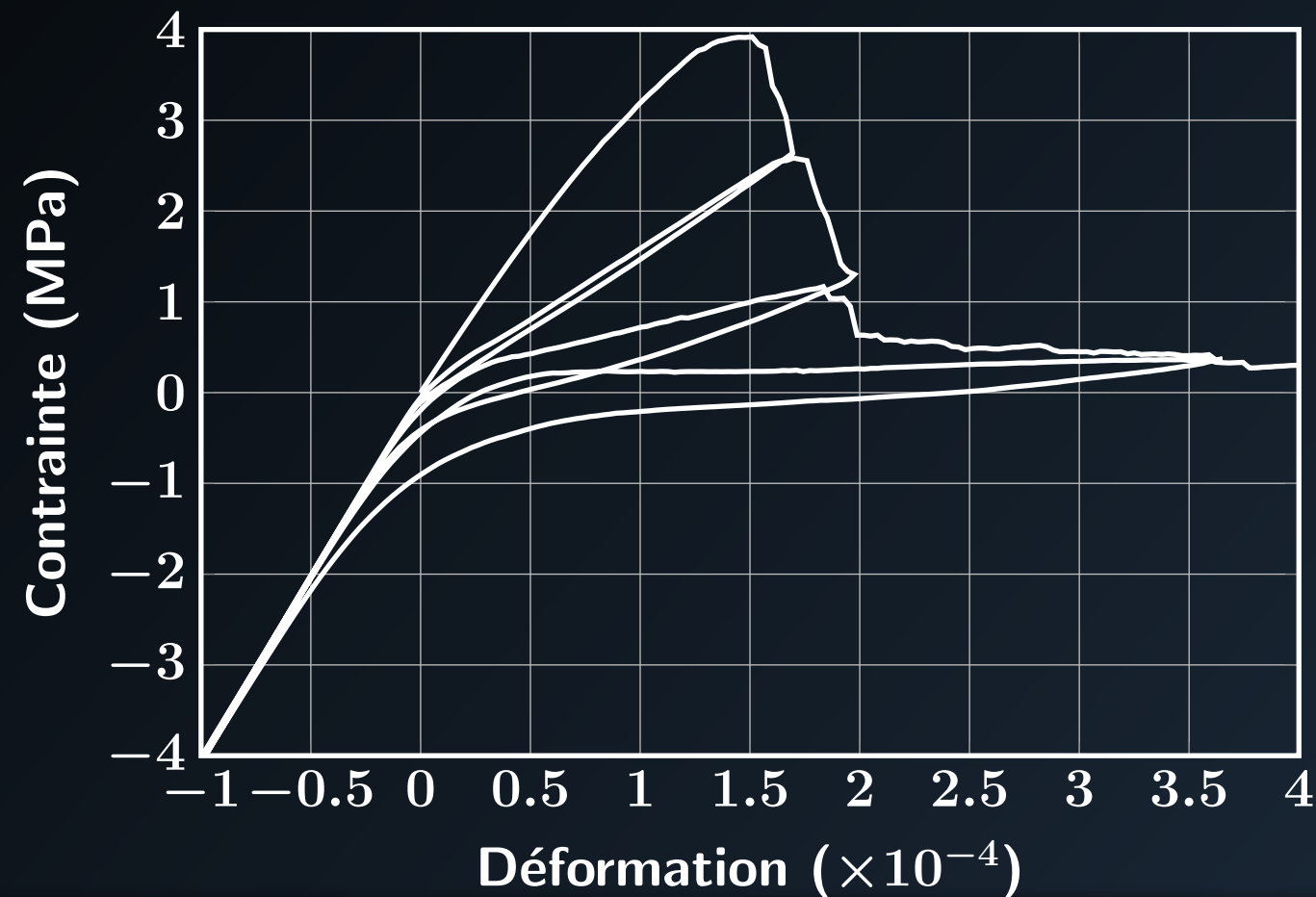
Identification de la dissipation hystérique

- Expérimentation numérique
 - σ_0 identifié à partir de proportion de fissures fermées



Identification de la dissipation hystérique

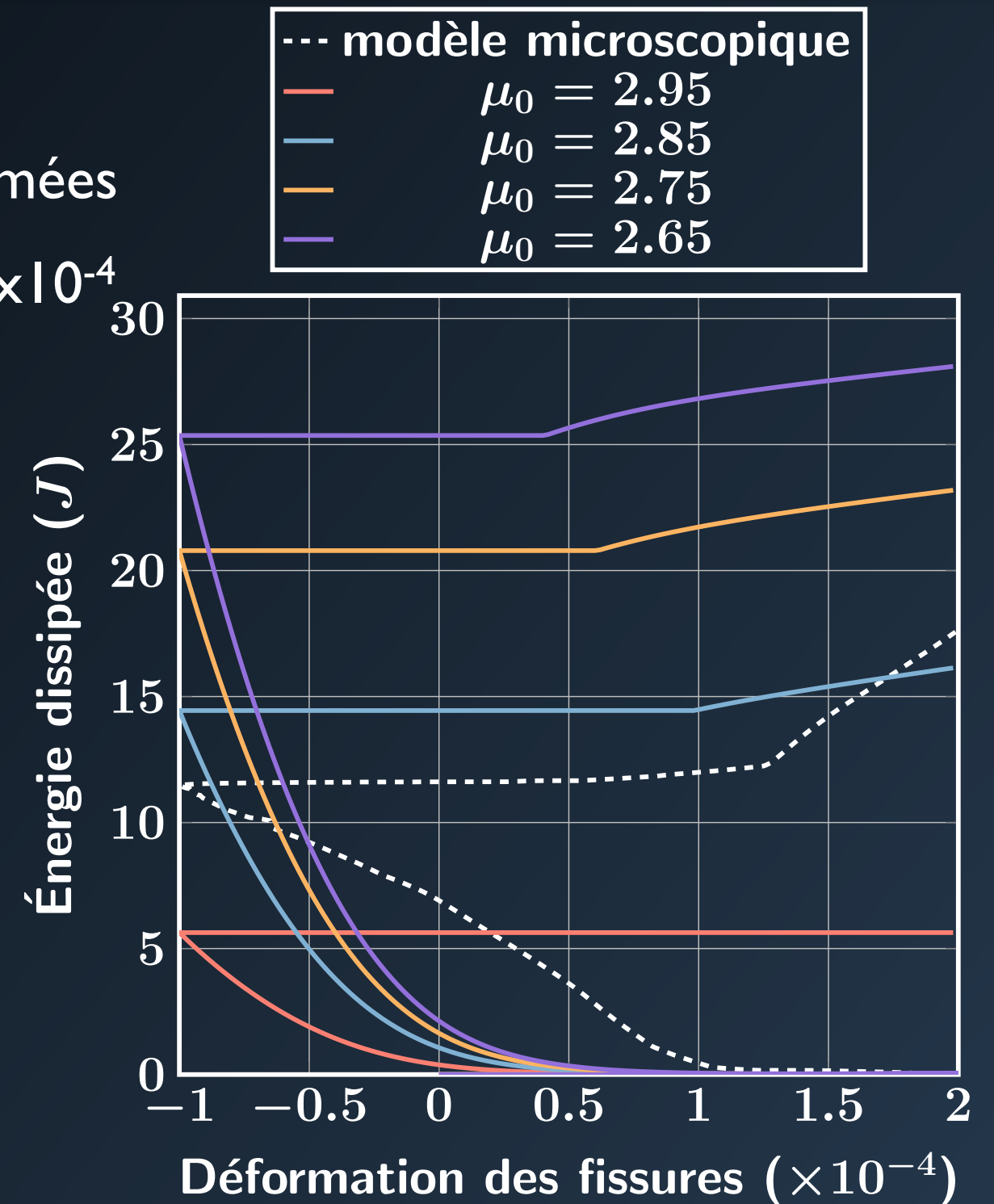
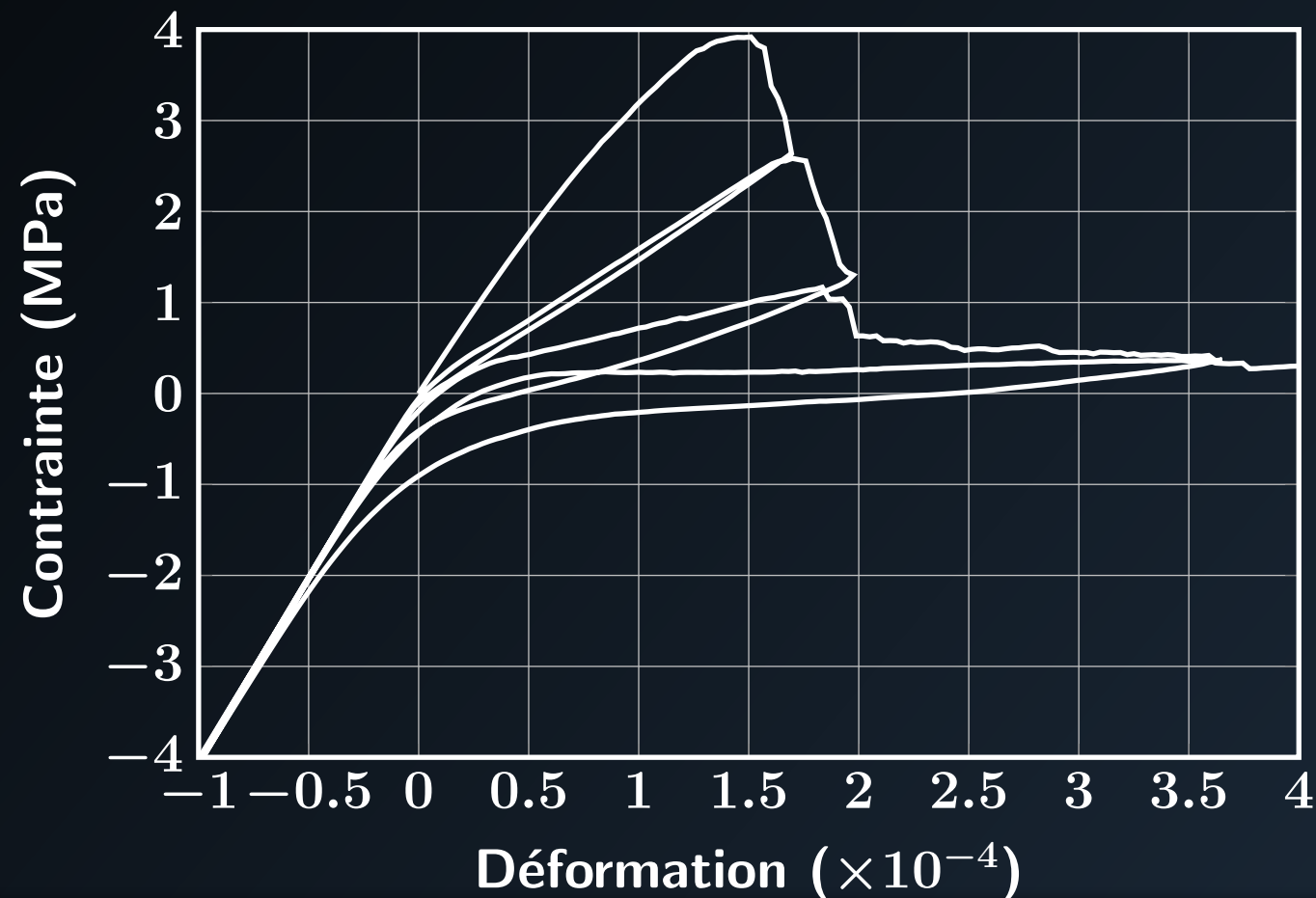
- Expérimentation numérique
 - σ_0 identifié à partir de proportion de fissures fermées
 - μ_0 identifié à partir de l'aire des boucles $\varepsilon_{\max}^f = 2 \times 10^{-4}$



Identification de la dissipation hystérique

- Expérimentation numérique
 - σ_0 identifié à partir de proportion de fissures fermées
 - μ_0 identifié à partir de l'aire des boucles $\varepsilon_{\max}^f = 2 \times 10^{-4}$

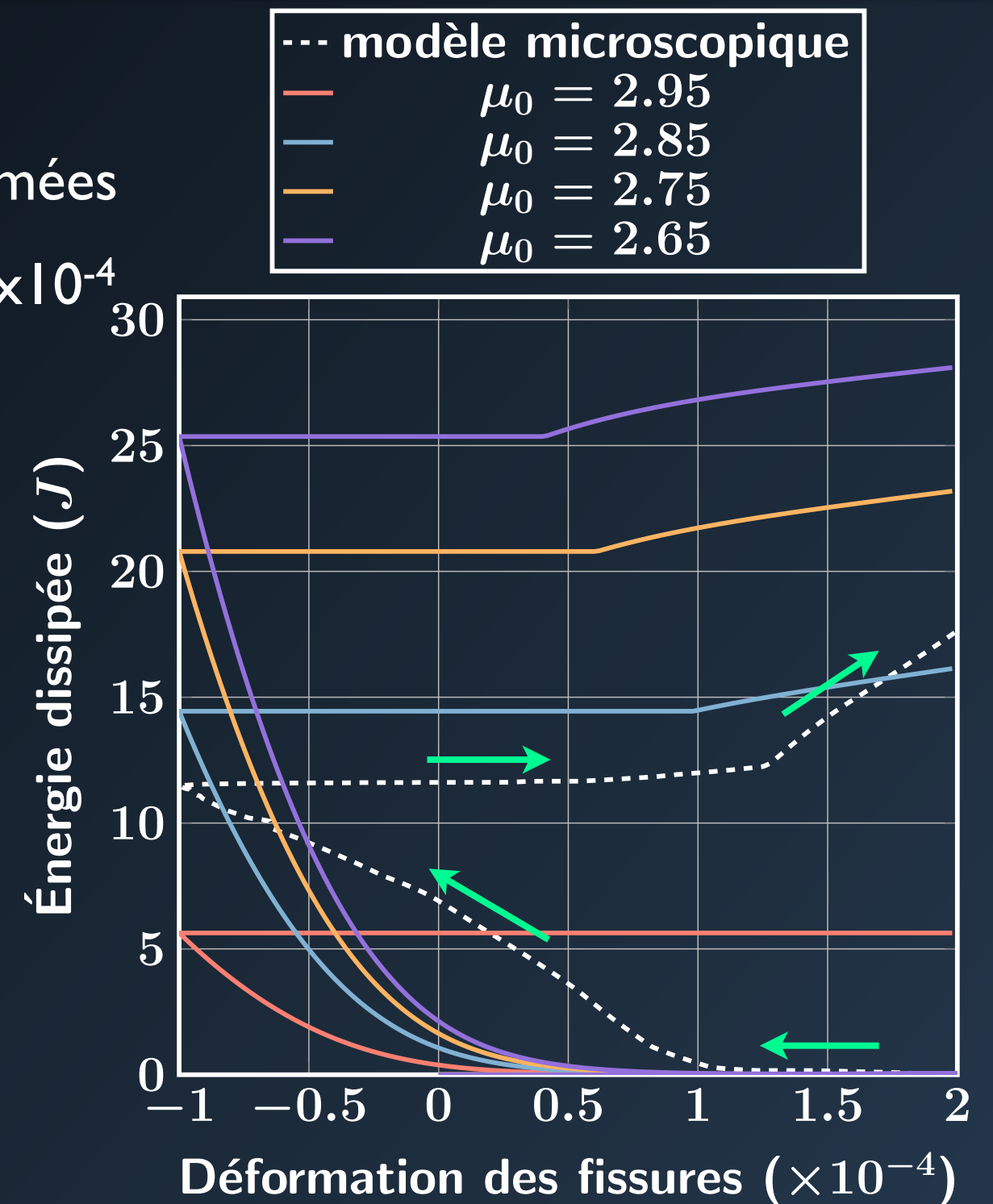
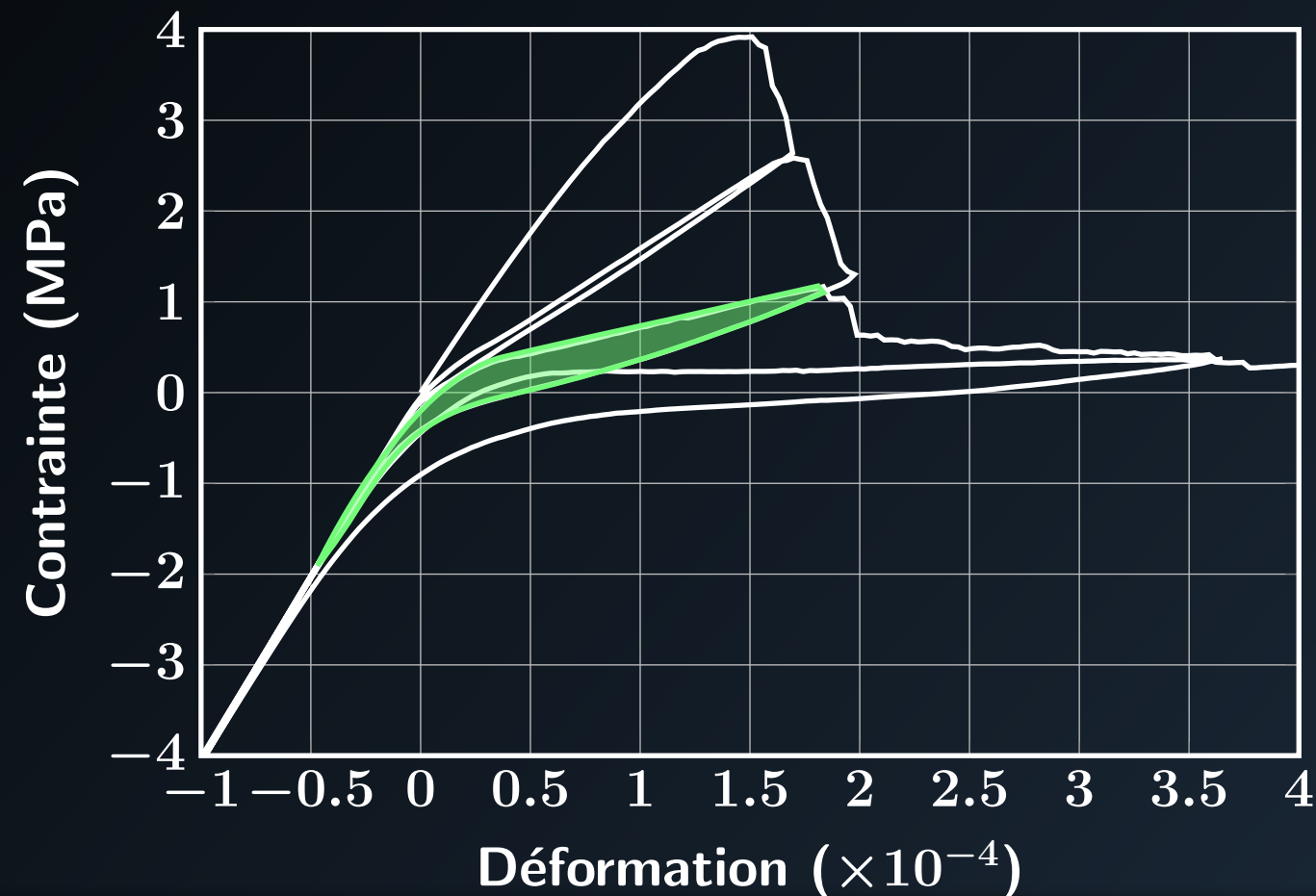
(énergie dissipée par frottement)



Identification de la dissipation hystérique

- Expérimentation numérique
 - σ_0 identifié à partir de proportion de fissures fermées
 - μ_0 identifié à partir de l'aire des boucles $\epsilon_{\max}^f = 2 \times 10^{-4}$

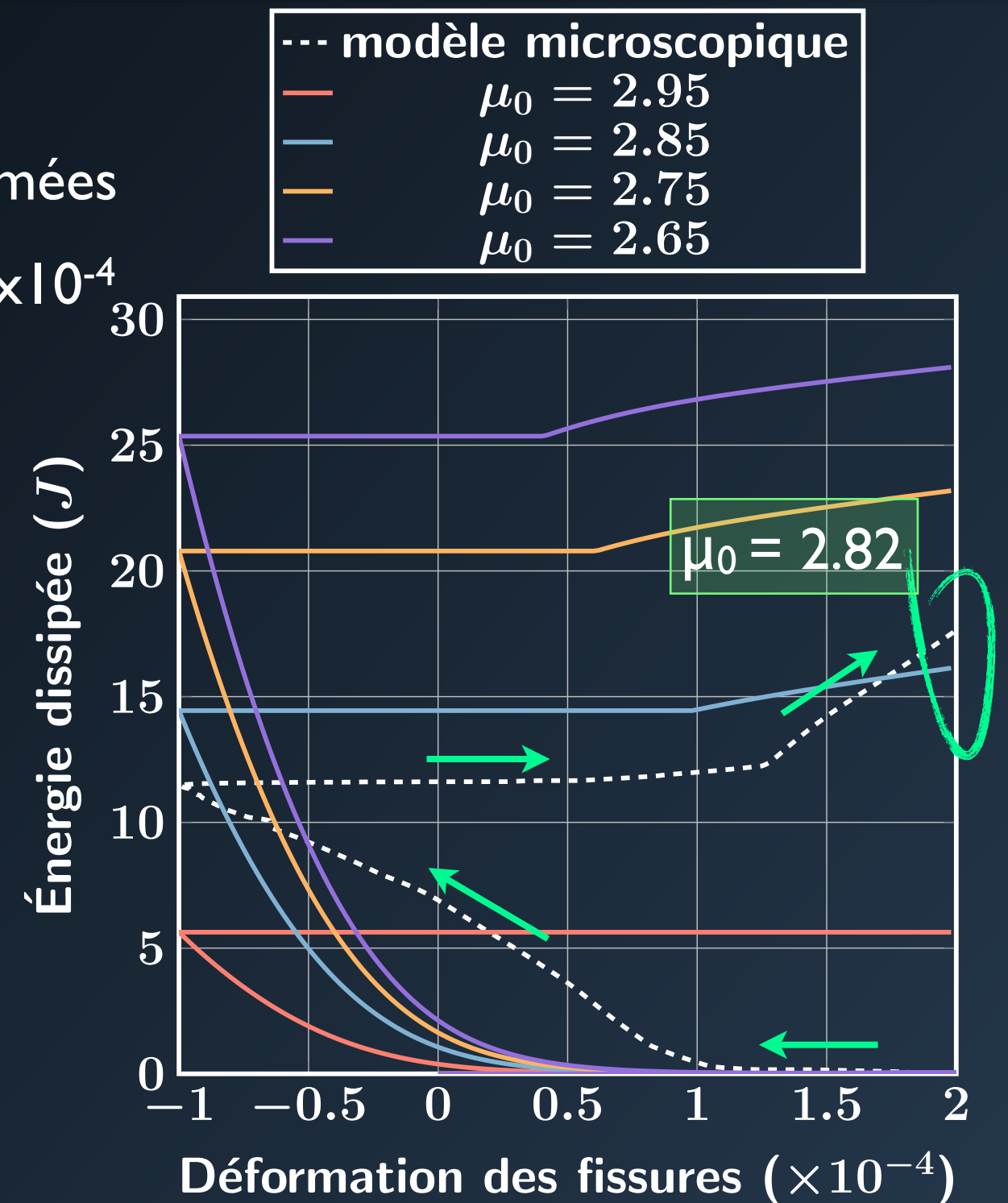
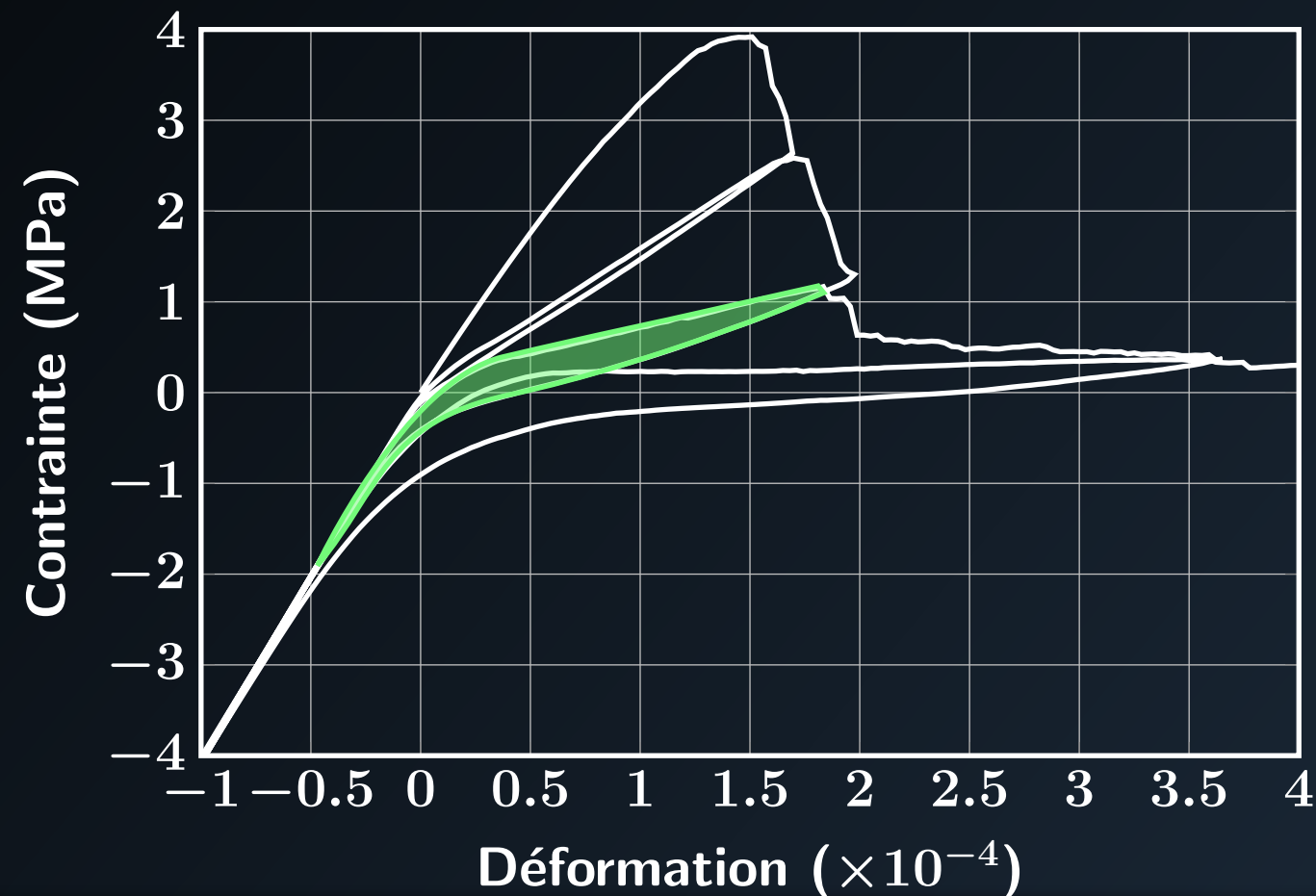
(énergie dissipée par frottement)



Identification de la dissipation hystérique

- Expérimentation numérique
 - σ_0 identifié à partir de proportion de fissures fermées
 - μ_0 identifié à partir de l'aire des boucles $\epsilon_{\max}^f = 2 \times 10^{-4}$

(énergie dissipée par frottement)

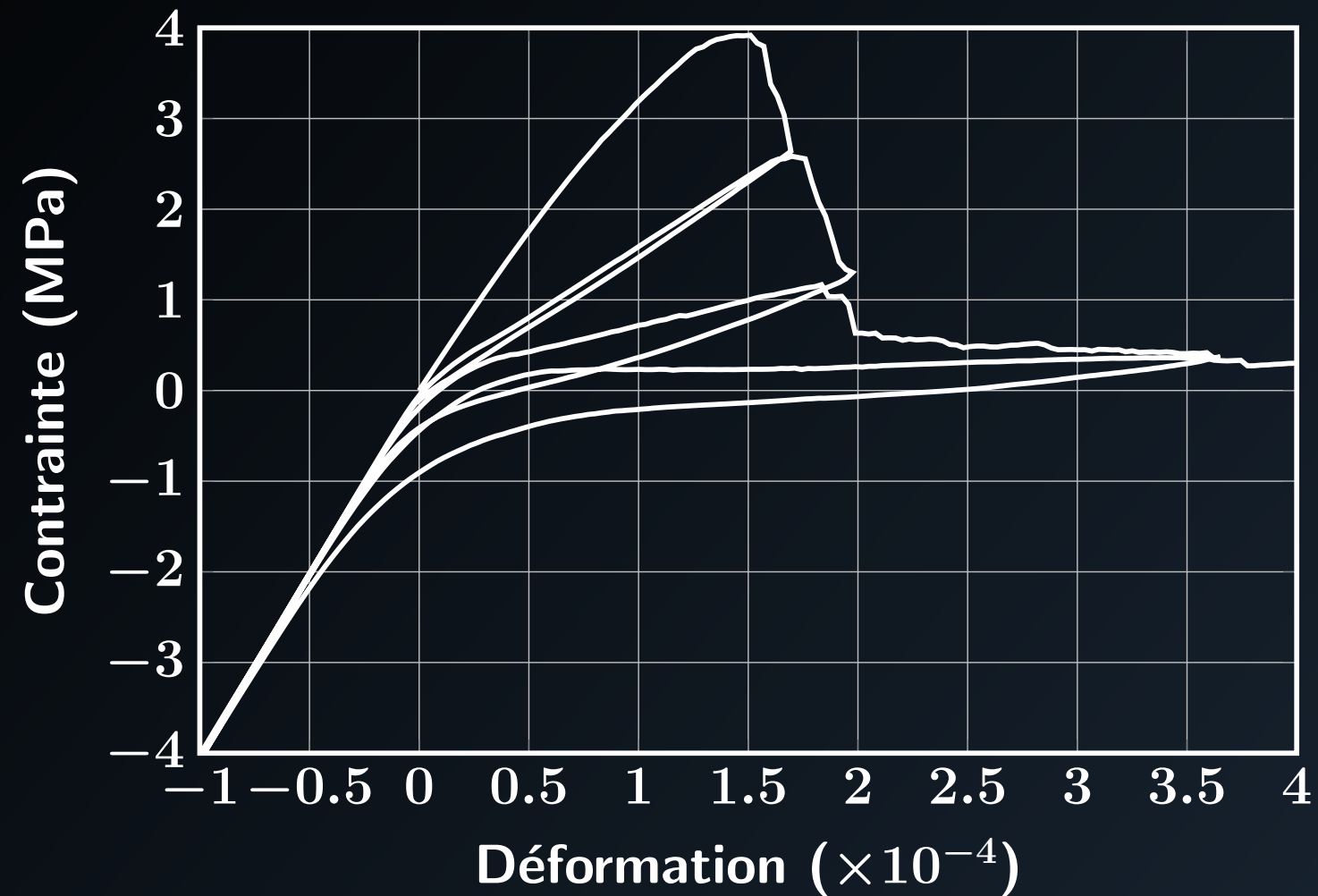


Résultats locaux

Résultats locaux - Point d'intégration

- Traction uni-axiale

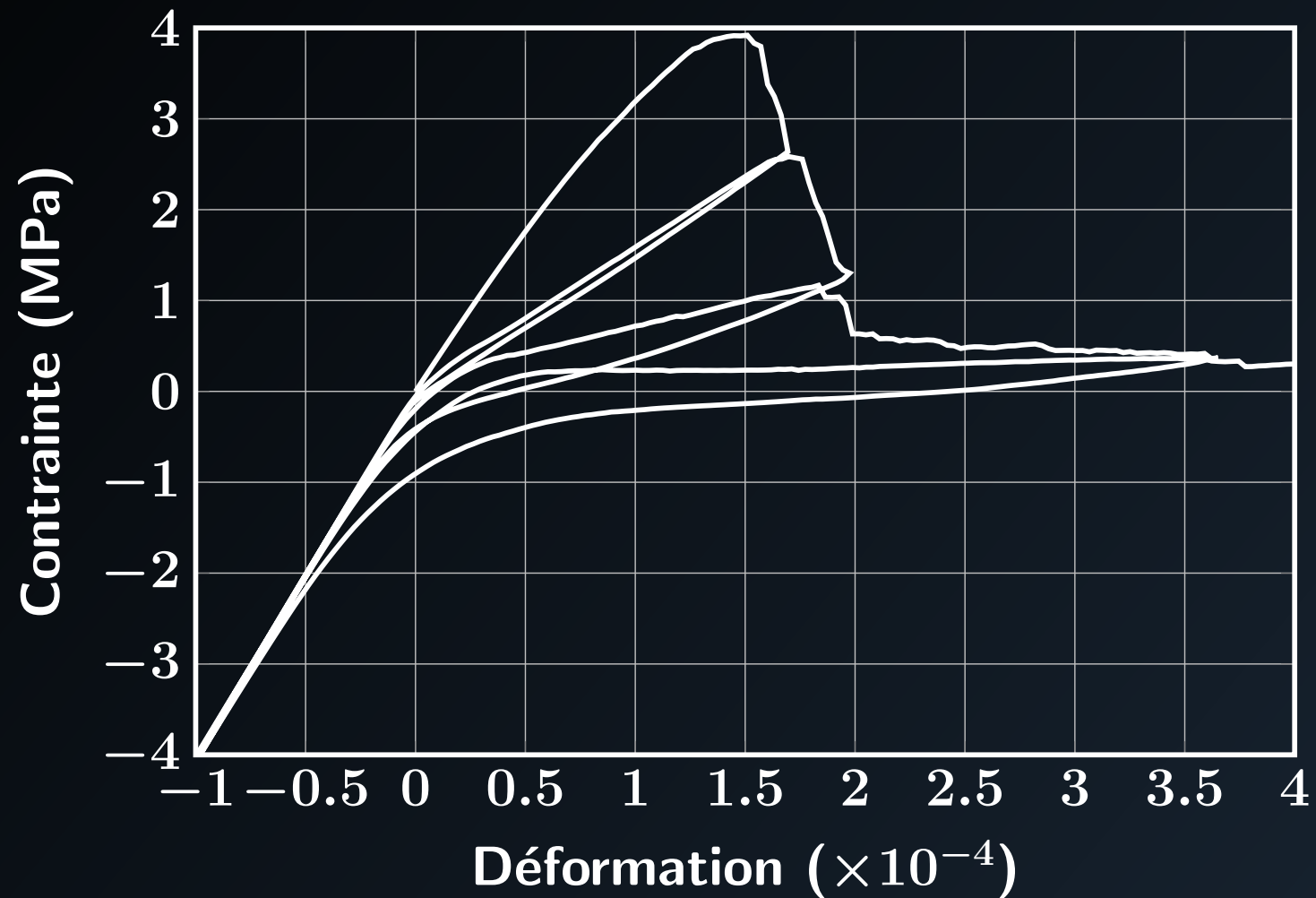
- Traction uni-axiale



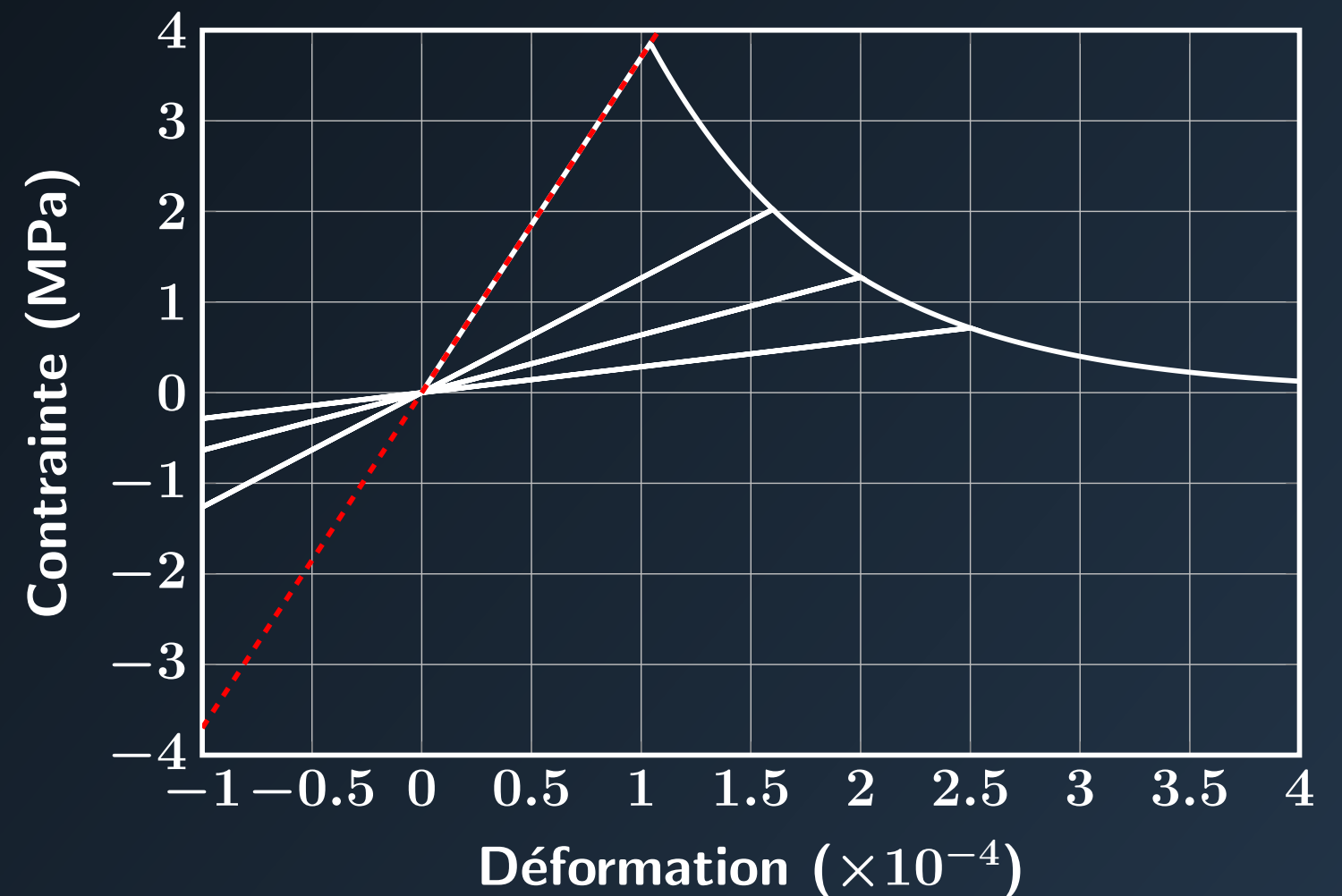
Exp.

Résultats locaux - Point d'intégration

- Traction uni-axiale



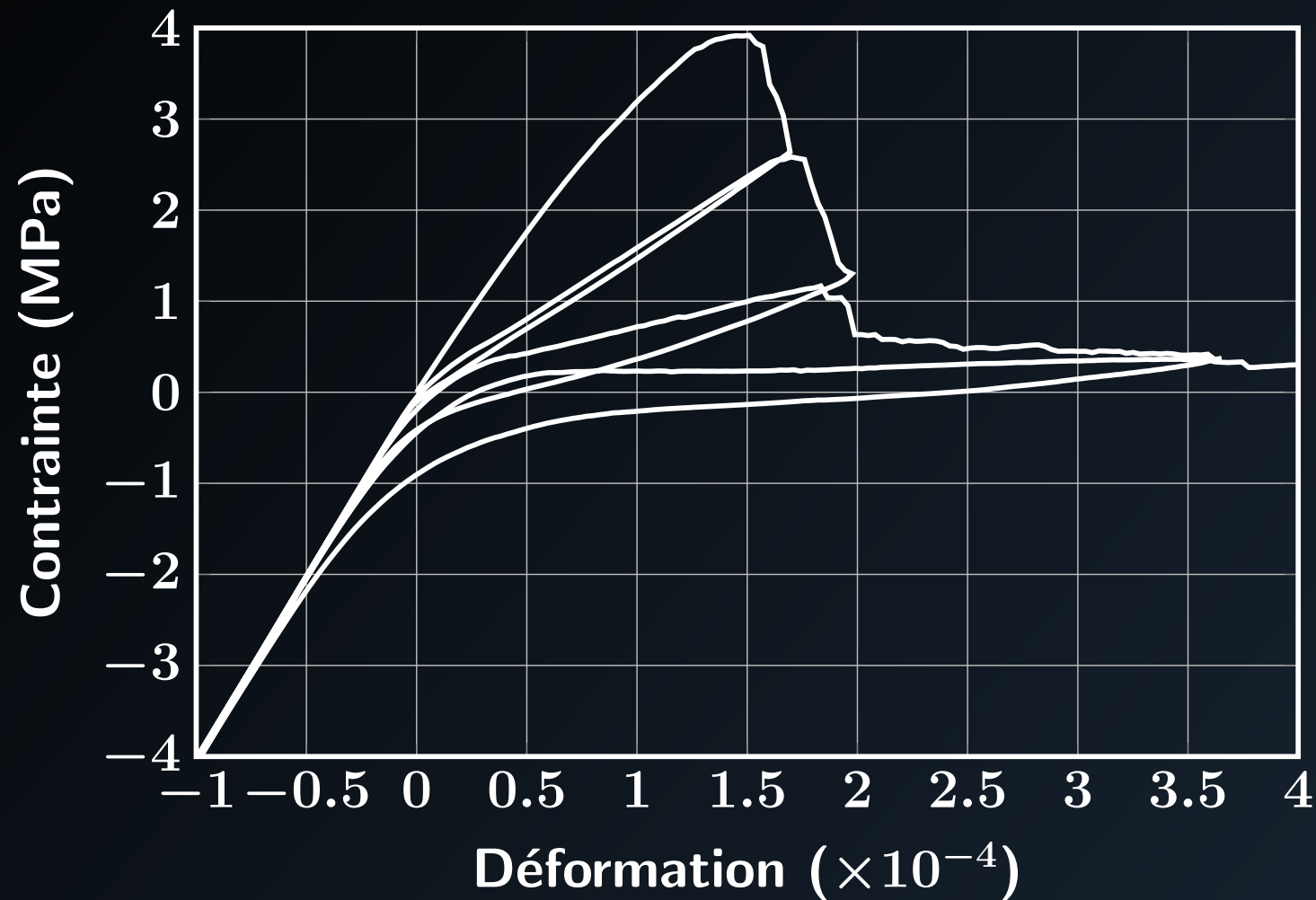
Exp.



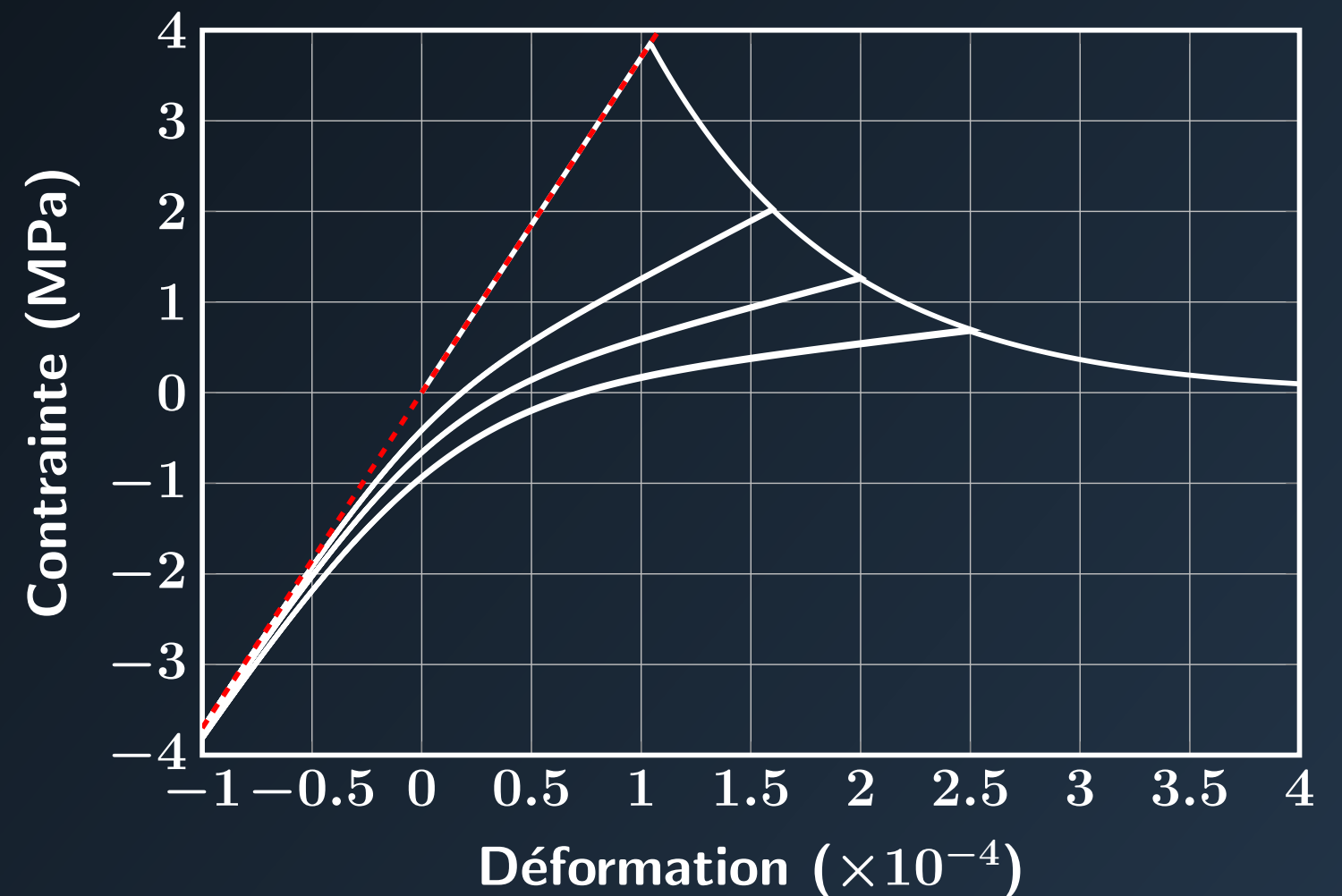
$$\sigma = \sigma^m$$

Résultats locaux - Point d'intégration

- Traction uni-axiale



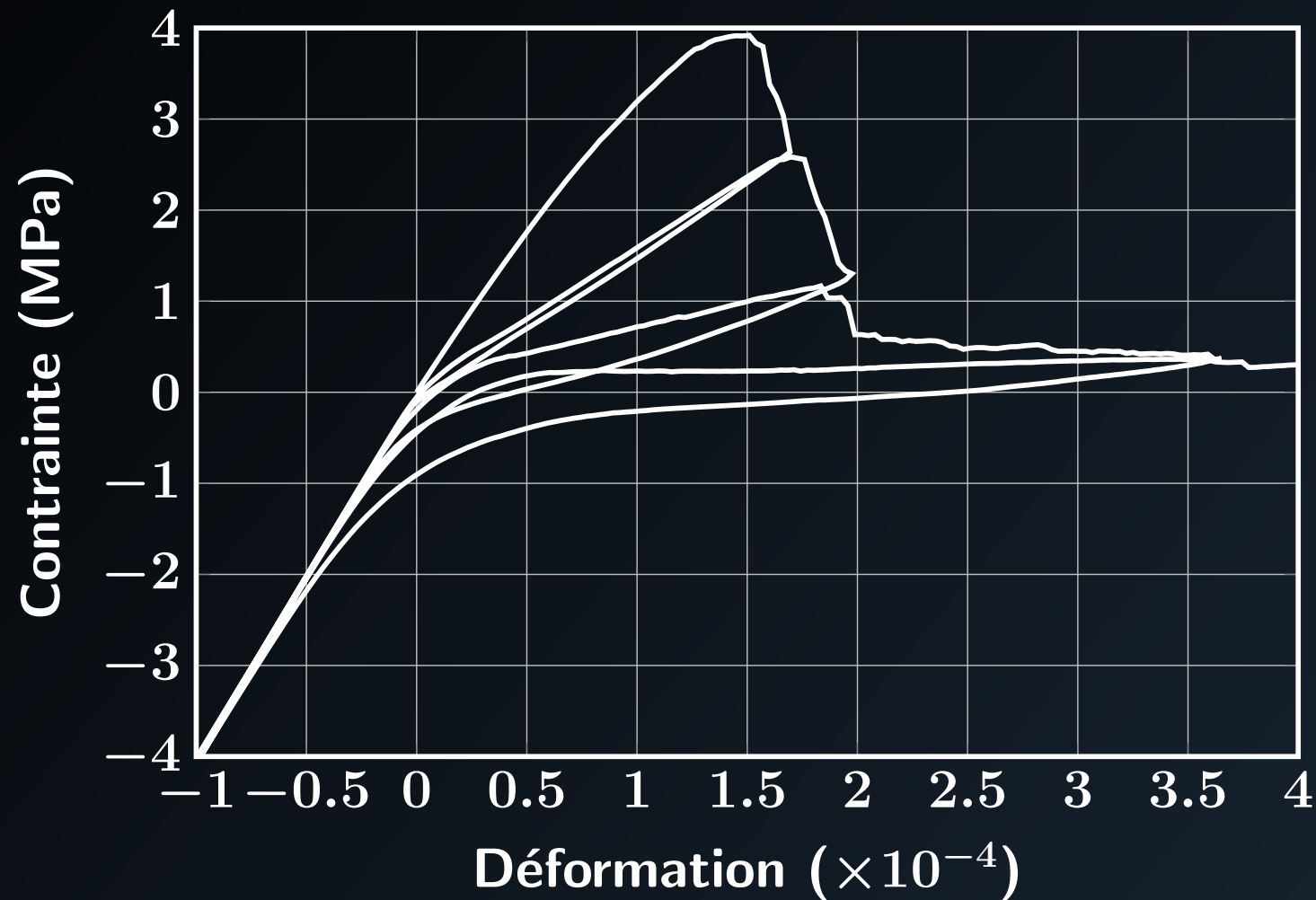
Exp.



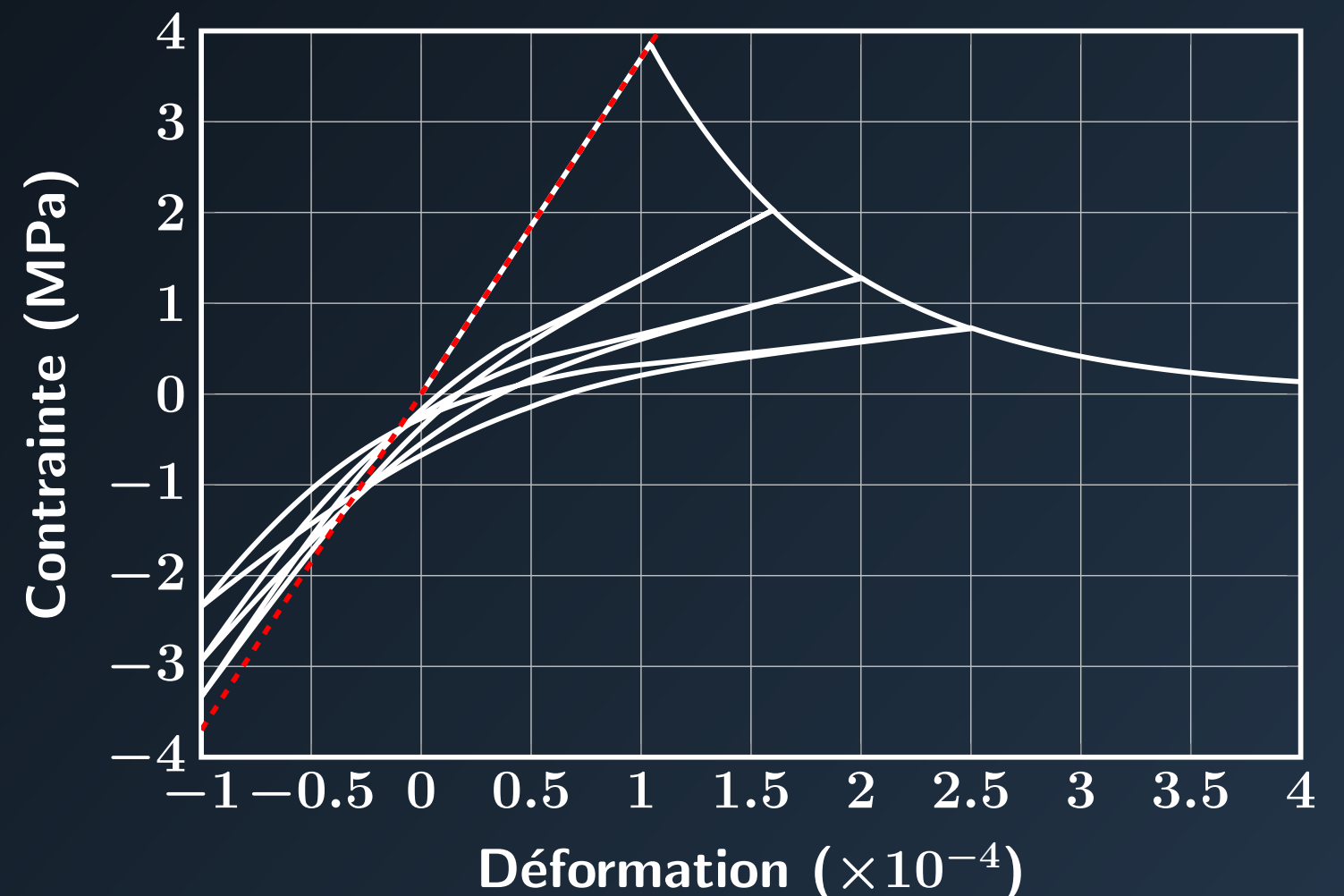
$$\sigma = \sigma^m + \sigma^{f,el}$$

Résultats locaux - Point d'intégration

- Traction uni-axiale



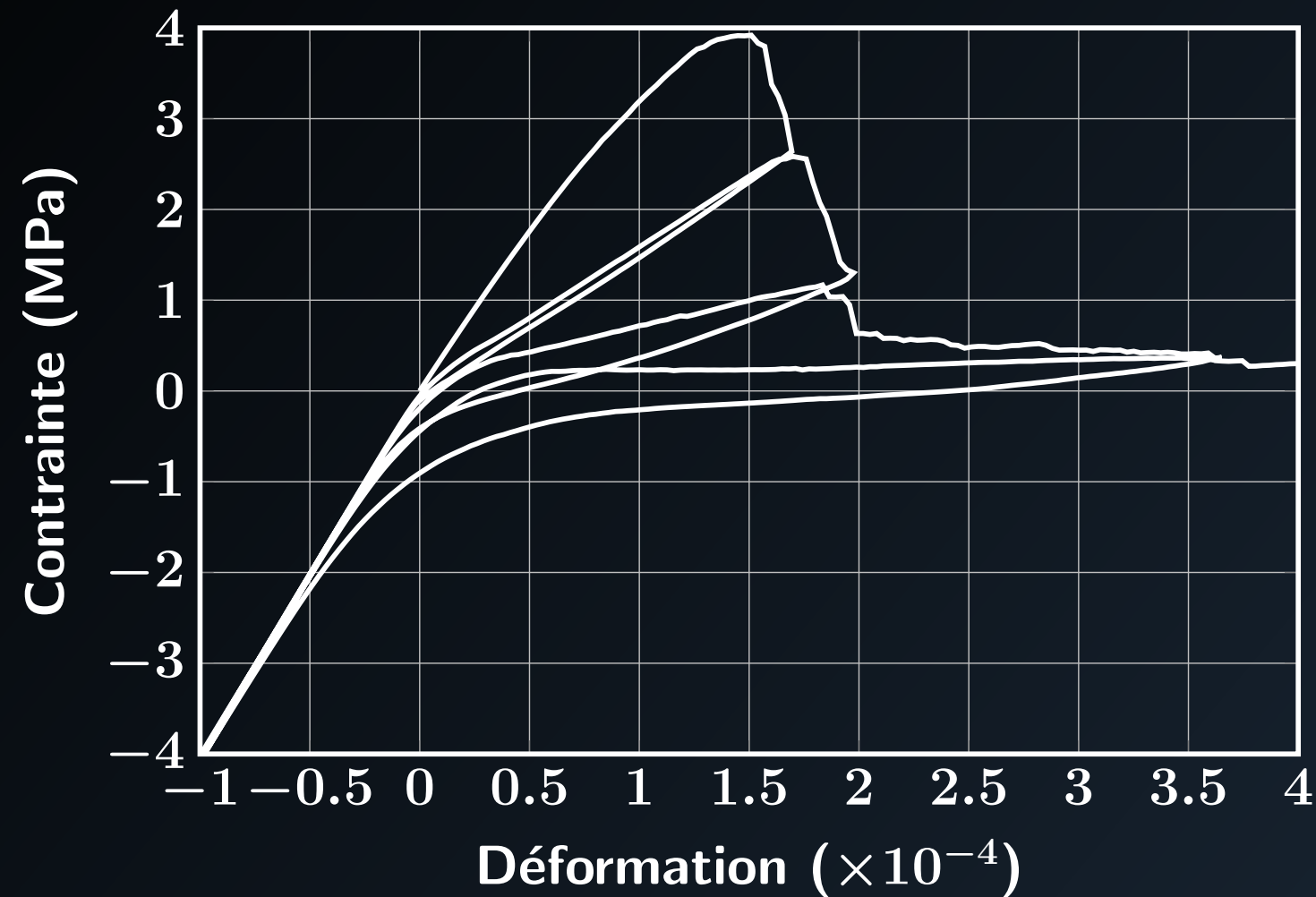
Exp.



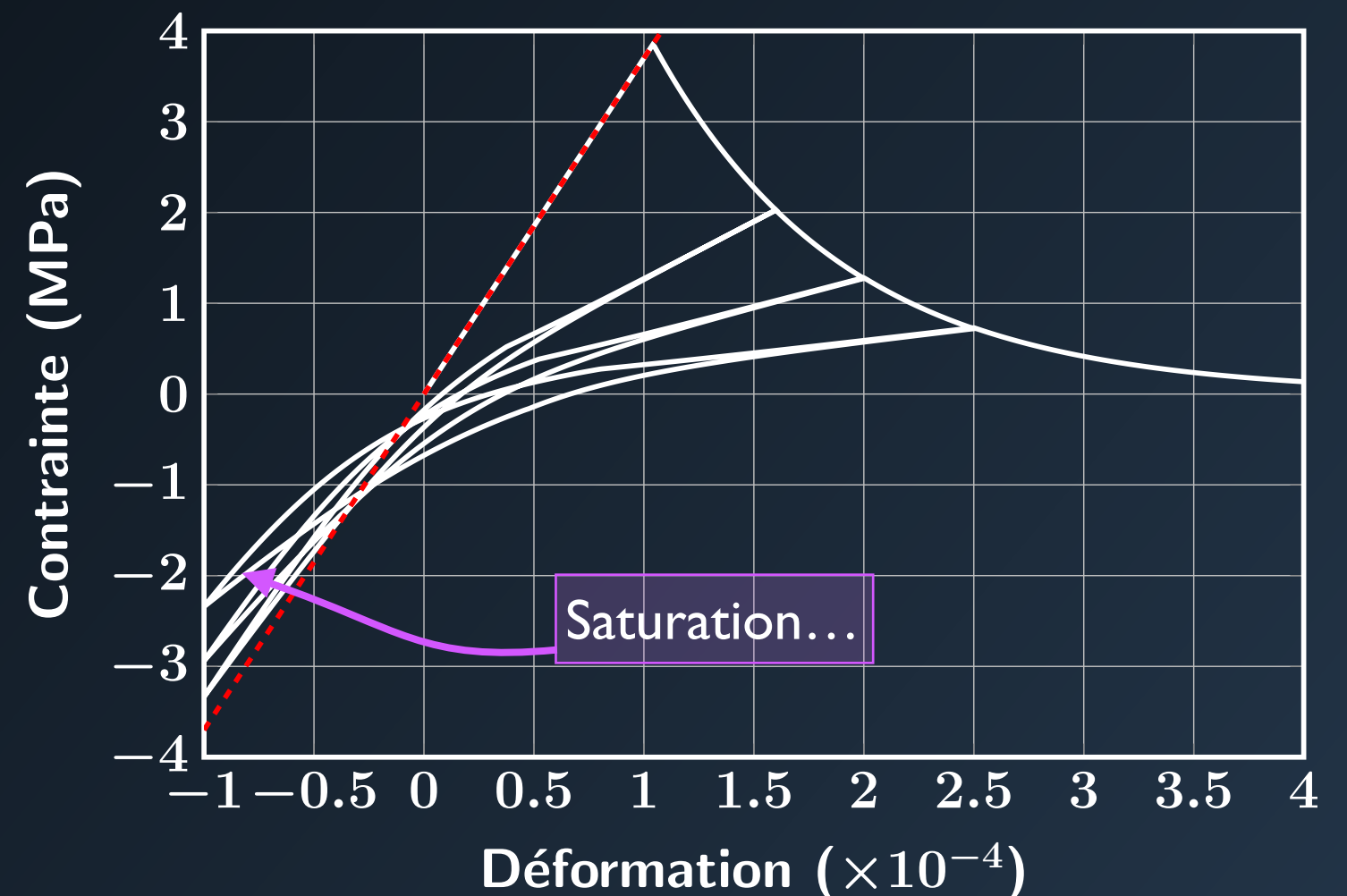
$$\sigma = \sigma^m + \sigma^f$$

Résultats locaux - Point d'intégration

- Traction uni-axiale



Exp.



$$\sigma = \sigma^m + \sigma^f$$

Exemple structural

Exemple structural

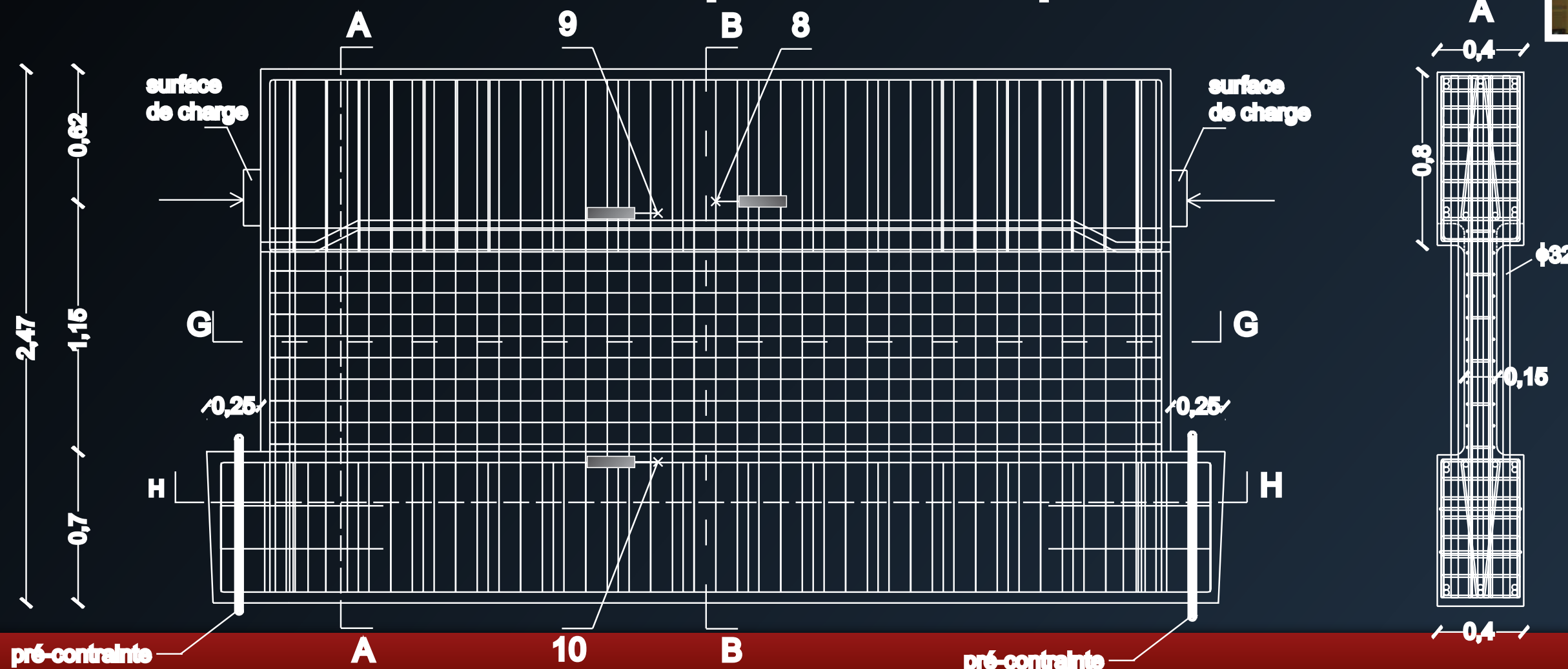
- ▶ Analyse de la robustesse du schéma d'intégration local et de la pertinence de l'approche

- ▶ Analyse de la robustesse du schéma d'intégration local et de la pertinence de l'approche
- ▶ Un voile en BA a été sujet à un chargement cyclique

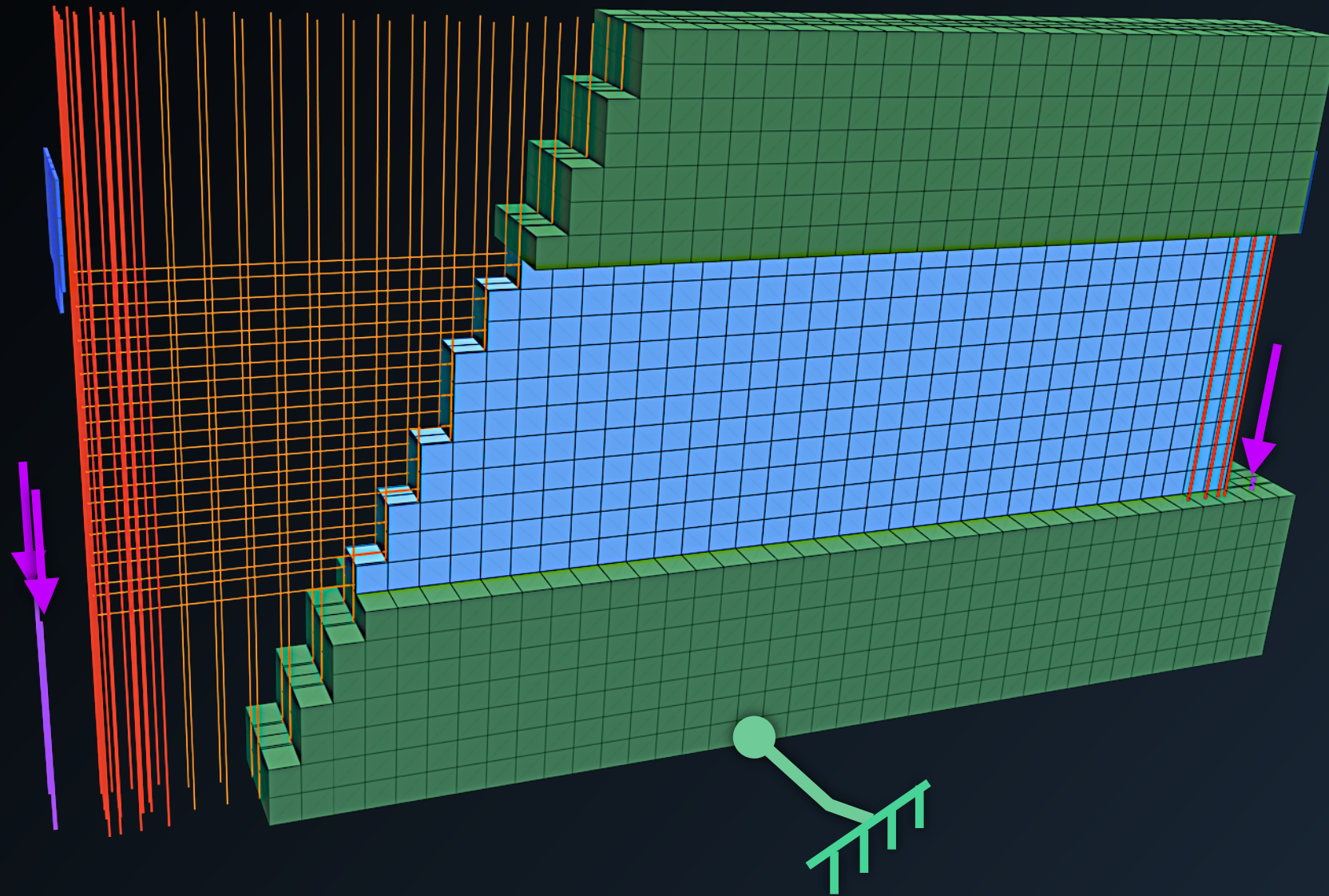
► Analyse de la robustesse du schéma d'intégration local et de la pertinence de l'approche

► Un voile en BA a été sujet à un chargement cyclique

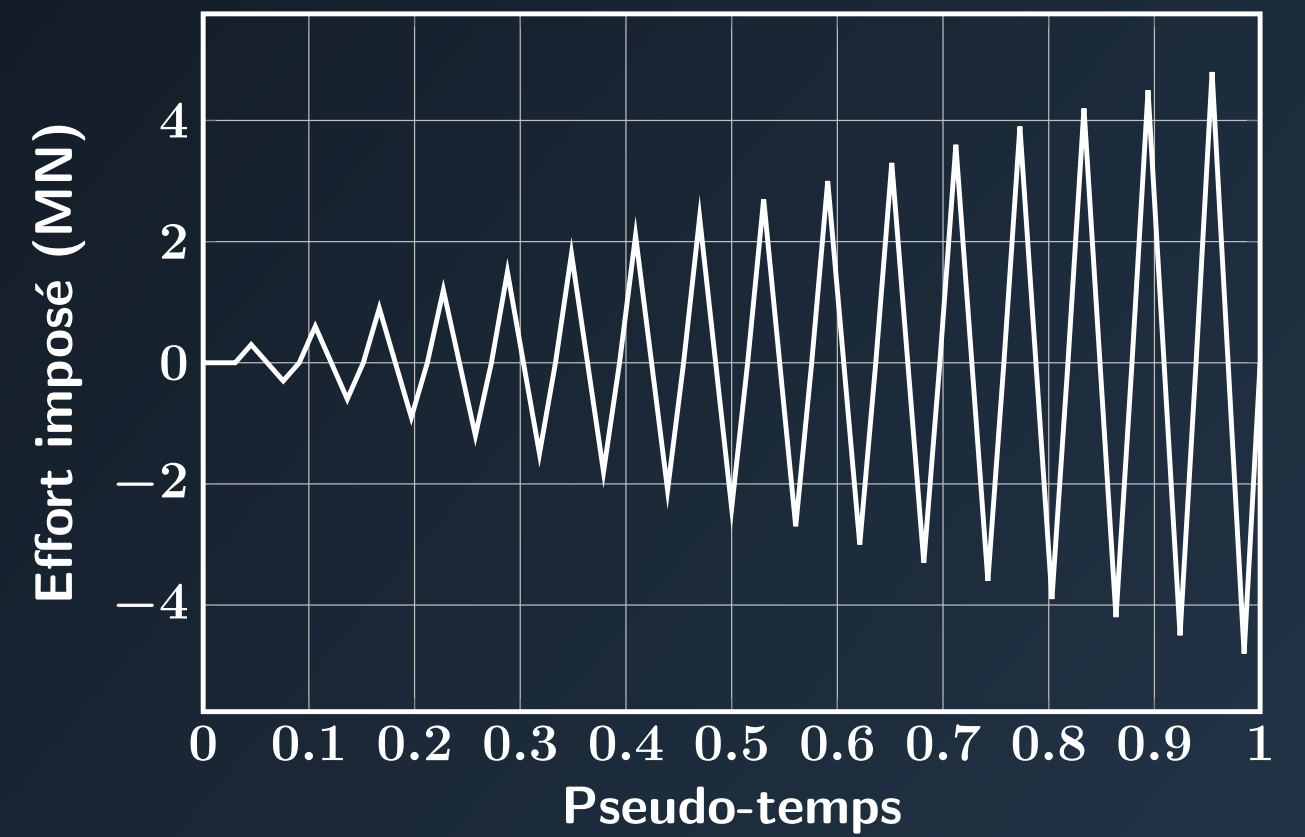
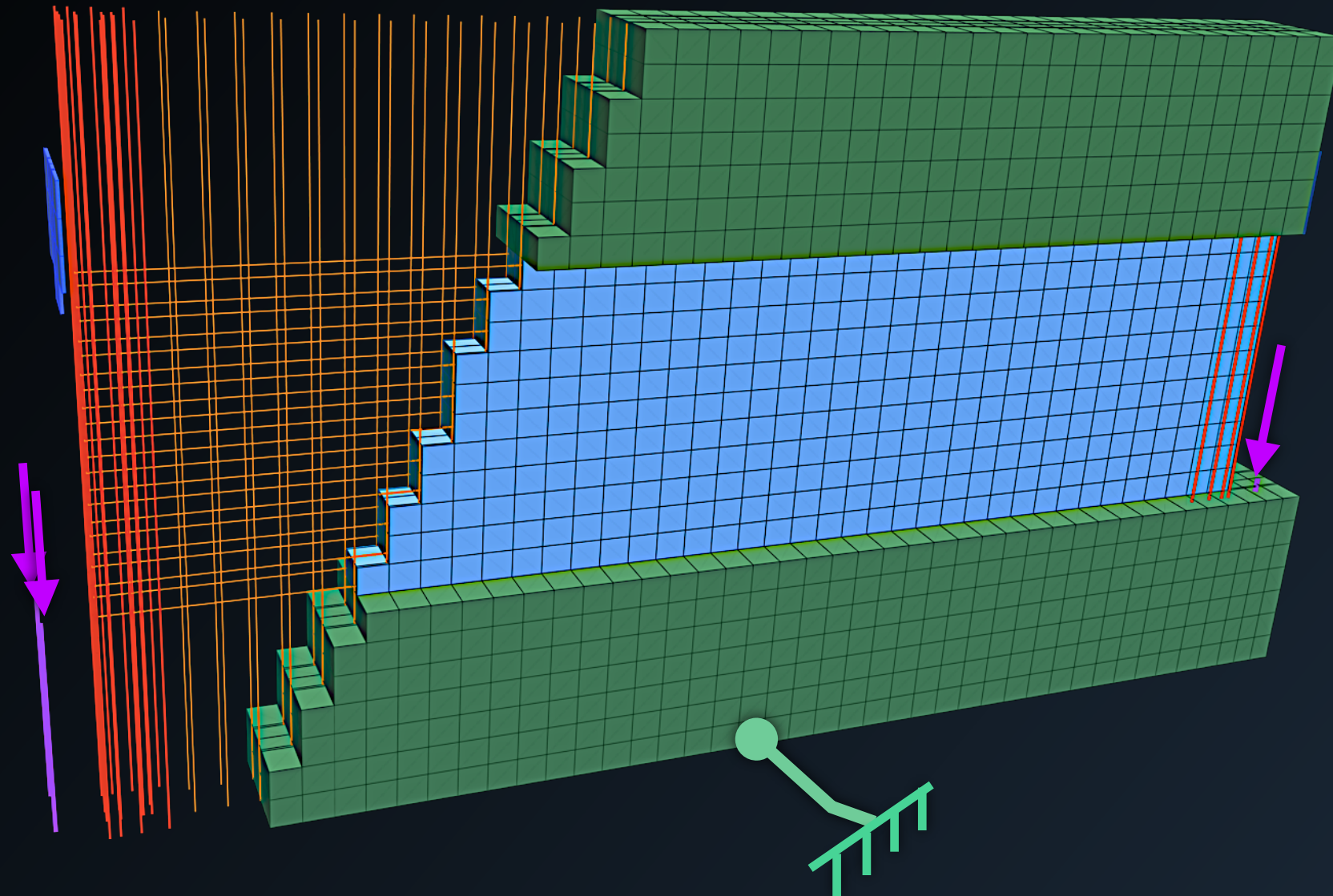
- Benchmark ConCrack [Rivillon et Gabs, 11]



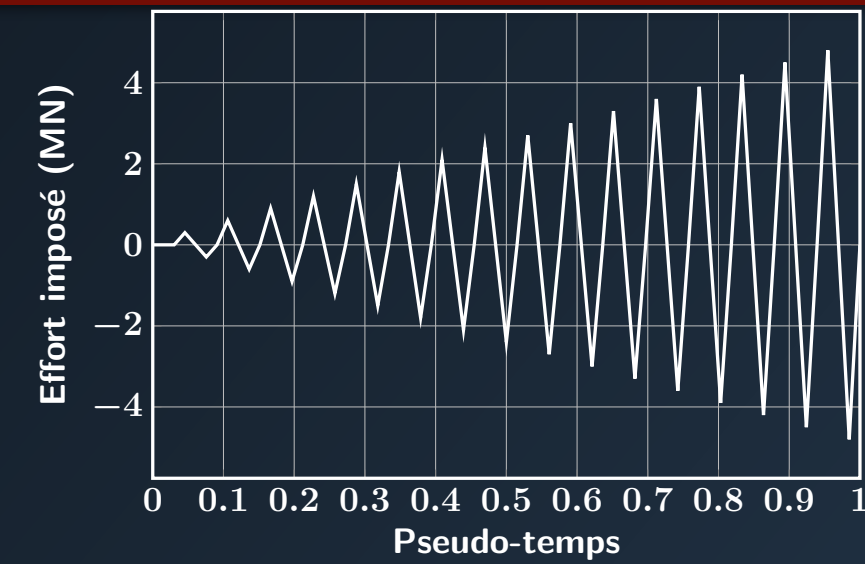
Exemple structural



Exemple structural

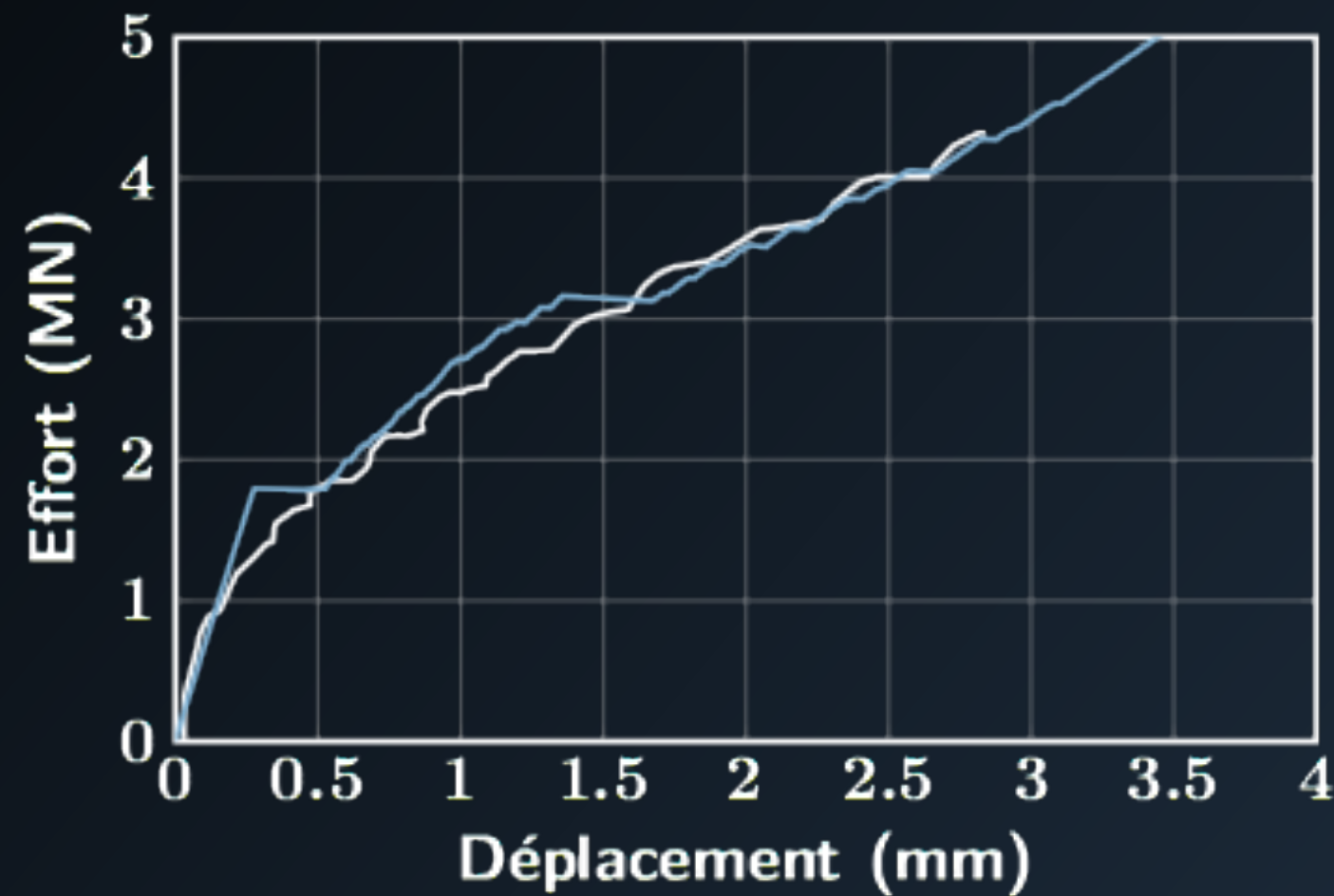


Comportement à rupture

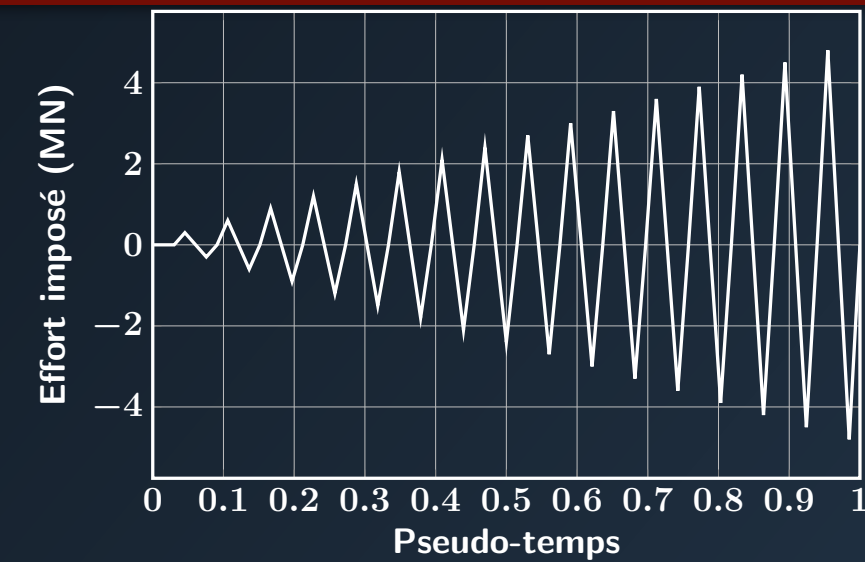


Comportement à rupture

- Courbe de capacité satisfaisante

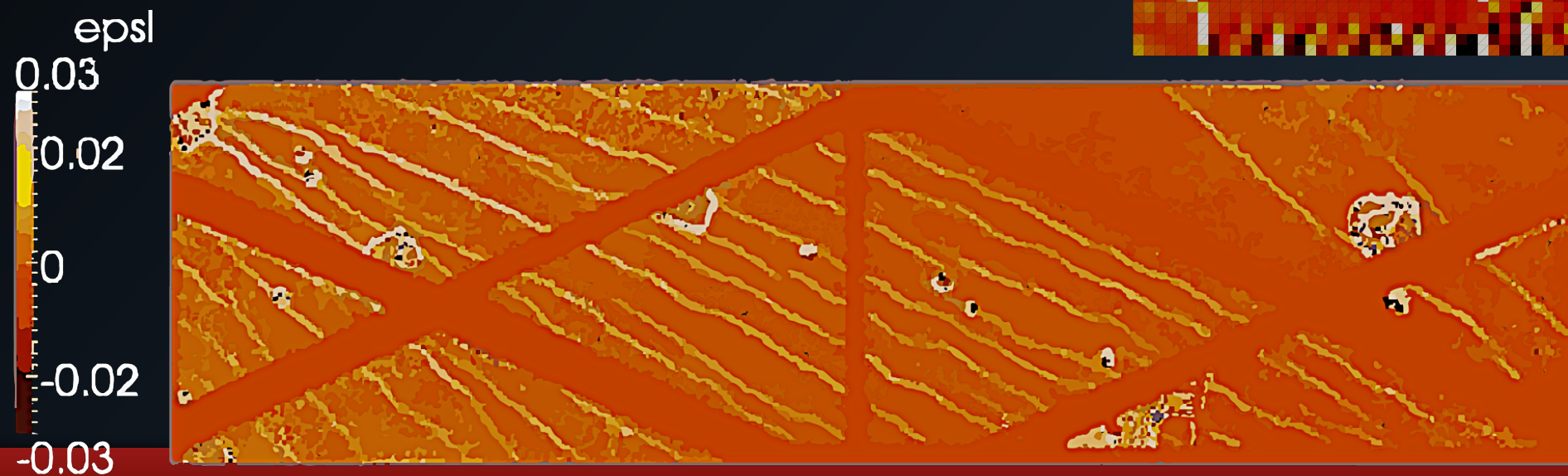
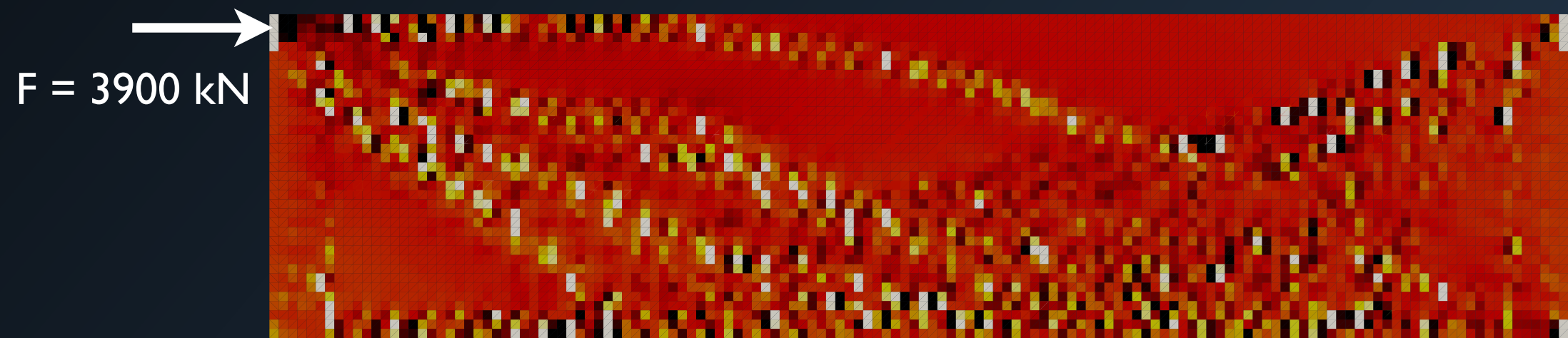
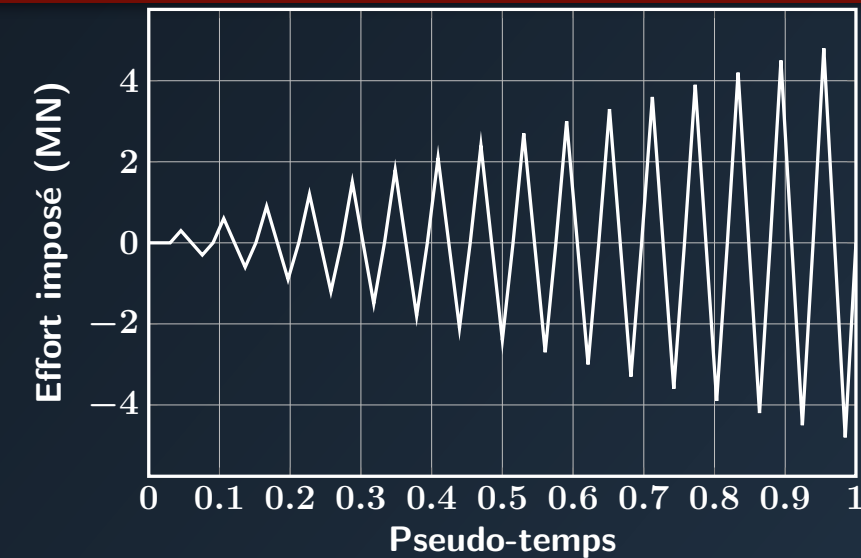
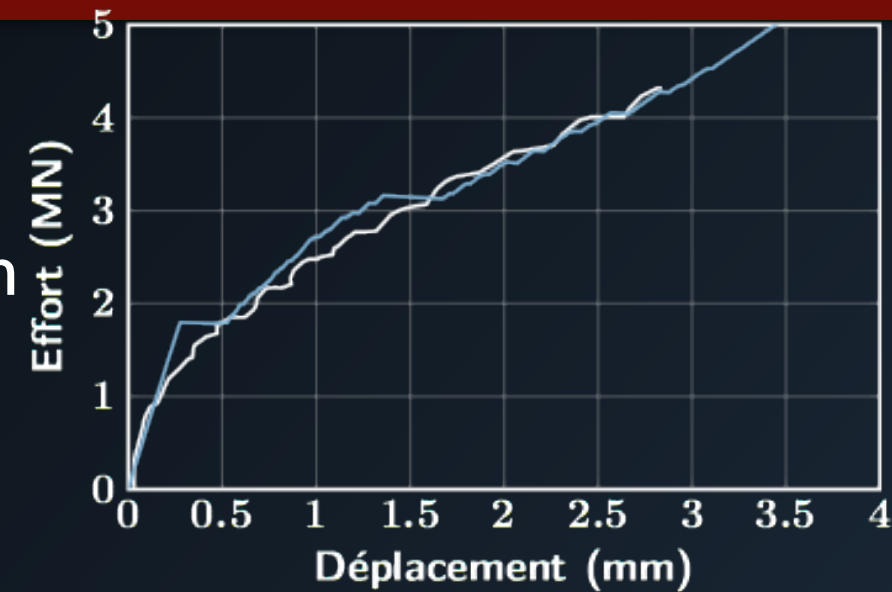


— expérience
— modèle macroscopique



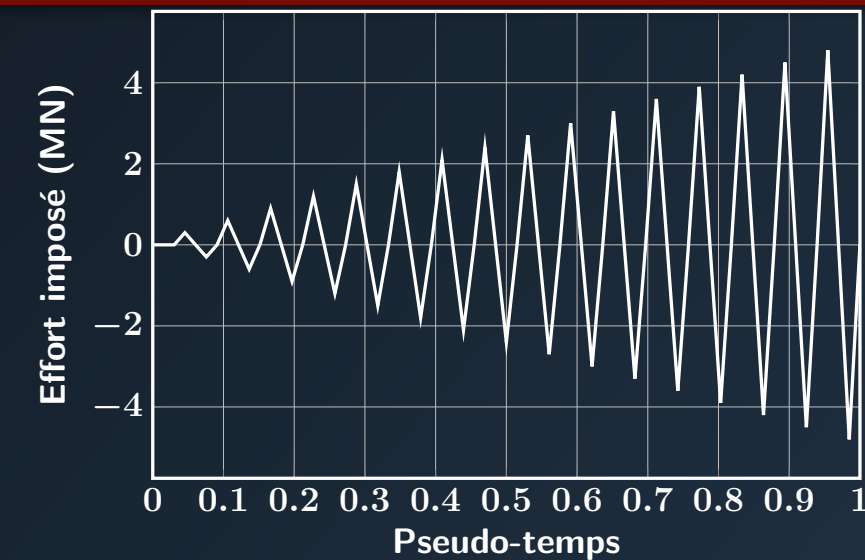
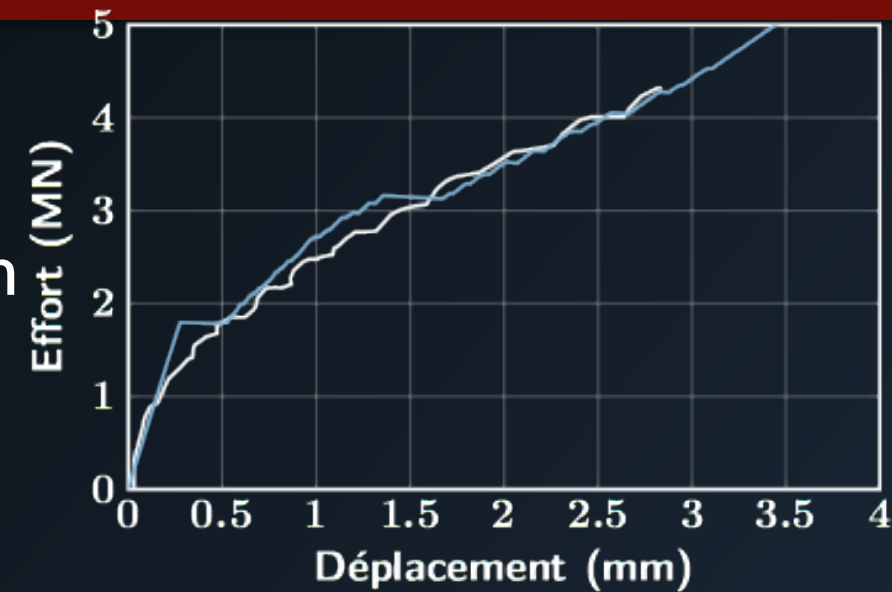
Comportement à rupture

- Courbe de capacité satisfaisante
- Description satisfaisante de faciès de fissuration

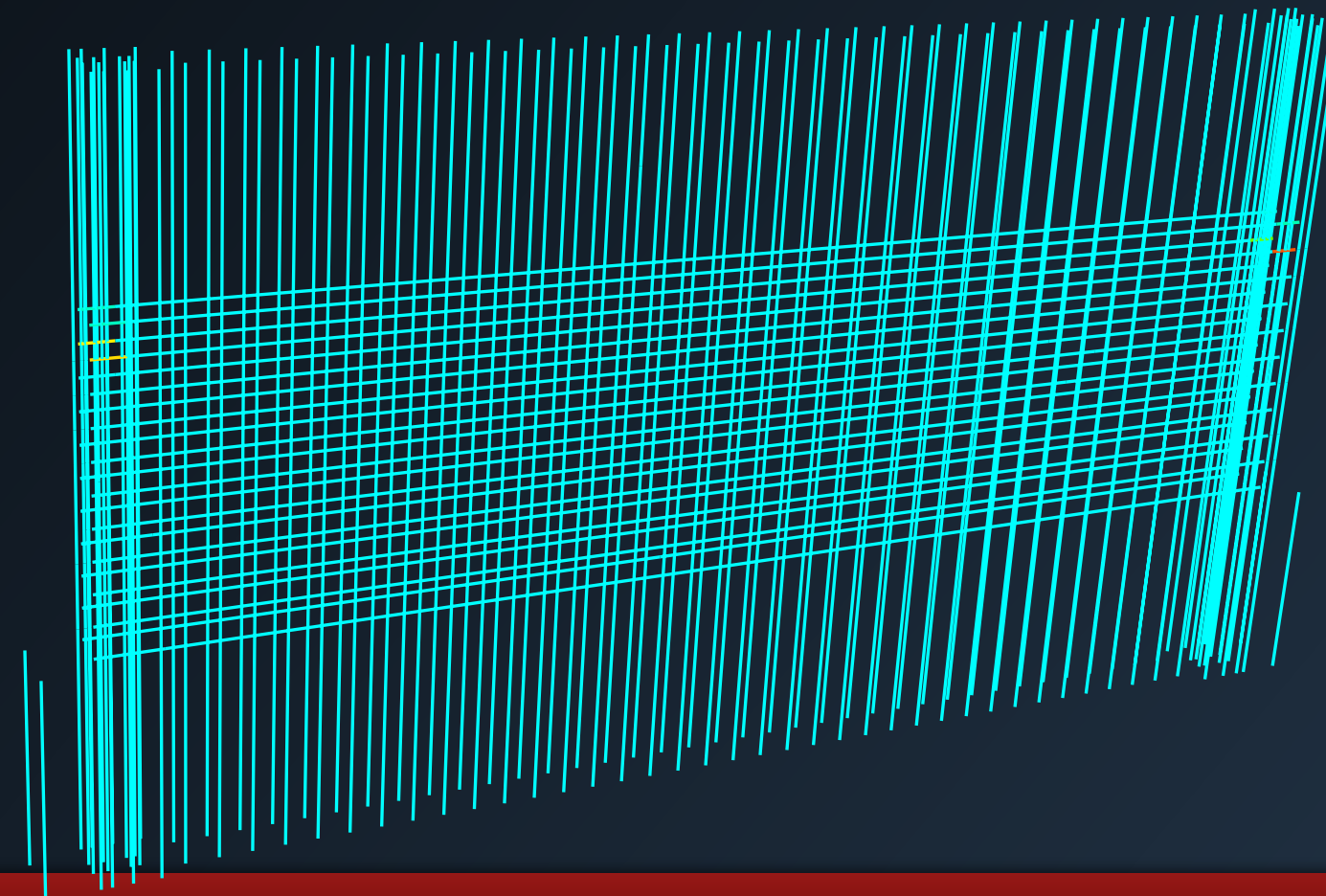
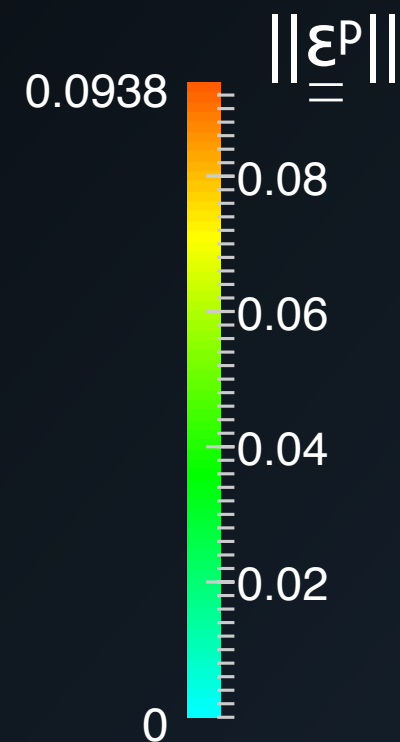


Comportement à rupture

- Courbe de capacité satisfaisante
- Description satisfaisante de faciès de fissuration
- Pas de plasticité dans l'acier

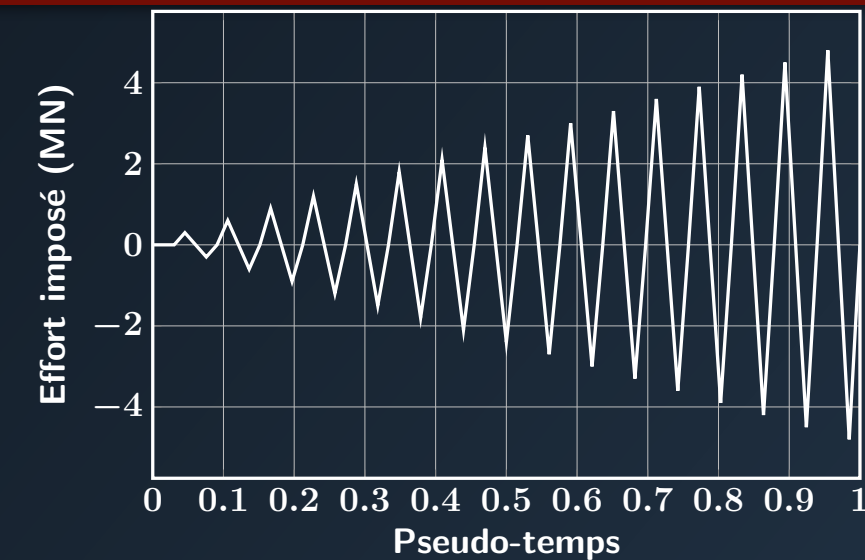
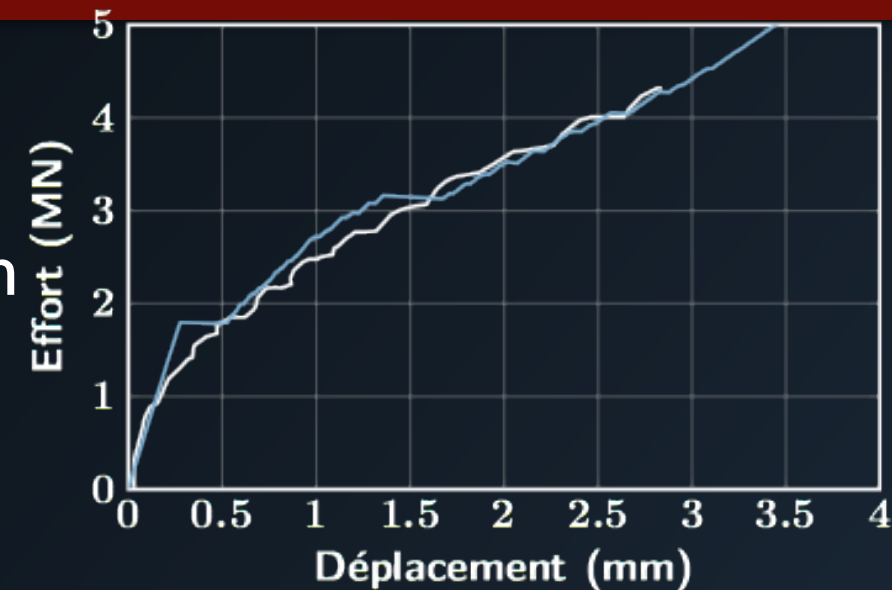


F = 4900 kN

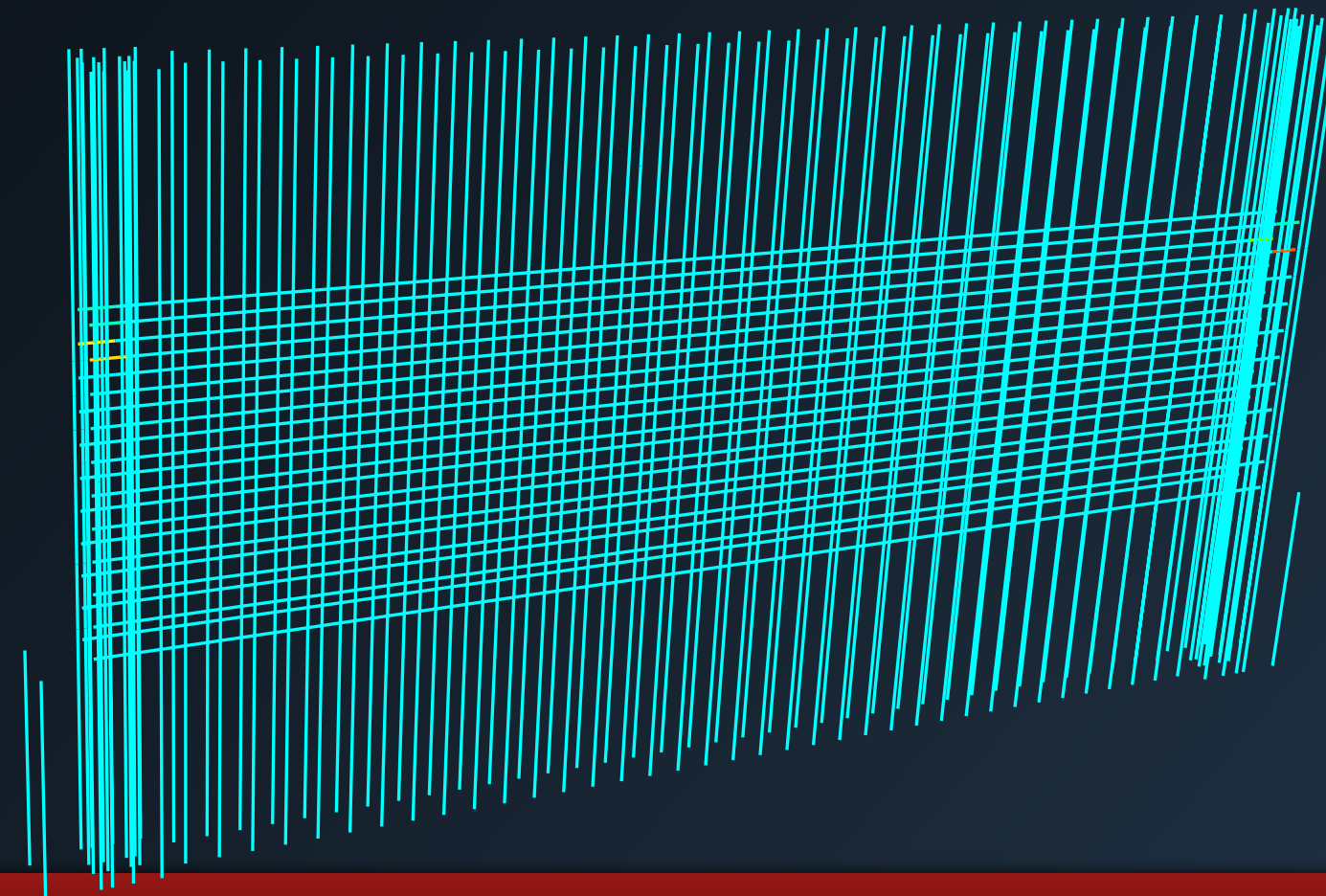
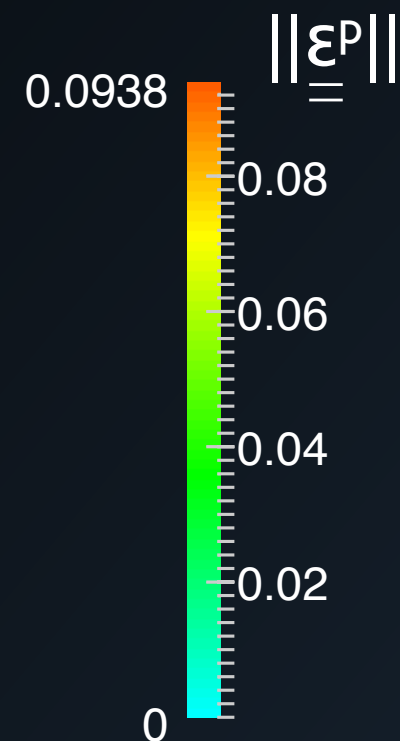


Comportement à rupture

- Courbe de capacité satisfaisante
- Description satisfaisante de faciès de fissuration
- Pas de plasticité dans l'acier

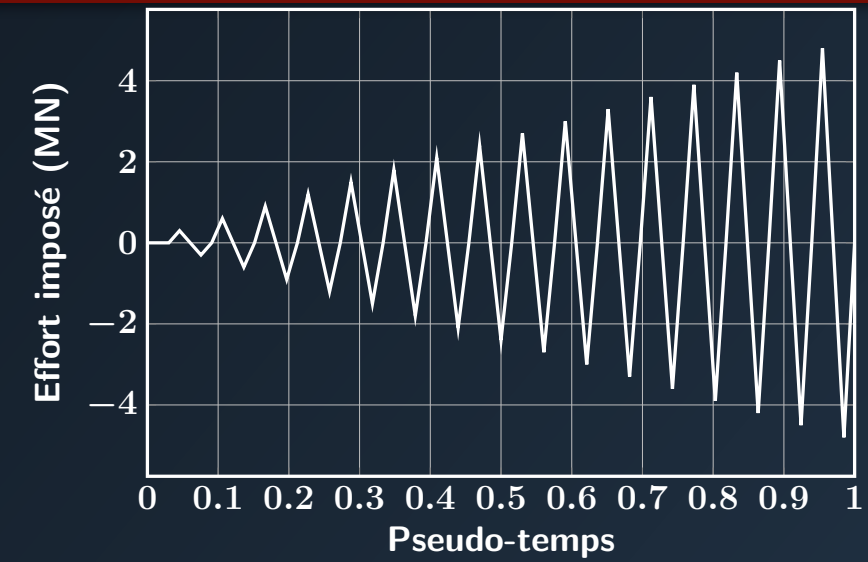


F = 4900 kN



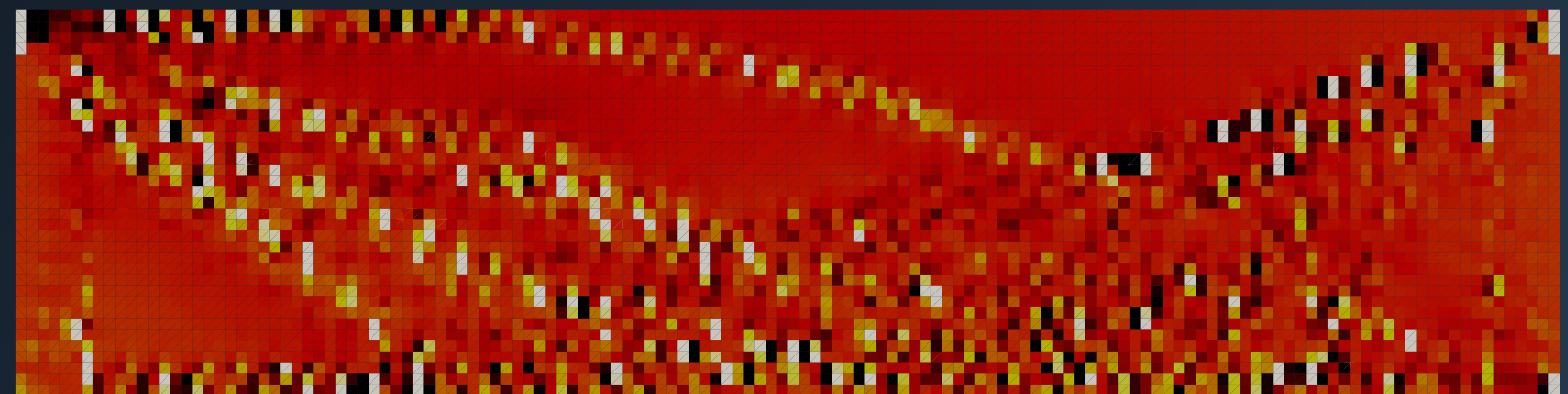
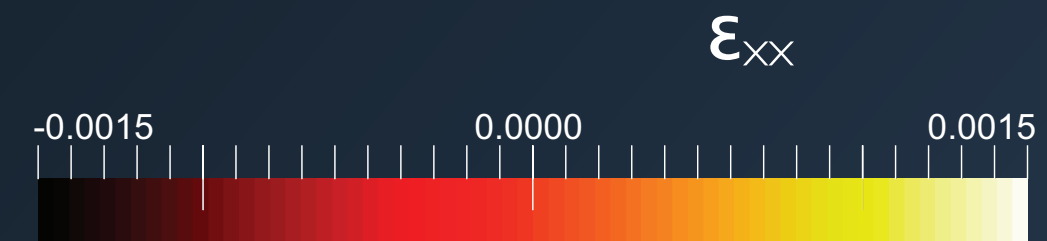
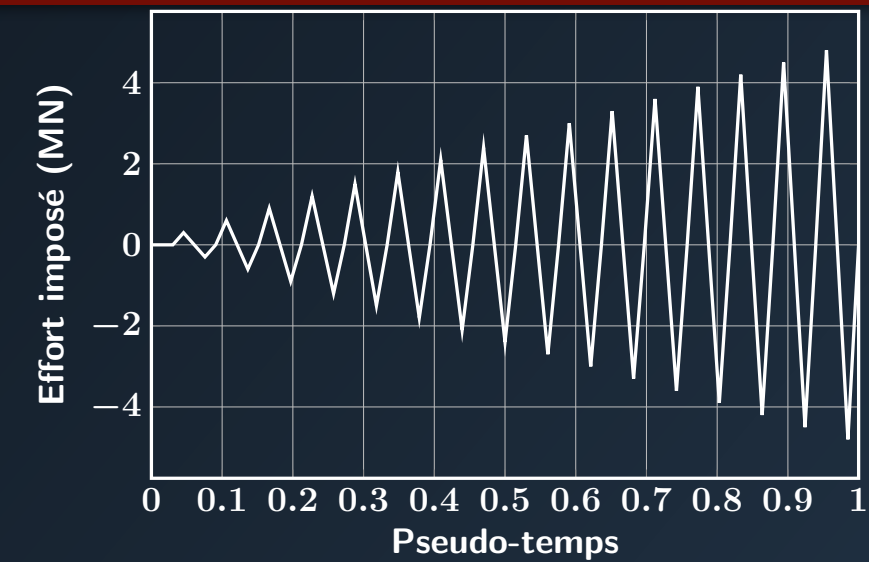
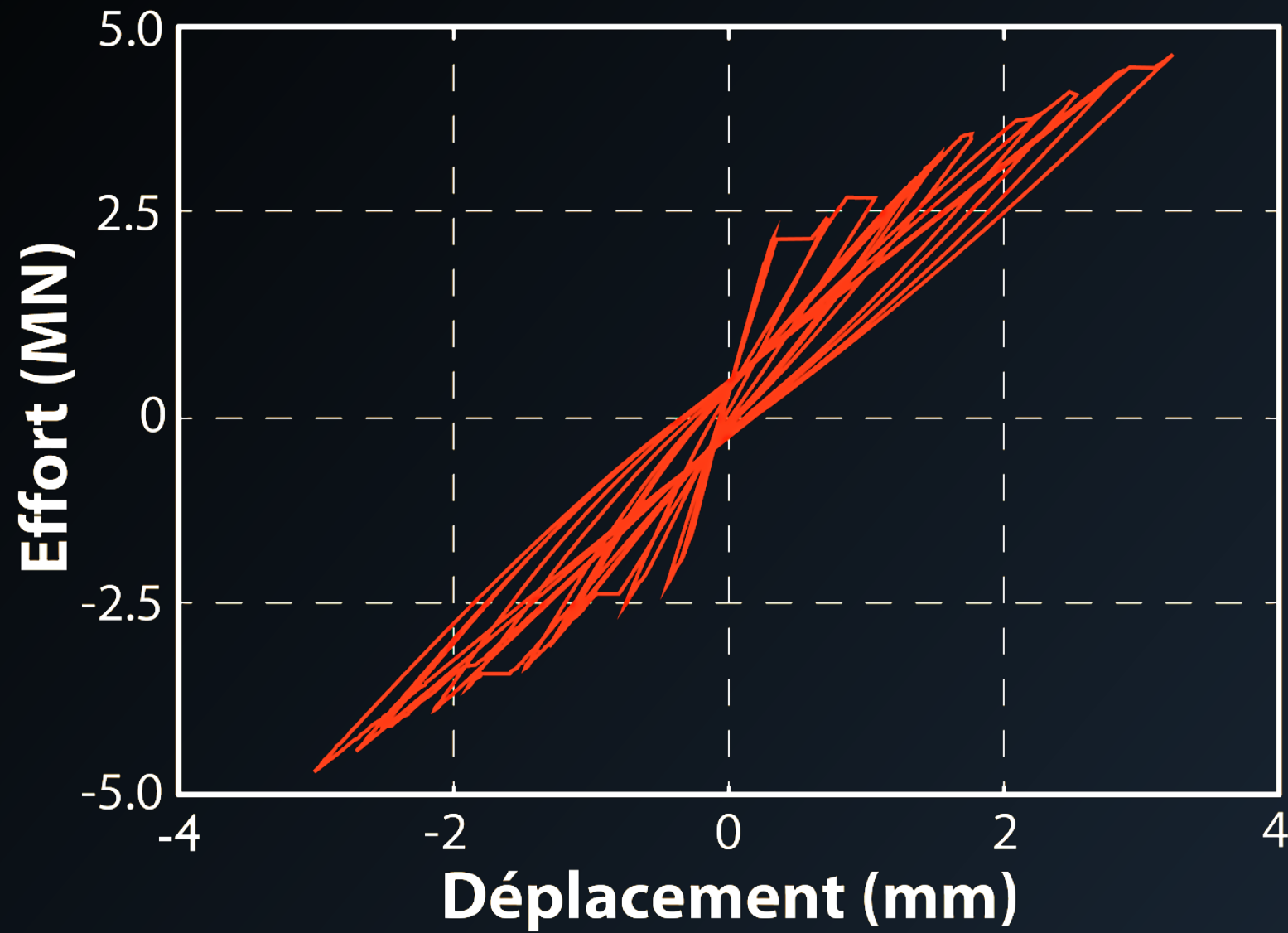
► Le béton est la seule source de dissipation

Réponse sous chargement cyclique



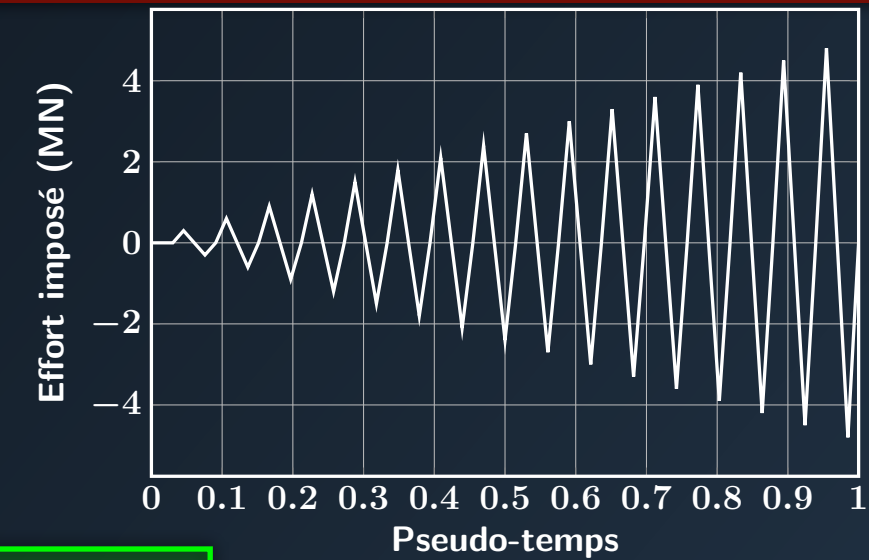
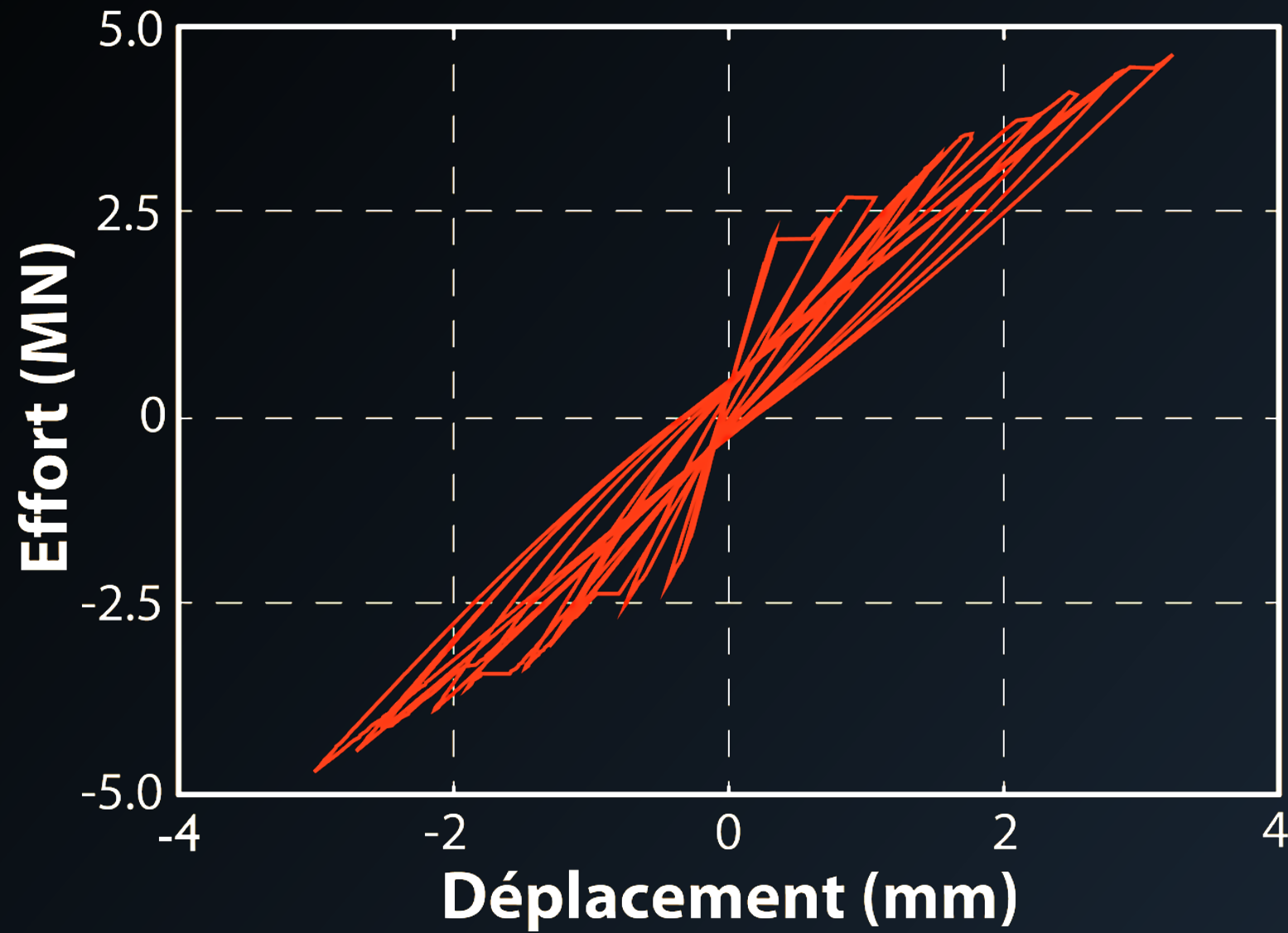
Réponse sous chargement cyclique

- Simulation de l'ensemble du trajet de chargement

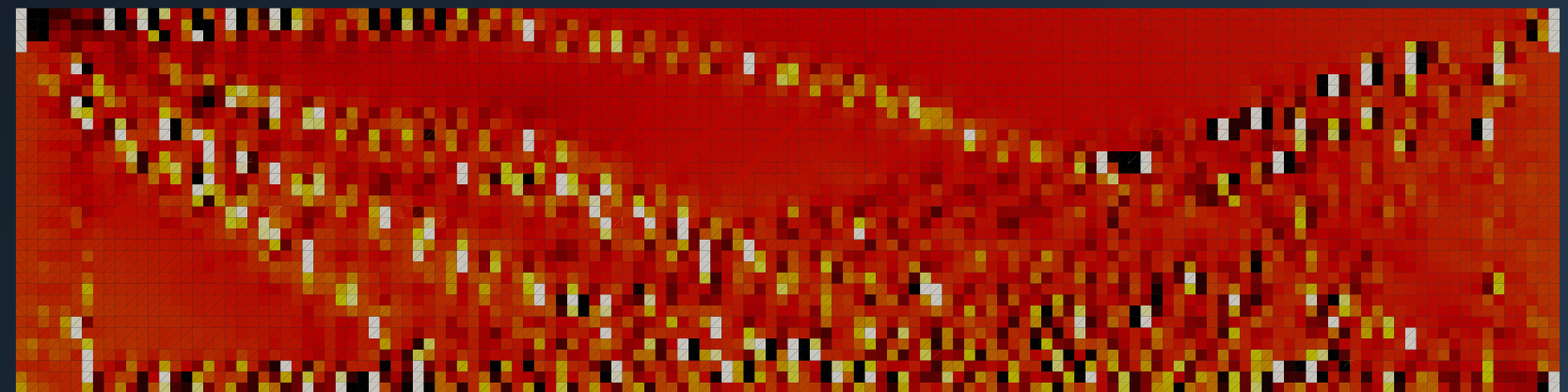
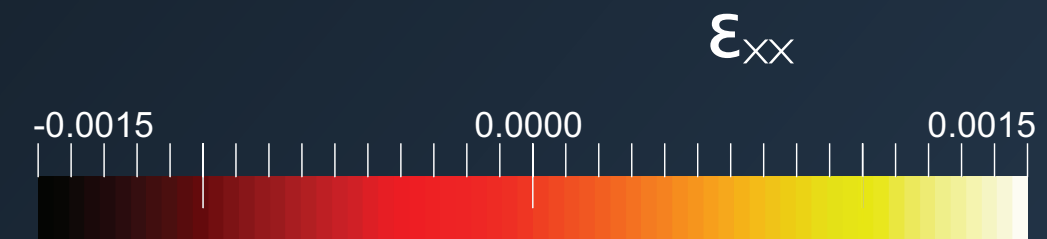


Réponse sous chargement cyclique

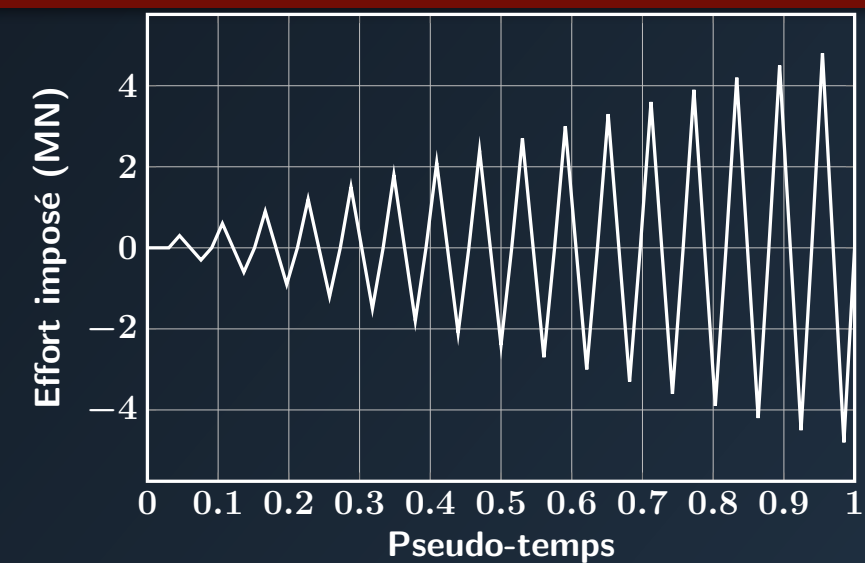
- Simulation de l'ensemble du trajet de chargement



✓ Robustesse numérique

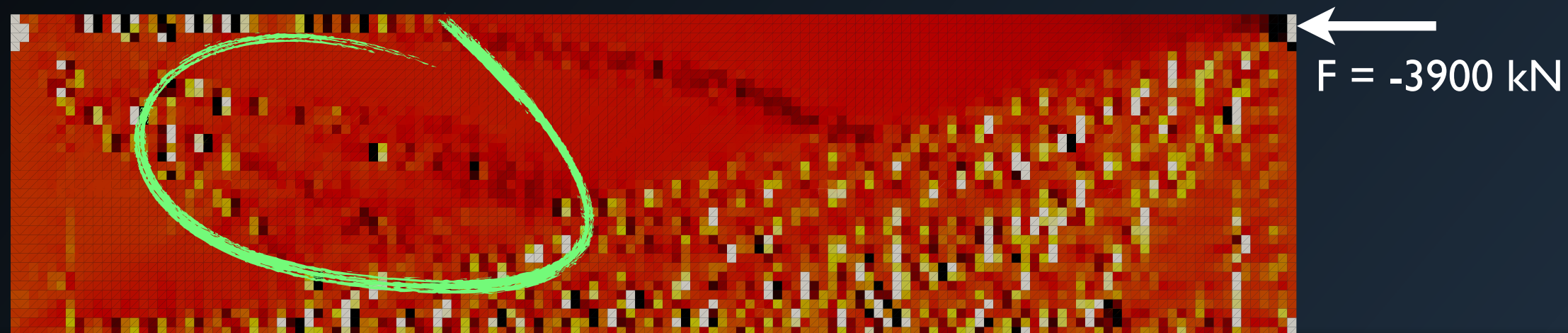
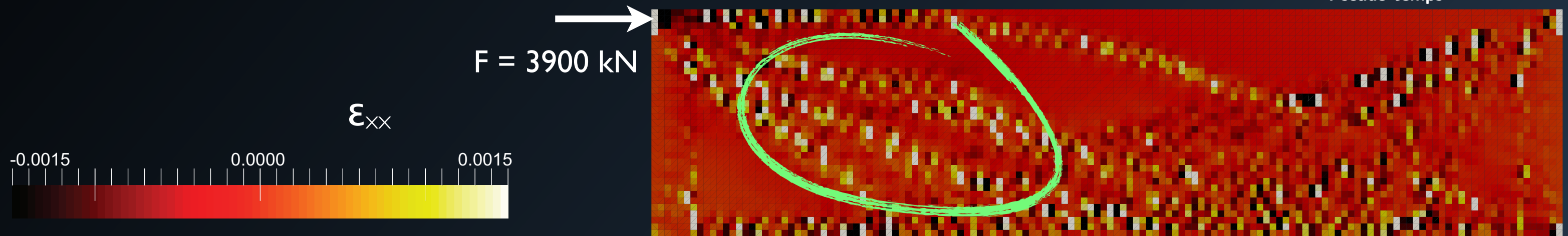
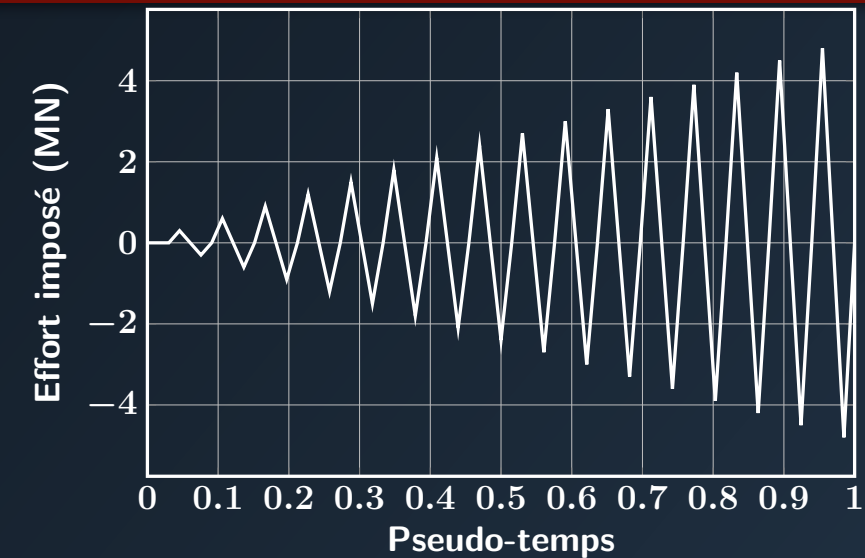


Réponse sous chargement cyclique



Réponse sous chargement cyclique

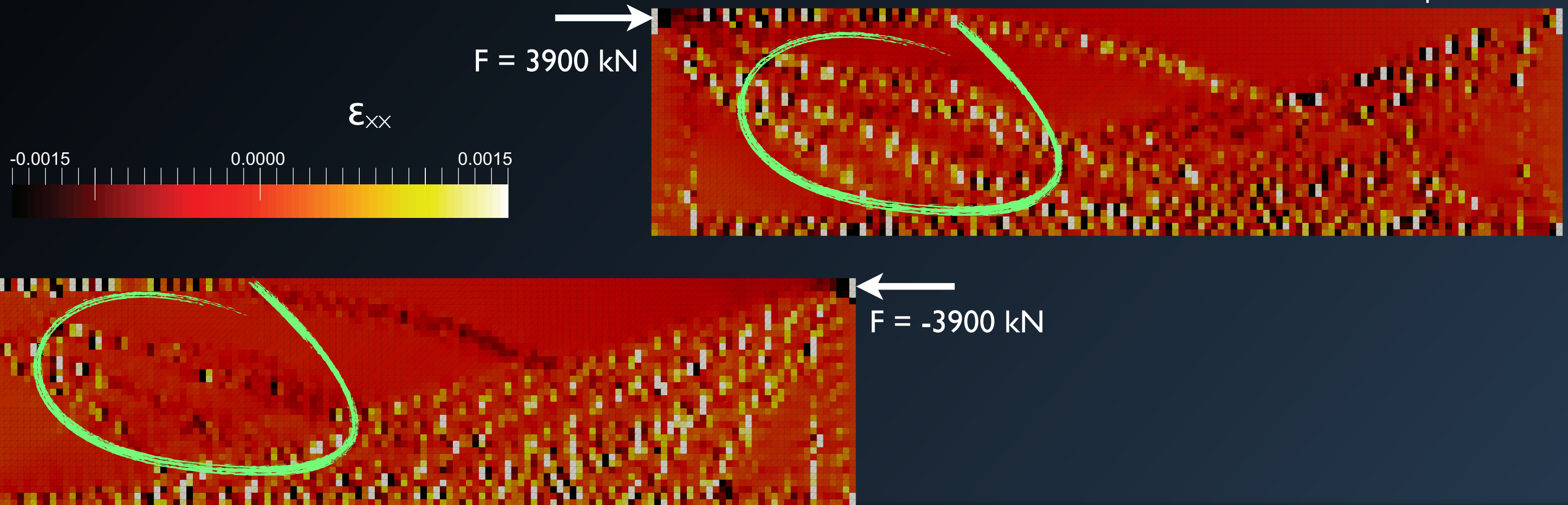
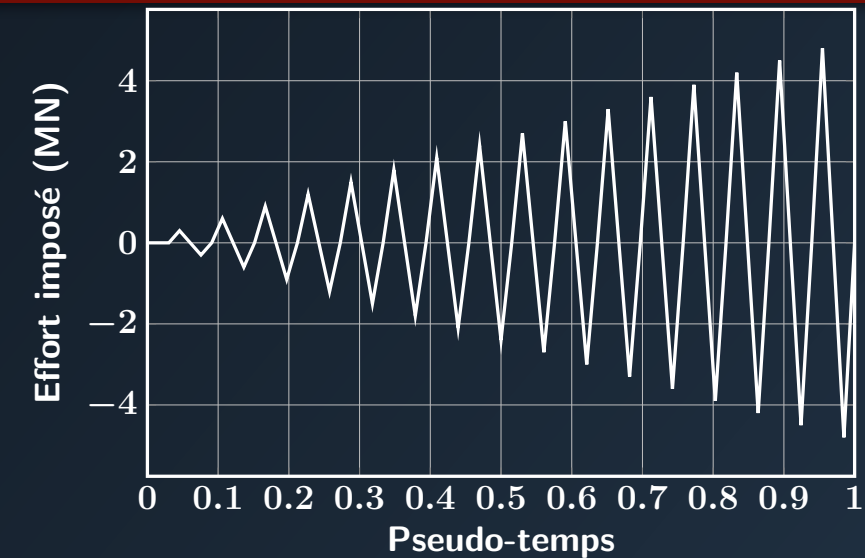
- Faciès de fissuration
 - Symétrique
 - Redistribution des déformation en compression



Réponse sous chargement cyclique

- Faciès de fissuration
 - Symétrique
 - Redistribution des déformation en compression

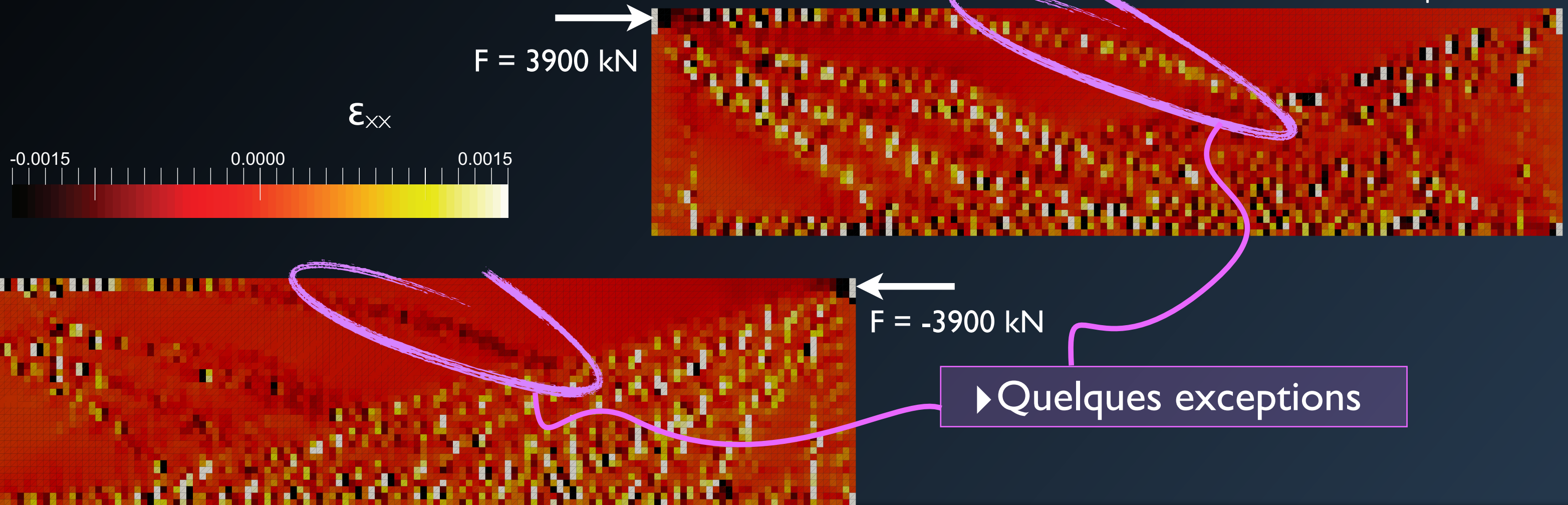
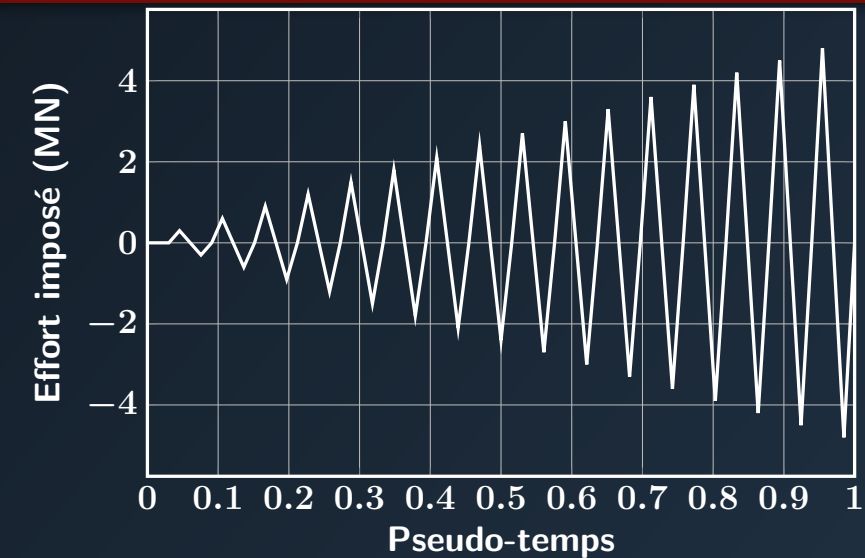
✓ Effet unilatéral



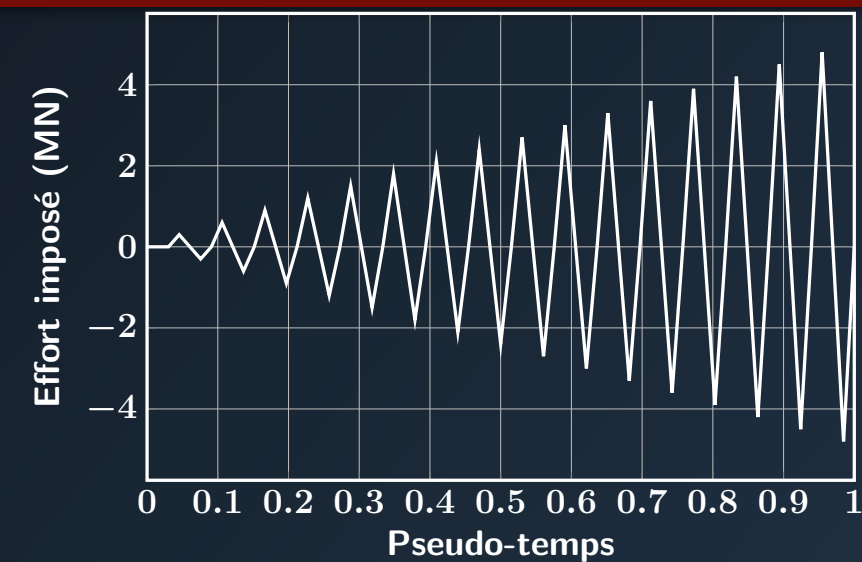
Réponse sous chargement cyclique

- Faciès de fissuration
 - Symétrique
 - Redistribution des déformation en compression

✓ Effet unilatéral

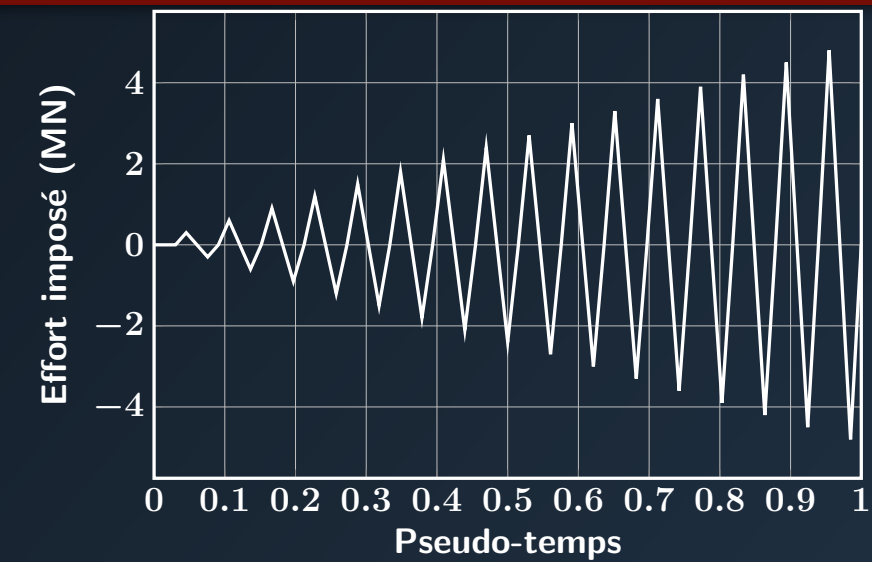


Réponse sous chargement cyclique



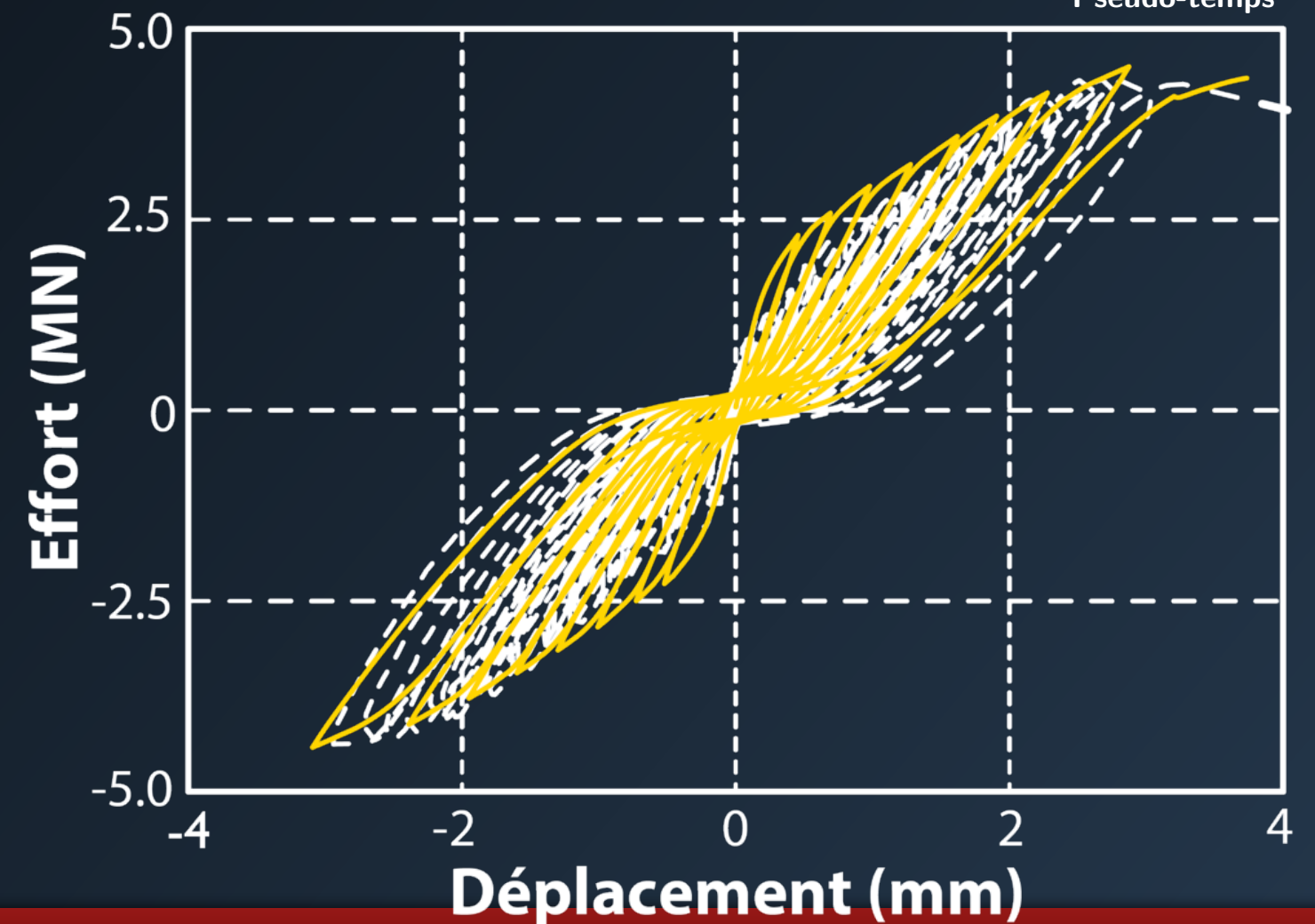
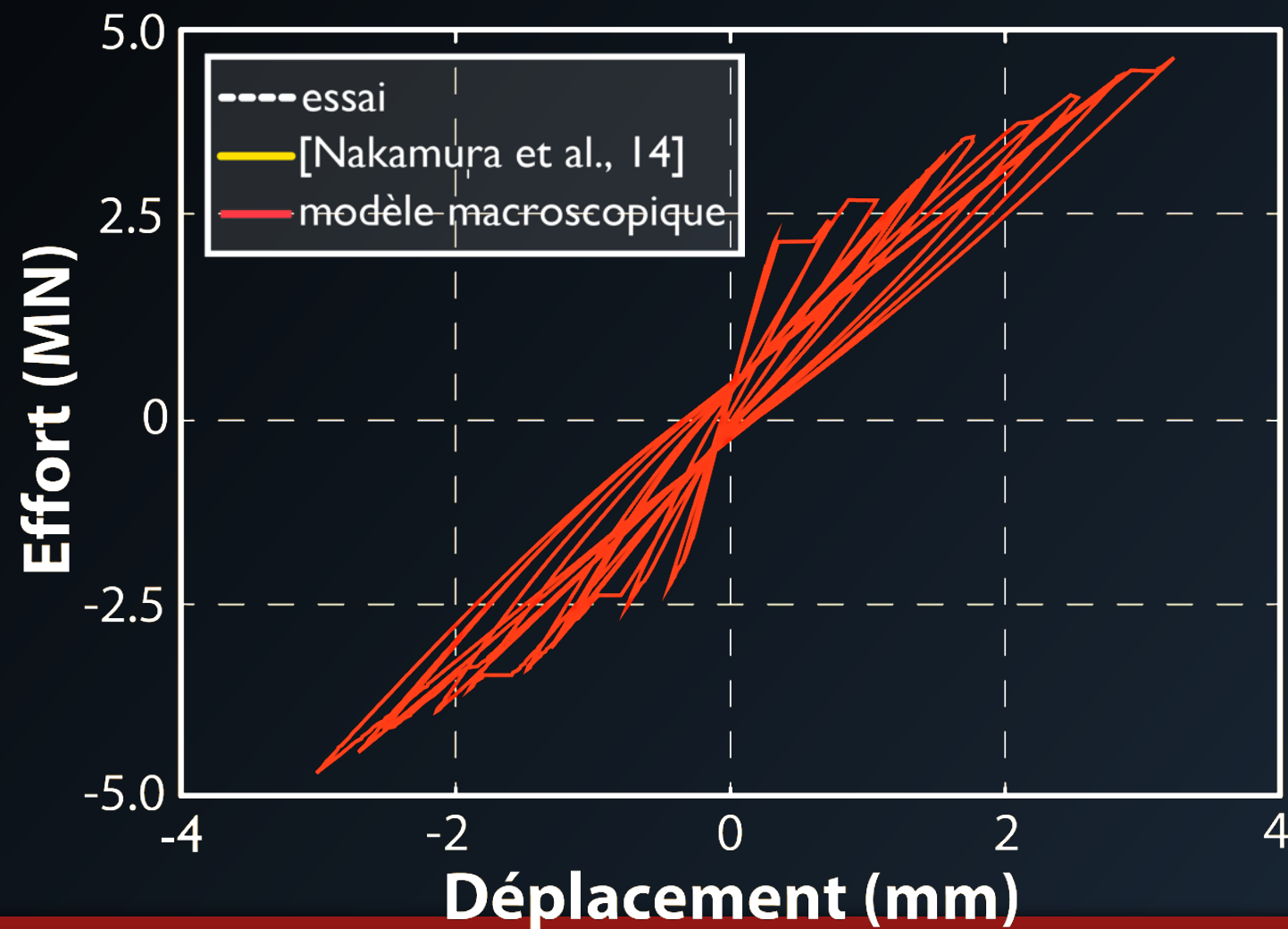
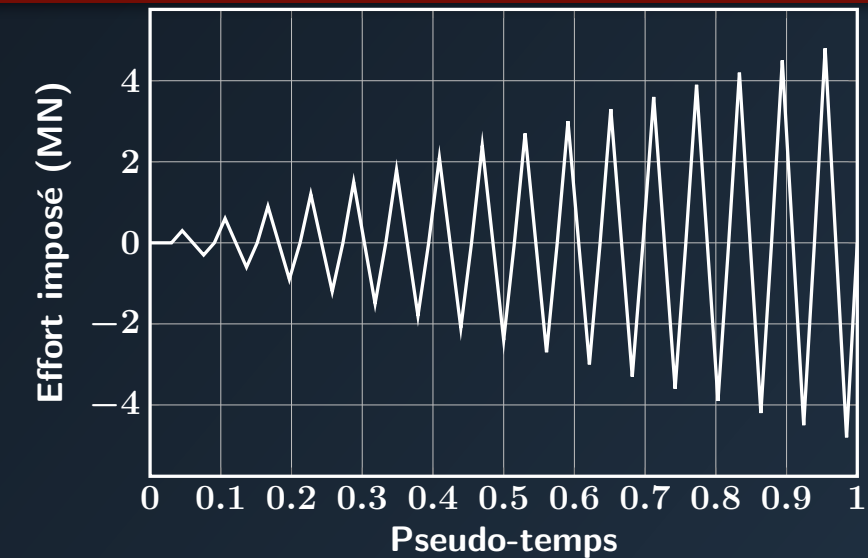
Réponse sous chargement cyclique

- Réponse force-déplacement



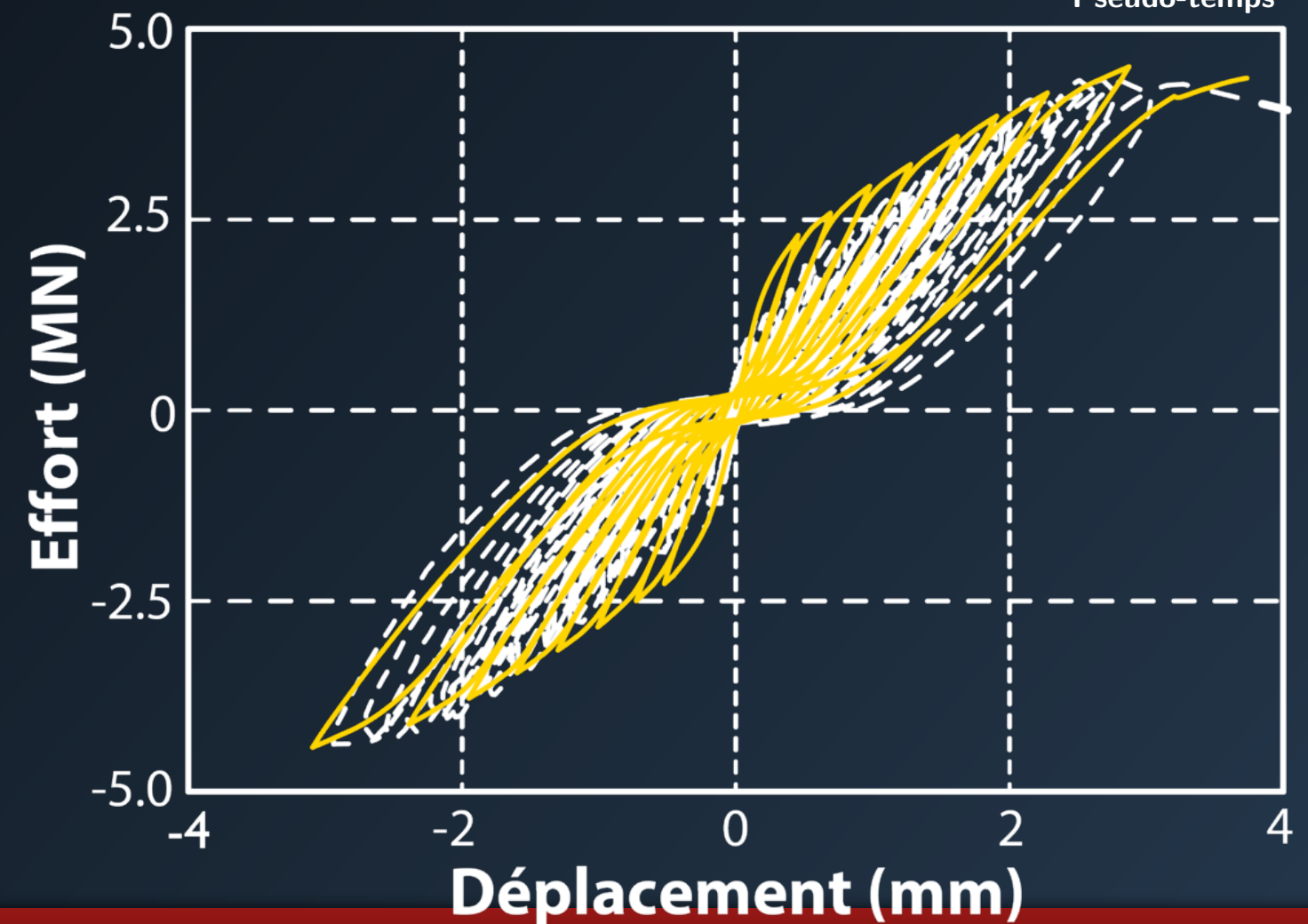
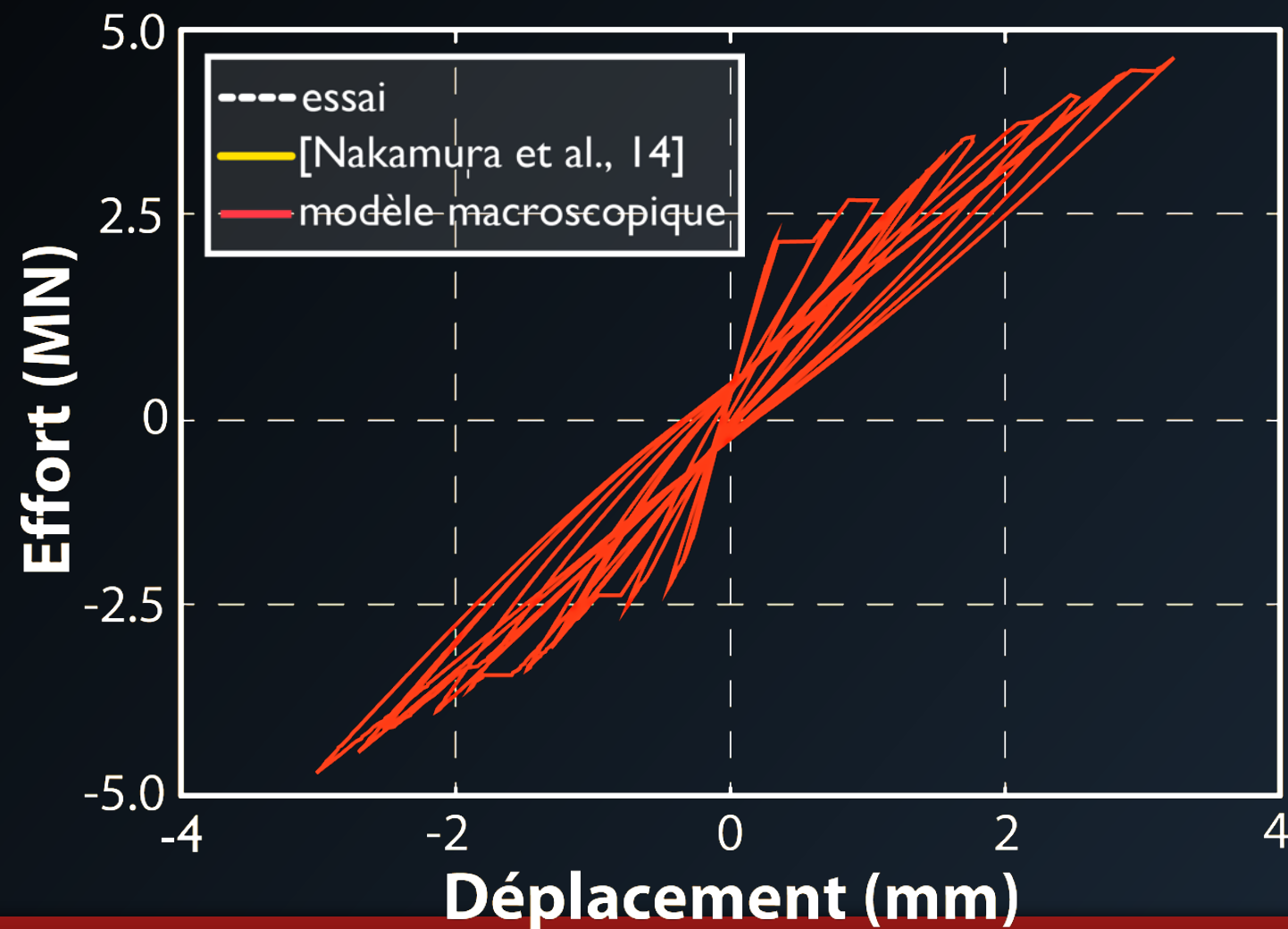
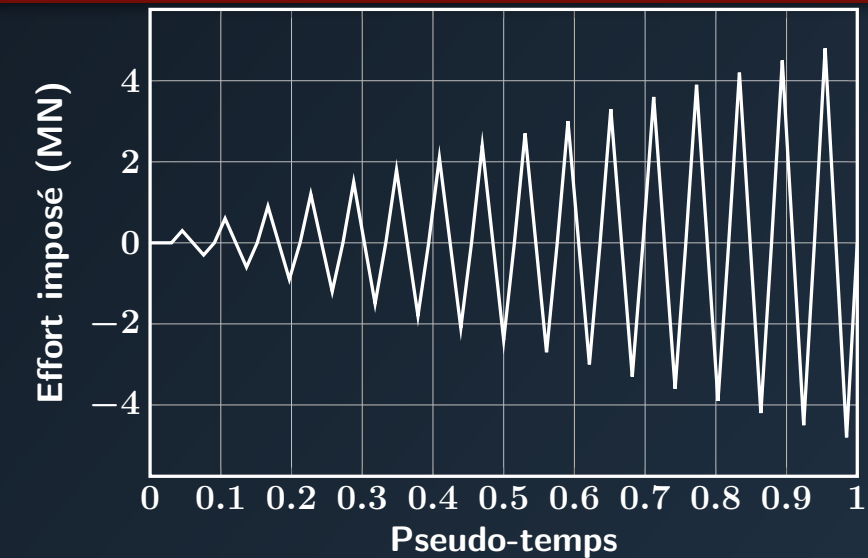
Réponse sous chargement cyclique

- Réponse force-déplacement



Réponse sous chargement cyclique

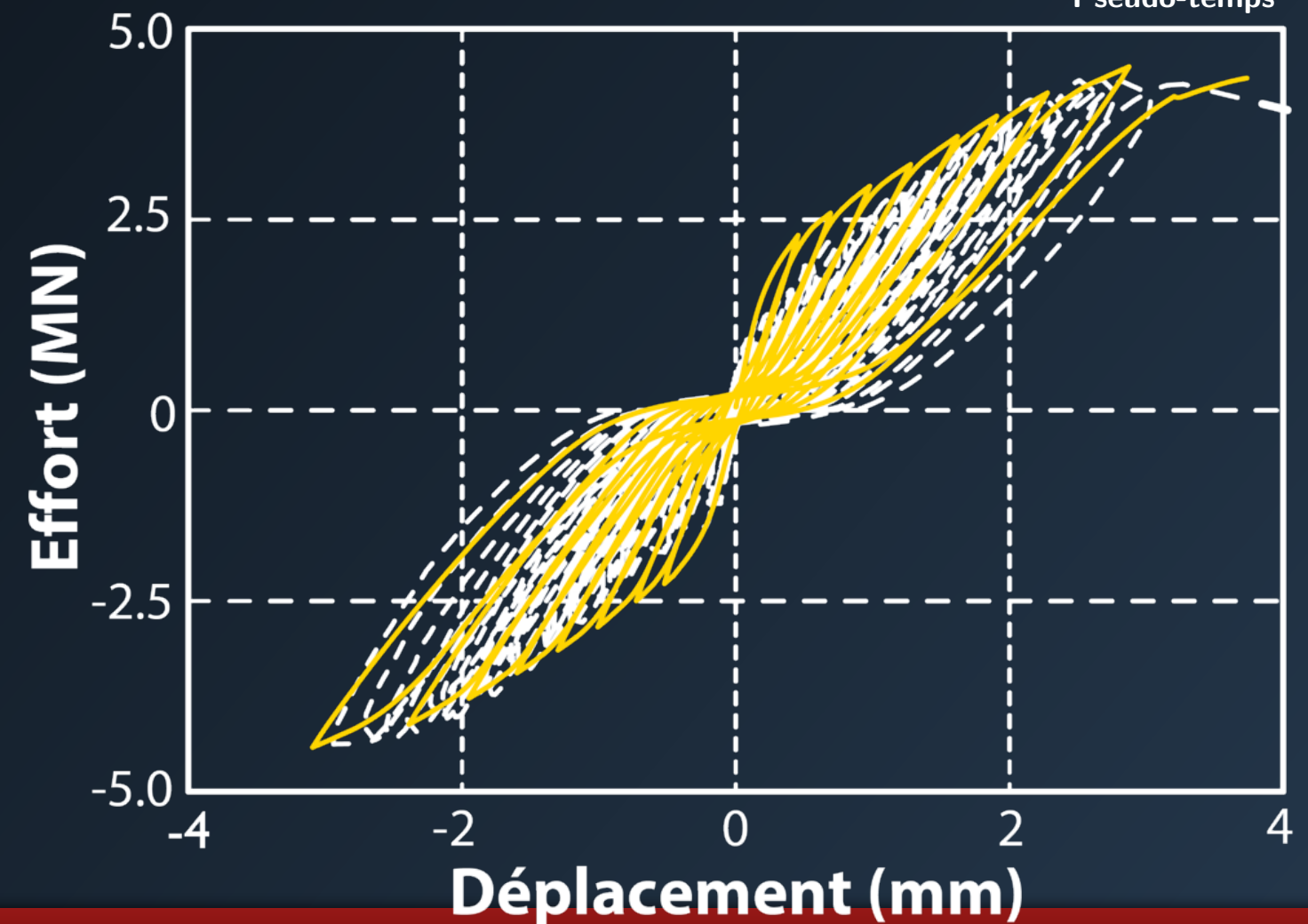
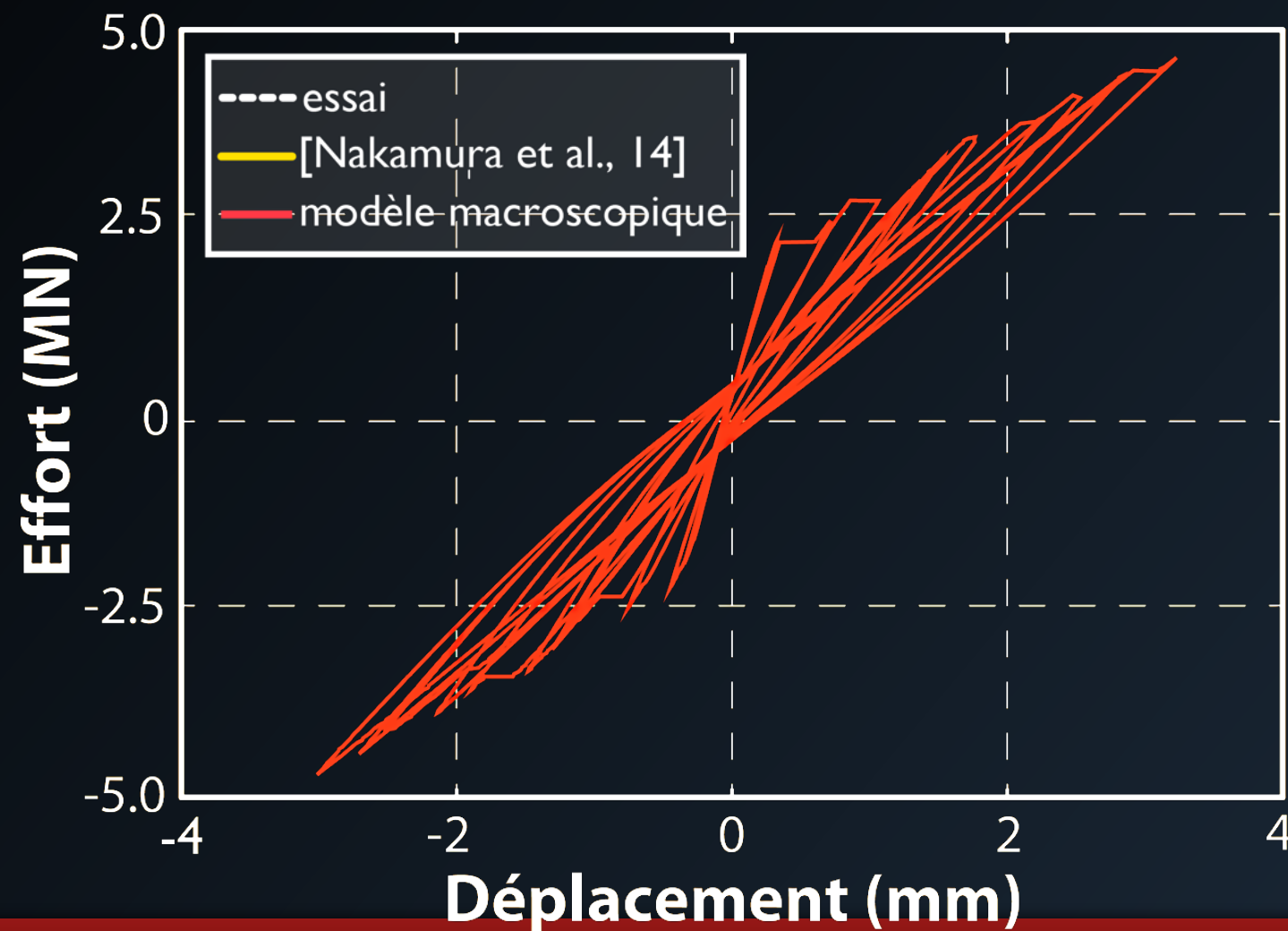
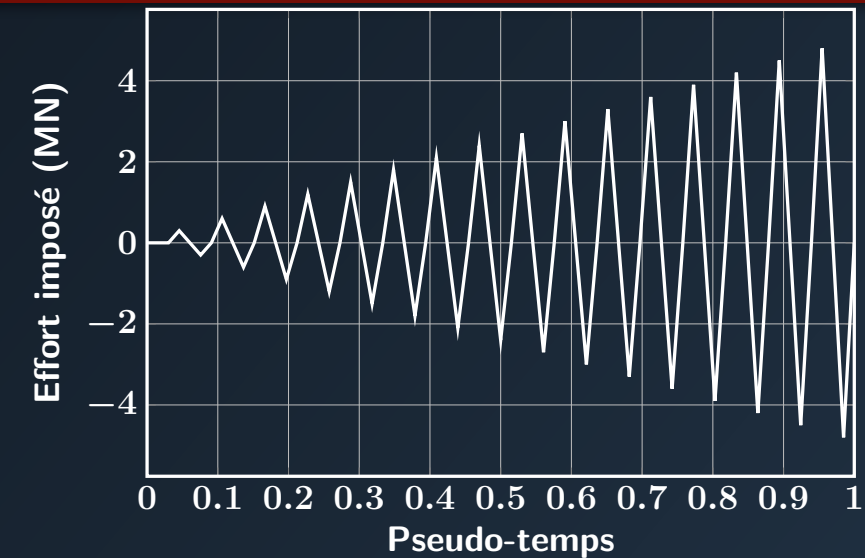
- Réponse force-déplacement
- Boucles d'hystérésis



Réponse sous chargement cyclique

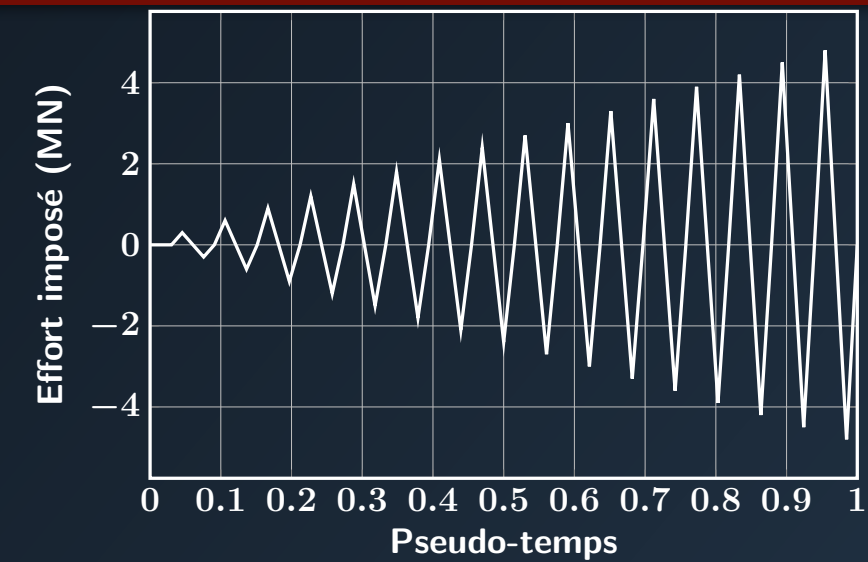
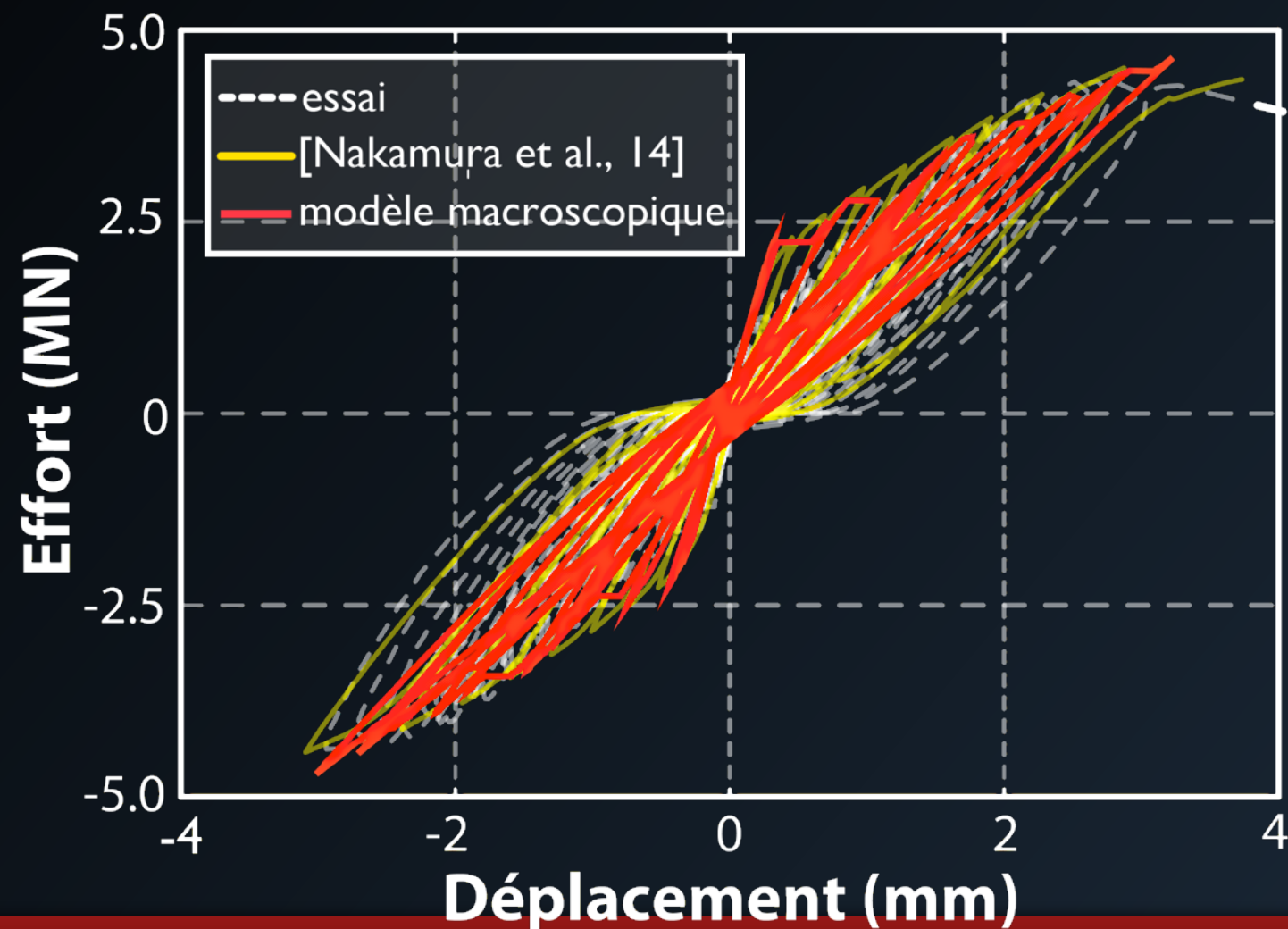
- Réponse force-déplacement
- Boucles d'hystérésis

✓ Glissement interne



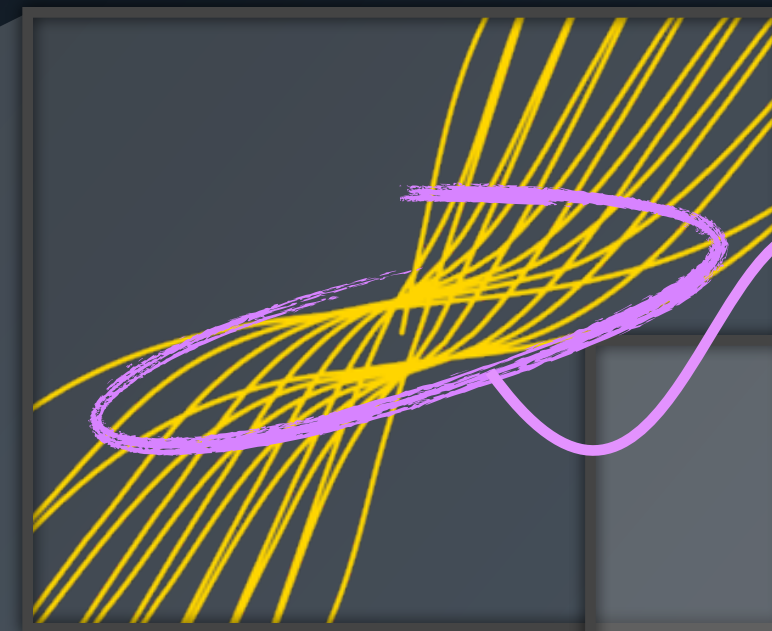
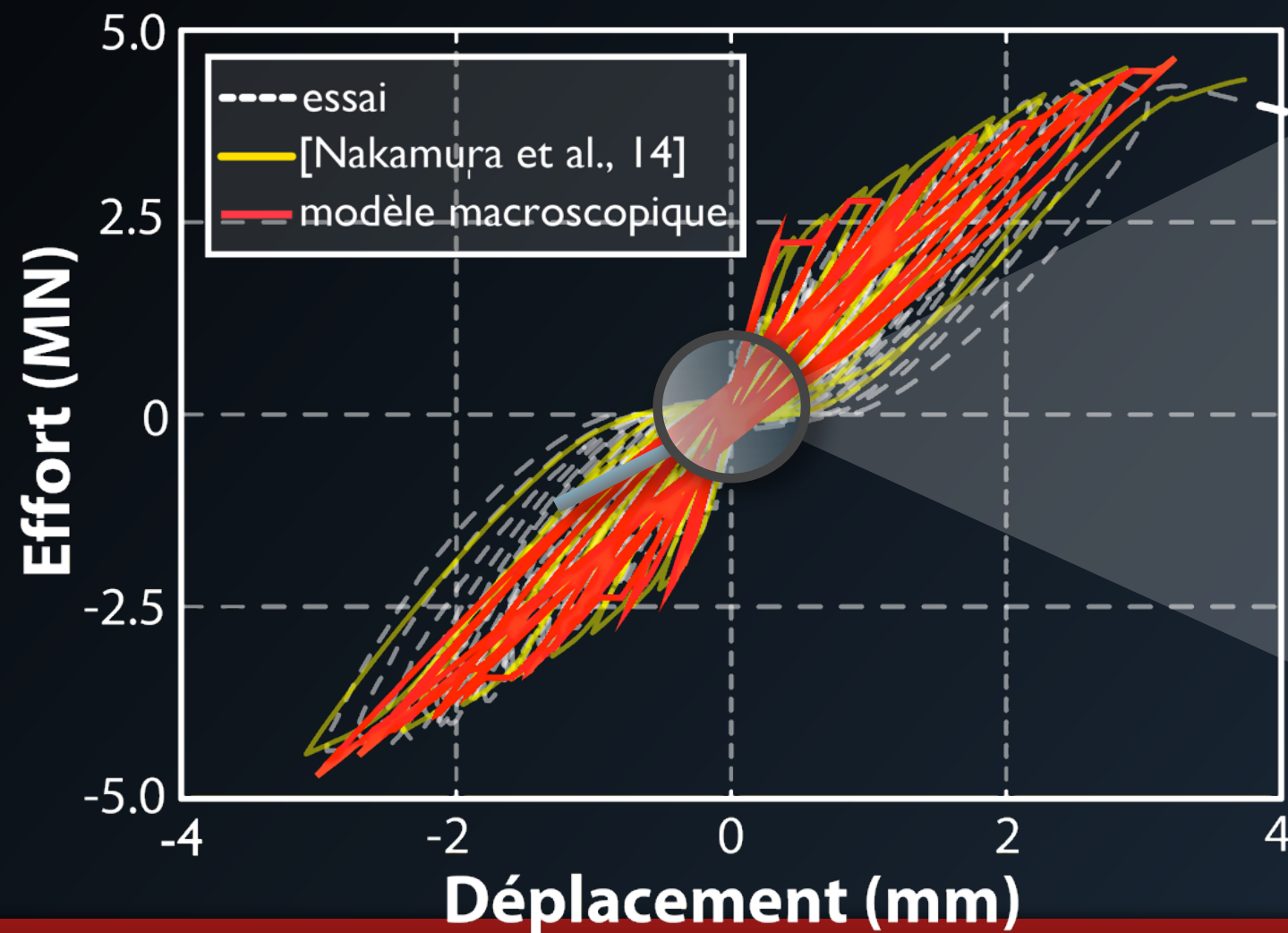
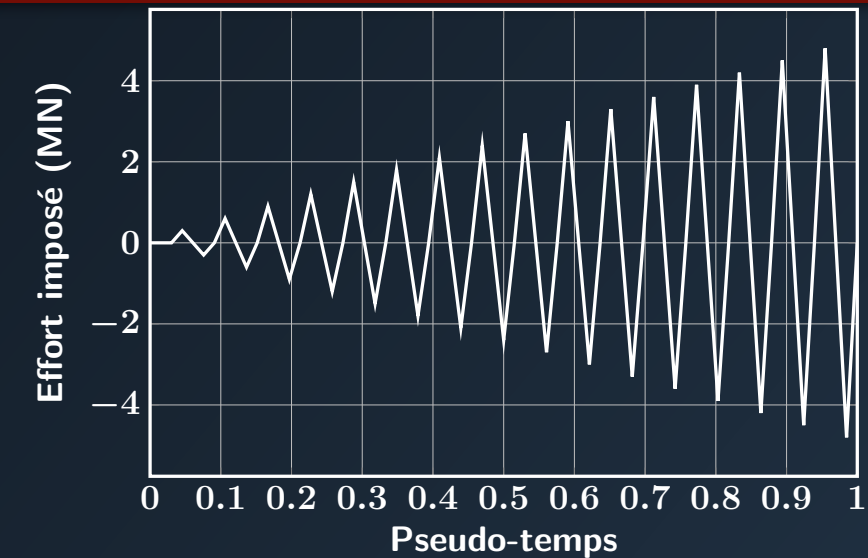
Réponse sous chargement cyclique

- Réponse force-déplacement
- Boucles d'hystérésis



Réponse sous chargement cyclique

- Réponse force-déplacement
- Boucles d'hystérésis



► Pincement



Conclusions et voies d'amélioration

Conclusions et voies d'amélioration

Conclusions et voies d'amélioration

✳ Formuler une loi constitutive capable de simuler le comportement cyclique de structures en béton armé sujettes à des chargements cycliques

– Points clefs :

- **Formulation 3D**

- ▶ Simulation de structures en béton armé jusqu'à rupture
- ▶ Effet unilatéral partiel (a priori suffisant pour un voile)
- ▶ Description des effets hystérétiques

- **Disponible dans Cast3M**

- ▶ Poutres TIMO (multifibres), COQ4 (multicouches) et VOLUMIQUE
- ▶ Régularisations NON LOCALE et ENERGETIQUE

Conclusions et voies d'amélioration

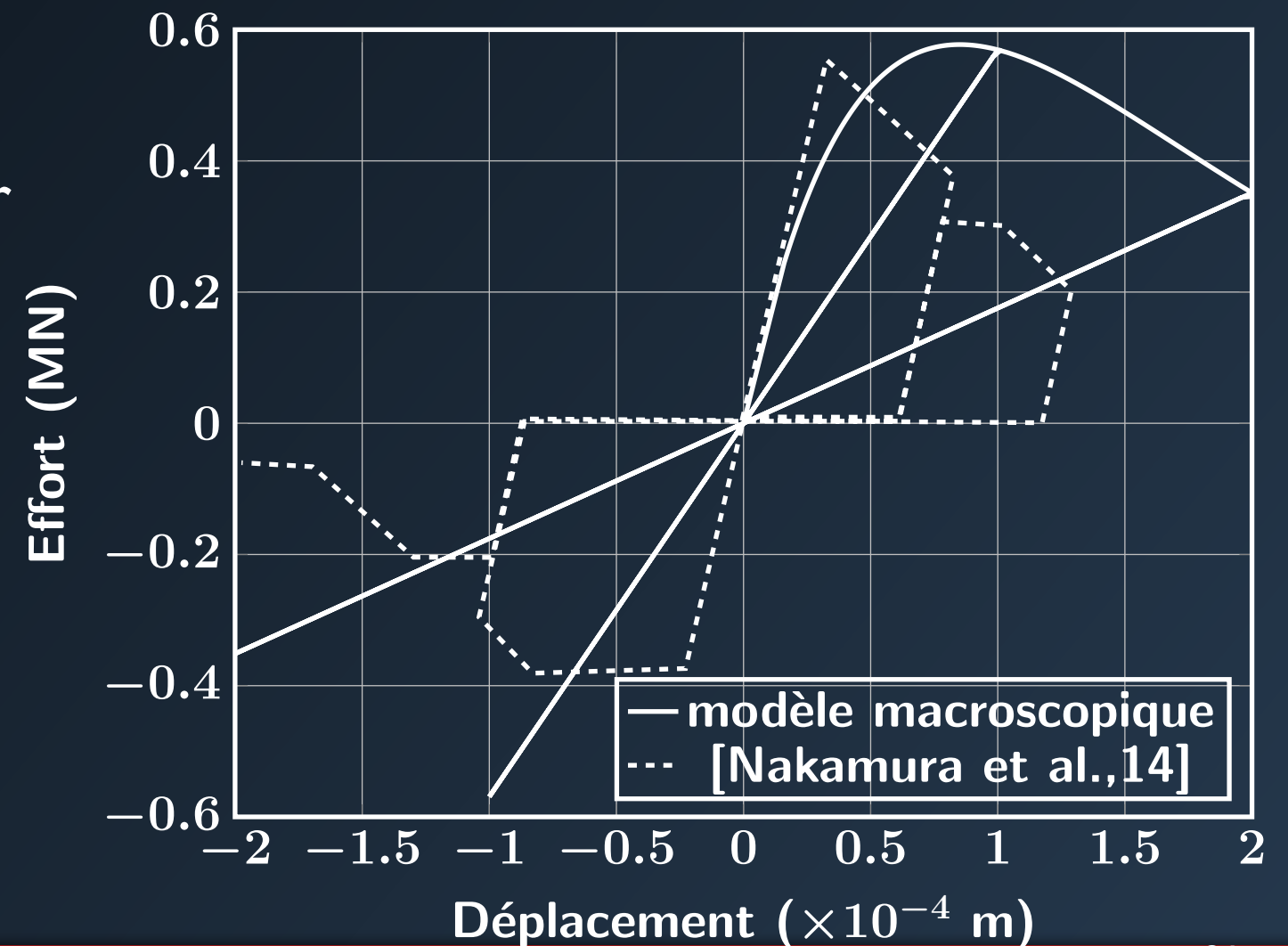
* Formuler une loi constitutive capable de simuler le comportement cyclique de structures en béton armé sujettes à des chargements cycliques

Conclusions et voies d'amélioration

* Formuler une loi constitutive capable de simuler le comportement cyclique de structures en béton armé sujettes à des chargements cycliques

- Dans un futur proche :

- Effet unilatéral complet
 - ▶ Amélioration de la réponse en cisaillement pur
 - ▶ Endommagement anisotrope ? [Kishta, 16]

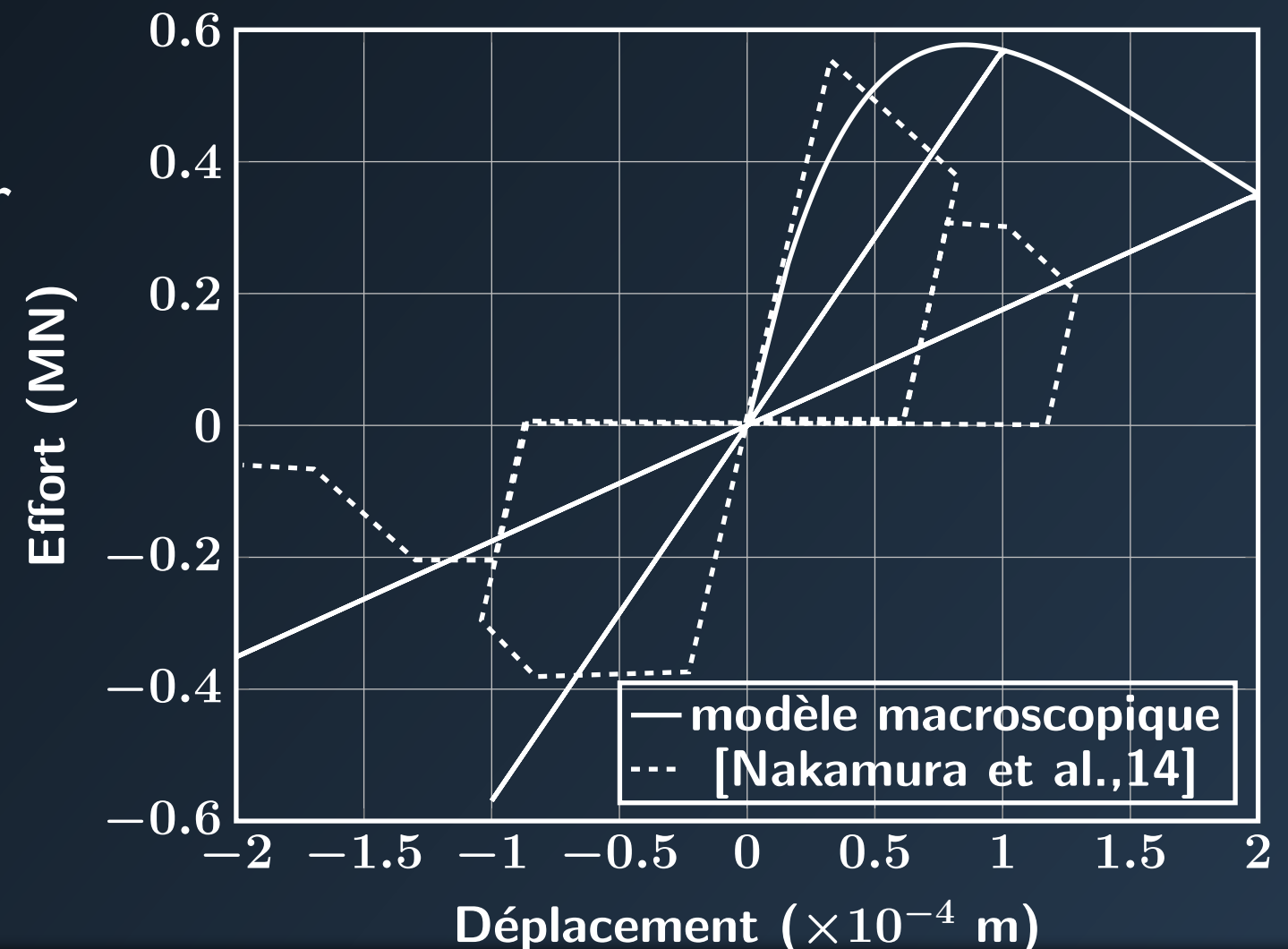


Conclusions et voies d'amélioration

* Formuler une loi constitutive capable de simuler le comportement cyclique de structures en béton armé sujettes à des chargements cycliques

- Dans un futur proche :

- Effet unilatéral complet
 - ▶ Amélioration de la réponse en cisaillement pur
 - ▶ Endommagement anisotrope ? [Kishta, 16]
- Effet de pincement
 - ▶ Conséquence du cisaillement ?

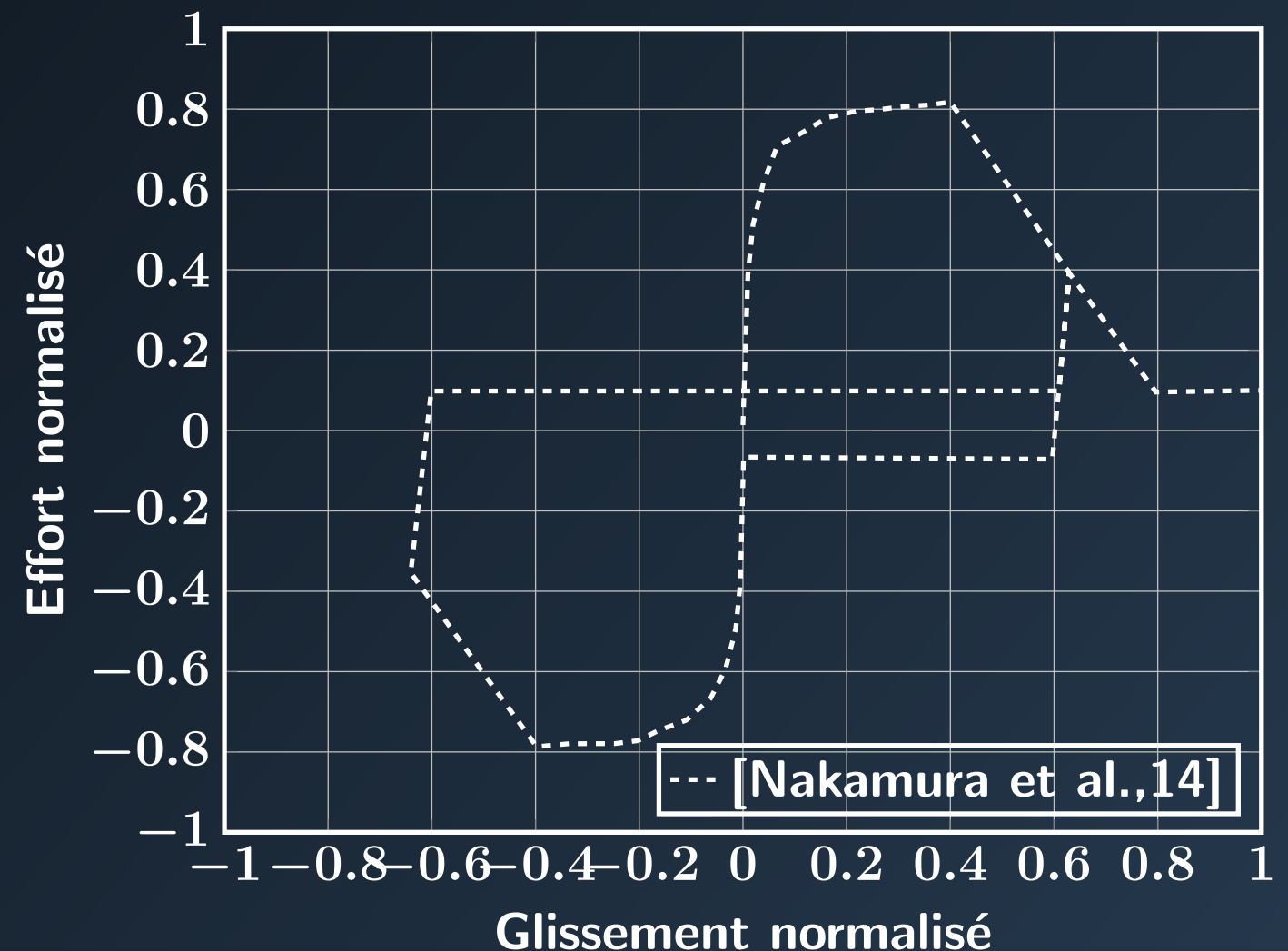


Conclusions et voies d'amélioration

* Formuler une loi constitutive capable de simuler le comportement cyclique de structures en béton armé sujettes à des chargements cycliques

- Dans un futur proche :

- Effet unilatéral complet
 - ▶ Amélioration de la réponse en cisaillement pur
 - ▶ Endommagement anisotrope ? [Kishta, 16]
- Effet de pincement
 - ▶ Conséquence du cisaillement ?
 - ▶ Dégradation de l'interface acier/béton ?



References

Vassaux, M., Richard, B., Ragueneau, F., & Millard, A. (2015). Regularised crack behaviour effects on continuum modelling of quasi-brittle materials under cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 149, 18-36.

Richard, B., Vassaux, M., Ragueneau, F., & Millard, A. (2015). Une nouvelle loi constitutive pour la description du comportement cyclique des matériaux quasi-fragiles: effet unilatéral régularisé et effets hystérétiques. *S25 Réponses des matériaux et des structures de Génie Civil aux sollicitations sévères. Congrès Français de Mécanique*, Lyon, France.

Vassaux, M., Ragueneau, F., & Millard, A. (2015). A robust and efficient 3d constitutive law to describe the response of quasi-brittle materials subjected to reverse cyclic loading: formulation, identification and application to a RC shear wall. In *COMPLAS XIII: proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity: fundamentals and applications* (pp. 550-561). CIMNE.

Postdoc needed (12 mois)
CEA Paris-Saclay, France

Contact : Benjamin.Richard@cea.fr

www.cea.fr

Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
Centre de Saclay - 91191 Gif sur Yvette Cedex
T. +33 (0)1 69 08 76 74 - F. +33 (0)1 69 08 83 31
Etablissement public à caractère industriel et commercial
RCS Paris B 775 685 019

Direction de l'Energie Nucléaire
Département de Modélisation des Systèmes et des Structures
Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques
Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique