

Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil des installations nucléaires françaises

Aya RIMA¹

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMT - Laboratoire de Mécanique et Technologie, 91190, Gif-sur-Yvette, France.

RESUME Les systèmes d'ancrage chevillé sont utilisés pour assurer la fixation de nombreux EIP (Eléments Importants pour la Protection) dans les installations nucléaires françaises. L'évaluation du comportement des ancrages existants représente un enjeu majeur pour la sûreté notamment en cas de séisme. Il est proposé d'utiliser un modèle particulaire-lattice pour étudier le comportement des fixations sous différents chargements. Au cours de cette thèse, plusieurs développements numériques ont été réalisés dans ce code d'éléments discrets. Une méthode de génération du maillage, adaptée au cas complexe des ancrages, est proposée et une approche simplifiée pour la détection du contact entre l'acier et le béton en 2D et en 3D est mise en œuvre pour améliorer les temps de calcul. Ensuite, en se basant sur ces simulations discrètes ainsi que sur des résultats expérimentaux, un modèle simplifié utilisant des variables généralisées est développé pour représenter le comportement non-linéaire de l'ancrage.

Mots-clefs Fixation, Modèle d'éléments discrets, Maillage, Contact, Macroélément.

I. INTRODUCTION

Afin de prédire la résistance des chevilles existantes ou futures, il est nécessaire de mieux simuler le comportement mécanique des éléments de fixation. Généralement, l'étude du comportement des ancrages dans le béton se fait par des campagnes expérimentales. Pourtant, elles sont coûteuses et limitées par le nombre d'essais réalisés. Récemment, la simulation numérique est devenue de plus en plus utile dans le domaine des systèmes de fixation. Elle est utilisée pour envisager une meilleure compréhension des mécanismes de rupture. De plus, ces simulations permettent de réduire potentiellement le nombre, la durée et le coût des essais ainsi que d'évaluer les réponses sous chargements complexes hors d'atteinte des capacités expérimentales disponibles usuellement. La méthode la plus utilisée pour réaliser des modèles numériques d'essais d'ancrage est la modélisation par éléments finis. Cette modélisation vise à reproduire de manière réaliste le comportement des fixations. Mais les études numériques continues ne permettent pas de représenter tous les mécanismes liés à la fissuration.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer le comportement des fixations présentes dans les ouvrages des installations nucléaires. L'approche scientifique consiste à utiliser deux modèles : un premier à l'échelle de l'ancrage, où la fissure sera explicitement reproduite, et un deuxième à l'échelle de la

structure, où un macroélément sera développé. L'identification du macroélément repose sur la réponse expérimentale virtuelle obtenue par l'analyse discrète.

La présentation des résultats est organisée comme suit : Dans la partie II, le principe du modèle particulaire-lattice est présenté. Ensuite, un nouvel algorithme pour générer un maillage discret en 3D et une méthode de détection du contact sont proposés. Un essai d'arrachement d'un goujon installé dans le béton est présenté dans la partie III. Un macroélément est formulé dans la partie IV permettant de représenter correctement le comportement des ancrages sous chargement statique et cyclique.

II. Modèle Particulaire-Lattice (DEAP)

A. Principe du modèle discret

Le modèle discret « DEAP » utilisé dans ce travail est initialement proposé par (Delaplace, 2008) pour étudier le comportement mécanique des matériaux quasi-fragiles. Ce modèle combine l'approche particulaire (Cundall et Strack, 1979) et l'approche Lattice (Hrennikoff, 1941) afin de représenter explicitement les différents mécanismes associés à la fissure : initiation, propagation, refermeture et frottement. Une extension de ce modèle a été développée par (Vassaux et al., 2016). Le milieu continu est représenté par un ensemble de particules polyédriques rigides reliées entre elles par un réseau de poutres d'Euler-Bernoulli assurant la transmission des interactions cohésives entre les particules (Fig 1(a)). Chaque poutre est caractérisée par sa longueur l_b , sa section A_b , son module d'Young E et son coefficient d'inertie $\alpha = 64 * \frac{l_b * \pi}{A_b^2}$. Les deux premiers paramètres varient avec la géométrie et les deux derniers sont égaux pour toutes les poutres.

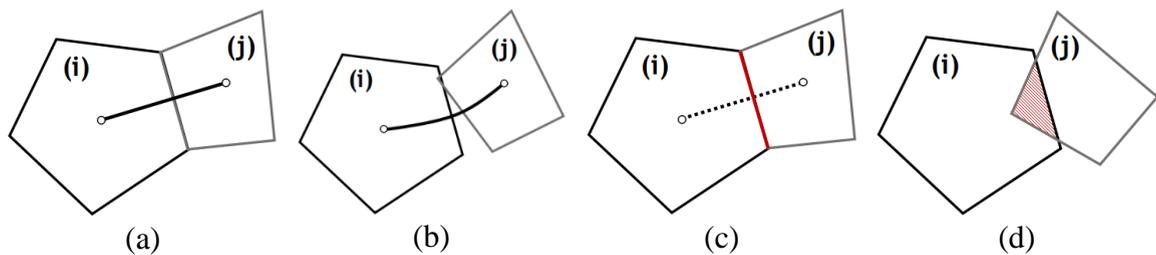


FIGURE 1. Principe de DEAP (a) Deux particules liées par une poutre (b) Poutre déformée (c) Rupture de la poutre (d) Deux particules en contact

Un critère de rupture P_{ij} est associé à chaque poutre. Ce critère s'écrit en fonction de l'extension axiale ε_{ij} et des rotations θ_i et θ_j de la poutre.

$$P_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_{ij}^{cr}} + \frac{|\theta_j - \theta_i|}{\theta_{ij}^{cr}} \geq 1$$

Où les paramètres ε_{ij}^{cr} et θ_{ij}^{cr} représentent, respectivement, les limites d'extension et de rotation de la poutre. Une distribution de Weibull est associée à ces deux seuils de rupture pour représenter un comportement quasi-fragile. Lorsque le critère de rupture P_{ij} entre deux particule i et j est atteint, la poutre se casse et n'est plus prise en compte. Par conséquent, une microfissure apparaît sur le côté commun des deux particules concernées (Fig. 1(b), (c)). Lors d'un chargement cyclique, la

fermeture des fissures engendrent la transmission d'efforts de contact normaux et tangentiels qui peuvent conduire à de nouvelles dégradations (Fig. 1(d)).

B. Génération d'un maillage 3D pour des géométries complexes

Le milieu est décrit comme un ensemble de particules polyédriques irrégulières reliées entre elles par des poutres. Suivant la proposition de (Moukarzel et al., 1992), ces éléments sont générés à l'aide de deux opérations : la triangulation de Delaunay pour la génération du réseau de poutres et la tessellation de Voronoi pour remplir le volume par des particules polyédriques. Les deux opérations sont basées sur la génération aléatoire d'un ensemble de points à l'intérieur de la géométrie. Ces points représentent les sommets des triangles de Delaunay et les centres des particules. Des points supplémentaires sont ensuite placés à l'extérieur de la géométrie pour générer correctement les bords. Plusieurs méthodes ont été proposées pour le positionnement des points à l'intérieur et à l'extérieur de la géométrie. Cependant, elles ne permettent pas la représentation de géométries tridimensionnelles complexes présentant des surfaces droites et courbes, des angles non-orthogonaux ou des trous.

Dans le cadre de cette étude, une méthode pour générer un maillage tridimensionnel par éléments discrets est proposée. La méthode consiste à transformer un maillage éléments finis tétraédrique en un maillage polyédrique associé à un réseau de poutres (Fig 2). L'utilisation d'un maillage tétraédrique permet de bénéficier des nombreux développements déjà réalisés dans les logiciels de maillage éléments finis. Les coordonnées de tous les points sont exportées du maillage tétraédrique et les indices des points des coins, des arêtes et des triangles des surfaces sont listés. Différentes techniques de génération sont utilisées en fonction de la position des points (sur un coin, un côté, une surface ou à l'intérieur du volume).

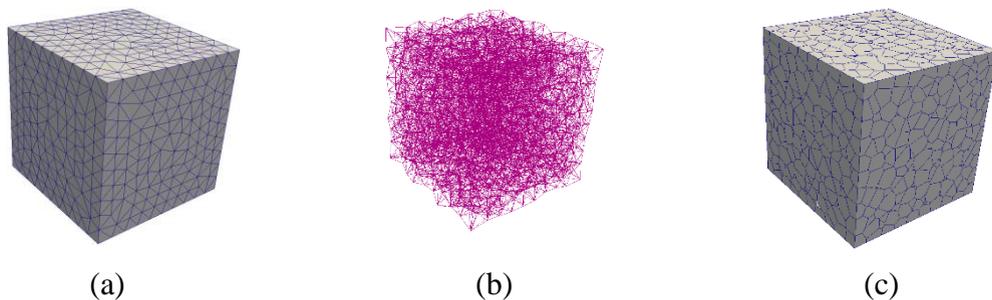


FIGURE 2. Maillage (a) EF (b) éléments discrets : Réseau des poutres (c) éléments discrets

Nous verrons sur l'exemple du goujon que ce nouveau maillage est adapté pour représenter des géométries tridimensionnelles complexes.

C. Détection du contact

La détection du contact est une étape nécessaire pour pouvoir traiter l'interaction entre l'ancrage et le béton. Une technique robuste et efficace basée sur la méthode des multi-sphères est proposée. Lors de la génération du maillage, un ensemble de sphères est associé à chaque particule. Elles

seront ensuite utilisées pour détecter le contact entre les particules. La technique de remplissage des sphères est inspirée de la méthode sphère-polyèdre (Alonso-Marroquin, 2008).

Prenons l'exemple de deux particules 1 et 2 voisines et pouvant entrer en contact. Supposons que « s » est un élément de contact associé à la particule 2 et que « f » est une facette appartenant à la particule 1 (Fig. 3(a)). La sphère « s » de la particule 2 est projetée sur la facette « f » de la particule 1 pour générer une sphère fictive « s_p » (Fig. 3(b)). Si le centre de la sphère « s_p » est à l'intérieur de la particule 1 et si la distance entre le centre des deux sphères « s » et « s_p » est inférieure à la somme de leurs rayons, une pénétration est détectée entre les deux particules 1 et 2 et la force de contact résultante est calculée.

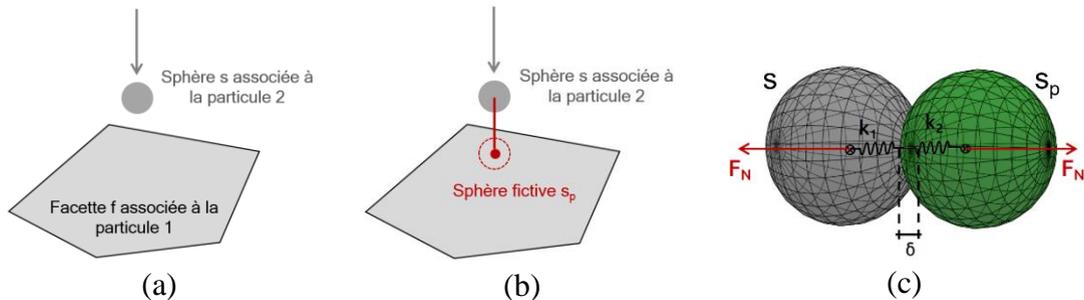


FIGURE 3. (a) Deux particules en contact (b) Projection de s sur f (c) Modèle de contact entre deux sphères

Pour le traitement du contact, une force de contact élémentaire est calculée entre une particule et une sphère, et son orientation est définie par l'inclinaison de la droite formée entre les deux centres des deux sphères « s » et « s_p ». Cette force F_N est proportionnelle à l'interpénétration δ entre les deux sphères et est calculée à l'aide d'un modèle de deux ressorts en série dont les raideurs k_i dépendent des propriétés du matériau E_i, du rayon des sphères et de la longueur l_{eq} entre les centres des deux particules (Fig. 3(c)).

$$k_1 = \frac{8 E_i r_i^2}{l_{eq}} \quad F_N = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \delta$$

La force de contact normale résultante entre deux particules correspond à la somme des forces de contact élémentaires.

III. Application sur des goujons

L'objectif de cette partie est d'étudier le comportement des goujons en utilisant la version 3D du modèle discret DEAP et de démontrer l'efficacité de la méthode de maillage et de l'algorithme de détection de contact proposés. Un essai d'arrachement d'un goujon de 20 mm de diamètre ancré dans une dalle de béton est modélisé.

Dans cette analyse, la géométrie complète a été simulée et, du fait de l'hétérogénéité du matériau, aucune symétrie n'a été adoptée. Le béton et l'ancrage sont discrétisés avec des éléments indéformables de forme polyédrique, en utilisant la méthode de maillage proposée dans la section II.B (Fig. 4). La profondeur h_{ef} de pénétration de l'ancrage dans le béton est égale à 100 mm. Le béton est de forme cylindrique de dimensions H = 25 cm et D = 6* h_{ef}. Ce dernier a été supposé non renforcé. La procédure proposée montre sa capacité à mailler des géométries complexes telle

que la dalle de béton trouée et le goujon (Fig. 4). On remarque que des surfaces lisses sont assurées, ce qui évitera le frottement indésirable entre le goujon et le béton.

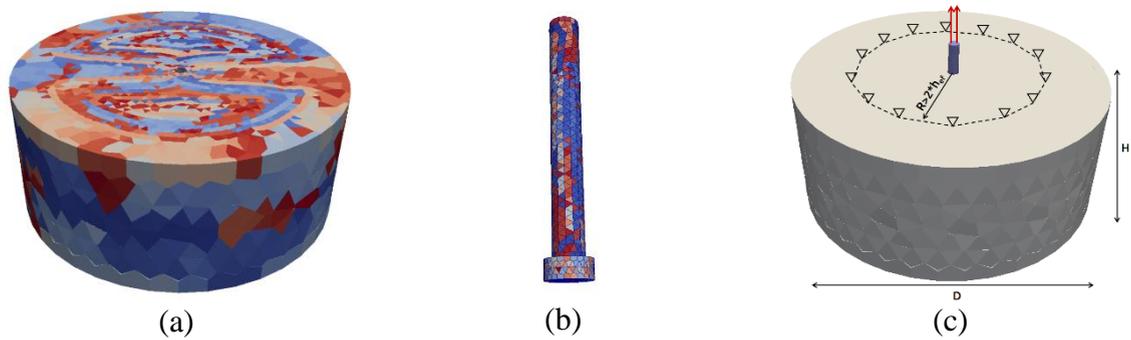


FIGURE 4. Maillage du (a) béton (b) goujon M20*160 (c) Conditions aux limites

Comme mentionné précédemment, un déplacement uniaxial quasi-statique est imposé sur la partie supérieure de la tige du goujon. Au niveau du béton, le déplacement vertical est bloqué à une distance égale à $2 \cdot h_{ef}$ (Fig. 4 (c)) pour représenter le support installé au-dessus de la dalle pendant les essais expérimentaux.

Pour cet essai d'arrachement, le contact entre le goujon en acier et le béton n'existe qu'au niveau de la surface inférieure du trou du béton et la surface supérieure de la tête du goujon. De cette manière, l'effort de traction sur l'ancrage est transféré au béton. En revanche, les forces de contact tangentielles dues au frottement sont supposées être négligeables car l'ancrage a été huilé avant d'être coulé pour éviter l'adhésion. Pour la même raison, le contact entre la tige de l'ancrage et le béton est empêché en ajoutant un jeu de 1 mm sur toute la longueur de l'ancrage.

Dans la modélisation, l'acier est supposé indéformable et les paramètres utilisés pour le béton sont résumés dans le tableau 1. Ces paramètres ont été identifiés en suivant la procédure proposée en 2D dans (Vassaux et al., 2016).

TABLEAU 1. Identification des paramètres locaux du béton

E (GPa)	α	λ_{ecr}	$\lambda_{\theta cr}$	k
49	0.75	$5.5e^{-4}$	$6e^{-4}$	0.8

Avec λ_{ecr} et $\lambda_{\theta cr}$ les facteurs d'échelle et k le facteur de forme de la distribution de Weibull.

Après l'application du déplacement, l'initiation de la fissure a lieu à la limite de la zone de contact entre l'acier et le béton. La fissure se propage ensuite vers la surface supérieure et forme un cône dans le béton autour de la tête du goujon. Suite à la formation du cône, des fissures en forme de croix apparaissent à la surface du béton. Ces fissures radiales sont dues aux fortes contraintes de traction exercées sur la dalle afin de pouvoir arracher le cône de béton. La figure 5 montre le faciès de fissures obtenu où un cône de béton est formé avec un angle de propagation de la fissure approximativement égal à 30° . Cet angle d'inclinaison mesuré par rapport à l'horizontal est proche de la valeur attendue de 32° (Eligehausen et al. 2006).

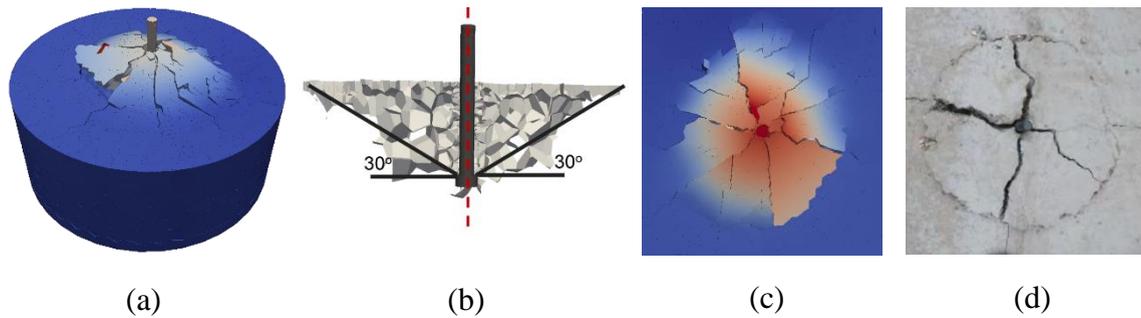


FIGURE 5. (a) Champs de déplacement du béton, (b) Cône de béton, Fissures radiales (b) DEAP, (c) Essai

IV. Proposition d'un macroélément

L'objectif final de ces travaux est d'obtenir un macroélément permettant de représenter de manière simplifiée le comportement des ancrages sous différents types de chargements. Ce modèle simplifié sera à terme implémenté dans un code d'éléments finis pour traiter le comportement global d'une structure et des EPI associés lors de séismes.

Nous nous intéressons dans un premier temps au cas de chargement d'arrachement uniaxial en proposant une loi reliant la force F et le déplacement U . Le modèle est basé sur un couplage entre l'élasticité, l'endommagement, la plasticité et le frottement afin de prendre en compte les différents phénomènes physiques intervenant lors du chargement. Le déplacement macroscopique U est considéré comme une variable observable. Une variable scalaire interne D représentant l'endommagement dans le béton est introduite. Pour représenter les irréversibilités liées au frottement acier-béton et à la déformation plastique entre la rondelle et le béton, une variable plastique U_p est utilisée. De même, un mécanisme dissipatif est ajouté au modèle pour prendre en compte le glissement et le frottement au niveau des fissures dans le béton. Ce mécanisme est introduit par une variable interne U_π représentant le déplacement lié au frottement.

A. Potentiel d'état et lois d'état

Le potentiel d'état est l'énergie libre d'Helmholtz ψ . Cette énergie doit inclure tous les mécanismes dissipatifs. Elle dépend des variables internes du modèle. L'expression de cette énergie est donnée par :

$$\rho\psi = \frac{1}{2} * K * (1 - D) * (U - U_p)^2 + \frac{1}{2} * K * g(d) * (U - U_\pi)^2 + H(z) + G(p) + X(\alpha)$$

Dans cette équation, K est la rigidité élastique initiale, D est l'endommagement, U_p et U_π sont, respectivement, le déplacement plastique et le glissement, $g(d)$ est un paramètre quantifiant le couplage entre l'endommagement et le frottement, $H(z)$ est l'écroutissage isotrope lié à l'endommagement, $G(p)$ est l'écroutissage isotrope linéaire associé à la plasticité et $X(\alpha)$ est l'écroutissage cinématique appliqué au frottement.

Les lois d'état sont déduites de l'expression de l'énergie libre $\rho\psi$. On en déduit alors :

$$F = \rho \frac{d\psi}{dU} = K * (1 - D) * (U - U_p) + K * g(d) * (U - U_\pi)$$

$$Y = \rho \frac{d\psi}{dD} = \frac{1}{2} * K * (U - U_p)^2; Z = \rho \frac{d\psi}{dz}; R = \rho \frac{d\psi}{dp}; X = \rho \frac{d\psi}{d\alpha}$$

Avec F la force totale, Y le taux de restitution de l'énergie et Z , R et X les fonctions des variables d'écroutissage associées, respectivement, à l'endommagement, à la plasticité et au frottement.

B. Fonctions seuils et lois d'évolution

Des fonctions seuils sont introduites pour définir le domaine d'élasticité du matériau.

L'endommagement du béton est défini par deux variables scalaires D et z . La fonction seuil en énergie est définie par :

$$f_d = Y - Z - Y_0$$

Avec Y_0 le seuil initial en énergie de l'endommagement.

La loi d'évolution de l'endommagement utilisée suit celle proposée par (Laborderie, 1991) :

$$d = 1 - \frac{1}{1 + p * (Y^d - Y^0)^q}$$

Avec p et q représentent la forme de l'évolution de l'endommagement.

Les phénomènes irréversibles liés à l'écrasement au niveau de la tête du goujon sont introduits dans la plasticité et un écrouissage isotrope linéaire est retenu. Le critère prend la forme suivante :

$$f_p = \tilde{F} - R - F_{y0} \quad \text{avec} \quad \tilde{F} = \frac{F}{1-D}$$

L'évolution du déplacement plastique U_p dépend de l'endommagement d , de la raideur élastique K_0 et du taux d'écrouissage H lié à la plasticité.

Un mécanisme dissipatif est introduit pour représenter le frottement dans le béton lors de la refermeture des fissures. Il permet de reproduire les boucles d'hystérésis pendant les cycles de charge et de décharge. Un écrouissage cinématique est pris en compte en introduisant deux paramètres α et β qui contrôlent les boucles d'hystérésis. La fonction seuil considérée est présentée dans la thèse de (Nguyen, 2012).

Par conséquent, sept paramètres sont pris en compte et doivent être identifiés à l'aide des essais expérimentaux et des résultats obtenus par le modèle particulaire-lattice « DEAP ».

C. Validation du modèle

Afin de valider le macroélément proposé sous chargement statique et cyclique, une comparaison des courbes force-déplacement obtenues expérimentalement et numériquement est réalisée. Le macroélément parvient à reproduire la courbe expérimentale, notamment la partie pré-pic et le pic et une bonne représentation est observée (Fig. 6). Par conséquent, la formulation du macroélément est validée et est capable de reproduire la réponse de l'ancrage sous chargement monotone et cyclique.

Après la réalisation des études paramétriques pour identifier les paramètres du modèle, les valeurs retenues sont présentées dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Paramètres du modèle

K_0 (N/m)	Y_0 (N.m)	p (1/N)	q (-)	H (N/m)	α (1/N)	β (N/m)
$2 \cdot 10^8$	4	$1.4 \cdot 10^{-2}$	1.8	$7 \cdot 10^8$	0.0004	$2 \cdot 10^7$

V Conclusion

Les travaux de thèse ont comme but d'évaluer le comportement des ancrages sous chargement statique et sismique. Des développements numériques importants ont été réalisés dans le code particulaire-lattice DEAP pour améliorer le générateur de maillage et permettre la prise en compte du contact dans le cas 3D. Grâce à ces développements, le modèle discret est maintenant un outil approprié pour étudier le comportement des ancrages dans le béton. Une bonne compréhension des différents mécanismes est assurée et le développement de la fissure jusqu'à la rupture est

capturé. Les simulations discrètes sont utilisées pour proposer un macroélément en variables généralisées et à terme serviront à l'identifier. Le but de ce macroélément est de modéliser le comportement complexe des ancrages sous chargement sismique de manière simplifiée tout en assurant l'efficacité et en réduisant le temps de calcul.

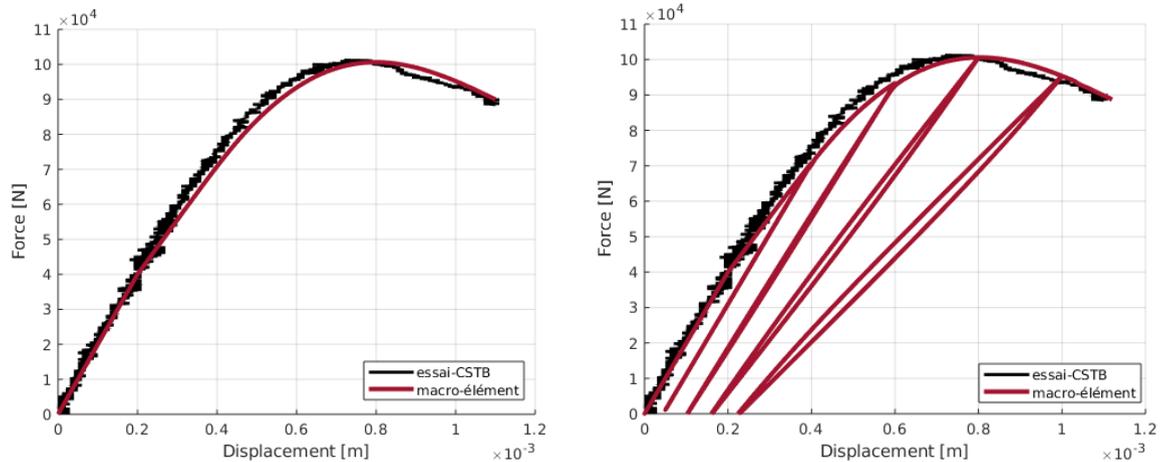


FIGURE 6. Comparaison des courbes obtenues expérimentalement et par le macroélément : essai (gauche) monotone (droite) cyclique

REFERENCES

- A. Delaplace (2008), Modélisation discrète appliquée au comportement des matériaux et des structures. *Mémoire HDR de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*.
- M. Vassaux, C. Oliver-Leblond, B. Richard, and F. Ragueneau. (2016) Beam-particle approach to model cracking and energy dissipation in concrete: Identification strategy and validation. *Cement and Concrete Composites*, 70:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.011>
- F. Alonso-Marroquin. (2008). Spheropolygons: A new method to simulate conservative and dissipative interactions between 2D complex-shaped rigid bodies. *EPL (Europhysics Letters)*, 83(1), 14001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/83/14001>
- C. Laborderie. (1991) Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : modélisation et application à l'analyse de structure en béton. *Thèse de doctorat, Université de Paris 6*.
- C. Moukarzel, and H.J. Herrmann (1992). A vectorizable random lattice. *Journal of Statistical Physics*, 68(5), 911-923.
- T. H. Nguyen. (2012). Analyses du comportement de rupteurs thermiques sous sollicitations sismiques. *Thèse de doctorat, école normale supérieure de Cachan*.
- P.A. Cundall and O.D.L. Strack. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 29(1): 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- A. Hrennikoff. (1941). Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method. *Journal of Applied Mechanics* 8(4): A169-A175. <https://doi.org/10.1115/1.4009129>
- E. Eligehausen, R. Mallee, and J. Silva (2006). Anchorage in concrete construction, Ernst and sohn, berlin.