

DIMENSIONNEMENT DES ANCRAGES PASSIFS SCELLÉS - APPORT DE L'OPTIMISATION PARAMÉTRIQUE DES ESSAIS D'ARRACHEMENT

Yannick FARGIER¹, Jean-Pierre RAJOT¹, Patrick JOFFRIN¹, Jean DE SAUVAGE¹, Ghida HAWWA¹

¹ Université Gustave Eiffel, GERS/RRO, Bron, France

RÉSUMÉ – Les ancrages passifs scellés au rocher, utilisés pour fixer les ouvrages de protection et renforcer les massifs, sont essentiels pour l'aménagement du territoire. Un code de modélisation numérique en éléments finis et un code d'optimisation paramétrique (résolution du problème inverse) ont été développés pour améliorer l'interprétation d'essais d'arrachement des ancrages passifs et ainsi optimiser leur dimensionnement.

ABSTRACT – Rock-bolts, used to secure protective structures and reinforce rock masses, are essential for territorial development. A finite element numerical modeling code associated with a parametric optimization code (inverse problem resolution) have been developed to enhance the interpretation of passive anchor pull-out tests and optimize their design. This paper focus on the theoretical and practical resolution of the inverse problem.

1. Introduction

Plusieurs évènements récents ont mis en évidence l'aspect critique du dimensionnement et de la surveillance des ouvrages de protection vis-à-vis des instabilités gravitaires telles que les glissements de terrain et les chutes de blocs. Ils ont également sensibilisé les autorités publiques et les gestionnaires à l'importance d'adopter une approche de maintenance plus systématique pour les infrastructures (Hiker et al., 2009).

Les ancrages passifs scellés au rocher sont des équipements largement utilisés depuis plus de 50 ans pour fixer les ouvrages de protection et/ou renforcer les massifs en place (Ho, 2017). Même si ces équipements restent aujourd'hui incontournables, il ne se passe pas une année sans rupture ayant conduit à la ruine de l'ouvrage (Cerema, 2017). Avec aujourd'hui plusieurs centaines de milliers d'ancrages installés chaque année en France, l'enjeu est une priorité pour de nombreux acteurs tels que les gestionnaires d'infrastructures de transport (SNCF, DIR, Conseils Départementaux, Sociétés d'autoroutes...).

Parmi les outils et méthodes à disposition, les essais d'arrachement en traction sont conventionnellement réalisés pour le contrôle des ancrages (norme XP P94-444). Ces essais permettent d'évaluer de manière assez directe la capacité de l'ancrage à résister à une certaine valeur d'arrachement axiale à partir des résultats de l'essai (courbe effort déplacement) (Thevenin et al., 2017). Cependant, cette approche ne permet pas d'interpréter de manière fine le comportement de l'ancrage et de celui du sol (la mesure intégrant plusieurs mécanismes internes) (Cao, 2013 ; Ho et al., 2019).

Afin d'améliorer l'interprétation de cet essai et favoriser l'optimisation du dimensionnement des ancrages passifs, un code libre de modélisation numérique en éléments finis a été développé au sein du laboratoire RRO de l'Université Gustave Eiffel (Rajot, 2023). Ce code permet de simuler numériquement la déformation longitudinale d'un ancrage consécutive à une charge statique appliquée en tête, ou en un autre point, tout en tenant compte des caractéristiques mécaniques des milieux encaissants. Afin d'optimiser l'utilisation de cet outil, un second code a été développé impliquant la résolution du

problème inverse permettant de remonter aux caractéristiques des milieux étudiés (Liu et al., 2023).

Ce papier a pour objectif de présenter globalement le code de modélisation et plus précisément le code d'inversion (optimisation paramétrique). Nous évaluons ensuite la sensibilité de cette approche à partir de données acquises lors de plusieurs campagnes. Les données sont acquises sur cinq sites différents présentant un matériau plus ou moins tendre et intégrant plusieurs niveaux de fracturation. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de méthodes d'inversion permet de caractériser plus finement les caractéristiques mécaniques des milieux encaissant même si la problématique de non unicité de la solution reste présente. En perspectives, nous souhaitons tester ces outils numériques sur une plus grande gamme de sites afin d'en évaluer les limites et optimiser le futur dimensionnement des ancrages passifs scellés au rocher.

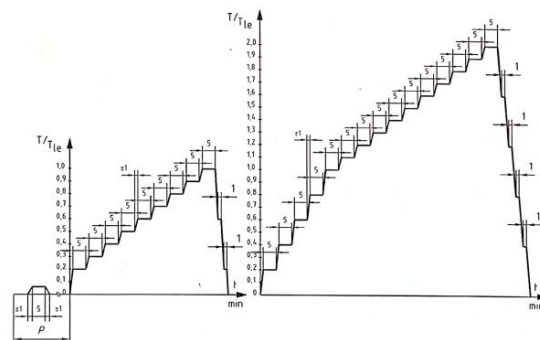
2. Matériels & méthodes

2.1. Essai d'arrachement

L'essai d'arrachement des ancrages passifs scellés au rocher est la méthode la plus couramment utilisée pour évaluer la capacité d'un ancrage (couplage de l'armature, du coulis et du milieu environnant) à reprendre un effort d'arrachement axial. La figure 1.a) présente le matériel d'essai et de mesure utilisés. Pour cet essai, un vérin hydraulique creux est enchâssé sur l'armature (barre) métallique. Le vérin est alors actionné à partir d'une pompe (manuelle ou automatique) permettant d'arracher l'ancrage. Tout au long de l'essai, l'effort appliqué et le déplacement de la tête de l'ancrage sont mesurés. L'effort est mesuré par un capteur de force positionné entre le vérin et l'écrou tandis que les déplacements sont mesurés par un capteur de type magnétostrictif (Lushnikova et al., 2020). Cet essai permet d'extraire la courbe « effort-déplacement » classiquement utilisée pour l'interprétation de l'essai. La figure 1.b) illustre les paliers de chargement à effectuer dans le cadre de la norme XP P94 444 pour obtenir cette courbe.



a)



b)

Figure 1. a) Illustration d'une partie du matériel d'essai et de mesure d'un essai d'arrachement. b) Paliers de chargement en fonction du temps (d'après norme XP P94-444)

2.2. Résolution du problème inverse

La résolution d'un problème inverse, comme son nom l'indique, consiste à réaliser la procédure inverse de la modélisation numérique. Le principe est de pouvoir, à partir de données mesurées (ou synthétiques), remonter aux paramètres mécaniques ou physiques des milieux étudiés. Pour cette application, les données mesurées sont les efforts imposés

et les déplacements en tête d'ancrage. Les paramètres mécaniques investigués et reconstruits sont décrits dans la section 2.3 de cet article.

Le principe de l'inversion consiste à répéter de manière itérative la résolution du problème direct pour converger vers une solution. C'est-à-dire reconstruire le milieu qui explique au mieux des données mesurées. La figure 2 présente le principe général de cet algorithme. La boucle se stoppe lorsqu'un critère de qualité est atteint. Ici, un critère de type erreur absolue (L1) ou quadratique (L2) moyenne entre données mesurées et données calculées est utilisé, doublé d'un critère de nombre maximum d'itération si convergence insuffisante.

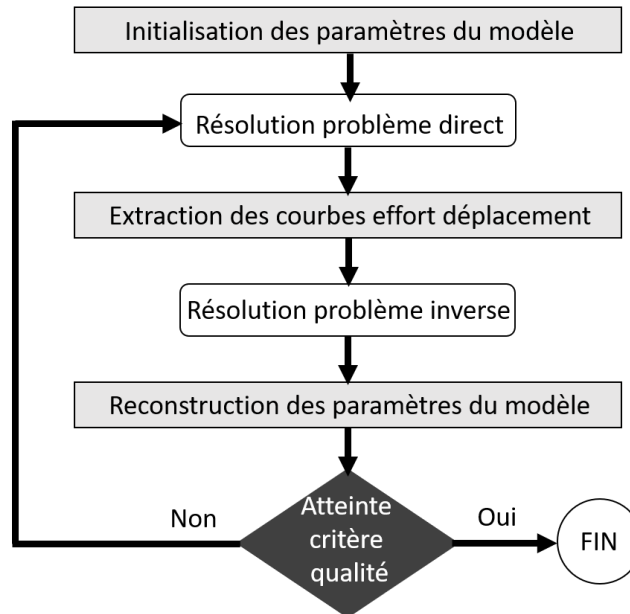


Figure 2. Algorithme général pour l'inversion de données. Rectangles gris : paramètres entrants ou sortants. Rectangles blanc : fonctions.

Afin de converger vers une solution (minimum local) au problème, l'inversion nécessite la définition d'une fonction cout et le calcul d'un certain nombre de paramètres telle que la matrice des dérivés de Fréchet G (Fargier et al., 2017). L'objectif général est de réaliser l'opposé du problème direct formulé à l'équation 1 en linéarisant et en inversant le problème direct.

$$\mathcal{F}(m) = d \quad (1) \quad \rightarrow \quad m = G^{-1} d \quad (2)$$

Avec \mathcal{F} la modélisation numérique d'un milieu m , vecteur composé de M éléments, permettant la génération des données d , vecteur composé de N éléments. Le problème direct est décrit à la section 2.3.

Différentes méthodes peuvent être mises en place pour le calcul des matrices des dérivées de Fréchet tel que l'état adjoint, les équations de sensibilité ou les méthodes de perturbation. Le principe consiste à évaluer chaque dérivée partielle des données (d_j) par rapport aux paramètres du modèle (m_i) tel que présenté à l'équation (3). Pour la méthode par perturbation, l'idée est de très légèrement perturber le modèle et d'évaluer l'effet de cette perturbation sur la mesure (équation 3).

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial m_1} & \frac{\partial d_1}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial d_1}{\partial m_M} \\ \frac{\partial d_2}{\partial m_1} & \frac{\partial d_2}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial d_2}{\partial m_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial d_N}{\partial m_1} & \frac{\partial d_N}{\partial m_2} & \dots & \frac{\partial d_N}{\partial m_M} \end{bmatrix} = \frac{\mathcal{F}_j(m_i^{pert}) - \mathcal{F}_j(m_i^{ini})}{m_i^{pert} - m_i^{ini}} \quad ; j = 1:M \text{ et } i = 1:N \quad (3)$$

Une fois que ces éléments sont établis, la résolution de l'équation normale d'inversion peut se faire via différentes méthodes. Plusieurs approches issues de l'optimisation paramétrique sont employées pour inverser les données : Gradient conjugué, Nelder Mead et quasi Newton. De plus amples informations sur ces algorithmes peuvent se retrouver dans la littérature (Liu et al., 2023).

2.3. Résolution du problème direct

L'algorithme d'inversion repose sur une utilisation itérative d'un code de modélisation numérique permettant de simuler la réponse d'un ancrage passif suite à une sollicitation axiale en tête (arrachement) (Rajot, 2023). Ce logiciel mis librement à disposition de la communauté sur demande repose sur le modèle d'interface proposé par Franck et Zhao (1982). D'après Rajot (2023), ce modèle est défini par deux seuils de cisaillement et trois pentes décrivant la variation de cisaillement par unité de déplacement relatif entre l'inclusion et le terrain. Pour les faibles déplacements relatifs, la rigidité (k) peut être considérée représenter un comportement élastique de l'interface. Le plus faible seuil (q_{sy}) peut être considéré correspondre à la plastification de l'interface avec écrouissage positif, provenant par exemple de la dilatance du sol autour de l'inclusion. L'indice « y » fait référence au mot « yielding », i.e. plastification sans rupture. L'écrouissage positif signifie que la rigidité de l'interface est réduite par rapport au domaine élastique, mais est encore strictement positive : $0 < k_{sy} < k_{se}$. Le seuil le plus élevé (q_{sf}) correspond à la rupture de l'interface. L'indice « f » fait référence au mot « failure », i.e. plastification avec rupture. L'absence d'écrouissage à la rupture signifie que la rigidité de l'interface est alors quasiment nulle : $k_{sy} \approx 0$.

Tel que présenté sur la figure 3.b, ce code de modélisation numérique permet d'évaluer les déplacements sur toute la longueur de l'ancrage en fonction de la charge exercée. On retrouve ainsi, la décroissance exponentielle classique tant que le comportement reste élastique. Ensuite, un couplage entre élasticité et plasticité se met en place, à 100 et 150 kN, jusqu'à arriver à la rupture de l'interface vers 250 kN (pour le milieu simulé). L'intégration de ces déplacements permet l'évaluation du déplacement en tête de barre, équivalent au paramètre de déplacement mesuré sur le terrain.

Plusieurs matériaux peuvent être intégrés en fonction de la longueur de l'ancrage permettant à la fois de simuler des terrains fracturés et/ou de simuler des milieux bi-couches ou multi-couches. Ainsi pour un milieu composé de N couches, $N*5$ paramètres devront être inversés par l'algorithme d'inversion. Pour assurer une bonne détermination du problème inverse, un maximum d'information doit être employé. Pour cela, nous utilisons toutes les données issues de la phase ascendante de la courbe effort-déplacement obtenue en continue. La qualité de reconstruction dépend ainsi des paliers atteints lors de l'essai (20 paliers réalisés dans le cadre des essais présentés dans cet article).

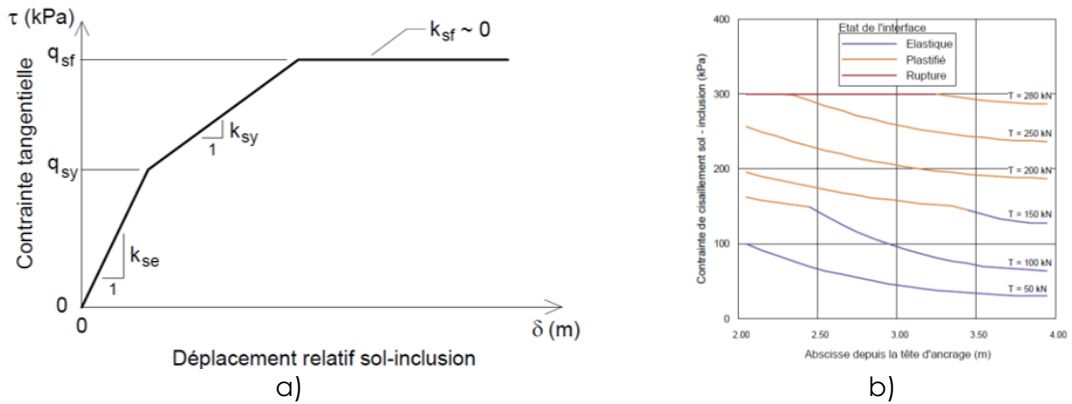


Figure 3. a) Représentation locale du frottement à l'interface entre l'inclusion et le terrain. b) état de l'interface le long de l'armature à différents niveaux de chargement. D'après Rajot (2023).

3. Résultats et interprétation

3.1. Cas d'études & protocole d'essai

La méthodologie décrite dans la section 2 est appliquée à un jeu de données acquises sur différentes lithologies. La figure 4 illustre deux des cinq milieux étudiés dans le cadre de ces campagnes de mesure (Lushnikova et al., 2020). Pour chacun de ces sites, six à sept ancrages sont réalisés et implantés de manière normale à la falaise.



Figure 4. a) cinquième site étudié avec matrice hétérogène à faible caractéristiques mécaniques (molasse). b) Troisième site étudié composé de roches carbonatées compétentes fortement fracturées.

La figure 5 schématise les caractéristiques communes des ancrages réalisés : armatures de 3 m de long ; forages de 2 m de profondeur ; 1 m scellé à partir du fond ; 2 m de longueur libre dont 1 m dans le rocher. Le paramètre B décrit le diamètre de la barre étudié tandis que le paramètre H représente le diamètre de forage.

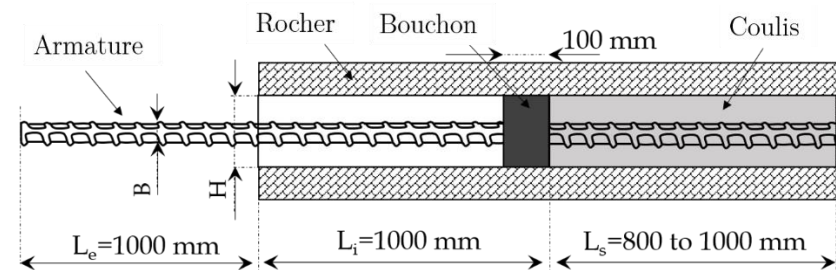


Figure 5. Schéma de réalisation des ancrages passifs testés.

Le tableau 1 synthétise le plan d'expérience utilisé avec les différents diamètres d'armature et forage testés.

Table 1 Plan d'expérience

#	H (mm)	B (mm)	Espacement du filetage (mm)	Rupture en traction de l'armature (kN)
T1	57	25	12.5	270
T2	64	25	12.5	270
T3	76	32	16	442

La figure 6 présente à titre d'illustration les courbes type effort déplacement obtenues pour le site 5.

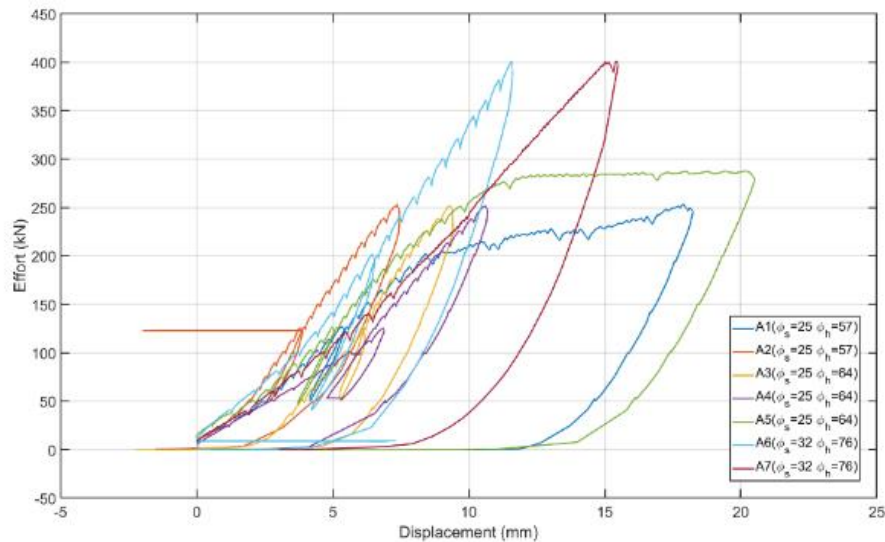


Figure 6. Courbes type effort-déplacement en tête site 5.

3.2. Résultats

La figure 7 présente deux résultats de convergence de l'inversion. Pour chaque cas étudié, un modèle initial *a priori* éloigné des mesures terrain est sélectionné pour ne pas favoriser les résultats. La courbe noire représente les données brutes mesurées. A noter, ces données sont filtrées pour l'inversion. Pour exemple, la dernière phase (relâchement des efforts) n'est pas prise en compte dans les calculs. La courbe bleue illustre la courbe type effort déplacement induite par le modèle initial. La courbe violette représente le résultat à l'itération 1. La courbe rouge représente le résultat final d'inversion à l'itération 5. Chaque inversion permet de diviser par 30 l'erreur RMS avec une erreur finale inférieure à 5%. Cette erreur faible permet de témoigner de la qualité de la convergence.

Pour le 1^{er} résultat, l'inversion permet de bien reconstruire le comportement « bilinéaire » de l'ancrage. Dans le second cas, la sollicitation n'ayant pas atteint la plasticité de l'ancrage seul un comportement linéaire est reconstruit. Ce second résultat permet de faire ressortir un des aspects complexes de l'inversion automatique des données. En effet, le modèle cherchera nécessairement à reconstruire un modèle à 5 paramètres, même si, ici, un seul paramètre est nécessaire pour expliquer ce résultat. De plus, il est possible d'observer un raidissement de la pente vers 9 mm de déplacement. Ce comportement ne peut être pris en compte physiquement par le modèle de Frank et Zhao (1982).

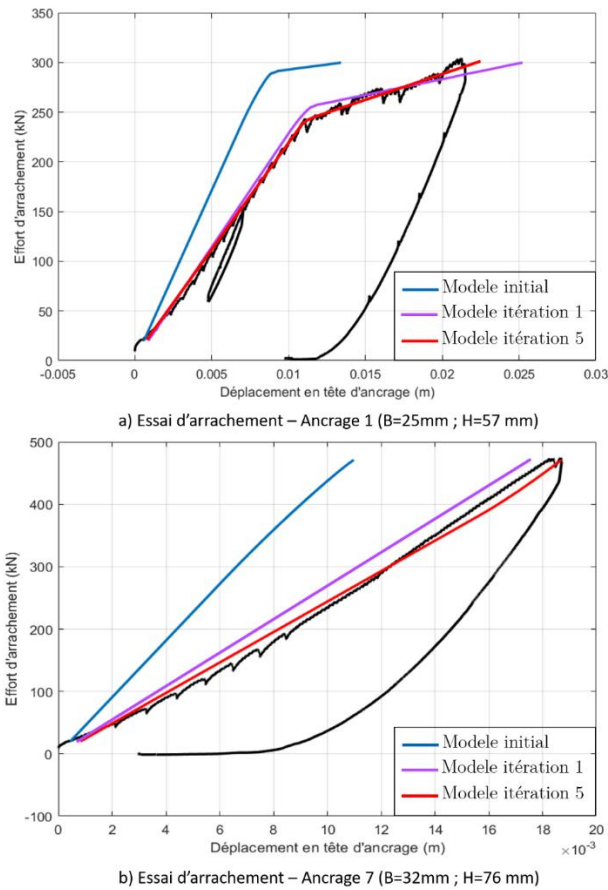


Figure 7. Courbes type effort-déplacement en tête.

3.3. Discussion des résultats

La méthodologie de traitement des données que nous proposons présentent plusieurs limitations. Elle se base tout d'abord sur un modèle simplifié de comportement à l'interface et ne peut permettre une interprétation plus poussée que ne permet ce modèle. Deuxièmement, seules des mesures « externes » sont inversées. Le problème inverse étant mal posé et sous déterminé, même s'il peut paraître sur-déterminé (plus de données que de paramètres à inverser), une infinité de solutions équivalentes peuvent exister. C'est le principe de non unicité de la solution. La seule connaissance de données extérieure (ici la courbe type effort déplacement) ne permet pas de qualifier la présence de fractures internes sans autre information *a priori*. Les paramètres mécaniques inversés des différents sites étudiés restent à chaque cohérent vis-à-vis des valeurs théoriques des matériaux en place. Un détail des paramètres inversés par lithologie étudiée sera présenté à l'oral. A ce titre, les paramètres intrinsèques du forage (B, H ou la limite élastique de l'acier) étant pris de manière explicite dans le problème direct, ils n'influencent pas de manière prépondérante le résultat de l'inversion lorsque les paliers « hauts » sont bien atteints.

4. Conclusions & Perspectives

Pour permettre une interprétation structurale plus fine issue des d'essais d'arrachement, un code de modélisation numérique et d'inversion ont été adaptés pour inverser des données. Bien que cette approche soit plus fine et plus robuste, cette approche nécessite un prétraitement assez lourd des données. De plus cette approche se heurte au phénomène de non unicité de la solution notamment si un milieu multicouche doit être reconstruit. Pour s'affranchir de cette problématique de sous détermination du problème

inverse, nous envisageons l'intégration de mesures par fibre optique à inverser. Enfin, nous espérons également pouvoir étendre cette analyse à de plus nombreux cas d'étude et d'autres technologies de renforcement linéique (pieux).

5. Références bibliographiques

- Cao C., Nemcik J., Aziz N, Ren T. (2013). Analytical study of steel bolt profile and its influence on bolt load transfer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 60, 188–95.
- Chen Y. Experimental study and stress analysis of rock bolt anchorage performance. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 6, 428–37.
- Das K, Sekhar GPR, Deb D, Narang A. Analytical Model for Fully Grouted Rock Bolts with Multiple Joints, *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*; 2015.
- Fargier, Y., Antoine R., Dore L., Lopes S., et Fauchard C. (2017). 3D Assessment of an Underground Mine Pillar by Combination of Photogrammetric and Geoelectric Methods. *Geophysics*. Vol. 82(4), E143-53.
- Frank R., Zhao S.R., (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bulletin de liaison Labo Ponts et Chaussées*, vol. 154, 17-24.
- Guide Cerema. 2017. Protection contre les instabilités rocheuses - Dimensionnement et exécution des boulons. Collections reference. 60 p.
- Hilker N., Badoux A., Hegg C. 2009. The Swiss flood and landslide damage database 1972-2007 ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, 913-25.
- Ho D.A (2017). Comportement axial des ancrages passifs scellés au rocher : étude de l'interface barre-scellement et modélisation. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon. 375 p.
- Ho D.-A., Bost M., Rajot J.-P. (2019). Numerical Modeling of Brittle Materials by Damage Plasticity Model: Determination of Parameters with Consideration of Size Effects Due to Tensile Cracking and Compressive Crushing. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 62, 1065-1071.
- Liu X., Liu Y., Li X., Yang Z., Jiang S. (2023). Efficient adaptive reliability-based design optimization for geotechnical structures with multiple design parameters, *Computers and Geotechnics*, Vol. 162, 105675,
- Lushnikova A., Joffrin P., Pruvost C., Bost M., Khadour A., Sedoud W, Forest O, Robit P., Fargier Y. (2020). Apport de la fibre optique pour l'étude des ancrages passifs scelles au rocher en milieu fracturé. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*. 02-03 novembre 2020. Lyon, France.
- Norme XP P94-444 (2022). Roches - Essai statique d'arrachement, sous un effort axial de traction, d'un ancrage scellé dans un massif rocheux - Essai par paliers. Norme AFNOR. 10 p.
- Rajot J.P. (2023). Programme ANCRAGE : Analyse de l'interaction axiale des ancrages et autres inclusions linéiques dans les sols et les roches. Version 1.0. Manuel utilisateur. 48 p.
- Thenevin T, Blanco-Martín L., Hadj-Hassen F., Schleifer J., Lubosik Z., Wrana A. (2017). Laboratory pull-out tests on fully grouted rock bolts and cable bolts: Results and lessons learned, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 9(5), 843-855.