

Analyse expérimentale et numérique de la dynamique d'arbres verts de petits diamètres soumis à l'impact d'un bloc rocheux

D. BERTRAND^a, F. BOURRIER^b, M. BRUN^a, F. BERGER^b

a. Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIE) - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), Site Coulomb 2, 69621 VILLEURBANNE

b. Cemagref – UR EMGR, 2 rue de la papeterie, 38402 St Martin d'Hères

Résumé :

Afin de mieux comprendre le rôle de protection des forêts de montagne contre les chutes de blocs, un modèle d'impact d'un bloc sur une tige de bois vert est proposé. Ce dernier est basé sur une modélisation par éléments finis (MEF) développée à partir du code libre CAST3M. Pour décrire l'interaction bloc/arbre, la cinématique et les phénomènes dissipatifs au cours de l'impact, les non-linéarités géométriques, matérielles et de contact sont prises en compte. En particulier, un algorithme de gestion du contact tige/bloc, basé sur la méthode des éléments discrets (MED), a été développé. La calibration est faite à partir d'essais d'impact à l'aide d'un pendule de Mouton-Charpy instrumenté. L'objectif de cette étude est de quantifier les échanges énergétiques et les modifications de la cinématique du bloc lors de l'impact, données très utiles pour prédire la trajectoire de blocs rocheux se propageant le long d'un talus boisé.

Abstract :

To better understand the protection function of forests against rockfall in mountainous areas, a model of the impact of a rock on fresh stem is proposed. The latter is based on a finite element model developed using the open source code CAST3M. Geometric, material and contact nonlinearities are taken into account to describe several physical aspects during the impact such as the rock/tree interaction, the stem kinematic and the dissipative processes. Especially, a contact algorithm has been developed and is based on the discrete element method. The calibration is carried out from experimental impact tests using an instrumented Charpy's pendulum. The goal of this research study is to quantify the energy transfers and rock's kinematics variations during the impact. These latter data are very useful to predict the rock trajectories along a forested slope.

Mots clés : Risques naturels, Chutes de blocs, Essais dynamiques, Couplage éléments finis/discrets, Bois vert.

1 Introduction

En raison de l'accroissement de l'urbanisation des zones montagneuses, un nombre croissant d'enjeux est exposé aux risques naturels ce qui nécessite de proposer des solutions pour assurer leur protection. Les risques naturels de montagne sont multiples (avalanches de neige, glissements de terrain, coulées boueuses, chutes de blocs, etc.). Cette étude porte sur les chutes de blocs, très fréquentes en zones montagneuses.

Pour se prémunir contre cet aléa, une multitude d'ouvrages de protection relevant du génie civil peuvent être utilisés. On peut distinguer les parades actives visant à empêcher le déclenchement du phénomène (béton projeté sur paroi rocheuse, filets plaqués, etc.) et les parades passives qui ont pour fonction d'arrêter le phénomène au cours de sa propagation (merlons, filets pare-pierre, etc.) [1].

Cette étude s'intéresse au rôle protecteur des forêts de montagne. Sur un versant boisé, la forêt joue un rôle de protection significatif. Lors de la propagation des blocs le long de la pente, les impacts successifs sur les arbres modifient, d'une part, la trajectoire des blocs et limitent, d'autre part, leur énergie cinétique ([2], [3]). A l'heure actuelle, seule l'étude du comportement mécanique d'arbres de gros diamètres face à l'impact d'un

bloc a été abordé autant d'un point de vue numérique qu'expérimental ([4], [5], [7], [8]). Ces études ont conduit au développement de codes de calculs de trajectoires de blocs en chute prenant en compte l'effet des forêts composées d'arbres de gros diamètres, communément appelées futaies. En outre, malgré le rôle protecteur observé sur le terrain des forêts de type taillis, i.e. composées d'arbres de petits diamètres, leur influence n'est pas intégrée dans les codes de calculs de propagation des blocs. L'objectif final de cette étude est donc l'implémentation dans ces codes de l'effet des taillis. Dans cette optique, l'impact de blocs rocheux sur des arbres (hêtres) dont le diamètre n'excède pas 10cm est étudié à partir d'approches numériques et expérimentales.

2 Mécanique du bois

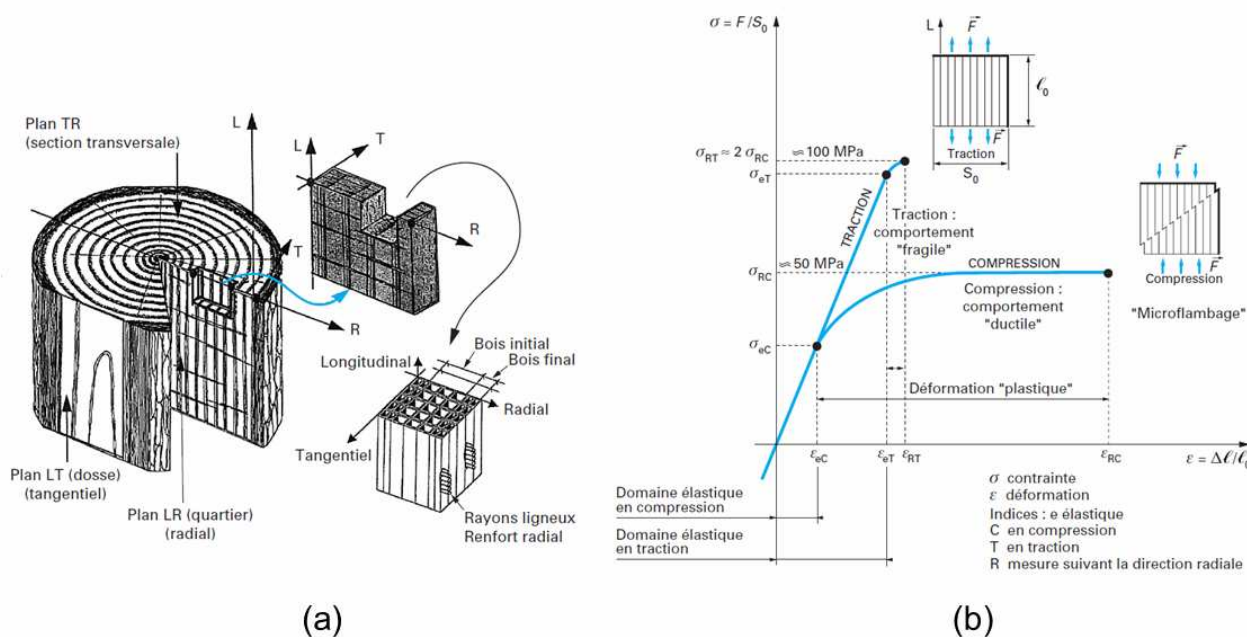


FIG. 1 – Description structurale du bois à l'échelle de la section (a) Exemple qualitatif du comportement mécanique en traction et compression (b) [8].

A l'échelle millimétrique, le bois est un matériau composite naturel multi-couches composé d'enveloppes cylindriques coaxiales. En coupe transversale, les cellules ligneuses qui assurent le transit de la sève, sont facilement identifiables et sont majoritairement orientées selon l'axe longitudinal du tronc. Les rayons ligneux, orthogonaux à l'axe longitudinal, assurent à la fois la circulation de la résine au sein du matériau et jouent également un rôle de renfort en terme de résistance mécanique globale (FIG. 1a). La couche de matière ligneuse dans l'épaisseur du cerne peut être assimilée à une structure de type nid d'abeille. En outre, le comportement du bois est fortement conditionné par son état physique. En particulier, le taux d'humidité est une caractéristique fondamentale qui joue significativement sur le comportement mécanique d'ensemble du bois dont les propriétés mécaniques sont à déterminer.

Au regard de ces considérations, la caractérisation du comportement mécanique d'arbres verts nécessite la réalisation d'essais expérimentaux au plus proche des conditions de sollicitation de l'arbre. Des tiges de bois fraîchement coupées ont donc été soumises à des tests de caractérisation dans des conditions dynamiques afin d'assurer une calibration pertinente des modélisations numériques développées. Compte tenu du peu d'informations disponibles sur le comportement mécanique macroscopique d'arbres verts de petits diamètres sous impact, les réponses mécaniques du bois en traction et compression sont supposées suivre l'allure des courbes contrainte/déformation présentées sur la FIG. 1b. Les paramètres impliqués dans cette approche sont la masse volumique du bois (ρ_b), le module d'Young (E_b), l'amortissement supposé visqueux (α) et les résistances en compression (σ_c) et traction (σ_t).

3 Approche expérimentale

Deux types de tests sont effectués. Des essais de vibration libre permettent tout d'abord d'obtenir des ordres de grandeur du module d'Young et de l'amortissement de la tige considérée comme dans le cas d'une poutre supposée élastique et de calibrer ces paramètres pour chaque essai. Des essais d'impact sont ensuite effectués

à l'aide d'un pendule de Mouton-Charpy de manière à simuler au plus près la réponse de l'arbre impacté par un bloc rocheux.

Les essais de vibration libre consistent à faire osciller une tige de bois verticale et encastrée à sa base. Un déplacement est imposé au niveau de la tête de la tige jusqu'à atteindre une position d'équilibre initialement fléchi (en restant dans le domaine élastique). La tige est ensuite brusquement relâchée et oscille jusqu'à reprendre sa position d'équilibre en position verticale. Les déplacements de différents points de la tige sont mesurés à partir d'une caméra rapide ce qui permet d'obtenir leurs trajectoires au cours du temps.

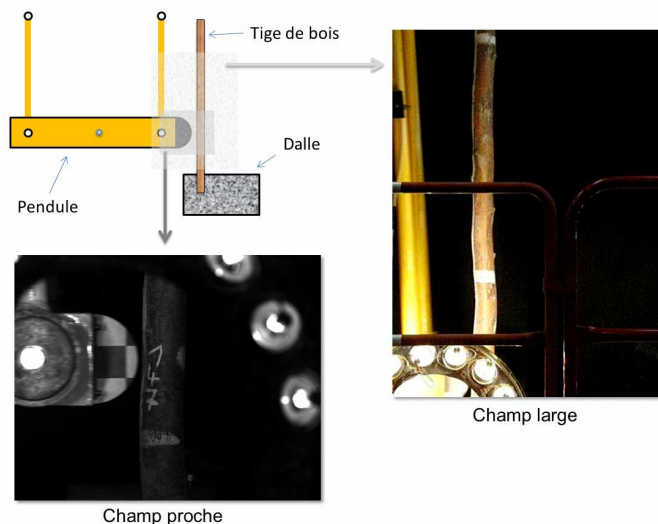


FIG. 2 – Schéma du pendule de Mouton-Charpy utilisé et champs de prise de vue associés aux caméras rapides. Un champ proche pour caractériser l'interaction bloc/arbre et un champ large pour mesurer la cinématique globale de la tige.

Le banc d'essai d'impact de type pendule de Mouton-Charpy se compose d'un pendule parallélépipédique à tête cylindrique monté sur deux axes transversaux. Le pendule est relié au bâti par quatre poutres de même longueur ($L_p=1.75\text{m}$) par l'intermédiaire de liaisons pivot (FIG. 2). La masse des poutres est de $m_1=37\text{Kg}$ et celle du pendule de $m_2=93\text{Kg}$. L'énergie cinétique du pendule lors du choc est définie par rapport à une hauteur de largage connue. Le mouvement du pendule est de type translation circulaire, ce qui implique que le champ d'accélération du pendule est uniforme. Une dalle de béton posée au sol permet l'encastrement des troncs d'arbres lors des essais d'impact. La connexion entre le tronc et la dalle est réalisée en plaçant la tige à tester dans un trou performé dans la dalle puis en coulant du béton dans ce trou.

Un accéléromètre uniaxial de $\pm 10g$ est fixé au centre de gravité du pendule et permet de mesurer l'accélération horizontale du pendule. La sensibilité du capteur est de 484 mV/g . La fréquence d'acquisition est de $10\mu\text{s}$. Pour mesurer la cinématique de la tige au cours de l'impact, deux caméras numériques sont utilisées. L'une effectue une mesure globale du mouvement à l'échelle des dimensions de la tige et l'autre se focalise sur la zone impactée (FIG. 2). Les trajectoires du centre gravité de la tête cylindrique du pendule ainsi que celles de repères régulièrement répartis sur la tige de bois sont ainsi déterminées. Il est important de noter que les aberrations optiques des objectifs sont prises en compte et corrigées à l'aide de mires de visée.

4 Approche Numérique

Afin de capturer les phénomènes physiques prépondérants associés au comportement sous impact d'un arbre vert de petit diamètre, le modèle numérique développé doit permettre de décrire les grands déplacements que subit la tige de bois ainsi que les interactions entre le bloc et l'arbre. De plus, étant donné que l'objectif final de ce travail est de mieux comprendre les transferts et les dissipations d'énergie au sein du matériau, la loi de comportement choisie doit reproduire les non linéarités matérielles pouvant se développer.

Le code aux éléments finis CAST3M a été utilisé pour développer le modèle d'impact. Les phénomènes rapides associés au chargement requièrent l'utilisation d'un algorithme de Newmark explicite pour la résolution du problème. Les grands déplacements ainsi que les non linéarités matérielles sont prises en compte dans le modèle. Compte tenu de la nature fibreuse du bois et donc de son caractère orthotrope, des éléments finis multi-fibres ont été utilisés pour la modélisation géométrique de la tige [9]. Le comportement longitudinal du bois vert est décrit en compression par un modèle mécanique élasto-plastique avec écrouissage et en traction par un modèle élastique fragile.

Un algorithme spécifique de gestion du contact basé sur les approches de modélisation classiquement utilisées en MED a été développé pour prendre en compte l'interaction bloc/tige. La cinématique du bloc est calculée à chaque itération temporelle permettant ainsi de déterminer l'évolution de la force de contact. Dans un premier temps, la direction de cette dernière est supposée uniquement portée par la normale à la surface de contact et est proportionnelle à l'interpénétration entre l'arbre et le bloc. Etant donné que le pendule de Mouton-Charpy développe une trajectoire circulaire, la modélisation de la cinématique du bloc a été décrite en tenant compte de la force qu'applique la barre de support sur le pendule (FIG. 3a). Un résultat de simulation d'impact est représenté sur la FIG. 3b où les trajectoires de quelques nœuds sont données. D'un point de vue qualitatif, la cinématique d'ensemble de la tige est correctement prédite par le modèle.

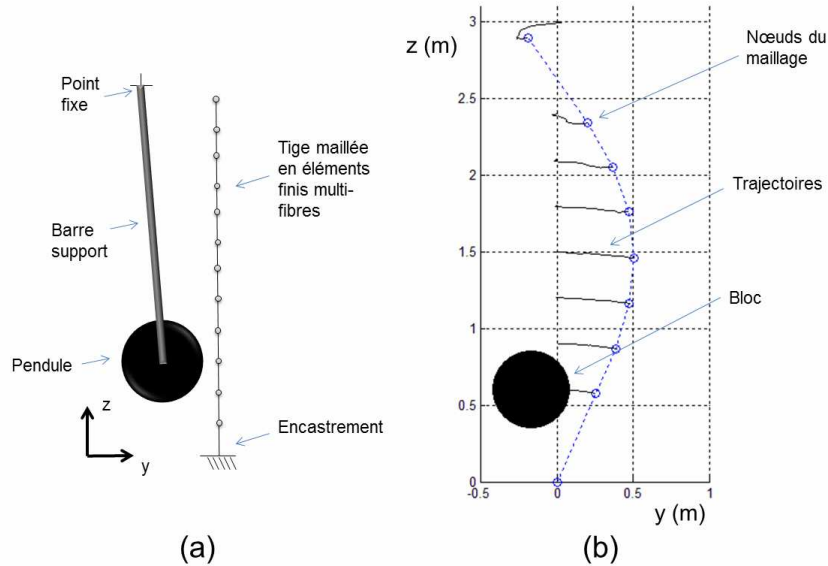


FIG. 3 – Caractéristique de la modélisation MEF (a). Exemple de déformée issue du calcul MEF (b).

5 Résultats

5.1 Vibration libre

Le calage du module d'Young et de l'amortissement visqueux a été effectué à partir des résultats expérimentaux des essais de vibration libre. Le comportement du matériau est supposé élastique, seul l'amortissement joue un rôle dissipatif. Compte de la forte variabilité des caractéristiques des tiges testées, les couples de valeurs (E_b , α) sont à caler sur chaque essai. La FIG. 4 donne un exemple de calage pour une tige de densité 1177 Kg/m^3 , de longueur 3m et de diamètre moyen 7.57cm.

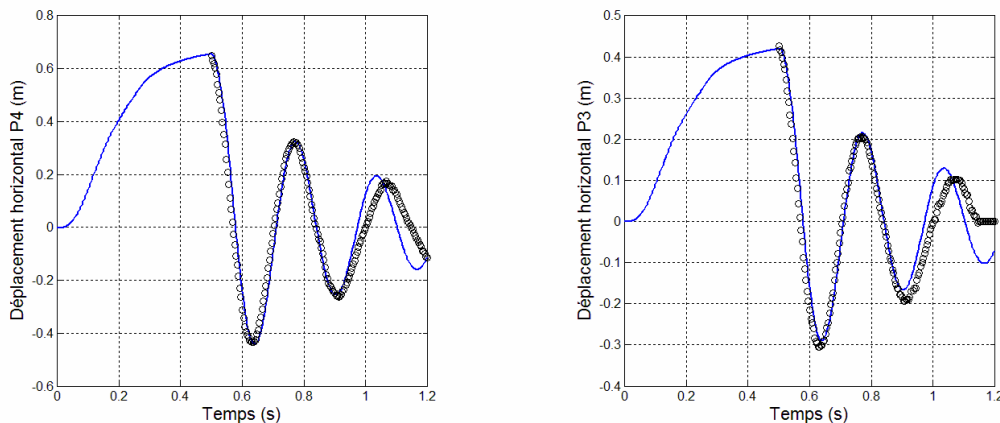


FIG. 4 – Evolution des déplacements horizontaux des points 3 et 4 au cours du temps (s) dans le cas d'un essai de vibration libre. Le trait continu représente le résultat de simulation et les points sont issus de l'expérience.

La calibration donne : $E_b = 13\,500 \text{ MPa}$, $\alpha = 7\%$. La première phase des courbes correspond à la mise en place de la tige en position initialement fléchie.

La simulation donne des résultats en accord avec l'expérience pour les deux premiers cycles d'oscillation, ensuite la dégradation du matériau semble se développer de manière significative. En moyenne sur l'ensemble des essais exploitables, des valeurs de $E_b^{moy} = 20\ 200\ \text{MPa}$ et $\alpha^{moy} = 6.7\%$ ont été déterminées. Ces valeurs de module d'Young ont été comparées à celles proposées par Quétel [4] pour des arbres de gros diamètre. Dans le cas du hêtre, les valeurs sont $E_b^{Quétel} = 12\ 600\ \text{MPa}$. Ces dernières semblent souligner qu'au jeune âge, les arbres sont plus raides.

5.2 Impact

Les résultats expérimentaux d'un essai d'impact sont présentés. La tige fait 5cm de diamètre et 2.7m de long pour une masse 9.3Kg. Elle a été testée 4 jours après sa coupe sur le terrain. La réponse dynamique du pendule pendant l'impact est filmée (FIG. 5). L'accélération horizontale est mesurée et filtrée par moyenne glissante avec une fréquence de 500Hz. Le déplacement et la vitesse au cours du temps du pendule sont obtenues par intégration temporelle du signal à partir d'un schéma de Newmark type « accélération moyenne ». L'erreur commise lors de l'intégration numérique est atténuée connaissant les valeurs caractéristiques du déplacement et de la vitesse du pendule à certains instants (déplacements et vitesses initiaux et finaux, vitesse avant impact). D'après les données issues des caméras numériques (champ proche et champ large), l'instant de début de contact se produit à $t = 1.2121\text{s}$ et la fin de l'interaction à $t = 1.331\text{s}$ (FIG. 6). Pour cette partie du déplacement du pendule, les mesures de déplacement horizontal sont en accord avec l'intégration numérique.

La comparaison de résultats de simulations et de résultats d'essais d'impact pour les trajectoires de quatre points régulièrement réparties le long de la tige met en évidence la capacité du modèle à traduire les déplacements de la tige lors de l'impact jusqu'à la rupture (FIG. 7).

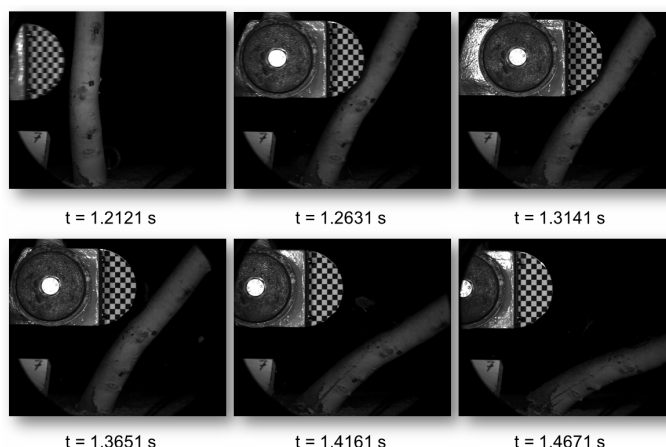


FIG. 5 – Déplacement du pendule lors de l'interaction bloc/arbre. Images issues de la caméra rapide en champ proche.

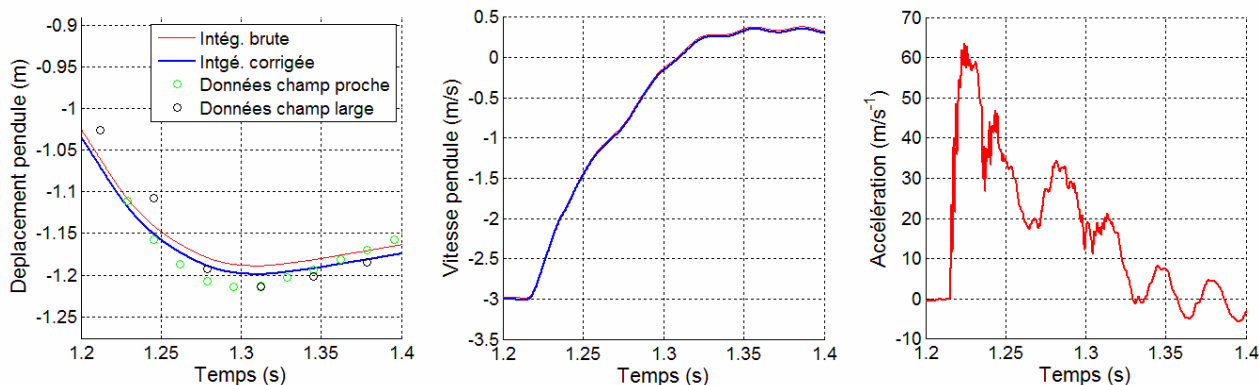


FIG. 6 – Déplacement, vitesse et accélération du pendule lors de la phase de contact avec la tige.

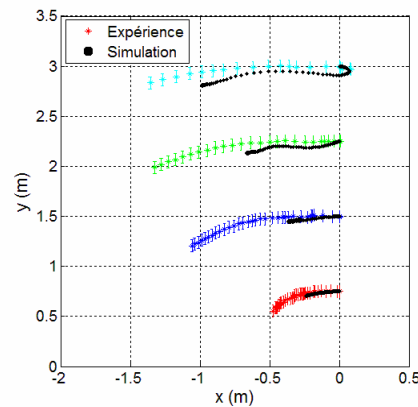


FIG. 7 – Comparaison de résultats de simulations et de résultats d’essais d’impact pour les trajectoires de quatre points régulièrement réparties le long de la tige pour une tige de 19.7 Kg, de 3m de long et de 8.4cm de diamètre moyen

6 Conclusion et perspectives

L’étude expérimentale de l’impact d’un bloc rocheux sur des arbres de petits diamètres a permis d’identifier les principaux phénomènes physiques impliqués dans la cinématique de la tige et du bloc. Le développement d’essais de vibration libre et d’impact sur tiges de petits diamètres a permis d’évaluer la capacité du modèle à reproduire fidèlement la réponse du système et également de recueillir un jeu de données expérimentales très utiles pour la calibration du modèle. Dans un avenir proche, ces essais permettront la calibration fine du modèle numérique au niveau du mouvement d’ensemble de la structure ainsi que localement à l’échelle du lieu d’impact. La définition d’un protocole de calibration des paramètres du modèle numérique en fonction de la variabilité des propriétés de la tige impactée ainsi que la mise en œuvre de campagnes d’essais de calibration et de validation constituent les deux principales étapes de travail nécessaire au développement d’un modèle numérique opérationnel dédié à caractériser fidèlement l’interaction entre un bloc rocheux et des arbres de petits diamètres. Une fois calé, le modèle numérique permettra de prédire la trajectoire des blocs lors de l’interaction avec cette population d’arbres et ainsi de mieux prévoir le risque encouru au niveau des enjeux exposés à ce type de risque naturel.

References

- [1] Lambert S., Nicot F., *Traité MIM – Risques Naturels : Géomécanique des instabilités rocheuses : du déclenchement à l’impact*, 434p., 2010.
- [2] Masuya H., Amanuma K., Nisikawa Y., Tsuji T., *Basic rockfall simulation with consideration of vegetation and application to protection measure*, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1835-1843, 2009.
- [3] Bourrier F., *Analyse trajectographique des chutes de blocs : des méthodologies actuelles à la modélisation stochastique*, *Traité MIM – Risques Naturels : Géomécanique des instabilités rocheuses : du déclenchement à l’impact*, Editeurs Lambert S. et Nicot F., 434p., 2010.
- [4] Quétel C., *Approche mutli-échelle du comportement mécanique d’un arbre soumis à l’impact d’un bloc rocheux*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 237p., 2005.
- [5] Dorren L., Berger F., *Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts*, *Tree Physiology*, 26, 63-71, 2005.
- [6] Jonsson M., *Energy absorption of trees in a rockfall protection forest*, PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology – Zurich, 209p., 2007.
- [7] Lundstrom T., Jonsson M., Volkwein A., Stoffel M., *Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall : a detailed assessment using a new experimental method*, *Tree Physiology*, 29, 245-359, 2008.
- [8] Trouy-Triboulot M., Triboulot P., *Matériau Bois – Structure et caractéristiques*, Tech. de l’Ingénieur (TI c925), 2010.
- [9] Guedes J., Pegon P., Pinto A.V., *A fibre Timoshenko beam element in CASTEM 2000*, Technical note, n° 1.94.31, ELSA, Joint Research Center, Ispra, 1994.