

Quantification de la capacité de dissipation d'énergie des arbres après un feu de forêt : cas du massif de Bitsch (CH)

NOYER Estelle¹, MONOD Ella¹, DLOUHA Jana², KRAMER Lukas³

¹Haute Ecole Spécialisée Bernoise, HAFL, Zollikofen, Suisse

² Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France

³ Haute Ecole Spécialisée Bernoise, AHB, Bienne, Suisse

estelle.noyer@bfh.ch

Mots clés : feu, densité du bois, aubier, dissipation d'énergie, chute de pierre, forêt

Contexte et objectifs

Depuis quelques décennies, l'augmentation des feux de forêts de forte intensité difficilement contrôlables (Bowman et al 2009) et le risque grandissant pour les zones originellement peu prônes aux incendies (Grünig et al 2023) préoccupent les gestionnaires forestiers du fait des altérations engendrées sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes forestiers. Outre la forte mortalité des arbres, laissant un nombre de tiges brûlées sur pied conséquent, les dommages structuraux induits par le feu peuvent varier d'une réduction du volume du houppier à la destruction partielle du système racinaire plus ou moins superficiel réduisant la stabilité des individus, en passant par une carbonisation du bois des tiges sur pied. Les arbres survivants peuvent ne pas récupérer de ces dommages, menant à une mortalité différée dans le temps (Hood et al 2018, Busby et al 2024). A une plus fine échelle, les propriétés mécaniques des tiges à la suite d'un feu de forêt sont peu reportées (Rust 2015, Lukina et al 2022). Néanmoins, les impacts d'un traitement thermique sur les propriétés du bois sont mieux connus. Accompagné d'une perte de masse, le bois traité montrera une meilleure dureté matérielle et durabilité dans le temps mais aussi une plus grande vulnérabilité à l'impact et une réduction du module de rupture (Murata et al 2013, Candelier et al 2016), démontrant une altération potentielle des propriétés mécaniques de la tige.

Dans le cas des forêts de protection, une perturbation extrême se traduit par une perte de la capacité de protection de la forêt contre les dangers naturels (May et al 2023). Pour quantifier les impacts sur la fonction de protection contre les chutes de pierre, les modèles actuels (Volkwein et al 2011) décrivent l'effet protecteur d'une forêt contre les chutes de pierre en fonction de la densité des tiges (*i.e.* probabilité d'impact) ainsi que de la capacité des arbres à dissiper l'énergie lors d'un impact avec un block ($E_{diss, cap}$). Toutefois, ces modèles ont été calibrés sur des arbres sains, sous-entendant des propriétés du bois homogènes dans les scénarios testés.

Ce projet vise donc à estimer la capacité maximale de dissipation d'énergie des arbres brûlés afin d'évaluer l'effet protecteur d'une forêt après un feu de forêt. Une première partie se concentre sur l'estimation de l'effet protecteur du site de Bitsch dont le massif forestier a subi en juillet 2023 un feu de forêt intense et non contrôlable. De premières hypothèses sur les caractéristiques des arbres 1, 5 et 10 ans après le feu de forêt sont testés pour estimer l'effet protecteur. Une deuxième partie se focalise sur le développement d'une méthode en laboratoire pour la mesure des propriétés mécaniques pertinentes des tiges dans l'estimation de la capacité maximale de dissipation d'énergie permettant ainsi de valider les hypothèses développées en première partie. L'objectif final est de pouvoir répliquer *in vivo* les dommages causés par un

incendie sur les arbres survivants et de proposer aux praticiens une évaluation rapide de l'effet protecteur des peuplements touchés.

Matériel et méthodes

Site d'étude

Le site d'étude se situe proche de la ville de Bitsch dans le canton du Valais en Suisse (46.35, 8.01, altitude 1522 m). La localisation du site est en région montagneuse où la typologie présente des pentes moyennes de 35.95°. Le site est principalement composé de *Picea abies* (> 80 %) et dans de moindres proportions de *Pinus sylvestris*, *Pinus cembra* et *Larix decidua*.

Un feu de forêt a eu lieu du 17 juillet au 3 août 2023 (*i.e.* 19 jours) sous des conditions très venteuses, générant une expansion *via* le sol (30 à 40 cm de profondeur) ainsi que par les cimes. Les surfaces des zones brûlées, allant de 0.3 à 2 076 m², présentent une médiane de 28 m² et une moyenne de 118 m². Au total, 110 hectares ont brûlé sur l'ensemble du massif forestier.

Effet protecteur du massif forestier de Bitsch contre les chutes de pierre

Pour chaque arbre du site d'étude dont le diamètre à 1.30 m est supérieur à 12 cm, le diamètre, la hauteur totale, la largeur de la couronne et la vitalité sont mesurés en juillet 2024 à partir d'un nuage de points réalisé avec un drone (M300RTK, DJI) équipé par une caméra multispectrale (MicaSense Altum). L'analyse du nuage de points avec le package lidR v. 4.1.2 (Roussel et al 2020) a permis d'extraire les caractéristiques architecturales des arbres. La vitalité des arbres a pu être apprécié *via* le calcul de deux indices de végétation à partir des données multispectrales : le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le NPCRI (Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index). Une classification a permis par la suite la définition de zones forestières homogènes.

En complément, de premiers profils radiaux de la densité basique du bois et de la profondeur du bois conducteur ont été acquis sur un sous-échantillonnage de dix arbres (DBH = 18 ± 4 cm, six arbres brûlés et quatre arbres non brûlés) prélevés au mois d'août 2024.

L'estimation de la capacité maximale de dissipation d'énergie des tiges ($E_{diss, cap}$, kJ) a été ajustée de Dorren et al (2006) de manière à prendre en compte la perte en masse du bois brûlé dans le temps et la réduction de la surface conductrice du bois. L'effet protecteur du site d'étude est estimé par le modèle RockFor3D (Dorren 2016). Une première simulation sans forêt est utilisée comme référence. Plusieurs simulations sont ensuite réalisées en modifiant les caractéristiques individuelles des arbres pour évaluer l'impact du feu de forêt sur la probabilité de chutes de pierre.

Quantification des propriétés mécaniques des tiges en laboratoire

Les essais en laboratoire visent à quantifier la perte potentielle en $E_{diss, cap}$ des tiges brûlées et d'identifier les modifications à inclure au modèle existant. La capacité maximale de dissipation d'énergie définie par les modèles de chutes de pierre est basée sur des mécanismes de rupture multiples.

Dans ce contexte, des essais de flexion statique monotone à trois points sont prévus sur 30 grumes de *Picea abies* de 18 ± 4 cm de diamètre et 3 m de long, réparties en deux groupes (témoins et brûlées). Cette configuration permet d'évaluer la résultante de la déformation et de la rupture (*i.e.* flexion, cisaillement et compression perpendiculaire au grain). Les grumes fraîches seront traitées avant le début du processus de séchage pour se rapprocher des conditions *in situ*. Enfin, la combustion des grumes brûlées sera réalisée en chambre contrôlée et sur un seul côté de la tige pour imiter au mieux les dommages observés sur le site de Bitsch.

Résultats préliminaires

Le carottage d'un sous-échantillonnage d'arbres a montré que les arbres non brûlés conduisent de la sève sur *cca.* 55 % de leur rayon, tandis que les arbres brûlés sévèrement ne présentent plus de surface conductrice. La densité basique du bois est aussi significativement affectée un an après le feu de forêt (médiane : 562.8 vs. 481.4 kg.m⁻³ chez les arbres non brûlés et brûlés, respectivement). Cette réduction de la densité du bois et la perte de la surface conductrice réduit en moyenne $E_{diss,cap}$ des arbres brûlés de 46 % (42.25 – 47.47 % pour l'ensemble des arbres).

L'inventaire réalisé à partir du nuage de points a pu identifier 808 arbres tandis que la classification a permis de définir 28 zones homogènes avec lesquelles les premières simulations ont été faites avec RockyFor3D. Les résultats en Fig. 1 montrent la probabilité de passage de block dans la zone d'étude. La comparaison entre la simulation de référence (sans forêt, Fig. 1 gauche) et avec une forêt saine (Fig. 1 droite) indique que l'effet protecteur s'illustre par une diminution de la longueur des couloirs de transit, limitant la probabilité de chutes de pierre sur les villages environnants. Les simulations avec les nouvelles valeurs de $E_{diss,cap}$ sont en cours de traitement.

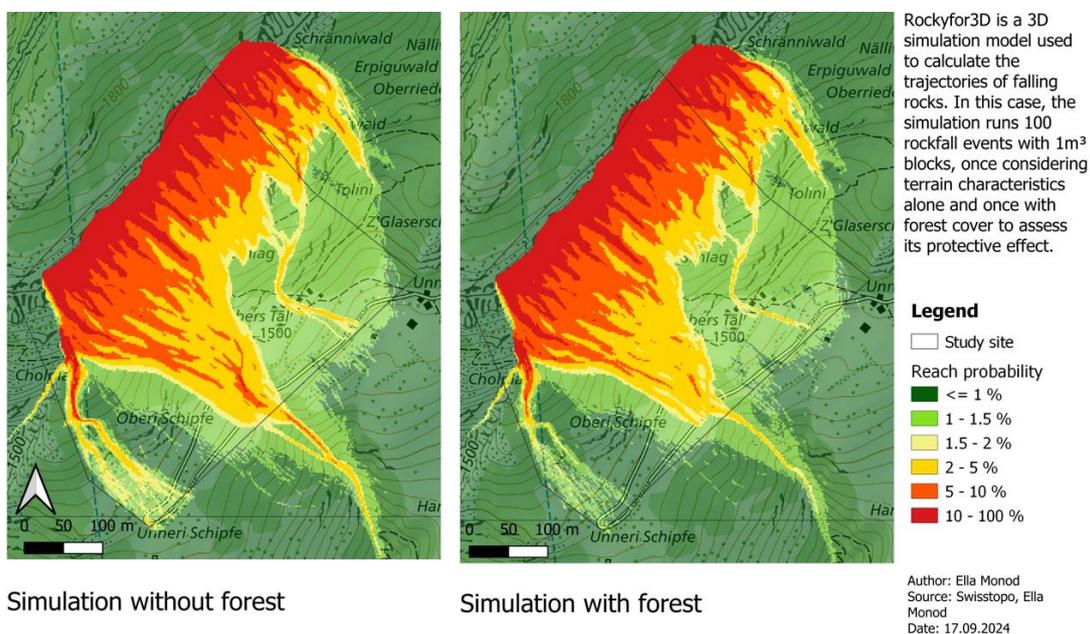


Fig. 1 : Cartes de probabilité des trajectoires des chutes de pierre sur le site de Bitsch.

Conclusions et perspectives

Cette analyse préliminaire montre que l'altération des propriétés matérielles du bois des tiges brûlées diminue considérablement $E_{diss,cap}$ des arbres sur l'ensemble du peuplement. Ces premiers résultats permettent de mettre en avant la nécessité de prendre en compte les propriétés matérielles, aussi triviales soient-elles, dans l'estimation des paramètres contribuant à l'effet protecteur contre les chutes de pierre. Les simulations avec les valeurs de $E_{diss,cap}$ ajustées pourront quantifier la diminution potentielle de l'effet protecteur d'une forêt brûlée. Toutefois, basée sur des hypothèses théoriques, l'approche utilisée pour ajuster $E_{diss,cap}$ a besoin d'être comparé aux essais réalisés en laboratoire sur des tiges saines et brûlées artificiellement en conditions contrôlées. Une fois l'approche validée et ajustée, des hypothèses sur la perte en masse des arbres survivants et brûlés seront explorées afin de simuler l'état futur de la forêt de protection du massif de Bitsch.

Remerciements

Ce projet est supporté par le programme Junior Scholars : BFH transversal de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise BFH.

Références

Bowman DMJS, Balch JK, Artaxo P, et al (2009) Fire in the earth system. *Science* 324:481–484.

Busby S, Evers C, Holz A (2024) Patterns, drivers, and implications of postfire delayed tree mortality in temperate conifer forests of the western UNITED STATES. *Ecosphere* 15(4):e4805.

Candelier K, Thevenon M-F, Petrissans A, et al (2016) Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science* 73:571–583.

Dorren L (2016) A Rockyfor3D (v5. 2) revealed—Transparent description of the complete 3D rockfall model.

Dorren LKA, Berger F, Putters US (2006) Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:145–153.

Grünig M, Seidl R, Senf C (2023) Increasing aridity causes larger and more severe forest fires across Europe. *Global Change Biology* 29:1648–1659.

Hood SM, Varner JM, Van Mantgem P, Cansler CA (2018) Fire and tree death: Understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. *Environmental Research Letters* 13.

Lukina A, Lisyatnikov M, Martinov V, et al (2022) Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood. *AEJ* 7:44–52.

May D, Moos C, Dorren L, et al (2023) Quantifying the long-term recovery of the protective effect of forests against rockfall after stand-replacing disturbances. *Frontiers in Forests and Global Change* 6.

Murata K, Watanabe Y, Nakano T (2013) Effect of Thermal Treatment on Fracture Properties and Adsorption Properties of Spruce Wood. *Materials* 6:4186–4197.

Roussel J-R, Auty D, Tompalski NCC and P, et al (2020) lidR: An R package for analysis of airborne laser scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment* 251:112061.

Rust SM (2015) Classification of timber from *Pinus radiata* trees exposed to forest fires. PhD, Stellenbosch: Stellenbosch University, 71 p.

Volkwein A, Schellenberg K, Labiouse V, et al (2011) Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:2617–2651.