



Rockfor.NET : le premier outil de diagnostic rapide de l'aléa chute de pierres à l'aval d'une forêt de protection

F. Berger, L. Dorren

► To cite this version:

F. Berger, L. Dorren. Rockfor.NET : le premier outil de diagnostic rapide de l'aléa chute de pierres à l'aval d'une forêt de protection. Sciences Eaux & Territoires, 2010, 2, p. 186 - p. 197. 10.14758/SET-REVUE.2010.2.22 . hal-00583646

HAL Id: hal-00583646

<https://hal.science/hal-00583646>

Submitted on 6 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rockfor^{NET} : le premier outil de diagnostic rapide de l'aléa chute de pierres à l'aval d'une forêt de protection

En montagne, la forêt est une barrière de protection efficace contre les risques naturels comme les chutes de pierres et de rochers qui compromettent la sécurité des biens et des personnes. Il reste toutefois encore difficile d'en définir les mécanismes et de quantifier cette capacité de protection. Les gestionnaires forestiers trouveront dans cet article la présentation d'un outil permettant, grâce à la définition de plusieurs paramètres locaux, une évaluation quantitative rapide de la capacité de protection de la forêt contre les chutes de pierres à l'échelle d'un versant.



En zone de montagne, les chutes de pierres sont des processus naturels, mais en raison de la spontanéité de leurs occurrences et des vitesses extrêmes que peuvent développer les projectiles, elles peuvent occasionner des dommages importants aux biens et aux personnes (habitations, voies de communications...). Dans cet article, nous définissons les chutes de pierres par la mise en mouvement et la propagation de blocs rocheux à partir d'une falaise, blocs dont le volume peut varier de un litre (10^{-3} m^3) à plusieurs dizaines de mètres cubes. Les chutes de pierres se produisent sur toutes les parois rocheuses et sont les conséquences de l'altération et de la dégradation des propriétés mécaniques des roches s'exerçant au sein des massifs rocheux. Là, où de par le passé, des événements dangereux ont eu lieu, des études détaillées sont souvent réalisées pour la délimitation des zones à risque* et le dimensionnement des ouvrages de génie civil nécessaires à la mise en sécurité de

ces zones. Malgré le fait que les techniques de génie civil se soient rapidement développées au cours de ces vingt dernières années, les types d'ouvrages et les stratégies de protection restent limités, et surtout très coûteux. Dans les Alpes, il existe cependant de nombreux enjeux socio-économiques qui ont besoin d'être protégés des chutes de pierres, comme l'indique clairement le nombre de blocs rocheux arrêtés dans les forêts situées en amont des voies de communications et des zones urbanisées. Ces rochers arrêtés par les arbres montrent également que les forêts de montagne peuvent, dans certains cas, offrir une alternative, écologique et économique efficace au génie civil, comme l'ont confirmée Jahn (1988) et Dorren *et al.* (2005).

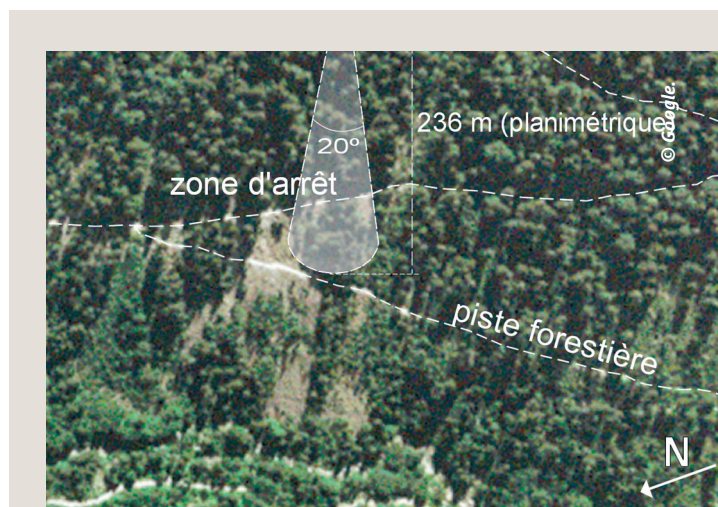
Le forestier, qui est le garant de la protection offerte par les peuplements forestiers, doit être en mesure de quantifier rapidement l'efficacité de cette fonction des forêts, et ce pour trois raisons. En premier lieu, car une décision doit être prise afin de déterminer

quelles sont les forêts qui nécessitent des interventions sylvicoles afin de prévenir une augmentation du risque lié aux chutes de pierres. En effet, compte tenu de l'évolution naturelle des peuplements forestiers, la capacité de protection d'une forêt évolue et change au fil du temps (Brang, 2001). De telles interventions que l'on peut qualifier de préventives permettent au forestier d'éviter de « courir » derrière les situations d'urgences. En second lieu, une quantification du potentiel de protection d'un peuplement forestier permet de cartographier les zones forestières où une fonction de protection devrait leur être attribuée et reconnue comme telle. En dernier lieu, il est nécessaire de définir et cibler les secteurs nécessitant de plus amples investigations de terrain nécessaires à la caractérisation précise du risque de chute de pierres, ainsi qu'au chiffrage des futurs investissements en mesures de protection basées sur l'utilisation conjointes des techniques de génie civil et de celles d'ingénierie écologique.

Une évaluation rapide de la capacité de protection d'un peuplement forestier nécessite de disposer d'un jeu de données restreint et d'un outil convivial d'analyse. Les données à utiliser doivent permettre de donner une représentation globale de la réalité et être facile à acquérir, aussi bien à l'échelle d'un versant qu'à celle du peuplement forestier. Jusqu'à présent, un tel outil n'était pas disponible.

Il existe, cependant, des guides de sylviculture qui donnent des lignes directrices pour apprécier la protection offerte par les peuplements forestiers vis-à-vis des chutes de pierres à partir du nombre d'arbres à l'hectare (densité d'un peuplement) et du diamètre moyen des arbres (i.e., Wasser et Frehner, 1996). Plus récemment, la révision de ces guides a intégré dans le diagnostic le volume des projectiles (i.e., Frehner *et al.*, 2005 ; Gauquelin *et al.*, 2006). Ce dernier paramètre est très important. En effet, pour un peuplement de densité et diamètre donnés, un projectile a une probabilité d'impact avec un arbre et développe une énergie cinétique* qui sont proportionnelles à son volume. Ainsi, plus le projectile est de faible volume, plus sa probabilité d'impact avec un arbre et son énergie cinétique sont faibles. En outre, les dimensions des blocs rocheux influencent de manière significative leurs modes de déplacement (Gerber, 1998).

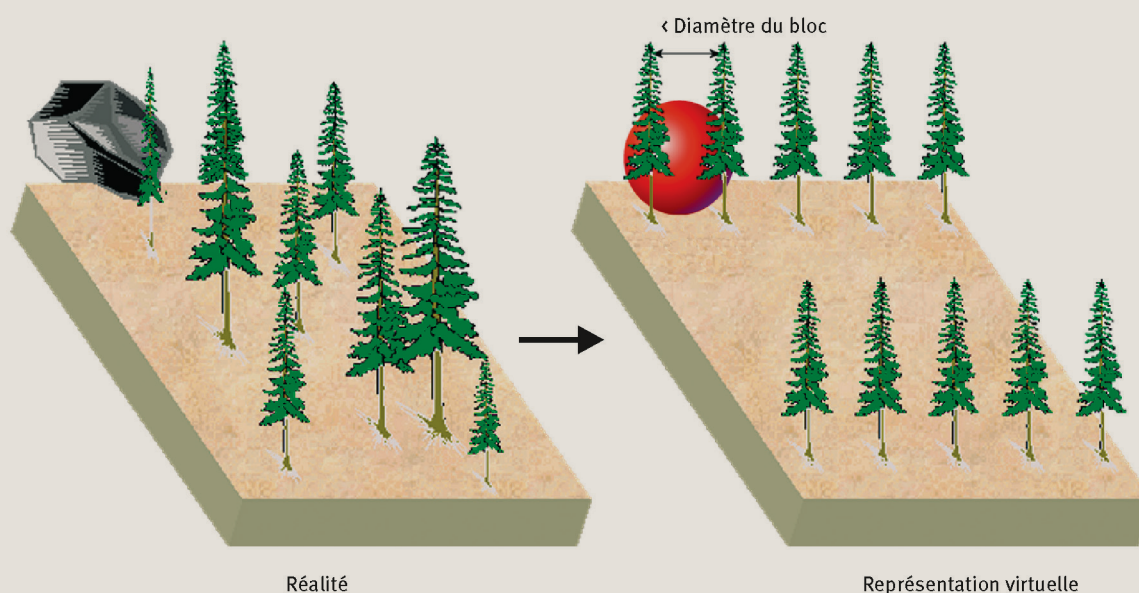
Actuellement, les seuls outils qui prennent en compte l'action du volume des projectiles sont des modèles de simulations trajectographiques en 2D et 3D (i.e., Dorren *et al.*, 2006). Toutefois, l'utilisation de ces modèles exige une connaissance experte sur la modélisation et sur les relevés de terrain nécessaires à la caractérisation du comportement mécanique des sols. De plus, dans la majorité des cas, ces outils de simulations ne sont pas en mesure de prendre en compte de manière réaliste l'action des peuplements forestiers. En tant que tels, ils sont donc, pour les forestiers, ni d'une utilisation aisée, ni adaptés à leurs besoins. L'un des premiers concepts pour quantifier la capacité de protection des forêts contre les chutes de pierres qui ait pris en compte le volume des projectiles est



❶ Vue générale du site expérimental de Vaujany (France)

celui de la « distance moyenne dégagée d'arbres » (DMDA*) initialement développé par Gsteiger (1993), puis repris et adapté par Brauner *et al.* (2005) et Dorren *et al.* (2005). La DMDA correspond à la distance moyenne que peut parcourir un projectile rocheux entre deux impacts avec des arbres. Cette distance est calculée à partir du volume du projectile, du nombre d'arbres présents sur une surface planimétrique donnée, et du diamètre moyen mesuré à hauteur de poitrine (DHP*) de ces arbres. Compte tenu de son principe de calcul, la DMDA est toujours une distance planimétrique. Gsteiger (1993) considère que les peuplements forestiers, dont la DMDA dépasse 40 m, ne sont pas en mesure de freiner efficacement ou d'arrêter les chutes de pierres. En fait, la valeur seuil critique de la DMDA dépend à la fois de la pente moyenne du terrain et – c'est le paramètre le plus important, de l'énergie maximale développée par le projectile rocheux pour lequel le calcul est réalisé. Ainsi, les besoins actuels des forestiers portent sur l'élaboration et la mise à disposition d'un outil qui soit en mesure d'intégrer à la fois la pente moyenne d'un versant et l'énergie maximale potentielle que peut développer un bloc rocheux sur cette pente. Le forestier dispose d'un paramètre dendrométrique* qui lui permet, dès la phase d'inventaire de terrain, de compenser l'effet de la pente : c'est la surface terrière* mesurée avec un relascope*. La surface terrière (notée par définition G) correspond pour une surface donnée à la somme des superficies des sections orthogonales des arbres mesurées à 1,30 m de haut, elle est exprimée en m²/ha. Les travaux de Couvreur en 1982, repris par Dorren *et al.* en 2005, ont mis en évidence que la capacité d'interception d'un bloc rocheux par un arbre est plutôt corrélée à sa surface terrière (notée par définition G à l'échelle d'un arbre) réellement impactée qu'à son diamètre total. Ces arguments que nous venons de présenter brièvement confirment la nécessité de développer un outil d'analyse construit sur le concept de la surface terrière interceptée.

2 Principe de décomposition d'un peuplement forestier réel en une succession de rideaux virtuels

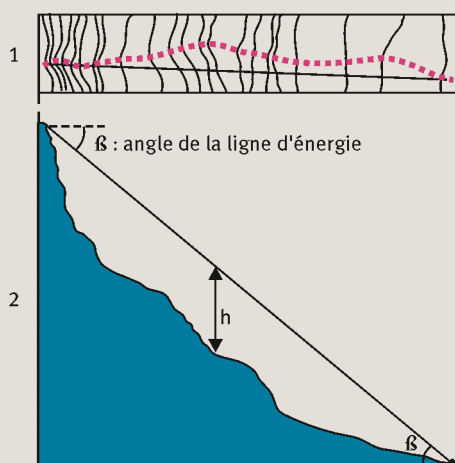


► En résumé, malgré le concept de la distance moyenne dégagée d'arbres et les directives des guides de sylviculture, il n'y a actuellement, pour les forêts à fonction de protection contre les chutes de pierres, aucune règle quantitative précise pour déterminer la combinaison optimale entre le nombre d'arbres à l'hectare et la surface terrière, qu'elle soit ou non exprimée en un diamètre d'arbre moyen. La détermination des valeurs optimales de ce couple de paramètres dendrométriques doit prendre en compte les dimensions du bloc rocheux duquel on souhaite se protéger, de son éner-

gie cinétique (principalement déterminée par l'angle de la pente du versant sur lequel il se propage), de la longueur totale de la bande boisée présente sur le versant et de la composition en essence des peuplements forestiers. Afin de fournir un outil permettant de proposer une évaluation quantitative rapide de la capacité de protection de la forêt contre les chutes de pierres à l'échelle d'un versant et qui prenne en compte les paramètres mentionnés ci-dessus, nous avons développé l'utilitaire Rockfor^{NET}.

Dans cet article, nous présentons dans un premier temps les principes sous-jacents de cet utilitaire, puis les méthodes de calcul utilisées et enfin les études de cas utilisées pour sa validation.

3 Présentation graphique du principe de la ligne d'énergie



Le schéma 1 présente une vue aérienne de la pente avec la position des rebonds d'une chute de pierres. Le schéma 2 correspond au profil en long du versant avec la ligne d'énergie correspondante à l'événement du schéma 1.

Matériels et méthodes

Les expérimentations grandeurs nature de chutes de blocs rocheux

Pour calibrer les paramètres utilisés dans les différents calculs effectués par Rockfor^{NET}, nous avons réalisé des expériences réelles de chutes de pierres *in situ* et à trajectoire libre. Notre site expérimental est situé dans la forêt communale de Vaujany, dans les Alpes françaises (latitude : 45° 12 ' ; longitude : 6° 3 '). Le site (figure 1), qui a fait l'objet de relevés et d'inventaires de terrain précis et détaillés dans le cadre de cette étude (cartographie de tous les arbres présents, réalisation d'un relevé d'un modèle numérique de terrain au pas de 1 m...), a une altitude comprise entre 1 200 m et 1 400 m au-dessus du niveau de la mer et une pente moyenne de 38°. Dans le cadre de cette étude, nous avons procédé au lâcher individuel de 57 blocs rocheux. Ces projectiles avaient un diamètre moyen de 1 m. Les lâchers ont été réalisés à l'aide d'une pelle

mécanique (de type Caterpillar®). Les blocs ont été lâchés, les uns après les autres, à partir d'une piste forestière et dans la ligne de plus grande pente. Chacune des trajectoires a été filmée au moyen de cinq caméras vidéo numériques situées à postes fixes, en parallèle de l'axe principal de propagation. Le volume moyen des blocs est de 0,52 m³ (minimum = 0,15 m³; maximum = 1,51 m³; stddev. = 0,32 m³, n = 57) et la masse moyenne de 1 466 kg. Pour obtenir des détails supplémentaires sur le protocole expérimental, nous invitons le lecteur à consulter l'article de Dorren *et al.* (2005). La zone analysée en détail lors de cette étude couvre une surface triangulaire ayant une base de 106 m et une hauteur de 300 m. Cette surface représente une déviation latérale de 10° de part et d'autre de la ligne de plus grande pente et elle correspond à la déviation latérale maximale observée lors de nos expérimentations. La densité moyenne du peuplement forestier (nombre d'arbres à l'hectare) présent dans la surface d'étude est de 294 arbres/ha. La surface terrière totale mesurée *in situ* est de 31,6 m²/ha, ce qui correspond à un DHP moyen de 36,9 cm. Les principales espèces d'arbres présentes sont le sapin blanc (*Abies alba* – 57 %), l'épicéa (*Picea abies* – 13 %), le hêtre européen (*Fagus sylvatica* – 23 %) et l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* – 7 %).

Le concept de base de Rockfor^{NET}

Le concept de base qui a conditionné la construction de l'outil Rockfor^{NET} est que la forêt présente sur un versant peut être décomposée en une succession de « filets virtuels pare-pierres », un filet étant constitué d'une rangée d'arbres (figure 2). Le franchissement d'un filet ne peut se faire sans impacter un arbre et donc dissipation d'énergie. Dans la suite de cet article, ces « lignes d'arbres » sont dénommées « rideaux ». Le principe général de Rockfor^{NET} est, pour un bloc rocheux donné, de déterminer si le nombre de rideaux présents est suffisant pour dissiper la totalité de l'énergie développée par celui-ci.

Tout d'abord, Rockfor^{NET} estime, en utilisant le principe de la ligne d'énergie, l'énergie maximale potentielle que peut atteindre un projectile rocheux (Heim, 1932 ; Evans et Hungr, 1993 ; Gerber, 1998 ; Meissl, 1998). Puis il calcule la capacité de dissipation d'énergie de chacun des rideaux présents sur le site ainsi que le nombre de rideaux théoriquement nécessaires pour dissiper l'énergie totale du projectile rocheux. Par la suite, le nombre requis de rideaux est converti en une valeur de surface terrière, et ce à partir de la valeur du DHP moyen présent sur le site. L'avant-dernière étape consiste à déterminer la surface terrière théoriquement interceptée par le bloc rocheux quand celui-ci traverse la zone forestière. Au final, Rockfor^{NET} évalue quantitativement le rôle protecteur de la forêt contre les chutes de pierres en comparant, pour un projectile rocheux choisi par l'opérateur, la surface terrière théoriquement interceptée sur le site étudié avec la valeur requise pour arrêter ce projectile. Toutes ces étapes, ainsi que l'étalonnage des paramètres nécessaires aux calculs, sont expliqués en détail ci-après.

Le principe de la ligne d'énergie

Les pertes d'énergie occasionnées par les rebonds entre le projectile et le sol ne peuvent être prises en compte dans un outil « simple » tel que Rockfor^{NET}. En effet, celui-ci n'est pas un outil de simulation trajectographique mais un utilitaire d'évaluation statistique du pourcentage de blocs rocheux arrêtés, à l'échelle d'un versant, par les peuplements forestiers présents sur celui-ci. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'utiliser le principe de la ligne d'énergie, tel que décrit par Heim (1932), Evans et Hungr (1993), Gerber (1998) et Meissl (1998), pour déterminer l'énergie maximale potentielle que peut développer un projectile rocheux. Le principe de la ligne d'énergie est que l'énergie cinétique d'un bloc rocheux en un point donné de sa trajectoire est égale à son énergie potentielle au même point (E_{pot}). Cette énergie potentielle est calculée avec la formule suivante :

$$E_{pot} = m \times g \times h \quad 1$$

avec m : la masse du projectile rocheux (kg), g : l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²) et h : la différence de hauteur (en m) entre la ligne d'énergie et le terrain au point donné de calcul (figure 3).

À partir de la formule 1, il est donc possible d'estimer la vitesse maximale (V_{max}) que peut atteindre un projectile rocheux lors de sa propagation. Cette estimation se fait avec la formule 2. V_{max} est exprimée en m/s :

$$V_{max} = \sqrt{2 * g * h} \quad 2$$

L'angle de la ligne d'énergie utilisé dans Rockfor^{NET} est de 31°. Il correspond à la valeur de l'angle observé lors des expérimentations grandeur nature réalisées par le Cemagref en 2000, 2001, 2003 et 2004 et décrites par Dorren *et al.* (2005). Ces expérimentations ont été réalisées sur un site dépourvu de végétation et sur un site boisé. Ces deux sites expérimentaux, situés sur le même versant, ont une pente moyenne de 38°. La vitesse maximale mesurée sur le site expérimental boisé a été de 24,3 m/s et sur le site non boisé de 30,4 m/s. Au regard de ces résultats expérimentaux, il s'est avéré nécessaire d'introduire un paramètre permettant de limiter la valeur de la vitesse maximale d'un projectile rocheux calculée à partir du principe de la ligne d'énergie en utilisant la formule 2.

La limitation imposée dans Rockfor^{NET} est que, pour une pente boisée avec une surface terrière d'au minimum 10 m²/ha, la vitesse maximale ne peut être supérieure à 0,64 fois la pente moyenne du versant (°). Si G est inférieure, ou s'il n'y a aucune couverture forestière, la vitesse maximale du projectile est considérée comme étant égale à 0,8 fois la valeur de la pente moyenne du versant. Les valeurs de 0,64 et 0,8 ont été obtenues par l'analyse des vitesses mesurées lors de nos expérimentations grandeur nature.

Compte tenu de ces observations et du principe de la ligne d'énergie, nous avons émis l'hypothèse qu'il existait une relation linéaire entre la valeur de la pente

► moyenne du terrain et la vitesse maximale que peut développer un projectile rocheux. La condition d'une valeur minimale de G , de $10 \text{ m}^2/\text{ha}$, est basée sur les observations faites par Doche (1997), qui a trouvé que les forêts avec une faible surface terrière n'ont pratiquement aucun effet sur l'atténuation des chutes de pierres. La valeur totale de l'énergie que doit dissiper la forêt (E_{tota}) est calculée dans Rockfor^{NET} avec la formule 3 :

$$E_{\text{tota}} = 0,5 \times m \times V_{\text{maxim}}^2 + m \times g \times 0,25 \times Fh \quad (3)$$

avec m : la masse du projectile rocheux (kg), V_{maxim} (m/s) est la vitesse maximale du projectile calculée avec la formule 2 et ne pouvant dépasser la valeur limite déterminée en fonction du seuil de $10 \text{ m}^2/\text{ha}$ de surface terrière présente sur le site étudié, Fh est la hauteur de chute libre initiale du projectile et E_{tota} est exprimée en joules.

Le premier terme de l'équation 3 permet de calculer l'énergie cinétique de translation du projectile et le deuxième terme l'énergie potentielle additionnelle. Il est admis que 75 % de l'énergie résultante de la chute libre initiale est dissipée au cours du premier impact avec le sol (Evans et Hung, 1993). Les 25 % restants sont transformés en énergie cinétique additionnelle due à la rotation du projectile. Pour évaluer la pertinence de notre principe de calcul de la vitesse d'un bloc rocheux avec le principe de la ligne d'énergie, nous avons comparé cette vitesse calculée à la vitesse maximale absolue mesurée et à la vitesse maximale moyenne mesurée de tous les blocs rocheux utilisés lors de nos expérimentations grandeur nature en terrain nu (Dorren *et al.*, 2005).

La surface terrière interceptée

Après chacun des lâchers de blocs sur notre site expérimental, nous avons réalisé un relevé cartographique de la trajectoire, depuis le point de départ jusqu'au point d'arrêt. Si, sur cette trajectoire, des arbres ont été impactés, nous avons alors mesuré la surface terrière de la zone impactée (figure 4). Cette surface terrière impactée par

le bloc est appelée la surface terrière interceptée et notée g_{in} .

Pour chacun des blocs, nous avons sommé sur l'ensemble de sa trajectoire les surfaces terrières réellement interceptées (notée $g_{\text{in,réel}}$). À partir de l'ensemble des données collectées, nous avons établi, par régression linéaire, une relation entre la distance planimétrique parcourue et la surface terrière totale interceptée. Puis, nous avons calculé à partir des paramètres dendrométriques du peuplement forestier présent sur notre site expérimental, la surface terrière théoriquement interceptable ($g_{\text{in,théo}}$) par un bloc rocheux. La formule utilisée pour réaliser ce calcul est la suivante :

$$g_{\text{in,théo}} = (d \times R_{\text{diam}}) \times G / 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha} \quad (4)$$

avec $g_{\text{in,théo}}$ en m^2 , d est la distance totale parcourue par le bloc rocheux (m), R_{diam} est le diamètre du bloc rocheux assimilé à une sphère (m) et G est la surface terrière totale du peuplement forestier présent sur le site (m^2/ha).

Pour valider la pertinence de notre calcul de la surface terrière théoriquement interceptable par un bloc rocheux ($g_{\text{in,théo}}$), nous avons testé l'existence d'une différence statistiquement significative entre la relation linéaire établie sur la base de $g_{\text{in,réel}}$ et notre calcul de $g_{\text{in,théo}}$, avec pour hypothèse une distribution normale de l'estimateur ($\alpha = 0,05$). Nous avons utilisé une analyse statistique de type *bootstrap* * (méthode d'inférence statistique basée sur une succession de ré-échantillonnage ; Manly, 2007). Au total, nous avons réalisé 10 000 régressions linéaires sur notre base de données qui a été ré-échantillonnée par modification des données originales de $g_{\text{in,réel}}$. Puis nous avons déterminé si nos résultats pour $g_{\text{in,théo}}$ étaient compris dans l'intervalle de confiance à 95 % des résultats de l'analyse statistique *bootstrap*.

Calcul de l'énergie dissipée par rideau

Un des paramètres clés de Rockfor^{NET} est le ratio entre l'énergie qui est réellement dissipée par un rideau et l'énergie maximale qui pourrait être dissipée par ce

4 Représentation schématique de la surface terrière d'un arbre interceptée (représentée en grisé) par un bloc rocheux (g_{in})

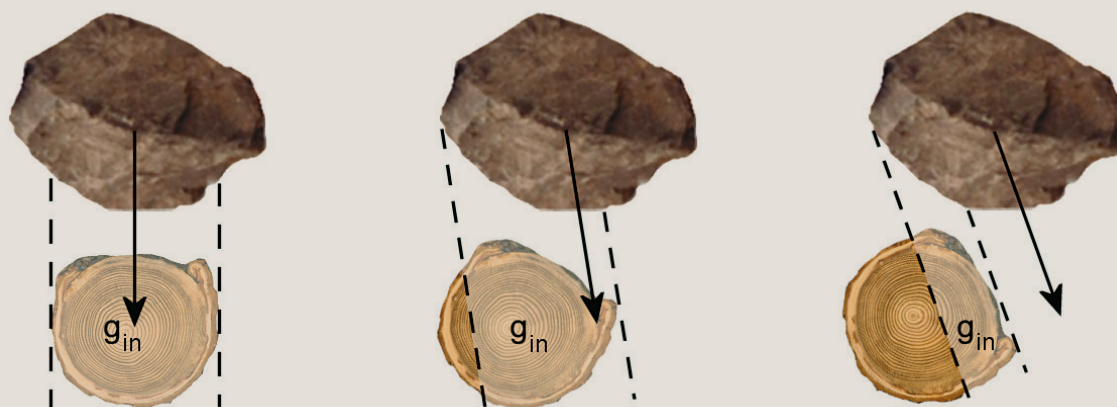


Photo de la rondelle d'arbre de Michelle Bollschweiler (Dendrolab, Université de Fribourg).

même rideau. Pour plus de commodité, ce paramètre est dénommé dEc_{factor} . Il correspond en fait à la mesure de l'efficacité de chaque rideau. Notre méthode pour déterminer ce paramètre, essentiel à la suite des calculs, a été de calculer pour notre site expérimental boisé la valeur de $g_{in,theo}$ (avec la formule 4) à l'aval du peuplement forestier et à l'amont de la piste forestière (figure 1). Ce point de calcul est situé à une distance planimétrique de 175 m du point de départ initial, soit 222 m mesurés sur la pente. Nous avons émis l'hypothèse que la valeur de $g_{in,theo}$ était représentative de la $g_{in,réel}$ observée. Puis, sur la base de la valeur de $g_{in,theo}$, nous avons calculé le nombre moyen d'arbres théoriquement impactés avec la formule suivante :

$$Nr_{arb_impact} = (g_{in,theo} \times 4) / (n \times (DHPm)^2) \quad 5$$

avec $DHPm$: le diamètre moyen des arbres mesuré à hauteur de poitrine et exprimé en mètres.

À partir de la valeur de l'énergie maximale calculée au niveau des points d'arrêts maximaux des blocs rocheux (avec le principe de la ligne d'énergie) – cette énergie correspond à celle qui a dû être dissipée par le peuplement forestier – et du nombre moyen d'arbres impactés, il est alors possible de quantifier l'énergie dissipée lors du franchissement de chacun des rideaux.

Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons observé que sur le site expérimental boisé, 66 % des projectiles se sont arrêtés à la limite aval de la zone boisée et en amont de la piste forestière (figure 8). À partir de ce taux d'arrêt observé *in situ*, nous avons proposé, à partir de l'équation 5, la formulation 6 pour calculer le nombre théorique de rideaux nécessaires (Nr_{rideau_req}) pour obtenir un taux d'arrêt de 100 % :

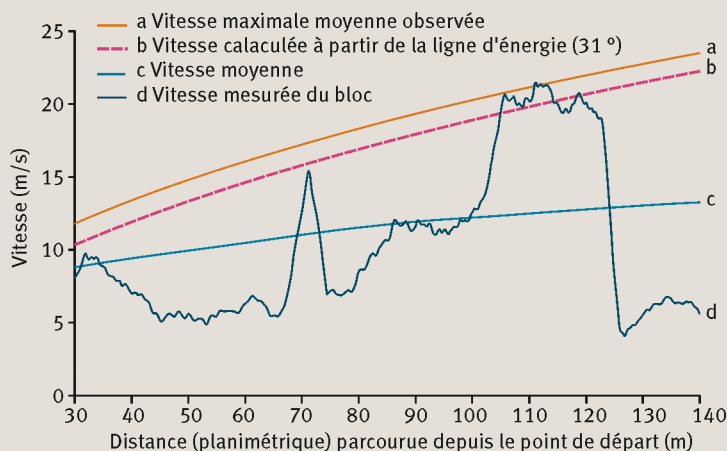
$$Nr_{rideau_req} = Nr_{arb_impact} \times (100/66) \quad 6$$

Disposant du nombre de rideaux virtuels pour obtenir un taux d'arrêt de 100 %, il ne reste plus qu'à déterminer l'élément constitutif de base d'un rideau et son agencement au sein de celui-ci. En d'autres termes, à ce stade de l'analyse, il faut caractériser l'arbre moyen utilisé pour construire les rideaux virtuels. Nous avons décidé que tous les rideaux seraient constitués d'arbres dits « normalisés ». Un arbre « normalisé » est en fait une structure composite qui est virtuellement construite à partir de la combinaison de certains des paramètres dendrométriques réels du peuplement étudié. Ces paramètres sont la répartition de la composition en essences et le calcul du DHP moyen des arbres présents. Le DHP moyen est calculé à partir de la surface terrière totale du peuplement et de sa densité. La répartition de la composition en essence est utilisée pour créer une essence composite représentative du taux de présence (exprimé en %) de chacune des essences. À partir de ce principe de construction d'un arbre normalisé, l'énergie maximale que celui-ci peut dissiper est calculée avec la formule suivante :

$$max_E_diss = FE_ratio \times 38,7 \times DHP^{2,31} \quad 7$$

avec max_E_diss : l'énergie maximale qui peut être dissipée par un arbre « normalisé » et exprimée en joules,

5 Vitesses observées et calculées sur le site de Vaujany avec le principe de la ligne d'énergie avec un angle de 31°



FE_ratio caractérise pour une essence donné son ratio d'énergie de rupture calculé en utilisant comme référence celui d'*Abies alba*, DHP est le diamètre moyen des arbres mesurés à hauteur de poitrine (cm).

Pour de plus amples détails sur cette équation, nous invitons le lecteur à consulter l'article de Dorren et Berger (2006). À titre d'exemple, d'après Dorren et Berger (2006), le FE_ratio pour *Picea abies* est de 0,9. En utilisant un FE_ratio de 1, l'équation 7 représente le maximum d'énergie qui peut être dissipée par un *Abies alba*, et ce en fonction de son diamètre.

Si plusieurs espèces d'arbres sont présentes au sein d'un peuplement forestier, le FE_ratio de l'arbre « normalisé » est calculé en réalisant une moyenne de tous les FE_ratio des essences présentes, pondérée par le taux de présence de celles-ci. Par exemple, si le peuplement est composé à 80 % d'*Abies alba* et à 20 % de *Picea abies*, le FE_ratio de l'arbre « normalisé » sera de 80 % $\times$ 1 + 20 % $\times$ 0,9 = 0,98. Ainsi au final, la capacité de dissipation d'énergie de l'arbre normalisé est déterminée « par un mélange pondéré de toutes les espèces présentes ».

En multipliant l'énergie maximale dissipable par un rideau avec le nombre de rideaux nécessaires pour obtenir un taux d'arrêt de 100 %, on obtient l'énergie totale que peut dissiper le peuplement forestier étudié. Au final le dEc_{factor} peut être calculé à partir des résultats des formules 3, 6 et 7, en utilisant :

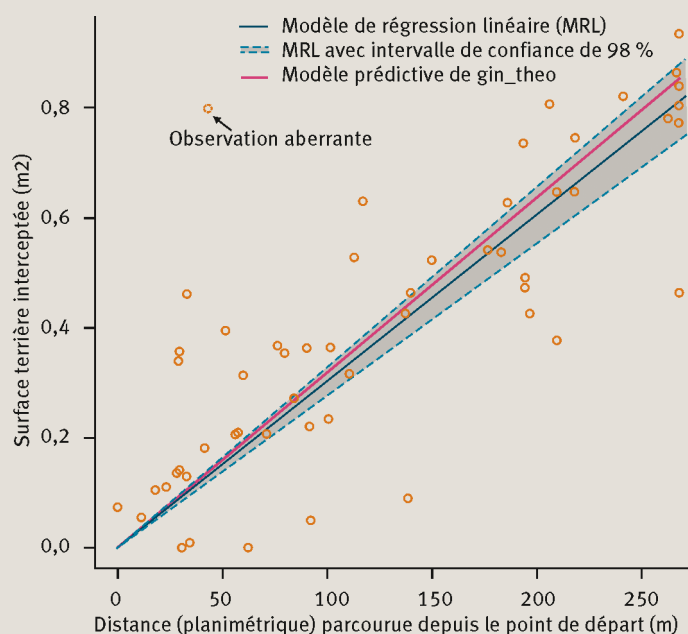
$$dEc_{factor} = E_{totd} / (Nr_{rideau_req} \times max_E_diss) \quad 8$$

Résultats

Ligne d'énergie et vitesse des blocs rocheux

En comparant la vitesse calculée avec le principe de la ligne d'énergie, en utilisant un angle de 31°, aux vitesses observées au cours des expérimentations grandeur nature *in situ* (figure 5) il s'avère que le principe de la ligne d'énergie sous-estime légèrement la vitesse maximale absolue (courbe a de la figure 5) et surestime la vitesse maximale moyenne des projectiles (courbe c de la

6 Représentation graphique de la surface terrière cumulée réellement interceptée ($g_{in_réel}$) et de la surface terrière cumulée théoriquement interceptée ($g_{in_théo}$) par chacun des blocs rocheux (représentés par les cercles oranges), en fonction de la distance planimétrique parcourue depuis le point de départ initial



► figure 5). La courbe de la vitesse maximale absolue (courbe a) correspond à la limite supérieure de toutes les vitesses maximales observées lors de nos expérimentations. La courbe représentative de la vitesse observée du bloc ayant atteint la plus forte vitesse maximale lors de nos expérimentations (courbe d de la figure 5)

confirme que le principe de la ligne d'énergie (courbe b de la figure 5) offre une estimation valide des vitesses maximales mesurée sur la distance parcourue par ce bloc rocheux.

À titre d'illustration, en utilisant le principe de la ligne d'énergie pour calculer l'énergie totale que devrait dissiper un peuplement forestier pour un bloc ayant parcouru une distance planimétrique de 236 m sur une pente de 38° (correspondant à la distance maximale d'arrêt des blocs sur le site expérimental boisé), une chute libre initiale de 0 m, une masse de 1 466 kg, et en tenant compte de notre principe de limitation de V_{max} à 24,3 m/s sur une pente de 38° avec un peuplement forestier ayant au minimum 10 m²/ha de surface terrière, on obtient une énergie totale de 433 565 joules.

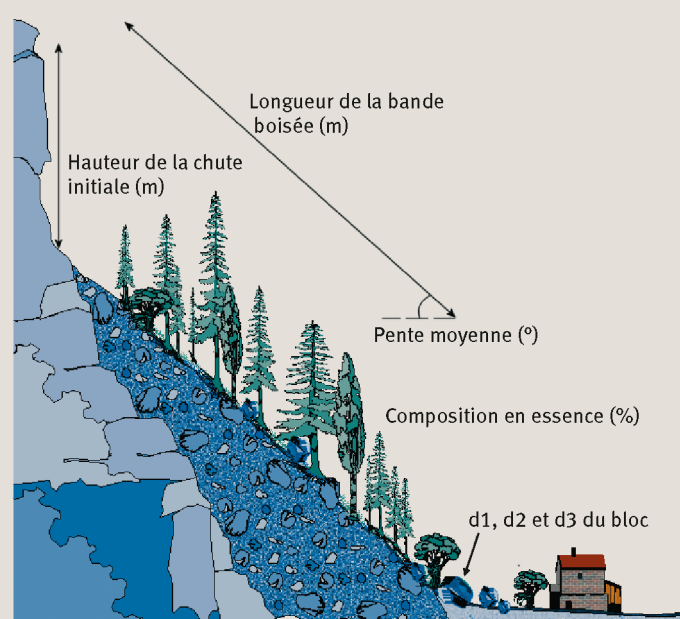
La surface terrière interceptée

De l'analyse de nos données expérimentales, il ressort en premier lieu qu'il y avait une valeur aberrante dans notre jeu de données (figure 6), que nous avons décidé d'exclure de nos analyses. En second lieu et après rejet de la valeur aberrante, il s'avère qu'il existe bien une relation linéaire (figure 6) entre la $g_{in_réel}$ et la distance planimétrique parcourue par les blocs rocheux ($y = 0,003 \times x$, $R^2 = 0,73$, $p < 0,0001$, $n = 56$). De plus, on observe aussi une bonne corrélation entre la régression linéaire de $g_{in_réel}$ et notre modèle théorique de calcul (avec la formule 4) de $g_{in_théo}$ (RMSE = 0,13, $n = 56$). Les tests statistiques ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les deux ($p = 0,46$ avec $\alpha = 0,05$). En outre, des résultats de l'analyse *bootstrap*, il ressort que la pente du modèle linéaire de $g_{in_théo}$ est comprise dans l'intervalle de confiance à 95 % de la pente de régression générée par ré-échantillonnage. Là encore, cette analyse statistique valide notre principe de calcul de $g_{in_théo}$.

Calcul de l'énergie dissipée par rideau

La surface terrière totale qu'un bloc rocheux est théoriquement en mesure d'intercepter ($g_{in_théo}$) à l'aval de notre site expérimental boisé est de 0,55 m². La surface terrière réelle interceptée calculée avec la relation linéaire présentée dans la figure 6 (obtenue avec nos données expérimentales) est de 0,58 m². La $g_{in_théo}$ de 0,55 m² correspond, selon notre principe de calcul, à 5,15 impacts avec des arbres, soit le franchissement de 5,15 rideaux d'arbres. Si, après 5,15 rideaux d'arbres, 66 % des blocs sont arrêtés, et compte tenu de la relation linéaire entre $g_{in_théo}$ et la distance parcourue, alors le nombre total de rideaux nécessaires pour arrêter 100 % des blocs devrait être de 7,81 (équation 6). L'énergie totale qui devra alors être dissipée par le peuplement forestier est égale à 7,81 (nombre total de rideaux) multiplié par l'énergie maximale que peut dissiper un rideau. L'énergie maximale que peut dissiper l'arbre normalisé ayant un FE_ratio de 1,15 correspondant au jeu de paramètres dendrométriques du peuplement forestier présent sur notre site expérimental (*Abies alba* 57 % x 1 + *Picea abies* 13 % x 0,9 + *Fagus sylvatica*

7 Schéma de présentation des principaux paramètres nécessaires à l'utilisation de l'utilitaire internet Rockfor^{NET}



1 Données observées et calculées pour le site de Vaujany

Caractéristiques du site : hauteur de chute initiale = 0 m, pente = 38°, longueur de la bande non boisée = 0 m								
Paramètres forestiers					Description du projectile		ARP observé (%)	ARP calculé avec Rockfor ^{NET} (%)
Longueur de la bande boisée (m)	Densité (arbre/ha)	G (m ² /ha)	DHP (cm)	Composition en essence	Diamètre moyen (m)	Géologie et forme		
222	294	31,6	36,9	<i>Abies alb.</i> 57 % <i>Picea ab</i> 13 % <i>Fagus syl.</i> 23 % <i>Acer ps.</i> 7 %	1	Granit, sphère	34	34
299							0	11

23 % x 1,7 + *Acer pseudoplatanus* 7 % x 1,1) est de 186 166 joules (les valeurs ont été publiées par Dorren et Berger, 2006). Au final, le dEc_{factor} peut être calculé en divisant l'énergie maximale calculée avec le principe de la ligne d'énergie, soit 433 565 joules, par 186 166 joules x 7,81 rideaux, ce qui donne la valeur de 30 %. Cette valeur correspond à la quantification de l'efficacité de chaque rideau, ou de chaque impact avec un arbre normalisé.

Conceptualisation et création de l'utilitaire Rockfor^{NET}

Rockfor^{NET} quantifie, à l'échelle d'un versant, le rôle protecteur d'une forêt vis-à-vis des chutes de pierres, en comparant l'énergie maximale que peut dissiper cette forêt à l'énergie maximale que peut théoriquement développer un projectile rocheux sur un versant de pente similaire mais dépourvu de toute végétation forestière. Pour ce faire, ces deux types d'énergies sont exprimées en terme de surfaces terrières disponibles (G_{disp}) et requise (G_{req}). Pour élaborer cet outil, nous avons supposé que le rapport entre la surface terrière disponible sur le versant et celle théoriquement requise pour arrêter tous les projectiles était représentatif de l'aléa résiduel probable à l'aval de la forêt. Nous définissons l'aléa résiduel probable comme étant le pourcentage de projectiles en mesure de franchir une zone boisée. Rockfor^{NET} calcule cet aléa résiduel probable (ARP*) à l'aval d'un versant boisé de la manière suivante :

$$ARP = 100 - (G_{disp} \times 100 / G_{req}) \quad 9$$

avec l'ARP exprimée en pourcentage.

$$G_{req} = Nr_{rideau_req} \times n \times 0,25 \times DHP^2 \quad 10$$

$$Nr_{rideau_req} = E_{total} / (max_E_{diss} \times dEc_{factor}) \quad 11$$

$$G_{disp} = ((diamètre \text{ du bloc} \times longueur \text{ forêt}) / 10^4 \text{ m}^2/\text{ha}) \times G \quad 12$$

avec DHP exprimé en m, le *diamètre du bloc* est calculé en assimilant celui-ci à une sphère de même volume et la *longueur forêt* est la longueur totale en mètres de la zone boisée.

Nous avons décidé de fixer la valeur minimale de l'ARP calculée par Rockfor^{NET} à 1 %, car le risque zéro n'existe pas tout comme une protection efficace à 100 %. Pour calculer l'ARP, les données requises sont présentées dans la figure 7.

En plus de l'aléa résiduel probable, Rockfor^{NET} donne aussi le nombre d'arbres à l'hectare ainsi que le DHP moyen nécessaires pour obtenir un ARP de 1 %. Ce DHP moyen est calculé en utilisant la formule ci-dessous :

$$DHP_r = \left(\frac{E_{total} * Rideau_{dist}}{Longueur_forêt * FE_ratio * dEc_{factor} * 38,7} \right)^{\frac{1}{2,31}} \quad 13$$

avec $Rideau_{dist}$: la distance entre deux rideaux, dont nous avons fixé la valeur maximale à 30 m et qui correspond à un compromis entre les valeurs maximales de la distance moyenne dégagée d'arbres proposées par Gsteiger (1993), Frehner *et al.* (2005), Dorren *et al.* (2005), et Gauquelin *et al.* (2006).

La densité d'arbres requise peut alors être calculée en utilisant la formule :

$$Req_densité = (4 \times G_{req}) / (n \times DHP_r^2 / 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha}) \quad 14$$

Afin de fournir aux gestionnaires forestiers des valeurs cibles minimale et maximale pour le DHP moyen et la densité d'arbres, la version internet en accès libre de notre utilitaire Rockfor^{NET}: www.rockfor.net, développé en langage PHP* (www.php.net), calcule ces valeurs en faisant varier de plus ou moins 5 % le diamètre du projectile. Ainsi, l'ARP affiché à l'issu des calculs réalisés par Rockfor^{NET} est la valeur moyenne des résultats obtenus avec un diamètre de projectile rocheux de - 5 % et de +5 % par rapport à la donnée saisie par l'utilisateur. En utilisant les valeurs des paramètres présentés dans les paragraphes précédents et en appliquant Rockfor^{NET}

2 Données observées, données initiales utilisées avec Rockfor^{NET} et résultats des travaux de validation

Description générale	Caractéristiques du site			Paramètres		
Localisation, année de l'événement (ref.)	Hauteur de chute initiale (m)	Pente (°)	Longueur de la bande non boisée (m)	Longueur de la bande boisée (m)	Densité (arbres/ha)	
Savournon (France) 05/04/2006	49	28	0	525	1 534	
St. Martin le Vinoux (France) 06/08/1987 (Bigot, 2006)	20	35	0	270	800	
Lumbin (France) 07/01/2002	50	32	0	707	1 080	
Le Fontanil (France) 1998 (inventaire ; Crenn, 1999)	30	32,8	0	148	2 750	
Diemtigtal (Suisse) 2001 (inventaire ; Stoffel <i>et al.</i> , 2006)	50 - 350	40	0	90	523	
Vailly (France) 1997 (expérimentation ; Doche, 1997)	0	38	0	140	485	
Balzers (Lituanie) 1987, (expérimentation ; Jahn, 1988)	0	35,5	0	161	3 400	

► aux conditions de notre site expérimental de Vaujany (tableau 1), on obtient un ARP de 34 % pour une distance planimétrique de 175 m (correspondant à la limite aval de la zone boisée située à l'amont de la piste forestière) et de 11 % pour une distance planimétrique de 236 m (point d'arrêt maximal observé lors de nos expérimentations grandeur nature).

Validation

Pour évaluer la pertinence de Rockfor^{NET}, nous avons testé et validé cet outil avec :

- des phénomènes passés et pour lesquels des données fiables sont disponibles,
- des inventaires forestiers en zones de chutes de pierres et pour lesquels la position des points d'arrêts des blocs a été cartographiée,
- des données expérimentales provenant d'autres sites expérimentaux que celui de notre site de Vaujany.

L'ensemble des sites et des données utilisés pour valider l'utilitaire Rockfor^{NET} est résumé dans le tableau 2. Dans ce tableau sont aussi présentés, pour chacun des sites

tests, la valeur de l'ARP réel et celle de l'ARP calculée avec Rockfor^{NET}.

Discussion

Comme nous l'avons explicité auparavant, le principe de base qui a régi la construction de l'outil Rockfor^{NET} est basé sur la notion de surface terrière interceptable par un projectile rocheux. La relation linéaire qui existe entre nos données expérimentales relatives à la surface terrière réellement interceptée ($g_{in,réel}$) et à la distance d'arrêt, et donc indirectement avec la dissipation de l'énergie développée par les projectiles rocheux, confirme et valide ce principe. La corrélation qui existe entre $g_{in,réel}$ et $g_{in,théo}$ offre une base solide pour l'évaluation quantitative de la fonction de protection des peuplements forestiers vis-à-vis des chutes de pierres. Malgré le fait que Rockfor^{NET} ait été élaboré à partir des seules données et observations de notre site expérimental de Vaujany, on peut conclure, au regard des résultats présentés dans le tableau 2, que son utilisation permet de reproduire les données observées

forestiers			Description du projectile		Aléa résiduel probable	
G (m ² /ha)	DHP (cm)	Composition en essence	Diamètre moyen (m)	Géologie et forme	ARP observé (%)	ARP calculé avec Rockfor ^{NET} (%)
29,6	16	<i>Quercus sp.</i> 5 % <i>Fagus syl.</i> 95 %	2,84	Calcaire, rectangulaire	66	85
16,1	16	<i>Quercus sp.</i> 80 % <i>Pinus ni.</i> 20 %	1	Calcaire, rectangulaire	75	78
23,3	17	<i>Quercus sp.</i> 5 % <i>Acer ps.</i> 62 % <i>Robinia ps.</i> 8 %	2,35	Calcaire, rectangulaire	100	88
34,8	13	<i>Quercus sp.</i> 65 % <i>Fagus syl.</i> 25 % <i>Acer ps.</i> 10 %	1,25	Calcaire, rectangulaire	25	26
20,1	22	<i>Picea ab.</i> 97 % <i>Acer ps.</i> 3 % (estimé)	0,15	Calcaire, rectangulaire	< 5	4 (moyenne)
38,7	28	<i>Picea ab.</i> 48 % <i>Abies alb.</i> 16 % <i>Acer ps.</i> 21 % <i>Fagus syl.</i> 15 %	0,87	Granit, sphérique	34	35
-	13	<i>Fagus syl.</i> 50 % <i>Picea ab.</i> 25 % <i>Pin. sylv.</i> 25 %	0,28	Calcaire, sphérique	0	1

sur d'autres sites. Lors de nos travaux de validation, l'erreur maximale observée a été de 19 % avec une RMSE de 9,3 %. Le point le plus important est que Rockfor^{NET} est en mesure d'estimer correctement l'ARP à l'aval d'une bande boisée, et ce par classe d'ARP de 25, 50 et 75 %. Au regard de ces faits, on peut considérer que les principes de base utilisés lors de la construction de Rockfor^{NET} sont valides.

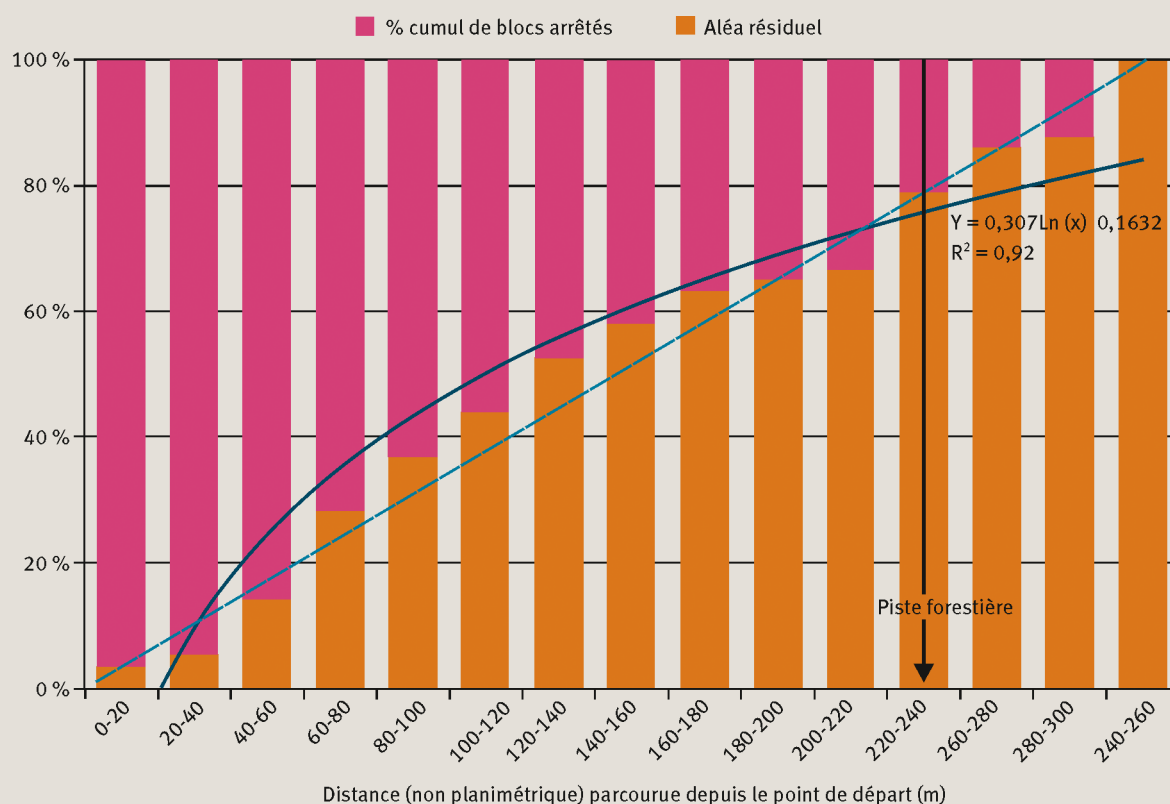
Les autres points forts de cet utilitaire sont que premièrement l'utilisateur n'a pas besoin de calibrer cet outil. Seules des données globales relatives au site étudié, en faible nombre et faciles à relever sur le terrain, sont nécessaires. Deuxièmement, Rockfor^{NET} permet au forestier, pour un site et un volume de projectile donnés, de mieux cerner les caractéristiques, en termes de diamètre moyen et de densité, du peuplement forestier en mesure de fournir un ARP de 1 %. À ce titre, cet utilitaire représente un outil d'aide à la sylviculture. En effet, le forestier peut ainsi déterminer le peuplement objectif offrant la meilleure protection et de fait définir la sylviculture nécessaire à l'obtention de ce peuplement objectif. De plus, le sylviculteur, au regard des résultats de Rockfor^{NET}, peut déter-

miner si une stratégie de protection basée sur la forêt est réaliste ou non.

Si les concepts de cet outil sont valides, celui-ci n'en reste pas moins perfectible. Tout nouvel événement et toute nouvelle expérimentation devront être utilisés pour tester et accroître la robustesse de cet utilitaire. De plus, toutes nouvelles données permettront de ré-étalonner l'outil si besoin. Dans la forme actuelle de cet outil, nous avons pu tester la robustesse des valeurs des paramètres utilisés. Un des paramètres important est le dEc_{factor} , dont la valeur actuelle a été fixée à 0,3. En fait, cette valeur est similaire à celle de la probabilité d'impact frontal d'un arbre par un bloc ($P = 33\%$), type d'impact pour lequel la capacité de dissipation d'énergie d'un arbre est la plus forte (Dorren et Berger, 2006). Il serait intéressant, à partir de nouvelles données expérimentales provenant d'autres sites que celui de Vaujany, de déterminer si cette valeur varie de façon significative.

Par ailleurs, l'élaboration de Rockfor^{NET} a nécessité la formulation de plusieurs hypothèses qui, si elles ont fait l'objet d'une validation générale au regard de la validité du concept de calcul de l'ARP, n'en nécessitent pas moins

8 Représentation graphique du pourcentage cumulé des blocs arrêtés et de la valeur de l'aléa résiduel, en fonction de la distance parcourue depuis le point de départ initial, observés lors des expérimentations grandeur nature sur le site de Vaujany



La courbe en pointillés correspond à la courbe de régression linéaire obtenue avec les données expérimentales et actuellement utilisé au sein de l'outil Rockfor^{NET} ($R^2 = 0,98$). La courbe noire représente la courbe obtenue par régression logarithmique ($R^2 = 0,92$).

► une validation individuelle. La limitation de la vitesse maximale calculée avec le principe de la ligne d'énergie en est un exemple. Un autre exemple est l'hypothèse que la relation linéaire qui existe, pour le peuplement forestier du site de Vaujany, entre la $g_{in_réel}$ et la distance d'arrêt est valable pour tous les types de peuplements. Il est possible que cette fonction soit de type logarithmique comme celle qui existe entre le nombre cumulé de blocs arrêtés et la distance parcourue depuis le point de départ (figure 8). Une fonction de type logarithmique par rapport à une fonction linéaire traduirait une augmentation plus rapide de la capacité de protection d'un peuplement forestier en fonction de la distance parcourue dans la zone boisée. Pour mieux décrire cette fonction, qui est un des moteurs de fonctionnement de Rockfor^{NET}, de nouvelles données expérimentales sont nécessaires.

Les causes d'arrêt autres que les impacts avec les arbres, telles que la rugosité du sol, la présence de pistes et routes, ne sont pas prises en compte dans Rockfor^{NET}. Compte tenu du mode de construction de cet utilitaire et de son objectif d'estimation globale à l'échelle d'un versant, la prise en compte de ces autres causes d'arrêt n'est actuellement pas possible. Toutefois, il faut signaler que les plus petits blocs ont plutôt tendance à s'arrêter à

cause des caractéristiques du terrain (i.e. rugosité du sol) qu'à cause des impacts avec les arbres. La non-prise en compte des structures « planes » telles que les piste et les routes permet d'expliquer que Rockfor^{NET} a calculé à l'aval de la piste forestière du site de Vaujany un ARP de 11 % alors qu'en réalité cette piste correspond au point maximale d'arrêt observé lors de nos expérimentations (figure 8). La voirie forestière est reconnue comme étant une mesure de protection efficace (Dorren *et al.*, 2005). Rockfor^{NET} est actuellement valide pour une configuration de terrain type : présence d'une falaise ou d'une barre rocheuse, avec à son aval une pente relativement constante et qui est couverte par une forêt homogène (figure 7). Les irrégularités de terrain, tels que des affleurements rocheux et la présence de blocs rocheux, ou la présence de couloirs préférentiels au sein de la couverture forestière (occasionnés par des chutes de pierres ou des avalanches) ne peuvent être prises en compte dans cet utilitaire.

Néanmoins, Rockfor^{NET} est le premier outil international opérationnel, de diagnostic rapide de la fonction de protection pare-pierre des forêts à l'échelle d'un versant, actuellement disponible et en accès libre sur internet. Il permet d'obtenir des informations utiles aussi bien aux gestionnaires en charge de la politique de prévention des

risques naturels qu'aux forestiers, et ce en ne nécessitant qu'un faible jeu de données faciles à relever sur le terrain. De plus, il permet de rapidement comparer la capacité de protection pare-pierres de différents peuplements forestiers. Les premiers résultats d'utilisation de Rockfor^{NET} sont prometteurs. Il s'avère être un outil d'aide à la décision adapté pour la gestion des forêts de protection et reste ouvert à toutes actions de développement et de validation.

Conclusions et perspectives

Au final, nous concluons que l'utilitaire Rockfor^{NET} est opérationnel. Il a été construit à partir de concepts qui ont été validés à la fois expérimentalement et à partir d'événements passés. En conséquence, les gestionnaires forestiers disposent ainsi du premier outil de diagnostic rapide de la fonction de protection pare-pierre des forêts à l'échelle d'un versant. Les futurs développements de cet outil portent en priorité sur les travaux de tests et de validations à partir de nouvelles expérimentations grandeur nature in situ. Actuellement, nous travaillons à l'intégration de Rockfor^{NET} au sein de modèles de dynamique et croissance forestière (i.e. SAMSARA). Le croisement de ces modèles permettra de disposer d'une plateforme d'expérimentations numériques afin de tester différents types d'interventions sylvicoles et d'étudier leurs effets sur la capacité de protection des peuplements forestiers. ■

Les auteurs

Frédéric Berger

Cemagref, centre de Grenoble,
UR EMGR, Écosystèmes montagnards,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
frederic.berger@cemagref.fr

Luuk Dorren

Office fédéral de l'environnement,
des forêts et des paysages,
Worblentalstrasse 32,
3063 Ittigen,
Postadresse : 3003 Bern Suisse
luuk.dorren@bafu.admin.ch

Remerciements

Nous remercions George Kunstler, Alain Bédécarrats et Julien Pottier pour leur aide lors des analyses statistiques, Christophe Bigot pour sa participation aux relevés de terrain, Éric Mermin pour ses tests intensifs de Rockfor.NET, ainsi que tous les utilisateurs du site www.rockfor.net qui nous aident à développer et améliorer cet utilitaire.

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- BIGOT, C., 2006, *Regard critique sur une forêt à fonction de protection contre les chutes de blocs - Retour d'expérience à St. Martin le Vinoux (Isère)*, MSc thesis, Cemagref/IGA-UJF, Grenoble, 78 p.
- BRANG, P., 2001, Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the European Alps, *For. Ecol. Manag.*, n° 145, p. 107-119.
- BRAUNER, M., WEINMEISTER, W., AGNER, P., VOSPERNIK, S., HOESLE, B., 2005, Forest management decision support for evaluating forest protection effects against rockfall, *For. Ecol. Manag.*, 207, 1-2, p. 75-85.
- CRENN, R., 1999, *Influence exercée par la forêt exploitée en taillis sur la dynamique du phénomène de chutes de pierres – analyse rétrospective des traces d'un événement récent sur la commune du Fontanil-Cornillon*, 38, MSc thesis, Cemagref/IGA-UJF, Grenoble, 4 p.
- COUVREUR, S., 1982, *Les forêts de protection contre les risques naturels*, École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF), 89 p.

► Consulter l'ensemble des références
sur le site de la revue www.set-revue.fr