

APPROCHE PHYTOSANITAIRE DE L'IMPACT DES BLOCS ROCHEUX SUR LE TRONC DES ARBRES EN FORÊTS DE MONTAGNE

**ALAIN SOUTRENON - JACQUELINE TOURNUT-HUBERT
FRÉDÉRIC BERGER - LUUK K.A. DORREN**

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Les forêts de montagne peuvent offrir une protection efficace contre les chutes de blocs (Couvreur, 1982 ; Dorren *et al.*, 2005a). Une équipe de recherche du Cemagref de Grenoble (UR Écosystèmes montagnards) s'attache à comprendre et à caractériser les interactions entre les peuplements forestiers et les chutes de pierres, et, ainsi, de quantifier le rôle protecteur de la forêt : à cet effet, des expérimentations grandeur nature sont réalisées sur le terrain depuis l'année 2000 afin de développer des outils d'expertises et de simulation numérique. Le peuplement forestier est considéré comme un écran (Berger et Dorren, 2007) capable de freiner ou d'arrêter les blocs rocheux. Cette capacité est déterminée par un certain nombre de caractéristiques sylvicoles (surface, densité, pente, essences présentes, diamètre des arbres à hauteur de poitrine, surface terrière des arbres...).

Des blocs rocheux sphériques d'un diamètre moyen d'environ 1 mètre sont lâchés au moyen d'une pelle mécanique et caractérisés (taille, forme, poids, vitesse, énergie cinétique du projectile, trajectoire, point d'arrêt, distance parcourue). Lors des essais, un suivi cinématographique de la trajectoire, de la vitesse, des points d'impact au sol et sur les arbres, de la hauteur des rebonds des blocs, est effectué avec des caméras numériques à prises de vues rapides : ces mesures ont permis d'étudier la dissipation d'énergie (bloc ralenti, freiné, dévié ou stoppé) occasionnée par les impacts successifs du bloc sur les arbres. Un article détaillé sur les méthodes et les résultats de ces travaux a été publié par Dorren *et al.* (2005b).

Après chaque lâcher, et parmi les nombreux paramètres étudiés, sont réalisés un relevé et une cartographie de tous les positionnements des points d'impact des blocs sur les troncs des arbres blessés, se traduisant, à différentes hauteurs de l'arbre, outre parfois par la cassure de l'arbre, par d'importantes plaies et mises à nu souvent profondes du bois (photo 1, p. 452), pouvant entraîner des dépréciations mécaniques des bois et d'éventuelles infections par des champignons pathogènes d'altération du bois.

OBJECTIF DES TRAVAUX

Le but de cette étude est de vérifier sur le plan phytosanitaire, après prélèvement de carottes de bois sur certains arbres blessés, la présence d'éventuelles infections pathogènes au niveau



Photo 1 Site de Vaujany (Isère).

Vue d'une partie du peuplement impacté : 6 plaies d'impacts de blocs ont été entourées.

des blessures consécutives à l'impact des blocs rocheux sur le tronc des arbres, et en particulier l'action d'agents lignivores⁽¹⁾, parasites de blessure.

Les plaies résultant d'une blessure quelconque du bois, quelle que soit l'essence affectée, sont classiquement considérées comme des portes d'entrée potentielles pour des agents pathogènes responsables d'altération du bois. Bien que cette inquiétude ait été soulevée depuis longtemps, le problème est à peine abordé et les études biologiques s'y rapportant sont à ce jour peu nombreuses. Sont surtout connus les travaux du chercheur américain Shigo et de son équipe (1985) qui portent essentiellement sur les conséquences de petites blessures artificielles et sur les mécanismes de défense des arbres (compartimentage et théorie des barrières). Un effort de recherche bibliographique a été consacré à l'étude des conséquences phytosanitaires des blessures occasionnées aux arbres sur pied lors de divers travaux d'exploitation en forêt (Vasilias, 2001). Par ailleurs, des observations ont été effectuées sur les conséquences phytosanitaires de blessures d'écorçage, notamment sur l'Épicéa (Bazzigher, 1973). Enfin, on peut signaler une étude sur des épicéas morts sur pied (invasion de scolytes après tempête) et atteints de pourriture (notamment *Fomitopsis pinicola*), étude mettant en évidence l'effet de cette pourriture sur la résistance des troncs aux blocs (Amman, 2006).

L'approche phytosanitaire de l'impact des blocs sur le tronc des arbres constitue une première étude dans ce domaine en France : les premiers travaux sur quelques arbres ont été engagés en 2006, surtout dans le but de tester la méthode (Soutrenon *et al.* 2007a, 2007b). Une seconde campagne de prélèvement et d'analyses de carottes de bois sur des arbres différents a été effectuée en 2007 ; elle a permis de comparer les résultats avec ceux obtenus en 2006. Cette étude a notamment permis de connaître pour chacune des essences étudiées le temps nécessaire pour constater la présence d'une infection au sein du bois.

(1) Lignivore : champignon pathogène qui induit une pourriture de bois sur des arbres vivants.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude a été réalisée en forêt communale de Vaujany (Isère, France) à une altitude comprise entre 1 200 m et 1 400 m, sur une pente moyenne de 38 % et relativement uniforme, l'orientation du site étant nord-ouest. Les quatre principales essences présentes dans le peuplement forestier étudié sont le Sapin (*Abies alba* ; 50 % du nombre d'arbres du peuplement), l'Épicéa (*Picea abies* ; 25 %), le Hêtre (*Fagus sylvatica* ; 17 %) et l'Érable (*Acer pseudoplatanus* ; 7 %). Le diamètre moyen à hauteur de poitrine de tous les arbres mesurés est de 31 cm en 2007.

La méthode de prélèvement des carottes à la tarière de Pressler (le diamètre des carottes prélevées est de 4,5 mm) dans la zone impactée et de leur préservation a fait l'objet d'un protocole précis. Afin d'éviter tout problème de dessiccation, les carottes prélevées le matin sur le terrain étaient immédiatement conditionnées et envoyées le jour même (en fin d'après-midi) au laboratoire d'analyse. Les arbres échantillonnés ont été tirés au hasard dans la population d'arbres impactés.

Pour la première campagne (2006), les prélèvements ont été effectués le 3 juillet : 10 arbres différents, répartis dans le peuplement, ont été étudiés : 3 sapins, 3 épicéas, 3 hêtres et 1 érable. Pour chaque arbre, 4 carottes ont été prélevées : 2 au centre et 2 à la périphérie de la plaie.

Pour la deuxième année d'étude (2007), l'échantillonnage des arbres impactés, effectué le 16 juillet, a été augmenté : 20 arbres nouveaux, répartis dans le peuplement (6 sapins, 6 épicéas, 6 hêtres et 2 érables) ont été étudiés ; cette fois-ci, un seul prélèvement à la périphérie de la plaie de chaque arbre a été réalisé. Ce changement de zone de prélèvement a été induit par le fait que nous avons observé, sur les analyses 2006, une plus grande activité des champignons en périphérie de la blessure plutôt qu'au centre.

Aussi bien en 2006 qu'en 2007, les impacts de lâchers de blocs les plus anciens (octobre 2002) ont été privilégiés dans le choix des plaies étudiées.

En 2006, les carottes de bois prélevées ont été, dans un premier temps, envoyées et traitées à la SMAF (Station de Mycologie agricole et forestière ; anciennement UMAF) du LNPV (Laboratoire national de la Protection des Végétaux) basée à Malzéville (près de Nancy). L'identification des Basidiomycètes Aphylophorales⁽²⁾ (agents de pourriture) en culture a été effectuée grâce à la méthode de détermination de Stalpers (1978) selon 100 critères codés.

La mise en évidence et l'identification d'un champignon nécessitent plusieurs étapes :

- La première consiste à isoler sur un milieu de culture gélosé adapté le ou les champignons présents dans l'échantillon de bois.
- Les ensemencements sont conservés dans des conditions de température et de lumière déterminées. Cette deuxième phase, dénommée incubation, favorise la croissance des mycéliums.
- La troisième étape, dite de repiquage, permet d'obtenir des cultures pures de chaque type de champignon. Des fragments de mycélium obtenus en isolement sont déposés sur des milieux gélosés favorables à leur croissance et leur sporulation.
- La dernière phase, quant à elle, a pour but l'identification du matériel mycologique issu des repiquages. Celle-ci fait aussi bien appel à des observations microscopiques qu'aux techniques de biologie moléculaire (analyse ADN).

Les méthodes d'isolement, d'incubation et de repiquage effectuées par les deux laboratoires associés à cette étude la SMAF et le CBS (voir plus loin) sont à peu près équivalentes et sont données en annexe 1 (p. 463).

(2) Le terme Aphylophorale est en train de disparaître du langage des systématiciens, mais il a cependant été conservé dans cet article (NDLR).

TABLEAU II Identification des échantillons prélevés en 2007

Basidiomycètes Aphylophorales (10)	5 Corticiacées <i>Amylostereum chailletii</i> * <i>Peniophora</i> sp. <i>Peniophora incarnata</i> * <i>Cylindrosporium evolvens</i> * <i>Stereum sanguinolentum</i>	Sapin (3) Sapin (1) Sapin (1) Hêtre (1) Épicéa (1)	AP AP AP AP AP
	3 Polyporacées <i>Heterobasidium annosum</i> <i>Trametes versicolor</i> * <i>Polyporus</i> s. sp.	Sapin (1) Hêtre (2) Hêtre (1)	AP AP AP
	1 Coniophoracée <i>Coniophora arida</i>	Hêtre (1)	AP
	1 Hériciacée (terrain 2007) <i>Hericium coralloides</i> *	Sapin (1)	AP
Basidiomycète Agaricale	<i>Pholiota aurivella</i>	Hêtre (1)	AP
Basidiomycète	Inconnu	Sapin (1)	
Ascomycètes (3)	<i>Ophiostoma rectangulosporium</i> <i>Hypoxylon fragiforme</i> <i>Talaromyces</i> sp.	Sapin (1) Hêtre (2) Épicéa (1)	NL AN AP
Deutéromycètes (Champignons imparfaits) (7)	<i>Trichoderma</i> sp. * <i>Cladosporium</i> sp. * <i>Aspergillus</i> sp. * <i>Penicillium</i> sp. * <i>Ulocladium</i> sp. * Dematiacées <i>Humicola</i> sp. *	Sapin Sapin, Épicéa, Érable Sapin, Épicéa Sapin, Épicéa Épicéa Épicéa, Érable Épicéa	NL AN NL PF AC NL NL AN NL NL NL AC
Autres	Bactéries Zygomycète <i>Sterile fungus</i>	Sapin, Épicéa, Hêtre, Érable Hêtre Épicéa, Érable	NL AC NL NL

Deutéromycètes, Ascomycètes : NL : non lignivore ; PF : possible parasite de faiblesse ; AC : possible agent de coloration du bois ; AN : possible antagoniste d'agent de pourriture.

Basidiomycètes : AP : agent de pourriture.

* champignon se retrouvant dans les identifications de 2006 et dans celles de 2007.

(n) = nombre de fois où le champignon a été identifié.

Aussi, en 2006, suite aux difficultés de la détermination précise des 13 Basidiomycètes Aphylophorales néanmoins trouvés, nous avons sollicité le Centraalbureau Voor Schimmelcultures (CBS)⁽³⁾, basé à Utrecht (Pays-Bas) à qui ont été adressées les 13 cultures conservées en boîte de Petri pour des analyses approfondies complémentaires. Ce laboratoire néerlandais d'identification, de renommée mondiale, utilise, en complément de la méthode de Stalpers, une méthode de biologie moléculaire.

Pour la seconde campagne d'étude réalisée en 2007, les carottes de bois prélevées ont été adressées cette fois directement au laboratoire néerlandais CBS.

(3) Centraalbureau Voor Schimmelcultures - Fungal Biodiversity Centre - Institute of the Royal Netherlands - Academy of Arts and Sciences (KNAW) - PO Box 85167 - 3508 AD Utrecht (Pays-Bas).

LES RÉSULTATS DES IDENTIFICATIONS

Des agents cryptogamiques, pathogènes ou non, ont été mis en évidence au niveau des zones de bois impactées étudiées lors des deux campagnes de prélèvements de carottes de bois en 2006 et en 2007 :

- certains d'entre eux appartenait à la classe des Deutéromycètes ou Champignons imparfaits (*Fungi imperfecti*) ou Adélomycètes,
- d'autres appartenait à la classe des Basidiomycètes-Hyménomycètes (baside non cloisonnée) qui comprend notamment l'ordre des Aphylliphorales et l'ordre des Agaricales,
- un petit nombre appartenait à la classe des Ascomycètes.

Les tableaux I et II (pp. 454-455) exposent les résultats trouvés à la suite des prélèvements de carottes de bois et des identifications de 2006 et de 2007.

Les Deutéromycètes ou Champignons imparfaits

Les travaux ont souligné la présence d'une vingtaine de Champignons imparfaits isolés par le laboratoire de la SMAF lors de la campagne 2006 et d'une huitaine lors de celle de 2007 identifiés cette fois par le CBS. Les petites différences de méthode de laboratoire employée pour l'isolement des champignons entre les deux laboratoires peuvent être à l'origine de ce déséquilibre en termes de nombre.

La plupart des Champignons imparfaits ne présentent pas d'une façon générale un caractère pathogène. Ils ne sont pas cause de pourriture ; leur rôle lignivore est négligeable, sinon nul (NL). Bien souvent, certains font partie de la flore normale du bois.

D'une façon générale, ils sont réputés pour envahir très rapidement les tissus ligneux et pour s'installer les premiers (avec certaines bactéries, des champignons de bleuissement et certains Ascomycètes). Ainsi, ces Champignons imparfaits peuvent, en tant qu'organismes envahisseurs primaires ou pionniers, « préparer le terrain » pour l'installation ultérieure d'éventuels agents générateurs de pourriture.

La coloration anormale souvent brune du bois, plus ou moins limitée, est sans doute liée à la présence de certains Champignons imparfaits (coloration biologique) (AC) (*Aureobasidium* sp., *Fusarium solani*, *Fusarium* sp., *Cladosporium* sp., *Libertella* sp., *Humicola* sp.). Certaines bactéries et certains Ascomycètes non lignivores peuvent également induire des colorations biologiques analogues. À noter que la coloration anormale du bois peut aussi résulter, dans un premier temps, de processus physiologiques normaux, consécutifs à la mise à nu des tissus vivants du bois (coloration physiologique ou chimique).

Enfin, des Champignons imparfaits, agents de bleuissement du bois (*Cladosporium* sp., *Aureobasidium* sp.) peuvent être aussi présents (au même titre que certains Ascomycètes).

Enfin, si certains Champignons imparfaits peuvent faire partie de la flore normale du bois, d'autres peuvent jouer un rôle d'antagoniste ou de compétiteur vis-à-vis de certains agents de pourriture (AN) (*Scytalidium album*, *Penicillium* sp., *Fusarium solani*, *Fusarium* sp., *Trichoderma* sp.). Certaines bactéries et certains Ascomycètes peuvent également jouer un rôle d'antagoniste.

Les champignons Basidiomycètes Aphylliphorales, agents de pourriture

Dans un premier temps et avant le démarrage de l'étude phytosanitaire, sur le site forestier, seuls deux champignons Basidiomycètes Aphylliphorales agents de pourriture ont été observés et identifiés à partir de leur fructification (a) ou de leurs dégâts (b) :

- *Fomitopsis pinicola* (a) (tous résineux)
- *Heterobasidion annosum* (b) (Épicéa).

Pourtant très observée dans la forêt étudiée (présence de carpophores) et grand colonisateur des arbres en zones de montagne à partir de blessures, il est étonnant de ne pas avoir retrouvé la présence de l'unguline marginée, *Fomitopsis pinicola*, lors des identifications de 2006 et de 2007. Par contre, le fomes, *Heterobasidion annosum* est un redoutable champignon d'altération du bois au niveau des racines, du collet et du tronc des résineux, la pourriture centrale de cœur pouvant remonter jusqu'à plusieurs mètres de hauteur notamment chez l'Épicéa ; il a été identifié une fois sur Sapin en 2007.

Par ailleurs, la fructification de grande taille d'un agent de pourriture, *Hericium coralloides*, a été observée au niveau d'un impact d'un bloc à la base du tronc, aussi bien en 2006 qu'en 2007, sur le même sapin (photo 2, ci-dessous). Il s'agit de la seule fructification apparente d'un champignon Basidiomycète Aphyllophorale découverte sur l'ensemble du site étudié. Sans avoir fait l'objet d'analyse de laboratoire, *Hericium coralloides* a donc été mentionné dans les tableaux d'identification 2006 et 2007 précédents.

Rappelons que de la nature des enzymes puissantes excrétées par le champignon pathogène dépend le mode de décomposition des bois et l'aspect qu'il prend au cours de l'attaque : on distingue ainsi, selon la configuration et la couleur du bois atteint, trois grands types de pourriture :

- cubique, brune (dégradation de la cellulose et des hémicelluloses, lignine intacte),
- fibreuse, blanche (destruction de la lignine, cellulose peu ou pas attaquée ; pourritures les plus nombreuses),
- alvéolaire et tubulaire, de couleur variable (destruction presque totale de la lignine et de la cellulose).



Photo 2 Fructification de *Hericium coralloides*, masse volumineuse pouvant atteindre 40 cm, à la base d'un sapin impacté.

Les deux caractéristiques essentielles de ces pourritures sont, d'une part une modification importante, ou carrément une perte totale, des propriétés physiques, mécaniques et chimiques du bois qui devient généralement impropre à tout usage, et d'autre part une extériorisation tardive par un carpophage, parfois volumineux, ou par une croûte, apparaissant généralement seulement 4 à 5 ans après le début de l'infection.

Si la découverte de nombreux Champignons imparfaits généralement non pathogènes est normale et logique, la présence importante en 2006 et en 2007 de 13 Basidiomycètes Aphylophorales différents identifiés, agents de pourriture (AP), est étonnante sur des plaies, certes importantes en surface et en profondeur, mais n'ayant que moins de 4 ans d'âge.

Le plus grand nombre d'Aphylophorales a été trouvé chez le Sapin et le Hêtre alors que l'Épicéa et l'Érable en ont révélé peu. *Amylostereum chailletii*, *Cylindrobasidium evolvens* et *Peniophora* sp. ont été les champignons les plus rencontrés.

Certains Basidiomycètes Aphylophorales identifiés en 2006 sur certaines essences ont été retrouvés à nouveau en 2007 sur les mêmes essences.

Certains agents de pourriture décelés, *Pycnoporus cinnabarinus*, *Amylostereum chailletii*, *Bjerkandera adusta* et *Hericium coralloides* (sur Sapin) se rencontrent souvent en forêts de montagne.

Ce nombre important de Basidiomycètes Aphylophorales est peut-être à mettre en relation avec la faible croissance ou la jeunesse de certains arbres, le champignon ayant pu trouver un terrain propice pour se développer au niveau de plaies d'arbres peu vigoureux ou trop jeunes.

Il est à noter que les analyses effectuées sur les carottes d'Épicéa ne révèlent aucune présence d'agent de pourriture en 2006 et un seul agent en 2007, *Stereum sanguinolentum*.

Certaines Aphylophorales décelées au niveau des plaies d'impact se comportent comme des parasites de faiblesse et de blessures. Bon nombre sont des champignons que l'on retrouve également sur bois mort ou blessé.

La description sommaire du type de pourriture, de l'action pathogène, de la fructification et de l'habitat des différents Basidiomycètes identifiés en 2006 et en 2007 est donnée en annexe 2 (p. 464).

DISCUSSION - CONCLUSIONS

On a procédé à l'étude de l'évolution interne d'une éventuelle altération du bois à partir d'impacts importants de blocs sur le tronc et à la vérification de la présence d'agents pathogènes ou non.

La question posée était de déterminer si la plaie d'impact constitue réellement une porte d'entrée préférentielle pour les agents biotiques de pourritures, c'est-à-dire s'il existe un risque de problème phytosanitaire à court et à long terme. Les résultats montrent que moins de 4 années après la blessure, une forte proportion des plaies ont été colonisées par les champignons Basidiomycètes agents de pourriture.

En montagne, les blessures occasionnées par les blocs rocheux sont particulièrement redoutables parce que les bords en sont très irréguliers ; le bois est déchiqueté (photo 3, p. 459) et la cicatrisation souvent difficile et généralement incomplète.

Les blessures dues à l'impact de lourds blocs et mettant fortement à nu le bois à différents niveaux du tronc de l'arbre constituent bien des portes d'entrée potentielles à des champignons pathogènes responsables de pourriture du bois.

Photo 3
Après avoir été freiné et dévié par d'autres arbres, le bloc a été arrêté par l'arbre provoquant une blessure importante à 1,50 m du sol.



Bien entendu, il faut reconnaître que les échantillonnages prélevés en 2006 et en 2007 ne sont pas très nombreux et que deux années d'études ne sont pas suffisantes, mais les premiers résultats sont là, même s'ils représentent plutôt des tendances que des résultats définitifs.

Un récent programme d'étude mené sur 6 ans quant à l'influence du baliage sur la maladie du chancre du Châtaignier (*Cryphonectria parasitica*) en taillis infectés a montré que, en fait et contrairement à des idées reçues, les blessures d'exploitation (notamment de tronçonneuse) se sont cicatrisées pour la plupart en deux ans et n'ont pas constitué de portes d'entrée à d'éventuels agents de pourriture (Soutrenon, 2007).

Toutefois, des niveaux de colonisation aussi élevés ont déjà été observés par d'autres auteurs. Butin (1978) a estimé à partir de données de la littérature que, en moyenne, 75 % des plaies d'arbres, sans précision de leur origine, sont infectées ; dans une étude qu'il a menée sur Épicéa, 60 % des plaies artificielles étaient infectées par des agents de pourriture et d'autres organismes seulement un an après la blessure.

Nos travaux ont souligné l'existence de nombreux Champignons imparfaits, dont le rôle n'est pas pathogène, mais qui peuvent cependant induire une coloration du bois et favoriser, en tant que pionniers, l'installation d'agents de pourriture. Les champignons Basidiomycètes observés sont par contre des agents de pourritures importants.

Parmi les Basidiomycètes Aphylophorales identifiés, certains sont considérés comme de véritables parasites de blessure. Il n'est donc pas étonnant de retrouver au niveau des impacts de

blocs des agents de pourriture comme *Cylindrobasidium evolvens*, *Bjerkandera adusta*, *Ganoderma adpersum*, *Stereum sanguinolentum*, *Heterobasidion annosum*, *Pholiota aurivella*.

Une étude réalisée par Pechmann et Aufsess (1971) sur les champignons de pourriture se développant après écorçage de tronc de résineux a révélé également des agents identifiés dans notre étude : *Stereum sanguinolentum* (espèce la plus fréquente), *Amylostereum areolatum* (proche de *Amylostereum chailletii*), *Heterobasidion annosum*, *Bjerkandera adusta*, *Trametes versicolor*.

Dans une autre étude (Bazzigher, 1973), certains agents de pourriture isolés de dégâts d'écorçage de chèvres subis une vingtaine d'années auparavant dans des pessières naturelles sont les mêmes que ceux trouvés dans notre étude : *Heterobasidion annosum* (le plus fréquent), *Stereum sanguinolentum*, *Bjerkandera adusta* (75 % des 2 083 épicéas échantillonnés étaient atteints de pourriture).

Dans une étude bibliographique, Vasiliauskas (2001) a réalisé un inventaire des champignons trouvés en forêts résineuses à la suite de blessures essentiellement d'exploitation : là encore, on retrouve dans cette liste certains champignons, agents de pourriture, identifiés à la suite de nos travaux : *Stereum sanguinolentum* (espèce la plus fréquente), *Amylostereum chailletii*, *Heterobasidion annosum*, *Coniophora puteana* (proche de *Coniophora arida*).

La présence identifiée du fomes sur sapin en 2007, *Heterobasidion annosum*, qui provoque de forts dommages chez tous les résineux, est à relever. De faibles impacts de blocs peuvent être assimilés à des blessures d'exploitation forestière aux racines et surtout à l'empiètement des arbres ; de telles blessures basales ont été démontrées comme étant des portes d'entrée pour le fomes dans les peuplements.

L'identification des champignons de pourriture informe sur la tenue mécanique de l'arbre atteint : ces agents présentent en général une assez forte spécialisation pour ce qui est des organes attaqués ou des zones de bois infectées. Leur détermination peut permettre de connaître la rapidité de la progression de la pourriture et ses possibilités d'extension.

Cependant, la présence de telles blessures peut ne pas entraîner l'infection du bois par un champignon : en effet, sur un arbre vigoureux, les cellules vivantes sous-jacentes peuvent réagir en élaborant des substances phénoliques et en formant un bourrelet cicatriciel au niveau du bois mis à nu qui assure ainsi l'immunité de l'arbre (nombreux cas observés de plaies en cours de cicatrisation dans la forêt étudiée). Par ailleurs, on ne peut passer sous silence l'efficacité des barrières protectrices naturelles (processus de réaction de l'arbre aux blessures et théorie du compartimentage de Shigo). Enfin, on peut également évoquer l'éventuelle action antagoniste de certains organismes pionniers vis-à-vis des champignons de pourriture ; certains auteurs estiment que la colonisation du bois mis à nu peut être conditionnée par la présence d'antagonistes ou de compétiteurs.

Par ailleurs, le risque d'infection par des champignons de pourritures semble dépendre de l'importance en surface et de la profondeur de la blessure. Dans le cas de dégâts d'écorçage, certains auteurs s'accordent à trouver une corrélation positive entre l'importance de la blessure subie, caractérisée par une estimation de sa surface le plus souvent, et le développement ultérieur d'une colonne d'altération ou de pourriture. Il faut noter que nous disposons, pour notre site expérimental, de la description (largeur, hauteur et profondeur) des blessures provoquées par les impacts des blocs sur les arbres. La prochaine étape de nos travaux sera d'étudier la corrélation qui peut exister entre la nature de la blessure et les agents pathogènes présents.

Le risque d'infection par des agents de pourritures semble dépendre de la vigueur de l'arbre et de sa résistance à la contamination. L'âge et la taille des arbres blessés doivent influencer le

développement de la pourriture (déroutement de l'infection et extension de l'altération). Enfin, les conditions climatiques (température et humidité) sont d'importance au moment de la contamination et au cours de la croissance du champignon dans le bois.

La saison à laquelle naît la blessure doit éventuellement jouer un rôle non négligeable mais peu de données existent actuellement ; des informations relatives à la période de dégâts d'écorçage de résineux et à leurs conséquences s'avèrent parfois contradictoires.

Il n'est pas certain que la présence d'une pourriture ait un effet sur la croissance ou sur la physiologie de l'arbre. Par contre, il est admis que les arbres qui hébergent une pourriture interne du tronc peuvent casser plus facilement : en effet, la présence de pourritures peut se manifester indirectement par la casse du tronc sous l'action de vent à différentes hauteurs de l'arbre (cas de *Bjerkandera adusta*, cause de la « cassure du hêtre » étudiée en Grande-Bretagne au début du XX^e siècle).

Par ailleurs, sur le plan de la vitalité des arbres touchés, il ne faut pas oublier l'effet mécanique des impacts violents des blocs sur les arbres. En effet, les arbres atteints ont été ébranlés, secoués brutalement et d'une manière plus ou moins intense selon la vitesse et la masse du bloc, à différents niveaux du tronc. Ce phénomène de déchaussement a vraisemblablement provoqué une altération plus ou moins prononcée des systèmes racinaires et une perte d'ancrage dans le sol : ceci peut, sans nul doute, conduire à une alimentation hydrique insuffisante des arbres. La santé de certains arbres, déjà handicapés par des plaies importantes et profondes du bois et par des pourritures serait ainsi progressivement compromise pouvant entraîner une durée de survie limitée du peuplement.

Enfin, les arbres impactés, ébranlés, et de ce fait de faible vigueur, présentent un risque de contamination et ne sont pas à l'abri d'éventuelles attaques d'insectes ravageurs tels que des pullulations de scolytes. Ces insectes pourront par la suite atteindre les arbres voisins encore bien venants.

Compte tenu du peu de recul de nos deux années d'études, il est difficile de prévoir à long terme l'évolution de la forêt en fonction des paramètres évoqués : arbres cassés, arbres ébranlés avec des plaies importantes, présence de pourriture évolutive démarrant au niveau des blessures. La forêt, formée en partie d'arbres en situation difficile, conservera-t-elle toujours son rôle efficace de protection, d'écran ? Un suivi précis et des observations de terrain régulières seront nécessaires.

Alain SOUTRENON – Frédéric BERGER – Luuk K.A. DORREN

UR Écosystèmes montagnards
CEMAGREF - Groupement de Grenoble
Domaine Universitaire
2 rue de la Papeterie, BP 76
F-38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES CEDEX
(frederic.berger@cemagref.fr)
(luuk.dorren@cemagref.fr)

Jacqueline TOURNUT-HUBERT

Station de Mycologie agricole et forestière (SMAF)
Laboratoire national de la Protection des Végétaux
Domaine de Pixérécourt
BP 90059
F-54220 MALZÉVILLE
(jacqueline.hubert@agriculture.gouv.fr)

Remerciements

... à Éric Mermin et à Pascal Tardif (Cemagref, UR Écosystèmes montagnards) pour leur collaboration aux prélèvements des carottes de bois en 2006 et 2007, au Centraalbureau Voor Schimmelcultures (CBS) pour sa collaboration technique.

BIBLIOGRAPHIE

- AMMAN (M.). — Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. — ETH Dissertation n° 16638, 2006. — 190 p.
- BAZZIGHER (G.). — Wundfäule in Fichtenwaldungen mit alten Schältschäden. — *European Journal of Forest Pathology*, vol. 3, 1973, pp. 71-82.
- BERGER (F.), DORREN (L.K.A.). — Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. — *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 158 (6), 2007, pp. 157-165.
- BUTIN (H.). — Problems of wood decay in western Europe. — Proceedings of the fifth international conference on problems of root and butt rot in conifers, Kassel Germany, 1978. — pp. 272-275.
- COUVREUR (S.). — Les forêts de protection contre les risques naturels. — École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), 1982. — 89 p.
- DORREN (L.K.A.), BERGER (F.), MÉTRAL (R.). — La Forêt est un filet de protection naturel contre les chutes de pierres. Sylviculture de montagne. — *La Forêt*, 12/05, 2005a, pp. 13-15.
- DORREN (L.K.A.), BERGER (F.), LE HIR, (C.), MERMIN (E), TARDIF (P.). — Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. — *Forest Ecology and Management*, 215 (1-3), 2005b, pp. 183-195.
- PECHMANN (H.), AUFSESS (H.). — Untersuchungen über die Erreger von Stammfäulen in Fichtenbeständen. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 90, 1971, pp. 259-284.
- SHIGO (A.L.). — Les défenses des arbres. — *Pour la Science*, 1985, pp. 69-78.
- SOUTRENON (A.). — Chancre du châtaignier après balivage de taillis infectés (2001-2006) ; des résultats encourageants. — *Forêt-Entreprise*, n° 178, 2007, pp. 44-50.
- SOUTRENON (A.), TOURNUT (J.), BERGER (F.), DORREN (L.K.A.). — Première approche phytosanitaire de l'impact des blocs sur le tronc des arbres forestiers. — Rapport interne Cemagref-UMAF, 2007a. — 6 p.
- SOUTRENON (A.), TOURNUT (J.), BERGER (F.), DORREN (L.K.A.). — Impact de la chute des blocs en montagne. — *La Lettre du DSF*, n° 36, 2007b, pp. 9-10.
- STALPERS (J.A.). — Identification of wood-inhabiting Aphylophorales in pure culture. — Centraalbureau Voor Schimmelcultures, Baarn, 1978. — 248 p. (Studies in Mycology, n° 16).
- VASILIAUSKAS (R.). — Damage to trees due to forestry operations and its pathological signifiacnce in temperate forests : a literature review. — *Forestry*, vol. 74, 2001, pp. 319-336.

Annexe 1 : Méthodologie d'identification des champignons

Méthode d'isolement

À leur réception au laboratoire, les carottes (environ 12 cm de long) sont retirées de leur conditionnement sous une hotte stérile. Ces carottes sont désinfectées en les passant rapidement au-dessus d'une flamme puis déposées, après les avoir préalablement découpées en une trentaine de petites rondelles, sur des milieux de culture gélosés appropriés.

Dans chaque boîte de Petri (polystyrène cristal de 90 mm de diamètre), le milieu de culture standard est un milieu gélosé spécifique contenant, pour un litre de préparation, 12 g d'extrait de malt, 15 g d'agar-agar, 2 ml d'un antibiotique (chloramphénicol) pour lutter contre les bactéries, 1 000 ml d'eau osmosée. Le CBS ajoute également du bénomyl (2 et 4 ppm) pour lutter contre les pollutions et utilise également, pour une faible part de petites rondelles, un milieu spécifique à base de cerises.

Incubation, repiquage

À la SMAF, l'incubation des boîtes de Petri s'effectue dans une enceinte climatique à 22 °C ± 4 °C avec alternance de lumière 12 h/12 h. Pour le laboratoire hollandais CBS, les boîtes incubent de 7 à 28 jours à la température de la salle.

Des observations régulières des boîtes ensemencées sont réalisées. Au bout de 10 à 15 jours, dès que l'on voit la naissance de champignons, on procède à un repiquage. Pour les Basidiomycètes, chaque type de champignon en cours de développement est repiqué sur 5 boîtes de Petri différentes contenant un milieu malt gélosé sans antibiotique, à raison d'un implant par boîte pour identification de tous les champignons présents. Pour les Deutéromycètes (Champignons imparfaits), les repiquages ont été réalisés sur une boîte de malt et une boîte de PDA (Potato Dextrose Agar) à raison de 39 g de PDA en poudre pour 100 ml d'eau osmosée avec un implant par boîte.

Identification après repiquage

L'identification des champignons se réalise à la suite de repiquages sur des milieux gélosés plus favorables à leur croissance et à leur sporulation. Pour les Basidiomycètes, les délais de réalisation des analyses mycologiques sont d'environ 3 mois ; le délai est plus court pour les Deutéromycètes (de 15 jours à un mois et demi).

Il s'agit essentiellement de la détermination des Basidiomycètes Aphylophorales (et Agaricales) en culture. On procède à un prélèvement du mycélium puis à l'observation de celui-ci au microscope entre lame et lamelle.

Deux méthodes sont possibles pour les Basidiomycètes :

- identification classique à partir de la **méthode Stalpers** à partir du mycélium (100 critères codés concernant la composition enzymatique du mycélium, son aspect, sa couleur, sa morphologie microscopique...). Environ 550 espèces de champignons appartenant à l'ordre des Aphylophorales peuvent être identifiées. Éventuellement, on peut procéder à des confrontations avec des cultures de référence ;
- si on se heurte à des difficultés de détermination (comme en 2006), on utilise alors la biologie moléculaire dont les principales étapes sont les suivantes :
 - extraction de l'ADN du champignon,
 - amplification génomique de cet ADN puis électrophorèse,
 - purification de l'ADN,
 - séquençage (caractérisation fine d'un fragment d'ADN par la connaissance de la composition et de l'ordre des nucléotides qui le composent).

Annexe 2 : Description des basidiomycètes identifiés

Basidiomycètes Aphylliphorales

Amylostereum chailletii (*Stereum chailletii*) [Stérée de Chaillet]

- Assez commun sur bois mort de Sapin pectiné, parfois sur Épicéa.
- Fructification en forme de croûte étalée.
- Provoque une pourriture blanche, non active.

Cylindrobasidium evolvens (ou *Corticium laeve*) (ou *Corticium evolvens*)

- Lignivore sur bois mort sur pied ou à terre sur feuillus (Hêtre) et résineux (Sapin, Épicéa).
- Signalé sporadiquement après blessure d'écorçage sur Épicéa.
- Fructification étalée, en croûte sur le bois.
- Agent de pourriture blanche peu actif.

Peniophora incarnata

- Sur branches et troncs morts debout ou tombés de feuillus et de résineux (Sapin).
- Fructification orangée en croûte mince.
- Développe une pourriture blanche, assez active.

Un autre *Peniophora* sp. (sans précision de l'espèce) a été identifié sur Sapin (2007).

Pycnoporus cinnabarinus (ou *Trametes cinnabarina*) [Polypore rouge cinabre]

- Saprophyte sur troncs morts, souches, bois gisants, chablis de feuillus (Hêtre, Bouleau, Merisier, Frêne) et de résineux (Sapin).
- Fructification en forme de console rouge-orangé.
- Se rencontre surtout en forêts de montagne.
- Provoque une pourriture fibreuse, blanche, assez active.

Trametes versicolor (ou *Coriolus versicolor*) [Polypore de couleurs variées]

- Colonise en saprophyte les souches, les troncs abattus et les branches pendantes ou tombées de nombreux feuillus (Hêtre, Bouleau, Merisier) et de quelques résineux.
- Peut se comporter en parasite de faiblesse et de blessure.
- Fructifications en lames minces, coriaces, imbriquées à marge ondulée de couleurs très variées (zones concentriques satinées luisantes alternant avec des zones velues mates).
- Grand destructeur des bois entraînant une pourriture blanche, fibreuse, active, du bois d'aubier.

Bjerkandera adusta (ou *Leptoporus adustus*) (ou *Gloeoporus adustus*) [Leptopore brûlé]

- Se rencontre sur feuillus (Hêtre notamment, Tremble, Érable), à un moindre degré sur résineux (Épicéa).
- Se développe sur les souches, les arbres morts encore debout mais souvent parasite typique de blessure sur arbre vivant (souvent observé après écorçage).
- Fructification mince, veloutée, étalée, grisâtre.
- Induit une pourriture fibreuse, blanche, très active.

Ganoderma adspersum (ou *G. europaeum*) (ou *G. australe*) [Ganoderme d'Europe]

- Lignivore actif saprophyte sur les souches, les troncs morts mais également parasite de blessure et de faiblesse sur arbres vivants.
- Sur un grand nombre d'arbres feuillus, notamment le Hêtre et le Chêne, le Marronnier, le Platane, le Tilleul, le Peuplier, le Frêne. Atteint parfois les résineux (Sapin, Mélèze).
- Fructification en forme de console, bosselée, largement fixée.
- Rencontré surtout dans des parcs, allées et bord de route plutôt qu'en forêt.
- Responsable d'une pourriture blanche, fibreuse, du bois de cœur.

Hericium coralloides (ou *H. alpestre*) (ou *Dryodon coralloides*) [Hydne-coraïl]

- S'observe sur troncs morts, tombés ou debout de résineux (Sapin, Épicéa) et de feuillus (Hêtre et Chêne surtout, Frêne, Orme, Noyer).
- Grande fructification (30 cm de large) charnue avec une base plus ou moins développée et avec de très nombreux aiguillons longs, mous, pendants, blancs.
- Se rencontre en forêts de montagne sur Sapin.
- Lignivore actif à l'automne.

Stereum sanguinolentum [Stereum rougeâtre]

- Très commun sur les souches, les troncs ou les branches de résineux déjà morts (Pin, Sapin, Épicéa, Mélèze).
- Attaque fréquemment les résineux vivants sur pied (pathogène classique de blessure du tronc). Peut également coloniser les blessures basales du tronc.
- Fructifications en forme de croûtes minces plaquées sur le tronc.
- Lignivore actif qui provoque une pourriture fibreuse, blanche, de l'aubier et du bois de cœur.

Heterobasidion annosum (ou *Fomes annosus*) (ou *Ungulina annosa*) [Fomes]

- Provoque des dégâts importants chez tous les résineux : attaque des racines et mortalité chez les pins (maladie du Rond), pourriture centrale de cœur chez l'Épicéa notamment, chez le Sapin, le Pin Weymouth, le Mélèze.
- Fructification en forme de croûte à face supérieure brune et à face inférieure blanchâtre.
- Un des champignons pathogènes les plus dommageables en France sur résineux.

Coniophora arida

- Se trouve sur bois morts, troncs et branches tombés, de résineux (Pin) et de feuillus (Hêtre, Châtaignier).
- Fructification en forme de croûte étalée.
- Provoque une pourriture sèche, active.

Basidiomycète Agaricale

Pholiota aurivella (ou *Dryophila aurivella*) [Pholiote dorée]

- Espèce lignivore destructrice de bois âgés, malades ou morts de certains feuillus (Hêtre, Saule, Orme). Se trouve sur souches, vieux troncs, au pied des troncs morts, parfois sur les bois abattus.
- S'observe en solitaire ou en petites touffes.
- Espèce à chapeau mordoré à squames brunes.
- Se comporte souvent en parasite de blessure ou de faiblesse.

APPROCHE PHYTOSANITAIRE DE L'IMPACT DES BLOCS ROCHEUX SUR LE TRONC DES ARBRES EN FORÊTS DE MONTAGNE (Résumé)

Dans le cadre de ses travaux de recherches sur les interactions entre les peuplements forestiers de montagne et les chutes de pierres, le Cemagref de Grenoble a réalisé plusieurs séries d'expérimentations grandeur nature de lâchers de blocs rocheux sous couvert forestier. Au regard de l'absence d'informations relatives aux conséquences phytosanitaires des blessures provoquées par les chutes de pierres sur le matériel ligneux, l'équipe forêt de montagne du Cemagref de Grenoble a décidé d'initier des premiers travaux de recherche sur cette thématique. Cet article présente les premiers résultats obtenus.

PLANT HEALTH STUDY OF ROCKFALL IMPACT ON TREE STEMS IN UPLAND FORESTS (Abstract)

As part of its research programme on interaction between upland forests and rockfall, Cemagref Grenoble carried out a series of life size simulations by causing rockfalls on a forested slope in the French Alps. The phytosanitary impact of injury to tree stems caused by rockfall is not known, motivating the Cemagref Grenoble mountain forest team to initiate a research project to explore this area. This article presents initial findings.
