
LIBRE ÉVOLUTION DES FORÊTS ET MAÎTRISE DU RISQUE SANITAIRE ASSOCIÉ AUX SCOLYTES DES CONIFÈRES

HERVÉ JACTEL^a – LORENZO MARINI^b

Les écosystèmes forestiers sont fréquemment exposés à des perturbations naturelles telles que les incendies, les tempêtes et les pullulations d'insectes herbivores qui façonnent la structure des peuplements forestiers et en déterminent la dynamique (Atiwill, 1994). Si les perturbations sont donc essentielles à la succession forestière et à la biodiversité, les risques biotiques et abiotiques peuvent avoir aussi un impact négatif sur la santé des forêts (Trumbore *et al.*, 2015) et compromettre la fourniture de certains biens et services écosystémiques (Boyd *et al.*, 2013). Or les forêts européennes semblent de plus en plus menacées par les insectes ravageurs (Seidl *et al.*, 2014), qui peuvent causer d'importantes pertes économiques et des impacts négatifs sur le fonctionnement des écosystèmes *via* les défoliations ou les mortalités d'arbres. Ces risques sylvo-sanitaires croissants sont clairement liés aux multiples pressions exercées par le changement global, aussi bien en termes de modifications du climat, de changement d'utilisation des terres que d'augmentation des invasions d'espèces non indigènes (Seidl *et al.*, 2017 ; Ayres *et al.*, 2018). Dans le même temps, le nombre d'options de gestion des insectes ravageurs a considérablement diminué en forêt. Dans la plupart des pays, les insecticides sont interdits en raison de leur inefficacité et des préoccupations croissantes concernant leurs impacts sur l'environnement (Liebhold, 2012) et la sélection génétique des arbres pour la résistance aux insectes n'a pas tenu ses promesses (Henery, 2011 ; Woodcock *et al.*, 2018).

Une approche prometteuse consiste donc à essayer d'adapter la gestion forestière afin de rendre les peuplements forestiers plus résistants et résilients aux perturbations dues aux insectes ravageurs comme le suggèrent des revues de la littérature scientifique (Jactel *et al.*, 2009 ; Marini *et al.*, 2021). Cependant, les conclusions de ces synthèses bibliographiques indiquent que peu de méthodes sylvicoles existent permettant une protection générale des peuplements forestiers contre différentes espèces de ravageurs, soulignant la nécessité d'une approche au cas par cas. Il est donc possible de s'interroger sur les vertus de la gestion active des forêts pour la prévention des risques sanitaires et d'envisager au contraire ce que seraient les effets d'une absence de gestion dédiée, aussi bien au niveau de la parcelle que du massif forestier. L'analyse comparative de la vulnérabilité aux attaques d'insectes des forêts gérées versus en libre évolution n'a pas encore été menée de façon approfondie.

Nous pouvons néanmoins amorcer cette comparaison en nous focalisant sur le cas des scolytes des conifères, dont certaines espèces comme le scolyte typographe *Ips typographus* L. et le scolyte

^a INRAE, Université de Bordeaux, UMR Biogeco, F-33612 Cestas, France
^b DAFNAE, Université de Padoue, I-35020 Legnaro, Padova, Italie

sténographe *Ips sexdentatus* Boern. en Europe ou *Dendroctonus ponderosae* et *Dendroctonus frontalis* en Amérique du Nord sont parmi les plus dangereuses pour la santé des forêts, notamment dans le contexte du changement climatique (Seidl *et al.*, 2008 ; Marini *et al.*, 2017 ; Hlásny *et al.*, 2019). Ce sont aussi les espèces les mieux étudiées en termes d'impact de la gestion des forêts sur leurs populations (par exemple Weslien *et al.*, 1999 ; Grodzki *et al.*, 2006 ; Mezei *et al.*, 2017 ; Stadelmann *et al.*, 2013 ; Leverkus *et al.*, 2021). Enfin, rappelons que deux des plus importantes polémiques sur la question de l'intervention de l'homme pour limiter des pullulations d'insectes ravageurs dans des forêts sous statut de forte protection ont eu lieu quand il s'est agi de contrôler les attaques massives du scolyte *Ips typographus* dans le parc naturel forestier de Bavière (Mueller, 2011) et le parc naturel de la Bialowieza (Grodzki, 2016).

PRÉVENTION DES ATTAQUES DE SCOLYTES À L'ÉCHELLE DU PEUPEMENT

L'éclaircie des peuplements de conifères est couramment recommandée en Amérique du Nord pour améliorer la résistance des forêts aux attaques de scolytes. La réduction de la surface terrière dans les peuplements de pins se révèle en particulier efficace pour prévenir les infestations de *Dendroctonus ponderosae*, *Dendroctonus frontalis*, *Dendroctonus brevicomis* et *Scolytus ventralis* (Fettig *et al.*, 2007 ; Egan *et al.*, 2010 ; Zhang *et al.*, 2013 ; Hood *et al.*, 2016). De manière surprenante, à notre connaissance, l'éclaircie n'a pas été explicitement testée pour la prévention des attaques de scolytes comme *Ips typographus* dans les forêts européennes. Cependant, les mêmes mécanismes induits par les éclaircies devraient opérer : l'espacement accru entre les arbres hôtes empêche le comportement d'agrégation qui conduit aux attaques en masse des scolytes, et la compétition réduite entre les arbres pour la lumière, l'eau et les nutriments les rend individuellement plus vigoureux et donc mieux à même de mobiliser les réserves énergétiques nécessaires à la production de métabolites secondaires (notamment la résine) impliqués dans leurs réactions de défense (Lieutier, 2007 ; Raffa *et al.*, 2008). Le fait de laisser des forêts en libre évolution pourrait ne pas permettre la réalisation d'éclaircies préventives pour réduire leur vulnérabilité aux attaques de scolytes.

Cependant, d'autres caractéristiques des forêts non gérées pourraient aboutir à réduire cette vulnérabilité. En effet, une autre stratégie favorable à la résistance des forêts à de nombreux ravageurs est l'augmentation de leur diversité. Il est maintenant avéré que les forêts mixtes sont significativement plus résistantes aux attaques d'insectes que les forêts pures (monospécifiques), et cela quels que soient les régimes alimentaires des insectes herbivores, notamment les xylophages (Jactel *et al.*, 2021). Plusieurs études ont ainsi montré une moindre infestation par des scolytes comme les dendroctones (Showalter *et al.*, 1993 ; Aoki *et al.*, 2018) ou les espèces du genre *Ips* (Li *et al.*, 2013 ; Kärvelo *et al.*, 2016 ; Dobor *et al.*, 2020a ; Kaminska *et al.*, 2021) dans les forêts de conifères associés à des essences feuillues. Ce phénomène, appelé « résistance par association », s'explique par plusieurs mécanismes complémentaires comme la réduction de la densité relative d'arbres hôtes, la production de composés volatils répulsifs par les essences non hôtes associées et l'augmentation de l'abondance et de la diversité des prédateurs (Jactel *et al.*, 2021). En particulier, la réduction de la densité d'arbres hôtes et souvent la meilleure croissance des arbres en peuplements mélangés qu'en peuplements purs (« *overyielding* », Jactel *et al.*, 2018) doivent se combiner pour favoriser la vigueur individuelle et donc la résistance aux attaques de scolytes. Ainsi l'Épicéa commun produit 21 % de biomasse de plus en peuplement mélangé avec du Hêtre qu'en peuplement pur (Pretzch & Schütze, 2009) et la croissance du Pin sylvestre et de l'Épicéa sont meilleures dans leurs mélanges que dans leurs peuplements purs (Bielak *et al.*, 2014). Plusieurs études ont aussi montré que les essences feuillues émettent des composés volatils organiques reconnus par les scolytes des conifères et contribuant à réduire le risque de leurs infestations dans les peuplements mélangés (Jactel *et al.*, 2001 ; Zhang & Schlyter, 2004). Enfin Warzée *et al.* (2006) ont démontré que l'abondance de *Thanasimus formicarius*, coléoptère prédateur du

scolyte typographe, est plus importante dans les forêts mélangeant le Pin à l'Épicéa. Si les forêts de conifères en libre évolution sont en mélange avec des essences feuillues, il est donc attendu qu'elles se révèlent moins vulnérables aux attaques de scolytes.

LUTTE CURATIVE CONTRE LES INFESTATIONS DE SCOLYTES À L'ÉCHELLE DES PEUPELEMENTS ET DES MASSIFS

Une fois initiée une pullulation de scolytes, la recommandation classique pour en limiter la progression est la coupe d'arbres (Leverkus *et al.*, 2018). Ces coupes sanitaires visent soit à prélever les arbres endommagés dans les forêts attaquées par les scolytes pour compenser les pertes économiques et réduire les risques (« coupes de récupération »), soit à éliminer rapidement les arbres attaqués par les scolytes pour éviter la propagation de l'épidémie (« coupes d'assainissement »). Dans les deux cas, les buts recherchés sont de diminuer directement les densités de populations de scolytes par évacuation des bois infectés, de réduire le substrat de développement des scolytes (volis, chablis, arbres affaiblis, piles de bois en bord de route), voire de limiter leurs capacités de reproduction en les éloignant de l'aire d'attraction des phéromones d'agrégation.

Malgré l'application courante de ces pratiques par les services en charge de la santé des forêts qui les jugent utiles, notamment après les chablis causés par les tempêtes de neige ou de vent, les preuves scientifiques solides de leur efficacité sont encore douteuses (Six *et al.*, 2014 ; de Groot *et al.*, 2018 ; Leverkus *et al.*, 2021). Des études récentes conduites en Amérique du Nord n'ont trouvé aucune preuve d'une augmentation alarmante des populations de scolytes après des tempêtes en l'absence de coupes sanitaires (Dodds *et al.*, 2019). En Europe, l'abattage sanitaire est une pratique de gestion courante dans la lutte contre *Ips typographus*. Les quelques études à long terme portant sur la dynamique spatiotemporelle des épidémies de l'insecte indiquent des résultats mitigés. Dans certains cas, l'abattage sanitaire semble réduire l'émergence de nouveaux foyers d'infestation, bien que l'effet soit généralement faible par rapport aux coûts de ces interventions (Stadelman *et al.*, 2013). En Suisse, des pullulations de *Ips typographus* ont été observées après la tempête Lothar malgré l'élimination préalable de la majorité des chablis (Stadelman *et al.*, 2013). Les coupes sanitaires dans les forêts de Suède (Schroeder & Lindelöw, 2002) et des Tatras (Mezei *et al.*, 2017 ; Havasova *et al.*, 2017) n'ont pu réduire que partiellement (environ – 50 %) les infestations du scolyte typographe. Comparant la mise en œuvre de coupes sanitaires en Slovaquie et la non intervention en Pologne suite aux pullulations de *Ips typographus* dans les monts Tatra, limitrophes aux deux pays, Grodzki *et al.* (2006) n'ont pu mettre en évidence une différence d'efficacité dans la régulation des pullulations du scolyte. Il a parfois même été observé que les coupes sanitaires ont contribué à augmenter la mortalité des arbres sur pied en rendant le microclimat plus chaud et donc plus favorable aux scolytes en bordure de coupes rases (Kautz *et al.*, 2013). Ces études empiriques ont été récemment complétées par des exercices de modélisation permettant de simuler des dynamiques de pullulations de scolytes (le plus souvent *Ips typographus*) et les effets de différentes options de coupes pour en limiter les conséquences en termes de mortalité d'arbres. Ces simulations montrent que l'efficacité de l'évacuation des arbres abattus par la tempête pour prévenir les épidémies de scolytes n'est atteinte qu'en cas d'effort massif, représentant plus de 80 % à 95 % des chablis (Dobor *et al.*, 2020b ; Dobor *et al.*, 2020c). De même, Augustynczyk *et al.* (2021) indiquent que seul l'enlèvement de l'intégralité des arbres touchés par les tempêtes permettrait de contrôler une pullulation de scolytes. La configuration spatiale des opérations de coupes sanitaires apparaît également importante, avec un plus grand effet des arbres évacués sur de grandes surfaces continues qu'en bandes au bord des routes. En revanche, laisser des parties du paysage forestier sans intervention ne paraît pas aggraver le risque épidémique (Dobor *et al.*, 2020c).

Sur la base de ces résultats et compte tenu de l'effet négatif potentiel des coupes sanitaires sur les services écosystémiques (comme le stockage de carbone) et sur la biodiversité (en réduisant le volume de bois mort ; par exemple Lassaue *et al.*, 2011), certains auteurs ont préconisé une stratégie de non-intervention (Grodzki *et al.*, 2006 ; Kulakowski, 2016). La non-intervention permet la mortalité naturelle des arbres et n'interfère pas avec les interactions biotiques complexes entre l'arbre hôte, les scolytes et leurs ennemis naturels. Des gestionnaires ont déjà adopté cette stratégie en raison des restrictions d'intervention dans certaines zones de conservation de la biodiversité, notamment dans les parcs naturels ou les réserves naturelles. Par conséquent, plusieurs études ont pu comparer la dynamique des épidémies de scolytes à l'intérieur et à l'extérieur de ces zones, montrant que les multiples pratiques visant à atténuer la mortalité des arbres en forêt gérée ont été largement inefficaces (Mezei *et al.*, 2017 ; Vanicka *et al.*, 2020). Il faut toutefois souligner que la plupart des études comparant zones gérées et non gérées étaient séparées par des distances inférieures à la capacité de dispersion des scolytes (Valeria *et al.*, 2016). Enfin, rappelons que si la disponibilité en substrats de reproduction sous la forme d'arbres abattus par la tempête est souvent le déclencheur des pullulations de scolytes, la forte compétition intraspécifique pour les arbres hôtes en est le principal mécanisme de régulation endogène, conduisant à l'extinction naturelle des foyers d'infestation, aussi bien chez *Ips typographus* (Marini *et al.*, 2013) que chez *Ips sexdentatus* (Pineau *et al.*, 2017).

CONCLUSION

Sur la base des publications disponibles en Amérique du Nord et en Europe, il n'existe donc pas de preuves solides pour confirmer l'intérêt de mettre en œuvre des mesures de gestion curative pour réduire ou supprimer les pullulations de scolytes dans les forêts de conifères. Cela est dû à la fois à la faible efficacité des coupes sanitaires pour limiter les pullulations et aux impacts environnementaux négatifs associés aux interventions sur de grandes surfaces et au prélèvement de grandes quantités d'arbres, comme la réduction du stock de carbone, le compactage des sols ou la destruction d'habitats pour la faune. Il apparaît de même que les conditions d'une prévention des attaques de scolytes, telles que la réduction de la densité d'arbres hôtes (ici les conifères) et l'augmentation de la diversité des essences forestières (ici le mélange conifères – feuillus), peuvent être réunies dans certaines forêts laissées en libre évolution.

Les mesures de gestion ou de non gestion que nous avons passées en revue visaient à réduire l'importance de l'aléa biotique constitué par les pullulations de scolytes et à diminuer la vulnérabilité des peuplements exposés à ces perturbations. Mais l'appréhension complète du risque intègre une troisième composante, qui correspond aux enjeux socioéconomiques menacés par les dégâts résultant d'un aléa touchant un système vulnérable. Intégrant plusieurs types d'aléas, notamment les attaques de scolytes, une analyse multicritère a été conduite pour comparer les niveaux de risques multiples associés à différents modes de gestion des plantations de Pin maritime (Régolini *et al.*, 2020). Cette étude a montré que le système de non gestion correspondait à l'une des alternatives les plus pertinentes pour réduire ces risques. Ce classement favorable tient à une vulnérabilité limitée des plantations non gérées aux aléas biotiques mais surtout à une faible valeur sur pied en termes de volume de bois commercialisable. Cette dimension économique du risque, comprenant la valeur des services écosystémiques fournis, devrait donc être mieux prise en compte dans la décision de maintenir ou d'abandonner la gestion active des écosystèmes forestiers.

Cet article est centré sur le cas des espèces de scolytes dont les pullulations se traduisent par d'importantes mortalités dans les forêts de conifères mais d'autres études seraient nécessaires pour compléter l'examen des effets de la libre évolution des forêts sur le risque sylvo-sanitaire. Il conviendrait en particulier de se pencher sur la question émergente des espèces exotiques envahissantes d'insectes forestiers. Leur nombre est en effet en constante augmentation dans les forêts

européennes (Brockerhoff et Liebhold, 2017) et il peut arriver que ces espèces exotiques s'établissent dans des forêts sous statut de protection comme les zones Natura 2000 (Gallardo *et al.*, 2017). La question se pose alors de l'application des arrêtés de lutte obligatoire imposés par la législation européenne. Ainsi, par exemple, la décision de la Commission européenne du 26/09/2012 sur les mesures d'urgence pour prévenir l'expansion du nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus*) en Europe impose l'éradication des foyers d'arbres infestés par coupe rase mais laisse la place à des méthodes alternatives (non précisées) de coupes d'arbres dans les zones protégées pour la conservation des habitats naturels et de la faune et flore sauvages (Directive du 21/05/1992). Il serait donc utile d'anticiper ces cas problématiques en développant des recherches sur des méthodes d'éradication ne nécessitant pas d'interventions sylvicoles (par exemple par piégeage de masse, Tobin *et al.*, 2011), afin notamment de prévenir d'éventuels conflits entre propriétaires de forêts en libre évolution contaminées par des espèces à éradiquer et les propriétaires voisins.

Hervé JACTEL

Entomologie forestière & Biodiversité
INRAE, Université de Bordeaux UMR BIOGECO
69 route d'Arcachon
F-33612 CESTAS CEDEX
(herve.jactel@inrae.fr)

Lorenzo MARINI

DAFNAE, Université de Padoue
Viale dell'Università 16
I-35020 LEGNARO, PADOVA
ITALIE
(lorenzo.marini@unipd.it)

RÉFÉRENCES

- Aoki, C.F., Cook, M., Dunn, J., Finley, D., Fleming, L., *et al.* (2018). Old pests in new places: Effects of stand structure and forest type on susceptibility to a bark beetle on the edge of its native range. *Forest Ecology and Management*, 419-420, 206-219.
- Augustynczyk, A.L., Dobor, L., & Hlásny, T. (2021). Controlling landscape-scale bark beetle dynamics: Can we hit the right spot? *Landscape and Urban Planning*, 209, 104035.
- Attwill, P.M. (1994). The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management*, 63, 247-300.
- Ayres, M.P., & Lombardero, M.J. (2018). Forest pests and their management in the Anthropocene. *Canadian Journal of Forest Research*, 48, 292-301.
- Bielak, K., Dudzińska, M., & Pretzsch, H. (2014). Mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] can be more productive than monocultures. Evidence from over 100 years of observation of long-term experiments. *Forest systems*, 23(3), 573-589.
- Boyd, I.L., Freer-Smith, P.H., Gilligan, C.A., & Godfray, H.C.J. (2013). The consequence of tree pests and diseases for ecosystem services. *Science*, 342(6160).
- Brockerhoff, E.G., & Liebhold, A.M. (2017). Ecology of forest insect invasions. *Biological Invasions*, 19(11), 3141-3159.
- De Groot, M., Ogris, N., & Kobler, A. (2018). The effects of a large-scale ice storm event on the drivers of bark beetle outbreaks and associated management practices. *Forest Ecology and Management*, 408, 195-201.
- Dobor, L., Hlásny, T., & Zimová, S. (2020a). Contrasting vulnerability of monospecific and species-diverse forests to wind and bark beetle disturbance: The role of management. *Ecology and Evolution*, 10(21), 12233-12245.
- Dobor, L., Hlásny, T., Rammer, W., Zimová, S., Barka, I., & Seidl, R. (2020b). Is salvage logging effectively dampening bark beetle outbreaks and preserving forest carbon stocks? *Journal of Applied Ecology*, 57, 67-76.
- Dobor, L., Hlásny, T., Rammer, W., Zimová, S., Barka, I., & Seidl, R. (2020c). Spatial configuration matters when removing wind-felled trees to manage bark beetle disturbances in Central European forest landscapes. *J. Environ. Manage.*, 254, 109792.

- Dodds, K.J., DiGirolomo, M.F., & Fraver, S. (2019). Response of bark beetles and woodborers to tornado damage and subsequent salvage logging in northern coniferous forests of Maine, USA. *Forest Ecology and Management*, 450, 1174-89.
- Egan, J.M., Jacobi, W.R., Negron, J.F., Smith, S.L., & Cluck, D.R. (2010). Forest thinning and subsequent bark beetle-caused mortality in Northeastern California. *Forest Ecology and Management*, 260, 1832-1842.
- Fettig, C.J., Klepzig, K.D., Billings, R.F., Munson, A.S., Nebeker, T.E., Negrón, J.F., & Nowak, J.T. (2007). The effectiveness of vegetation management practices for prevention and control of bark beetle infestations in coniferous forests of the western and southern United States. *Forest Ecology and Management*, 238(1-3), 24-53.
- Gallardo, B., Aldridge, D.C., González-Moreno, P., Pergl, J., Pizarro, M., Pyšek, P., & Vilà, M. (2017). Protected areas offer refuge from invasive species spreading under climate change. *Global change biology*, 23(12), 5331-5343.
- Grodzki, W., Jakuš, R., Lajzová, E., Sitková, Z., Maczka, T., & Škvarenina, J. (2006). Effects of intensive versus no management strategies during an outbreak of the bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col.: Curculionidae, Scolytinae) in the Tatra Mts. in Poland and Slovakia. *Annals of forest science*, 63(1), 55-61.
- Grodzki, W. (2016). Mass outbreaks of the spruce bark beetle *Ips typographus* in the context of the controversies around the Białowieża Primeval Forest. *Leśne Prace Badawcze / Forest Research Papers*. Grudzień, 77(4), 324-331.
- Havašová, M., Ferenčík, J., & Jakuš, R. (2017). Interactions between windthrow, bark beetles and forest management in the Tatra national parks. *Forest Ecology and Management*, 391, 349-361.
- Henery, M.L. (2011). The constraints of selecting for insect resistance in plantation trees. *Agric. For. Entomol.*, 13, 111-120.
- Hlásny, T., Krokene, P., Liebhold, A., Montagné-Huck, C., Müller, J., Qin, H., & Viiri, H. (2019). *Living with bark beetles: impacts, outlook and management options* (No. 8). European Forest Institute.
- Hood, S. M., Baker, S., & Sala, A. (2016). Fortifying the forest: thinning and burning increase resistance to a bark beetle outbreak and promote forest resilience. *Ecological Applications*, 26(7), 1984-2000.
- Jactel, H., Nicoll, B.C., Branco, M., Gonzalez-Olabarria, J.-R., Grodzki, W., et al. (2009). The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science*, 66, 701-701.
- Jactel, H., Gritti, E.S., Drössler, L., Forrester, D.I., Mason, W.L., Morin, X., & Castagneyrol, B. (2018). Positive biodiversity-productivity relationships in forests: climate matters. *Biology Letters*, 14(4), 20170747.
- Jactel, H., Moreira, X., & Castagneyrol, B. (2021). Tree Diversity and Forest Resistance to Insect Pests: Patterns, Mechanisms, and Prospects. *Annual Review of Entomology*, 66, 277-296.
- Jactel, H., Van Halder, I., Menassieu, P., Zhang, Q.H., & Schlyter, F. (2001). Non-host volatiles disrupt the response of the stenographer bark beetle, *Ips sexdentatus* (Coleoptera: Scolytidae), to pheromone-baited traps and maritime pine logs. *Integrated Pest Management Reviews*, 6(3), 197-207.
- Kamińska, A., Lisiewicz, M., Kraszewski, B., & Stereńczak, K. (2021). Mass outbreaks and factors related to the spatial dynamics of spruce bark beetle (*Ips typographus*) dieback considering diverse management regimes in the Białowieża forest. *Forest Ecology and Management*, 498, 1195-30.
- Kärvelo, S., Johansson, V., Schroeder, M., & Ranius, T. (2016). Local colonization-extinction dynamics of a tree-killing bark beetle during a large-scale outbreak. *Ecosphere*, 7(3), e01257.
- Kautz, M., Meddens, A.J.H., Hall, R.J., & Armeth, A. (2017). Biotic disturbances in Northern Hemisphere forests – a synthesis of recent data, uncertainties and implications for forest monitoring and modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 26(5), 533-552.
- Kautz, M., Schopf, R., & Ohser, J. (2013). The “sun-effect”: microclimatic alterations predispose forest edges to bark beetle infestations. *Eur. J. For. Res.*, 132, 453-465.
- Kulakowski, D. (2016). Managing bark beetle outbreaks (*Ips typographus*, *Dendroctonus* spp.) in conservation areas in the 21st century. *For. Res. Pap.*, 77, 352-357.
- Lassauce, A., Paillet, Y., Jactel, H., & Bouget, C. (2011). Deadwood as a surrogate for forest biodiversity: meta-analysis of correlations between deadwood volume and species richness of saproxylic organisms. *Ecological Indicators*, 11(5), 1027-1039.
- Leverkus, A.B., Lindenmayer, D.B., Thorn, S., & Gustafsson, L. (2018). Salvage logging in the world's forests: Interactions between natural disturbance and logging need recognition. *Global Ecology and Biogeography*, 27(10), 1140-1154.
- Leverkus, A.B., Buma, B., Wagenbrenner, J., Burton, P.J., Lingua, E., Marzano, R., & Thorn, S. (2021). Tamm review: Does salvage logging mitigate subsequent forest disturbances? *Forest Ecology and Management*, 481, 1187-21.
- Li, J., Shi, J., Luo, Y., & Heliovaara, K. (2013). Responses of monophagous *Ips subelongatus* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) and polyphagous *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Lymantriidae) to tree species mixture. *Entomological news*, 123(1), 5-14.

- Liebhöhd, A.M. (2012). Forest pest management in a changing world. *Int. J. Pest Manag.*, 58, 289-295.
- Lieutier, F. (2007). Host resistance to bark beetles and its variations. pp. 135-180. *In: Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis*. Dordrecht: Springer.
- Marini, L., Ayres, M.P., & Jactel, H. (2021). Impact of forest stand management and landscape structure on insect disturbances. *Annual Review of Entomology*, 67, 181-199.
- Marini, L., Lindelöw, Å., Jönsson, A.M., Wulff, S., & Schroeder, L.M. (2013). Population dynamics of the spruce bark beetle: a long-term study. *Oikos*, 122(12), 1768-1776.
- Marini, L., Økland, B., Jönsson, A.-M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., & Schroeder, M. (2017). Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*, 40(12), 1426-1435.
- Mezei, P., Blaženec, M., Grodzki, W., Škvarenina, J., & Jakuš, R. (2017). Influence of different forest protection strategies on spruce tree mortality during a bark beetle outbreak. *Annals of forest science*, 74(4), 1-12.
- Mezei, P., Blaženec, M., Grodzki, W., Škvarenina, J., & Jakuš, R. (2017). Influence of different forest protection strategies on spruce tree mortality during a bark beetle outbreak. *Annals of forest science*, 74(4), 1-12.
- Mueller, M. (2011). How natural disturbance triggers political conflict: bark beetles and the meaning of landscape in the Bavarian Forest. *Global Environmental Change*, 21(3), 935-946.
- Pineau, X., Bourguignon, M., Jactel, H., Lieutier, F., & Sallé, A. (2017). Pyrrhic victory for bark beetles: Successful standing tree colonization triggers strong intraspecific competition for offspring of *Ips sexdentatus*. *Forest Ecology and Management*, 399, 188-196.
- Pretzsch, H., & Schütze, G. (2009). Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe: evidence on stand level and explanation on individual tree level. *European Journal of Forest Research*, 128(2), 183-204.
- Raffa, K.F., Aukema, B.H., Bentz, B.J., Carroll, A.L., Hicke, J.A., Turner, M.G., & Romme, W.H. (2008). Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. *Bioscience*, 58(6), 501-517.
- Régolini, M., González, A.A., Branco, M., Meredieu, C., Jactel, H., Amiano, A.C., & Orazio, C. (2020). Multi-criteria analysis to compare multiple risks associated with management alternatives in planted forests. *Forest systems*, 29(2), 1-17.
- Schroeder, L.M., & Lindelöw, Å. (2002). Attacks on living spruce trees by the bark beetle *Ips typographus* (Col. Scolytidae) following a storm-felling: a comparison between stands with and without removal of wind-felled trees. *Agricultural and forest entomology*, 4(1), 47-56.
- Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., & Lexer, M.J. (2008). Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 209-220.
- Seidl, R., Schelhaas, M. J., Rammer, W., & Verkerk, P.J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature climate change*, 4(9), 806-810.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., & Reyer, C.P. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature climate change*, 7(6), 395-402.
- Showalter, T.D., & Turchin, P. (1993). Southern pine beetle infestation development: interaction between pine and hardwood basal areas. *Forest Science*, 39(2), 201-210.
- Six, D., Biber, E., & Long E. (2014). Management for mountain pine beetle outbreak suppression: Does relevant science support current policy? *Forests*, 5, 103-133.
- Stadelmann, G., Bugmann, H., Meier, F., Wermelinger, B., & Bigler, C. (2013). Effects of salvage logging and sanitation felling on bark beetle (*Ips typographus* L.) infestations. *Forest Ecology and Management*, 305, 273-281.
- Tobin, P.C., Berc, L., & Liebhold, A.M. (2011). Exploiting Allee effects for managing biological invasions. *Ecology letters*, 14(6), 615-624.
- Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2015). Forest health and global change. *Science*, 349, 814-818.
- Valeria, M., Coralie, B., Petr, D., Susanne, K., Jan, O., et al. (2016). How differential management strategies affect *Ips typographus* L. dispersal. *Forest Ecology and Management*, 360, 195-204.
- Vanícká, H., Holuša, J., Resnerová, K., Ferenčík, J., Potterf, M., et al. (2020). Interventions have limited effects on the population dynamics of *Ips typographus* and its natural enemies in the Western Carpathians (Central Europe). *Forest Ecology and Management*, 470-471, 118209.
- Warzée, N., Gilbert, M., & Grégoire, J.C. (2006). Predator/prey ratios: a measure of bark-beetle population status influenced by stand composition in different French stands after the 1999 storms. *Annals of forest science*, 63(3), 301-308.

- Weslien, J., & Schroeder, L.M. (1999). Population levels of bark beetles and associated insects in managed and unmanaged spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 115(2-3), 267-275.
- Woodcock, P., Cottrell, J.E., Buggs, R.J.A., & Quine, C.P. (2018). Mitigating pest and pathogen impacts using resistant trees: a framework and overview to inform development and deployment in Europe and North America. *Forestry*, 91, 1-16.
- Zhang, J., Ritchie, M.W., Maguire, D.A., & Oliver, W.W. (2013). Thinning ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) stands reduces mortality while maintaining stand productivity. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 311-320.
- Zhang, Q.H., & Schlyter, F. (2004). Olfactory recognition and behavioural avoidance of angiosperm nonhost volatiles by conifer-inhabiting bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, 6(1), 1-20.

LIBRE ÉVOLUTION DES FORÊTS ET MAÎTRISE DU RISQUE SANITAIRE ASSOCIÉ AUX SCOLYTES DES CONIFÈRES (Résumé)

Les forêts tempérées subissent un fort accroissement des attaques d'insectes ravageurs en réponse aux changements climatiques comme en attestent l'augmentation récente des pullulations de scolytes des conifères. Avec l'interdiction des insecticides et l'impasse de la sélection génétique, adapter la gestion des forêts pour prévenir ou contrôler ces infestations demeure la meilleure option. En termes de prévention, l'augmentation de la diversité des essences forestières, associant conifères et feuillus, permet de réduire la densité d'arbres hôtes, de renforcer leur vigueur, de perturber les processus de colonisation et de maintenir les ennemis naturels, améliorant globalement la résistance des peuplements aux attaques de scolytes. En termes de lutte, les coupes sanitaires visant à évacuer les bois scolytés et à limiter leur substrat de développement ne sont que rarement efficaces, à moins d'être pratiquées rapidement en visant la quasi-totalité du volume de chablis. Les forêts en libre évolution, pourvu qu'elles soient composées d'un mélange équilibré d'essences contrastées, n'apparaissent donc pas intrinsèquement plus vulnérables aux attaques de scolytes.

LONG TIME UNMANAGED FORESTS AND CONTROL OF THE SANITARY RISK LINKED TO BARK BEETLES ON CONIFEROUS TREES (Abstract)

Temperate forests are experiencing a sharp increase in insect pest attacks in response to climate change, as evidenced by the recent rise in conifer bark beetle outbreaks. As a result of the banning of insecticides and the deadlock of genetic selection, the best option remains to adapt forest management in order to prevent or control these infestations. In terms of prevention, increasing the diversity of forest species by combining coniferous and deciduous trees reduces the density of host trees, increases their vigour, disrupts colonization processes and maintains natural enemies, and this improves the overall resistance of stands to bark beetle attacks. In terms of control, sanitation harvestings to remove trees infested by bark beetles and reduce their breeding substrate are rarely effective, unless they are carried out rapidly and target almost the entire volume of windfall. Therefore, long time unmanaged forests do not appear to be intrinsically more vulnerable to bark beetle attacks, provided that they are composed of a balanced mixture of contrasting tree species.

Citation de l'article :

Jactel, H., & Marini, L. (2021). Libre évolution des forêts et maîtrise du risque sanitaire associé aux scolytes des conifères. *Revue forestière française*, 73(2-3 « Des forêts en libre évolution »), 383-390. doi : 10.20870/revforfr.2021.5477



Licence Creative Commons

Attribution + Pas de Modification + Pas d'Utilisation Commerciale (BY ND NC)