

Evolution des risques biotiques en forêt

Jactel H.¹, Desprez-Loustau M.L.¹, Marçais B.², Piou D.³, Robinet C.⁴, Roques A.⁴

¹ INRA, UMR BIOGECO, 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas Cedex, France

² INRA, UMR IaM, F 54280 Champenoux, France

³ Département de la Santé des Forêts, 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas Cedex, France

⁴ INRA, URZF, 2163, avenue de la pomme de pin, CS 40001 Ardon, 45075 Orléans cedex 2, France

Correspondance : herve.jactel@pierroton.inra.fr

Résumé

Le risque biotique en forêt combine la probabilité d'occurrence de l'aléa biotique (attaque d'insecte ravageur ou infection par un champignon pathogène), le niveau de vulnérabilité de la forêt à cet aléa (déterminant l'ampleur du dégât) et l'enjeu socio-économique de ce dégât, c'est-à-dire la valeur de la fonction assurée par cet écosystème forestier et susceptible d'être impactée. Ces trois composantes du risque montrent une évolution inquiétante sous l'effet des changements globaux. L'augmentation des dégâts de tempête s'est accompagnée d'une recrudescence des pullulations de scolytes et la hausse des températures favorise les insectes défoliateurs comme la processionnaire du pin ou certains champignons foliaires. De plus en plus d'insectes et de pathogènes exotiques s'établissent en France en raison de l'accélération des échanges commerciaux. L'intensification des sécheresses accroît la vulnérabilité des forêts aux attaques d'insectes et de champignons alors que la réduction de la diversité spécifique ou génétique dans les forêts de plantation s'accompagne d'une moindre résistance aux aléas biotiques. L'augmentation de la surface des forêts, du volume sur pied, des services rendus par les écosystèmes forestiers accentue l'enjeu économique des dommages forestiers qui seraient de l'ordre de 2 milliards d'euros par an en France. Des recherches approfondies doivent donc être menées pour mieux analyser et prévenir ce risque biotique qui va probablement augmenter avec les changements climatiques.

Mots-clés : risque, aléa, vulnérabilité, enjeu, insectes ravageurs, champignons pathogènes, changement climatique, invasion

Abstract: Changes in biotic risks in forests

Three main components determine biotic risks: (i.) the likelihood of biotic hazards like pest insects or fungal pathogens, (ii.) the vulnerability of the forest to damaging forces of hazards and (iii.) the exposure which represents the value of forests exposed to the hazards and likely to be lost. All three components of biotic risks are affected by global changes. Windstorm damage is increasing, which results in more frequent bark beetle outbreaks while raising temperature benefits foliar pathogens and insect defoliators. With the intensification of global trade, the establishment of exotic pests and pathogens affecting trees has significantly increased in the last decades. More severe drought episodes can result in higher vulnerability of forest stands to foliar pathogens, insect defoliators, bark beetles and endophytic fungi. The reduction of specific and genetic diversity of trees in forest plantations increases herbivory by forest insects and damage by some pathogens. Increasing forest area, standing timber volume and provision of ecosystem services have resulted in higher exposure to pest and pathogen damage. Overall ca. 2 billions € per year would be lost in the French forests due to biotic hazards. There is therefore an urgent need to develop risk analyses and risk management in forest to prevent detrimental effects of climate change.

Keywords: risk, hazard, vulnerability, exposure, pest, pathogen, climate change, invasion

Introduction

Les forêts européennes fournissent un volume important de bois, fibre et biomasse et assurent de nombreux services écosystémiques comme le stockage de carbone, la protection de la qualité des sols et de l'eau, la conservation de la biodiversité, l'accueil du public. Leur surface est en constante augmentation avec un accroissement d'environ 700 000 ha /an (0.4%) et un volume de bois sur pied passé de 124 m³/ha en 1990 à 141 m³/ha en 2005 (FAO, 2007). Cette tendance devrait se maintenir pour les prochaines décennies même si des infléchissements sont prévus (voir Loustau *et al.*, ce volume). L'évolution d'autres statistiques forestières semble en revanche moins positive comme en témoigne l'augmentation des perturbations naturelles. Ces perturbations naturelles correspondent aux aléas abiotiques comme les tempêtes, sécheresses, gels, incendies ou aux aléas biotiques comme les pullulations d'insectes ou les épidémies de pathogènes. Elles altèrent la structure et le fonctionnement des forêts sur une période de temps supérieure à la saison de végétation. La surface forestière ainsi affectée en Europe est de l'ordre de 10 millions d'ha par an (6% de la surface totale, FAO 2007), avec un volume de bois impacté d'environ 8% de la récolte annuelle (Schelhaas *et al.*, 2003). La plupart de ces perturbations naturelles ont augmenté en fréquence ou en intensité ces dernières années notamment en raison des changements de gestion forestière (accroissement des surfaces de forêts de production, de la proportion de conifères, du volume sur pied...) mais aussi des évolutions climatiques. La plupart des scénarios de changement climatique prédisent une augmentation des températures moyennes, de la sévérité des sécheresses (notamment en Europe du sud ouest), et sans doute aussi de la violence des coups de vent (Solomon *et al.*, 2007 ; Blenkinsop et Fowler, 2007 ; Della-Marta *et al.*, 2009). Or de nombreuses espèces d'insectes et de champignons pathogènes sont susceptibles d'accroître leurs dommages en réponse à ces changements, soit directement via l'augmentation de leur capacité de développement ou l'extension de leur aire de répartition (Desprez-Loustau *et al.*, 2007, Vanhanen *et al.*, 2007 ; Berggren *et al.*, 2009) soit indirectement via l'augmentation de la sensibilité des arbres (Battisti *et al.*, 2005 ; Rouault *et al.*, 2006 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2006). Comme conséquence de la globalisation des échanges commerciaux, un nombre sans cesse grandissant d'espèces exotiques de ravageurs et pathogènes s'établissent en Europe pouvant causer des sévères dégâts aux forêts (Roques *et al.*, 2009 ; Desprez-Loustau, 2009 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2010).

L'évaluation du risque de dommages forestiers apparaît donc comme cruciale pour adapter la gestion et l'aménagement des forêts à ces menaces dans une perspective de production durable. Le concept de risque est communément décrit comme la résultante de trois facteurs : (i.) l'occurrence de l'aléa qui est la cause du dommage, (ii.) la vulnérabilité du système à cet aléa qui détermine l'ampleur du dommage et enfin (iii.) l'enjeu qui représente la valeur économique, sociale ou immatérielle du système qui est susceptible d'être perdue en raison du dommage (Kron, 2005 ; de Moel *et al.*, 2011). Une analyse de risque suit donc une approche probabiliste pour quantifier les conséquences négatives d'un aléa pour un système donné en multipliant la probabilité d'occurrence de l'aléa par le niveau de vulnérabilité du système et la valeur de la fonction assurée par le système et susceptible d'être impactée. Cette méthode d'analyse offre en outre une grille de lecture pour étudier l'évolution du risque biotique en forêt en considérant successivement l'évolution de la nature et de la fréquence des aléas biotiques (attaques d'insectes ravageurs et de champignons pathogènes), de la vulnérabilité des peuplements forestiers à ces aléas et des impacts socio-économiques des dommages forestiers. Pour chacune de ces trois composantes du risque nous considérerons l'effet des changements climatiques et d'autres changements anthropiques comme ceux liés à la globalisation de l'économie ou à la gestion forestière.

Bilan et évolution des aléas biotiques en forêt française et européenne.

L'analyse des dommages sur 3400 placettes du réseau européen de suivi de l'état des forêts en Europe (ICP-Forest Niveau 1) entre 1994 et 2005, couvrant 21 pays et concernant 26 essences dominantes, indique que 8% des arbres sont en moyenne attaqués par des insectes ravageurs et 5% par des

champignons pathogènes (Jactel *et al.*, 2007). Les aléas biotiques sont responsables de 57% des dommages forestiers, avec respectivement 34% des dégâts causés par des insectes, 19% par les champignons et 4% par les mammifères herbivores. En comparaison, les dégâts d'origine abiotique (sécheresse, feu, vent, gel etc.) représentent 22% du total et ceux d'origine anthropiques (gestion, pollution etc.) 21%. Cette proportion relative des trois types d'aléas est remarquablement stable dans le temps sur la période considérée. La prévalence des aléas biotiques semble plus importante pour les essences feuillues que pour les conifères. Le pourcentage d'arbres attaqués par les insectes augmente avec la longévité des essences concernées et la richesse des communautés d'insectes associés. Ainsi au final les épicéas et sapins apparaissent comme moins exposés à leurs infestations que l'aulne ou les chênes.

L'examen des bases de données du Département de la Santé des Forêts en France produit des résultats convergents. Environ 14% des arbres sont attaqués par des insectes chaque année et 5% par des champignons pathogènes en France. Les aléas biotiques représentent 81% des causes de dommages, 61% pour les insectes et 20% pour les champignons. Environ 300 espèces d'insectes ravageurs et 200 espèces de champignons pathogènes ont été répertoriées en forêt française. Les essences feuillues sont en moyenne plus exposées aux effets des aléas biotiques que les conifères.

L'étendue spatiale et la fréquence des aléas biotiques montrent cependant une évolution notable depuis quelques années sous l'effet du changement des conditions climatiques.

Une étude portant sur la fréquence des tempêtes en Europe a récemment révélé une nette augmentation au cours des dernières années du XXème siècle (Schelhaas *et al.*, 2003). Les chablis créés par ces tempêtes se sont quasi systématiquement accompagnés de pullulations de scolytes. Les récentes tempêtes qui ont frappé la forêt des Landes de Gascogne confirment cette tendance. Martin (1999) et Klaus (2009) ont causé la perte de plusieurs dizaines de millions de m³ de bois et ont engendré l'année suivante une pullulation du scolyte sténographe provoquant 10% de mortalité supplémentaire.

L'augmentation régulière des moyennes de température s'est aussi traduite par un accroissement de la prévalence de certains aléas biotiques (Rouault *et al.*, 2006). Ainsi, la maladie des bandes rouges causée par les champignons foliaires *Dothistroma septospora* et *D. pini* était considérée comme sans importance épidémiologique jusque dans les années 70-80. Favorisée par des conditions climatiques chaudes et humides, elle s'est étendue en France et a augmenté ses dégâts, remettant en question la plantation de pins laricio dans certaines régions. De même, l'expansion en altitude et en latitude de la processionnaire du pin peut être attribuée à la hausse des moyennes de températures hivernales (Battisti *et al.*, 2005 ; Robinet *et al.*, 2007). La vitesse d'expansion est de plusieurs km par an, le front de l'épidémie se situe désormais au sud du bassin parisien avec des avant-postes en Bretagne, région parisienne et même en Alsace. Il est probable que des températures plus clémentes favorisent la survie des chenilles, conduisant à des défoliations plus sévères.

Parallèlement à ces modifications des conditions environnementales, l'accélération des échanges commerciaux se traduit par une augmentation exponentielle du nombre d'espèces exotiques d'insectes et de champignons pathogènes introduites en Europe. Deux projets européens (DAISIE et ALARM) ont récemment montré que, en moyenne, 2 espèces nouvelles de champignons et 8 d'arthropodes exotiques s'établissent désormais chaque année en France (Desprez-Loustau, 2009 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2010, Roques *et al.*, 2009). Il semble que les espèces survivent mieux aux transports car ces derniers sont beaucoup plus rapides que par le passé. De même, à l'arrivée, les espèces d'origine tempérée ou subtropicale bénéficieraient de conditions climatiques plus favorables avec le changement climatique. Ces différents facteurs pourraient expliquer l'origine majoritairement asiatique des espèces exotiques récemment établies en France et en Europe. Ainsi les châtaigniers subissent désormais des attaques récurrentes de la mineuse *Cameraria ohridella* originaire des Balkans (Valade *et al.*, 2009), le capricorne *Anoplophora glabripennis* introduit de Chine infeste les essences feuillues comme le peuplier

ou l'érable, et le nématode du pin *Bursaphelenchus xylophilus*, introduit du Japon a trouvé au Portugal un insecte vecteur *Monochamus galloprovincialis* pour contaminer les forêts de pin. De même le chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*) et l'agent de mortalité du cyprès de Lawson (*Phytophthora lateralis*) sont originaires d'Asie. Une nouvelle espèce *Chalara fraxinea* d'origine inconnue menace actuellement la survie du frêne en France.

La concomitance des changements climatiques et économiques se traduit donc pas une probabilité forte d'augmentation de la fréquence et de la diversité des aléas biotiques pour les forêts françaises.

Evolution de la vulnérabilité des forêts aux aléas biotiques.

Les essences forestières, via des mécanismes de résistance physiologique, présentent des capacités plus ou moins grandes de résistance aux infestations d'insectes et de champignons pathogènes. Cette résistance peut cependant être modulée par les conditions environnementales, elles mêmes dépendantes du sol, du climat ou de la gestion forestière.

En novembre 2011, les experts du GIECC ont révisé à la hausse leur prédiction de sécheresse dans les pays du sud de l'Europe et notamment de la France, pour l'horizon 2046 – 2100. Or une méta-analyse de la littérature scientifique internationale, intégrant une centaine d'études, révèle que l'intensité des dégâts causés par les insectes et champignons pathogènes augmente chez les arbres subissant un stress hydrique (Jactel *et al.*, 2012). Si les agents pathogènes primaires tels que les pourridiés racinaires et les pissodes semblent défavorisés par la sécheresse, les insectes défoliateurs, les champignons foliaires, les insectes xylophages comme les scolytes et les champignons endophytes font plus de dégâts sur les arbres stressés. L'ampleur du dégât semble en outre modulée par la capacité de résistance à la sécheresse des essences (plus forte par exemple pour le chêne vert que pour le peuplier pour prendre deux extrêmes) et par l'intensité du stress hydrique. Cette évolution de la sensibilité des arbres en condition de sécheresse est bien illustrée par l'augmentation récente de la sévérité des dégâts causés par le champignon endophyte *Diplodia pinea* qui est devenue une contrainte sanitaire majeure pour les pinèdes (pins noirs et sylvestre) du sud et du centre de la France (Fabre *et al.*, 2011).

L'absence de co-évolution permettant la sélection naturelle de populations résistantes expliquerait en outre la vulnérabilité des essences européennes vis-à-vis des espèces d'insectes et de champignons exotiques récemment introduites.

L'augmentation de la surface des forêts de plantation représente une tendance lourde de l'économie forestière mondiale. D'après les statistiques de la FAO (2007) l'accroissement est actuellement de l'ordre de 5 millions d'ha par an. En France l'augmentation a été de 10% de la surface forestière entre 1989 et 2004 (+ 2 millions ha, IFN) et plus de la moitié des peuplements forestiers sont dominés par une seule essence. Or de nombreuses études scientifiques convergent pour estimer que les forêts mono-spécifiques seraient plus vulnérables aux aléas biotiques que les forêts mélangées. Une méta-analyse portant sur 119 études montre que les dégâts d'un insecte ravageur sur une essence sont plus importants lorsqu'elle est gérée en peuplements mono-spécifiques qu'en peuplements mélangés (Jactel et Brockerhoff, 2007). Cette tendance semble aussi se vérifier pour certains champignons pathogènes comme les pourridiés racinaires (Jactel *et al.*, 2008). Par ailleurs la réduction de la diversité génétique dans les plantations pourrait amplifier ce phénomène. Ainsi les plantations monoclonales de peuplier se sont révélées particulièrement sensibles à de nouvelles races de rouille (*Melampsora larici-populina*) (Miot *et al.*, 1999).

Le changement climatique, le manque de résistance aux ravageurs et pathogènes exotiques et l'intensification sylvicole (Jactel *et al.*, 2009) seraient donc trois facteurs pouvant contribuer à augmenter la vulnérabilité des forêts françaises aux aléas biotiques.

Evolution de l'impact des dommages forestiers d'origine biotique.

Les dommages causés par les aléas biotiques peuvent diminuer la valeur de l'ensemble des produits forestiers.

De nombreux insectes ravageurs et champignons pathogènes sont des agents de mortalité d'arbres. Ainsi les pourridiés racinaires comme le fomes ou l'armillaire, les scolytes lors de leurs pullulations, peuvent causer des pertes importantes en termes de volume de bois. Les pinèdes des Maures et de l'Estérel ont été pratiquement rayées de la carte après les pullulations de la cochenille du pin maritime dans les années 50-70. Pour la forêt des Landes de Gascogne, on estime que les pullulations du scolyte sténographe ont provoqué la mort de plusieurs millions d'arbres pour un volume perdu de l'ordre de 2 millions de m³ après la tempête Martin et 5 millions de m³ après le passage de Klaus. Ces mortalités massives peuvent limiter la capacité des forêts à stocker du carbone. Ainsi la pullulation gigantesque du dendroctone du pin (*Dendroctonus ponderosae*) en Colombie britannique (Canada), avec environ 1 milliard de m³ de bois détruits, a déplacé la forêt de pins d'une position de puits à celle de source de carbone (Kurz *et al.*, 2008).

Les champignons foliaires et les insectes défoliateurs peuvent également réduire la productivité primaire des forêts en réduisant la croissance radiale des arbres. Une revue quantitative des publications portant sur les effets des défoliations par les chenilles processionnaire a montré que les pertes de croissance peuvent atteindre jusqu'à 50% de la croissance annuelle (Jacquet *et al.* soumis). Sachant que plus de 20% des arbres d'un massif peuvent être impactés et que les pullulations se reproduisent tous les 5 à 7 ans, il apparaît clairement que les attaques de processionnaire doivent avoir un impact significatif sur la production à l'échelle régionale.

Certains insectes ravageurs invasifs comme les guêpes du genre *Megastigmus* sur Douglas et la punaise *Leptoglossus occidentalis* sur pin, en s'attaquant aux graines, peuvent également menacer la production de semences de variétés améliorées (A. Roques, comm. pers.).

Par ailleurs, même s'ils ne menacent pas la vitalité ou la croissance des arbres, de nombreux insectes et champignons pathogènes provoquent des altérations du bois, les rendant impropres à une utilisation industrielle. Par exemple la pyrale du tronc (*Dioryctria sylvestrella*) induit la formation de poche de résine qui décline les bois de pin maritime pour un usage en lambris, les agents du bleu (*Ophiostoma* sp.), souvent véhiculés par les scolytes, donnent une coloration inesthétique aux billes de pin et la rouille courbeuse (*Melampsora pinitorqua*) provoque une déformation de la tige qui la rend impropre au sciage (Riou-Nivert *et al.*, 2010). Ces trois exemples illustrent bien comment la nature des enjeux économiques menacés par les dégâts sanitaires modifie l'ampleur du risque. En effet si l'objectif des plantations de pin maritime est la production de biomasse, aucun de ces trois agents de dégât ne peut être considéré comme induisant un risque économique important (alors que la processionnaire du pin diminuant la croissance le serait). En revanche si ces plantations sont orientées vers la production de bois d'œuvre alors chacun de ces trois aléas biotiques doit être considéré comme un facteur de risque.

Les estimations de pertes dues aux dommages forestiers en termes de valeur économique sont difficiles à réaliser du fait d'un manque d'études ciblées sur ces questions. D'autre part, jusqu'à présent, seules les pertes sur la valeur du produit commercialisé sont généralement considérées. Une estimation plus complète de l'impact des pathogènes et ravageurs nécessiterait de prendre en compte l'ensemble des services écosystémiques rendus par la biodiversité des forêts. En reprenant l'approche développée par Chevassus-au-Louis *et al.* (2009), et en considérant une réduction de 2.8 à 5.6% de la valeur de ces services en raison de dégâts causés par les champignons pathogènes, une estimation du coût de ces dégâts de l'ordre de 400 à 800 millions d'euros par an a été proposée pour les forêts françaises (Sache *et al.* 2011). En suivant le même raisonnement les pertes imputables aux insectes ravageurs seraient dans une fourchette de 0.7 à 1.5 milliards d'euros.

L'impact des dommages forestiers d'origine biotique représente donc un enjeu majeur pour la gestion des forêts, dans toutes leurs composantes économiques et environnementales. Cet enjeu devient de plus en plus important à mesure que la demande pour les produits et services fournis par les forêts augmente, ce qui semble le cas actuellement avec l'usage accru de matériaux à base de bois pour la construction et de biomasse forestière comme source d'énergie. Puisque le risque est le produit de la fréquence des aléas par la vulnérabilité du système et les enjeux économiques et sociaux des dommages, l'accroissement de la valeur des forêts participe donc à augmenter le niveau du risque biotique. Dans une étude récente portant sur les forêts européennes, Seidl *et al.* (2011) ont bien montré que l'augmentation des surfaces et du volume sur pied des forêts de conifères avait eu le même effet que les changements climatiques sur le risque associé aux dégâts de scolytes. Ce type de raisonnement a récemment amené les experts du GIECC à considérer que les risques associés à l'augmentation des catastrophes naturelles étaient autant dus à leur recrudescence qu'au fait que de plus en plus de personnes habitaient dans les zones exposées à ces catastrophes.

4. Conclusions

Il apparaît donc que l'évolution des trois composantes du risque biotique, sous l'effet conjugué des changements climatiques et des évolutions socio-économiques, conduit à prédire une augmentation de ce risque pour les forêts européennes. Bien entendu cette prévision est très globale et demande à être affinée en fonction des caractéristiques propres des principaux massifs forestiers, de leur mode de gestion et des espèces d'arbres, d'insectes et de champignons qu'ils abritent. Dans le cadre du projet européen EFORWOOD nous avons tenté de classer différents types de gestion sylvicole, du plus extensif (« proche de la nature » et « multifonctionnel ») au plus intensif (« forêt de plantation » et « ligniculture pour la biomasse »), vis-à-vis du risque associé aux dommages d'insectes ravageurs, champignons pathogènes, cervidés, du vent et du feu. En considérant simultanément ces aléas, nous avons obtenu un classement similaire dans les 8 régions forestières européennes testées, indiquant un risque plus faible dans les modes de gestion extensive en raison de moindres enjeux, ou dans le mode de production de biomasse en raison d'une moindre vulnérabilité liée aux courtes rotations, alors que le risque est plus élevé dans les sylviculture de plantation qui cumulent une vulnérabilité élevée et une valeur économique importante (Jactel *et al.*, 2012).

L'amélioration de notre capacité à entreprendre ce type d'analyse du risque passe cependant par l'accroissement de notre effort de recherches. Concernant l'effet du changement climatique sur l'occurrence des aléas biotiques il convient sans doute de développer des modèles de probabilité d'établissement d'espèces pathogènes exotiques et de dynamique spatio-temporelles des populations des principaux insectes et champignons pathogènes, en interaction avec les activités du Département de la Santé des Forêts. Pour mieux comprendre l'impact du changement climatique sur la vulnérabilité des forêts il nous faut désormais analyser les interactions biotiques à l'échelle des communautés, c'est-à-dire en étudiant mieux les relations trophiques entre les différentes espèces d'arbres, la flore accompagnatrice, les champignons et insectes herbivores mais aussi leurs ennemis naturels. Pour mieux comprendre comment les enjeux socio-économiques influent sur le calcul mais aussi la perception du risque par les gestionnaires forestiers il nous faut mobiliser les méthodes des sciences humaines et sociales. Enfin le transfert de ces avancées scientifiques vers les utilisateurs finaux passe sans doute par le développement d'outils d'aide à la décision.

Références bibliographiques

Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A., Larsson S., 2006. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications* 15, 2084-2096.

- Berggren Å., Björkman C., Bylund H., Ayres M., 2009. The distribution and abundance of animal populations in a climate of uncertainty. *Oikos* 118, 1121-112
- Blenkinsop S., Fowler H.J., 2007. Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology* 27, 1595–1610.
- Chevassus-au-Louis B., Salles J.-M., Pujol J.L., 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes - Contribution à la décision publique. Centre d'analyse stratégique, Paris. La Documentation française, Rapports et documents, n° 18.
- De Moel H., Aerts J.C.J.H., 2011. Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards* 58, 407–425
- Della-Marta P.M., Mathis H., Frei C., Lininger M.A., Kleinn J., Appenzeller C., 2009. The return period of wind storms over Europe. *International Journal of Climatology* 29, 437-459.
- Desprez-Loustau M.L., 2009. The alien fungi of Europe. In: DAISIE, Handbook of alien species in Europe Springer, Dordrecht. pp. 15–28
- Desprez-Loustau M.L., Courtecuisse R., Robin C., Husson C., Moreau P.A., Blancard D., Selosse M.A., Lung-Escarmant B., Piou D., Sache I., 2010. Species diversity and drivers of spread of alien fungi (*sensu lato*) in Europe with a particular focus on France. *Biological Invasions* 12, 157-172.
- Desprez-Loustau M.L., Robin C., Reynaud G., Déqué M., Badeau V., Piou D., Husson C., Marçais B., 2007. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. *Canadian Journal of Plant Pathology* 29, 101-120.
- Desprez-Loustau M.L., Marçais B., Nageilesen L.M., Piou D., Vannini, A. (2006) Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annals of Forest Sciences*, 63, 597–612
- Fabre B., Piou D., Desprez-Loustau M.L., Marçais B., 2011. Can the emergence of pine shoot blight caused by *Sphaerosopsis sapinea* in France be explained by changes in pathogen pressure linked to climate change? *Global Change Biology*, 17 (10): 3218–3227
- FAO, 2007. State of the World's Forests, <http://www.fao.org/docrep/009/a0773e/a0773e00.htm>
- Hanewinkel M., Hummel S., Albrecht A., 2011. Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. *European Journal of Forest Research* 130, 329-351
- Jacquet J.S., Orazio C., Jactel H., 2011. Effect of processionary moth defoliation on tree growth: a quantitative review. *En révision aux Annales des Sciences Forestières*
- Jactel H., Brockerhoff E.G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* 10, 835-848.
- Jactel H., Nicoll B., Branco M., Gonzalez-Olabarria J.R., Grodzki W., Langström B., Moreira F., Netherer S., Orazio C., Piou D., Santos H., Schelhaas M.J., Tojic K., Vodde F., 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science* 66, 701.
- Jactel H., Vodde F., Branco M., Carnus J.M., Ramon Gonzalez J., Grodzki W., Langstrom B., Moreira F., Netherer S., Nicoll B., Orazio C., Piou D., Santos H., Schelhaas M.J., Tojic K., 2007. Prevalence of biotic and abiotic hazards in European forests. EFORWOOD Project Deliverable D242. 29 p.
- Jactel H., Brockerhoff E., Piou D., 2008. Disease risk in mixed forests. *Revue Forestière Française* 60, 168-180
- Jactel H., Petit J., Desprez-Loustau M.L., Delzon S., Piou D., Battisti A., Koricheva J., 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology* (18), 267–276
- Jactel H., Branco M., Duncker P., Gardiner B., Grodzki W., Långström B., Moreira F., Netherer S., Nicoll B., Orazio C., Piou D., Schelhaas M.J., Tojic K., 2012. A multi-criteria risk analysis to evaluate impacts of forest management alternatives on forest health in Europe. (en révision à *Ecology & Society*)
- Kron W., 2005. Flood Risk = hazard x value x vulnerability. *Water International* 30, 58-68
- Kurz W.A., Dymond C.C., Stinson G., Rampley G.J., Neilson E.T., Carroll A.L., Ebata T., Safranyik L., 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, 987-990.

- Miot S., Frey P., Pinon J., 1999. Varietal mixture of poplar clones: Effects on infection by *Melampsora larici-populina* and on plant growth. *European Journal of Forest Pathology* 29, 411-423.
- Riou-Nivert P., Nageleisen L.-M., Piou D., Saintonge F.-X., 2010. La santé des Forêts - Maladies, insectes, accidents climatiques. Diagnostic et prévention. Département de la santé des forêts, Institut pour le développement forestier, Paris, 2010, 608 pages.
- Robinet C., Baier P., Pennerstorfer J., Schopf A., Roques A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography* 16, 460–471.
- Roques A., Rabitsch W., Rasplus J.-Y., Lopez-Vamonde C., Nentwig W., Kenis M., 2009. Alien terrestrial invertebrates of Europe. *Handbook of Alien Species in Europe* (ed. DAISIE), Springer, Berlin pp. 63–79.
- Rouault G., Candau J.N., Lieutier F., Nageleisen L.M., Martin J.C., Warzee N., 2006. Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science* 63, 613–624.
- Sache I., Roy A.-S., Suffert F., Desprez-Loustau M.-L., 2011. Invasive Plant Pathogens in Europe. In: D. Pimentel (Ed.) *Biological Invasions: Economic and Environmental Costs of Alien Plant, Animal, and Microbe Species*.
- Schelhaas M.J., Hengeveld G., Moriondo M., Reind G.J., Kundzewicz Z.W., ter Maat H., Bindi M., 2010. Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15, 681–701
- Schelhaas M.J., Nabuurs G.J., Schuck A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9, 1620-1633
- Seidl R., Rammer W., Lexer M.J., 2011. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. *Climatic Change* 106, 225–254
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., 2007. *Climate Change 2007*. Technical report. Cambridge University Press: Cambridge.
- Valade R., Kenis M., Hernandez-Lopez A., Augustin S., Mena N.M., Magnoux E., Rougerie R., Lakatos F., Roques A., Lopez-Vaamonde C., 2009. Mitochondrial and microsatellite DNA markers reveal a Balkan origin for the highly invasive horse-chestnut leaf miner *Cameraria ohridella* (Lepidoptera, Gracillariidae). *Molecular Ecology* 18, 3458-3470
- Vanhanen H., Veteli T.O., Päivinen S., Kellomäki S., Niemelä P., 2007. Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth – a model study. *Silva Fennica* 41, 621–638.