

Impacts des changements climatiques sur les biens et services des forêts de montagne européennes

M. Maroschek, R. Seidl, S. Netherer et M.J. Lexer

Un examen de la vulnérabilité probable de l'écosystème et des impacts sur les produits et services forestiers résultant des changements climatiques prévus dans les forêts de montagne européennes – ainsi que de quelques solutions d'adaptation possibles.

Contrairement à de nombreuses autres zones montagneuses du monde, celles d'Europe se caractérisent par de fortes densités de population et, partant, doivent satisfaire un grand nombre d'exigences environnementales potentiellement conflictuelles. Les écosystèmes forestiers sont les éléments clés de la matrice des utilisations foncières de ces zones, fournissant une variété de biens et services aux moyens d'existence humains. Cependant, les changements climatiques prévus pourraient compromettre ces services à cause de la forte exposition à laquelle sont soumis les écosystèmes de montagne européens.

Dans les Alpes, par exemple, l'augmentation totale de la température observée au cours de la seconde moitié du XX^e siècle était le double environ de la moyenne mondiale. Les projections régionales des modèles climatiques de pointe montrent que cette tendance se poursuivra pendant le XXI^e

siècle, avec un réchauffement escompté d'environ 3,5 à 4 °C en été et d'une valeur à peine inférieure aux autres saisons entre aujourd'hui et 2100 (Christensen *et al.*, 2007). Les changements dans les régimes des précipitations et des tempêtes de vent sont encore extrêmement incertains et seront fortement influencés par l'hétérogénéité géomorphologique locale des paysages de montagne. Dans les zones montagneuses d'Europe centrale, le régime des précipitations devrait se caractériser par un accroissement de l'humidité en hiver et des étés de plus en plus secs. On prévoit que cette tendance s'affirmera encore en Méditerranée, où l'on s'attend à ce que la baisse évidente des précipitations pendant la période de végétation enregistre une

Les forêts de montagne fournissent de multiples biens et services aux communautés locales, comme dans la vallée du Stubai dans les Alpes centrales, en Autriche



Michael Maroschek, Rupert Seidl et Manfred J. Lexer travaillent à l'Institut de sylviculture, et **Sigrid Netherer** à l'Institut d'entomologie, de pathologie et de protection forestières. Ils appartiennent tous au Département des forêts et des sciences du sol, Université des ressources naturelles et des sciences appliquées de la vie (BOKU), Vienne (Autriche).

M. MAROSCHKE

augmentation sous l'effet d'un réchauffement, qui pourrait atteindre 4 °C d'ici à la fin du XXI^e siècle (Christensen *et al.*, 2007).

Le présent article examine les facteurs de vulnérabilité de l'écosystème, les impacts futurs sur les biens et services, et les moyens d'adaptation éventuels par rapport aux variations escomptées de la température dans les forêts de montagne méditerranéennes en Europe. Il examine les principaux systèmes montagneux de ces zones climatiques, à savoir les Alpes, les Carpates et les Pyrénées, et couvre une grande variété de types actuels de forêts, allant des forêts thermophiles feuillues sempervirentes et des forêts de conifères sèches aux forêts de conifères alpins et aux forêts décidues tempérées continentales. Cet examen fait partie d'une synthèse paneuropéenne récente réalisée en profondeur sur les changements climatiques et les forêts (Lindner *et al.*, 2008).

VULNÉRABILITÉ DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Les changements qui surviennent dans les températures, la disponibilité d'eau et le régime des perturbations détermineront probablement des variations de la productivité des écosystèmes forestiers, notamment ceux qui sont déjà limités par la température ou l'absence d'eau. Une teneur en CO₂ atmosphérique accrue influencera probablement aussi la productivité, mais on n'en connaît pas encore entièrement l'effet sur différentes espèces arborescentes (Körner *et al.*, 2005).

À des altitudes supérieures, les températures plus élevées et un milieu environnemental moins âpre ont déjà augmenté les taux de croissance. La prolongation continue de la période de végétation pourrait intensifier ce phénomène, tout en stimulant un bourgeonnement précoce qui, à son tour, risque d'accroître la susceptibilité des arbres aux gelées tardives. Néanmoins, une tendance de croissance positive devrait se poursuivre, en particulier dans les sites qui ne souffrent pas de pénurie d'eau (Bolli, Rigling et Bugmann, 2007).

À des altitudes inférieures et dans les vallées alpines intérieures sèches, les changements du régime des précipitations et les températures croissantes pourraient provoquer le stress dû à la sécheresse, et diminuer par là même la productivité. Ce phénomène a déjà été observé récemment, par exem-

Forêt subalpine de *Picea abies* infestée par le scolyte *Ips typographus*, déjà favorisé par les changements de température et le stress accru dû à la sécheresse, qui rendent les arbres hôtes plus vulnérables (encart: galeries larvaires caractéristiques de *I. typographus*)



ple en Suisse dans la vallée supérieure du Rhône (Rebetez et Dobbertin, 2004).

Une augmentation du stress dû à la sécheresse risque aussi d'accroître la vulnérabilité des forêts de montagne à des agents de perturbation biotiques, dont les conséquences vont de la mortalité accrue des arbres au niveau du peuplement à des répercussions très graves à grande échelle si le seuil de résistance du système est dépassé (Raffa *et al.*, 2008).

Un temps plus chaud et plus sec expose aussi davantage les écosystèmes forestiers alpins aux facteurs abiotiques. Des périodes de sécheresse, notamment en hiver et au printemps, promeuvent les incendies de forêt, qui devraient, selon les prévisions, augmenter non seulement dans les zones des Pyrénées déjà arides et touchées par le feu, mais aussi dans les Alpes, où les feux de friches n'ont revêtu dans le passé qu'une importance secondaire (Reinhard, Rebetez et Schlaepfer, 2005; Schumacher et Bugmann, 2006). Bien que l'influence des changements climatiques sur la fréquence et la gravité des tempêtes soit encore incertaine, le nombre accru d'ouragans qui ont ravagé certaines zones d'Europe centrale au cours des deux décennies écoulées (tels que «Viviane» en 1990, «Lothar» en 1999, «Kyrill» en 2007) met bien en évidence la susceptibilité croissante des forêts.

Les dommages abiotiques sont le principal facteur qui contribue au risque de perturbation biotique, comme les attaques de défoliateurs (Battisti, 2004, par exemple) et les infestations massives d'espèces secondaires de scolytes (Nierhaus-Wunderwald et Forster, 2000). Les forêts d'épinettes de Norvège (*Picea abies*) compromises par le

stress dû à la sécheresse ou le chablis sont fortement prédisposées aux attaques des scolytes de l'épinette *Ips typographus* et *Pityogenes chalcographus*, qui bénéficient aussi des températures estivales et hivernales accrues (Wermelinger, 2004). À l'heure actuelle, la répartition dans l'espace des essences hôtes s'étend au-delà de l'aire de répartition thermique des scolytes, mais une hausse des températures favorables aux insectes déclenchera sans doute des infestations de scolytes dans les forêts de conifères situées à des altitudes plus élevées (Seidl *et al.*, 2009).

Bien que le développement de nombreux organismes hétérothermes (dont la température corporelle varie en fonction de la température environnante, par exemple les insectes) soit lié positivement aux températures en hausse, des effets négatifs ne sont pas à exclure pour certaines espèces de ravageurs. L'augmentation de la température hivernale pourrait compromettre l'inhibition ou le maintien de la diapause (état de dormance permettant aux arthropodes de survivre dans des conditions défavorables), accroître les taux de mortalité des stades d'hivernage ou interdire la synchronie entre hôtes et herbivores (Bale *et al.*, 2002; Battisti, 2004). En Suisse, par exemple, les densités de pointe des populations et, dès lors, l'incidence et l'intensité des infestations de la tordeuse des bourgeons du mélèze, *Zeiraphera diniana* (un défoliateur cyclique des peuplements alpins internes de mélèzes), ont accusé un recul au cours des 30 dernières années, parallèlement à la tendance au réchauffement climatique, en raison probablement de la mortalité accrue des œufs et des larves (Esper *et al.*, 2007).

Dans l'ensemble, les études de simulation ont montré que les niches des essences forestières sont extrêmement sensibles aux changements climatiques; de ce fait, la répartition et la composition des espèces pourraient être altérées. Dans les Alpes et les Carpates, l'aire de répartition potentielle des essences décidues devrait s'étendre davantage que celle des conifères (Lexner *et al.*, 2002; Skvarenina, Krizova et Tomlain, 2004). Dans le Montseny en Espagne, par exemple, les aires de répartition de *Quercus ilex* et *Fagus sylvatica* se sont déjà déplacées vers des altitudes majeures au cours de ces dernières décennies (Peñuelas *et al.*, 2007). La limite des arbres s'élèvera aussi lorsque des microsites adaptés se seront établis, suite à la baisse de mortalité des arbres et à la hausse de croissance et de reproduction dans les endroits où la température est actuellement un facteur de limitation. C'est ainsi qu'un déplacement vers le haut de la limite de la zone arborée dominée par *Picea abies* et *Pinus cembra*, dans les Alpes, a déjà été observé ces dernières années. Toutefois, ces limites forestières sont sensibles non seulement à l'évolution du climat, mais aussi aux changements d'affectation des terres qui peuvent soit atténuer soit amplifier les effets climatiques (Gehrig-Fasel, Guisan et Zimmermann, 2007).

IMPACTS POTENTIELS SUR LES BIENS ET SERVICES FORESTIERS

La vulnérabilité des écosystèmes forestiers décrite plus haut exercera des impacts considérables sur les biens et services des forêts de montagne. La production de bois variera non seulement à cause de la baisse de productivité, mais aussi de pertes possibles imputables à des perturbations biotiques et abiotiques, en particulier dans les peuplements de conifères des Alpes et des Carpates (Seidl *et al.*, 2009). Cependant, les changements climatiques élargiront aussi la gamme des essences dans de nombreux écosystèmes forestiers de montagne, réduisant les limitations écophysiologiques d'un grand nombre de feuillus.

Le service de piégeage du carbone est partiellement lié aux changements de productivité. Les forêts des Alpes devraient conserver leur rôle de puits de carbone pendant la première moitié environ du XXI^e siècle. Plus tard au cours du siècle, les taux croissants de respiration et la fréquence accrue des perturbations pourraient provoquer l'affaiblissement de la fonction de puits de carbone, et les forêts risquent même de devenir une source de carbone atmosphérique. Enfin, l'environnement socioéconomique – y compris la demande de biomasse forestière, les prix du marché pour le piégeage du carbone et

les changements d'affectation des terres – déterminera si les forêts de montagne européennes resteront ou non un puits de carbone (Zierl et Bugmann, 2007).

Un important service procuré par les forêts en faveur des régions montagneuses, aussi bien que des zones habitées adjacentes, est la fourniture d'eau potable. Des perturbations à grande échelle pourraient accroître le ruissellement et, partant, réduire l'eau stockée dans les bassins versants. Il en résulterait une diminution de la sécurité hydrique, ainsi qu'une augmentation de l'érosion du sol, des inondations et des coulées de débris. En outre, la décomposition accélérée des matières organiques due aux ouvertures du couvert (imputables aux perturbations) et la hausse des températures pourraient stimuler le lessivage des nitrates et d'autres éléments nutritifs, diminuant par là même la qualité de l'eau (Jandl *et al.*, 2008). L'amenuisement des glaciers provoqué par le climat risque de menacer le bilan hydrique dans certaines régions alpines internes. Le retrait des glaciers pourrait compromettre leur fonction d'équilibrage des débits des cours d'eau pendant les mois chauds et secs de l'été, réduisant ainsi la disponibilité d'eau (Zappa et Kan, 2007).

La protection contre les catastrophes naturelles, comme les inondations, les coulées de débris, les glissements de terrain, les éboulis et les avalanches, est un service écosystémique d'une très grande importance dans les zones de montagne densément peuplées. Les impacts nets des changements climatiques sur cette fonction de la forêt seront un résultat des effets combinés sur la dynamique forestière et sur l'ampleur et la fréquence de tels phénomènes dangereux. D'une manière générale, les perturbations croissantes, telles que les infestations de scolytes, les chablis et les incendies, exerceront un impact néfaste sur les fonctions de protection des forêts (Schumacher et Bugmann, 2006). En revanche, une limite forestière ascendante pourrait renforcer la protection contre les dangers en stabilisant les masses érodables, en réduisant les zones de démarrage des avalanches, en diminuant le ruissellement grâce à une meilleure interception et consommation de l'eau, et en stabilisant les sols par un enracinement plus profond et plus intense.

Une limite d'arbres ascendante pourrait aussi influencer la conservation de la bio-



Des forêts de protection abritent le village autrichien de Hallstatt, dans les Alpes calcaires du nord, contre les éboulis, les avalanches et les coulées de débris – fonctions qui pourraient être influencées par une perturbation accrue des forêts sous l'effet des changements climatiques



La limite forestière dominée par *Picea abies* sur le mont Speikkogel, en Autriche, est particulièrement sensible aux changements climatiques; une limite forestière ascendante devrait stabiliser les arbres et assurer une meilleure protection contre les dangers, mais la biodiversité risque d'en souffrir

diversité. Il est probable que la diversité des espèces végétales dans les zones alpines et nivales souffre des déplacements vers le haut de la forêt subalpine et des communautés arbustives, telles que la ceinture de *Pinus mugo* dans les Alpes (Theurillat *et al.*, 1998). Cependant, dans les forêts gérées, où la biodiversité est fortement influencée par les interventions de gestion forestière, la concurrence croissante des communautés forestières décidues riches en espèces aux altitudes plus élevées pourrait s'avérer, dans l'ensemble, favorable à la conservation de la biodiversité.

PERSPECTIVES: BESOINS ET SOLUTIONS EN MATIÈRE D'ADAPTATION

Dans de nombreux écosystèmes forestiers européens de montagne, il faudra prendre des mesures d'adaptation pour contrebalancer les impacts préjudiciables des changements climatiques et conserver les biens et services écosystémiques. On devra tenir compte des conditions biophysiques et socioéconomiques locales dans l'élaboration de ces mesures. C'est pourquoi nous n'examinons ici qu'un ensemble de solutions générales aptes à adapter la gestion des forêts à l'évolution du climat.

Le choix du matériel forestier de reproduction adapté, à savoir provenances et génotypes, et d'espèces capables de supporter les conditions futures prévues est d'une importance capitale pour la foresterie durable. Il est possible d'atténuer les effets prévus des sécheresses en établissant des

peuplements plus espacés et en adaptant les systèmes d'entretien et d'éclaircie (Spiecker, 2003). Lors des périodes d'évolution des régimes de perturbation, des mesures préventives de protection des forêts (surveillance des ravageurs, par exemple) et correctives (coupe d'assainissement, lutte contre les ravageurs, par exemple) sont essentielles pour réduire au minimum les effets défavorables des perturbations sur la fourniture de biens et services forestiers. Pour renforcer la fonction de protection, le maintien d'un couvert continu est important; cela exige des pratiques d'entretien et d'éclaircie visant à stabiliser au maximum les peuplements forestiers et à stimuler la régénération. En outre, la présence d'un couvert forestier structuré et continu assure une meilleure fourniture d'eau potable. L'application des mesures nécessaires sur un terrain alpin complexe peut être complétée par des infrastructures forestières améliorées (planification du réseau routier, par exemple). De plus, les solutions de gestion adaptatives seraient plus efficaces si d'autres pressions sur les écosystèmes forestiers de montagne, comme le broutage des ruminants et le dépôt de polluants, étaient réduites. D'une manière générale, la gestion intégrée de l'environnement est nécessaire dans les régions montagneuses d'Europe, notamment là où des changements d'affectation des terres (l'abandon des pâturages alpestres d'altitude, par exemple) altèrent fortement la structure du paysage.

La mise en œuvre de mesures d'adaptation efficaces dépend beaucoup de la disponibilité de ressources humaines et de compétences. Cependant, les connaissances de base concernant les forêts de montagne européennes sont asymétriques sous l'angle du sujet ciblé et de l'emplacement. Des recherches approfondies ont été menées davantage sur les Alpes, par exemple, que

sur les Carpates et les Pyrénées. La production de bois est le service étudié le plus fréquemment, alors que rares sont les études qui traitent explicitement des impacts de l'évolution du climat sur la fourniture d'eau potable de qualité élevée, les loisirs ou les produits forestiers non ligneux. Une gestion adaptative réussie devra combler de graves lacunes dans la compréhension des impacts des changements climatiques sur des forêts de montagne polyvalentes.

En outre, la recherche ciblée sur la mise en œuvre de stratégies d'adaptation s'impose de toute urgence. La conception et l'application de systèmes d'aide à la prise de décisions axés sur le climat, ainsi que la participation des parties prenantes, peuvent faciliter ce processus et traduire les conclusions de la recherche en mesures d'adaptation opérationnelles. Les scientifiques, les décideurs et les praticiens devront se mobiliser pour créer les capacités aptes à relever le défi de la gestion durable des forêts de montagne dans des conditions climatiques en évolution. ♦



Bibliographie

- Bale, J.S., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J., Good, J.E.G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.H., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symrnioudis, I., Watt, A.D. et Whittaker, J.B. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8: 1–16.
- Battisti, A. 2004. Forests and climate change – lessons from insects. *Forest*, 1(1): 17–24.
- Bolli, J.C., Rigling, A. et Bugmann, H. 2007.

- The influence of changes in climate and land-use on regeneration dynamics of Norway spruce at the treeline in the Swiss Alps. *Silva Fennica*, 41(1): 55–70.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. et Whetton, P.** 2007. Regional climate projections. In *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution du Groupe de travail I au quatrième rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis, Cambridge University Press.
- Esper, J., Büntgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D. et Liebhold, A.** 2007. 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274: 671–679.
- Gehrig-Fasel, J., Guisan, A. et Zimmermann, N.E.** 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science*, 18(4): 571–582.
- Jandl, R., Herman, F., Smidt, S., Butterbach-Bahl, K., Englisch, M., Katzensteiner, K., Lexer, M., Strebl, F. et Zechmeister-Boltenstern, S.** 2008. Nitrogen dynamics of a mountain forest on dolomitic limestone – a scenario-based risk assessment. *Environmental Pollution*, 155: 512–516.
- Körner, C., Aschhoff, R., Bignucolo, O., Hättenschwiler, S., Keel, S.G., Peláez-Riedl, S., Pepin, S., Siegwolf, R.T.W. et Zotz, G.** 2005. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, 309: 1360–1362.
- Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheffinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F. et Englisch, M.** 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 162(1): 53–72.
- Lindner, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Geen, T., Reguera, R., Maroschek, M., Seidl, R., Lexer, M.J., Netherer, S., Schopf, A., Kremer, A., Delzon, S., Barbati, A., Marchetti, M., et Corona, P.** 2008. *Impacts of climate change on European forests and options for adaptation*. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development. AGRI-2007-G4-06. Bruxelles, Belgique.
- Nierhaus-Wunderwald, D. et Forster, B.** 2000. *Rindenbrütende Käfer an Föhren*. Merkblatt für die Praxis n° 31. Birmensdorf, Suisse, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL).
- Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M. et Jump, A.S.** 2007. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30(6): 829–837.
- Raffa, K.F., Aukema, B.H., Bentz, B.J., Carroll, A.L., Hicke, J.A., Turner, M.G. et 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.
- Rebetz, M. et Dobbertin, M.** 2004. Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, 79(1–2): 1–9.
- Reinhard, M., Rebetetz, M. et Schlaepfer, R.** 2005. Recent climate change: rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, south of Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 82(1–2): 17–25.
- Schumacher, S. et Bugmann, H.** 2006. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Global Change Biology*, 12: 1435–1450.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M. et Lexer, M.J.** 2009. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. *Regional Environmental Change*. (Sous presse; disponible sur Internet: <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-008-0068-2>)
- Skvarenina, J., Krizova, E. et Tomlain, J.** 2004. Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. *Ekologia Bratislava*, 23 (suppl. 2): 13–29.
- Spiecker, H.** 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe – temperate zone. *Journal of Environmental Management*, 67(1): 55–65.
- Theurillat, J.-P., Felber, F., Geissler, P., Gobat, J.-M., Fierz, M., Fischlin, A., Küpfer, P., Schüssel, A., Velluti, C., Zaho, G.-F. et Williams, J.** 1998. Sensitivity of plant and soil ecosystems of the Alps to climate change. In P. Cebon, U. Dahinden, H.C. Davies, D. Imboden et C.C. Jaeger, éd. *Views from the Alps: regional perspectives on climate change*, p. 225–308. Cambridge, Massachusetts, États-Unis, MIT Press.
- Wermelinger, B.** 2004. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *Forest Ecology and Management*, 202: 67–82.
- Zappa, M. et Kan, C.** 2007. Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(3): 375–389.
- Zierl, B. et Bugmann, H.** 2007. Sensitivity of carbon cycling in the European Alps to changes of climate and land cover. *Climatic Change*, 85(1–2): 195–212. ♦