

MODÉLISATION ET SIMULATION DES DIFFÉRENTS SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Compte rendu de l'atelier 4

La forêt produit de nombreux biens et services écosystémiques. Les choix de gestion sont faits en tenant compte non seulement du revenu tiré des activités comme la production de bois et la chasse, mais aussi de fonctions valorisées par le propriétaire (récréation, par exemple) ainsi que des contraintes réglementaires et des incitations publiques (par exemple, une réglementation des coupes, des aides à la préservation des habitats). Ces multiples objectifs ainsi que les incertitudes rendent la prise de décision complexe.

Les données de terrain, l'expertise et la connaissance des milieux sont des éléments clefs pour faire des choix de gestion. Il n'est cependant pas toujours facile d'anticiper l'impact des décisions en tenant compte de la variabilité des conditions climatiques ou économiques. De plus, certains services écosystémiques tels que la biodiversité ou la protection contre les risques sont difficilement mesurables sur le terrain. Enfin, les âges d'exploitabilité (quelques dizaines d'années, voire cent ou plus) font que les décisions actuelles ont un impact non seulement dans l'immédiat (prélèvement de bois, exposition aux risques) mais aussi sur le long terme.

Pour répondre à ces préoccupations concernant la production de services écosystémiques dans le temps, la modélisation est un outil particulièrement intéressant (Seidl *et al.* 2011 ; Hynynen *et al.*, 2005). Avec l'augmentation des capacités de calcul, la modélisation des écosystèmes s'est développée rapidement au cours des dernières années. Ces développements ont permis de caractériser puis de simuler la croissance de peuplements de plus en plus complexes en tenant compte d'un nombre croissant de paramètres (Porté et Bartelink, 2002). La modélisation demeure une représentation simplifiée et théorique de la réalité, mais cette technique permet de structurer la connaissance des phénomènes et de les articuler entre eux pour accroître la connaissance.

Dans cet article, nous illustrons les apports de la modélisation et de la simulation pour la gestion multifonctionnelle des forêts par trois exemples : l'évaluation de services écosystémiques rendus tels que la fonction de protection contre la chute de pierres et la préservation de la biodiversité ; l'estimation des coûts d'opportunité de la production de services écosystémiques et la prédiction du rôle que peut jouer un massif forestier dans la lutte contre le changement climatique à court et moyen terme.

FONCTIONS DE PROTECTION CONTRE LES RISQUES NATURELS ET DE CONSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ EN FORÊT DE MONTAGNE

De nombreuses forêts de montagne ont une importante fonction de protection contre les risques naturels (avalanches, chutes de pierres, etc.). Pour ne pas déstabiliser les peuplements, la

gestion forestière y a souvent été très prudente et les forêts de montagne ont aussi localement développé des structures favorables à la conservation de la biodiversité. Cependant, ces forêts sont pour la plupart des forêts récentes, issues de travaux de restauration des terrains en montagne (RTM) ou de la colonisation d'espaces abandonnés par l'agriculture. En conséquence, elles s'inscrivent dans un processus de succession secondaire au cours duquel la structure des peuplements et les services rendus changent.

À l'aide du modèle de chute de pierres Rockyfor 3D (Dorren *et al.*, 2005), Fuhr *et al.* (2010) ont estimé un indicateur de la fonction de protection contre les chutes de pierres défini comme le pourcentage de pierres arrêtées dans leur course sur une distance de 125 m en forêt. Les simulations permettent de comparer l'efficacité du service de protection rendu par la forêt pour les cinq stades de successions majoritaires. Ils ont ainsi montré que les stades les plus denses, c'est-à-dire les stades jeunes ou le stade jardiné, arrêtent mieux les petites pierres (0,5 m³) que les stades intermédiaires plus ou moins régularisés et dominés par les gros ou très gros bois.

Fuhr *et al.* (2010) ont également estimé pour chaque peuplement la fonction de conservation de la biodiversité à l'aide d'indicateurs indirects : l'indice de Shannon sur la distribution des diamètres, la surface terrière des gros arbres et le volume de bois mort. Les stades les plus âgés (renouvellement ou jardiné) sont les plus favorables à la biodiversité en raison des dimensions des arbres et du volume de bois mort.

Le stade jardiné optimise les deux fonctions. Dans certains contextes de montagne, il est cependant difficile à pérenniser, pour des raisons écologiques⁽¹⁾, sylvicoles (dégâts d'exploitation) ou économiques. Le forestier peut alors préférer une mosaïque de stades de développement, associant des bouquets de jeunes peuplements denses là où la fonction de protection est déterminante à des îlots de vieux arbres là où les risques naturels sont moins élevés. La modélisation a dans cet exemple permis de quantifier la fourniture de services par la forêt et de discuter de modalités de gestion optimisant deux services.

COÛT D'OPPORTUNITÉ DE LA FOURNITURE DE SERVICES ENVIRONNEMENTAUX

Les capacités de simulation offertes par les modèles de croissance et production des peuplements forestiers aident à l'établissement d'itinéraires sylvicoles en fonction de l'essence et de paramètres environnementaux (Sardin, 2008). Ils peuvent également être utilisés pour analyser la production de services non-bois, si ceux-ci dépendent de l'état du peuplement. C'est ce qu'ont illustré Robert et Stenger (2011) sur un peuplement de Chêne. Ils ont calibré des indicateurs de biodiversité et de récréation utilisant des données prédites par le simulateur Fagacées. Ce simulateur contenait préalablement un module permettant d'estimer le stockage de carbone dans le peuplement (Vallet, 2005). À partir de l'assemblage de modèles ainsi constitué, ils ont simulé l'impact de différents scénarios sylvicoles sur le profit résultant de la gestion, le nombre potentiel d'espèces d'oiseaux préservées, le stockage de carbone et l'attractivité de la forêt pour la récréation. En raison des différences de révolution entre les itinéraires de gestion, deux outils d'agrégation temporelle ont été utilisés : la moyenne sur la révolution, correspondant à la production moyenne sur un massif sur lequel tous les stades de développement du peuplement seraient représentés, et la valeur actualisée nette si l'itinéraire est répété à l'infini. Les résultats obtenus ont été utilisés pour tracer l'enveloppe de fonctions de profit contraintes par la production de services environnementaux. Les frontières tracées donnent des informations sur la compa-

(1) À l'étage subalpin, seule la création de trouées permet d'obtenir la durée minimale journalière d'ensoleillement direct nécessaire à la régénération de l'Épicéa.

tibilité entre services, relativement élevée lorsque l'on observe la production moyenne de services écosystémiques. Si les résultats sont actualisés, en supposant que le peuplement est en régénération naturelle au moment de la prise de décision de gestion, alors les services deviennent substituables à cause des différences de cinétiques de production. De la fonction de profit sous contrainte ainsi déterminée, on retire une information concernant les coûts d'opportunité monétaires et non monétaires de la production de l'un des services environnementaux. On met ainsi en évidence que, lors de l'augmentation d'un service environnemental, la réduction d'un autre peut être utilisée afin de limiter l'impact monétaire. La modélisation offre dans cet exemple la possibilité d'analyser, du point de vue théorique, l'impact sur des services comme la récréation de politiques publiques visant à accroître la production de certains autres services environnementaux, tels que le stockage de carbone ou la biodiversité.

FONCTION DE STOCKAGE DE CARBONE À L'ÉCHELLE DU MASSIF FORESTIER

Notre dernier exemple montre que la modélisation est un outil permettant de réfléchir à la gestion d'un massif forestier à moyen terme. Brunet Navarro *et al.* (2011) ont utilisé le simulateur Fagacées pour simuler la croissance et la production de certains types de peuplement dans un massif forestier de l'Est de la Lorraine dominé par le Chêne et le Hêtre. Partant d'un inventaire de l'état des peuplements en 2008, ils ont calculé les prélèvements de bois et le stockage de carbone en forêt sur 20 ans correspondant au plan de gestion actuellement en vigueur.

Malgré un outil mal adapté à la réalité du terrain — Fagacées étant conçu pour la croissance de peuplements réguliers monospécifiques sans sous-étage — l'exercice a permis d'évaluer la variation des stocks de carbone dans les types de peuplement étudiés. En appliquant la méthode à l'ensemble des types de peuplement du massif, il serait possible de simuler l'évolution des stocks de carbone correspondant au plan de gestion et au besoin de tester des alternatives à ce plan. L'hétérogénéité des peuplements, l'absence de modèle adapté à certains types de peuplements et les biais d'échantillonnage — les peuplements jeunes sont très peu échantillonnés en comparaison des autres types de peuplements — sont cependant autant d'obstacles à surmonter pour en arriver à modéliser l'ensemble du massif forestier.

CONCLUSIONS

L'impact des décisions de gestion forestière sur les services environnementaux est indéniable. La modélisation est un outil permettant, par une approche simplifiée de la réalité, d'analyser le fonctionnement des écosystèmes forestiers et d'évaluer l'impact de décisions sur le moyen terme (on parle de « projections »), toutes choses étant égales par ailleurs. Les modèles peuvent être utilisés en complément d'approches de terrain pour l'évaluation des services environnementaux.

Cependant, la mise en œuvre des simulateurs s'avère souvent complexe. La qualité des prédictions est dépendante du contexte dans lequel le simulateur a été conçu. Par ailleurs, la précision de prédictions s'amenuise avec le temps. En contrepartie, les résultats obtenus grâce à une connaissance de plus en plus riche et à des systèmes de calcul de plus en plus puissants permettent d'anticiper dans leurs grandes lignes les changements futurs et de commencer dès à présent la réflexion sur la production de services écosystémiques dans le cadre du changement climatique.

Nicolas ROBERT
Mission de la stratégie
et des affaires européennes et internationales
INSTITUT DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE (IGN)
73 avenue de Paris
F-94160 SAINT-MANDÉ

et
Laboratoire d'Économie forestière
UMR INRA-AgroParisTech
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY Cédex
(nicolas.robert@ign.fr)

Mathieu FORTIN
LERFoB (Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois)
UMR INRA-AgroParisTech 1092
AgroParisTech
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY Cédex
(mathieu.fortin@agroparistech.fr)

Marc FUHR
Écosystèmes montagnards
Irstea
2 rue de la Papeterie
F-38400 SAINT-MARTIN-D'HÈRES Cédex
(marc.fuhr@irstea.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- BRUNET NAVARRO (P.), FORTIN (M.), WERNSDÖRFER (H.), EHRHART (Y.), NINGRE (F.). — Évaluer le bilan de carbone d'un massif forestier. *In* : Ateliers Regefor. 15 juin 2011. [En ligne] http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens_article/evenements/2011/REGEFOR_2011_Resumesatelier%204.pdf
- DORREN (L.K.A.), BERGER (F.), PUTTERS (U.S.). — Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non forested slopes. — *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 2005, pp. 145-153.
- FUHR (M.), CLOUET (N.), CORDONNIER (T.), BERGER (F.). — Gestion multifonctionnelle des forêts de montagne, quels compromis entre les fonctions de protection et de conservation ?. — *Sciences Eaux et Territoires*, n° 3, 2010, pp. 20-25.
- HYNYNEN (J.), AHTIKOSKI (A.), SIITONEN (J.), SIEVANEN (R.), LISKI (J.). — Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production. — *Forest Ecology and Management*, 207, n° 1-2, 2005, pp. 5-18.
- PORTÉ (A.), BARTELINK (H.H.). — Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. — *Ecological Modelling*, 150, 2002, pp. 141-188.
- ROBERT (N.), STENGER (A.). — Produire du bois, préserver la biodiversité, accueillir le public ou stocker du carbone : faut-il choisir ? *In* : Ateliers Regefor. 15 juin 2011.
- SARDIN (T.). — Guide des sylvicultures – Chênaies continentales. — Paris : Office national des forêts, 2008.
- SEIDL (R.), FERNANDES (P.M.), FONSECA (T.F.), GILLET (F.), JÖNSSON (A.M.), MERGANICOVA (K.), NETHERER (S.), ARPACI (A.), BONTEMPS (J.D.), BUGMANN (H.), GONZALEZ-OLABARRIA (J.R.), LASCH (P.), MEREDIEU (C.), MOREIRA (F.), SCHELHAAS (M.J.), MOHREN (F.). — Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. — *Ecological Modelling*, vol. 222, n° 4, 2011, pp. 903-924.
- VALLET (P.). — Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction "puits de carbone" des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), 2005. — 195 p. (Thèse de doctorat).