

## Modéliser et quantifier les services écosystémiques forestiers à l'échelle des petits territoires

**La forêt occupe près de 30 % du territoire français et fournit de nombreux services de production, de régulation et culturels. L'évaluation de ces services écosystémiques et de leurs évolutions pose des défis majeurs pour les scientifiques et les décideurs, qui plus est à l'échelle des petits territoires pour lesquels les données ou indicateurs élaborés à l'échelle nationale ne sont guère transposables. Des progrès importants ont toutefois été réalisés ces dernières années, reposant le plus souvent sur l'utilisation conjointe de bases de données, d'outils de télédétection et de modèles démographiques appliqués à différentes échelles. Cet article illustre, au travers de trois cas d'étude qui concernent la forêt de montagne, les avantages et limites de certaines de ces approches et propose ensuite des voies d'amélioration dans l'objectif d'appuyer les prises de décision pour des projets de développement territorial.**



Les forêts occupent une place majeure en France : elles couvrent près de 30 % de la surface métropolitaine et sont très diversifiées, en raison de la présence de plusieurs domaines bioclimatiques et d'une grande hétérogénéité de pratiques de gestion. Elles sont pour moitié mélan-

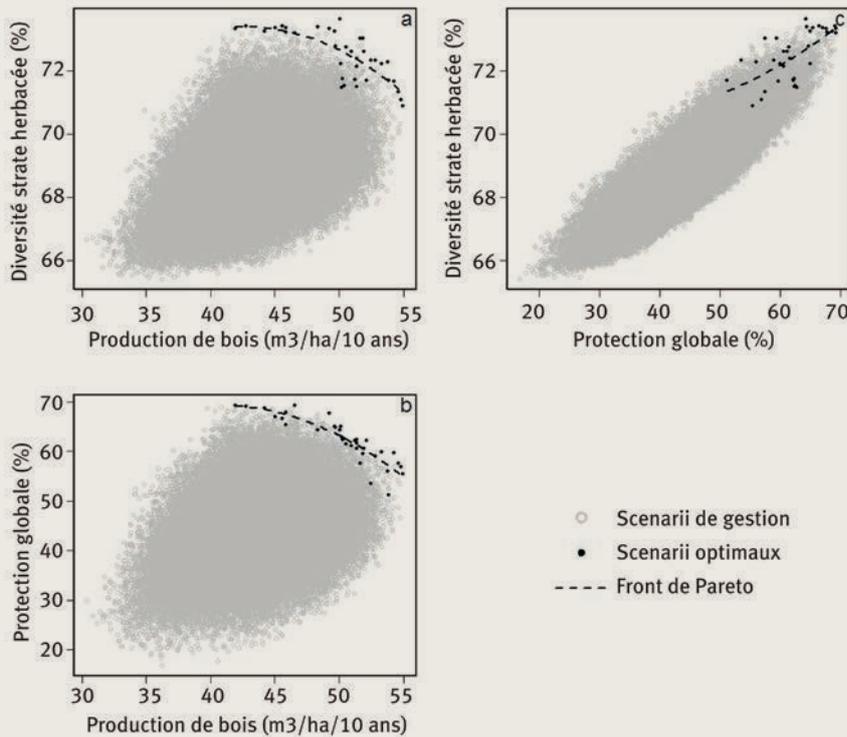
gées en espèces, ce qui représente un intérêt certain pour la biodiversité et pour l'attractivité des paysages. Enfin, elles régulent nombre de processus climatiques et hydrologiques, et réduisent l'impact d'aléas naturels sur les infrastructures et les habitations. La forêt est ainsi une source remarquable de biens et de services pour la société qu'on regroupe sous le terme de services écosystémiques (Chevassus-au-Louis, 2012). Il s'agit aussi bien de services de régulation, comme le contrôle de l'érosion ou le stockage du carbone, de services d'approvisionnement, dont l'un des plus notables est la fourniture de bois pour la construction ou pour l'énergie, que de services culturels, la forêt étant le théâtre de maintes activités sportives ou autres activités ressourçantes pour le corps et l'esprit.

L'apport de la notion de service écosystémique est de trois ordres. Premièrement, elle met l'accent sur le lien entre le service lui-même (ex. : fourniture de bois) et le fonctionnement de l'écosystème (ex. : production pri-

maire). Deuxièmement, elle opère mieux la distinction entre le service potentiel (ex. : limitation des aléas gravitaires) et le service réel (ex. : protection d'un enjeu) ; soit finalement entre offre naturelle, demande sociale et résultat final tel que « négociable » par la gestion. Troisièmement, la notion de service sous-tend la question de son évaluation par rapport aux besoins sociétaux, de manière beaucoup plus explicite par exemple que la notion de multifonctionnalité. Cette quantification doit permettre de mieux cerner l'importance du service écosystémique considéré, qui peut varier spatialement et au cours du temps, mais également de déterminer les interdépendances avec les autres services.

La quantification des services écosystémiques forestiers pose toutefois des difficultés particulières, notamment aux échelles intermédiaires que sont les petits territoires (ex. : parc naturel régional, communauté de communes). Dans cet article, nous illustrons, au travers de trois cas d'étude qui concernent la forêt de montagne, certains avantages et limites d'approches actuelles de quantification des services écosystémiques. Nous abordons successivement le problème posé par les échelles intermédiaires et l'intérêt des outils de télédétection et de modélisation pour la quantification des services écosystémiques actuels ou potentiels. Nous insistons enfin sur une voie de progrès possible pour la quantification

- ❶ **Compromis et synergies entre trois services écosystémiques (production de bois, biodiversité, protection contre les risques gravitaires) en sapinière-pessière irrégulière de montagne, services représentés par trois indicateurs :**
- le volume moyen récolté ( $m^3/ha/10$  ans) ;
  - la moyenne des richesses spécifiques relatives (RS scénario  $i$  / RS max) de trois groupes écologiques de la flore vasculaire (sciaphiles, intermédiaires, héliophiles) ;
  - la moyenne des trois scores relatifs (Score scénario  $i$  / Score max) pour la protection contre les avalanches, les chutes de blocs et les glissements de terrain.



Les points gris représentent les valeurs obtenues des indicateurs pour 100 000 scénarii de gestion, projetés en 2D pour chaque paire de services.

Les points noirs représentent les scénarii optimaux selon la méthode des fronts de Pareto, i.e. les scénarios maximisant localement au moins un des services (NB : le front est défini en 3D et projeté ici en 2D).

La courbe en pointillés est une régression effectuée sur les projections 2D du front de Pareto. Elle permet notamment de caractériser les compromis (a et b) et synergies (c) entre SEs.

des services écosystémiques dans les petits territoires, à savoir le couplage explicite et structuré d'approches de télédétection (ex. : LIDAR, télédétection par laser), de modélisation démographique (dynamique des forêts) et de fonctions de liens (algorithme, sous-modèle ou indicateur, qui relie les sorties du modèle aux services écosystémiques). Un tel couplage permettrait de tester les effets à moyen terme sur les services écosystémiques forestiers de différents scénarios socio-économiques et ainsi d'appuyer les prises de décision pour des projets de développement de territoires.

### Cas d'étude

#### Compromis et synergies entre différents services écosystémiques à l'échelle du peuplement

Dans le cadre des projet ESNET (Futur des réseaux de services écosystémiques dans la région urbaine de Grenoble), ARANGE (*Advanced multifunctional forest management in European mountain ranges*) et GeForHet (Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité : quelle gestion multifonctionnelle des peuplements hétérogènes?), une étude a établi les relations entre le service de production de bois, le service de protection contre les aléas gravitaires et la conservation de la biodiversité en forêt de montagne (Lafond *et al.*, 2016).

Cette étude repose sur l'utilisation d'un modèle de dynamique forestière (Samsara2) qui permet de simuler la gestion de peuplements irréguliers de sapins et d'épicéas purs ou mélangés d'une surface de quatre hectares. Pour chaque scénario de gestion et chaque état initial du peuplement, les simulations fournissent des données permettant le calcul d'indicateurs liés aux services (ex. : le volume moyen de bois récolté, un indice synthétique de protection contre les aléas gravitaires, le volume de bois mort). Certaines fonctions de lien plus élaborées sont couplées au modèle de dynamique forestière pour améliorer l'évaluation de la biodiversité (ex. : algorithme prédisant la diversité floristique en fonction de la structure forestière). Le nombre de scénarii de gestion testés étant très élevé (100 000), il est alors possible de construire des relations quantitatives entre les paramètres de gestion (ex. : taux de récolte, diamètre d'exploitabilité) et les indicateurs de service écosystémiques. La méthode des Fronts de Pareto est ensuite appliquée aux résultats pour déterminer les compromis ou synergies possibles entre les services écosystémiques étudiés. Les résultats révèlent un compromis marqué entre biodiversité et production, un léger compromis entre production et protection ainsi que de possibles synergies entre diversité floristique et protection (figure ❶).

## Services culturels liés au tourisme de nature sur un petit territoire

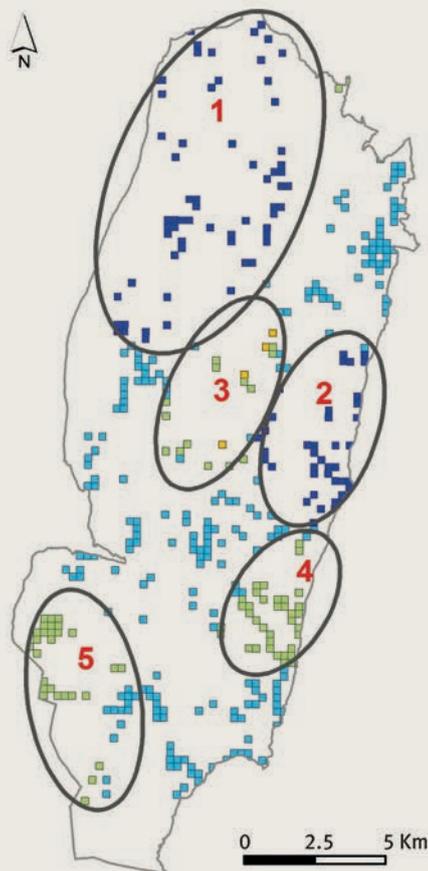
Dans le cadre du projet européen OpenNESS (*Operationalisation of natural capital and ecosystem services*), une analyse des services écosystémiques culturels a été réalisée sur le territoire du massif des Quatre Montagnes dans le Vercors (Tenerelli *et al.*, 2016). Cette étude est basée sur la localisation de visiteurs dans le territoire, en supposant que ces visiteurs sont attirés par l'endroit où ils prennent des photos. Les métadonnées, les étiquettes et la position géographique des photos ont été obtenues grâce à l'interface de programmation d'applications (API) qui est accessible au public pour des applications web 2.0 telles que Flickr. Après vérification, validation et classification des photos (1 326 au total), le nombre de photos de chaque unité géographique (grille de 250 m x 250 m) est utilisé comme indicateur de la fourniture réelle de services culturels au sein de l'unité. Le nombre de photos est ensuite mis en regard de différents indicateurs au niveau du paysage dont la variation spatiale peut affecter la fourniture de services culturels. Quatorze variables explicatives ont ainsi pu être sélectionnées. Il s'agit de variables environnementales ou liées à des infrastructures (ex. : proximité d'un

point de vue, proximité d'une route, type de végétation), qui sont considérées comme les principaux moteurs des opportunités concernant les services culturels. Des modèles géostatistiques sont appliqués afin de vérifier si les éléments paysagers ont une influence homogène sur le territoire étudié. Un des principaux résultats est que la diversité des habitats naturels, l'accessibilité et la proximité de points de vue influencent de manière significative le nombre de photos, mais de manière variable sur le territoire (figure 2).

### Service de protection contre les chutes de blocs à différentes échelles

Toujours dans le cadre du projet ESNET, une carte des forêts à rôle de protection contre les chutes de blocs a été réalisée sur l'ensemble du département de l'Isère (figure 3). Cette cartographie est basée sur un algorithme qui calcule en chaque point du modèle numérique de terrain la pente de la ligne de plus grande énergie. Cette pente permet de déterminer, selon sa valeur, le potentiel d'occurrence de chutes de blocs et ainsi le rôle potentiel que peut jouer la forêt pour limiter la propagation des blocs. Cette première approche de cartographie peut être ensuite affinée, à l'échelle d'un versant, par l'utilisation d'un modèle mécaniste (ROCKYFOR3D), qui simule la

2 Pourcentage de déviance locale expliquée par un modèle statistique du type « geographically weighted Poisson regression model » qui prédit de manière spatialisée le nombre de photos en fonction de paramètres du paysage sur le territoire des Quatre Montagnes (Vercors). Les groupes 1 et 2 représentent des zones où le pourcentage est plus élevé que la moyenne ; les groupes 3, 4, 5, représentent des zones où le pourcentage est plus faible que la moyenne. Le tableau représente la significativité statistique locale des paramètres pour chaque groupe.



Significativité statistique locale des paramètres pour chaque groupe

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Autre
Point de vue	-	++++	-	+	++++	++
Géologie	+	-	-	-	-	+
Surface d'eau	+	-	-	+	+	++
Accessibilité	++++	+	-	+	+	+++
Station de ski	+++	++++	+	+	-	+
Point de repos	-	+	-	-	+	+
Statut de protection	-	+++	-	-	+	+
Pente	-	+++	-	+	-	+
Insolation	+	++++	+	+++	-	+
Population	-	+++	+	+	-	+
Habitat	+++	+++	+	+	++++	+
Diversité des habitats	+++	+++	+	+	+	+++

++++ : significatif partout

+++ : significatif dans plus de 50 % des pixels

++ : significatif dans 50 % des pixels

+ : significatif dans moins

de 50 % des pixels

- : non significatif

Pourcentage de déviance locale expliquée

0,1333 – 0,2800

0,2800 – 0,4278

0,4278 – 0,5756

0,5756 – 0,7234

trajectoire de blocs de dimensions définies au sein de la forêt, en tenant compte des impacts possibles sur le tronc des arbres. En sortie, des indicateurs de protection sont calculés (ex. : proportion de blocs arrêtés à une distance fixée). Ce modèle, qui nécessite la connaissance de la structure en diamètre d'une forêt, a par exemple été employé pour étudier les relations entre conservation de la biodiversité et protection contre les chutes de blocs dans des peuplements ayant atteint différents stades de maturité.

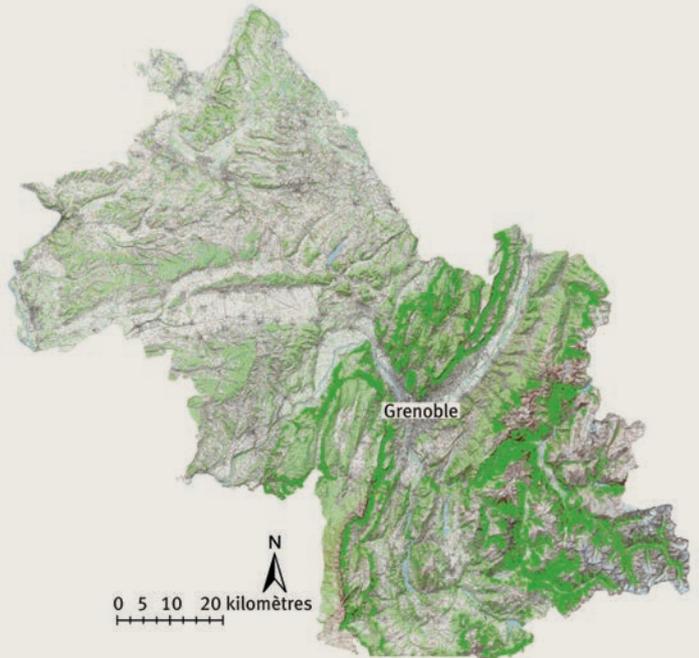
### Le problème des échelles intermédiaires

Les trois études citées ont été menées à différentes échelles : le peuplement forestier pour la première, la communauté de communes pour la deuxième et le département ou un versant dans la dernière. Les résolutions spatiales permises par les outils employés sont toutefois similaires : 4 ha pour la première, 6,25 ha pour la seconde et celle du modèle numérique de terrain pour la dernière. Travailler à ces échelles intermédiaires (plus grand que le peuplement mais plus petit que la région) pose des difficultés toutes particulières. En effet, à ces échelles, la plupart des systèmes d'information, bases de données nationales ou régionales ne peuvent être mobilisés en raison d'un manque de données ou d'une puissance statistique insuffisante. La spatialisation des niveaux de services au sein du territoire devient alors une véritable gageure. Pour le cas de la production forestière, les données forestières « nouvelle méthode » de l'Institut national de l'information géographique et forestière (depuis 2005) peuvent par exemple être utilisées à l'échelle de la région – ou même du département pour certaines – mais plus difficilement à des échelles plus fines. Source d'information potentiellement très intéressante, les documents d'aménagements forestiers ne sont toutefois pas homogènes et couvrent des périodes différentes. En outre, de nombreuses forêts privées ne font pas l'objet de plans simples de gestion. Il existe donc un réel déficit de données pour traiter correctement les échelles intermédiaires. Étonnamment, c'est bien notre exemple sur les services culturels qui s'avère applicable à de telles échelles, et ce grâce au développement d'un site web de partage de photos. La cartographie des forêts à fonction de protection peut certes couvrir de vastes territoires mais s'avère limitée en termes de niveau de quantification du service. Quant à l'étude sur les compromis et synergies entre services, elle se limite à l'échelle du peuplement et son éventuelle application à des territoires nécessite des données spatialisées de structures forestières. Comment pallier ces problèmes qui limitent grandement l'opérationnalité du concept de service écosystémique ?

### Intérêt de la télédétection et de la modélisation

La quantification des services écosystémiques fournis par la forêt implique de disposer de données relativement détaillées sur la structure des peuplements (espèces, distribution des diamètres, distribution spatiale des arbres) et si possible de leur dynamique (croissance, mortalité et régénération). Ces données statiques et dynamiques sont en effet essentielles pour renseigner des indicateurs de services écosystémiques qui puissent être per-

- ③ Forêts à fonction de protection (en vert foncé) vis-à-vis de l'aléa chute de blocs dans le département de l'Isère. Le zonage est réalisé en utilisant le principe de la ligne d'énergie pour un angle de 32° et un modèle numérique de terrain d'une résolution de 25 x 25 m.



tinents. L'acquisition de ces données peut reposer sur un dispositif *in situ* dédié (ex. : réseaux de placettes de mesures) ou sur des outils de télédétection. Les avancées dans ce domaine sont d'ailleurs particulièrement rapides. Le LIDAR aérien représente de ce point de vue un exemple intéressant (Monnet *et al.*, 2015). En éventuelle association avec des images satellitaires, il ouvre des perspectives pour l'évaluation de la ressource en bois, la caractérisation des structures forestières ou des habitats forestiers sur des petits territoires. Un autre atout du LIDAR est de fournir des données très précises sur la topographie et donc sur les conditions de desserte et d'exploitation, qui sont des préoccupations majeures en forêt de montagne et se révèlent fondamentales pour aborder les services écosystémiques. À noter toutefois que le LIDAR nécessite la mise en place d'un minimum de placettes de terrain ou l'utilisation de données de terrain déjà existantes pour calibrer les analyses et que l'acquisition des données LIDAR à l'échelle d'un territoire reste encore assez coûteuse.

L'utilisation de modèles de dynamique forestière (Pérot et Ginisty, 2004) offre une autre voie intéressante pour la quantification des services écosystémiques. La première étude présente ainsi une portée générale en ce sens qu'elle prédit la valeur d'un indicateur de service écosystémique en fonction de paramètres de gestion en tenant compte de l'état initial du peuplement forestier et de certains paramètres démographiques. L'expérimentation virtuelle permet ici de déterminer la sensibilité des services écosystémiques aux pratiques de gestion et aux

► conditions locales. Un autre avantage des modèles de dynamique forestière est que l'on peut tester d'autres effets que la seule gestion, pour peu que les modèles les prennent en compte, comme ceux du changement climatique. Une difficulté majeure réside alors, comme nous l'avons vu précédemment, dans l'échelle d'application de ces modèles. Pour dépasser l'échelle du peuplement, les modélisateurs disposent de deux options :

- appliquer des modèles peuplement à des peuplements dits représentatifs (conditions écologiques et gestion) du territoire pour lesquels on dispose d'une cartographie ;
- utiliser des modèles ou des plateformes de simulation adaptés à l'échelle du massif.

Ces options s'accompagnent d'étapes de calibration et de validation des modèles et requièrent des données d'observations pour pouvoir initialiser les simulations.

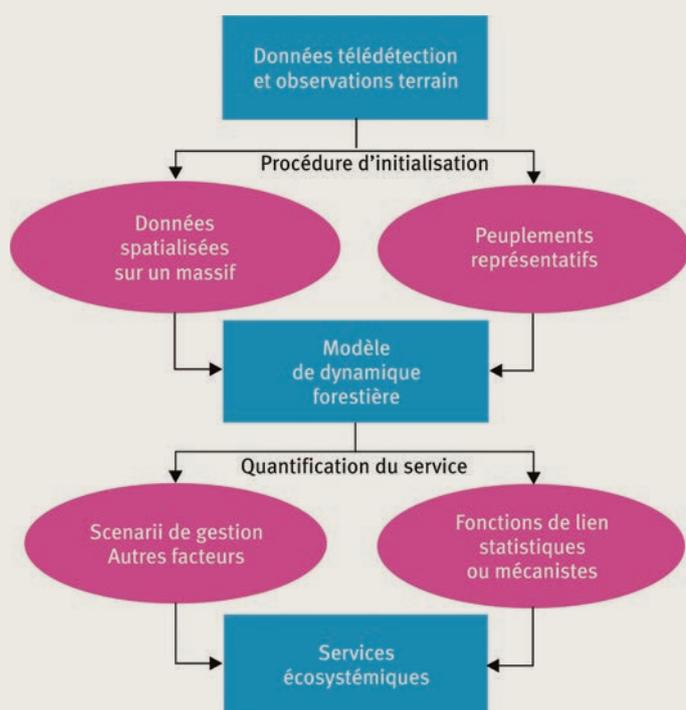
Bien entendu, les résultats dépendent de la structure du modèle et des hypothèses qui ont conduit à son élaboration. Il faut donc être précautionneux quand on tire des conclusions avec ce type d'approche. Une autre limite de l'approche réside dans les indicateurs eux-mêmes, qui peuvent être parfois un peu simplistes ou très indirects. Aussi, un autre enjeu consiste à améliorer les fonctions de liens entre les sorties des modèles et la quantification des services écosystémiques. Ces fonctions de lien peuvent être des modèles mécanistes assez complexes, comme c'est le cas pour le modèle ROCKYFOR3D, ou

alors des modèles statistiques calibrés par ailleurs en reliant un service à des variables prises en compte par le modèle, comme par exemple la structure en diamètre du peuplement, l'abondance des espèces d'arbre ou encore le couvert forestier.

### Coupler télédétection, modèles et fonctions de lien

L'évaluation conjointe de plusieurs services sur une même unité géographique, selon divers scénarios de gestion, se présente comme l'outil stratégique d'avenir pour orienter la gestion forestière, permettant d'arbitrer dans le temps les compromis entre services. Un tel objectif implique l'utilisation d'une approche intégrée, cohérente et harmonisée. Il nous semble qu'une voie prometteuse pour l'atteindre réside dans le couplage effectif d'approches de télédétection, de modélisation de la dynamique forestière et de fonctions de lien élaborées, si possible mécanistes (figure 4). Les outils de la télédétection permettent d'envisager à court terme l'initialisation de simulations par des modèles de dynamique forestière qui ont besoin en entrée de données sur la structure de la forêt et certains facteurs écologiques (topographie, sol, climat). Les avantages de la télédétection sont de pouvoir disposer de données sur des étendues compatibles avec les petits territoires. Les efforts en termes d'acquisition de données sur le terrain restent alors raisonnables. En revanche, cela nécessite des compétences spécifiques en analyse du signal et d'imagerie satellitaire. Les modèles comme Samsara2 permettent quant à eux de quantifier des services écosystémiques liés à des flux de matière (ex. : production, stockage de carbone). Le couplage avec des fonctions de lien est en cours mais les marges sont encore importantes dans ce domaine. Par exemple, le couplage avec des modèles mécanistes permettant de caractériser la protection contre les glissements de terrain reste à faire. Par ailleurs, une meilleure connexion entre sylviculture et exploitation, structures forestières et services culturels et une meilleure intégration des modèles économiques restent encore à développer.

4 Schéma représentant le couplage entre des données de télédétection et des modèles de dynamique forestière pour la quantification des services écosystémiques. Les procédures d'initialisation des simulations, de définition des scénarios de gestion et d'élaboration de fonctions de lien représentent des étapes clés.



### Conclusions

Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années pour permettre une meilleure quantification des services écosystémiques. Les exemples fournis dans cet article illustrent certaines de ces avancées, qui reposent le plus souvent sur l'utilisation conjointe de bases de données, d'outils de télédétection et de modèles statistiques ou démographiques appliqués à différentes échelles. Ces différentes approches présentent des limites et ne sont pas forcément compatibles en termes d'échelle, de résolution et de niveau de détail dans la quantification des services. Il nous paraît donc essentiel de réfléchir à des approches qui puissent produire des évaluations de plusieurs services sur la base d'une même méthodologie, harmonisée et cohérente. Une voie de progrès possible à court terme nous semble résider dans la construction d'une chaîne de traitement qui articule l'acquisition de données de télédétection (couplées à des données de calibration terrain), l'initialisation de modèles de dynamique forestière et l'évaluation de la

❶ La forêt est une source remarquable de services écosystémiques : services de régulation (contrôle de l'érosion, stockage du carbone), services d'approvisionnement (fourniture de bois pour la construction et l'énergie) mais aussi services culturels et récréatifs.



© V. Pagneux (Irstea)

production de services écosystémiques par des fonctions de lien utilisant au mieux les sorties des modèles de dynamique forestière applicables à l'échelle du peuplement ou du massif. Cette nouvelle chaîne d'outils conduit à raisonner une gestion forestière concertée à l'échelle-clé des collectivités locales. Elle est par exemple mise en œuvre dans le cadre du projet PSDR4 OUI-GEF (Outils innovants pour une gestion concertée des forêts) qui a débuté en 2015. ■

### EN SAVOIR PLUS...

- **CHEVASSUS-AU-LOUIS, L.**, 2012, Les services écologiques des forêts : définition des concepts, origine et typologies, *Revue Forestière Française*, n° 64, p. 213-224.
- **LAFOND, V., CORDONNIER, T., MAO, Z., COURBAUD, B.**, 2016, Tradeoffs and synergies between ecosystem services in uneven-aged mountain forests: evidences using Pareto Fronts, *European Journal of Forest Research*.
- **MONNET, J.-M., CHIROUZE, E., MERMIN, E.**, 2015, Estimation de paramètres forestiers par données LiDAR aéroporté et imagerie satellitaire RapidEye - Étude de sensibilité, *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 211-212, p. 71-80.
- **PEROT, T., GINISTY, C.**, 2004, *Bilan et perspectives sur les modèles de croissance, de dynamique forestière et de qualité des bois*, Rapport de convention Cemagref/DGFAR, Cemagref, 190 p.
- **TENERELLI, P., DEMSAR, U., LUQUE, S.**, 2016, Crowdsourcing indicators for cultural ecosystem services: A geographically weighted approach for mountain landscapes, *Ecological Indicators*, n° 64, p. 237-248.

### Les auteurs

**Thomas CORDONNIER, Frédéric BERGER, Christophe CHAUVIN, Benoît COURBAUD, Marc FUHR et Patrizia TENERELLI**

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR EMGR, Centre de Grenoble, 2 rue de la Papeterie, BP 76, F-38402 St-Martin-d'Hères, France.

✉ [thomas.cordonnier@irstea.fr](mailto:thomas.cordonnier@irstea.fr)

✉ [frederic.berger@irstea.fr](mailto:frederic.berger@irstea.fr)

✉ [christophe.chauvin@irstea.fr](mailto:christophe.chauvin@irstea.fr)

✉ [benoit.courbaud@irstea.fr](mailto:benoit.courbaud@irstea.fr)

✉ [marc.fuhr@irstea.fr](mailto:marc.fuhr@irstea.fr)

✉ [patrizia.tenerelli@irstea.fr](mailto:patrizia.tenerelli@irstea.fr)

**Valentine LAFOND**

ETH Zurich, Department of Environmental Sciences, Institute of Terrestrial Ecosystems, Forest Ecology, CH-8092 Zurich, Suisse.

✉ [valentine.lafond@usys.ethz.ch](mailto:valentine.lafond@usys.ethz.ch)

**Sandra LUQUE**<sup>1,2</sup>

1. Université Grenoble Alpes, Irstea, UR EMGR, Centre de Grenoble, 2 rue de la Papeterie, BP 76, F-38402 St-Martin-d'Hères, France.

2. University of St Andrews, School of Geography and Geosciences, North Street, KY16 9AJ St Andrews, Scotland, Royaume-Uni.

✉ [sandra.luque@irstea.fr](mailto:sandra.luque@irstea.fr)

**Zhun MAO**

INRA, UMR AMAP, Boulevard de la Lironde, F-34398 Montpellier Cedex 5, France.

✉ [zhun.mao@inra.fr](mailto:zhun.mao@inra.fr)