

LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DES SOLS FORESTIERS : QUELLES AVANCÉES ?

LES AVANCÉES DE LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE LA MODÉLISATION DES INTERACTIONS SOL-ARBRE

**LAURENT SAINT-ANDRÉ – JULIEN SAINTE-MARIE – SOPHIE LEGUÉDOIS – BRUNO FERRY –
FRANÇOIS LAFOLIE – CLAIRE MARSDEN – GREGORY VAN DER HEIJDEN – ÉRIC DUFRÈNE –
JEAN-DANIEL BONTEMPS – ARNAUD LEGOUT**

Les écosystèmes forestiers sont par nature très variables :

- dans leur dimension verticale où leur interaction avec l’environnement s’étend de la roche mère à l’atmosphère ;
- dans leur dimension horizontale car la variabilité spatiale de la topographie, des propriétés du sol, de la sylviculture, de l’historique de gestion et de l’occupation des sols, font que la structure et le fonctionnement d’un écosystème peuvent varier sensiblement dans un voisinage local ;
- et, enfin, dans leur dimension temporelle car les révolutions varient de moins d’une dizaine d’années (typiquement, l’Eucalyptus ou l’Acacia en milieu tropical), à quelques dizaines d’années (Hêtre, résineux en milieux tempérés et tropicaux) jusqu’à plusieurs centaines d’années (exemple : Chêne, Séquoia) ; pendant ces révolutions, des perturbations plus ou moins soudaines et des forçages naturels ou anthropiques de long terme peuvent se traduire en dynamiques, dont l’ampleur et le déroulement échappent largement à l’intuition immédiate.

Il en résulte que l’étude de leur fonctionnement est très complexe du fait de la diversité des échelles temporelles et spatiales qu’il faut prendre en compte, ainsi que les interactions et rétroactions entre processus.

Ces écosystèmes sont soumis à deux tensions sociétales antagonistes. D’une part, la pression sur les forêts va s’accroître pour satisfaire les besoins en bois d’œuvre, bois d’industrie (en particulier la pâte à papier) ainsi qu’en bois énergie (prélèvement envisagé des souches et des menus bois). Mais, d’autre part, de fortes attentes sont exprimées dans le domaine de l’environnement et du développement durable (Brundtland, 1987 et les conférences internationales qui ont suivi), avec le principe général de pouvoir satisfaire nos besoins présents sans hypothéquer la possibilité des générations futures de satisfaire les leurs. À ce contexte sociétal s’ajoute un contexte environnemental, dans lequel les écosystèmes forestiers sont soumis aux évolutions globales et régionales des conditions de milieu (notamment climat et les dépôts atmosphériques) sur le long terme ainsi qu’à un accroissement du nombre et de l’intensité des aléas (sécheresses, tempêtes, etc.) qui ont influencé, ou vont modifier, leur production (exemple : changements de productivité, Badeau *et al.*, 1995 ; Bontemps *et al.*, 2012 ; Charru *et al.*, 2014), leur composition (Lenoir *et al.*, 2008 ; Bertrand *et al.*, 2011) et leur capacité à se renouveler (Lenoir *et al.*, 2009).

Dans ce cadre, les interrogations émanant de préoccupations de politique et de gestion forestière peuvent être regroupées en deux grands types, ayant conduit à des approches de modélisation

disjointes (Fontès *et al.*, 2010). Ces préoccupations et les approches de modélisation associées sont détaillées ci-dessous :

– d'ordre économique : Quel itinéraire sylvicole pour atteindre tel ou tel objectif ? En quantité ou en qualité de bois ? Quels essences, hybrides, clones et quelles substitutions ? Comment assurer, dans le temps, la pérennité du couvert forestier, du puits de carbone et de la production ? Quel usage de la biomasse (bois d'œuvre, d'industrie ou d'énergie) ? Ces questions ont initialement motivé la mise en place de nombreux essais sylvicoles (par exemple GIS COOP) ou des suivis sur placettes permanentes, qui ont permis l'élaboration de modèles de croissance à base dendrométrique avec une préoccupation nouvelle pour l'intégration synthétique des effets/forçages environnementaux (Seynave *et al.*, 2005, 2008 ; Bontemps et Bouriaud, 2014).

– d'ordre environnemental : Quel est l'impact des essences et du régime sylvicole sur la fertilité et la matière organique dans les sols et leurs dynamiques ? Quel est l'impact des changements environnementaux sur les interactions sol-plante ? Ces questions ont abouti à de nombreux essais/sites ateliers sur les cycles biogéochimiques, les flux de matière et d'énergies, qui ont notamment permis l'élaboration de modèles de fonctionnement des écosystèmes forestiers à base écophysiological ou biogéochimique, permettant de représenter les processus explicitant les interactions plante-milieu.

La double exigence publique (production durable et préservation des milieux) rend nécessaire le rapprochement entre ces questionnements et approches de modélisation. Cela suppose :

– d'une part, de comprendre les processus biogéochimiques contrôlant la dynamique des écosystèmes forestiers à différentes échelles afin de suggérer les leviers de pilotage potentiels s'offrant à la gestion pour maintenir les fonctions et services de la forêt dans un contexte de changements globaux (changements climatiques et changement d'usage des terres) ;

– d'autre part, la nécessité de développer les méthodologies et les outils dans lesquels la végétation et le sol évolueraient conjointement sous l'effet des changements globaux et des décisions des gestionnaires (amendements, choix des essences, itinéraires sylvicoles). L'ensemble, végétation/sol/sylviculture, ayant des conséquences, par exemple, sur le réseau hydrique en termes de quantité et de qualité des eaux.

Les modèles, qui sont des représentations schématiques (souvent sous forme mathématique) du fonctionnement des écosystèmes, forment une partie très importante de ces outils. Ils permettent, notamment, d'interpoler le fonctionnement des écosystèmes entre deux situations de calibrations pour lesquelles les données sont disponibles et d'étendre ainsi la capacité d'expertise à destination des gestionnaires.

Les objectifs de cette communication sont :

– de fournir un état des lieux des modèles sol-plante en cours de développement dans les différentes disciplines que sont la dendrométrie, l'écophysologie et les sciences du sol ;

– de montrer comment les concepts de ces trois disciplines, par leurs interfaces, permettent de construire des outils répondant aux interrogations émanant de préoccupations de politique et de gestion forestière ;

– et enfin d'identifier les verrous qui devront être levés dans la prochaine décennie pour disposer d'outils permettant une évaluation simultanée de l'impact des changements globaux (climat, usage des terres, dépôts atmosphériques) et de la gestion sur les différentes fonctions de la forêt [par exemple maintien du couvert et protection des sols, fourniture de bois, quantité et qualité des eaux, maintien des fonctions chimiques, physiques et biologiques des sols, puits de carbone (stock sur pied et produits bois en substitution à d'autres matériaux plus énergivores)].

À noter que les modèles issus de l'écologie des communautés (par exemple : modèles de niche) ou de l'écologie théorique (modèles de migration, de recrutement, *gap models*...), en lien avec la diversité biologique forestière, ne sont pas traités dans cette communication. Notre propos concerne

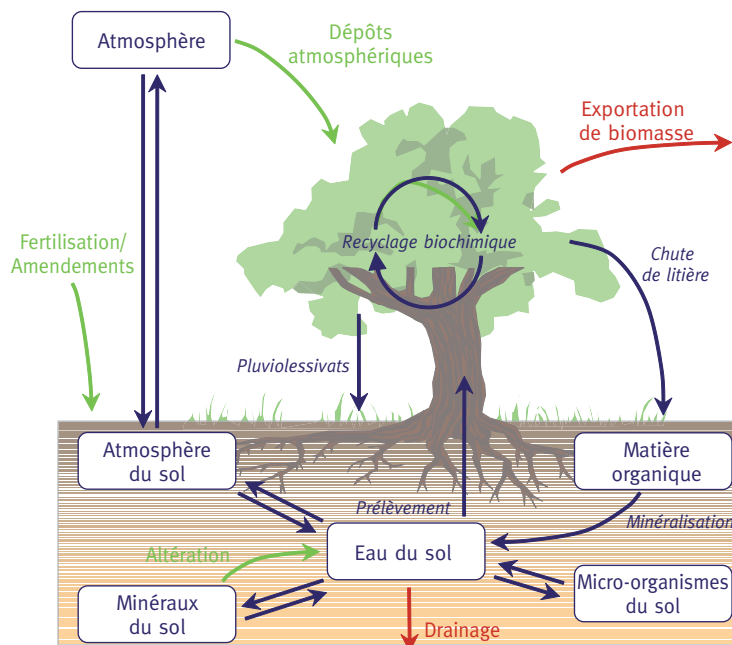
uniquement les interactions entre le sol et la plante, c'est-à-dire la croissance et la structure des peuplements forestiers, ainsi que l'évolution des propriétés et fonctions du sol.

UNE DÉMARCHE NÉCESSAIREMENT INTERDISCIPLINAIRE

Les écosystèmes forestiers peuvent être modélisés par les flux de matière et d'énergie, ou par les dynamiques des populations qui les composent (arbres, micro- et macro- organismes du sol). Ils sont en général localisés sur des sols pauvres, peu propices à l'agriculture, potentiellement fragiles, et soumis à des pressions anthropiques plus ou moins fortes (de la forêt en réserve intégrale jusqu'aux plantations industrielles gérées intensivement). Étudier et modéliser les cycles biogéochimiques dans un écosystème forestier (figure 1, ci-dessous) permet de caractériser les flux de carbone, d'eau et d'éléments minéraux dans cet écosystème, de comprendre son fonctionnement organo-minéral, et d'en déduire les dysfonctionnements qui pourraient être induits par la gestion ou par une modification de l'environnement, telle une baisse (ou une hausse) de la pollution atmosphérique, ou par des perturbations affectant fortement la structure et la composition de l'écosystème.

FIGURE 1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES À PRENDRE EN COMPTE DANS LES MODÈLES DE DYNAMIQUES FORESTIÈRES

Les processus représentés peuvent être d'origine biologique ou physicochimique. Les flèches vertes représentent les principales entrées d'éléments minéraux, les flèches rouges les exportations et les flèches bleues les flux.



Étudier et modéliser la dynamique de population permet d'identifier les processus de compétition et d'interaction entre arbres, entre essences en lien avec la disponibilité des ressources hydriques et minérales, et d'en déduire la meilleure façon d'accompagner les peuplements forestiers face aux changements globaux. Ces modèles peuvent être construits par l'observation du comportement

global du système (construction phénoménologique ou empirique), ou par assemblage de processus identifiés (construction mécaniste).

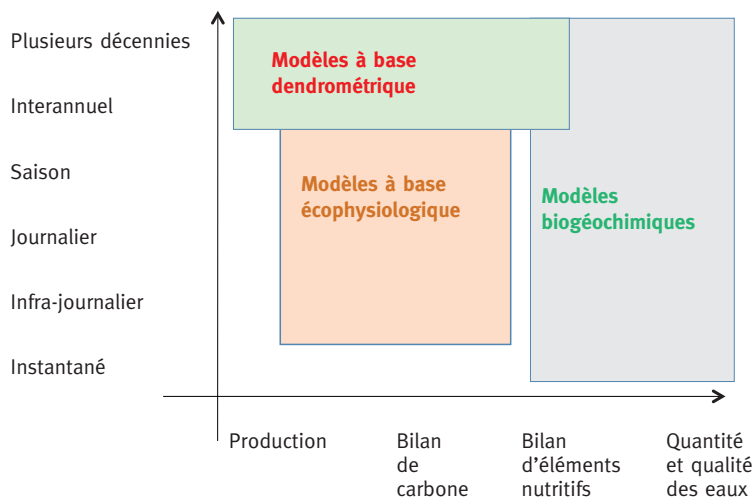
Trois grandes catégories de démarches sont ensuite utilisées pour comprendre et modéliser le fonctionnement des écosystèmes forestiers dans leur environnement (figure 2, ci-dessous) :

- la première (dite « à base dendrométrique »), plutôt empirique et très centrée sur la croissance et la structure des peuplements, répond principalement à des questions d'ordre sylvicole : quantification des différents produits bois, séquestration de carbone, exportation d'éléments minéraux ;
- la seconde (dite « à base écophysiological »), plutôt mécaniste et principalement centrée sur les cycles de l'eau et du carbone, répond principalement à des questions d'ordre climatique et de quantification de flux carbone et d'eau dans l'écosystème ;
- la troisième (dite « biogéochimique »), également plutôt mécaniste, répond à des questions très larges allant de la pédogénèse aux flux d'éléments minéraux dans le sol et dans les écosystèmes.

Ces trois approches utilisent toutes l'observation (dynamique naturelle de l'écosystème) et l'expérimentation (manipulation des écosystèmes pour tester des hypothèses). Elles sont en général déterministes (c'est-à-dire que les mêmes conditions provoquent les mêmes résultats) même si l'une ou l'autre incorpore à des degrés divers des modules stochastiques (c'est-à-dire introduction de variables aléatoires). La part d'empirisme et de mécanisme n'est pas figée et les modèles à base écophysiological et biogéochimique incorporent des sous-modules purement empiriques notamment pour l'allocation du carbone entre les arbres et les différents compartiments. Inversement, les modèles à base dendrométrique peuvent être le résultat de mécanismes stables et donc avoir un fondement solide et générique (comme la théorie dendrométrique pour les peuplements équiennes et monospécifiques – loi de Eichhorn complétée par Assmann et Langsaeter – Dhôte, 1999). Cette classification entre « empirisme » et « mécanisme » n'est donc pas strictement dichotomique et il existe un continuum.

FIGURE 2

**LES TROIS GRANDES APPROCHES DE REPRÉSENTATION
DU FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS
CLASSÉES EN FONCTION DES ÉCHELLES DE TEMPS COUVERTES
ET FONCTIONS PRINCIPALES MODÉLISÉES**



Ce cadre général étant posé, il apparaît clairement qu'une approche interdisciplinaire (la dendrométrie, l'écophysiologie végétale, les sciences du sol) est indispensable pour modéliser les interactions sol- plante dans leur complexité et leur diversité. Les exemples présentés ci-après illustrent cette démarche, où l'intégration des concepts de ces trois disciplines va permettre d'élaborer les outils nécessaires au gestionnaire pour répondre à des questions telles que choisir les scénarios de conduite des peuplements, tester le potentiel productif de différentes essences dans un contexte de changement climatique, ou évaluer les impacts de la gestion sur les sols. À noter que les modèles présentés ne sont pas tous des modèles appliqués aux écosystèmes forestiers. Cependant, ils doivent être inclus dans ce panorama pour pouvoir évaluer les avancements qui pourraient être retenus dans ce domaine.

PANORAMA DES MODÈLES SOL-PLANTE EN COURS DE DÉVELOPPEMENT

Les modèles de mécanique des sols et les modèles géomorphologiques

Ces modèles sont principalement utilisés pour simuler des propriétés physiques des sols ou des propriétés géomorphologiques telles que l'épaisseur du sol en lien avec l'érosion (par exemple EPIC), la stabilité des pentes (par exemple Root Bundle Model), la teneur en argile liée à la pédogénèse (par exemple SoilGen). Quelques-uns de ces modèles intègrent en plus des processus biogéochimiques comme la concentration en nutriments dans la solution du sol (EPIC) ou l'évolution du profil de teneur en carbone organique (SoilGen). Les échelles temporelles de ces modèles peuvent être très longues (siècle et au-delà). La végétation, quand elle est intégrée, est soit représentée de façon frustrée (entrée d'une succession végétale fixée) soit en ne considérant que les rétroactions en termes de bilan hydrique ou nutritionnel. Les évolutions physiques du sol liées à la végétation sont toujours négligées. Ces modèles n'ont jamais été utilisés en milieux forestiers mais, moyennant une adaptation, pourraient être appliqués à des problématiques de gestion forestière comme l'érosion ou la stabilité des pentes.

Les modèles biogéochimiques centrés sur le sol

Ces modèles (par exemple Phreeqc, Visual3P, Chess, Whamm, Min3p, SAFE) sont principalement utilisés pour étudier et simuler la composition chimique, la réactivité chimique et le transport réactif dans les milieux poreux, dont le sol. Leurs applications concernent l'évaluation de l'évolution de la fertilité des sols ou de la dynamique de polluants. Ces modèles décrivent, avec des degrés variables de détail, chaque réaction chimique gouvernant la biodisponibilité en éléments minéraux dans les sols : N, P, K, Ca, Mg, P, métaux. En général, et en particulier pour les écosystèmes forestiers, les interactions avec les plantes ne sont représentées que de manière implicite (pas de modélisation mécaniste du prélèvement). Quelques exceptions existent lorsque des hypothèses sont faites sur les prélèvements et sont introduites comme entrées du modèle biogéochimique.

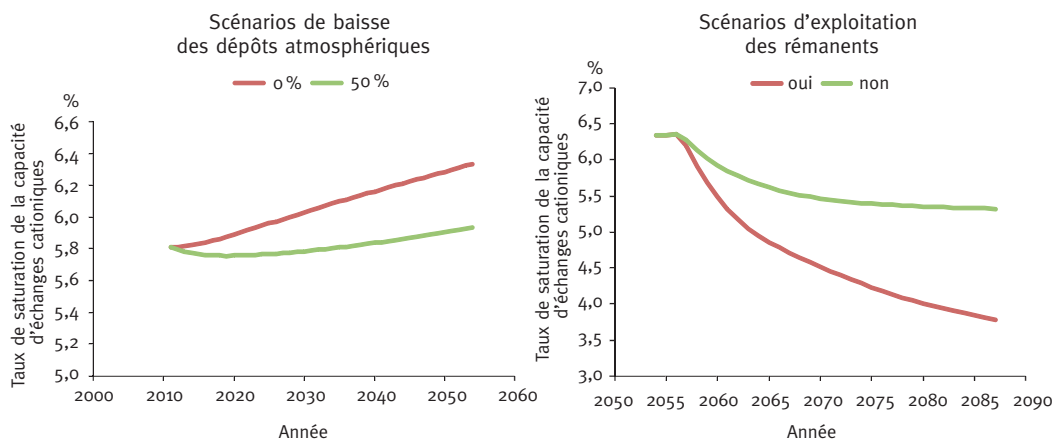
Les modèles biogéochimiques à l'échelle de l'écosystème

Ces modèles (par exemple ForNBM, ForSAFE, Witch-Aspect, Pastis, NuCM) ont une représentation complète des cycles biogéochimiques (biologique, géochimique, biochimique) couplée à un modèle de dynamique de la végétation (arbres, cultures). Les cycles concernés sont en général l'eau, le carbone et l'azote, avec quelques fois la prise en compte des cations (NuCM, ForSAFE, ForNBM). Le prélèvement par les plantes est explicitement représenté et la croissance végétale peut également l'être *via* des fonctions modificatrices qui dépendent de la biodisponibilité en éléments minéraux.

Van der Heijden *et al.* (2011) utilisent par exemple NuCM pour simuler l'impact d'une baisse des dépôts atmosphériques et d'une augmentation des exportations en éléments minéraux par l'exploitation des menus bois sur la croissance des arbres. Ils montrent que la restauration naturelle de l'écosystème suite à une diminution des dépôts est lente (figure 3, ci-dessous à gauche, simulations 2005-2055). Les raisons sont doubles : d'une part, du fait de la désorption progressive des sulfates stockés dans le profil de sol lors des épisodes passés de dépôts intenses (cette désorption d'un anion est une réaction acidifiante ; il migre et entraîne avec lui, entre autres, des cations nutritifs), et, d'autre part, du fait de la pauvreté chimique du substrat qui induit une faible recharge de la capacité d'échange cationique par altération des minéraux du sol, ainsi qu'une faible capacité à neutraliser les acides, insuffisante pour contrecarrer efficacement l'acidification du sol. Dans un scénario sans diminution des dépôts atmosphériques (0 %) et avec une augmentation des exportations des menus bois (à la coupe définitive du peuplement en 2055), le modèle NuCM prédit une baisse supplémentaire de fertilité chimique du sol (figure 3, ci-dessous à droite, simulations après 2055). Le modèle ne prenant pas complètement en compte les rémanents d'exploitation lors des éclaircies après 2055 (les 30 premières années de la vie du peuplement), cette baisse est probablement surestimée. Un meilleur couplage sol- plante permettra d'affiner les chiffres mais la tendance ne sera pas modifiée, ce site étant particulièrement pauvre chimiquement.

FIGURE 3 ÉVOLUTION DU TAUX DE SATURATION DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE DU SOL DE LA PLACETTE RENECOFOR SP57

(*Abies alba* Miller) simulée par le modèle NuCM en fonction de deux scénarios de réduction des dépôts atmosphériques sur 50 ans (0 % et 50 %) et de deux scénarios d'exploitation des menus bois à la coupe d'exploitation du peuplement (2055)



ForSAFE est un autre exemple, plus basé sur les processus concernant la partie aérienne. Il s'agit d'un modèle à une dimension, où l'écosystème est représenté par un profil vertical de sol et un arbre moyen. Il simule l'évolution au cours du temps des stocks, des flux d'énergie et de matière dans l'écosystème en fonction de scénarios climatiques, sylvicoles et de dépôts atmosphériques. ForSAFE couple quatre modèles existants : PnET (photosynthèse, évapotranspiration, croissance biomasse), PULSE (flux d'eau à travers l'écosystème forestier), DECOMP (décomposition de la matière organique du sol), SAFE (chimie du sol, altération minérale, drainage, prélèvement).

Les modèles de croissance racinaire

Ce sont des modèles, tels Rootmap, Spacsys ou ceux en cours de développement dans l'UMR AMAP, principalement centrés sur les racines. Ils sont utilisés pour comprendre la croissance et

l'impact de l'azote sur la photosynthèse, l'indice foliaire et la respiration de maintenance, grâce à une représentation plus ou moins détaillée des principaux processus et de leurs rétroactions et à un nombre parfois important de paramètres. Dans ces modèles, les processus d'interactions entre la canopée et l'atmosphère sont généralement plus détaillés que les processus souterrains d'interactions sol-micro-organismes-racines, ou que les mécanismes d'allocation de biomasse et de compétition inter-arbres. Ces modèles diffèrent entre eux principalement par leur exhaustivité et par leur niveau de détail sur les processus clés de couplage des flux d'eau et de carbone que sont la photosynthèse et la conduction stomatique.

Ces modèles mécanistes de la croissance sont connectés à des modèles d'évolution de la matière organique du sol, qui sont en général dérivés de Century ou de RothC. Ils permettent ainsi la simulation de la séquestration de carbone dans le sol et de l'évolution de la contrainte azotée au cours de révolutions successives. Les cycles des autres éléments minéraux ne sont par contre pas représentés. L'impact de la disponibilité du phosphore ou du potassium sur la croissance est pris en compte au mieux de manière empirique, par l'intermédiaire d'un « facteur de site » englobant différents paramètres de fertilité du sol et calibré localement.

Un intérêt de ces modèles du point de vue du gestionnaire est leur sensibilité aux variations climatiques et à la concentration atmosphérique en CO₂, dont ils peuvent simuler les effets sur la croissance forestière. Par contre, ils sont actuellement limités pour simuler l'impact d'une fertilisation autre qu'azotée, et, pour simuler la répartition de la biomasse entre arbres d'un même peuplement en réponse aux pratiques de gestion forestière. Par ailleurs, leur nombre souvent élevé de paramètres, dont certains doivent encore être calibrés localement, rend leur utilisation opérationnelle difficile à mettre en œuvre, même si des applications existent par exemple au Brésil (utilisation du modèle 3-PG pour le pilotage de plantations d'Eucalyptus, par exemple Almeida *et al.*, 2010).

Les modèles « plantes » à base dendrométrique

Ces modèles (par exemple E-Dendro, Fagacée, PP3...) intègrent la compétition entre arbres par construction. Ils ont été spécialement conçus pour le sylviculteur et pour répondre à des questions de production (quel itinéraire suivre pour obtenir telle quantité ou telle qualité de bois ?). Ils sont économes en mesures (des inventaires en diamètre et en hauteur suffisent) avec une base de construction très large, incluant des essais sylvicoles, des placettes permanentes ou des inventaires forestiers. Ceci leur confère une robustesse importante mais en contrepartie ces mesures sont globales et ne donnent accès qu'à des processus intégrés qui traduisent phénoménologiquement, et non explicitement, les processus écophysologiques sous-jacents. Deux limitations, listées ci-dessous, sont par ailleurs à souligner :

– L'indice de fertilité, qui est la notion essentielle pilotant les modèles de croissance issus de la théorie dendrométrique des peuplements purs et réguliers, est supposé stable sur une rotation. Or, cette stabilité a été largement remise en cause par les travaux des dendrologues (Becker *et al.*, 1994 ; Badeau *et al.*, 1996) et des biométriciens (Dhôte et Hervé, 2000 ; Bontemps *et al.*, 2009, 2010 ; Charru *et al.*, 2010) qui ont démontré un effet date sur la croissance en hauteur dominante. Ainsi, deux peuplements régénérés au même endroit à des périodes différentes (par exemple 1900 et 2000) ne produisent pas forcément la même quantité de bois au même âge (par exemple à 100 ans). Les modèles dendrométriques permettent de détecter ces changements, de les reproduire, mais ne permettent pas encore de les simuler selon différents scénarios climatiques ou différents scénarios de dépôts atmosphériques.

– L'effet du climat, dans ces modèles, est « gommé » volontairement par la multiplication des mesures, et la croissance restituée ne traduit ni les effets saisonniers ni les évolutions à long terme des températures, des précipitations ou des concentrations en CO₂ (*cf.* remarque précédente sur l'indice de fertilité). Or, dans l'objectif de simuler les cycles biogéochimiques, il est nécessaire de

restituer correctement les flux d'eau dans le sol et donc d'évaluer le prélèvement en eau par les plantes. Inversement, la connaissance du bilan hydrique permet de réguler la croissance des arbres et de restituer, par exemple, des phénomènes de dépérissement.

SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Chaque approche possède donc des atouts et des inconvénients :

- les modèles à base écophysio-logique ont un bon couplage eau/carbone, une forte capacité à simuler les impacts des changements climatiques et étudier finement le fonctionnement des écosystèmes, mais des difficultés pour répercuter l'effet du milieu (par exemple carences nutritives) et de la gestion forestière sur l'allocation de la biomasse produite, entre arbres et au sein de chaque arbre ;

- les modèles à base dendrométrique orientés vers l'aménagement des forêts prennent en compte explicitement la compétition entre arbres et la sylviculture, et sont aptes à simuler les exports en éléments minéraux, selon différents scénarios d'exploitation forestière ; ils permettent aussi de détecter les impacts des changements globaux passés, mais pas encore de simuler explicitement le cycle de l'eau ni celui des éléments minéraux (et donc également les mécanismes de carences nutritives par exemple) ;

- les modèles sol-plante de type biogéochimique ont des approches généralement mécanistes permettant de simuler l'altération des minéraux du sol, la minéralisation de la matière organique, les échanges avec la phase solide, la chimie des solutions du sol ; mais ils présentent des difficultés pour intégrer les fonctions de la biodiversité microbienne, les besoins de la plante, les prélèvements ainsi que l'allocation aux différents compartiments de l'arbre.

Un des défis est de pouvoir construire de nouveaux outils opérationnels en s'appuyant sur les concepts de ces disciplines. Le tableau I (ci-dessous) donne les grands axes de progression dans

TABLEAU I Les grands enjeux pour les futurs développements des modèles sol-plante

		Type de modèle	
		Plante ←	→ Sol
Objet représenté	Plante	<ul style="list-style-type: none"> . Mieux expliciter les processus (exemple : allocation, dynamique des réserves), et les intégrer dans les approches dendrométriques 	<ul style="list-style-type: none"> . Prélèvement de nutriments et d'eau . Modulation de la croissance et de la production de litières . Action de la plante (exemple : nitrification)
	Interactions	<ul style="list-style-type: none"> . Carbone . Eau . Nutriments 	<ul style="list-style-type: none"> . Carbone . Eau . Nutriments . Propriétés physiques
	Sol	<ul style="list-style-type: none"> . Milieu à rendre non statique . Courbes de réponse des modèles à la disponibilité en nutriments et en eau 	<ul style="list-style-type: none"> . Liens entre la biologie du sol et la géochimie ; intégration dans les approches simplifiées

chaque groupe pour parvenir à de tels outils. Ces développements peuvent s'appuyer sur des plateformes de modélisation permettant le couplage de différents modèles de processus (par exemple Sol Virtuel) ainsi que des techniques d'exploration, d'analyse et de simplification de modèles complexes. Cette démarche d'intégration des concepts a d'ores et déjà été entamée avec plusieurs exemples récents : pour les modèles dendrométriques (Sainte-Marie, 2014, voir ce même numéro), pour les modèles écophysologiques et pour les modèles biogéochimiques. Des approches en rupture et innovantes sont également en cours et reposent sur une approche théorique quantitative. Celles-ci s'intéressent à la structuration et la dynamique des communautés ligneuses (productivité et diversité) résultant de processus écologiques agrégés, que sont l'exploitation des ressources environnementales par l'écosystème, la consommation et la dynamique de ces ressources, les phénomènes de mortalité et de perturbation, et ceux de compétition/synergie pour ces ressources, entre les espèces formant l'écosystème.

In fine, ces nouveaux outils devront :

- être suffisamment complets pour répondre aux questions des gestionnaires et facilement calibrés ou adaptés aux conditions réelles ;
- distinguer ce qui relève du processus générique de ce qui est dépendant du site ;
- être inclus dans des plateformes comme *Capsis* pour être en mesure de simuler des scénarios variés pour les données d'entrées des modèles (climat, dépôts atmosphériques, sylviculture, etc.) ;
- et être documentés pour garantir la pérennité des informations relatives à chaque modèle (hypothèses sous-jacentes, calibration, validation).

Laurent SAINT-ANDRÉ – Julien SAINTE-MARIE –
Gregory VAN DER HEIJDEN – Arnaud LEGOUT
INRA – Centre de Nancy-Lorraine
UR 1138
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
F-54280 CHAMPENOUX
(st-andre@nancy.inra.fr)
(sainte-marie@univ-lorraine.fr)
(gregory.vanderheijden@nancy.inra.fr)
(legout@nancy.inra.fr)

Sophie LEGUÉDOIS
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
Laboratoire sols et environnement, UMR 1120
2 avenue de la forêt de Haye TSA 40602
F-54518 VANDEUVRE-LÈS-NANCY CEDEX
(sophie.leguedois@univ-lorraine.fr)

Bruno FERRY – Jean-Daniel BONTEMPS
AgroParisTech
UMR 1092 Laboratoire d'Étude des Ressources
Forêt-Bois
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(bruno.ferry@agroparistech.fr)
(jean-daniel.bontemps@agroparistech.fr)

François LAFOLIE
INRA
UMR 1114 Environnement méditerranéen
et modélisation des agro-hydrosystèmes
228 rue de l'Aérodrome
F-84914 AVIGNON
(lafolie@avignon.inra.fr)

Claire MARSDEN
Montpellier SupAgro
UMR 1222 Écologie fonctionnelle
& Biogéochimie des sols
Place Viala – Bâtiment 12
F-34060 MONTPELLIER CEDEX 2
(claire.marsden@supagro.inra.fr)

Éric DUFRÈNE
CNRS
UMR 8079, Laboratoire Écologie systématique
et évolution
Université Paris Sud – Bâtiment 362
F-91405 ORSAY CEDEX
(eric.dufrene@u-psud.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ALMEIDA (J.C.R.), LACLAU (J.-P.), GONÇALVES (J.L.D.), RANGER (J.), SAINT-ANDRÉ (L.). — A positive growth response to NaCl applications in Eucalyptus plantations established on K-deficient soils. — *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 9, 2010, pp. 1786-1795.
- ANGERS (D.A.), CARON (J.). — Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. — *Biogeochemistry*, 42, 1998, p. 55-72.
- BADEAU (V.), BECKER (M.), BERT (D.), DUPOUEY (J.-L.), LEBOURGEOIS (F.), PICARD (J.-F.). — Long-term growth trends of trees: ten year of dendrochronological studies in France. pp. 167-181. In: Growth trends in European forests/H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard, editors. — Springer Verlag, 1996. — XI-372 p.
- BADEAU (V.), DUPOUEY (J.-L.), BECKER (M.), PICARD (J.-F.). — Long-term growth trends of *Fagus sylvatica* L in northeastern France. A comparison between high and low density stands. — *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, vol. 16, n° 5, 1995, pp. 571-583.
- BECKER (M.), NIEMINEN (T.M.), GEREMIA (F.). — Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. — *Annals of Forest Science*, vol. 51, 1994, pp. 477-492.
- BERTRAND (R.) LENOIR (J.), PIEDALLU (C.), RIOFRIO-DILLON (G.), DE RUFFRAY (P.), VIDAL (C.), PIERRAT (J.-C.), GÉGOUT (J.-C.). — Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. — *Nature*, 479 (7374), 2011, pp. 517-520.
- BONTEMPS (J.-D.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Long-Term Changes in Forest Productivity: A Consistent Assessment in Even-Aged Stands. — *Forest Science*, vol. 55, n° 6, 2009, pp. 549-564.
- BONTEMPS (J.-D.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. — *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 8, 2010, pp. 1455-1463.
- BONTEMPS (J.-D.), HERVÉ (J.-C.), DUPLAT (P.), DHÔTE (J.-F.). — Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. — *Oikos*, vol. 121, n° 8, 2012, pp. 1287-1299.
- BONTEMPS (J.-D.), BOURIAUD (O.). — Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. — *Forestry*, vol. 87, n° 1, 2014, pp. 109-128.
- BRUNDTLAND (G.H.). — Our common futur. Report of the World Commission on Environment and Development. — United Nations, 1987. — 247 p. [En ligne] : disponible sur : http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf
- CHARRU (M.), SEYNAVE (I.), MORNEAU (F.), BONTEMPS (J.-D.). — Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. — *Forest Ecology and Management*, vol. 260, n° 5, 2012, pp. 864-874.
- CHARRU (M.), SEYNAVE (I.), HERVÉ (J.-C.). — Spatial patterns of historical growth changes in Norway spruce across western European mountains and the key effect of climate warming. — *Trees-Structure and Function*, vol. 28, n° 1, 2014, pp. 205-221.
- DHÔTE (J.-F.). — Compétition entre classes sociales chez le Chêne sessile et le Hêtre. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2, 1999, pp. 309-325.
- DHÔTE (J.-F.), HERVÉ (J.-C.). — Productivity changes in four Sessile Oak forests since 1930: a stand-level approach. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 7, 2000, pp. 651-680.
- FONTÈS (L.), BONTEMPS (J.-D.), BUGMANN (H.) *et al.* — Models for supporting forest management in a changing environment. — *Forest Systems*, 19(SI), 2010, pp. 8-29.
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- LENOIR (J.), GÉGOUT (J.-C.), MARQUET (P.A.), DE RUFFRAY (P.), BRISSE (H.). — A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. — *Science*, vol. 320, n° 5884, 2008, pp. 1768-1771.
- LENOIR (J.), GÉGOUT (J.-C.), PIERRAT (J.-C.), BONTEMPS (J.-D.), DHÔTE (J.-F.). — Differences between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986-2006). — *Ecogeography*, vol. 32, n° 5, pp. 765-777.
- SAINTE-MARIE (J.). — Contribution à l'intégration des cycles biogéochimiques aux modèles de croissance à base dendrométrique. — *Revue forestière française*, vol. LXVI, n° 4, 2014, pp. 611-617.

- SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.), DRAPIER (J.), BRUNO (E.), DUMÉ (G.). — *Picea abies* Karst. site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 35, n° 7, 2005, pp. 1669-1678.
- SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth? — *Journal of Biogeography*, vol. 35, n° 10, 2008, pp. 1851-1862.
- VAN DER HEIJDEN (G.), LEGOUT (A.), NICOLAS (M.), ULRICH (E.), JOHNSON (D.W.), DAMBRINE (E.). — Long-term sustainability of forest ecosystems on sandstone in the Vosges Mountains (France) facing atmospheric deposition and silvicultural change. — *Forest Ecology and Management*, vol. 261, n° 3, 2011, pp. 730-740.

LES AVANCÉES DE LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE LA MODÉLISATION DES INTERACTIONS SOL-ARBRE (Résumé)

Les outils de modélisation au service de la politique, de la planification et de la gestion forestière ne permettent pas encore une évaluation simultanée de l'impact des changements globaux et de la gestion sur les différentes fonctions écologiques et productives assurées par les écosystèmes forestiers. Nous proposons un état des lieux des modèles disponibles dans les différentes disciplines que sont la dendrométrie, l'écophysiologie et les sciences du sol et comment l'intégration des concepts de ces trois disciplines peut permettre d'élaborer les outils nécessaires au gestionnaire. *In fine*, ces nouveaux outils devront être suffisamment complets pour répondre à des questions à l'échelle de l'écosystème ; distinguer ce qui relève du processus générique de ce qui reste site-dépendant ; permettre de définir puis simuler des scénarios de gestion variés et innovants en environnement incertain, avec des contraintes de plus en plus fortes ; et être documentés et référencés pour garantir leur pérennité et leur utilisation.

ADVANCES IN MODELING INTERACTIONS BETWEEN SOILS AND TREES (Abstract)

Models used for decision-making in forestry policy, planning and management are not yet able to produce a simultaneous evaluation of the effect of global climate change and management on the various ecological and productive functions provided by forest ecosystems. This paper gives an overview of models developed for dendrometry, ecophysiology and soil sciences and considers how the concepts used in these three disciplines can be combined to create decision-making tools for forest management. These new tools should (1) be sufficiently comprehensive to provide answers to management issues at the ecosystem scale, (2) distinguish between generic and site-dependent processes and parameters, (3) make it possible to define and simulate a range of innovative management scenarios in an uncertain environment, with increasingly strong constraints and (4) be well documented and referenced to ensure that they will be used and will continue to be used.
