HAL open science

L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux

Jean-Daniel Bontemps, Fleur Longuetaud, Tony T. Franceschini, Marie Charru, Thiéry Constant

To cite this version:

Jean-Daniel Bontemps, Fleur Longuetaud, Tony T. Franceschini, Marie Charru, Thiéry Constant. L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux. Revue forestière française, 2012, 64 (1), pp.176 - 188. 10.4267/2042/47437 . hal-01591121

HAL Id: hal-01591121

https://agroparistech.hal.science/hal-01591121v1

Submitted on 15 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'ESTIMATION DE LA BIOMASSE ET DE LA PRODUCTIVITÉ FORESTIÈRES À L'ÉPREUVE DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Jean-Daniel Bontemps – Fleur Longuetaud – Tony Franceschini
Marie Charru – Thiéry Constant

NDLR : Cet article est issu d'une communication présentée par Jean-Daniel Bontemps lors du carrefour de l'innovation agronomique « Forêt - bois : quelles ressources pour quels besoins ? » tenu à Nancy le 16 décembre 2011.

Les communications de ce carrefour viennent de paraître dans la revue électronique Innovations agronomiques *(volume 18, mars 2012).*

Nous remercions vivement Monsieur Christian Huyghe, rédacteur, de nous avoir autorisés à reproduire cet article.

L'estimation de la biomasse forestière, et des volumes qui lui sont associés, est une préoccupation ancienne de la gestion et de la science forestières, motivée par l'impératif d'évaluation de la production et des volumes commercialisables. Ce champ s'est considérablement renouvelé au cours de la dernière décennie, dans un contexte de préoccupations environnementales croissantes (protocole de Kyoto, United Nations, 1998 ; processus du Grenelle de l'environnement à compter de 2007, http://www.legrenelle-environnement.fr) qui a conduit à renforcer les attentes relatives :

— à une valorisation accrue de biomasse forestière à des fins énergétiques (bois énergie), dans une logique de substitution aux énergies fossiles,

— à une valorisation accrue du matériau bois dans la construction et l'aménagement, attente également mue par une volonté de développement économique de la filière bois au niveau national (discours présidentiel d'Urmatt du 19 mai 2009), dans un contexte où la France présente des atouts significatifs (première ressource nationale en Europe en termes de volume, troisième en termes de surface, IFN, 2009),

— enfin, à l'expression de nouvelles fonctions assignées aux écosystèmes forestiers, comme l'est celle de l'immobilisation de carbone aux fins d'atténuation du changement climatique. L'intérêt de telles fonctions reste cependant à confirmer. La forêt stocke en effet une partie non négligeable mais modeste des émissions de CO_2 (la forêt européenne absorbe aux environs de 10 % des émissions du continent, Janssens *et al.*, 2003). Il apparaît également que son rôle d'atténuation du réchauffement climatique, y compris au travers de politiques actives de boisement de terres arables, pourrait être mineur à une échelle globale, et d'intérêt bien moindre en région tempérée ou boréale que tropicale (Arora et Monténégro, 2011), suggérant qu'un enjeu prioritaire reste l'évitement de la déforestation en région tropicale (programme REDD, United Nations, 2008).

Parce qu'elle permet de caractériser des gisements, ventilés le cas échéant en différentes catégories d'usages (bois d'œuvre, bois énergie), l'estimation de la biomasse forestière est donc une étape préalable fondamentale à la programmation opérationnelle et prospective des prélèvements en forêt. L'impératif de gestion durable (conférence de Rio de 1992, programmes d'éco-certification des produits forestiers) conduit rapidement à scénariser ces prélèvements (flux de sortie) au regard du renouvellement de la ressource forestière (flux d'entrée), qui dépend du renouvellement des peuplements exploités, et de leur productivité (accroissement biologique). Ainsi, à l'échelle de ressources régionales ou nationales, et à un horizon temporel de moyen à long terme, il est réaliste de chercher à maintenir un ratio prélèvement/productivité au voisinage de l'unité (même si le taux de prélèvement reste très inférieur à l'accroissement biologique en France, conduisant à une capitalisation de la ressource ; ce constat reste un constat moyen, et dépend fortement des contextes spécifiques et régionaux ; IFN, 2011b). La caractérisation de la productivité forestière est donc un élément essentiel de toute politique de gestion durable. Elle présente deux caractéristiques communes à toute ressource naturelle renouvelable, liées à une double dépendance : à la nature des espèces ligneuses exploitées, et aux facteurs de l'environnement (conditions nutritives, hydriques et énergétiques, liées au climat et au sol). Dans un contexte où des changements environnementaux, pas seulement climatiques, se manifestent depuis des décennies (Jones et Moberg, 2003 ; Matson *et al.*, 2002), où des événements environnementaux exceptionnels affectent les écosystèmes forestiers (tempêtes Lothar et Martin en 1999, Klaus en 2009, sécheresse paneuropéenne de 2003 ; Ciais *et al.*, 2005), et où le constat de déclin des espèces, au moins temporaire, est une réalité (Elling *et al.*, 2009), la productivité forestière ne doit plus être considérée comme une donnée relativement stationnaire aux échelles temporelles traditionnelles de la gestion (Bontemps *et al.*, 2005), mais comme une quantité dynamique, dont il convient d'expliciter les relations de dépendance à l'environnement. Il s'agit donc là du second ancrage de la thématique d'estimation de la biomasse forestière aux problématiques environnementales.

Qu'il s'agisse d'estimation de stocks (volume, biomasse) ou de flux (productivité), ces nouveaux enjeux contextuels impliquent une nécessité d'exhaustivité de quantification des ressources, avec deux impératifs :

— celui d'une systématisation aux principales essences qui constituent une ressource forestière très hétérogène au plan national (IFN, 2011a). Cette catégorisation s'impose par le fait des variations inter-spécifiques : des allométries de développement qui conditionnent l'estimation des volumes et des biomasses, de la réponse environnementale de la productivité (notion de niche écologique).

— une systématisation à des échelles spatiales qui dépassent de loin les traditionnels peuplements et massifs (ce dernier mot étant pris au sens du périmètre sur lequel s'applique l'aménagement forestier), c'est-à-dire à l'échelle de territoires économiques régionaux, jusqu'à une échelle nationale.

Ces deux impératifs ont des conséquences sur la mise en œuvre des programmes de recherche afférents. D'une part, la notion d'espèce modèle, qui s'avère fondamentale dans bien des champs disciplinaires, doit *in fine* être dépassée. D'autre part, la systématisation à tous les contextes forestiers rend inopérantes (car non extrapolables) les caractérisations conduites dans des sites ateliers. Cela appelle donc des développements méthodologiques parcimonieux, c'est-à-dire dont le coût de mise en œuvre opérationnelle à ces échelles reste réaliste.

Dans l'exposé qui suit, nous nous attacherons donc à passer en revue les développements récents et les perspectives de recherche en matière d'évaluation de la biomasse et de la productivité forestières, en gardant à l'esprit l'impératif d'exhaustivité, et en donnant au propos une portée finalisée.

L'ÉVALUATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE

La question principale soulevée par cette évaluation réside dans l'estimation de volumes. Les autres quantités s'en déduisent classiquement par des coefficients spécifiques (densité du bois moyenne par espèce pour la biomasse, voir paragraphe "Du volume à la biomasse ligneuse", p. 45, teneur spécifique en carbone pour la séquestration de carbone).

Préliminaire : principes d'estimation de volumes, enjeux associés

L'estimation des volumes s'opère le plus souvent à l'échelle de l'arbre forestier (des tarifs portant à l'échelle du peuplement forestier, moins précis, existent également). L'obtention de volumes à des échelles plus intégrées (peuplement, massif, territoires) s'obtient par sommation sur un domaine donné.

Le volume d'un arbre n'étant pas mesurable de façon rapide et non destructive, son appréciation résulte toujours d'une estimation, obtenue à partir de modèles fondés sur des prédicteurs aisément accessibles par des inventaires classiques (hauteur, diamètre à 1,30 m), qu'on désigne par le terme de tarifs de cubage (à une, deux entrées ou plus, qui désignent le nombre de prédicteurs du volume). Ces modèles sont obtenus à partir d'échantillons dans lesquels le volume de l'arbre a fait l'objet de mesures détaillées. Ils font intervenir un facteur de forme, qui désigne le rapport du volume de l'arbre à celui d'un cylindre de dimensions identiques.

La nature de ce volume doit être précisée. Il correspond historiquement au volume de la tige principale de l'arbre ayant une vocation commerciale, et se traduit par un volume jusqu'à une hauteur de découpe de diamètre minimal donné (par exemple 7 cm). Les enjeux plus récents en matière de quantification du bois énergie ou de la quantité de carbone séquestrée par les forêts amènent à considérer des compartiments autrefois négligés, tels que le volume total de la tige principale, ou le volume des branches. Ce dernier aspect est une des raisons majeures des développements de recherche les plus récents.

Le facteur de forme est susceptible d'être influencé par les régimes et traitements sylvicoles appliqués aux peuplements (par exemple en futaie ou en peuplement jardiné), leur évolution au cours du temps, ainsi que le caractère plus ou moins intensif de cette gestion. Ces spécificités peuvent avoir un caractère régional marqué. Aussi, l'enjeu de systématisation conduit au développement de tarifs de cubage de structure plus compliquée et aux prédicteurs éventuellement plus nombreux, permettant d'obtenir une validité à large échelle et dans une large gamme de contextes. À ce jour, ce second enjeu a néanmoins fait l'objet de développements moindres que celui lié à la prise en compte de nouveaux compartiments volumiques.

Une question historique et des réalisations nombreuses

Une revue de la littérature existant sur les tarifs de cubage en France (projet ANR Emerge, ANR 2008, Longuetaud et Deleuze, communication personnelle) a permis d'identifier plus de 180 occurrences de tarifs spécifiques depuis la publication des tarifs Algan (1894). Les tarifs développés dans des contextes de gestion locaux excèdent les 600 équations. Pour l'essentiel, il s'agit de tarifs d'estimation du volume de la tige principale à une découpe donnée. Un nombre important de tarifs ont été développés suite aux chocs pétroliers survenus dans les années 1970, témoignant des préoccupations d'alors en matière d'estimation de biomasse ligneuse à des fins énergétiques. Le nombre de tarifs disponibles est parfois très conséquent pour certaines espèces : au-delà de la dizaine pour les Chênes (sessile et pédonculé), l'Épicéa, le Douglas, et le Sapin (Longuetaud et Deleuze, communication personnelle). La prolifération de ces tarifs résulte de la contingence des définitions des volumes estimés, et de la nécessité de les développer dans un

contexte homogène (tableau 1 dans Tran-Ha *et al.*, 2007). Elle traduit également l'effort conséquent, et insuffisamment coordonné, qui a pu être consacré à cette tâche.

Des tarifs de cubage incluant de nouveaux compartiments

Plus récemment, des tarifs de cubage portant sur de nouveaux volumes ont vu le jour. Dans un contexte national, il s'agit par exemple de tarifs concernant le volume total de la tige principale (Tran-Ha *et al.*, 2007) ou le volume total aérien, incluant les branches (Vallet *et al.*, 2006). Afin de s'affranchir de la prédéfinition d'un volume particulier, des tarifs dits à découpe continue sont également en développement aujourd'hui (ANR Emerge). Ces équations visent à prédire le volume aérien d'un arbre en considérant le diamètre de la découpe comme un prédicteur supplémentaire, et demandent un effort métrologique considérable (à haute résolution le long des tiges et des branches) pour documenter des profils volumiques.

• *Tarifs permettant de prédire le volume total aérien*

Ces tarifs (Vallet *et al.*, 2006) ont été développés à partir de données au caractère tout à fait exceptionnel (plus de 4 500 arbres), collectées dans la première moitié du XXe siècle par la recherche forestière, et portant une attention particulière à la systématisation selon l'essence ligneuse, dans une large gamme de contextes forestiers. Ces tarifs ont pu être développés pour sept principales essences de la ressource nationale (Chêne sessile, Hêtre commun, Épicéa commun, Sapin pectiné, Pin sylvestre, Pin maritime, Douglas), lesquelles représentent près de deux tiers du volume de cette ressource (IFN, 2011a). Cependant, leur applicabilité à l'ensemble des contextes forestiers reste à préciser.

Ces tarifs ont une application évidente en matière de séquestration de carbone en forêt (mais le volume racinaire reste ignoré), mais aussi pour l'évaluation de gisements en bois énergie, qui peut représenter la valorisation principale de compartiments à faible diamètre de découpe. Cela suppose cependant de disposer de tarifs de cubage en volume commercial qui leur soient compatibles, en opérant par soustraction des volumes estimés.

• *Tarifs à découpe continue*

Le développement de ce type de tarif est l'un des objets de l'actuel projet ANR Emerge (ANR, 2008). Il s'appuie à la fois sur la saisie de données semblables à celles qui ont servi de support au développement des tarifs de volume total aérien (cf. paragraphe précédent, environ 10 000 individus pour lesquels des profils volumiques sur les tiges et branches ont été mesurés), et sur des données collectées pour l'occasion lors de campagnes récentes, permettant de compléter la couverture des contextes de la ressource nationale, de systématiser l'approche à des essences secondaires « orphelines » de la ressource, et d'appliquer un protocole plus fin de caractérisation des volumes. Ce type d'approche suppose de décrire l'évolution géométrique du profil volumique en fonction d'un diamètre de découpe, puis de relier des points spécifiques de ce profil à des attributs dimensionnels de l'arbre et du peuplement.

Elle conduit *in fine* à la mise en place d'un barème plutôt qu'un tarif de cubage, où le diamètre de découpe devient un prédicteur du volume. Le système d'estimation ainsi développé permet l'évaluation du volume relatif à différents compartiments volumiques de façon autonome, c'est-à-dire sans recourir à d'éventuelles soustractions mobilisant des tarifs d'origine exogène.

Des tarifs à portée nationale

Pour les besoins de l'inventaire de la ressource nationale, des tarifs de cubage à visée exhaustive sont également développés par l'Inventaire forestier national. Ces tarifs ont été révisés

récemment, et ont permis de quantifier à la fois les volumes de bois sur pied dans la ressource, et les prélèvements (IFN, 2011a et 2011b). Si le volume estimé reste classique (volume bois fort tige, c'est-à-dire à découpe de 7 cm), une modélisation fine du facteur de forme a permis de les rendre applicables à l'ensemble des contextes forestiers. La couverture des essences ligneuses est exhaustive.

Vers de la métrologie d'acquisition de données à haut débit

Les données nécessaires au développement de tarifs de cubage demandent un investissement considérable, qui vise conjointement à la mesure de volumes, qui reste destructive, et à celle des prédicteurs associés. Aussi, l'attention doit être portée à des technologies émergentes telles que le lidar terrestre (voir Dassot *et al.*, 2011 pour une revue sur cette technologie et ses applications). Le principe de cette technologie repose sur un balayage laser, utilisé comme un radar, du peuplement forestier à partir d'un point fixe. Il permet d'obtenir une image tridimensionnelle du peuplement à fine résolution. Les applications potentielles sont nombreuses. Dans le domaine de l'estimation des volumes ligneux, cette technique doit pouvoir permettre à terme de réaliser des inventaires du peuplement (hauteur, diamètre), d'estimer des volumes aériens, ou encore d'obtenir des profils de tige pouvant alimenter l'estimation de tarifs à découpe continue. La vision ponctuelle obtenue par cette technologie suppose cependant d'échantillonner le peuplement en plusieurs points dans l'espace. Les difficultés liées à l'exploitation de ces images résident : dans l'identification des arbres individuels, dans la reconstruction de leur géométrie, dont les parties cachées à l'écho Lidar supposent une reconstitution s'appuyant sur des modèles morphologiques ou architecturaux. La recherche relative au développement de cette technologie est également un des objets du projet ANR Emerge.

Du volume à la biomasse ligneuse

Dans les études visant à estimer des quantités de biomasse ligneuse à partir d'une quantification préalable du volume ligneux, ce dernier est converti en biomasse au moyen de valeurs spécifiques moyennes de la densité du bois. La conversion en masse de carbone s'obtient quant à elle par un coefficient de fraction massique compris dans un intervalle relativement restreint (entre 47 et 53 %, Ragland et Aerts, 1991).

De nombreux travaux ont pourtant mis en évidence des variations intra-arbre orientées et conséquentes de la densité du bois, par exemple avec la hauteur dans l'arbre, l'âge cambial ou le rayon (Bouriaud *et al.*, 2004 ; Franceschini *et al.*, 2010 ; Guilley *et al.*, 1999). Selon les compartiments considérés, ces variations peuvent donc impacter significativement l'estimation de la biomasse ligneuse. Sur ces aspects, un effort de systématisation par espèce reste à conduire.

Par ailleurs, des travaux peu nombreux, mais allant dans un sens identique, ont mis en évidence une baisse significative de la densité moyenne du cerne au cours des dernières décennies (Bergès *et al.*, 2000 ; Bontemps, 2006 ; Franceschini *et al.*, 2010 respectivement sur le Chêne sessile, le Hêtre commun et l'Épicéa en France ; Conkey, 1988 et Briffa *et al.*, 1998 en Amérique du Nord et dans le monde). Cette baisse reste modérée (de l'ordre de 5 à 10 %), mais son caractère systématique laisse supposer l'effet de changements environnementaux globaux, sans que cette causalité ait été encore précisément identifiée à ce jour (Franceschini, 2011) ; une des difficultés réside en effet dans la dépendance de la densité du cerne à la vitesse de croissance, laquelle est également sous contrôle environnemental, rendant difficile la séparation d'effets directs et indirects.

L'impact des variations de la densité du bois dans l'arbre et dans le temps sur l'efficacité de séquestration du carbone par les écosystèmes forestiers reste à évaluer.

L'ÉVALUATION DE LA PRODUCTIVITÉ FORESTIÈRE

Préliminaires : principes d'évaluation de la productivité forestière

La productivité forestière, ou accroissement biologique, désigne la composante de la productivité primaire nette forestière, déduction faite des compartiments à turn-over rapide (feuilles, rameaux), et le plus souvent de la partie souterraine. Il s'agit donc d'une productivité primaire nette ligneuse aérienne, rapportée à l'unité de temps et d'espace. Bien que cette productivité soit le plus souvent exprimée en masse de carbone séquestrée ou en masse sèche totale dans des approches écosystémiques fonctionnelles, elle est essentiellement exprimée en unités de volume ligneux dans les approches à large échelle qui portent sur des ressources forestières. Elle peut également être exprimée en unités de surface terrière (somme des accroissements sectionnels à 1,30 m de l'ensemble des arbres du peuplement, ramenée à l'hectare), mesure internationale qui ne nécessite pas d'inventaires de hauteur ni de recours à des tarifs de cubage (voir partie "L'évaluation de la biomasse forestière", p. 43).

• *Principes d'évaluation directe de la productivité*

Si l'on exclut les approches conduites sur des sites ateliers fortement instrumentés (mesures d'échanges gazeux) qui ne permettent pas d'extrapolation à large échelle, ou qui présentent un coût de déploiement prohibitif, il existe deux méthodes de quantification directe de la productivité d'un peuplement forestier :

— une première approche est d'inventorier de façon exhaustive l'accroissement de chaque arbre vivant du peuplement sur une période donnée, par des méthodes rétrospectives (carottage radial), en s'appuyant sur la mesure des largeurs de cerne. L'utilisation d'un tarif de cubage peut permettre d'estimer un accroissement volumique. Cette estimation n'est pertinente que dans la mesure où l'accroissement des arbres éventuellement prélevés en cours de période peut être documenté ou reconstitué, ce qui n'est possible qu'à court terme. Il s'agit de la méthode actuellement utilisée par l'IFN (voir également Charru *et al.*, 2010), dont l'avantage est qu'elle est conduite systématiquement sur la grille d'inventaire, mais dont l'inconvénient est qu'elle ne peut nullement constituer une méthode d'estimation générique à l'usage du gestionnaire ;

— une seconde approche repose sur une analyse de bilan, et consiste à sommer une différence de stock volumique entre deux périodes et les prélèvements intervenus en cours de période. Une telle méthode suppose un inventaire exhaustif et répété du peuplement, et ne peut être conduite que dans des réseaux permanents de placettes de suivi de la dynamique forestière. Elle ne constitue pas davantage une méthode générique à l'usage de la gestion. Ces réseaux, portés par des organismes de recherche ou de gestion forestière (GIS Coopérative de données pour la modélisation de la croissance forestière, réseaux permanents INRA, Houllier, 2001), n'ont aucune prétention de couverture systématique de la ressource forestière, mais plutôt de représentativité. La grande qualité des mesures qui y sont traditionnellement réalisées en fait également un outil clé d'identification des effets liés à l'ontogénie, à la densité des communautés ligneuses, ou encore aux changements de l'environnement sur la productivité (Dhôte et Hervé, 2000).

• *Une méthode d'évaluation indirecte mais opérationnelle : l'indice de fertilité et la loi de Eichhorn*

L'évaluation opérationnelle de la productivité forestière repose donc sur des approches indirectes. L'approche la plus répandue, valide pour les peuplements réguliers, repose sur la notion d'indice de fertilité, également dénommé indice de productivité (Skovsgaard et Vanclay, 2008). Cet indice correspond à la hauteur dominante d'un peuplement (hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare), rapportée à un âge donné (par exemple 50, 70 ou 100 ans). Le fondement de cet

indice ancien (XVIIe siècle, Batho et Garcia, 2006) repose sur une indépendance de la hauteur dominante à la densité des peuplements (Lanner, 1985) dans une vaste gamme de densité. En ramenant cette hauteur à un âge donné (au moyen de courbes de référence pour la croissance en hauteur, par exemple Duplat et Tran-Ha, 1997), cette dernière ne dépend plus que de l'espèce et des facteurs environnementaux, encore désignés sous le terme de facteurs stationnels. La forte corrélation entre la hauteur dominante et la production d'un peuplement depuis son origine (loi de Eichhorn : Eichhorn, 1904) a donné à cet indice un statut d'indicateur de productivité.

En pratique, à partir d'une mesure de hauteur dominante et d'âge du peuplement, et disposant de références de croissance en hauteur et d'une estimation de la relation hauteur-production, il est possible d'estimer la productivité forestière d'un peuplement. Ces deux concepts ont connu un succès universel dans les peuplements réguliers. L'indice de fertilité reste aujourd'hui encore l'objet de nombreux travaux [(1)]. Ces deux concepts sont à l'origine des tables de production forestière, et constituent aussi le fondement des plus actuels simulateurs de la dynamique forestière (voir les modèles présents sur la plateforme de simulation CAPSIS en France : http://capsis.cirad.fr/). Ces simulateurs servent de base à la définition d'itinéraires sylvicoles (par exemple, pour les actuels guides de sylviculture de l'Office national des forêts) et de scénarios de prélèvement en dépendance directe du niveau de productivité forestière. Ce type d'outil a également été utilisé pour tenter de définir des scénarios types de gestion forestière à l'échelle européenne (Forest Management Alternatives, projet européen EFORWOOD, www.eforwood.com).

Tandis que ces outils s'appliquent initialement à l'échelle du peuplement forestier, il devient possible de tirer plus ample parti de leur disponibilité actuelle sur une large gamme d'espèces. Des outils d'intégration à l'échelle du massif forestier, incluant un couplage avec des SIG, sont ainsi en cours de développement (cas de l'outil "Simmem" développé par le Cemagref (devenu Irstea) sur le massif orléanais : http://www.inra.fr/capsis/help_en/simmem).

Une rupture historique : l'explicitation de l'effet des facteurs de l'environnement…

L'idée d'expliciter le rôle des facteurs environnementaux sur la productivité forestière à des fins prédictives (c'est-à-dire indépendamment de la présence d'une espèce sur un site donné) a conduit par la suite au développement de relations environnement-productivité, et en particulier de relations environnement-indice de fertilité (un des travaux pionniers est celui de Hägglund et Lundmark, 1977). Les travaux de ce type ont eu historiquement une vocation d'application locale, mobilisant des descripteurs du milieu essentiellement centrés sur les conditions topographiques et des propriétés biophysiques du sol.

… aujourd'hui opérée à vaste échelle spatiale

La disponibilité croissante en données climatiques, le développement des approches de spatialisation de l'information (statistique spatiale, SIG), l'émergence de bases de données environnementales à large échelle (Seynave *et al.*, 2005), et le contexte des changements environnementaux (Albert et Schmidt, 2010, où sont considérés simultanément les effets des changements climatiques et des dépôts atmosphériques azotés) ont joué un rôle moteur essentiel dans ces développements, et ont conduit :

— à opérer une extension qualitative de la couverture et de la validité géographique des modèles correspondants,

(1) Une interrogation de Scholar (Google) au 1er décembre 2011 indique plus de 10 000 occurrences du terme "site index" depuis 1992, soit sur les 20 dernières années.

— à amorcer la démarche de cartographie prédictive (Seynave *et al.*, 2008 ; Albert et Schmidt, 2010),

— à utiliser ces outils pour inférer le tempérament écologique des espèces.

Une revue de ces travaux montre que la décennie 2000 a été l'objet de nombreuses réalisations de ce type, dans une large gamme de contextes mondiaux tempérés (Europe tempérée et boréale, Canada, Australie, Nouvelle-Zélande…). Tandis que ce saut d'échelle est encourageant, la systématisation de ce type d'approches à une collection d'espèces ligneuses présentes dans la ressource fait encore défaut dans la plupart des pays, y compris en France.

Alors que l'indice de fertilité n'admet d'acception et de mesure que dans des peuplements réguliers (indice dégagé des effets de l'âge et de la densité, qui n'admet pas d'équivalent dans les peuplements hétérogènes), les relations environnement-indice de fertilité peuvent être également interprétées comme une mesure des effets de l'environnement sur la productivité potentielle d'une espèce, toutes conditions biotiques (de densité et d'âge) étant égales par ailleurs, c'est-à-dire indépendamment du mode de gestion. Ainsi, ces relations peuvent être vues comme un moyen de caractériser la niche écologique des espèces (espace environnemental multidimensionnel dans lequel se développent préférentiellement les individus d'une espèce, Hutchinson, 1957), la croissance en hauteur ayant un caractère adaptatif (King, 1990). C'est donc un aspect majeur de cette rupture, engendrée par l'explicitation du rôle des facteurs de l'environnement, que d'étendre la portée de cet indicateur de productivité, et d'en faire un outil d'inférence pour le choix et l'adaptation des essences ligneuses dans un contexte environnemental changeant.

L'indice de fertilité, un concept en crise ?

Deux résultats de recherche, assez à très récents, sont venus mettre en question la validité de l'indice de fertilité comme indicateur clé de la prédiction de la productivité forestière. D'une part, les changements environnementaux intervenus au cours du XXe siècle (climat, pollution atmosphérique, taux de CO_2 atmosphérique) se sont traduits par des changements très significatifs de la croissance des arbres forestiers (Spiecker *et al.*, 1996 en Europe), invalidant la notion fixiste de courbes de référence pour la croissance en hauteur et le calcul de l'indice de fertilité (Bontemps *et al.*, 2007). D'autre part, la relation hauteur-production décrite par la loi de Eichhorn n'a jamais eu qu'un caractère régional, dont l'origine climatique était soupçonnée (Pardé et Bouchon, 1988). Des travaux très récents (Watt *et al.*, 2010) sont venus confirmer l'effet différentiel des facteurs climatiques sur l'allocation du carbone à la croissance primaire et secondaire, mettant en question la représentativité de cartes à large échelle d'indicateurs de productivité environnementale fondés sur l'indice de fertilité.

• *L'effet des changements environnementaux sur la croissance forestière*

La mise en évidence de l'effet des changements environnementaux sur la croissance date des années 1980, époque à laquelle le rôle fertilisant possible de l'augmentation de CO_2 atmosphérique (États-Unis, Lamarche *et al.*, 1984), et l'origine des dépérissements forestiers (Europe, Becker, 1989) ont été recherchés. En Europe, la généralisation de ces recherches a conduit au constat d'une augmentation générale de la productivité forestière dans la seconde moitié du XXe siècle (Spiecker *et al.*, 1996). Ce constat n'épargne pas la France, et a été fait à la fois sur la croissance radiale (Badeau *et al.*, 1996) et la croissance en hauteur (Bontemps *et al.*, 2011) des arbres forestiers. Les ordres de grandeur de ces augmentations sont de l'ordre de 50 à 100 % sur le XXe siècle, et sont donc d'ampleur considérable. Les changements climatiques (notamment le réchauffement) ou la fertilisation des écosystèmes forestiers par la pollution azotée d'origine anthropique ont été identifiés comme des causes de ces changements (Nellemann et Thomsen, 2001 ; Kahle *et al.*, 2008 et Solberg *et al.*, 2009 en Europe ; Bontemps *et al.*, 2011, en France).

Ces modifications temporelles de la croissance, qui opèrent à site et facteurs permanents du milieu donnés, invalident la notion de courbes de croissance de référence qui vaudraient indépendamment de la date d'observation (Bontemps *et al.*, 2007), et le calcul (ou en tout cas la comparaison) d'indices de fertilité établis dans des peuplements différents à des dates différentes, comme c'est le cas dans la plupart des études qui se fondent sur des bases de données larges qui couvrent des périodes étendues. Si l'idée d'établir des indices millésimés est théoriquement plausible (Bontemps *et al.*, 2007), elle suppose cependant une caractérisation des variations historiques de croissance dont le coût (Bontemps *et al.*, 2009) empêche un déploiement systématisé par espèce, et selon les contextes régionaux.

• *L'effet différentiel des facteurs climatiques sur la croissance primaire et secondaire*

L'étude des variations géographiques dans la relation de Eichhorn pour une espèce donnée a rapidement révélé l'existence de gradients latitudinaux et longitudinaux pour la plupart des espèces forestières (Assmann, 1970). Cette relation mettant en regard la hauteur dominante d'un peuplement et sa production totale en surface terrière (composante radiale de la productivité) ou en volume, des effets différentiels du climat sur la croissance primaire et secondaire, par exemple via une différence de phénologie de croissance radiale entre régions (Pardé et Bouchon, 1988), ou encore via un effet thermique direct sur la croissance en hauteur (Bontemps, 2006) ont été postulés.

L'étude de Watt *et al.* (2010) portant sur la productivité du *Pinus radiata* en Nouvelle-Zélande est ainsi venue apporter un éclairage explicite, et tout à fait nouveau [(2)] sur cette question. À partir d'une modélisation parallèle du déterminisme de l'indice de fertilité et de la productivité (corrigée du stade de développement et de la densité du peuplement), cette étude a en effet révélé un déterminisme partiellement commun aux deux quantités (par exemple les effets des ressources hydriques et trophiques), mais aussi des différences notables, en l'espèce d'un effet négatif de la vitesse du vent sur l'indice de fertilité, pas identifié sur la productivité (à productivité constante, le régime venteux induit donc un phénomène d'allocation différentielle), et d'un effet négatif du gel d'automne sur la productivité, tandis que seul un effet à optimum des températures moyennes annuelles sur l'indice de fertilité est identifié.

De tels travaux impliquent donc que les approches visant à caractériser et spatialiser la composante environnementale de la productivité à partir de l'indice de fertilité (Seynave *et al.*, 2008 ; Albert et Schmidt, 2010) ne sont pas indemnes de biais.

Une nécessité nouvelle : expliciter le rôle des facteurs environnementaux sur la productivité forestière

Le constat précédent amène finalement à rechercher l'estimation de l'effet direct des facteurs de l'environnement sur la productivité forestière. Cette conclusion reste finalement logique, dans la mesure où il subsiste un certain paradoxe dans la recherche d'effets explicites de l'environnement sur un indice de fertilité, qui se voulait être une mesure implicite de ces mêmes effets, à une époque encore lointaine où l'information environnementale spatialisée n'était largement pas disponible… Dès lors qu'une telle information existe, elle appelle nécessairement le développement des relations environnement-productivité implicitement visées dès l'origine.

Ce type d'approche implique donc la mise en œuvre de méthodes directes d'estimation de la productivité (voir paragraphe "Principes d'évaluation directe de la productivité", p. 46), qui puissent être systématisées à l'ensemble des espèces ligneuses, à tout domaine d'étude géogra-

(2) À notre connaissance, cette étude est la première publication qui ait mis en regard le déterminisme environnemental différentiel de l'indice de fertilité et de la productivité à large échelle. Cet article est resté relativement confidentiel, car son objectif explicite est resté purement opérationnel (cartographie), mais il constitue à notre sens une contribution majeure, et amène à explorer davantage les effets de l'environnement sur les patrons d'allocation du carbone à large échelle.

phique, et à un coût réaliste. Cela désigne naturellement les données dendrométriques collectées par les inventaires forestiers nationaux, dont la logique est répétitive et actualisée, exhaustive sur les territoires nationaux, et donc nécessairement en termes d'espèces, comme un candidat pertinent à ce type d'approches. La caractérisation de ces placettes d'inventaires en termes environnementaux (analyses pédologiques et floristiques) permet de façon parallèle une caractérisation, puis une spatialisation, de nombreux indicateurs environnementaux (pH : travaux de Piedallu et Gégout, http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/carte_PH_version1-formatA3.pdf, réserve utile des sols ; Piedallu *et al.*, 2011), qui renforce cette opportunité.

En France, des travaux de recherche conduits en partenariat avec l'Inventaire forestier national (3), sont en cours. Ils s'inscrivent dans la prolongation des travaux d'autécologie initiés il y a quelques années (Seynave *et al.*, 2005, 2008). Ils viennent confirmer la possibilité d'étudier la productivité forestière de façon pertinente, et d'identifier le rôle de facteurs de la dynamique forestière (stade de développement, densité du peuplement) et de l'environnement sur cette dernière (Charru *et al.*, 2010). Ces travaux originaux ouvrent également des perspectives de systématisation à de nombreuses espèces et de comparaisons de leurs comportements respectifs (Charru *et al.*, 2012).

Les résultats à venir de ce programme permettront :

— d'identifier la réponse environnementale de la productivité des principales espèces forestières de la ressource à une échelle nationale,

— de mener de façon conjointe le diagnostic d'évolution de la productivité au cours des dernières décennies, dans des contextes géographiques élargis qui permettent de décliner le diagnostic suivant la position dans la distribution des espèces (marges Nord et Sud, cœur de la distribution),

— de fournir une interprétation environnementale à ces variations,

— de développer une cartographie prédictive, régulièrement actualisée, de la composante environnementale de la productivité forestière.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La connaissance et la prédiction d'une part de l'impact des changements environnementaux sur les écosystèmes forestiers et d'autre part de la quantité de volume ou biomasse ligneux permettant d'honorer les demandes en produits et fonctions assignés à la forêt, dans un contexte lui-même motivé par l'atténuation du changement climatique, et les opportunités économiques potentielles qui lui sont associées, conduisent à un fort renouvellement des approches descriptives et prédictives de la productivité et de la biomasse forestières.

S'agissant d'estimation de volume et biomasse ligneux, l'accent essentiel porte aujourd'hui sur la caractérisation de compartiments ligneux auparavant négligés, et appelle de nouvelles représentations conceptuelles. Au-delà de retombées strictement opérationnelles, ces travaux ouvrent aussi la voie à la possibilité d'une estimation générique du volume et de la biomasse (par espèce, dans de larges contextes géographiques). Ils offrent donc la perspective plus cognitive de mise en évidence de patrons de séquestration de biomasse et d'allocation du carbone, et de leur mise en relation avec les traits de vie des espèces ligneuses, sur de larges gradients environnementaux, permettant l'identification de lois générales de comportements et de stratégies d'espèces.

(3) NDLR : L'Inventaire forestier national (avant 2012) est aujourd'hui intégré à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

S'agissant de la productivité forestière, les développements les plus récents vont dans le sens d'une explicitation renforcée des effets de l'environnement, et rendent progressivement obsolètes des approches plus classiques de quantification de la productivité forestière, encore très répandues. Ces évolutions appellent de nouveaux développements autour des modèles de simulation de la dynamique forestière, dont le couplage avec des outils cartographiques (SIG) devra être renforcé. Face à un environnement changeant mais incertain, le développement d'indicateurs spatialisés et régulièrement actualisés est également nécessaire pour assurer un suivi objectif et représentatif de la vitalité présente et future des espèces forestières. Il souligne le rôle essentiel que les inventaires forestiers nationaux sont appelés à jouer. Au plan plus fondamental, un travail très conséquent subsiste sur l'observation des relations environnement-productivité, leur interprétation fonctionnelle, c'est-à-dire l'identification des processus physiologiques qui contrôlent ces réponses, et leur mise en regard avec le concept de niche écologique et les conceptualisations associées.

Ces développements doivent être conduits tout en mettant en œuvre un effort d'intégration géographique et d'élargissement spécifique. Son succès repose sur l'acquisition méthodique de données d'observation dont le coût reste aujourd'hui considérable. La mise en place de méthodes d'estimation opérationnelles, actualisées, et satisfaisant à l'impératif d'exhaustivité tout en garantissant une précision locale suffisante semble devoir venir de trois directions :

— l'émergence de technologies innovantes en métrologie (exemple du Lidar terrestre),

— l'adossement de ces travaux de recherche à la mission d'inventaire forestier, seule en mesure d'assurer une couverture exhaustive de la ressource forestière à intervalle régulier,

— la combinaison de ces deux types d'approches, qui conduit à la notion d'inventaire forestier dit "multi-source" (pouvant inclure de l'imagerie satellite et du lidar aérien, voir l'ouvrage de référence de Tomppo *et al.*, 2008, dont un condensé est donné dans Tomppo *et al.*, 2008, et une revue d'ouvrage dans Bontemps, 2009).

Jean-Daniel BONTEMPS
UMR 1092 INRA/AgroParisTech
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)
AgroParisTech
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY Cedex
(jean-daniel.bontemps@agroparistech.fr)

Tony FRANCESCHINI – Marie CHARRU
UMR 1092 INRA/AgroParisTech
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)
AgroParisTech
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY Cedex
et
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Fleur LONGUETAUD
UMR 1092 INRA/AgroParisTech
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX
(longueta@nancy.inra.fr)

Thiéry CONSTANT
UMR 1092 INRA/AgroParisTech
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX
(constant@nancy.inra.fr)

BIBLIOGRAPHIE

ALBERT (M.), SCHMIDT (M.). — Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). — *Forest Ecology and Management*, 259, 2010, pp. 739-749.

ALGAN (H.). — Tarifs de cubage. — *Revue des Eaux et Forêts*, 1894, pp. 502-505.

ANR. — Emerge - Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie. Projet de recherche, réponse à l'appel d'offre "Bioénergies". — 2008.

ARORA (V.K.), MONTENEGRO (A.). — Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. — *Nature Geoscience*, 4, 2011, pp. 514-518.

ASSMANN (E.). — The principles of forest yield study. — Oxford : Pergamon Press, 1970. — 506 p.

BADEAU (V.), BECKER (M.), BERT (D.), DUPOUEY (J.-L.), LEBOURGEOIS (F.), PICARD (J.-F.). — Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. *In*: Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikaïnen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard (Eds.). — EFI, Research Report n° 5, 1996, pp. 167-181.

BATHO (A.), GARCIA (O.). — De Perthuis and the origins of site index: a historical note. — *Forest biometry, modelling and information sciences*, 1, 2006, pp. 1-10.

BECKER (M.). — The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. — *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 1989, pp. 1110-1117.

BERGÈS (L.), DUPOUEY (J.-L.), FRANC (A.). — Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteeth century. — *Trees*, 14, 2000, pp. 398-408.

BONTEMPS (J.-D.). — Book review of: TOMPPO (E.), HAAKANA (M.), KATILA (M.), PERÄSAARI (J.). — Multi-source national forest inventory – Methods and applications. — Springer, Germany, 2008. — 208 p. (Series n°18 Managing Forest Ecosystems). — *Annals of Forest Science*, 66, 2009, 2 p.

BONTEMPS (J.-D.). — Évolution de la productivité forestière de peuplements réguliers et monospécifiques de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle. — Nancy (France) : ENGREF, 2006. — 444 p. (Thèse de doctorat en sciences forestières).

BONTEMPS (J.-D.), DUPLAT (P.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Croissance en hauteur dominante du Hêtre dans le Nord de la France : des courbes de référence qui intègrent les tendances à long terme. — *Rendez-Vous Techniques*, n° 2, 2007, pp. 39-47.

BONTEMPS (J.-D.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Long-term changes in forest productivity: a consistent assessment in even-aged stands. — *Forest Science*, 55, 2009, pp. 549-564.

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*, 2011 DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.20080.x

BONTEMPS (J.-D.), HERVÉ (J.-C.), LEBAN (J.-M.), DHÔTE (J.-F.). — Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. — *Trees*, 25, 2011, pp. 237-251.

BONTEMPS (J.-D.), VALLET (P.), HERVÉ (J.-C.), RITTIÉ (D.), DUPOUEY (J.-L.), DHÔTE (J.-F.). — Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? — *Revue forestière française*, vol. 57, n° 2 spécial "L'avenir du Hêtre dans la forêt française", 2005, pp. 123-142.

BOURIAUD (O.), BRÉDA (N.), LE MOGUEDEC (G.), NEPVEU (G.). — Modeling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. — *Trees*, 18, 2004, pp. 264-276.

BRIFFA (K.R.), SCHWEINGRUBER (F.H.), JONES (P.D.), OSBORN (T.J.), SHIYATOV (S.G.), VAGANOV (E.A.). — Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. — *Nature*, 391, 1998, pp. 678-682.

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*, 260, 2010, pp. 864-874.

CHARRU (M.), SEYNAVE (I.), MORNEAU (F.), RIVOIRE (M.), BONTEMPS (J.-D.). — Significant differences and curvilinearity in the self-thinning relationships of 11 temperate tree species assessed from national forest inventory data. — *Annals of Forest Science*, vol. 69, n° 2, 2012, pp. 195-205, DOI : 10.1007/s13595-011-0149-0.

CIAIS (P.), REICHSTEIN (M.), VIOVY (N.), GRANIER (A.) *et al.* — Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. — *Nature*, n° 437, 2005, pp. 529-533.

CONKEY (L.E.). — Decline in Old-Growth Red Spruce in Western Maine - an Analysis of Wood Density and Climate. — *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 1988, pp. 1063-1068.

DASSOT (M.), CONSTANT (T.), FOURNIER (M.). — The use of terrestrial LIDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. — *Annals of Forest Science*, 68, 2011, pp. 959-974.

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, 2000, pp. 651-680.

DUPLAT (P.), TRAN-HA (M.). — Modélisation de la croissance en hauteur dominante du Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) en France. Variabilité inter-régionale et effet de la période récente (1959-1993). — *Annals of Forest Science*, vol. 54, 1997, pp. 611-634.

EICHHORN (F.). — Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse. — *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*, 80, 1904, pp. 45-49.

ELLING (W.), DITTMAR (C.), PFAFFELMOSER (K.), RÖTZER (T.). — Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. — *Forest Ecology and Management*, 257, 2009, pp. 1175-1187.

FRANCESCHINI (T.). — Variations historiques et déterminisme climatique de la densité intracerne du bois et des dimensions transversales des trachéides de l'Épicéa commun (*Picea abies* Karst. L.) au cours du XXe siècle. — Nancy : AgroParisTech, 2011. — 271 p. (Mémoire de thèse de doctorat, manuscrit déposé).

FRANCESCHINI (T.), BONTEMPS (J.-D.), GELHAYE (P.), RITTIÉ (D.), HERVÉ (J.-C.), GÉGOUT (J.-C.), LEBAN (J.-M.). — Decreasing trend and fluctuations in the mean-ring density of Norway spruce through the twentieth century. — *Annals of Forest Science*, vol. 67, n° 8, 2010, 10 p.

GUILLEY (E.), HERVÉ (J.-C.), HUBER (F.), NEPVEU (G.). — Modelling variability of within-ring density components in *Quercus petraea* Liebl. with mixed-effects models and simulating the influence of contrasting silvicultures on wood density. — *Annals of Forest Science*, 56, 1999, pp. 449-458.

HÄGGLUND (B.), LUNDMARK (J.-E.). — Site index estimation by means of site properties. Scots pine and Norway spruce in Sweden. — *Studia Forestalia Suecica*, 138, 1977, 38 p.

HUTCHINSON (G.E.). — Concluding remarks. Cold Spring Harbour symposium on quantitative biology. — 1957. — pp. 415-427.

HOULLIER (F.). — Modélisation de la production ligneuse et des paysages : des technologies nouvelles pour l'évaluation des ressources forestières. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4 spécial "Les 40 ans de l'Inventaire forestier national : utilisation et valorisation des données collectées", 2001, pp. 423-433.

IFN. — Harmonisation des données forestières européennes : l'Inventaire français impliqué dans des actions déterminantes. — *IF*, n° 22, 2009, 8 p.

IFN. — Volume de bois sur pied dans les forêts françaises : 650 millions de mètres cubes supplémentaires en un quart de siècle. — *IF*, n° 27, 2011a, 12 p.

IFN. — Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. — *IF*, n° 28, 2011b, 16 p.

JANSSENS (I.A.) *et al.* — Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12% of European Anthropogenic CO_2 Emissions. — *Science*, 300, 2003, pp. 1538-1542.

JONES (P.D.), MOBERG (A.). — Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update to 2001. — *Journal of Climate*, 16, 2003, pp. 206-223.

KAHLE (H.P.), KARJALAINEN (T.), SCHUCK (A.), AGREN (G.I.). — Causes and consequences of forest growth trends in Europe. *In*: EFI Research Report, vol. 21. — Joensuu (Finland) : EFI, 2008. — 261 p.

KING (D.A.). — The adaptive significance of tree height. — *American Naturalist*, 135, 1990, pp. 809-828.

LAMARCHE (V.C.), GRAYBILL (D.A.), FRITTS (H.C.), ROSE (M.R.). — Increasing atmospheric carbon dioxide: tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation. — *Science*, 225, 1984, pp. 1019-1021.

LANNER (R.M.). — On the insensitivity of height growth to spacing. — *Forest Ecology and Management*, 13, 1985, pp. 143-148.

MATSON (P.), LOHSE (K.A.), HALL (S.J.). — The globalization of nitrogen deposition : consequences for terrestrial ecosystems. — *Ambio*, 31, 2002, pp. 113-119.

NELLEMANN (C.), THOMSEN (M.G.). — Long-term changes in forest growth: potential effects of nitrogen deposition and acidification. — *Water, Air, and Soil Pollution*, 128, 2001, pp. 197-205.

PARDÉ (J.), BOUCHON (J.). — Dendrométrie. — 2e édition. — Nancy : ENGREF, 1988. — 328 p. (réimpression 2009).

PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.), BRUAND (A.), SEYNAVE (I.). — Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. — *Geoderma*, 160, 2011, pp. 355-366.

RAGLAND (K.W.), AERTS (D.J.). — Properties of Wood for Combustion Analysis. — *Bioresource Technology*, 37, 1991, pp. 161-168.

SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.), DRAPIER (J.), BRUNO (E.), DUMÉ (G.). — *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. — *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 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*, 35, 2008, pp. 1851-1862.

SKOVSGAARD (J.-P.), VANCLAY (J.K.). — Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. — *Forestry*, 81, 2008, pp. 13-31.

SOLBERG (S.), DOBBERTIN (M.), REINDS (G.J.), LANGE (H.), ANDREASSEN (K.), GARCIA FERNANDEZ (P.), HILDINGSSON (A.), DE VRIES (W.). — Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. — *Forest Ecology and Management*, 258, 2009, pp. 1735-1750.

SPIECKER (H.), MIELIKÄINEN (K.), KÖHL (M.), SKOVSGAARD (J.P.). — Growth trends in European forests. — Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1996. — 367 p. (Research report, vol. 5).

TOMPPO (E.), HAAKANA (M.), KATILA (M.), PERÄSAARI (J.). — Multi-source national forest inventory – Methods and applications. — Springer, Germany, 2008. — 208 p. (Series n° 18 Managing Forest Ecosystems).

TOMPPO (E.), OLSSON (H.), STÅHL (G.), NILSSON (M.), HAGNER (O.), KATILA (M.). — Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. — *Remote Sensing and Environment*, 112, 2008, pp. 1982-1999.

TRAN-HA (M.), PERROTTE (G.), CORDONNIER (T.), DUPLAT (P.). — Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. — *Revue forestière française*, vol. LIX, n° 6, 2007, pp. 609-624.

UNITED NATIONS. — Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. — Nations unies, 1998. — 23 p.

UNITED NATIONS. — Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries (UN-REDD). — Nations unies, 2008. — 27 p.

VALLET (P.), DHÔTE (J.-F.), MOGUEDEC (G.), RAVART (M.), PIGNARD (G.). — Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. — *Forest Ecology and Management*, 229, 2006, pp. 98-110.

WATT (M.S.), PALMER (D.J.), KIMBERLEY (M.O.), HÖCK (B.K.), PAYN (T.W.), LOWE (D.J.). — Development of models to predict *Pinus radiata* productivity throughout New Zealand. — *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 2010, pp. 488-499.

L'ESTIMATION DE LA BIOMASSE ET DE LA PRODUCTIVITÉ FORESTIÈRES À L'ÉPREUVE DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX (Résumé)

Les changements environnementaux impliquent une redéfinition et un élargissement des services écosystémiques rendus par les forêts, tout en visant la durabilité de leur gestion. La quantification des ressources en bois d'œuvre et bois énergie, et de la fonction de stockage de carbone, nécessite de nouvelles méthodes d'évaluation du volume et de la biomasse forestière. Dans un contexte de gestion forestière durable, l'évaluation des prélèvements doit tenir compte de la productivité forestière, dont le contrôle environnemental doit être explicité et quantifié. Ces impératifs requièrent également une extension des échelles géographiques considérées, et la prise en compte de la diversité ligneuse des ressources forestières. Une revue des progrès récents dans ces domaines en France, replacée dans un contexte historique, et assortie de perspectives, est proposée. Elle révèle des avancées significatives, et des perspectives de progression réalistes à court terme.

ASSESSING FOREST BIOMASS AND PRODUCTIVITY IN A CHANGING ENVIRONMENT — CHALLENGES AND RECENT PROGRESS (Abstract)

In the light of current environmental changes, forest ecosystem services must be redefined and their scope broadened, while forest sustainability must continue to be a priority. New methods for the quantification of forest volumes and biomass are needed for the purpose of estimating timber and fuel wood resources, as well as carbon sequestration. Sustainable forest management requires that removals be defined in relation to forest productivity for which relevant environmental factors need to be explored and quantified. The requirements of these approaches furthermore imply broadening geographical coverage and taking into account the species diversity inherent to forest resources. The authors review current progress on these issues in France, offering a historical perspective and outlining possible future developments. This review brings to light significant advances and a realistic, short-term outlook for further progress.