

RenD ez - V ou s t e c h n i q u e s

n° 44 - printemps 2014



p. 3

Le pin d'Alep en France

EMERGE dendrométrie

Dossier
p. 17



patrimoine
sylviculture
progrès

connaissances
économie

forêts et société
environnement

biodiversité
gestion durable

R e n D e z - V o u s t e c h n i q u e s

Directeur de la publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Jean-Marc Brézard, Bernard Gamblin, Laurence Lefèbvre, Prisca Léon, Albert Maillet, Marianne Rubio, Leslie Vey, Jean-François Dhôte, Véronique Vinot

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture

En haut : T. Gauquelin, Université Aix-Marseille

En bas : Consortium EMERGE

Page d'ouverture du dossier

Consortium EMERGE

Périodicité

4 numéros ordinaires par an

(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

[http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/
Publications ONF/ Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/ Publications ONF/ Périodiques))

Disponibilité au numéro, renseignements :

ONF - cellule de documentation technique et générale, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : dtcb-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : juillet 2014

Toutes les contributions proposées à la rédaction sont soumises à l'examen d'un comité de lecture

sommaire

N° 44 – printemps 2014

3 Pratiques

Le pin d'Alep en France : quels enjeux pour quelles gestions ?

par Bernard Prévosto et Thierry Quesney

9 Connaissances

Gestion du chêne pubescent dans le Sud-Est de la France. Quelle alternative au taillis simple ?

par Jean Ladier, Charles Teissier, Louis Amandier et Bernard Prévosto

17 dossier méthodes

EMERGE – Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie

81 Zoom

Représentations de la forêt et de la gestion forestière en milieu rural

par Anne-Marie Granet et Rudy Amand

Éditorial

Les enjeux liés au changement climatique, aux changements globaux, conduisent à faire évoluer l'approche de la dendrométrie. Les tarifs de cubage, barèmes, coefficients (d'expansion, de conversion...) mis au point jusqu'ici rendent d'indiscutables services, mais toujours pour des contextes ou situations bien circonscrits, sans vision plus globale. Même dans le cas de l'Inventaire forestier national, on manque d'outils pour répondre aux questions nouvelles.

Or ces questions sont nombreuses : estimer le stockage possible de carbone en forêt et dans les produits bois, la contribution forestière aux engagements en matière d'énergie renouvelable ou aux efforts d'atténuation (substituer le bois aux matériaux très « émetteurs » de CO₂, isolation externe des bâtiments)... Le tout dans un contexte technico-économique en mutation rapide, comme nous l'avons vu lors du colloque ONF de juin 2012 « Changement climatique et évolution des usages du bois » (voir RDVT n° 38). La forêt peut-elle faire face aux nouveaux « appétits » de bois ? Comment évaluer ces nouveaux besoins sans risquer de « vendre la forêt plusieurs fois » ? Sans épuiser les sols ? Cela relève bien sûr du domaine de la prospective : imaginer les filières possibles en optimisant les arbitrages entre usages concurrents, le cycle de vie du matériau bois, etc.

Mais pour cela il faut pouvoir estimer la ressource forestière de façon robuste, dans les diverses grandeurs requises par ses différents usages : volume « continu » de la tige (découpe quelconque) à l'arbre entier pour toutes les essences, mais aussi proportion d'écorce, biomasse et composition minérale de l'arbre entier ou par segments, et jusqu'au pouvoir calorifique potentiel. Pendant 4 ans, le projet ANR EMERGE a eu cette ambition : construire des outils d'estimation compatibles entre les différentes grandeurs ou segments, permettant des évaluations homogènes à différentes échelles de territoire : nationale, régionale, bassin de production ou d'approvisionnement, massif forestier. Avec des résultats qui peuvent sembler encore théoriques et abstraits mais dont la portée est considérable. C'est un dossier important, que nous avons ouvert dans le n° 39-40 et que nous refermons ici.

Dans un registre plus classique et plus accessible je vous invite aussi à faire plus ample connaissance avec le pin d'Alep, à réfléchir à la sylviculture du chêne pubescent dans le Sud-Est ou à partager le regard que les ruraux portent sur la forêt.

Le Directeur forêts et risque naturels,

Albert Maillet

Le pin d'Alep en France : quels enjeux pour quelles gestions ?

Le pin d'Alep peut paraître pour beaucoup, notamment pour les forestiers du Nord, une essence accessoire voire anecdotique : son utilisation actuelle dans la filière bois est marginale, elle n'est souvent pas exploitée ou sa sylviculture reste sommaire. On l'associe aussi sans discernement aux incendies qui ravagent régulièrement les massifs du Sud de la France en période estivale. Cette méconnaissance de l'essence et de ses potentialités a conduit un groupe d'auteurs à lui consacrer un ouvrage complet : un guide intitulé « Le pin d'Alep en France » et qui a vu le jour en 2013 (cf. encadré). Ce travail a rassemblé 22 auteurs de 7 organismes investis dans la gestion forestière aussi bien publique (ONF) que privée (CRPF), dans la recherche (Irstea, INRA, Université d'Aix-Marseille) et dans des questions techniques (DSF, FCBA). L'ouvrage couvre des questions variées allant de l'écologie à la gestion, il traite aussi des problématiques liées à l'incendie de forêt et de la valorisation de cette essence. Dans cet article nous rappelons en quoi cette espèce, certes très spécifique de la forêt méditerranéenne, porte des enjeux qui vont bien au-delà d'un simple cadre régional et qui peuvent intéresser la communauté forestière dans son ensemble.

Une espèce très représentative de la dynamique d'expansion forestière

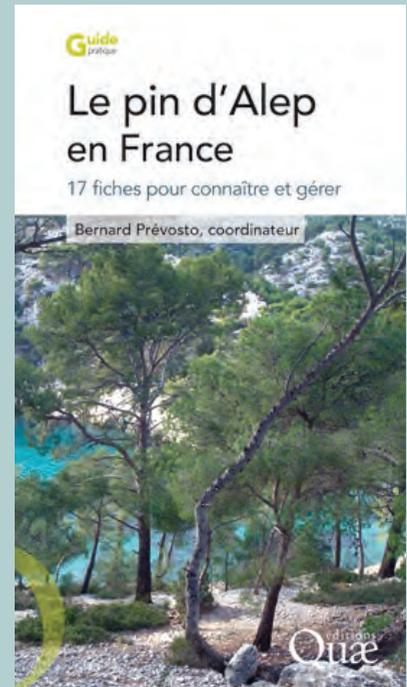
Si le pin d'Alep soulève un intérêt croissant c'est parce que les surfaces qu'il occupe sont loin d'être négligeables. Avec environ 240 000 ha, le pin d'Alep est en effet la troisième essence en surface de la forêt méditerranéenne française (qui représente environ 11 % de la forêt métropolitaine)

Conception de l'ouvrage « Le pin d'Alep en France »

Le guide « Le pin d'Alep en France » présente une synthèse des connaissances scientifiques et techniques disponible sur cette essence sous la forme de 17 fiches réparties en quatre grandes thématiques. La première thématique concerne l'histoire et l'écologie du pin d'Alep et détaille : sa place dans la société et son utilisation dans le passé, ses caractéristiques botaniques, sa répartition dans le bassin méditerranéen et en France, les dix problèmes phytosanitaires majeurs identifiés sur cette espèce et son comportement face au changement climatique. La deuxième traite de la gestion des peuplements et offre des outils concrets sur les relations station-production, sur la gestion des ressources génétiques, sur la régénération naturelle et sur les sylvicultures en général. La troisième thématique analyse le comportement du pin face à l'incendie : l'inflammabilité et le comportement face au feu, la régénération après incendie, les interventions après feu et la sylviculture préventive.

Enfin la dernière thématique est consacrée à la mobilisation et l'utilisation des bois. Elle aborde successivement les questions relatives à l'état de la ressource, les freins à la gestion des peuplements et les leviers, la mécanisation de la récolte et les valorisations possibles pour les bois.

Le guide a été distribué par les chargés de sylviculture aux personnels techniques de la DT-ONF Méditerranée et un extrait concernant les préconisations sylvicoles est en cours d'élaboration. Le produit sera un fascicule A5 destiné au terrain dénommé « Mémento pratique de conduite des peuplements ».



derrière le chêne vert et le chêne pubescent mais devant le pin sylvestre. À l'échelle du bassin méditerranéen elle s'étend sur 3,5 millions d'hectares ce qui en fait une essence majeure pour de nombreux pays (Espagne, Algérie, Grèce notamment).

L'espèce a connu une expansion fulgurante en France puisqu'en 150 ans les surfaces ont été multipliées par cinq (Fernandez *et al.*, 2013) ! Cette progression est très représentative de la dynamique générale de

la surface forestière nationale qui a connu un minimum au milieu du 19^e siècle suivi par une forte reconquête forestière des terrains abandonnés par l'agriculture. Ainsi, le pin d'Alep doit avant tout son succès actuel à sa capacité de colonisation des anciennes cultures et terrains pâturés (photos 1). En cela, il est très similaire au pin sylvestre qui a connu cette même évolution et partage le même mode de dissémination, à savoir la production d'un grand nombre de graines disséminées par le vent.

Si les surfaces couvertes sont importantes, la récolte du bois est plus faible actuellement que celle du pin sylvestre et du pin noir car les peuplements sont jeunes et peu exploités. Cependant même dans l'hypothèse d'un taux de mobilisation constant le pin d'Alep devrait devenir dans une trentaine d'années la première essence résineuse récoltée en région méditerranéenne.

Quel avenir pour le pin d'Alep dans un contexte de changement climatique ?

Le réchauffement climatique, avec en particulier l'accentuation des sécheresses, est une menace pour l'équilibre actuel de la forêt française. Les essences méditerranéennes, plus aptes à supporter les stress hydriques, auront-elles dans l'avenir un plus grand rôle à jouer dans les écosystèmes ? Le pin d'Alep est actuellement cantonné au sud de Montélimar et dans une tranche altitudinale variant de 0 à 600 m pour les principaux peuplements. Cependant dans les zones où les aires de distribution du pin d'Alep et du pin sylvestre se superposent, comme par exemple dans l'arrière-pays méditerranéen, c'est le pin d'Alep qui montre la croissance la plus forte. Dans un contexte climatique changeant, ceci préfigure une expansion probable de cette espèce vers le nord et/ou en altitude.

Le pin d'Alep montre en effet une extraordinaire plasticité aux contraintes du climat et du sol (photos 2). Il peut se développer dans des zones où la pluviométrie varie de 200 à 1500 mm, la température moyenne annuelle de 11 à 19 °C (-2 à + 6 °C pour les moyennes des minima les plus froids) et supporter des froids hivernaux de courte durée de -15 à -18 °C si l'arbre n'est pas en sève. Surtout, l'espèce est capable de supporter des sécheresses beaucoup plus fortes que les autres pins. Elle adopte en effet un comportement opportuniste en « évitant » la sécheresse,



J.M. Corti, CRPF



T. Gauquelin, Université Aix-Marseille

Photos 1 : colonisation d'anciennes terrasses de cultures (à gauche) conduisant à l'installation d'un peuplement mature (à droite)



M. Vennetier, IRSTEA

Photos 2 : plasticité climatique, stationnelle et morphologique du pin d'Alep
À gauche, bonsaï de 20 cm de haut à 42 ans dans une fissure en bord de mer (450 mm pluie/an); à droite, pin de 24 m de haut dans l'arrière-pays provençal (800 mm pluie/an).



M. Vennetier, IRSTEA

Photo 3 : peuplement sévèrement touché par le gel du printemps 2012 dans la région d'Aix-en-Provence

en fermant ses stomates et donc en limitant sa transpiration, plutôt que d'y résister (Vennetier et Huc, 2013). La résistance au stress hydrique est souvent mesurée par la tension (ou pression négative en mégapascal, MPa) à partir de laquelle 50 % des vaisseaux ne conduisent plus la sève dans l'arbre (perte de conductivité hydraulique). Pour une espèce, plus cette tension est négative et plus elle est résistante au stress hydrique. C'est le cas du pin d'Alep qui affiche une tension de -4,8 MPa indiquant une vulnérabilité à la sécheresse bien moindre que celle du pin sylvestre ou du pin noir dont les tensions respectives ne sont que de -2,9 et -2,6 MPa.

Il serait cependant caricatural de ne pas signaler les impacts négatifs du changement climatique sur le développement du pin d'Alep. Face aux sécheresses répétées (notamment celles de 2003 à 2007 en Provence) la productivité de l'espèce a été réduite (Vennetier et Huc, 2013). Le dérèglement climatique s'accompagne aussi de fins d'automne et débuts d'hiver doux favorisant la mise en place de nouvelles pousses qui sont alors particulièrement vulnérables aux gelées (photo 3). Enfin, l'essence

est sensible aux bris de branches par de la neige lourde. Ces accidents peuvent fragiliser l'essence et la rendre vulnérable à l'attaque de scolytes. Malgré ces contraintes qui frappent aussi un grand nombre d'autres essences, la très forte adaptation du pin d'Alep à son milieu fait que les dépérissements observés jusqu'à présent sont très faibles et diffus (Boutte *et al.*, 2013).

Le pin d'Alep et l'incendie : contraintes et atouts

Le pin d'Alep a une mauvaise réputation parce qu'il est supposé « faciliter » les incendies. Rappelons cependant que 95 % des départs de feu sont du fait de l'homme et que le pin d'Alep est plus répandu dans les zones où le risque de feu est élevé ce qui a tendance à renforcer l'association pin d'Alep – incendie. Il reste que cette espèce est effectivement plus inflammable que les autres pins (Ganteaume *et al.*, 2013). Elle contient une proportion plus forte d'éléments chimiques volatils très inflammables, les branches mortes ne s'élaguent pas, les cônes s'accumulent dans le houppier, le feuillage plus aéré et la branchaison plus fine

accroissent l'inflammabilité. Comme l'écorce est fine, l'arbre est souvent tué par le passage d'un feu un peu intense.

Cependant, cet arbre possède aussi une qualité remarquable : une partie de ses cônes, dits sérotineux, restent clos pendant des années et ne s'ouvrent que lors du passage du feu (photo 4). Ces cônes constituent donc dans le houppier une banque de graines qui, une fois libérée sous l'effet de la chaleur, permet à l'espèce de se régénérer (photo 5) parfois massivement : on peut observer des densités de plus de 100 000 semis/ha ! Les arbres adultes issus de cette régénération porteront eux-mêmes une proportion plus forte de cônes sérotineux. Cette particularité illustre le fait que l'espèce a coévolué depuis des millénaires avec le feu et s'est adaptée à cette perturbation. Cependant lorsque le retour de l'incendie est trop fréquent (moins de 20 ans environ) l'arbre n'a pas pu produire suffisamment de graines et il ne peut se régénérer.

L'incendie est une menace majeure en région méditerranéenne et nécessite une politique active de prévention



Photo 4 : accumulation de cônes ouverts et de cônes sérotineux fermés dans le houppier



Photo 5 : la libération des graines des cônes sérotineux après le passage du feu permet la régénération



C. Ripert, IRSTEA

Photo 6 : peuplement de pin d'Alep avec un sous-étage de chêne pubescent



C. Ripert, IRSTEA

Photo 7 : le broyage suivi d'un crochetage du sol est un traitement efficace pour régénérer les peuplements



C. Ripert, IRSTEA

Photo 8 : brûlage dirigé par une équipe spécialisée de l'ONF pour la régénération du pin d'Alep



L.-M. Duhon, CRPF

Photo 9 : en forêt privée l'éclaircie s'arrête à la limite de propriété alors que la gestion doit s'opérer à une échelle plus large pour être rentable et cohérente

et de lutte comprenant une surveillance renforcée, des moyens lourds d'intervention terrestres et aériens, un effort important de débroussaillage et un grand nombre de pistes et de coupures de combustible. Ces efforts sont efficaces car ils ont permis de réduire largement les surfaces brûlées chaque année. Les surfaces incendiées sont ainsi passées de 17 700 ha/an en moyenne pour la période 1994-2003 à 7200 ha/an pour la période 2004-2013 (source Prométhée). Le poids financier est cependant lourd et sera-t-il supportable à l'avenir, surtout si le risque de feu s'étend à des régions jusqu'à présent peu concernées ?

Dans l'ouvrage sur le pin d'Alep une réflexion originale a été conduite sur la sylviculture préventive, qui n'a été jusqu'à présent que très peu mise en œuvre (Rigolot et al., 2013). Cette sylviculture n'a pas pour objectif de stopper le feu, seuls les moyens précédemment évoqués le peuvent, mais de minimiser son impact sur les peuplements. Les structures de différents types de peuplement sont analysées par rapport à cet objectif.

Certaines sont très sensibles au feu (cas des jeunes peuplements et des structures irrégulières) alors que d'autres le sont moins et peuvent tirer bénéfice d'actions sylvicoles permettant de limiter la probabilité qu'un feu courant bas devienne un feu de cime destructeur. Il s'agit par exemple dans les structures régulières matures de supprimer les « échelles à feu » et de limiter l'ouverture du couvert pour contrôler le développement du sous-étage (éclaircies par le bas).

Cette analyse qui est proposée n'est pas propre au pin d'Alep et peut aussi se décliner sur d'autres essences. Il s'agit donc d'initier une stratégie d'adaptation et de minimisation du risque de feu en complément d'une stratégie de lutte et de suppression de ce risque.

Un défi pour le forestier : gérer et valoriser le pin d'Alep

La production biologique du pin d'Alep est supérieure à 530 000 m³/an mais seuls 130 000 m³/an sont aujourd'hui récoltés ce qui fait que cette essence est actuellement largement sous-exploitée (Grulois, 2013a). De plus la majorité de la récolte actuelle part en bois de trituration et les revenus tirés de son exploitation sont faibles pour le propriétaire.

La conduite des peuplements

Un défi pour le forestier est donc de proposer une gestion plus soutenue des peuplements et une meilleure valorisation des produits en lien étroit avec les progrès en cours concernant la rationalisation et la mécanisation de l'exploitation des peuplements de pin d'Alep. Sur le plan technique la conduite des peuplements est similaire à celle pratiquée en zone tempérée, à savoir une conduite par éclaircies successives jusqu'à la régénération, mais elle ne se pratique que sur les meilleures stations (Quesney et Amandier, 2013). Le traitement en futaie régulière est favorisé, car la structure irrégulière est plus sensible à l'incendie et ce traitement se prête également bien au mélange (photo 6) avec les chênes méditerranéens (chêne vert et chêne pubescent). Le mélange présente l'intérêt de coupler des produits variés bois de feu/bois d'industrie, d'améliorer la qualité des pins par gainage des tiges et d'offrir une meilleure résilience des peuplements. En particulier, en cas de passage du feu, le pin se régénérera par graines et les feuillus rejetteront de souche.

Les forestiers du Sud sont néanmoins confrontés comme les forestiers du Nord à la délicate question de la régénération des peuplements qui est peut-être encore plus prégnante en zone méditerranéenne en raison des contraintes des sols et du climat. Le pin d'Alep, comme le pin sylvestre ou le pin noir, est un pionnier qui a

besoin de perturbations dans l'environnement pour s'établir. Ainsi, dans les peuplements âgés de plus de 80 ans et en capacité de produire des graines, une simple coupe d'ensemencement laissant 100 à 150 tiges/ha ne suffit pas à assurer leur régénération naturelle. Il est donc préconisé de l'accompagner par des travaux de préparation comme le broyage de la végétation et le crochitage du sol pour assurer une bonne installation des semis (Prévosto et al., 2013) (photo 7).

Solution innovante, le brûlage dirigé, utilisé jusqu'à présent pour réduire les masses combustibles ou revitaliser les terrains en pâture, s'avère très efficace dans un cadre expérimental pour régénérer les peuplements s'il est suffisamment intense (voir photo 8). Il permet de dégager du sol nu et de réduire durablement la compétition au sol et favorise ainsi l'installation et la survie des plantules. La présence de rémanents au sol assure un feu suffisamment intense.

Une valorisation délicate

La question de la valorisation est plus difficile à résoudre. Une part non négligeable de la ressource est détenue par des propriétaires qui ne souhaitent pas exploiter les bois en raison d'obstacles psychologiques, économiques et fonciers (photo 9).

Cette situation n'est là encore pas exclusive de la zone méditerranéenne ni de cette essence, bien que le cas du pin d'Alep soit assez emblématique. Le guide propose des solutions (Duhon et Quesney, 2013) : aborder les propriétaires par des thèmes qui les motivent, parfois éloignés d'un objectif de production (chasse, usage récréatif, intérêt patrimonial) mais qui nécessitent cependant de passer par une coupe de bois, promouvoir le regroupement et l'aménagement des massifs, simplifier les processus administratifs, etc.

En forêt publique, le faible revenu tiré des bois (10-15 euros/tonne) et

la sanctuarisation des forêts qui va de pair avec une diminution de sensibilité rurale des usagers sont aussi un obstacle à l'exploitation des pinèdes d'Alep, alors même que le bois possède des propriétés technologiques équivalentes à celles des autres pins (Grulois, 2013b). Surmonter toutes ces difficultés ne pourra s'envisager que par une action concertée et sur le long terme entre les représentants des propriétaires, les acteurs de la filière bois, les élus et les administrations.

Pour conclure

Le pin d'Alep est certes une espèce typique de la région méditerranéenne mais elle porte des enjeux qui se déclinent aussi à une échelle plus large. Elle présente une très forte plasticité aux contraintes de l'environnement et elle est donc bien armée pour faire face aux sécheresses que l'on annonce plus fréquentes et plus intenses avec le changement climatique. Sa sylviculture est assez similaire à celle d'autres espèces de pin et les solutions pour faire face aux questions techniques de la conduite des peuplements et de leur renouvellement se posent aux forestiers du Sud comme à ceux du Nord. Elle est aussi représentative d'une ressource forestière sous-exploitée parce qu'éparpillée et parce qu'encore insuffisamment valorisée.

Bernard PRÉVOSTO

UR Écosystèmes méditerranéens et risques
Irstea Aix-en-Provence

Thierry QUESNEY

Pôle sylviculture-récolte-travaux-chasse
ONF, DT Méditerranée

Références

Les références et les photographies sont issues de l'ouvrage « Le pin d'Alep en France. 17 fiches pour connaître et gérer, 2013, éditions QUAE, B. Prévosto (coord.), 160 p. Nous indiquons ci-dessous le nom des auteurs et les titres des chapitres.

Boutte B., Durand-Gillmann M., Boivin T., 2013. Surveillance phytosanitaire : dix problèmes à connaître.

Duhen L.M., Quesney T., 2013. Leviers pour engager les propriétaires sur la voie de la gestion.

Fernandez C., Bousquet Mélou A., Prévosto B., 2013. Répartition dans le bassin méditerranéen et en France.

Ganteaume A., Dupuis J.L., Pimont F., 2013. Inflammabilité et comportement au feu.

Grulois S., 2013a. Une ressource en forte augmentation.

Grulois S., 2013b. Transformation des bois et perspectives.

Prévosto B., Ripert C., Quesney T., Amandier L., 2013. La régénération naturelle.

Quesney T., Amandier L., 2013. Les sylvicultures.

Rigolot E., Amandier L., Duché Y., Prévosto B., Ripert C., Savazzi R., 2013. La sylviculture préventive.

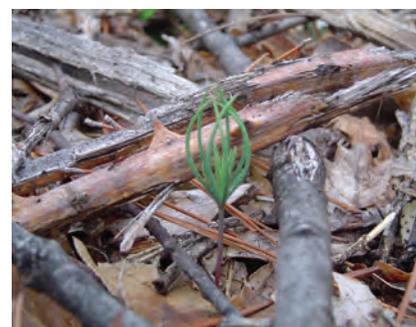
Vennetier M., Huc R., 2013. Les défis du changement climatique.



T. Quesney, ONF



T. Quesney, ONF



T. Quesney, ONF

Gestion du chêne pubescent dans le Sud-Est de la France. Quelle alternative au taillis simple ?

Les peuplements de chêne pubescent sont, dans le Sud-Est de la France, des taillis simples qui ont été peu exploités depuis la Seconde Guerre mondiale. La gestion de ces taillis vieillissants est une question récurrente, avec un souci croissant de diversifier les traitements. De nombreuses expérimentations ont été menées, notamment par l'ONF, pour y répondre. Ces travaux confirment les difficultés rencontrées par les gestionnaires et n'apportent, à ce jour, aucune réelle alternative au taillis simple. Deux raisons à cela : des conditions de croissance trop limitantes et l'impossibilité de renouveler le peuplement par semis à l'aide des méthodes habituelles.

Le chêne pubescent et sa gestion actuelle

Une essence en extension mais peu productive

Le chêne pubescent couvre aujourd'hui plus de 800 000 ha en France, dont la moitié environ en région méditerranéenne, ce qui le classe au premier rang à l'échelle nationale. Les résultats de l'inventaire forestier national montrent, sur les dernières décennies, une spectaculaire augmentation du volume sur pied de cette essence, qui a plus que doublé en 25 ans, même si sa contribution au volume total des feuillus sur pied reste modeste (tableau 1). Cette évolution est la conséquence de deux phénomènes concomitants : l'installation du chêne sous le couvert des peuplements pionniers de pins et la capitalisation dans les chênaies pubescentes en place.

Il faut cependant garder à l'esprit le potentiel de croissance du chêne pubescent qui est, en région méditerranéenne du moins, très inférieur à celui des chênes rouvre et pédonculé en région tempérée. Les courbes de croissance en hauteur « dominante » du taillis (Duché, 1983) donnent une bonne idée de l'éventail des potentialités avec, pour les quatre classes de fertilité distinguées, des valeurs médianes qui s'échelonnent de 4 à 12 mètres à 30 ans. Mais ces classes sont très inégalement représentées : la classe 1, la meilleure, est marginale et représente 1 à 2 % des surfaces tandis que la majorité des peuplements se situe au-dessous de la classe 2, soit moins de 8 mètres de haut à 30 ans.

Le régime du taillis est critiqué

Les taillis de chêne pubescent ont longtemps été les seules sources d'énergie domestique des populations de l'arrière-pays provençal.

Leur gestion a été caractérisée par des rotations autrefois très courtes, jusqu'à moins de 10 ans pour le bois de bûche. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, les besoins ont été moins importants. Les peuplements n'ont plus été systématiquement exploités et les taillis ont vieilli. Cette tendance au vieillissement est en train de s'inverser suite au renchérissement des énergies fossiles et à un nouvel engouement pour le bois de chauffage.

La coupe de taillis est une intervention jugée brutale par nombre d'écologues et d'usagers. Cette coupe rase périodique empêche la maturation des écosystèmes. On craint aussi que sa répétition épuise le sol ou les souches. De plus, son contour géométrique est trop visible dans le paysage. Toutes ces raisons incitent à rechercher une méthode de gestion alternative au taillis simple.

ESSENCE	Volume sur pied 1981 (en Mm ³)	Volume sur pied 2007 (en Mm ³)	Accroissement annuel (en %)
Chêne pédonculé	232	288	0,8
Chêne rouvre	205	281	1,2
Chêne pubescent	40	97	3,5
Hêtre	214	262	0,8
Châtaignier	87	121	1,3
Frêne	41	88	2,9
Charme	62	93	1,6
Autres feuillus	185	295	1,9
Total feuillus	1 067	1 524	1,4
Total conifères	676	867	1,0
TOTAL	1 743	2 392	1,2

Tab. 1 : évolution des volumes sur pied entre 1981 et 2007, toutes propriétés confondues (source IFN, 2011)

N° de l'essai	Thème	Forêt <i>FD domaniale</i> <i>FC communale</i> <i>FP privée</i>	Modalités	Altitude Exposition	climat <i>(d'après AurRelHy</i> <i>1971-2000)</i>	Substrat	Fertilité	Période
Cemagref	Régénération naturelle et croissance du taillis	FD de Lure (Alpes-de-Haute-Provence)	5 modalités de coupes + témoin X 4 blocs	1200 exposition Sud-Est pente faible	P totale 1200 mm T° annuelle 11,5 °C	Brunisol luviq ue à texture argilo-limoneuse assez profond sur calcaire à silex	Fertilité 3 sup	1985-2012
ONF AR 1986_21_19	Régénération naturelle à partir d'un taillis	FD du Montdenier (Alpes-de-Haute-Provence) La Plaine du Bois	3 intensités d'ensemencement + témoin X 3 blocs	800 m plateau	P totale 750 mm P été 170 mm T° annuelle 11 °C 1 mois sec	Calcosol compact pierreux sur poudingue	32 ans 8-9 m Fertilité 2inf	1988-1996
		(idem) canton de Ourbes	2 intensités d'ensemencement + témoin X 2 blocs	1000 m exposition Nord	P totale 840 mm P été 160 mm T° annuelle 11 °C 1 mois sec	Calcosol en fentes issu de terra rossa sur calcaire compact	42 ans 10 m Fertilité 2inf	1988-1996
ONF SYLVIPACA AR 1997_21_02a	Éclaircies dans le taillis	FD de la Sainte-Baume (Var)	3 intensités d'éclaircie + témoin	700 m exposition NNO pente 25 %	P totale 920 mm P été 130 mm T° annuelle 11,3 °C 1,5 mois sec	Sol brun limoneux sur calcaire à entroques et à rudistes du coniacien	50 ans 12,2 m Fertilité 2	1997-2007
ONF SYLVIPACA AR 1997_21_02b	Éclaircies dans le taillis	FD de Morières-Montrieux (Var)	2 intensités d'éclaircie + témoin	600 m plateau	P totale 1000 mm P été 130 mm T° annuelle 12,1 °C 1,5 mois sec	Calcosol argilo-limoneux en fentes issu de terra rossa et lapiaz sur calcaire compact urgonien	75-80 ans 12,65 m Fertilité 3	1996-2007
ONF AR 1997_21_03	Régénération naturelle d'une futaie sur souche	FD de la Sainte-Baume (Var)	3 modalités d'ensemencement + témoin	700 m exposition NNO pente 5 à 20 %	P totale 900 mm P été 130 mm T° annuelle 11,4 °C 1,5 mois sec	Sol brun limoneux sur calcaire à entroques et à rudistes du coniacien	200 ans Fertilité 2	1997-2007
CRPF SYLVIPACA CRPF P04-97-01	Éclaircies et renouvellement du taillis	FP de Vallongue Gréoux-les-Bains (Alpes-de-Haute-Provence)	Coupe rase + 3 niveaux d'éclaircie + témoin	400 m fond de vallon plat	P totale 780 mm P été 220 m T° annuelle 11 °C 1,5 mois secs	Calcosol sur colluvium de poudingue de Valensole	60 ans Fertilité 2	1997-en cours
ONF AR 1999_19_01	Valorisation des feuillus précieux dans un taillis	FC de Bourg-St-Andeol (Drôme)	détourage + témoin X 2 blocs	370 m plateau pente 5 %	P totale 1080 mm P été 180 mm T° annuelle 12,4 °C 1 mois sec	Calcosol issu de terra rossa et lapiaz sur calcaire compact urgonien	Fertilité 2	1998-en cours
ONF AR 2001_19_02	Renouvellement du taillis en fonction de l'âge	FC de Grane (Drôme)	2 âges de taillis : 51 et 81 ans	330 m exposition Est pente 30 à 45 %	P totale 940 mm P été 180 mm T° annuelle 11,9 °C 1 mois sec	Rendosol peu profond pierreux sur calcaire en plaquettes	Fertilité 3	2002-en cours
		FC de Réauville (Drôme)	3 âges de taillis : 25, 51 et 81 ans	310 m plateau pente faible	P totale 890 mm P été 170 mm T° annuelle 12,7 °C 1 mois sec	Calcosol en fente sur terra rossa et lapiaz issu de calcaire compact	Fertilité 4	2001-en cours

Tab 2 : liste et caractéristiques des dispositifs expérimentaux

Les autres traitements sont mal connus

L'allongement des rotations est a priori bénéfique, et le vieillissement des peuplements est souvent perçu favorablement. Il ouvre la voie à trois options : le taillis simple à longue rotation, le taillis avec réserves et la conversion en futaie. Cependant, chacune soulève des incertitudes, car on ne maîtrise pas bien ces itinéraires techniques. Quelques tentatives existent localement, soit pour des motivations sociales d'accueil du public, soit pour des motivations plus sylvicoles. Mais nulle part on n'a dépassé le stade du balivage ou de la futaie sur souche. On ne dispose en fait d'aucune expérience aboutie de conversion.

Ce manque de référence sur les traitements alternatifs au taillis simple jeune a motivé, depuis 25 ans, la mise en place de plusieurs expériences en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Six essais ont ainsi été implantés par l'ONF (STIR Méditerranée) entre 1986 et 2001. Parallèlement, le CRPF installait en 1997 une expérimentation sylvicole partageant le même protocole que deux des essais de l'ONF. Le Cemagref (aujourd'hui Irteisa) a également installé dès 1985 un essai visant à analyser la croissance et la régénération. Les caractéristiques de ces huit essais sont présentées dans le tableau 2.

La capacité de reprise du taillis diminue-t-elle avec l'âge ?

On estime généralement qu'un taillis vieux rejette moins bien qu'un taillis jeune, ce qui compromettrait à long terme la gestion en taillis à longue rotation. Toutefois, cette perte de vigueur n'a pas été vérifiée ni quantifiée. Cette question est l'objet du dispositif expérimental de Réauville et Grane, dans la Drôme. Celui-ci est constitué de deux blocs, un sur chaque site, installés respectivement au début des années 2001 et 2002. Le facteur étudié est l'âge du taillis

au moment de la coupe, avec trois modalités : taillis jeune (25 ans), taillis d'âge moyen (51 ans) et taillis vieux (81 ans), sachant que la modalité « taillis jeune » est manquante à Grane.

Les observations portent sur cinquante souches dans chaque parcelle expérimentale, avec comptage des rejets et mesure des plus hauts de chaque souche. Trois campagnes de mesures ont été faites, la première un an après installation, la deuxième en 2007 après 6 et 5 ans, la troisième en 2012 après 11 et 10 ans.

L'analyse des résultats amène à décliner la question de l'influence de l'âge en trois volets : la mortalité des souches après coupe, le nombre de rejets sur les souches vivantes, la croissance de ces rejets.

La mortalité des souches est plus forte dans les vieux taillis

Le premier enseignement de cette expérimentation est la mortalité différée de certaines souches. Bien qu'elle intervienne le plus souvent dès la première année, la mortalité s'est poursuivie sur plus de 5 ans sur le site de Réauville alors qu'elle s'est arrêtée plus tôt sur le site de Grane

(figure 1). Parmi les souches ayant rejeté, les souches non pérennes portaient souvent, après un an, des rejets peu nombreux et plus petits que les autres. Pour autant, ces critères ne permettent pas de prédire la pérennité des cépées à l'issue de la première saison ; de nombreuses souches portant initialement peu de rejets sont toujours vivantes, tandis que des souches portant initialement plusieurs dizaines de rejets sont mortes.

Les différences entre sites s'avèrent plus grandes que les différences entre classes d'âge, le site de Grane montrant des taux de mortalité plus élevés que celui de Réauville. Le facteur âge ressort malgré tout. Après 10 ans, le « taillis vieux » présente une mortalité de 25 % en moyenne, nettement supérieure à celle des taillis jeunes ou d'âge moyen.

Le nombre de rejets diminue rapidement

Le nombre de rejets par souche a fortement diminué entre les deux premières mesures et a continué de décroître plus lentement. Seule une minorité des rejets qui apparaissent après la coupe se développe durablement. Après 10 ans, le nombre

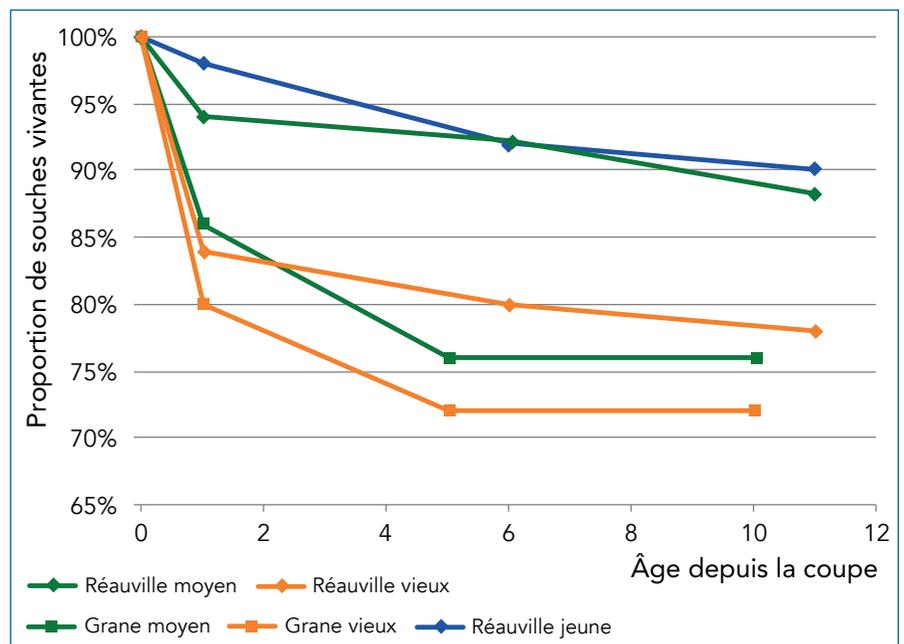


Fig. 1 : évolution de la proportion de souches vivantes sur le dispositif expérimental de Grane-Réauville

moyen de rejets subsistant sur les souches vivantes est inférieur à 5. Globalement, sur cette période, cela correspond à l'avortement d'un rejet sur six tous les ans. Cette tendance à la réduction devrait se prolonger si l'on en juge par le nombre de brins par cépée dans les taillis mûrs, qui est généralement compris entre deux et quatre.

Les différences entre modalités et sites se sont rapidement estompées et ne sont plus significatives depuis la deuxième mesure à 5-6 ans. En effet si, en moyenne, le nombre de rejets sur les souches vivantes reste décroissant en fonction de l'âge du taillis, il varie de 1 à plus de 10 dans chaque parcelle expérimentale.

La croissance des rejets est indépendante de l'âge du taillis

Les rejets mesurés sont en moyenne hauts de 3,80 m après 10 ans à Grane, contre 3,30 m à 11 ans à Réauville. Ce rythme de croissance différent s'explique par l'écart de fertilité entre les deux sites. Par contre, aucune corrélation n'apparaît entre la croissance des rejets et l'âge du taillis au moment de la coupe.

Le maintien d'un couvert permet-il la croissance du taillis ?

Le Cemagref a installé en 1985 un dispositif expérimental en forêt domaniale de Lure (Alpes-de-Haute-Provence) dans le but d'étudier l'effet de différentes intensités d'éclaircie sur la croissance du taillis et sur la régénération naturelle.

L'expérimentation comprenait 6 traitements, de la coupe à blanc à des prélèvements de 10 à 40 % de la surface terrière, appliqués sur des placettes de 1 600 m² et répliqués 4 fois. Le dispositif a été perturbé par une coupe intempestive en 1998 et son suivi a été interrompu jusqu'à une dernière visite en 2012.

Un dispositif similaire a été créé en 1997 par le CRPF dans une forêt privée sur la commune de Gréoux-les-Bains (Alpes-de-Haute-Provence) pour suivre à la fois la reprise du taillis, le comportement des réserves et la régénération naturelle. Celui-ci s'intègre dans le programme SYLVIPACA, financé par le Service Régional de la Forêt et du Bois et la Région PACA. Le taillis initial comptait environ 2 200 brins par hectare. Les cinq modalités étudiées sont : la coupe rase, trois niveaux d'éclaircie correspondant à un prélèvement de 24 à 54 % de la surface terrière et un témoin sans intervention (photos 1 et 2).

Le développement du taillis est freiné par le couvert

Sur le dispositif de la FD de Lure, les chiffres de croissance moyenne du taillis sont de 0,3 cm/an sur le diamètre avec peu de différences entre les modalités : seules les modalités coupe à blanc et coupe très forte montrent des croissances plus élevées de l'ordre de 0,4 cm/an.

Les résultats sont similaires à Gréoux, où la densité des rejets de souche est très suffisante pour reconstituer le peuplement. L'importance du recru est globalement proportionnelle à

l'intensité de l'éclaircie : quasiment nul dans le témoin, il culmine pour l'éclaircie très forte et surtout pour la coupe rase.

Ceci tend à confirmer le bon fonctionnement du système traditionnel de la coupe rase de taillis, tandis que le maintien d'un surétage limite la vigueur de la reprise.

Le balivage permet-il d'obtenir des produits plus intéressants que le bois bûche ?

Le gestionnaire d'un beau taillis est tenté de sélectionner les plus beaux brins pour les conserver et travailler à leur profit. Il souhaite favoriser leur croissance et espère, à terme, pouvoir les valoriser sous une forme plus intéressante que le bois de chauffage. Cela concerne le chêne pubescent mais aussi les essences secondaires, dont quelques feuillus précieux qui pourraient constituer un potentiel intéressant.

L'éclaircie a peu d'effet bénéfique sur les chênes réservés

En 1997, l'ONF a implanté deux essais, en forêts domaniales de Morières-Montrieux et de la Sainte-Baume, dans le Var, dans le cadre du programme SYLVIPACA. Ils comprennent respectivement trois et quatre modalités avec un prélèvement de 13 % à 51 % de la surface terrière plus un témoin sans intervention. Ils complètent les deux dispositifs présentés précédemment pour l'étude de l'effet d'éclaircies sur les arbres réservés.



L. Amandier, CRPF

1 – Dispositif CRPF de Gréoux-les-Bains. Modalité témoin



L. Amandier, CRPF

2 – Dispositif CRPF de Gréoux-les-Bains : éclaircie d'intensité moyenne



B. Prévosto, Irstea

3 – Dispositif de la FD de Lure, les brins de chêne mis en réserve (âgés de 80 ans environ) montrent des signes de dépérissement dans le houpplier

La grosseur des tiges suivies dans ces deux essais du Var s'échelonnait au départ entre 16 et 35 cm de diamètre. Elle n'était pas identique entre les modalités, mais la hiérarchie des diamètres n'a pas évolué depuis l'état initial. En effet, les accroissements annuels sont faibles et assez proches : 0,2 à 0,3 cm/an sur le diamètre à la Sainte-Baume et seulement 0,1 et 0,2 cm/an à Morières-Montrieux. En outre, ils ne s'ordonnent pas systématiquement selon le taux de prélèvement.

Sur le dispositif CRPF de Gréoux (photos 1 et 2), les accroissements sont du même ordre, variant de 0,1 à 0,3 cm/an selon l'intensité des éclaircies et selon le statut social des arbres échantillons. Globalement, la croissance radiale est liée positivement à l'intensité de l'éclaircie, les co-dominants et les dominés profitant davantage de la réduction de concurrence.

Dans le même temps, la croissance en hauteur est très lente. Ainsi, sur le dispositif de la FD de Lure, la hauteur moyenne des réserves est passée de 10,8 mètres à 56 ans à 13 mètres 27 ans plus tard, soit un accroissement de l'ordre de 8 cm/an. En fait, de très nombreuses réserves montrent des descentes de cimes, qui se manifestent dès les faibles niveaux d'éclaircie (photo 3) et même, moins fréquemment, dans les placettes témoins, ce qui témoigne d'un manque de vitalité de ces peuplements. Cela s'accompagne, sur la plupart de ces arbres, d'une forte émission de gourmands.

Ces expériences montrent une très faible croissance radiale des arbres conservés, qui profitent peu des éclaircies pratiquées. Surtout, le gain sur les volumes unitaires ne compense pas la dépréciation qualitative des grumes. Non seulement elles ne peuvent convenir à un usage plus noble, mais la nécessité de « nettoyer » et de refendre les bûches fait qu'elles sont même moins intéressantes que le taillis pour le bois de chauffage.

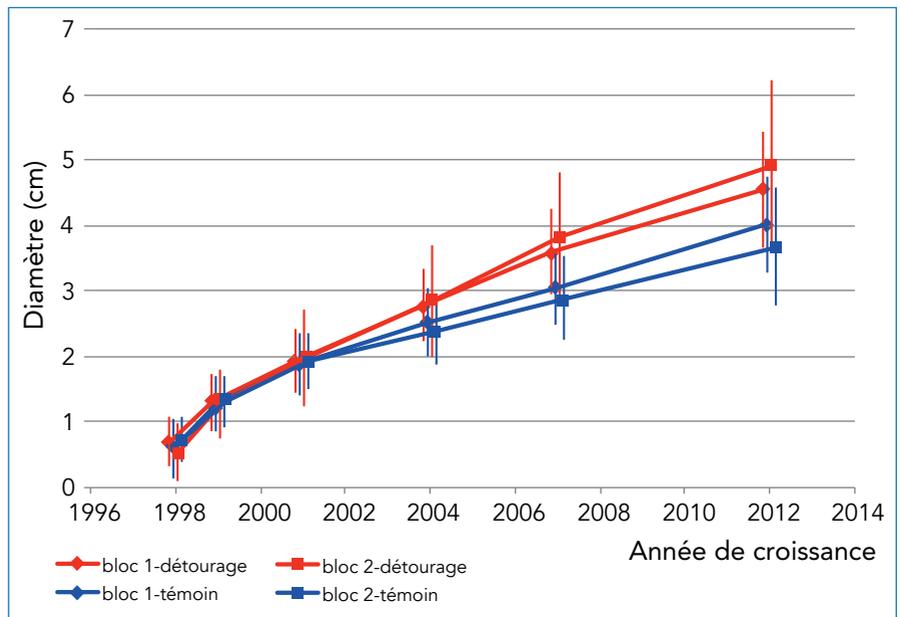


Fig. 2 : évolution des diamètres (moyenne et écart-type) des alisiers échantillons, de 1998 à 2012, par placette expérimentale sur le dispositif de Bourg-Saint-Andéol

La croissance des feuillus « précieux » est médiocre

Une expérimentation est en cours en forêt communale de Bourg-Saint-Andéol, dans un taillis relativement riche, pour vérifier la faisabilité technique et économique d'une gestion favorisant la croissance des feuillus précieux, notamment l'alisier torminal, en vue de les valoriser à part sous forme de petites grumes.

Le taillis a été complètement exploité au cours de l'hiver 1996-97. Fin 1998, les plus belles tiges de feuillus précieux ont été repérées et détourées dans un rayon d'un mètre dans la modalité travaillée, le témoin restant sans intervention. Un deuxième détourage des mêmes tiges, ainsi qu'une taille de formation si nécessaire, ont été réalisés début 2004. Un échantillon de 30 brins d'alisiers est suivi sur chaque parcelle expérimentale.

Comme attendu, le détourage stimule la croissance en diamètre des alisiers (figure 2). La différence entre traitements n'est toutefois pas encore significative ; elle n'est que de 1 cm en moyenne après 14 ans

et seule une moitié de l'échantillon des brins détourés a vraiment profité de l'intervention. Sans anticiper sur la conclusion de cet essai installé pour 40 ans, soit une rotation de taillis, le faible rythme de croissance radiale et la hauteur forcément limitée des fûts rendent peu probable l'obtention de grumes commercialisables en deux ou trois rotations de taillis.

Comment régénérer naturellement le chêne pubescent ?

La plupart des chênaies, pourvu qu'elles soient suffisamment âgées, contiennent des semis. Mais ceux-ci ont un port buissonnant ou plagiotrope et rares sont ceux qui dépassent 50 cm de haut. La principale raison invoquée est le manque de lumière. Ce potentiel de renouvellement, présent mais contraint, incite à ouvrir ces vieilles chênaies pour les régénérer.

Pourtant, aussi évidente que paraisse cette solution, elle ne donne pas, en gestion courante, les résultats attendus. C'est pourquoi plusieurs expérimentations ont porté sur le degré

d'ouverture du peuplement autant pour développer les houppiers des semenciers que pour permettre le développement de la régénération.

Les semis préexistants sont peu vigoureux

Une expérimentation a été implantée en 1988 sur deux sites de la FD du Montdenier (Alpes-de-Haute-Provence) dans des taillis d'âge moyen, pour suivre la régénération en fonction du niveau d'ouverture du peuplement.

On étudie l'effet de trois intensités de coupe et un témoin. Le peuplement initial a une densité de 2 200 cépées et 3 500 à 4 000 tiges par hectare. La coupe a ramené la densité à 1 800 (sur l'un des sites seulement), 1 200 et 600 tiges par hectare. Les semis ont été comptés sur des placeaux de 4 m². La distinction des semis initiaux par rapport à ceux qui se sont installés ensuite n'a pu être rigoureuse que jusqu'à 4 ans. On ne peut donc produire de résultats au-delà de ce délai.

Le décompte initial des semis montre une densité moyenne de 5,0 à 7,2 pour 4 m² à la Plaine du Bois et de 2,2 à 2,7 pour 4 m² à Ourbes. Après 4 ans, la mortalité de ces semis est importante puisqu'un tiers seulement subsiste. Elle est en moyenne plus forte dans les peuplements clairs, comme l'indique le tableau 3. Les tests statistiques ne permettent pas de distinguer les modalités, mais on peut conclure *a minima* que les coupes n'ont pas eu d'effet bénéfique sur la survie des semis initiaux.

Une forte proportion de ces semis, de l'ordre d'un tiers chaque année, présente une pousse terminale sèche. Les semis touchés ne sont pas toujours les mêmes d'une année sur l'autre. Cela

limite de fait leur développement, sans que l'on puisse distinguer une influence du traitement appliqué.

Une coupe forte ne favorise pas l'ensemencement

Dans le cadre de l'expérimentation du Montdenier, l'abondance et la qualité des glandées de 1989 et 1991 ont été appréhendées par le ramassage des glands sur des placeaux de 1 m². Le nombre récolté en 1989 correspond à environ 200 000 glands par hectare, ce qui est comparable aux valeurs rapportées dans la littérature pour le chêne sessile ou le chêne pédonculé. On constate de fortes variations au sein de chaque site. Les valeurs moyennes tendent à montrer un effet bénéfique de la diminution de densité des semenciers, mais cela n'est pas statistiquement significatif.

La majorité de ces glands sont creux. Le taux de levée, estimé par le rapport du nombre de nouveaux semis au printemps 1990 sur le nombre de glands lourds de 1989, est très faible et différent selon le site : 1,4 % pour la Plaine du Bois et 10 % pour Ourbes. Cette différence s'explique notamment par la petite taille des glands de la Plaine du Bois. Il faut cependant noter que le comptage des semis de l'année 1988 donnait des densités supérieures et inversées par rapport à celles de 1990. On retrouve ici les effets de la variabilité interannuelle des fructifications, qui est bien connue des forestiers.

Indépendamment du site, le taux de levée de la glandée de 1989 est significativement plus faible dans la modalité « coupe très forte », tandis que les autres modalités ne se distinguent pas franchement.

La densité de régénération est très variable

En plus des deux dispositifs SYLVIPACA de Morières-Montrieux et de la Sainte-Baume évoqués ci-dessus, un troisième essai fut installé également dans la forêt domaniale de la Sainte-Baume en automne 1997, afin d'observer l'installation des semis. Il comprend trois modalités de coupe d'ensemencement : coupe modérée conservant 200 semenciers par hectare, coupe forte conservant 100 semenciers par hectare, trouées de 20 mètres de diamètre, et témoin sans coupe. Les semis ont été comptés dans des placeaux de 1 m² au nombre de 25 par modalité dans les deux premiers essais et de 30 dans le troisième. Les derniers comptages datent de l'intersaison 2007-2008, soit dix ans après installation.

Les évolutions du nombre de semis de chêne pubescent et leur densité après dix ans sont très différentes selon le site (figure 3). Les variations spatiales et temporelles des fructifications sont une des explications. On ne peut pas conclure qu'une modalité est plus favorable qu'une autre. Tout au plus peut-on constater que la coupe forte n'est pas efficace. Les trouées semblent plus favorables mais leur nombre insuffisant empêche d'être affirmatif. Dans toutes les situations, cependant, on décompte en moyenne une densité de semis supérieure à 1 par mètre carré, ce qui est à la fois faible et *a priori* suffisant pour régénérer le peuplement.

Sur le dispositif CRPF de Gréoux, les semis ont été suivis également pendant une dizaine d'années. Leur densité est assez forte, même dans le témoin, sans différence significative entre les traitements.

Par contre, dans l'expérimentation de la FD de Lure présentée plus haut, Mazzobel (1986) a montré qu'aucun semis n'était apparu un an après une coupe rase ou une coupe laissant

Modalité	la Plaine du Bois	Ourbes
Témoin	59,6 %	55,7 %
Coupe faible 1 800 tiges/ha	52,6 %	-
Coupe modérée 1 200 tiges/ha	64,4 %	67,4 %
Coupe très forte 600 tiges/ha	71,3 %	83,2 %
Ensemble	62,0 %	68,8 %

Tab 3 : taux de mortalité moyen des semis initiaux, par site et par modalité, après 4 ans sur le dispositif du Montdenier

100 semenciers par hectare. Après 27 ans la régénération de chêne qui avait été observée dans les autres modalités a disparu (Prévosto et al., 2013). Une régénération dynamique de hêtre s'est installée en mélange avec du pin sylvestre, surtout abondant dans la coupe à blanc, et de l'érable à feuille d'obier. Dans ce dispositif, situé à la limite de l'étage montagnard, les coupes dans le taillis ont servi d'abri pour l'installation du hêtre qui s'est largement développé, atteignant une hauteur moyenne de 9 mètres, en reprenant certainement une place qu'il occupait antérieurement.

Les semis ne se développent pas

Après dix années de suivi dans les dispositifs du Var, comme sur celui de Gréoux, très peu de semis dépassent vingt ou trente centimètres de hauteur (figure 4). De plus, aucune différence entre modalités n'apparaît réellement. Quelles que soient les conditions d'expérimentation, on constate une absence de développement en hauteur de la régénération. Il semble qu'un certain pool de semis soit annuellement renouvelé mais que la régénération soit bloquée à ce stade.

Cela reflète moins une croissance lente qu'une stagnation de la taille des semis qui ne grandissent pas significativement d'une année sur l'autre ou perdent leur dernière pousse. Lorsqu'on observe un semis plus en détail on constate souvent une architecture en « microcépée » plus ou moins marquée (photo 4).

Prévosto et coll., 2013



4 – Architecture d'un semis de chêne en « microcépée »
Le plant âgé de 19 ans environ mesure 20 cm. Il porte plusieurs tiges vivantes et des cicatrices de tiges mortes.

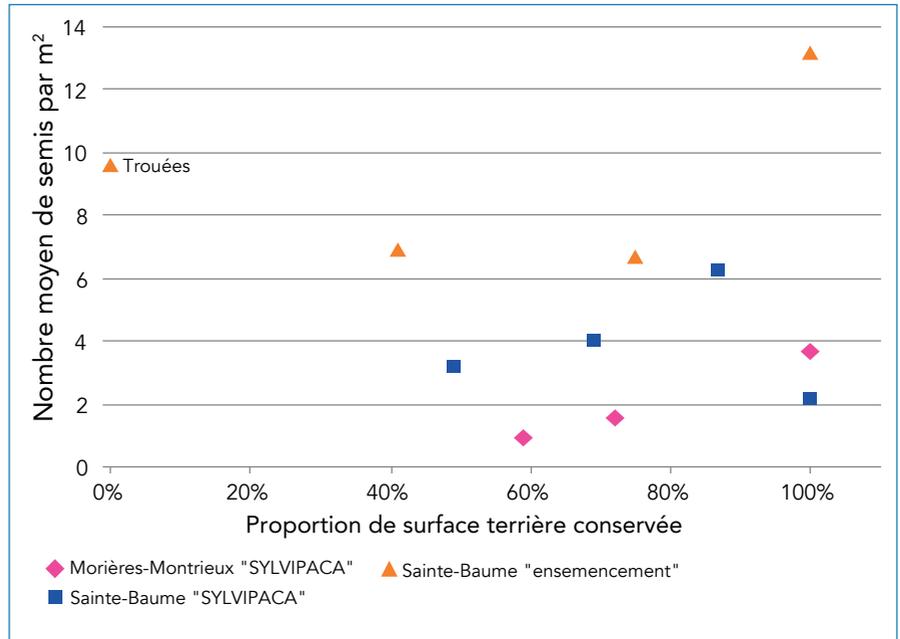


Fig. 3 : densité moyenne de semis (en nb/m²) après dix ans dans trois dispositif expérimentaux, en fonction de la proportion de surface terrière de chêne conservée

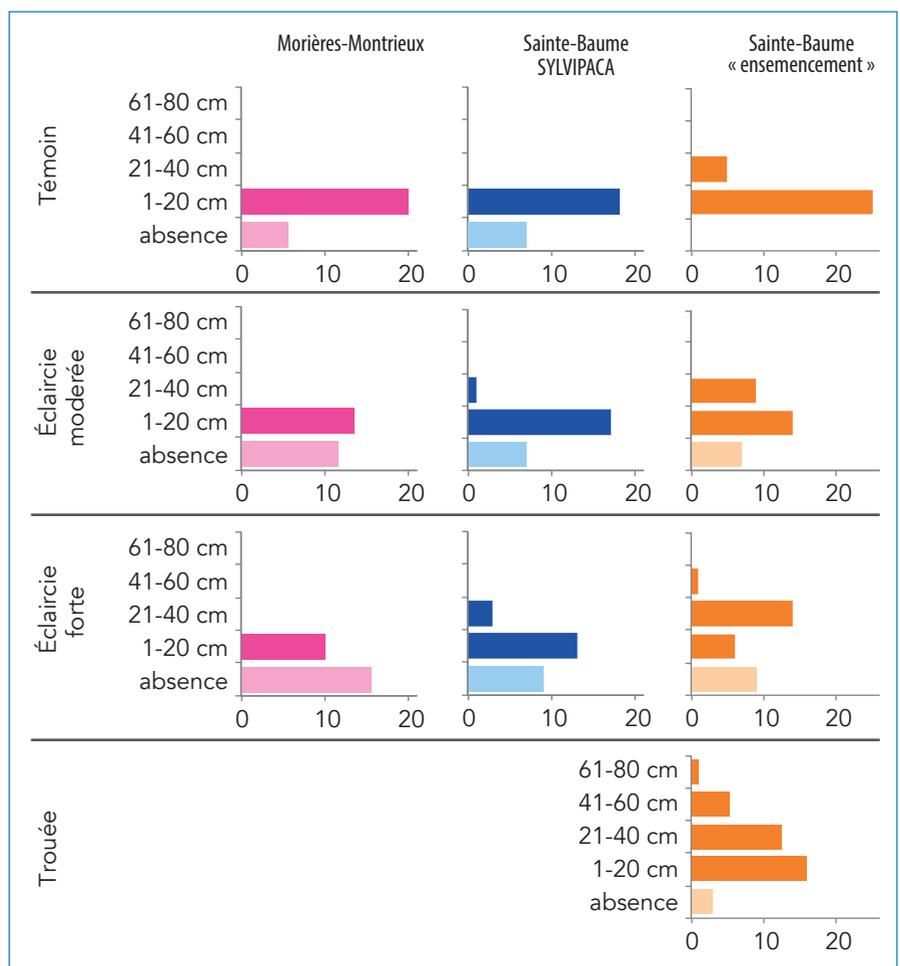


Fig. 4 : nombre de placeaux par classe de hauteur du semis le plus grand dix ans après la coupe (« absence » = placeau vide) dans trois dispositifs expérimentaux

Dans ce cas, il n'y pas une croissance régulière d'une tige dominante mais apparition de nombreuses tiges au développement chaotique. On ne sait pas à quels facteurs précis attribuer ce phénomène : est ce liée à des fertilités trop faibles, à des contraintes microclimatiques, à la concurrence de la végétation au sol ?

Conclusion : le taillis simple reste le meilleur compromis

Les résultats des dispositifs expérimentaux sont décevants puisqu'aucune des modalités de gestion expérimentées ne s'est révélée convaincante. Ils sont cependant convergents et riches d'enseignements pour le gestionnaire tenté par l'allongement de la rotation du taillis, le balivage ou la conversion.

Il se confirme qu'un taillis vieilli perd de sa capacité à rejeter, ce qui se traduit principalement par une augmentation de la mortalité des souches. Sur les souches vivantes, le nombre de rejets viables apparaît peu dépendant de l'âge du taillis au moment de la coupe tandis que leur croissance est principalement liée à la fertilité de la station.

Une coupe partielle du taillis limite la vigueur des rejets et profite peu aux brins réservés. Le peuplement à deux étages qui en résulte est donc peu productif et sera, en outre, plus difficile à gérer qu'un taillis simple.

Le détournement des feuillus précieux stimule peu leur croissance en diamètre, ce qui ne permettra sans doute pas d'obtenir d'autres débouchés que le bois de chauffage ni de rentabiliser les travaux réalisés.

Les arbres conservés après une éclaircie dans le taillis de chêne ou dans une futaie sur souche n'ont pas la capacité de réaction attendue. Ils se montrent incapables de développer leur houppier après coupe et, au contraire, subissent des descentes de cimes et développent des gourmands.

Les coupes d'ensemencement, quelle que soit leur intensité, ne favorisent pas le développement des semis préexistants et ne permettent pas, sans autres travaux, de régénérer le peuplement. Ce n'est pas l'installation de la régénération qui est en cause puisque les semis sont généralement suffisamment nombreux, mais son développement en hauteur qui stagne sans raison évidente.

Ces conclusions ne sont pas toutes définitives. En particulier, la question de la régénération naturelle reste posée et devrait faire l'objet de nouvelles expérimentations pour déterminer quels sont les facteurs de blocage et comment les lever. Il s'agira notamment de tester, en plus des modalités d'ouverture du peuplement, des méthodes de préparation du sol.

Cependant, force est de constater que le taillis simple, avec des rotations de 40 à 50 ans, reste le traitement à la fois le plus simple, le mieux adapté à un objectif de production et le plus pérenne pour le chêne pubescent en région méditerranéenne. Cette conclusion rejoint d'ailleurs totalement celle de Ducrey (1996) sur la gestion des taillis de chêne vert. Les autres sylvicultures peuvent s'envisager, dans un souci paysager ou d'accueil du public, dans les meilleures classes de fertilité, mais, en l'état actuel des connaissances, elles ne sont pas pertinentes pour un objectif de production et ne permettent pas d'assurer le renouvellement des peuplements.

Jean LADIER

Charles TESSIER

ONF – DFRN – Département R&D

Louis AMANDIER

CRPF de PACA

Bernard PRÉVOSTO

UR Écosystèmes méditerranéens et risques
Irstea Aix-en-Provence

Bibliographie

Amandier L. *et al.*, 2008. Quelle sylviculture pour les beaux taillis de Chêne pubescent de l'arrière-pays provençal ? Les enseignements de la placette expérimentale de Gréoux-bains (Alpes-de-Haute-Provence). Doc. interne CRPF. 68 p. + Synthèse 9 p.

Bourdenet P., 1996. Étude de la régénération naturelle du chêne pubescent à partir d'un taillis simple. Forêt méditerranéenne vol. XVII, n° 3, pp. 169-174

Duché Y., 1983. Établissement de classes de croissance des peuplements de chêne pubescent en Provence. Analyse de leurs facteurs explicatifs. Mémoire de 3^e année ENITEF /CEMAGREF Aix-en-Provence. 106 p. + annexes (73 p.),

Ducrey M., 1996. Recherches et expérimentations sur la conduite sylvicole des peuplements de chêne vert. Forêt Méditerranéenne, vol. XVII, n° 3, pp. 151-168

IFN, 2011. L'IF n° 27. 12 p.

Mazzobel F., 1986. Les problèmes sylvicoles des taillis de chêne pubescent en région méditerranéenne : premiers résultats. Mémoire de BTS – Production forestière. CEMAGREF Aix-en-Provence

Prévosto B., Ripert C., Ostermeyer R., 2013. Éclaircir est-il suffisant pour favoriser la régénération de taillis de chêne blanc ? Retour sur un dispositif installé il y a 27 ans en forêt domaniale de Lure (Alpes-de-Haute-Provence). Forêt méditerranéenne vol. XXXIV, n° 1, pp. 3-12

Santelli J. coord, 1996. Guide de sylviculture du Chêne pubescent. ONF Direction régionale PACA, 28 p + annexes

Dossier

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR


Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie

Le projet de recherche ÉMERGE, soutenu par l'ANR et coordonné par l'ONF, s'est achevé en 2013. Son objet : la refonte des outils de dendrométrie dans le contexte des nouveaux enjeux d'estimation de la ressource bois. Un premier dossier (RDVT n° 39-40) en a présenté l'ampleur et la diversité. Nous revenons ici au cœur du projet : la construction de tarifs génériques, robustes et compatibles pour les volumes (arbre entier, tige), puis la biomasse, la minéralomasse et enfin le pouvoir calorifique. Avec un regard sur des aspects particuliers : la généralisation par groupes d'essences, les apports du scanner, un focus sur la masse volumique. C'est un peu ardu... mais fondamental !

- p. 18 Mesures de volume, biomasse, minéralomasse : peut-on généraliser par affinités architecturales et anatomiques ?
par Fleur Longuetaud, Michaël Rivoire, Philippe Santenoise, Frédéric Mothe, Yves Caraglio, Christine Deleuze
- p. 22 Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station
par Christine Deleuze, François Morneau, Jean-Pierre Renaud, Yannick Vivien, Michaël Rivoire, Philippe Santenoise, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Jean-Christophe Hervé, Patrick Vallet
- p. 33 Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes
par Christine Deleuze, François Morneau, Jean-Pierre Renaud, Yannick Vivien, Michaël Rivoire, Philippe Santenoise, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Jean-Christophe Hervé
- p. 43 Modèles de biomasse et de minéralomasse. Quelles avancées de la recherche ? Pour quels usages à terme en gestion ?
par Laurent Saint-André, Astrid Genet, Arnaud Legout, Jacques Ranger, Holger Wernsdörfer, Mathieu Jonard, Quentin Ponette, Paul-Igor Hounzandji, Christine Deleuze
- p. 57 Un scanner tomographique à rayons X pour l'analyse de la structure interne des arbres
par Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Santenoise, Francis Colin, Charline Freyburger, Philippe Borianne, Christine Deleuze
- p. 65 Étude exploratoire de la masse volumique. Influence du « taux de remplissage » en eau du bois frais
par Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Santenoise, Michaël Rivoire, Mériem Fournier, Laurent Saint-André, Christine Deleuze
- p. 73 Qualification du bois énergie : peut-on aller jusqu'au pouvoir calorifique ?
par Nicolas Bilot, Laurent Saint-André, Yann Rogau, Christine Deleuze

Mesures de volume, biomasse, minéralomasse : peut-on généraliser par affinités architecturales et anatomiques ?

Élaborer des tarifs génériques, valables pour toutes les essences de la ressource forestière, est une véritable gageure compte tenu de la masse de données nécessaire pour ajuster les modèles. Si l'information est largement disponible pour certaines essences, d'autres sont peu (ou pas) renseignées. D'où l'idée de constituer des groupes d'essences de même architecture et structure interne, qui permettent de mutualiser l'information et proposer un modèle par groupe sinon par essence. Une opération structurante.

L'objectif du projet EMERGE est de construire pour les estimations de volume, biomasse et minéralomasse des modèles génériques (valables pour les différentes essences forestières) et robustes (quelles que soient les stations et structures de peuplement). Il a fallu pour cela rassembler le maximum de données possible, issues pour l'essentiel d'archives et de bases de données anciennes, ou recueillies en complément dans le cadre du projet (RDVT n° 39-40, pp. 37-47). Cependant, selon la grandeur que l'on veut reconstituer, la quantité de données disponibles est plus ou moins importante et ne couvre pas toujours toutes les essences forestières.

Au sein de la ressource française de métropole, l'Inventaire forestier national recense plus de 100 espèces et en distingue une soixantaine (les autres étant appréhendées globalement). Certaines sont très bien représentées comme les chênes, le hêtre, l'épicéa, le sapin ou les pins mais il en est d'autres pour lesquelles les données sont maigres : ce sont les essences dites « orphelines ». Du côté des organismes gestionnaires ou de recherche, on ne retrouve qu'une vingtaine d'essences, certaines étudiées sur de larges gra-

dients stationnels et sylvicoles, avec des mesures extrêmement détaillées, et d'autres moins renseignées.

Un enjeu important du projet a donc été de classer les essences en groupes homogènes de façon que l'information largement disponible sur certaines essences puisse servir à asseoir des modèles génériques par groupe, applicables ainsi à des essences moins connues.

Cet article présente la démarche générale suivie pour construire ces groupes *a priori* homogènes au sens de la répartition du volume et de la biomasse dans l'arbre. L'hypothèse forte posée est que des essences d'un même groupe auront des variations communes de forme et de répartition de volume ou biomasse.

Organisation des essences

Pour appréhender la distribution de volume et biomasse, et discriminer les essences entre elles, on peut étudier deux grands critères : l'architecture, d'une part, avec les différences de mise en place et d'organisation des axes d'un arbre (tronc et branches) et, d'autre part, la structure interne du bois avec les différents plans ligneux.

Des architectures contrastées

L'architecture de l'arbre donne un premier niveau d'organisation des essences. Tout forestier appréhende intuitivement un gradient entre deux extrêmes (figure 1) : d'un côté des arbres plutôt hauts et rectilignes, avec un tronc bien défini jusqu'en haut et des branches assez fines, et à l'opposé des arbres trapus avec un tronc bien défini jusqu'à une certaine hauteur seulement et des branches imposantes. L'architecture de l'arbre rend compte des caractéristiques à la fois botaniques, topologiques et géométriques des essences, de leur évolution en fonction du stade de développement atteint par l'arbre, mais aussi des interactions avec son environnement, en particulier du point de vue du forestier : compétition, structure forestière, station.

Il existe un panel de modèles architecturaux qui définissent l'évolution dans le temps de cette organisation topologique des éléments de l'arbre (axes et ramifications, inflorescences, feuilles) : par exemple les modèles de Rauh et de Massart.

Des structures internes du bois différentes

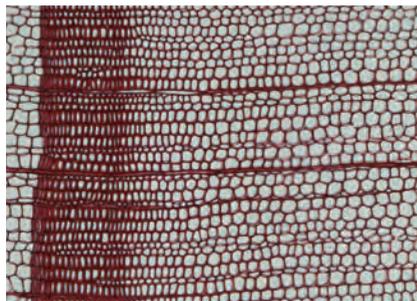
L'autre gradient bien connu des forestiers est la structure interne du bois :



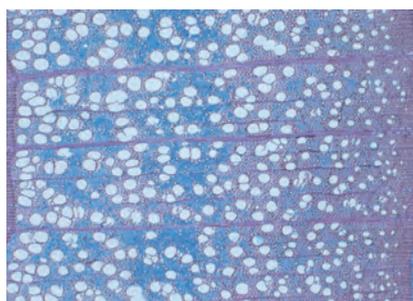
Fig. 1 : illustration du gradient d'architectures des arbres

À gauche, un cas typique de résineux très élancé avec le modèle de Massart; au milieu, des feuillus plus ou moins élancés en futaie, avec les modèles architecturaux au stade adulte du frêne puis du hêtre (Barthélémy et Caraglio, 2007); à droite, un cas extrême de feuillu trapu avec des grosses branches basses, en réserve de taillis-sous-futaie.

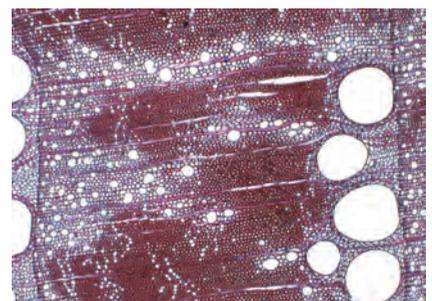
Résineux : épicéa



Feuillus à pores diffus : hêtre



Feuillus à zone initiale poreuse : chêne



P. Gelhaye, LERFoB
J. Ruelle, LERFoB

Fig 2 : illustration du gradient de structure interne (anatomie) du bois, avec les trois grands types de plans ligneux. En haut, radiographies (détail) des coupes transversales; en bas, des observations de coupes microscopiques le long du même gradient.

c'est l'agencement particulier de cellules de tailles et de formes variables, caractéristique de chaque essence et qu'on désigne sous le terme de « plan ligneux ». On identifie en général trois grands types de plans ligneux (figure 2) : les résineux, les feuillus à pores diffus et les feuillus à zone initiale poreuse. Ce gradient reflète des stratégies internes très différentes entre le rôle de soutien et le rôle de conduction de la sève. Les résineux ont un tissu assez simple avec des trachéides qui assument conjointement ces deux rôles. Les feuillus ont à l'inverse des cellules plus spécialisées, avec en particulier des vaisseaux plus ou moins larges, dédiés à la conduction de sève.

Comment construire des groupes homogènes ?

Il est difficile d'utiliser directement ces deux gradients pour organiser nos groupes, et ce pour plusieurs raisons : ces deux gradients sont tout d'abord assez corrélés, puisque l'on trouvera par exemple beaucoup de résineux dans les mêmes groupes architecturaux. À l'inverse certains croisements de modèles architecturaux et plans ligneux restent sans représentant. Par ailleurs les plans ligneux, comme les modèles architecturaux, synthétisent une combinaison de variables qui peuvent être regardées séparément et donner des informations plus détaillées pour certaines essences.

Quelles variables descriptives retenir ?

Afin de construire des groupes, nous avons donc sélectionné certaines variables issues des approches architecturale et anatomique :

- phyllotaxie, sexualité terminale ou latérale, capacité de réitération, potentiel à rejeter de souche, sympode ou monopode en ce qui concerne l'architecture ;
- plan ligneux et infradensité en ce qui concerne la structure interne du bois.

Mais nous avons aussi retenu des indications écologiques importantes pour le développement de l'arbre : tolérance ou non à l'ombrage, gradient successional, croissance juvénile, hauteur maximale potentielle, capacité de réitération.

Ces variables ont été sélectionnées afin d'être à la fois complémentaires et représentatives de facettes différentes des caractéristiques des essences. Elles ont été renseignées pour toutes les essences (plus de 60) à l'aide de la bibliographie (par exemple la flore forestière de Rameau, 1989) ou à dire d'expert, avec l'aide d'Yves Caraglio (botaniste au CIRAD).

Une classification automatique en plusieurs niveaux

À partir de ces variables, une analyse statistique (analyse des correspondances multiples, suivie d'une classification hiérarchique avec distance de Ward) a permis de construire des groupes d'essences (figure 3). Selon le degré de finesse de ce tri, plusieurs niveaux peuvent s'emboîter : séparation classique entre feuillus et résineux, distinction en 5 groupes dont 2 groupes résineux (A et B) et 3 groupes feuillus (C, D et E), eux-mêmes divisés en sous-groupes (12 au total).

■ Le groupe A rassemble les résineux qui ont une croissance initiale assez forte, avec peu de polycyclisme, et dont la ramification se développe en différé, c'est-à-dire l'année après la formation des bourgeons. Le sous-groupe A1 se compose de résineux exotiques (*Cryptomeria japonica*, *Pseudotsuga menziesii*, *Sequoia sempervirens*); le sous-groupe A2 (*Cupressocyparis leylandii*, *Cupressus sempervirens*) est également exotique, mais proche du sous-groupe A3 formé notamment par les sapins et épicéas (*Abies alba*, *Abies grandis*, *Abies nordmanniana*, *Picea abies*, *Picea sitchensis*, *Tsuga heterophylla*, *Thuja plicata*).

■ Le groupe B concerne surtout les pins, avec parfois une ramification l'année même de la formation des bourgeons, avec aussi du polycyclisme, et une certaine capacité à la réitération. Il se sépare en deux sous-groupes : B1 pour deux pins avec cèdres et mélèzes (*Cedrus atlantica*, *Cedrus libani*, *Larix decidua*,

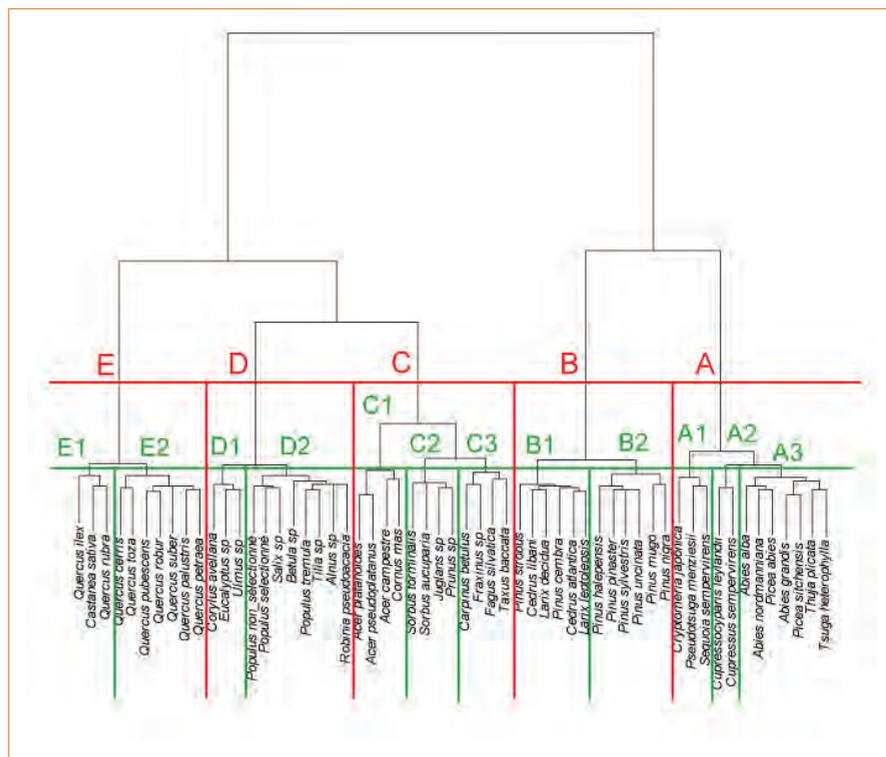


Fig. 3 : arbre de classification des essences à partir de l'analyse des correspondances multiples

Les traits vert et rouge représentent deux niveaux d'arrêt du processus de classification, conduisant respectivement à 5 groupes (A, B, C, D et E) ou 12 sous-groupes d'essences. Une base de données des caractéristiques architecturales, anatomiques et écologiques a été constituée pour l'ensemble des essences différenciées dans l'Inventaire forestier national, soit plus de 60 essences. Quelques unes, trop peu documentées, ont été écartées de l'analyse qui a finalement porté sur 57 essences. D'autres essences peuvent être distribuées dans ces groupes, une fois l'ensemble des variables renseignées à dire d'expert ou par la littérature.

Larix leptolepis, *Pinus strobus*, *Pinus cembra*), et B2 pour les autres pins (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Pinus mugo*, *Pinus nigra*).

■ Le groupe C est constitué de feuillus plutôt monopodiaux, avec une phyllotaxie opposée pour le sous-groupe C1 (*Acer campestre*, *Acer platanoides*, *Acer pseudoplatanus*, *Cornus mas*). Le sous-groupe C2 (*Sorbus aucuparia*, *Sorbus torminalis*, *Juglans sp.*, *Prunus sp.*) se distingue à la fois de C1 et C3 par une infradensité et une tolérance à l'ombrage plus faibles. Noter enfin en C3 (*Fagus sylvatica*, *Carpinus betulus*, *Fraxinus sp.*, *Taxus baccata*) la situation singulière de l'if qui se retrouve parmi des feuillus malgré son plan ligneux.

■ Le groupe D se distingue par des rejets de souches et drageons; il se répartit entre espèces assez tolérantes à l'ombrage en D1 (*Corylus avellana*, *Eucalyptus sp.*, *Ulmus sp.*) et espèces moins tolérantes en D2 (*Alnus sp.*, *Betula sp.*, *Salix sp.*, *Tilia sp.*, *Populus non sélectionné*, *Populus sélectionné*, *Populus tremula*, *Robinia pseudoacacia*).

■ Le groupe E réunit la plupart des feuillus à zone initiale poreuse et forte densité, qui se répartissent également en deux sous-groupes selon leur tolérance à l'ombrage : plutôt tolérants en E1 (*Quercus ilex*, *Quercus rubra*, *Castanea sativa*) et moins tolérants en E2 (*Quercus cerris*, *Quercus palustris*, *Quercus petraea*, *Quercus pubescens*, *Quercus robur*, *Quercus suber*, *Quercus toza*).

À quoi servent ces groupes dans le projet EMERGE ?

Nous avons là le socle de construction d'une démarche générique, qui vise à construire des modèles spécifiques quand le nombre de données le permet, ou des modèles que l'on appellera « gris », pour des groupes d'essences, dans les autres cas.

Pour chaque grandeur modélisée, ces groupes sont testés statistiquement. Selon la quantité de données disponible pour la grandeur considérée, on choisit l'un des niveaux de segmentation et on ajuste les paramètres du modèle par groupe. Si les tests statistiques ne valident pas ces paramètres, on refait l'ajustement au niveau de segmentation supérieur, si bien que l'on obtient souvent au moins des modèles gris feuillus ou résineux. La procédure d'ajustement permet par ailleurs d'obtenir à la fois un modèle spécifique pour certaines essences du groupe et un modèle gris pour le groupe.

Pour le volume total aérien, par exemple, faute d'un nombre suffisant de données dans certains sous-groupes, il a fallu se contenter de modèles gris feuillus ou résineux, compatibles avec les modèles spécifiques ajustés pour le chêne, le hêtre, etc. Mais dans le cas du volume de tige, nous avons pu établir une cinquantaine de modèles spécifiques et utiliser pleinement la classification pour obtenir aussi 12 modèles gris (un par sous-groupe). Pour une essence orpheline, et à défaut de données supplémentaires, il sera possible d'utiliser le modèle gris du sous-groupe qui lui correspond.

Pour les essences orphelines, la classification des espèces selon leurs caractéristiques architecturales et ligneuses, combinée à la modélisation

sur de très larges jeux de données couvrant plus d'une cinquantaine d'essences, est donc un progrès important : cela permet de proposer des outils réellement génériques et robustes, tenant compte du maximum d'information disponible.

Cette classification hiérarchisée a aussi permis d'organiser le travail. Ainsi, pour les travaux sur la biomasse et la minéralomasse, on a choisi de construire les premiers modèles spécifiques pour 5 essences, une dans chacun des 5 groupes principaux, afin d'avoir des cas tranchés de comportement. Comme pour les volumes, l'objectif final sera d'aller aux modèles génériques gris par groupes, mais la compréhension des différences de comportement entre les modèles d'espèces correspondant à des groupes distincts est une étape clé de la construction d'un modèle plus général.

Fleur LONGUETAUD

Michaël RIVOIRE

Philippe SANTENOISE

Frédéric MOTHE

INRA, UMR 1092-LERFoB¹
54280 Champenoux
prenom.nom@nancy.inra.fr

Yves CARAGLIO

CIRAD, UMR AMAP, Montpellier

Christine DELEUZE

ONF, département R&D

Références

Barthélémy D., Caraglio Y. 2007. Plant Architecture : A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany*, vol. 99 n° 3 pp. 375-407

Flore Forestière Française (Rameau, 1989



L. Croisé, ONF



L. Croisé, ONF



E. Ulrich, ONF

Exemples de trois (sous) groupes distincts avec le mélèze d'Europe (B1), le pin sylvestre (B2) et le hêtre (C3)

¹ Le LERFoB bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station

Pourquoi aborder les volumes en commençant par le volume total de l'arbre, peu familier et difficile à appréhender ? Parce qu'il est total, justement : indispensable pour assurer la cohérence des estimations par compartiment (tige, branches, à telle ou telle découpe). Et parce qu'on en a besoin pour les nouveaux enjeux, ceux du carbone par exemple. La méthode est complexe mais le résultat est là : un modèle général, paramétré pour 28 essences avec aussi une formule simplifiée pour des estimations approchées rapides

C Calculer le volume total¹ n'est certainement pas la manière la plus habituelle d'appréhender le volume d'un arbre pour les forestiers. Pour des raisons de commercialisation, c'est le volume tige à découpe commerciale qui prime : historiquement, les travaux sur les tarifs* de cubage ont d'ailleurs surtout concerné le volume de tige.

En ce qui concerne la connaissance de la récolte, pour la comparer à la production, l'outil de surface terrière paraît mieux adapté. Mais la demande croissante sur le stockage de carbone rend nécessaire de mieux appréhender le volume total. Lequel constitue par ailleurs une référence qui permet ensuite de distribuer le volume de manière cohérente entre différents compartiments, notamment la tige et le houppier, puis par découpe.

L'objectif du projet EMERGE était bien de construire des outils d'estimation, cohérents et compatibles, pour plusieurs volumes dans l'arbre. Il s'est avéré en outre que le volume total était bien moins variable que le volume de tige pour des sites et des conditions sylvicoles différentes.

Nous présentons ici les travaux existants dont nous nous sommes inspirés, la démarche que nous avons suivie, par l'intermédiaire d'un coefficient de forme, les données disponibles et le modèle obtenu. Ce modèle est générique puisqu'il permet de prédire le volume total des arbres quelle que soit l'essence : les paramètres sont spécifiques pour plus d'une vingtaine d'essences mais pour les autres on peut utiliser l'ajustement global « feuillus » ou « résineux ». Ce modèle a été ensuite validé sur des données indépendantes, en particulier pour des essences qui n'ont pas de paramètres spécifiques. Le modèle de volume total n'utilise en entrée que la hauteur totale de l'arbre et sa circonférence : ces informations de taille suffisent à décrire les variations entre sites et entre sylvicultures.

Pour terminer, une utilisation de ce modèle est proposée à titre d'illustration en gestion, sur des données de chênes.

On ne parlera ici que de volume géométrique*, tige et branches, individuel (= par arbre); noter aussi qu'il s'agit de volume total aérien, jusqu'à l'extrémité des rameaux.

Les tarifs* de cubage : une forte tradition forestière qui ne va pas sans difficulté

De nombreux articles scientifiques, et encore davantage de rapports et autre littérature dite « grise », montrent une grande richesse et diversité des tarifs de cubage (tige ou autre) : par essence, région, type de volume. Pardé et Bouchon (1988) en ont retracé la genèse, et les gestionnaires se sont emparés depuis longtemps de cette question à des fins opérationnelles. Trois marqueurs l'attestent : le *Protocole national pour le cubage d'arbres-échantillons* de 1972 piloté (et révisé en 1983) par le département technique de l'ONF, l'article de référence de Vallance (1995) dans le Bulletin technique qui cadre une méthodologie sur les tarifs, et la base de données des tarifs recensés à la direction technique ONF dans les années 1990 à 2000 (pas moins de 255 tarifs pour différents volumes et essences partout en France). De cet historique, il est intéressant de tirer quelques observations générales quel que soit le volume considéré : sur les variables explicatives de ce volume et les problèmes statistiques associés à l'ajustement des tarifs.

¹ Les mots ou expressions marqués du signe « * » renvoient au glossaire en fin d'article, page 31

Le volume est très lié au diamètre, mais aussi à la hauteur

Dans un peuplement homogène et régulier, le volume d'un arbre augmente très généralement avec le diamètre du tronc, mesuré à 1,30 m du sol. Certains tarifs* de cubage ou barèmes* permettent d'évaluer le volume d'un arbre à partir de la mesure du seul diamètre. Cependant le choix d'un tarif ou barème à une seule entrée (diamètre) est très délicat car la relation entre volume et diamètre évolue, pour une essence donnée, en fonction de la station, du stade de développement et même, pour une coupe, du type de cette coupe. Par ailleurs, même si un barème est choisi en fonction de la mesure du volume d'un arbre moyen, la relation peut diverger pour les plus petits ou plus gros diamètres; enfin la décroissance métrique* varie dans un peuplement avec la taille de l'arbre.

Dès que l'on change de peuplement (ou d'âge ou de stade sylvicole pour un même peuplement), la relation entre volume et diamètre varie. Les tarifs à double entrée, diamètre et hauteur (totale ou à une découpe donnée), permettent de résoudre en grande partie cette difficulté : le couple diamètre-hauteur donne une approche, sinon de la forme précise de la tige, tout au moins de sa conicité générale, ce que le diamètre à lui seul n'indique pas. Les tarifs construits pour un large domaine géographique utilisent donc deux entrées : le diamètre et une hauteur, la hauteur totale ou une hauteur de découpe. Vallance (1995) conclut que cette deuxième entrée est indispensable pour bien rendre compte des variations de forme de la tige.

Une autre difficulté : la dispersion des mesures de volumes augmente chez les gros arbres

Quiconque a manipulé des données de volume d'arbre aura pu constater que la variabilité de ce volume augmente avec la taille (diamètre ou circonférence, hauteur) de l'arbre :

la dispersion des valeurs de volume est plus forte pour les catégories de gros et très gros arbres. Ce phénomène, appelé hétéroscédasticité*, amène une difficulté statistique dans la construction de tarifs de cubage. Difficulté qui conduit généralement à utiliser pour cette construction des méthodes d'ajustement avec pondération des écarts, ou bien à recourir à des transformations de variables*.

La plupart des tarifs construits par le département Recherche de l'ONF, ainsi que par d'autres organismes forestiers (Afoce, INRA, Cemagref...) ont utilisé des pondérations du type $1/D^3$, $1/D^4$ ou $1/D^5$; nous n'y reviendrons pas ici (voir par exemple les n° 7 et 11 du Bulletin technique ONF, en 1975 et 1980). Plus récemment Tran-ha et al. (2007 et 2011) et Vallet et al. (2006) ont construit des tarifs par transformation de variable*. Le principe consiste à ne pas ajuster directement un modèle de volume, mais celui d'une autre variable, fonction du volume, qui n'est pas sujette à l'hétéroscédasticité et permet donc d'utiliser les méthodes statistiques classiques; le calcul du volume n'intervient qu'en fin de parcours, par la transformation inverse du modèle, moyennant les vérifications d'usage sur un échantillon de validation.

Pallier la difficulté par une étape de « transformation » du volume

La transformation proposée par Tran-Ha et al. (2007 et 2011) consiste à modéliser un rapport volume sur surface terrière, ayant la dimension d'une hauteur et appelé « hauteur cylindrique ». Cette hauteur cylindrique est assez bien reliée linéairement à la hauteur individuelle de l'arbre pour une essence donnée mais, si elle réduit bien l'hétéroscédasticité, elle ne l'élimine pas totalement.

Vallet et al. (2006) ont choisi une transformation faisant le rapport de deux volumes : le volume de l'arbre (qui nous intéresse) rapporté à celui d'un cylindre qui aurait la même

hauteur et dont la section serait la surface terrière de l'arbre. Cette nouvelle variable a été appelée « coefficient de forme » par analogie avec l'application traditionnelle de ce même rapport à la tige seule (Pardé et Bouchon, 1988). Pour la tige, ce coefficient donne effectivement une indication de forme, par référence à des types simples : la part d'espace occupé dans le cylindre circonscrit est de $1/3$ pour le cône, $1/4$ pour un néloïde et $1/2$ pour un paraboloïde. Pour l'arbre entier, il est plus difficile à visualiser : il correspond à l'espace occupé par le volume de l'arbre, tige et branches, comme s'il était possible de rabattre ces branches le long du tronc. Cette transformation élimine la forte dispersion des valeurs en fonction de la taille de l'arbre et a été utilisée pour le travail que nous présentons ici pour le volume total (et dans un article distinct pour le volume de tige).

Les variables explicatives du volume : avant tout l'effet taille...

Dans la plupart des tarifs de cubage classiques, la variable explicative* utilisée est D^2H , assez proche du volume du cylindre (Pardé et Bouchon 1988). De même, Tran-Ha et al. (2007) utilisent, comme variable explicative de la hauteur cylindrique, la hauteur de l'arbre (ce qui revient au final à exprimer le volume en fonction de D^2H). Dans ces approches, il n'y a pas souvent d'autres variables explicatives du volume : le facteur « taille » explique à lui seul l'essentiel des différences de volumes.

... mais quelles variables pour traduire un effet « forme de l'arbre » ?

Le passage au coefficient de forme, défini précédemment, permet d'étudier les volumes hors facteur « taille », et donc de rechercher des facteurs de variation plus subtils correspondant véritablement à un effet « forme de l'arbre ». Vallet et al. (2006) trouvent quelques variables explicatives : encore un léger effet

de la taille (circonférence à 1,30 m) et une nouvelle variable, particulièrement intéressante, baptisée « robustesse » de l'arbre. La robustesse est le rapport entre la racine de la circonférence et la hauteur; elle rend compte de la forme plus ou moins trapue de l'arbre (et elle est assez proche du facteur hauteur/diamètre qui à l'inverse indique l'élancement).

La démarche du projet EMERGE pour le tarif de volume total

Pour le volume total, l'objectif du projet était :

- de construire un tarif (modèle) générique, pour toutes les essences pour lesquelles nous disposons de données, et avec des paramètres approchés pour les autres essences;
- que ce tarif puisse être utilisé quels que soient le peuplement, le stade de développement, la région.

Il s'agissait de reprendre les tarifs de volume total établis par Vallet et al. (2006) pour 7 essences (chêne sessile, hêtre, sapin, épicéa, pins sylvestre et maritime, douglas) et d'étendre ce travail aux essences pour lesquelles des données ont été acquises pendant le projet.

Des données de volume total pour 28 essences

Les données que nous avons utilisées pour calibrer le modèle viennent des anciennes fiches de cubage INRA numérisées pendant le projet (environ 50 000 sur les 80 000 fiches papier) et versées dans la base de données EMERGE (voir RDVT n° 39-40, pp. 37-47). Pour le volume total des arbres jusqu'au fin bout des branches, on dispose ainsi de 12 216 arbres répartis en 28 essences :

- 10 feuillus : *Acer campestre*, *Acer pseudoplatanus*, *Betula pendula*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Prunus avium*, *Quercus robur* & *petraea* (non distingués dans les données anciennes), *Q. rubra* et *Q. palustris*
- et 18 résineux : *Abies alba*, *Abies nordmanniana*, *Cedrus atlantica* &

libani, *Larix decidua*, *Picea abies*, *Picea sitchensis*, *Pseudotsuga menziesii* et 10 pins).

Les effectifs sont plutôt bien répartis entre les différents résineux; par contre, les chênes (sessile et pédonculé uniquement) et le hêtre représentent plus de 90 % de l'ensemble des feuillus. C'est la plus grosse base de données de volumes totaux en France et certainement en Europe. Elle couvre une large gamme d'essences mais aussi de tailles : les hauteurs vont de 2 à plus de 42 m; les grosseurs vont des très faibles circonférences (6-7 cm) jusqu'à des arbres de presque 3 m de circonférence en résineux (sapin) voire plus de 3 m en feuillus (chênes), pour un volume total respectivement de plus de 12 m³ et plus de 18 m³.

Vallet et al. (2006) avaient déjà utilisé quelque 4 000 fiches anciennes de l'INRA, dont 2 215 ont échappé ensuite à l'effort de numérisation et ne figurent pas dans la base EMERGE; les arbres correspondants constituent donc un échantillon indépendant que nous avons réservé pour l'utiliser en validation.

Enfin il y a les mesures complètes réalisées lors des deux campagnes de terrain EMERGE sur 226 arbres : au-delà d'une simple validation, ces données permettent de tester le modèle en extrapolation, avec des essences et des conditions de croissance non représentées dans l'échantillon de calibration.

Transformation par un « coefficient de forme » rénové

Reprenant les travaux de Vallet et al. (2006), nous avons d'abord utilisé leur coefficient de forme (*formTot*, figure a de l'encadré) pour le volume total. Sur notre très large jeu de données, avec notamment une gamme de taille très étendue, on constate que la valeur du coefficient de forme, exprimée en fonction de la circonférence à 1,30 m, remonte pour les plus petits arbres (figure b de

l'encadré). C'est d'ailleurs ce qui avait conduit Vallet et al. (2006) à rajouter un terme correctif en $1/c_{130}$ dans leur modèle pour certaines essences. Or cette remontée du coefficient (0,8 pour les petits arbres au lieu de 0,5 pour les autres) ne correspond pas à un phénomène biologique particulier; ce n'est qu'un artefact dû au fait que le diamètre est mesuré à 1,30 m et non à la base de l'arbre, décalage important en hauteur relative pour des petits arbres. Le calcul avec la mesure à 1,30 m sous-estime le volume du cylindre qui entoure l'arbre (cylindre « circonscrit ») : l'effet n'est pas négligeable pour des petits arbres et conduit à surestimer leur coefficient de forme.

Nous avons donc proposé une correction géométrique (figure c de l'encadré) qui s'avère une innovation déterminante pour l'estimation correcte des volumes; nous y reviendrons. Le coefficient de forme ainsi redéfini, noté *formTotNew*, est celui qui a été modélisé. Il combine trois avantages :

- il a un sens géométrique (voir figure c de l'encadré);
- il corrige l'effet taille (hétéroscédasticité mentionnée plus haut) facilitant l'ajustement statistique du tarif;
- il corrige le coefficient de forme de Vallet (*formTot*) de l'artefact lié à la mesure de grosseur à 1,30 m.

Une équation générique pour ce nouveau coefficient de forme

Le premier résultat de ce travail a été de montrer que notre correction du coefficient de forme supprime bien l'artefact constaté auparavant sur les petits arbres.

Nous avons ensuite testé diverses variables explicatives possibles de ce nouveau coefficient de forme *formTotNew*. Grâce à la suppression de l'artefact, la variable de « robustesse » de l'arbre, introduite par Vallet et al. (2006) s'est révélée encore plus explicative pour décrire les variations de forme. Nous avons

Un nouveau coefficient de forme

Le coefficient de forme de Vallet *et al.* (2006), noté *formTot*, correspond au rapport entre le volume total de l'arbre jusqu'au fin bout des branches (*VolTot*) et le volume d'un cylindre de même hauteur et dont la section est la surface terrière de l'arbre (figure a). Cette définition induit un artéfact dû à la convention consistant à mesurer la grosseur d'un arbre à 1,30 m. Pour les plus petits arbres, la surface terrière devient très petite même si le volume total n'est pas négligeable ; à l'extrême, pour les arbres de 1,30 m, la surface terrière est nulle pour un volume total non nul. La correction proposée consiste à prendre comme section du cylindre la surface extrapolée jusqu'au niveau du sol, d'un arbre supposé conique (figure c, tracé rouge).

Pour les plus petits arbres, cette forme conique supposée est assez réaliste (aux formes éventuellement plus accentuées de l'empatement près, que l'on négligera ici). Pour les plus gros et, surtout, grands arbres, cette correction devient négligeable. Le nouveau coefficient de forme ainsi défini est noté *formTotNew*.

L'effet de cette transformation est illustré ci-dessous sur l'exemple des pins d'après les données anciennes de cubage de l'INRA réunies dans la base de données EMERGE (voir RDVT n° 39-40 pp. 37-47 et 51). L'échantillon des pins (4514 arbres) comporte suffisamment de petits arbres pour que l'artéfact lié à la définition de *formTot* soit « visible » ; mais cet artéfact a pu passer inaperçu pour d'autres essences, même très étudiées, car les mesures de petits arbres sont assez rares.

$$formTot = VolTot \frac{4 \cdot \pi}{h_{tot} \cdot c_{130}^2}$$

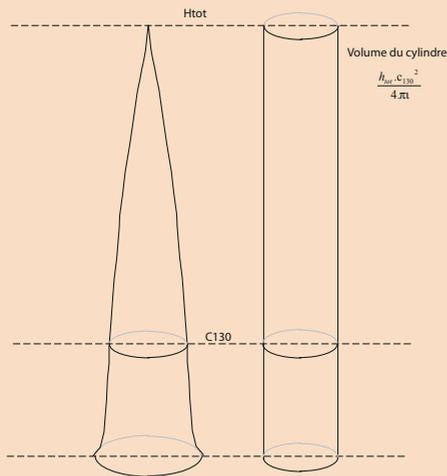


Fig. a : illustration schématique du coefficient de forme, rapport du volume total au volume d'un cylindre de même hauteur que l'arbre et dont la section est la surface terrière (soit par définition la section du tronc mesurée à 1,30 m).

$$formTotNew = \frac{4 \cdot \pi \cdot VolTot}{h_{tot} \cdot c_{130}^2} \cdot \left(1 - \frac{1.3}{h_{tot}}\right)^2$$

$$formTotNew = formTot \times correction$$

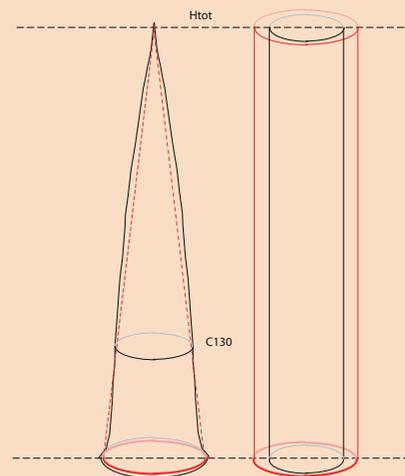


Fig. c : illustration schématique de la correction du coefficient de forme, en prenant comme référence un cylindre (en rouge) de même hauteur que l'arbre et ayant pour base la surface au sol extrapolée par un cône passant par la circonférence à 1,30 m.

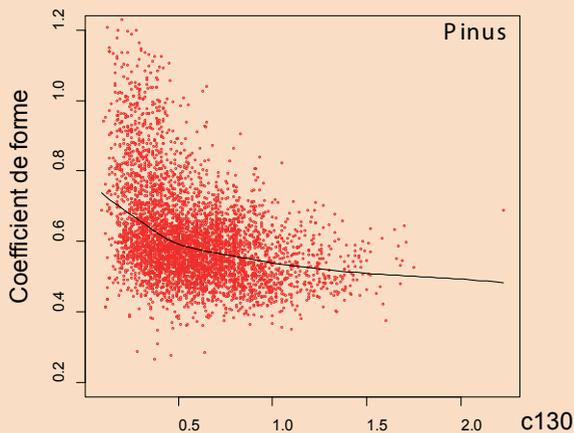


Fig. b : représentation du coefficient de forme *formTot* (tige et branches), calculé pour les pins, en fonction de la taille des arbres (circonférence à 1,30 m)

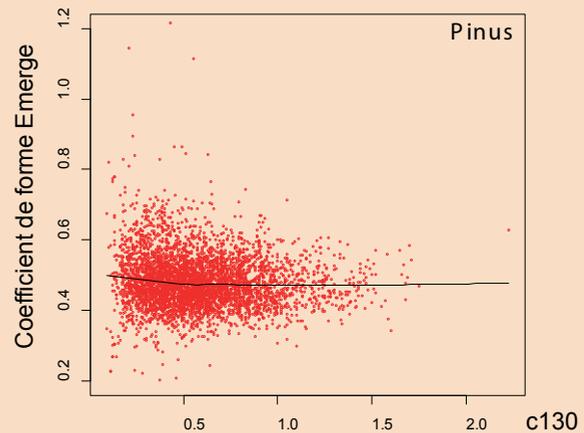


Fig. d : représentation du coefficient corrigé *formTotNew*, calculé pour les pins, en fonction de la taille des arbres (circonférence à 1,30 m).

également retenu une seconde variable : le défilement (rapport d'élanancement hauteur/circonférence). Les autres variables testées, par essence quand nous disposons d'assez de données ou à défaut pour toutes les essences, n'ont pas eu d'apport explicatif supplémentaire.

Le modèle expliquant – statistiquement – le coefficient de forme (par construction sans unité) s'écrit finalement ainsi, les circonférence et hauteur étant exprimées en mètres :

$$formTotNew = a + b \cdot \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}} + c \cdot \frac{h_{tot}}{c_{130}}$$

robustesse défilement

L'ajustement est fait globalement sur l'ensemble des 28 essences (tableau 1). Les paramètres a , b et c ont donc une valeur spécifique pour chacune de ces 28 essences (valeur b commune pour tous les résineux ou tous les feuillus, valeurs a et c par essence). Mais l'ajustement a aussi permis d'établir un modèle gris « feuillus » et un modèle gris « résineux ».

Retour au modèle de volume total et test sur des données indépendantes

Le coefficient de forme corrigé ayant été défini – géométriquement – comme suit :

$$formTotNew = \frac{4\pi \cdot VolTot}{h_{tot} \cdot c_{130}^2} \cdot \left(1 - \frac{1.3}{h_{tot}}\right)^2$$

... on en déduit le tarif de cubage, pour le volume total :

$$VolTot = \frac{h_{tot} \cdot c_{130}^2}{4\pi \left(1 - \frac{1.3}{h_{tot}}\right)^2} \left(a + b \cdot \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}} + c \cdot \frac{h_{tot}}{c_{130}} \right)$$

La figure 1 présente le résultat de l'ajustement en repassant au volume total. La transformation en coefficient de forme permet de s'affranchir de

l'effet taille, en particulier pour un bon ajustement statistique, mais il faut vérifier ensuite qu'il n'apparaît pas de biais d'estimation en revenant aux volumes, en particulier sur les plus gros arbres, pour lesquels des biais sur la forme auraient plus d'impact. Le modèle a été testé sur les 2 215 arbres des fiches anciennes réservées à cet effet, et sur les 226 arbres supplémentaires EMERGE (figure 2). La variabilité résiduelle autour du modèle reste forte, plus que pour les tarifs habituels sur des volumes de tige (rien d'étonnant : la variabilité de la branchaison est considérable), mais du même ordre que pour d'autres modèles de volume total.

La limite initiale de ce travail est qu'il repose principalement sur les données anciennes de l'INRA, qui représentent plutôt des arbres de futaies régulières

assez pures et qui concernent peu d'essences feuillues en dehors des chênes et du hêtre. Le test du modèle sur les 2 215 fiches restées à part valide le modèle (écart maximum de 2 % sur les volumes par groupes d'essences), pour des données certes indépendantes, mais de même origine, avec les mêmes travers.

Par contre, l'échantillon des campagnes de terrain EMERGE visait à l'inverse des arbres extrêmes, des essences qui n'étaient pas dans les fiches INRA (aulne, bouleau, tremble, chênes pubescent et vert, robinier, tilleul et eucalyptus) ou des structures non représentées (en particulier taillis-sous-futaie de chêne sessile et de hêtre, et taillis à courte rotation d'eucalyptus). Sur ces données le modèle est donc en extrapolation, avec des écarts aux données réelles de 12 à 13 % plus conformes à ce

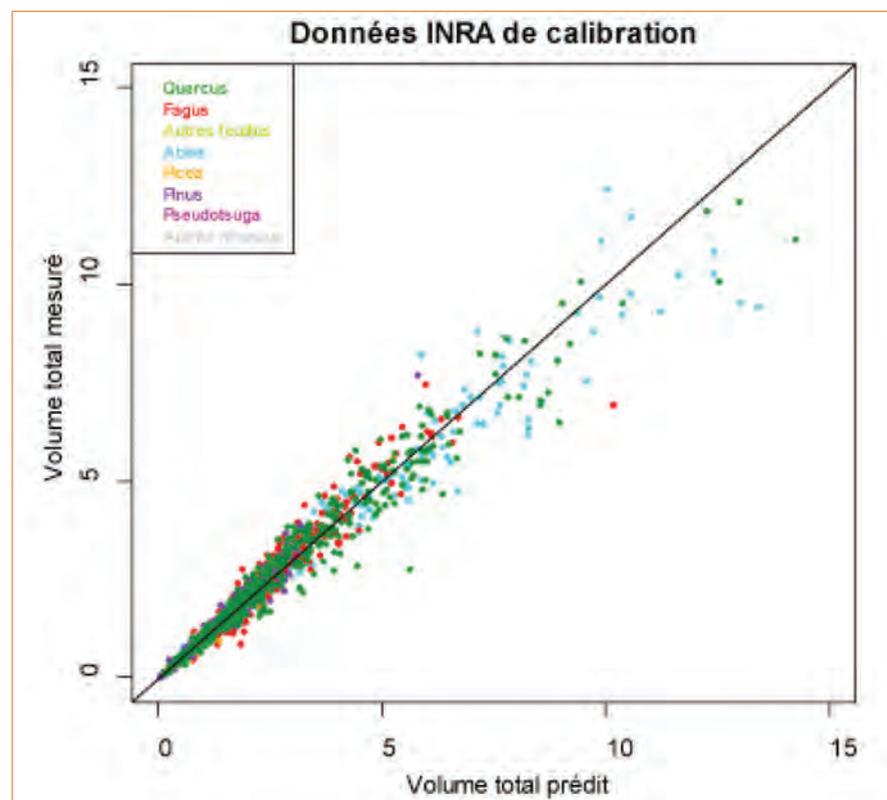


Fig. 1 : résultats de l'ajustement du modèle de volume total sur les données INRA pour 28 essences

Les volumes mesurés en ordonnées, sont comparés aux valeurs prédites, en abscisses. La droite correspond à l'égalité entre valeur prédite et valeur mesurée. Les tests sont faits sur les volumes pour vérifier qu'il n'y a pas de biais pour les gros volumes ; en particulier, la transformation nécessaire pour la modélisation rend bien compte de la plus forte variabilité pour les plus gros arbres.

qu'on sait par expérience de la variabilité des volumes. Noter aussi qu'on n'observe pas de biais sur le chêne sessile avec le modèle indistinct sessile-pédonculé.

Nous recherchons actuellement d'autres données en vue de tester plus avant ce modèle, mais les mesures exhaustives de volumes restent extrêmement rares. Dans leur ensemble, les données françaises ont déjà été récupérées au cours du projet; il reste cependant des pistes complémentaires et des contacts à l'étranger.

Simplification pour une estimation approchée du volume total

Le modèle qui vient d'être présenté permet de tenir compte des variations de la forme des arbres, en particulier à travers la robustesse et le défilement. Cependant il est utile, en forêt, d'avoir une formule plus simple pour pouvoir estimer rapidement le volume total d'un arbre.

Formules approchées actuelles : formules d'Algan ou de Bouvard

Pour cette estimation rapide, deux formules approchées étaient utilisées jusqu'à présent :

- pour les feuillus, la formule de Bouvard : le volume total du feuillu est supposé être la moitié (coefficient 0,5) du volume du cylindre de même hauteur et ayant comme base, la section de l'arbre à 1,30 m ;
 - pour les résineux, la formule d'Algan qui a la même forme mais avec un coefficient de 0,4 au lieu de 0,5.
- Nous avons cherché à simplifier notre tarif générique, sachant que le travail réalisé jusque là montre deux choses :
- il est important de tenir compte de notre correction de forme, sous peine de sous-estimer fortement le volume pour les petits arbres ;
 - la valeur moyenne du coefficient de forme (corrigé) est toujours proche de 0,5, et n'est pas vraiment différente pour feuillus ou résineux.

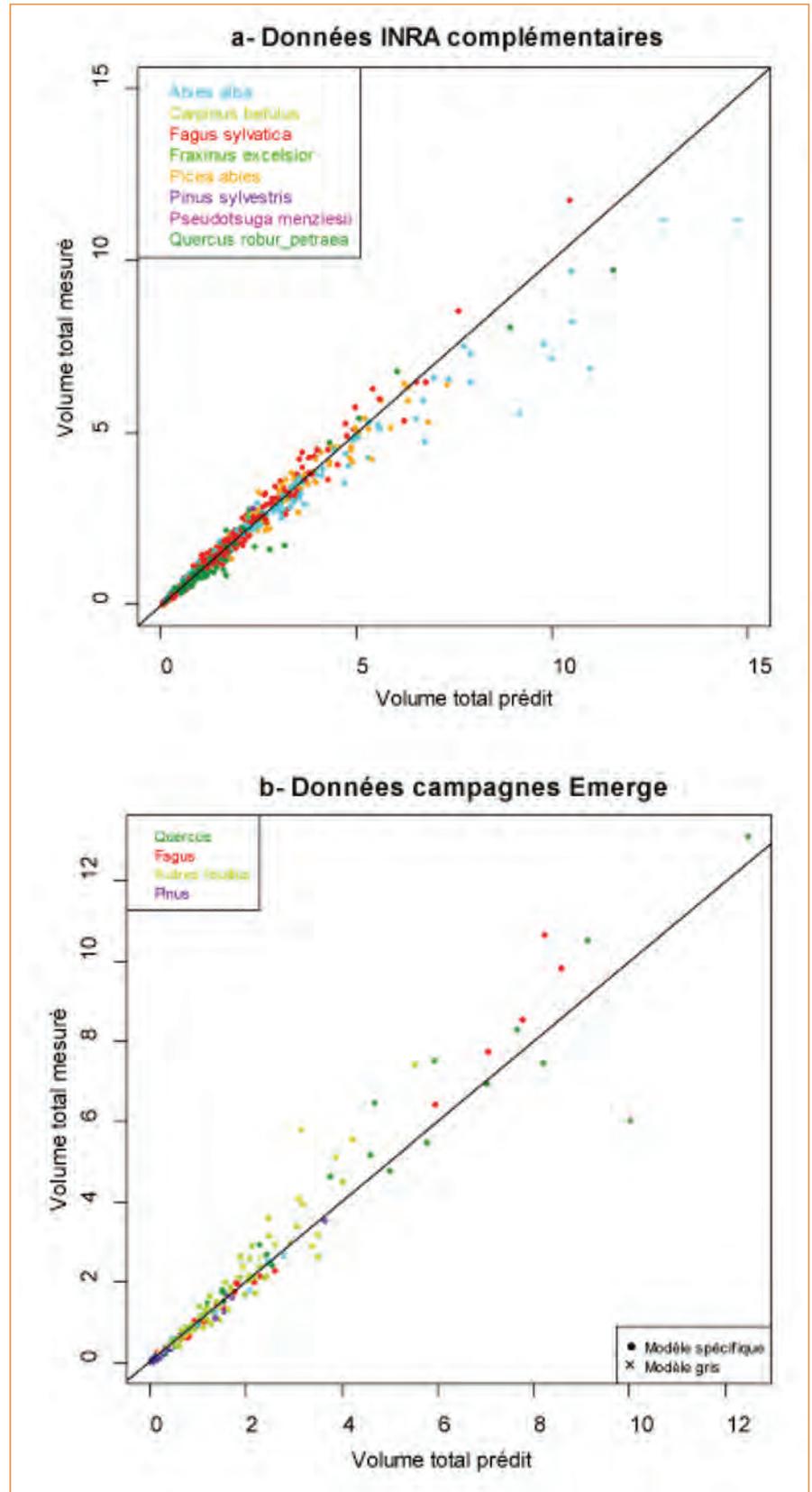


Fig. 2 : tests du modèle de volume total sur deux jeux de données indépendantes : en haut, des données INRA n'ayant pas servi à la phase de calibration; en bas, celles des 226 arbres mesurés pendant le projet. Les prédictions, en abscisses, sont comparées aux volumes mesurés, en ordonnées. La droite correspond à l'égalité entre valeur prédite et valeur mesurée.

Formule approchée EMERGE par essence

Nous avons ainsi ajusté un modèle simplifié à l'extrême : un coefficient de forme constant par essence (voir tableau 1, colonne « Constante »), obtenu là encore par l'ajustement d'une forme globale (constante) pour chacune des 28 essences disponibles. Comme il n'apparaît pas de différence significative entre le groupe des feuillus et celui des résineux, la valeur unique de cette constante à retenir pour toutes les autres espèces (ou même quelle que soit l'espèce) est de 0,496. On peut donc calculer rapidement un volume total par la formule du volume d'un cylindre (et moyennant établissement préalable d'un abaque de correction en fonction de la hauteur), comme suit :

$$VolTot \approx 0.496 \frac{\text{Vol. cylindre}}{\text{Correction artefact}}$$

$$VolTot \approx 0.496 \frac{h_{tot} \cdot c_{130}^2}{4\pi \left(1 - \frac{1.3}{h_{tot}}\right)^2}$$

formTotNew (constant)

Les résultats de validation ne montrent pas de forte perte de précision, ni de biais nettement accentué en simplifiant ainsi, même en ramenant le coefficient constant à 0,5, comme dans la formule de Bouvard, à la correction du coefficient de forme près !

Contrairement à ce que postule la formule d'Algan, rien ne justifie d'utiliser un coefficient différent pour résineux. Le tableau 1 montre d'ailleurs pour les sapins (et d'autres résineux) une valeur de la constante plus forte que pour tous les feuillus.

Insistons à nouveau sur la correction du coefficient de forme pour tenir compte de la mesure de la circonférence à 1,30 m de l'arbre. Sans cette correction, le coefficient serait bien trop variable pour être approché par une constante. Très conséquente pour les plus petits arbres (plus de

	Nb d'arbres	Modèle complet Emerge			Constante
		a [sans unité]	b (robustesse) [en m ^{0.5}]	c (défilement) [sans unité]	
Feuillus	4783	0,522	0,661	-0,002	0,496
<i>Acer campestre</i>	2	0,534	0,661	-0,002	0,509
<i>Acer pseudoplatanus</i>	5	0,502	0,661	-0,002	0,486
<i>Betula pendula</i>	16	0,493	0,661	-0,002	0,472
<i>Carpinus betulus</i>	79	0,533	0,661	-0,001	0,503
<i>Fagus sylvatica</i>	2302	0,542	0,661	-0,002	0,515
<i>Fraxinus excelsior</i>	161	0,509	0,661	-0,001	0,497
<i>Prunus avium</i>	1	0,521	0,661	-0,002	0,497
<i>Quercus palustris</i>	27	0,513	0,661	-0,002	0,479
<i>Quercus robur_petraea</i>	2079	0,561	0,661	-0,002	0,512
<i>Quercus rubra</i>	111	0,511	0,661	-0,002	0,477
Résineux	7433	0,356	1,756	0,002	0,496
<i>Abies alba</i>	1688	0,398	1,756	0,002	0,520
<i>Abies nordmanniana</i>	47	0,375	1,756	0,002	0,533
<i>Abies sp.</i>	35	0,360	1,756	0,003	0,529
<i>Cedrus atlantica ou libani</i>	142	0,340	1,756	0,002	0,483
<i>Larix decidua</i>	163	0,377	1,756	0,001	0,488
<i>Picea abies</i>	404	0,303	1,756	0,004	0,486
<i>Picea sitchensis</i>	12	0,351	1,756	0,002	0,494
<i>Pinus halepensis</i>	134	0,403	1,756	0,001	0,522
<i>Pinus laricio</i>	338	0,306	1,756	0,003	0,455
<i>Pinus mugo</i>	3	0,432	1,756	0,001	0,550
<i>Pinus nigra</i>	240	0,305	1,756	0,003	0,498
<i>Pinus nigra ssp pallasiana</i>	7	0,332	1,756	0,002	0,468
<i>Pinus pinaster</i>	1533	0,396	1,756	-0,002	0,489
<i>Pinus sp.</i>	2	0,332	1,756	0,002	0,484
<i>Pinus strobus</i>	42	0,356	1,756	0,001	0,485
<i>Pinus sylvestris</i>	1958	0,372	1,756	0,001	0,473
<i>Pinus uncinata</i>	257	0,443	1,756	-0,001	0,541
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	428	0,235	1,756	0,004	0,447

Tab. 1 : paramètres (a, b et c) du modèle de volume total pour 28 essences ou pour feuillus ou résineux; pour b, il n'est statistiquement pas justifié d'avoir des valeurs distinctes par essence

En caractères italiques les essences pour lesquelles les effectifs ne sont pas suffisants et il vaut mieux utiliser le modèle « gris » résineux ou feuillus.

Une version simplifiée (la constante) permet de donner un ordre de grandeur du coefficient de forme par essence.

20 % en deçà de 12 mètres de haut), la correction est encore de l'ordre de 10 % pour des arbres de 20 m de haut : ne pas en tenir compte revient à sous-estimer le volume total. Cette erreur est bien au-delà de l'erreur commise à prendre un coefficient fixe à 0,5 sur notre modèle.

Une application à des données en gestion

En 2012, dans le cadre d'un stage visant à une première utilisation des tarifs EMERGE en contexte proche de la gestion, des données d'inventaires ont été relevées dans trois chênaies du bassin ligérien : Bercé, Orléans et Tronçais. Il s'agissait en particulier de tester, lors d'opérations d'inventaire, le recueil d'informations complémentaires nécessaires à la mesure des volumes avec nos tarifs (différentes hauteurs notamment).

Un échantillonnage basé sur les peuplements martelés à différents stades

Dans ces forêts, des unités de gestion (UG) ayant fait l'objet d'un martelage récent ont été échantillonnées afin, notamment, d'estimer le volume des arbres à abattre et de comparer aux tarifs utilisés par les gestionnaires. Les parcelles choisies étaient situées dans les stations les plus communes du bassin ligérien.

Afin de disposer d'une gamme de grosseur étendue, dans chaque forêt, une unité de gestion a été échantillonnée par stade : amélioration petits bois (APB), amélioration bois moyens (ABM), amélioration gros bois (AGB) et régénération (R). Pour illustrer l'utilisation de ces tarifs dans des contextes variés, des peuplements de type taillis-sous-futaie (TDF) ont été recherchés, en complément des peuplements de futaie régulière plus courants dans ces forêts : ce sont les UG des stades ABM, AGB et R choisies à Orléans. Avec une UG échantillonnée par stade et par forêt, et ce choix de TSF à Orléans, il ne s'agit évidemment

pas de représenter fidèlement les gammes de volumes de ces forêts mais juste d'illustrer l'utilisation des tarifs EMERGE dans des conditions contrastées.

Pour chaque UG des placettes d'inventaires ont été installées avec le protocole de diagnostic sylvicole (*Sylvie*), à raison d'environ une placette par hectare. La taille des placettes a été ajustée pour s'adapter à la densité des peuplements. Sur ces placettes, ont été notées : l'essence, la circonférence à 1,30 m (au ruban), la hauteur totale des plus gros (au Vertex). Ainsi, 1059 arbres ont été inventoriés dont 310 martelés sur 12 UG.

Des volumes totaux très variables selon les contextes

On constate tout d'abord des différences de forme des arbres entre forêts pour les parcelles inventoriées (figure 3). Les arbres de Bercé sont globalement plus élancés (plus hauts à circonférence égale) que ceux de Tronçais et d'Orléans. Les trois parcelles d'Orléans choisies intentionnellement en TSF (ABM, AGB et R) ont évidemment les arbres les moins hauts, mais non représentatifs de toute la forêt. Les arbres des parcelles en régénération (R) de Bercé et de Tronçais ont des dimensions équivalentes mais avec des âges plus avancés à Tronçais.

Le tarif de volume total dépendant de ces deux grandeurs, hauteur et diamètre, le calcul des volumes totaux illustre bien la variabilité observée des tailles (figure 4). En particulier le tarif rend compte de la forte variabilité des arbres de TSF à Orléans, tandis qu'à taille équivalente, les volumes de Bercé et Tronçais sont assez proches en niveau et en variabilité.

Calcul d'autres références utiles en gestion : le rapport V/G

En dernière illustration, nous nous sommes intéressés aux valeurs du rapport V/G obtenues au niveau

lot d'arbres (population des arbres martelés). Ce rapport est très utile pour évaluer rapidement un volume à partir d'un niveau de capital ou de récolte en surface terrière. Le guide ONF des sylvicultures de Chênaie atlantique (Jarret 2004, annexe 8, p. 269) indique pour le volume total un rapport constant, de l'ordre de 15, que ce soit en futaie dense, claire ou en TSF ; cette valeur est basée sur l'expérience et sur l'examen des fiches de cubage à l'ONF (qui ne donnent en principe qu'une estimation du volume bois-fort total, sans les menus bois). Plus tard, en 2011, Tran-Ha et al. ont montré que ce rapport évolue en fait avec la hauteur des arbres.

La figure 5 illustre effectivement cette évolution, ici avec le stade de développement ; la valeur 15 correspond au stade amélioration bois moyens. Il est donc possible de moduler cette référence, avec ou sans les menus bois, en appliquant le tarif EMERGE à des échantillons d'arbres pour affiner les estimations aux différents stades et notamment dans le cas des jeunes peuplements, mal cerné par les outils de cubage classiques.

Discussion, conclusion

Le volume total d'un arbre est une grandeur relativement difficile à appréhender pour le forestier. Cependant, elle est de plus en plus nécessaire, notamment pour des estimations de carbone stocké ou comme volume global de référence à distribuer en compartiments ou produits différents. Notre parti pris, dans le projet EMERGE, était alors de commencer par développer des outils efficaces d'estimation de ce volume total pour construire ensuite des estimations cohérentes des autres volumes (tige notamment), par compartiment ou par découpe. Nos résultats sur le volume total reprennent en grande partie les travaux de Vallet et al. (2006) qui faisaient jusque-là référence ; ils les confirment et les précisent.

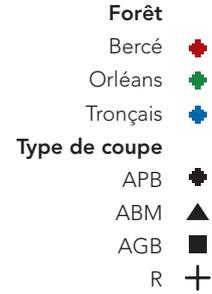
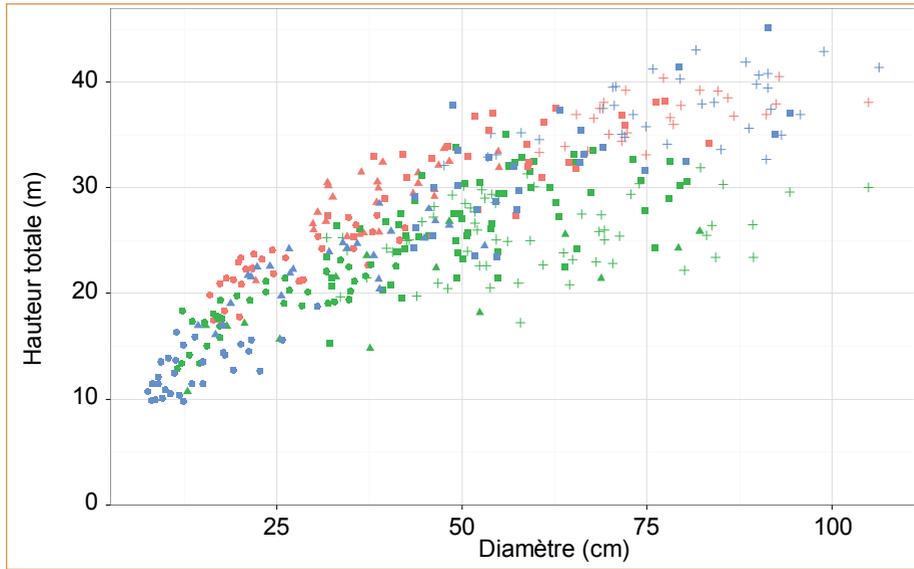


Fig. 3 : répartition, selon le diamètre et la hauteur totale, des arbres mesurés dans les trois forêts de Bercé, Orléans et Tronçais
 Les symboles distinguent les différents stades : amélioration petits bois (APB), bois moyens (ABM) ou gros bois (AGB), et régénération (R).

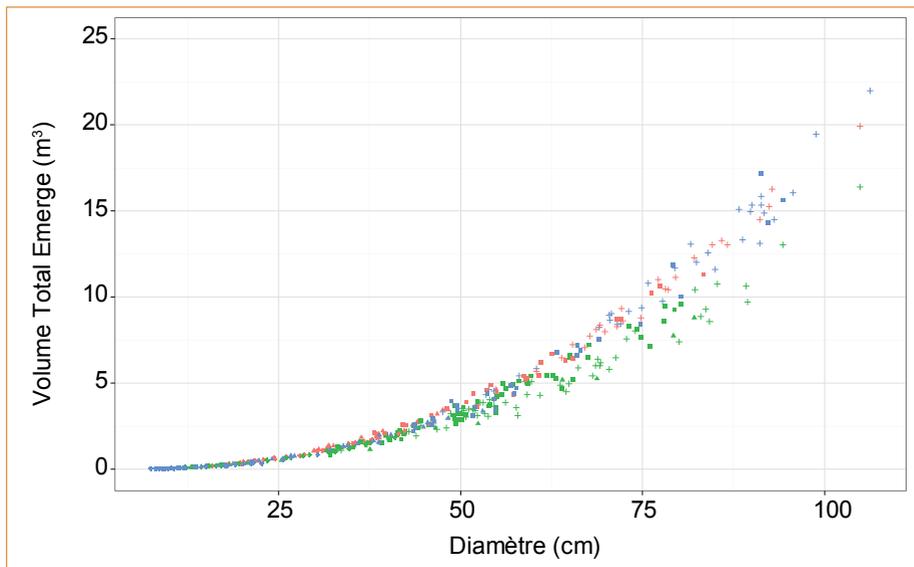


Fig. 4 : illustration de l'application du tarif EMERGE de volume total sur les parcelles de chêne inventoriées à Bercé, Orléans et Tronçais par type de coupe

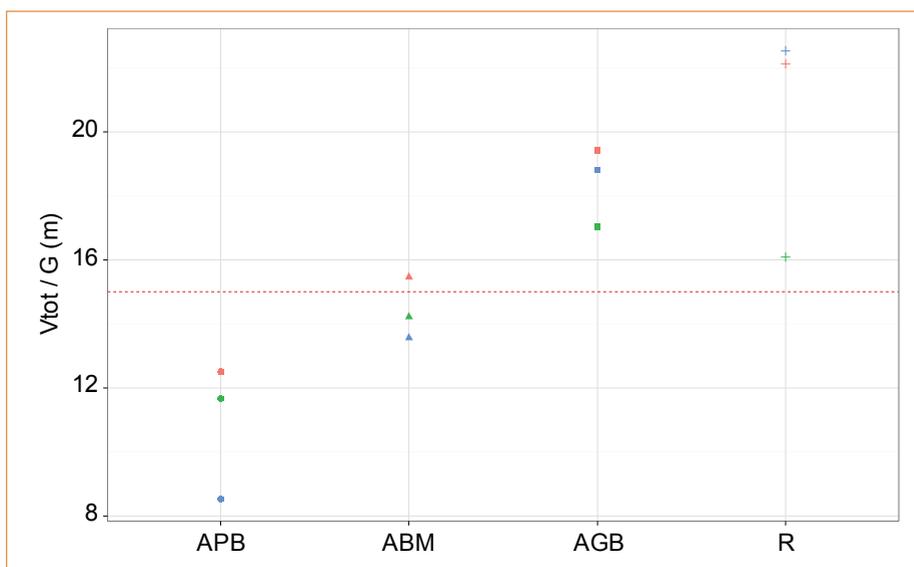


Fig. 5 : évolution du rapport V/G calculé avec le tarif de volume total EMERGE, pour nos échantillons d'arbres martelés dans les 3 forêts de Bercé, Orléans et Tronçais
 La ligne rouge à 15 identifie la référence fournie par le Guide des sylvicultures de la chênaie atlantique (Jarret 2004), avec une définition un peu différente du volume total, puisque l'ONF estime en principe un volume bois-fort total, n'incluant pas les menus bois (qui représentent 3 à 10 % du volume total selon le stade : 10 % en APB et aux alentours de 5 % au-delà)

g l o s s a i r e

L'intérêt premier de cet approfondissement est d'avoir élargi la base de données et, en conséquence, les essences prises en compte, si bien que le modèle obtenu peut être décliné pour 28 essences ou, pour les essences dites orphelines, utilisé sous forme de « modèle gris » feuillu ou résineux.

Le second apport majeur est la redéfinition du coefficient de forme que Vallet avait introduit pour le volume total. La correction géométrique apportée supprime l'artéfact lié à la mesure de circonférence à 1,30 m (et non à la base du volume à estimer). Mais l'impact de cette correction s'est révélé beaucoup plus important qu'attendu : ce nouveau coefficient de forme devient beaucoup plus stable, quelles que soient la taille de l'arbre ou l'essence.

Cette stabilité permet en particulier de proposer une formule de volume total simplifiée (avec un coefficient de forme constant), voire approchée (constante arrondie à 0,5) qui donne rapidement des ordres de grandeur de volume total. Cela peut faire penser à la formule approchée de Bouvard pour les feuillus mais notre constante est de nature différente car elle concerne le coefficient de forme tel que nous l'avons redéfini dans le cadre du projet EMERGE, qui évite de sous-estimer fortement le volume, surtout pour les petits arbres.

Quant au modèle complet, il a l'avantage important de tenir compte des modifications de forme des arbres, avec leur « robustesse », telle que définie par Vallet *et al.* (2006), et leur défilement : pour comparer des volumes à différents stades de croissance, par exemple, il faudra utiliser la formule complète du fait des évolutions de forme.

L'application à un cas concret sur le chêne illustre la capacité d'un tarif unique, construit sur une base de données très large, à estimer une grandeur de manière cohérente dans

Barème de cubage

Contrairement à un tarif de cubage un barème ne s'appuie pas sur des mesures réelles de volume d'arbres. Il est simplement la transcription d'une formule de cubage, correspondant à une forme géométrique simple, sous forme d'un tableau à une ou deux entrées (diamètre et hauteur). Le volume donné correspond à une formule ayant en paramètre un indicateur géométrique simple (comme une décroissance métrique pour les barèmes dits « de l'administration ») ou calé sur le cubage d'une tige théorique moyenne (Algan et Schaeffer) ; le choix du barème le mieux adapté à un peuplement ou une forêt peut s'appuyer sur une comparaison avec des volumes réels. Attention, certains barèmes sont parfois indûment appelés « tarifs » : « tarifs » Chaudé, par exemple.

Décroissance métrique

Exprime le nombre moyen de centimètres dont la circonférence (ou le diamètre) diminue par mètre de hauteur, depuis la hauteur d'homme jusqu'au milieu de la hauteur de l'arbre.

Hétéroscédasticité

C'est le fait que la variabilité d'observations ou de mesures – ici le volume – n'est pas la même quels que soient les sous-groupes observés. En biologie, ce phénomène apparaît souvent avec la taille des individus : la variabilité du volume des gros arbres (donnée par la variance) est plus forte que pour les petits arbres. Or les procédures classiques de régression supposent l'homogénéité des variances ; en cas d'hétéroscédasticité, il faut utiliser donc des méthodes d'ajustement adaptées (avec pondération des erreurs) ou recourir à une transformation de variable.

Tarif de cubage

Un tarif de cubage est une relation statistique (un modèle), établie sur un échantillon d'arbres, entre le volume mesuré et une ou deux variables facilement mesurables sur arbre debout. Il nécessite donc initialement de faire des mesures de cubage sur un échantillon d'arbres abattus.

Transformation de variable

Lorsque la variable à expliquer (Y) présente de l'hétéroscédasticité, une solution possible pour pouvoir utiliser les méthodes classiques de régression est de la transformer en une autre variable ($Y' = f(Y)$) dont la variance soit stable ; il suffit ensuite d'inverser la formule pour revenir au modèle souhaité. Il s'agit souvent de transformation logarithmique ($Y' = \log(Y)$), une formulation mathématique qui « écrase » la variabilité. Dans cet article, la transformation qui s'avère la plus pertinente consiste à faire le rapport entre notre variable à expliquer – le volume d'un arbre – et le volume d'un cylindre circonscrit à cet arbre.

Variable à expliquer, variable explicative

En modélisation, on cherche à prédire la valeur d'une grandeur difficile à mesurer, la variable à expliquer (ici le volume), à l'aide des mesures élémentaires accessibles (ici le diamètre à 1,30 m et la hauteur), ou d'indices particuliers calculés d'après ces mesures (ici la « robustesse » et le défilement) : ces mesures ou indices sont les variables explicatives.

Volume géométrique

Approche du volume réel considérant la tige et les branches comme un assemblage de tronçons coniques successifs.

Volume total

Volume aérien ligneux (tige et branches, sans les feuilles/aiguilles).

des situations contrastées : ici le volume total, dans trois forêts avec des conditions de croissance (stations, histoire sylvicole des peuplements) très différentes. Plus généralement, une telle application est possible quelles que soient l'essence, la région et la gamme de tailles.

Christine DELEUZE
François MORNEAU
Jean-Pierre RENAUD
Yannick VIVIEN
 ONF, département R&D

Michaël RIVOIRE
Philippe SANTENOISE
Fleur LONGUETAUD
Frédéric MOTHE
 INRA, UMR 1092-LERFoB¹
 54280 Champenoux

Jean-Christophe HERVÉ
 IGN – Nancy

Patrick VALLET
 Irstea, UR EFNO
 Nogent-sur-Vernisson

Bibliographie

Un article scientifique plus complet sera soumis à la revue *Annals of Forest Science*.

Jarret P., 2004. Guide des sylvicultures. Chênaies atlantiques, ONF, Lavoisier, 335 p.

Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. ENGREF, 328 p.

Rondeux J., 1975. Pour une définition du volume de bois d'œuvre de nos principales essences forestières feuillues. *Revue Forestière Française*, vol. XXVII, pp. 371-376

Tran-Ha M., Cordonnier T., Vallet P., Lombart T., 2011. Estimation du volume total aérien des peuplements forestiers à partir de la surface terrière et de la hauteur de Lorey. *Revue Forestière Française*, vol. LXIII n° 3, pp. 361-378

Tran-Ha M., Perrotte G., Cordonnier T., Duplat P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. *Revue forestière française*, vol. LIX n° 6, pp. 609-624

Vallance M., 1995. Construire son tarif de cubage ou adopter un tarif existant, comment faire le bon choix? *Bulletin technique ONF*, n° 30, pp.19-31

Vallet P., Dhôte J.F., Le Moguédec G., Ravart M., Pignard G., 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, vol. 229, n° 1-3, pp. 98-110



Aspects de la chênaie à Bercé (à gauche) et Tronçais (2 images de droite)

ONF

¹ Le LERFoB bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes

Le volume tige, on connaît... mais pour quelle découpe, quelle essence, quelle région voire forêt? Comment assurer des estimations cohérentes à large échelle? Comment anticiper l'évolution des usages, avec des spécifications (découpe...) de plus en plus variables? La solution : un modèle unique paramétré par essence (ou groupe d'essences), calé sur le volume total, valable partout et modulable selon la découpe. Vous en doutez? EMERGE l'a fait! En introduisant une nouvelle « entrée », la hauteur de décrochement. Attention : pour bien comprendre cet article il faut avoir lu le précédent.

 Pour le volume de tige comme pour le volume total de l'arbre, l'ambition du projet EMERGE était de construire un modèle de volume de tige générique et robuste, c'est-à-dire ayant une forme commune à l'ensemble des essences de la ressource forestière française (de métropole), quels que soient la région, les conditions de croissance (station, structure du peuplement), la sylviculture et le stade de développement. La première étape a consisté à répertorier les différentes grandeurs utilisées habituellement comme « entrées » pour décrire le volume de tige et à les rapprocher des données disponibles, surtout celles de l'Inventaire forestier national (mesures pour le cubage d'arbres debout dans toute la France et pour toutes les essences).

La deuxième étape a été de construire un modèle de volume de tige bois-fort sur écorce, référence de l'Inventaire familiale à la gestion, en s'appuyant comme dans le cas du volume total sur un coefficient de forme redéfini. Le travail d'ajustement montre bien (et les tests de validation confirment) la nécessité d'une troisième entrée par arbre, pour tenir compte des variations de forme de la tige entre différentes

régions, types de peuplements et conditions de croissance; la circonférence et la hauteur totale n'y suffisent pas. Cette troisième entrée est en l'occurrence une notion originale du protocole de cubage de l'Inventaire forestier national, et qui s'avère très riche d'information : la « hauteur de décrochement ». Restait enfin à coupler ce modèle à un modèle de profil de tiges, considéré en première approche comme une distribution conique, pour prédire des volumes à différentes découpes, au sens géométrique, avec une limite de découpe donnée par un diamètre extérieur.

L'article expose l'ensemble de cette démarche et de ses résultats, avant de les illustrer par une application pratique à des données de chênes et de conclure sur la discussion des perspectives ouvertes pour la gestion.

Les tarifs de cubage : 2 ou 3 entrées ?

Importance d'une mesure de hauteur pour les tarifs de cubage
Les limites des tarifs de cubage à une seule entrée (diamètre ou circonférence) ont été commentées à propos du volume total (article précédent) : ils sont parfois très utiles

mais le choix d'un tel tarif pour un peuplement est souvent hasardeux et source d'erreurs. L'introduction d'une seconde variable explicative du volume permet d'obtenir des tarifs valables pour de plus larges gammes de stades de développement, de régions, voire de structures de peuplement. C'est en général une hauteur : éventuellement la hauteur d'une découpe particulière quand il s'agit de volumes commerciaux, mais le plus souvent c'est la hauteur totale de l'arbre. Les tarifs de cubage (tige) à double entrée sont ainsi très répandus depuis plusieurs décennies. Par exemple, le tarif de Bouchon développé en 1982 pour le hêtre en futaie dans toute la France et qui fait encore référence, ou encore les tarifs de l'AFOCEL pour le douglas et l'épicéa, également valables sur toute la France (Guinaudeau et Duplat, 1994; De Champs, 1997).

Cependant Vallance (1995) compare des tarifs à deux entrées de plusieurs régions, qui montrent des divergences sur le chêne ou sur le pin sylvestre. En 2007, Tran-Ha a construit 6 tarifs (chêne, hêtre, douglas, épicéa, sapin et pin sylvestre) pour la France entière, et le test de ces modèles montre des décalages du modèle par forêt ou par structure, surtout

pour le chêne. Au niveau européen, une compilation des équations de volume (Zianis *et al.*, 2005) a montré que la plupart des tarifs disponibles en Europe sont à double entrée : circonférence à 1,30 m et hauteur, le plus souvent la hauteur totale de l'arbre. Mais ces auteurs notent qu'il existe aussi des tarifs avec d'autres variables, comme un indice de fertilité, un âge, une altitude. Il semble donc que, au moins pour certaines essences, une information supplémentaire soit nécessaire pour rendre compte des variations de forme des arbres entre régions et entre structures : la circonférence et la hauteur totale ne suffisent pas toujours à décrire les variabilités observées.

L'intérêt d'avoir une troisième entrée dans les tarifs

Dès 1940 le suédois Näslund (cité par Pardé et Bouchon, 1988) propose pour les essences scandinaves des équations de cubage à 3 entrées : diamètre, hauteur totale et hauteur de base de houppier vivant. Ces équations sont encore utilisées par les forestiers suédois. L'intérêt d'une troisième entrée pour décrire le volume d'une tige remonte même au 19^e siècle : le forestier allemand Pressler avait en effet remarqué que la hauteur pour laquelle le diamètre est la moitié de celui de la base de l'arbre, dite « hauteur de Pressler », permettait de calculer exactement le volume géométrique d'une tige supposée de forme simple (cône, parabolicoïde ou néloïde). Cette relation est notamment utilisée pour estimer le volume d'une tige avec un relascopie Bitterlich.

Les forestiers belges utilisent d'ailleurs le volume de la tige jusqu'à cette hauteur de Pressler, dit volume de Delevoy, comme un bon indicateur du volume de bois d'œuvre, surtout pour les feuillus (Rondeux, 1975). Une troisième entrée peut être donnée aussi par le diamètre à une hauteur fixée : les forestiers suisses utilisent par exemple la circonférence de l'arbre à 7 mètres de haut.

La hauteur de décrochement de l'IFN

En France, l'Inventaire forestier national a défini, pour son protocole de cubage, la notion de hauteur de décrochement (voir encadré).

Jusqu'en 2005, cette hauteur de décrochement n'était mesurée, avec l'ensemble des éléments du protocole de cubage, que sur un sous-échantillon des arbres inventoriés ; seules la circonférence et la hauteur totale étant mesurées sur tous les arbres. Lors de la mise au point de sa nouvelle méthode, l'Inventaire forestier national a détecté l'intérêt de cette variable supplémentaire pour décrire des variations de forme des arbres et, dès 2006, il a intégré la mesure de hauteur de décrochement aux inventaires systématiques, en plus de la circonférence à 1,30 m et de la hauteur totale.

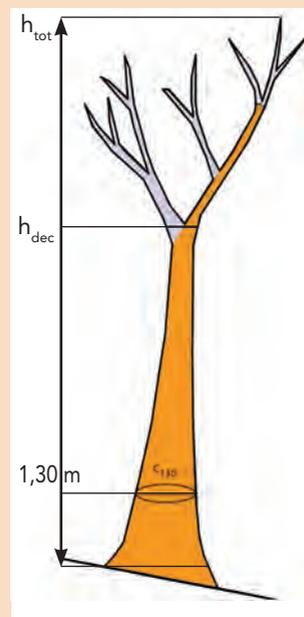
La hauteur de décrochement est en effet d'un grand intérêt parce qu'elle est à la fois :

- objective contrairement à la hauteur de « base de houppier » qui fait régulièrement débat (faute de définition consensuelle),
- plus précise qu'un diamètre pris en hauteur, ou une hauteur prise à un diamètre donné (difficile à caler précisément du fait de la faible précision de mesure de diamètre à plusieurs mètres de haut),
- et très informative de la zone de plus forte variation de la forme de l'arbre.

Sachant que cette variable est désormais disponible dans les inventaires nationaux et qu'elle est facilement accessible sur le terrain, en même temps que la mesure de hauteur totale, nous avons résolu de l'utiliser comme troisième entrée du tarif générique à construire.

La hauteur de décrochement du protocole de l'Inventaire forestier national

La hauteur de décrochement de la bille de pied, mesurée en mètre, correspond à la hauteur de la première décroissance brutale (10 %) de la tige de l'arbre. Cette déformation peut être due à un redent, à l'insertion d'une grosse branche ou à la couronne du houppier.



Pour l'utiliser dans un modèle de volume de tige, l'intérêt est de rendre compte de sa variation relative avec la hauteur de l'arbre. Après avoir testé plusieurs formulations, il s'avère que celle qui exprime le plus efficacement la relation entre cette position relative et le volume de tige est la suivante :

$$\log \left(\frac{h_{dec}}{h_{tot} - h_{dec}} \right)$$

Plus la hauteur de décrochement est haute dans l'arbre, plus cette variable est forte, tandis qu'elle devient négative pour des défauts plus bas que le milieu de la tige. En pratique elle varie entre -3 et 3.

La hauteur de décrochement s'est révélée extrêmement informative pendant tout le travail de modélisation, si bien qu'elle a été conservée malgré deux inconvénients : elle n'est pas toujours disponible dans les bases de données et elle peut être difficile à appréhender sur le terrain pour de nouvelles mesures. Sa définition cependant évoque largement une hauteur à la découpe « bûcheron », souvent usitée pour les cubages commerciaux.

Elle constitue une « troisième entrée » des tarifs développés pour le volume bois fort tige.

Figure : schéma du protocole de l'Inventaire forestier national pour la mesure de la hauteur de décrochement h_{dec} .

Abondance et qualité des données de volume de tige dans la base EMERGE

Dans la base EMERGE (cf. RDVT n° 39-40, pp. 37-47), les données sont particulièrement abondantes pour le volume de tige, avec des mesures de profils de tige permettant de reconstituer différents volumes géométriques selon les découpes. Les mesures les plus détaillées sont celles des anciennes fiches INRA (mesures tous les mètres le long de la tige, protocole Oudin), pour près de 50 000 arbres, ainsi que celles de l'échantillon EMERGE (mesures tous les deux mètres) composé de 226 arbres représentant des essences ou des conditions de peuplement (réserve de taillis – sous-futaie par exemple) peu ou pas représentées dans les données anciennes. S'y ajoutent des mesures réalisées par dixièmes de hauteur : d'une part les données de type « gestion », ciblées comme celles de l'INRA sur les essences principales mais avec des conditions géographiques plus variées, et qui concernent plus de 55 000 arbres; d'autre part les données du CTFT, assez complémentaires, avec 30 000 arbres peu représentés par ailleurs, dont la moitié de taillis.

En parallèle les données de cubage de l'Inventaire forestier national couvrent davantage d'essences et de conditions de croissance; les mesures sont moins détaillées (s'agissant de cubage sur arbres debout), mais ce sont les seules qui fournissent la hauteur de décrochement.

Remarque : ces différences de protocoles de mesures ont fait l'objet de nombreux débats, mais des tests croisés entre les diverses sources de données révèlent une remarquable homogénéité de résultat (voir aussi Bouchon *et al.*, 1986), les écarts étant d'un ordre de grandeur bien plus petit que la variabilité générale observée pour ces volumes. Dans tous les cas cependant l'empattement est sous-estimé.

La démarche de modélisation du volume de tige, pour 58 essences

Pour pouvoir utiliser l'ensemble des données, il fallait reconstituer rétrospectivement la hauteur de décrochement à l'aide des profils de tiges et mesures disponibles (différentes selon les protocoles); or cette reconstitution ne va pas sans difficulté, comme nous le verrons plus loin. Faute de temps, la modélisation a donc été construite sur les seules données de cubage de l'Inventaire : la plus grosse partie a servi en calibration, l'autre partie étant réservée aux tests. En fin de parcours, les données de l'échantillon EMERGE ont également pu contribuer aux tests.

Un modèle de volume bois-fort tige pour 58 essences

Les données de cubage de tige de l'Inventaire forestier national disponibles dans le projet représentent 1 106 099 arbres répartis selon 58 « essences » (espèces + quelques regroupements de genre ou « divers »), dont 36 feuillus. Elles ont été organisées en 3 groupes, en procédant comme suit : nous avons d'abord extrait les données des arbres mesurés en futaie irrégulière (selon la définition de l'Inventaire) et toutes les données du Massif Central; puis le paquet ainsi amputé a fait l'objet d'un tirage aléatoire pour constituer deux jeux indépendants mais de même type, un jeu de calibration (80 %) et un jeu de validation (20 %). Les données préalablement extraites sont destinées à tester les modèles en extrapolation sur deux critères : la structure forestière, d'une part, et la région, d'autre part.

Ainsi, nous disposons de près de 680 000 arbres pour calibrer les modèles avec, contrairement au cas du volume total de l'arbre, des effectifs suffisants pour l'ajustement aux 12 groupes d'affinité architecturale et anatomique définis en début de projet (Longuetaud *et al.*, ce dossier). Et comme les données de l'Inventaire

forestier national indiquent le volume bois-fort tige, notion également familière aux gestionnaires, c'est ce volume que nous avons choisi de modéliser, plutôt que le volume de tige complète.

Nouveau coefficient de forme pour la tige

La modélisation du volume de tige se heurte aux mêmes problèmes statistiques que celle du volume total de l'arbre, ce qui conduit à passer par une transformation de variable, c'est-à-dire en l'occurrence à travailler sur le coefficient de forme avant d'en déduire le modèle de volume. Rappelons que le coefficient de forme est le rapport du volume de l'arbre sur le volume d'un cylindre de même hauteur et de même section. L'article précédent sur le volume total de l'arbre a montré l'intérêt de considérer, pour cette section, non pas la circonférence à 1,30 m (convention habituelle), mais la circonférence correspondant à la base d'un cône qui partirait du sommet de l'arbre, passerait par le diamètre à 1,30 m et se prolongerait jusqu'au sol. Cette même correction est utilisée ici pour le rapport entre le volume de tige et le volume du cylindre : formule [1] (page 38).

Le choix du volume bois-fort impose une seconde correction pour tenir compte du fait que le volume de l'apex, au-dessus du diamètre de découpe bois-fort (7 cm sur écorce), n'est pas comptabilisé. Pour les plus petits arbres, le volume de cette pointe peut représenter une part non négligeable de la tige complète. Cette seconde correction reprend l'hypothèse théorique d'une forme conique, et utilise un rapport du volume de l'apex sur le volume de la tige complète : formule [2]. Comme la première, elle devient négligeable pour les plus gros arbres, mais elle permet de garder au coefficient de forme une véritable signification pour les petites tiges. En définitive, le coefficient de forme redéfini peut donc s'écrire en fonction du volume bois-fort tige (formule [3]).

Un modèle de volume de tige lié au volume total de l'arbre

La démarche de modélisation a consisté ensuite à rechercher une liaison statistique entre ce coefficient de forme de tige et des variables susceptibles d'expliquer les différences de forme. De plus, pour assurer la cohérence entre volume de tige et volume total de l'arbre, nous avons utilisé une formulation multiplicative par rapport au coefficient de forme correspondant au volume total de l'arbre. Trois variables ont été retenues à l'issue de cette analyse :

- la position relative de la hauteur de décrochement dans l'arbre (voir encadré), variable la plus significative, indispensable pour décrire les variations de formes surtout pour les feuillus ;
- la robustesse (rapport entre racine de la circonférence à 1,30 m et hauteur totale), qui s'avère également très intéressante, et qui est même la plus significative pour les résineux ;
- l'inverse de la circonférence à 1,30 m, avec un effet plus limité.

Le modèle s'écrit finalement selon la formule [4].

L'ajustement a été fait globalement sur l'ensemble des 58 essences, en tenant compte de la structuration par groupe. Pour ces 58 essences, des valeurs spécifiques sont donc disponibles pour les 4 paramètres d , e , f et g . Pour d'autres essences, des estimations peuvent être faites par rattachement à l'un des 12 groupes d'affinité architecturale et anatomique (valeurs du paramètre e par groupe, valeurs d et g par ensemble « résineux » ou « feuillus », et valeur globale pour f).

Test du modèle de volume de tige

Ainsi ajusté, le modèle a été reconverti en modèle de volume bois-fort tige (formule [5]) et testé sur les données de validation (figure 1). Comme pour le volume total, une forte variabilité résiduelle persiste, ce qui n'est pas une surprise : la même observation a été faite dans d'autres études sur de grands jeux de données, comme

pour les tarifs régionaux ou nationaux (Pardé et Bouchon, 1988 ; Tran-Ha, 2007). Sur l'ensemble des données, les hauteurs, totale et de décrochement, paraissent suffire, avec la circonférence à 1,30 m, à rendre compte des variabilités régionales et structurelles à une large échelle : à l'échelle des GRECO (Grandes Régions ECOlogiques) de l'IGN, il n'apparaît pas de biais sur la GRECO Massif Central, non utilisée pour la calibration ; le test sur le groupe des arbres issus de futaie irrégulière (définition de l'Inventaire) ne révèle pas non plus de biais imputable à la structure forestière.

Comment reconstituer la hauteur de décrochement des données anciennes ?

Pour tester le modèle sur les autres jeux de données de la base EMERGE, il fallait d'abord pouvoir reconstituer la hauteur de décrochement. Des méthodes automatiques de détection d'un décrochement sur le profil de tige ont été mises en œuvre. Leur efficacité diffère selon les mesures de profil disponibles. Sur profils détaillés (fiches INRA et campagnes EMERGE), elles permettent de reconstituer assez bien un décrochement net (cohérence vérifiée avec des mesures de hauteurs de fourches ou de défaut majeur) ; pour les arbres mieux conformés, la méthode automatique tend à détecter un décrochement au niveau de l'empatement. Sur des profils plus sommaires (protocoles avec moins de mesures), le positionnement automatique du décrochement est difficile.

Cette hauteur a été pour l'instant assez bien reconstituée sur les données des campagnes EMERGE, pour lesquelles les tests du modèle de volume de tige montrent des résultats comparables à ceux de la figure 1. Les résultats obtenus sont encourageants pour les données des fiches INRA, mais sur les autres jeux de données ils sont encore très insuffisants pour permettre le test plus complet du modèle.

Modulation des volumes selon la découpe

La dernière attente du projet sur les volumes était de pouvoir les moduler selon différentes spécifications utilisées par les forestiers. En dehors des habitudes commerciales qui tiennent compte d'un cahier des charges particulier et qui éliminent des zones de défauts, les découpes conventionnelles (4 cm, 7 cm = bois-fort, 14 cm, 20 cm, etc.) varient selon les usages, les essences et catégories de grosseur, ou les régions. Il existait donc historiquement, pour une essence et un échantillon de mesures de cubage, plusieurs tarifs de cubage selon la découpe, en particulier pour la tige. Plutôt que de considérer ces volumes comme des variables différentes, le projet a voulu et adopté une représentation en continu du volume par découpe.

Une représentation en continu des volumes par découpe...

Nous nous sommes donc penchés sur les modèles de profils de tige, qui permettent de représenter l'évolution de la grosseur d'une tige en fonction de la hauteur depuis le sol ou depuis l'apex (figure 2a). Ces profils permettent, une fois intégrés le long de la tige, de calculer un volume cumulé pour une hauteur donnée, ou pour une grosseur donnée : c'est cette seconde option qui nous intéresse ici.

La figure 3 propose une représentation de l'ensemble des volumes d'un arbre, en fonction de la variable d'intérêt : le diamètre de découpe sur écorce. Sont ainsi reliés sur un même graphique les volumes totaux de tige et de branches, et on peut y repérer facilement les données caractéristiques : diamètre de la souche en limite maximale de découpe, diamètre de la plus grosse branche pour l'apparition du volume de houp-pier, volume total de l'arbre, volume de la tige complète ainsi que les découpes usuelles et volumes tige correspondants.

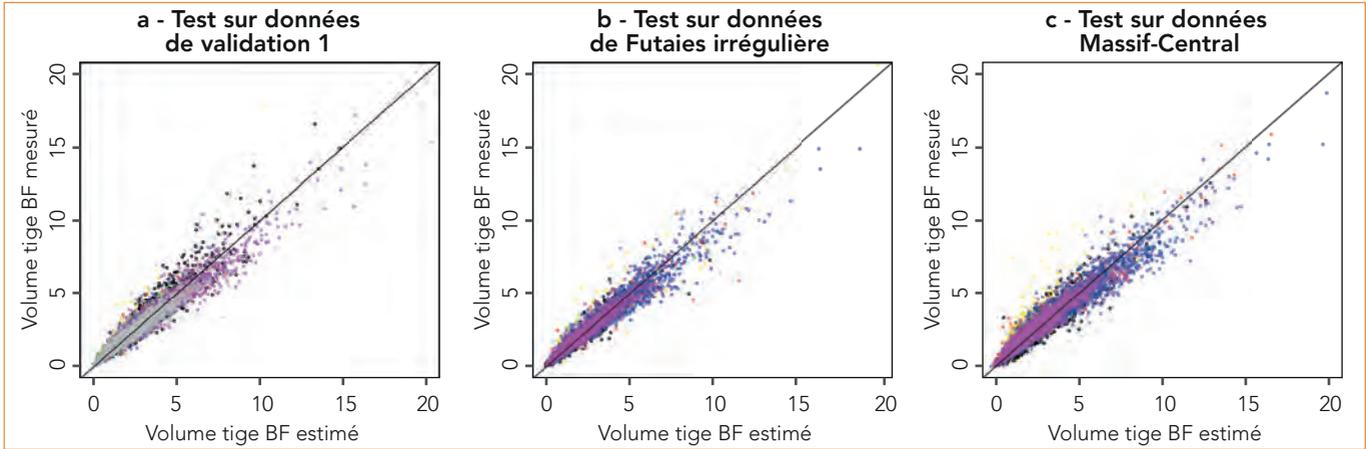


Fig. 1 : résultat des tests du modèle de volume bois-fort tige sur les données de validation, exclues préalablement du jeu de calibration

- a) test sur un échantillon indépendant mais de même nature que les données de calibration (extrait par tirage aléatoire de 20 % des arbres, soit 169 990 arbres);
 - b) test sur l'ensemble des arbres de futaie irrégulière (au sens de la définition de l'Inventaire forestier national; 54 746 arbres);
 - c) test sur l'ensemble des arbres de la région du Massif Central (222 683 arbres).
- À noter que les arbres de futaie irrégulière du Massif Central sont représentés ici deux fois. Les couleurs représentent différents genres.

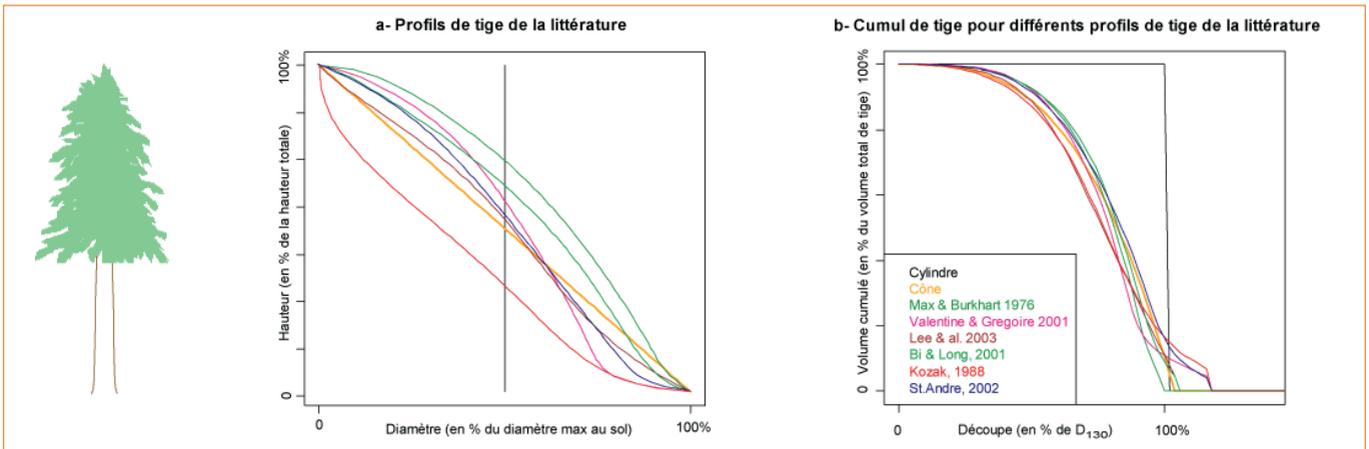


Fig. 2 : représentation de 8 modèles de profils de tige (a) et du volume de tige calculé pour le diamètre (découpe) correspondant (b), selon la hauteur dans l'arbre

En noir le modèle d'une tige cylindrique se distingue des 7 autres; en revanche les 6 modèles de la littérature donnent des volumes cumulés assez proches de ceux du simple modèle conique (en orange).

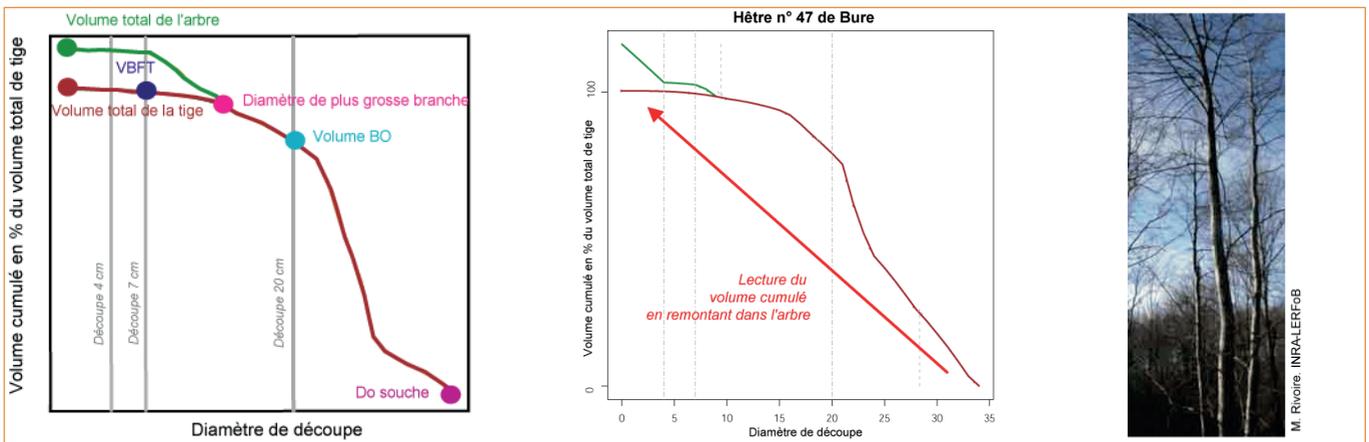


Fig. 3 : représentation théorique du volume cumulé d'un arbre en fonction de la découpe et visualisation pour un hêtre de la campagne de mesure EMERGE 2009

Les unités de volume sont ramenées à 1 pour le volume total. Cette représentation sépare, dans le volume total, la part du volume de tige (marron) et la contribution supplémentaire des branches (en vert). Sont indiquées aussi quelques découpes usuelles, ainsi que certaines variables caractéristiques : diamètre maximal à la souche, diamètre de la plus grosse branche marquant l'apparition du volume de houppier. Sont enfin positionnés les volumes que nous avons modélisés : volume total de l'arbre (point vert) et volume bois-fort tige (point violet).

formules & modèles

Pour modéliser le volume complet de tige (en m³), noté « VolumeTige », il faut passer d'abord par le coefficient de forme (sans unité) redéfini ; c'est la première correction :

$$[1] \text{formTigeNew} = \text{formTige} \left(1 - \frac{1.30}{h_{\text{tot}}} \right)^2 \quad \text{avec} \quad \text{formTige} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{VolumeTige}}{h_{\text{tot}} \cdot c_{130}^2}$$

où h_{tot} et c_{130} sont exprimées en mètres.

On choisit le volume bois-fort tige (noté « VBFT ») plutôt que le volume tige complet (deuxième correction) :

$$[2] \text{VBFT} = \text{VolumeTige} \cdot \left(1 - \frac{c_{\text{BF}}}{c_{130}} \left(1 - \frac{1.30}{h_{\text{tot}}} \right)^3 \right) \quad \text{avec} \quad c_{\text{BF}} = \text{circonférence bois-fort} (c_{\text{BF}} = 0.07\pi)$$

En définitive, le coefficient de forme est donc redéfini comme suit :

$$[3] \text{formTigeNew} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{VBFT}}{h_{\text{tot}} \cdot c_{130}^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{1.30}{h_{\text{tot}}} \right)^2}{\left(1 - \frac{c_{\text{BF}}}{c_{130}} \left(1 - \frac{1.30}{h_{\text{tot}}} \right)^3 \right)}$$

Reste à le modéliser en fonction du volume total de l'arbre (ou plutôt du coefficient de forme correspondant, formTotNew) et des variables explicatives des différences de forme ; le modèle s'exprime ainsi :

$$[4] \text{formTigeNew} = \left(d + e \cdot \log \left(\frac{h_{\text{dec}}}{h_{\text{tot}} - h_{\text{dec}}} \right) + f \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{\text{tot}}} + \frac{g}{c_{130}} \right) \text{formTotNew}$$

les paramètres d et e sont sans unité, f est exprimé en m^{0.5} et g en m⁻¹

Après ajustement statistique, on en déduit le modèle de volume bois-fort tige :

$$[5] \text{VBFT} = \underbrace{\frac{h_{\text{tot}} \cdot c_{130}^2}{4 \cdot \pi} \left(a + b \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{\text{tot}}} + c \frac{h_{\text{tot}}}{c_{130}} \right)}_{\text{Volume total de l'arbre}} \cdot \underbrace{\left(d + e \cdot \log \left(\frac{h_{\text{dec}}}{h_{\text{tot}} - h_{\text{dec}}} \right) + f \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{\text{tot}}} + \frac{g}{c_{130}} \right)}_{\text{part de la tige}} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{c_{\text{BF}}}{c_{130}} \left(1 - \frac{1.30}{h_{\text{tot}}} \right)^3 \right)}_{\text{correction bois fort}}$$

VolumeTige

Comment passer à un modèle de volume quelconque ? Proposition simpliste : généraliser la correction bois-fort à une découpe quelconque :

$$[6] \text{VolumeTige}(c_{\text{decoupe}}) = \text{VolumeTige} \cdot \left(1 - \frac{c_{\text{decoupe}}}{c_{130}} \left(1 - \frac{1.30}{h_{\text{tot}}} \right)^3 \right)$$

... gage de cohérence et de pérennité

Le premier intérêt d'une représentation (et modélisation) en continu du volume est de garantir la cohérence entre des différentes définitions de volume pour un même arbre. Une telle représentation assure structurellement qu'un volume à la découpe bois-fort, par exemple, sera toujours plus grand qu'un volume à une découpe plus grosse (située en dessous), alors que ce n'est pas forcément le cas lorsque les tarifs correspondants sont développés indépendamment, sur des jeux de données séparés. Par ailleurs l'intérêt de cette représentation est aussi de s'abstraire des spécifications particulières de découpe. Enfin elle permet d'envisager tranquillement l'éventualité que l'évolution des méthodes de récolte, avec des outils plus mécanisés, conduise à l'utilisation de nouvelles découpes.

Une première distribution simple de volume de tige par découpe

La littérature scientifique forestière regorge de modèles de profils de tige, souvent utilisés pour en déduire des volumes par découpe cohérents entre eux. Les formes mathématiques de ces profils permettent de décrire plus ou moins précisément les deux zones délicates que sont l'empatement de l'arbre et le haut du houppier, où apparaît parfois une nette inflexion de forme, notamment chez les feuillus. L'intégration de ces différents modèles en fonction de la découpe montre en figure 2 b que

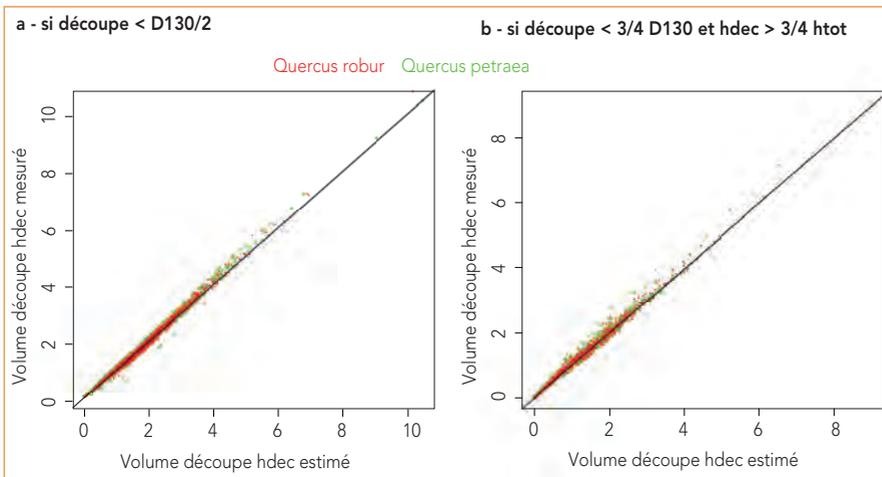


Fig. 4 : test du modèle de volume de tige, en fonction de la découpe, pour des chênes de la base de données de l'Inventaire forestier national. La découpe choisie ici est variable et correspond à la section mesurée à la hauteur de décrochement. On voit que le modèle fonctionne bien quand cette découpe est plus petite que la moitié du D_{130} (fig 4a, 44 050 arbres); le test est également satisfaisant si on pousse cette découpe jusqu'aux $\frac{3}{4}$ du D_{130} à condition que la hauteur de décrochement soit au dessus des $\frac{3}{4}$ de la hauteur totale (fig 4 b, 23 860 arbres). En dehors de ces situations, le calcul simplifié donne des volumes plus faibles que dans la réalité.

la forme du profil a finalement peu d'impact sur la part de volume tige prise en compte selon la découpe, sauf dans la zone de l'empatement (donc loin des découpes habituelles), et qu'on reste assez proche de ce que donnerait un profil tout simplement conique. Partant de ce constat qualitatif, nous avons généralisé à une découpe quelconque la correction conique utilisée précédemment pour exprimer le volume bois-fort à partir du volume total de tige : formule [6].

Cette approche simpliste se révèle efficace pour les découpes qui ne dépassent pas la moitié de la grosseur à 1,30 m. Nous l'avons testée sur les données chêne (sessile et pédonculé) de l'Inventaire : les mesures sont trop peu détaillées pour pouvoir contrôler le volume à une découpe particulière, mais on peut contourner la difficulté en prenant comme découpe la circonférence mesurée à la hauteur de décrochement. Tant que la découpe est en deçà de la moitié de la grosseur à 1,30 m, les estimations de volume restent tout à fait satisfaisantes (figure 4a); cette limite peut même aller jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de la grosseur à 1,30 m, pour peu que la hauteur de décrochement soit en même temps au dessus des $\frac{3}{4}$ de la hauteur totale (figure 4 b).

Perspectives pour les arbres mal conformés

En revanche, pour des arbres avec un décrochement plus bas, cette distribution sommaire du volume ne convient plus. Ce cas est illustré figure 5 par un chêne dont la fourche basse se traduit, sur le profil de volume cumulé en fonction du diamètre, par une cassure forte qui exprime une nette diminution de la part de tige dans le volume total de l'arbre. Notre modèle de volume de tige, qui fait intervenir la hauteur de décrochement, permet de rendre compte de la diminution du volume de tige lorsque la hauteur de décrochement diminue, surtout en deçà du milieu de houppier. Mais l'approximation conique de la distribution de volume suppose ensuite une certaine régularité pour distribuer ce volume par découpe, sans une telle cassure. Pour les arbres « mal conformés », il y a là une contradiction criante.

Des modèles plus complexes de volume cumulé ont été développés au cours du projet EMERGE mais ne sont pas opérationnels à ce stade. Il est prévu de les greffer au modèle de volume de tige, en remplacement de notre formulation simpliste de distribution par découpe, surtout pour les découpes proches de la grosseur à 1,30 m et pour les arbres avec de forts décrochements de forme. En parallèle, des modèles de volume cumulé pour les branches sont aussi à l'étude mais pas encore aboutis.

Un test avec des données de gestion

Pour illustrer l'utilisation de ces tarifs en gestion, nous nous appuyons à nouveau sur le jeu de données « chêne » présenté dans l'article précédent; il comprend, parmi les mesures de hauteur, la hauteur de décrochement telle que définie dans l'encadré. La figure 6 montre combien cette hauteur est variable avec la forêt et le stade de développement.

Elle est globalement stable à Bercé, autour de 60 % de la hauteur totale quel que soit le stade de développement, ce qui indique sur nos placettes échantillon une bonne conformation globale des tiges. Nous attendions intuitivement des valeurs plus basses pour les 3 placettes de taillis-sous-futaie à Orléans (ABM, AGB et R) mais, si cette hauteur est effectivement plus basse à Orléans qu'à Bercé, c'est à Tronçais, dans les stades amélioration gros bois et régénération, que les valeurs les plus faibles sont observées (autour de 40 % de la hauteur totale). Les arbres de Tronçais étaient assez comparables en hauteur, diamètre et volume total à ceux de Bercé, mais plus âgés; la hauteur de décrochement plus faible indique qu'ils ont une forme de tige différente.

Un échantillonnage illustratif des divers outils de cubage en gestion

L'échantillonnage croisant 3 forêts visait initialement des contextes stationnels différents. Ceci étant, le rapprochement avec les pratiques de gestion montre qu'il illustre aussi des habitudes de cubage bien distinctes. Le volume calculé en gestion est un volume tige commercial arrêté à la découpe bois-fort pour les petites

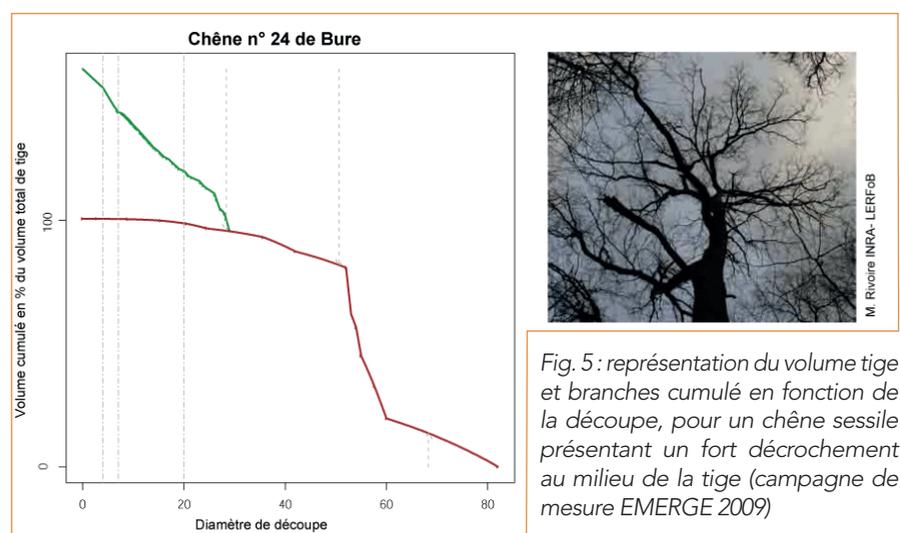


Fig. 5 : représentation du volume tige et branches cumulé en fonction de la découpe, pour un chêne sessile présentant un fort décrochement au milieu de la tige (campagne de mesure EMERGE 2009)

Le diamètre à la base de la fourche était de 51 cm et le diamètre à la base du second brin de fourche de 28 cm (apparition de la partie verte de la courbe); l'apparition de la fourche produit sur la courbe marron une cassure qui marque la diminution de la part de tige et induit une plus grande part de volume dans les branches (en vert).

tiges, à la découpe 20 cm pour les tiges de plus de 27,5 cm de diamètre, ou à la découpe bûcheron (pour Orléans et pour les plus gros arbres Tronçais). Les tarifs utilisés localement sont de 3 types :

- à Bercé : tarifs Schaeffer rapide 11 et 13 selon la fertilité avec une seule entrée, le diamètre ;
- à Orléans : barèmes de l'administration avec deux entrées (diamètre et hauteur de découpe) et une décroissance (en cm/m) qui augmente avec les classes de diamètre, fournissant le volume tige à la découpe considérée ;
- à Tronçais : tarif local à deux entrées (diamètre et hauteur de découpe bûcheron) fournissant le volume commercial correspondant au contexte local de la construction du tarif.

Pour chaque placette, ces tarifs ont été appliqués à nos données pour le calcul du volume « gestion » en prenant la hauteur de décrochement comme entrée pour la hauteur de découpe bûcheron. En parallèle le tarif EMERGE de volume tige a été appliqué, en utilisant l'équation [6] pour calculer le volume arrêté aux coupes commerciales usuelles. Notre tarif donne un volume géométrique jusqu'aux coupes fixes 7 et 20, mais ne tient évidemment pas compte de coupes arrêtées éventuellement plus bas en gestion.

Une première comparaison de volumes

La figure 7 présente la comparaison directe des volumes ainsi calculés. Elle compare en fait des volumes de nature un peu différente : d'un côté des volumes géométriques arrêtés à la découpe 7 ou 20 cm selon la taille de l'arbre pour EMERGE ; de l'autre, des volumes commerciaux reposant sur des hypothèses de calcul diverses mais correspondant aux situations locales.

Le premier constat est cependant que les volumes prédits avec le tarif unique EMERGE sont très cohérents avec les valeurs fournies par les tarifs locaux. À Bercé, la variabilité des

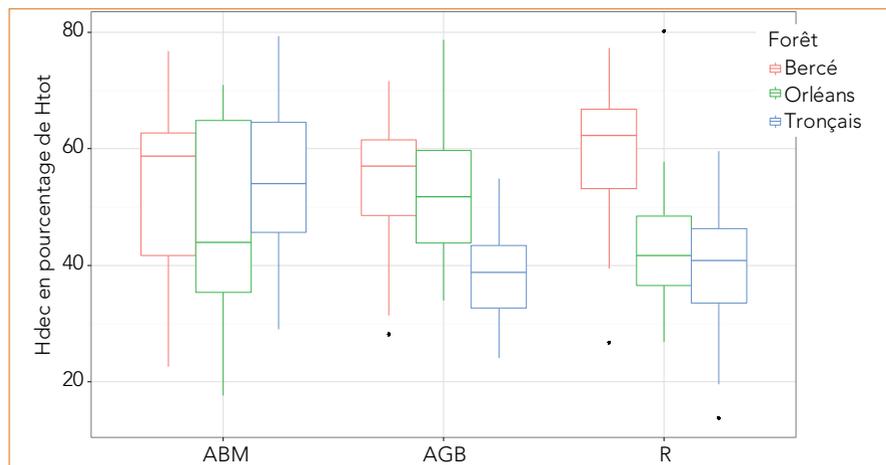


Fig. 6 : test en chênaie : distribution de la hauteur de décrochement (en pourcentage de la hauteur totale) par forêt et type de coupe (ou stade de développement)

ABM = amélioration bois moyens ; AGB = amélioration gros bois ; R = régénération. La distribution pour le stade APB est omise ici, les tiges des petits bois n'ayant pas de véritable décrochement et la hauteur étant arrêtée à la hauteur bois fort.

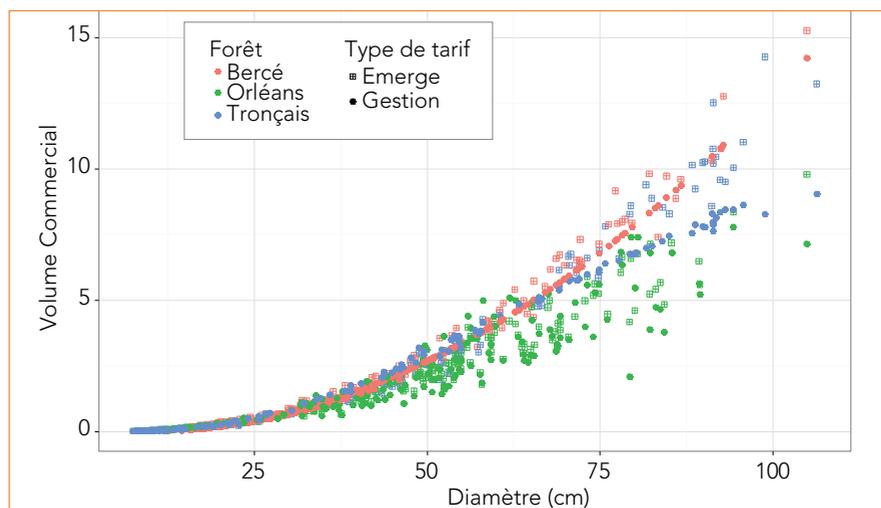


Fig. 7 : comparaison des estimations « gestion » et EMERGE du volume commercial tige en fonction du diamètre pour les trois forêts et les 4 stades de développement testés en chênaie.

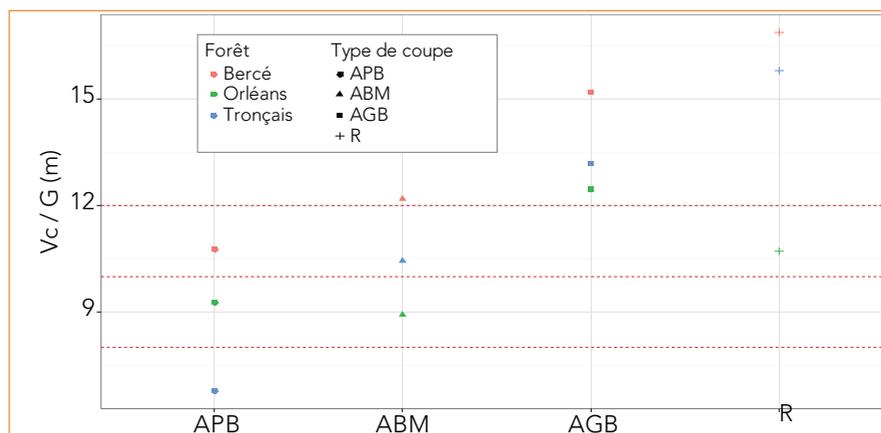


Fig. 7 : comparaison des estimations « gestion » et EMERGE du volume commercial tige en fonction du diamètre pour les trois forêts et les 4 stades de développement testés en chênaie.

volumes EMERGE par classe de diamètre est assez faible, comme pour le volume total, avec aussi des valeurs assez stables de hauteurs de décrochement ; cela explique bien *a posteriori* le choix en gestion d'un tarif à une seule entrée pour ces peuplements assez homogènes. À Orléans, à l'inverse, la variabilité des volumes est très forte pour un même diamètre, mais le tarif local (barème de l'administration à deux entrées) est très en phase avec les volumes EMERGE. Cette fois l'utilisation de deux entrées pour décrire la variabilité des volumes dans une même parcelle est indispensable. Enfin le cas de Tronçais est plus compliqué. Jusqu'aux gros bois, il y a une bonne cohérence des volumes gestion et EMERGE (valeurs légèrement plus faibles pour EMERGE) et la variabilité assez faible, comparable à celle de Bercé, montre que la seconde entrée dans le tarif n'est pas forcément nécessaire. En revanche les deux calculs se séparent nettement pour les très gros bois, avec une variabilité et des valeurs beaucoup plus fortes pour les volumes EMERGE.

À ce stade, la seconde entrée est importante, mais surtout on peut penser que ce ne sont plus les mêmes volumes qui sont comparés : les volumes commerciaux locaux pour ces très gros arbres s'arrêtent à la hauteur bûcheron, approchée dans nos calculs par la hauteur de décrochement, sans doute plus basse que la découpe 20 cm utilisée pour les volumes EMERGE. Les hauteurs de décrochement assez basses pour ces parcelles (figure 6) confirment ce diagnostic.

D'autres références calculées à partir des volumes EMERGE

Comme pour les volumes totaux de l'article précédent, il est possible de calculer le rapport entre le volume commercial tige et la surface terrière (figure 8). Les valeurs sont plus basses que pour le volume total mais montrent la même évolution avec la taille des arbres : les 3 niveaux indiqués

par le guide de sylviculture (Jarret, 2004) pour 3 types de peuplements viennent d'une première approche qu'il est désormais possible d'affiner.

Par ailleurs, le rapprochement entre les volumes totaux calculés dans l'article précédent et le volume commercial tige à une découpe donnée permet de calculer des coefficients de houppier (résultats non illustrés). Ces coefficients varient avec la taille des arbres, mais encore bien plus avec la définition du volume de tige. Lorsque la découpe bûcheron s'éloigne de la découpe de 20 cm, le volume de tige diminue et accroît de ce fait la part du houppier (au sens large, branches et surbille), mais surtout le rapport (volume total/volume tige) est fortement augmenté par diminution du dénominateur. Sans aller plus loin dans ces calculs et dans la comparaison aux coefficients de houppier en usage localement, une suggestion s'impose : vu l'extrême sensibilité de ces coefficients, il serait plus sûr et sans doute plus simple d'estimer les volumes de houppier par différence, en utilisant le modèle EMERGE de volume total.

Quelles perspectives pour la gestion ?

Les résultats présentés appellent des travaux complémentaires, mais les premiers tarifs génériques pourraient déjà être valorisés en gestion.

Des tarifs génériques et nationaux

L'intérêt principal est d'avoir construit, sur une base de données très large et représentative de nombreuses essences, conditions de croissance et sylvicultures, des tarifs génériques simultanément pour le volume de tige et pour le volume total de l'arbre (article précédent). Pour bien des essences, « orphelines » ou simplement peu prises jusqu'ici, ces outils apportent désormais des estimations robustes.

La redéfinition du coefficient de forme, pour tenir compte des spécificités

des mesures forestières (grosceur à 1,30 m, découpe excluant la pointe supérieure de la tige), assure un bon comportement de ces tarifs même pour des tailles d'arbres usuellement peu concernées : gros arbres comme les réserves de taillis – sous-futaie, ou petits arbres de taillis, d'essences très diverses, pour lesquels nous manquons d'outils d'estimation des volumes.

La robustesse (validité nationale, quelles que soient les conditions de croissance) tient aussi à l'introduction d'une troisième entrée qui, à grosceur et hauteur équivalentes, reflète les disparités de distribution du volume entre tige et houppier. C'est la hauteur de décrochement, une notion riche d'information qui rend indirectement compte du passé du peuplement, de la sylviculture, de la région et sans doute, dans une certaine mesure, de facteurs génétiques.

Ceci étant, la comparaison des volumes mesurés aux volumes calculés par nos tarifs montre que la variabilité reste importante, mais elle est du même ordre que celle observée pour les tests des tarifs de cubage antérieurs, ciblés sur une région et une essence. Or nos tarifs ont un spectre beaucoup plus large d'applications, grâce à la hauteur de décrochement qui permet, en plus de la hauteur totale, de rendre compte de différences d'environnement de l'arbre. C'est une avancée considérable par rapport à d'autres tarifs nationaux comme ceux de Bouchon (1982) pour le hêtre ou Tran-ha *et al.* (2007) pour 6 grandes essences.

À ce stade du travail, il n'apparaît pas de biais par rapport à la région ou la structure (toutes deux au sens de l'Inventaire) mais, à l'échelle du massif, des tarifs locaux (une essence, une forêt et un type de coupe) resteront certainement plus précis, pour peu qu'ils aient été établis avec des échantillons adaptés et qu'ils soient utilisés dans les bonnes conditions de validité.

Quelle application pour ces tarifs à 3 entrées ?

L'intérêt de nos modèles se situe donc d'abord à une échelle assez large, régionale ou nationale, pour réaliser des estimations sur toutes les essences, conditions de croissance et de coupe; des estimations qui seront parfaitement comparables. Plus localement, l'illustration faite sur des peuplements de chênes montre que les tarifs EMERGE sont des outils d'expertise particulièrement intéressants. En offrant la possibilité d'aborder simultanément le volume total et le volume commercial tige (à telle ou telle découpe), ils permettent de consolider les estimations locales : obtenir par simple différence des références de volume de houppier (ajuster les coefficients de houppier) mais aussi affiner les valeurs du rapport V/G à préconiser pour estimer rapidement le volume d'après la surface terrière. C'est une application particulièrement intéressante pour les jeunes peuplements ou taillis d'essences mélangées.

Notre étude du volume tige introduit une nouveauté par rapport à la hauteur des découpes classiquement affichées à l'ONF. Dans les chênaies par exemple, on est censé cuber les « arbres » (au sens des tiges de diamètre 27,5 cm et plus) à la découpe 20. Mais cette découpe est très difficile à déterminer et c'est en fait le plus souvent une découpe « bûcheron » à dire d'expert qui est utilisée. Or la hauteur de décrochement s'en rapproche beaucoup et elle a le mérite d'objectiver la mesure ou l'appréciation. C'est semble-t-il une hauteur assez facilement mobilisable et qui pourrait être utilisée pour définir le volume « arbre » de manière plus homogène... sachant que dans le cadre du modèle EMERGE, la hauteur de décrochement n'a de sens que par rapport à la hauteur totale individuelle. Plus modestement, nous proposons dans l'immédiat de tester les tarifs EMERGE en tant que « diagnostics volumes » pour asseoir le choix de tarifs de cubage ou barèmes à une entrée

pertinents localement, dans les cas de massifs ou essences pour lesquels les références manquent. Idéalement, ce choix requiert des mesures de cubage détaillées sur un échantillon représentatif d'arbre abattus, méthode particulièrement coûteuse ! Nos modèles offrent une alternative fiable et bien plus sobre : à partir des hauteurs (totale et de décrochement) et circonférences mesurées pour un échantillonnage de type Sylvie, ils fournissent des volumes de référence (arbre entier et tige à différentes découpes) qui permettent de sélectionner le barème ou tarif le mieux adapté pour quelques volumes choisis, ainsi éventuellement que des coefficients de passage de l'un à l'autre.

Christine DELEUZE
François MORNEAU
Jean-Pierre RENAUD
Yannick VIVIEN
 ONF, département R&D

Michaël RIVOIRE
Philippe SANTENOISE
Fleur LONGUETAUD
Frédéric MOTHE
 INRA, UMR 1092-LERFoB¹
 54280 Champenoux

Jean-Christophe HERVÉ
 IGN – Nancy

Remerciements

Pour les deux articles sur les volumes, le projet a grandement bénéficié du travail de nos prédécesseurs au département R&D, ou plutôt à la direction technique à Fontainebleau : Pierre Duplat, Mien Tran-Ha, Michel Vallance, Martin Hilaire, pour citer les contributions les plus importantes sur les protocoles de 1972 et 1983, les données de cubage soigneusement archivées et la fameuse base de données des tarifs à l'ONF. Merci particulièrement à Tran pour les discussions autour de la hauteur cylindrique.

Merci aussi à Christophe Voreux qui à nous a rappelé l'importance de la hauteur de Pressler.

Bibliographie

Un article scientifique plus complet sera soumis aux Annales des Sciences Forestières.

Bouchon J., 1982. Tarifs de cubage à deux entrées pour le Hêtre (*Fagus sylvatica*) en France. *Revue Forestière Française*, vol. XXXIV pp. 225-236

Bouchon J., Delord J.M., Rousseau P., 1986. Comparaison de deux méthodes de cubage. *Revue Forestière Française* vol. XXXVIII, n° 1 pp. 47-54

De Champs J. 1997. Le Douglas. AFOCEL. 416 p.

Guinaudeau F., Duplat P. 1994. Proposition d'un tarif de cubage unique pour l'épicéa commun. AFOCEL, Informations forêt n° 3-1994, fiche n° 487 pp. 225-236

Jarret P. 2004. Guide des sylvicultures. Chênaies atlantiques, ONF, Lavoisier, 335 p.

Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. ENGREF, 328 p.

Rondeux J., 1975. Pour une définition du volume de bois d'œuvre de nos principales essences forestières feuillues. *Revue Forestière Française*, vol. XXVII, pp. 371-376

Tran-Ha M., Perrotte G., Cordonnier T., Duplat P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. *Revue forestière française* vol. LIX, n° 6 pp. 609-624

Vallance M., 1995. Construire son tarif de cubage ou adopter un tarif existant comment faire le bon choix ? *Bulletin technique de l'ONF* n° 30 pp. 19-31

Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. 2005. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva fennica : Monographs* 4, 63 p.

¹ Le LERFoB bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Modèles de biomasse et de minéralomasse. Quelles avancées de la recherche? Pour quels usages à terme en gestion?

Il n'a échappé à personne que, avec les changements globaux, la biomasse forestière devient une ressource renouvelable très convoitée ; mais aussi que le sol, lui, n'est pas renouvelable et doit donc être ménagé, notamment en ce qui concerne la richesse minérale. Il est donc nécessaire de savoir bien estimer la biomasse et la minéralomasse forestières, pour assurer une gestion durable. Dans ce domaine aussi les résultats d'EMERGE sont un énorme progrès, même s'il reste à les compléter tant ils ouvrent de pistes.

Les gestionnaires forestiers ont depuis très longtemps intégré l'usage des tarifs de cubage des arbres pour l'aménagement des forêts et le commerce des bois, que ce soit pour les grumes ou le bois de d'industrie. L'usage de tarifs ou modèles pour évaluer la biomasse et son contenu en éléments minéraux (minéralomasse) est plus récent. Les études de biomasses ont connu un premier essor lors de la crise énergétique des années 70 (voir la première étude française de Lossaint et Rapp en 1971) et en connaissent un second avec les changements climatiques et les évaluations de bilan de carbone (années 2000 et plus).

La première période a débouché sur un très grand nombre de modèles, développés pour les grandes essences forestières, avec la mise au point de protocoles sur le terrain et de techniques statistiques spécifiques pour la biomasse et la minéralomasse. Avant le projet EMERGE, on avait donc pour les essences principales de la forêt française (notamment chêne et hêtre) une collection de modèles, souvent calibrés sur un faible nombre d'arbres compte tenu des coûts opérationnels pour obtenir les données, et dont la portée était par conséquent très limitée.

	Biom/min INRA-BEF	Biomasse FCBA	Biom/min EMERGE	Biom/min Sylvabiom	
Peuplier	140	4030		150	4320
Eucalyptus		411	6		417
Chêne	300	36	58		394
Châtaigner	320	18			338
Hêtre	250	12	37		299
Robinier			8	50	58
Bouleau	25	4	16		45
Charme	13	21	10		44
Érables			32		32
Sorbier	25	4			29
Aulnes			16		16
Frênes			9		9
Tilleuls			8		8
Tremble			6		6
Aubépine		1			1
Douglas	125	36		45	206
Epicéa commun	105	2			107
Pin maritime	20	44			64
Pin laricio et pin noir	5	30	8		43
Mélèze				30	30
Abies grandis				30	30
Séquoia sempervirens				26	26
Cupressocyparis				24	24
Pin d'alep			8		8
Cryptomeria japonica				7	7
Sapin		7			7
Pin sylvestre		52			52
Total	1328	4708	222	362	6620

Tab. 1 : bilan des données rassemblées pour le projet EMERGE, en nombre d'arbres. Anciennes données biomasse et minéralomasse du laboratoire INRA-BEF, anciennes données de biomasse de FCBA et mesures réalisées pendant le projet EMERGE ainsi que dans le projet ANR SYLVABIOM.

Ces modèles existants sont toutefois référencés dans une base de données mondiale des équations de biomasse (www.globalloomtree.org) à laquelle le projet EMERGE a contribué pour la France.

À partir des années 2000, on cherche à élargir le panel d'outils de quantification à différentes essences et conditions de croissance, avec une approche plus générale : il ne s'agit plus seulement de quantifier une biomasse disponible, mais aussi d'établir des bilans de carbone et des bilans d'exportation d'éléments nutritifs, dans une volonté de gestion durable et de bilan complet. Le projet EMERGE s'inscrit pleinement dans cette seconde phase avec, comme point fort essentiel, la mise en com-

mun des données disponibles, en termes de biomasse et de minéralomasse, dans les différents organismes forestiers français (tableau 1) et même européens (pour le hêtre et le chêne). La constitution d'une telle base de données est encore plus cruciale que pour le volume car les mesures de biomasse, puis de teneurs en éléments minéraux dans les différents compartiments de l'arbre sont extrêmement coûteuses en temps et en argent et restent rares (voir RDVT n° 39-40 pp.37-47).

L'approche du projet EMERGE, est donc de rassembler le maximum de données pour pouvoir construire des modèles de biomasse et de concentration en éléments minéraux qui soient les plus génériques possible

(mêmes formes d'équations quelle que soit l'essence), robustes (pouvant être utilisés en extrapolation sans risque majeur d'erreurs), et précis (bonne adéquation entre les mesures et les simulations). Les techniques de terrain mises au point, ainsi que les méthodes statistiques pour ajuster les modèles, sont détaillées dans un manuel en libre accès qui fait référence à l'international et auquel EMERGE a contribué (Picard et al. 2012).

Nous allons traiter cette approche en deux volets, le premier consacré à la biomasse, le second à la minéralomasse. Dans les deux cas nous détaillons la démarche pour le hêtre, et nous présentons les similitudes (ou dissimilitudes) avec d'autres essences forestières.

Estimer la biomasse : un enjeu en soi et un préalable nécessaire pour la minéralomasse

Quelques éléments théoriques

La biomasse à une découpe donnée est le produit du volume et de la densité du bois depuis la base de l'arbre jusqu'à cette découpe. L'enjeu théorique est donc de modéliser ces deux quantités : le volume jusqu'à une découpe quelconque et la densité moyenne de l'arbre depuis la base jusqu'à cette découpe, sachant qu'il y a dans les deux cas des variations liées au développement de l'arbre et à l'environnement. Cependant il existe des difficultés techniques importantes qui sont, d'une part, de quantifier le volume de branches à la découpe donnée et, d'autre part, de quantifier les variations de densité au sein d'un arbre pour obtenir une densité moyenne représentative de l'ensemble de la tige et des branches (et pas seulement celle mesurée à 1,30 m).

Les mesures nécessaires consistent à peser l'arbre dans son entier (billon par billon pour la grume, en lots par catégories de diamètre pour

les branches : 0-1 cm, 1-4, 4-7, 7-20 et supérieur à 20 cm), et à prélever des rondelles dans chaque lot pour mesurer l'infradensité¹, la proportion d'écorce, la teneur en eau et les concentrations en éléments minéraux (figure 1)². Ces mesures permettent ensuite de quantifier la biomasse sèche et la minéralomasse pour chaque compartiment (tronc, branches) et pour chaque tissu (bois, écorce), ce qui par sommation donne la biomasse et la minéralomasse de l'arbre entier. Ce sont ces quantités qui, à partir d'un échantillon d'arbres abattus, sont modélisées en fonction de mesures dendrométriques plus facilement accessibles au forestier (le diamètre à 1,30 m, la hauteur de l'arbre, la surface terrière etc.).

Tarifs, modèles : état des lieux avant EMERGE

Les études passées concernent l'élaboration de « tarifs » locaux, généralement en futaie régulière : une essence, un peuplement, une station, un stade de développement. L'échantillon des arbres mesurés

est représentatif des différentes classes sociales et tailles, de façon à construire un modèle qui permette d'estimer, à partir d'un inventaire forestier « ordinaire », la biomasse (puis éventuellement la minéralomasse) du peuplement concerné à une date donnée.

Les équations mathématiques utilisées dans ces études sont en général simples mais présentent trois écueils majeurs :

- elles sont à utiliser avec précaution en dehors du domaine de calibration et ne sont donc pas très robustes ;
- les équations sont établies par compartiment, sans contrainte spéciale de cohérence entre elles, or l'additivité ne va pas de soi et rien ne garantit qu'on puisse légitimement prédire la biomasse totale en faisant la somme des prédictions de biomasse par compartiment ;
- d'autres problèmes statistiques peuvent se poser, notamment parce que les variations des biomasses ou des minéralomasses

¹ L'infradensité est le ratio entre la masse anhydre et le volume saturé en eau d'un échantillon de bois

² à noter, d'autres compartimentations sont utilisées par la recherche, par exemple en intra-arbre, pour étudier les translocations des éléments minéraux d'un cerne à l'autre.

**Panel des données
rassemblées et des
essences étudiées**

**Les données de biomasse
disponibles**

Le tableau 1 (page 43) donne les caractéristiques principales des données disponibles pour ce travail au sein de la base de données EMERGE (cf. RDVT n° 39-40 pp. 37-47) et leur répartition par essence.

Historiquement les gros jeux de données disponibles sont ceux de l'INRA (BEF) et de FCBA; ils concernent le chêne, le hêtre, le peuplier, l'épicéa et le douglas, mais aussi le châtaignier. Un échantillon supplémentaire a été mesuré dans le cadre du projet EMERGE de façon à compléter ces premiers jeux pour le hêtre et le chêne, avec des arbres très contrastés comme des réserves de TSF et des perches, mais aussi avec des essences peu étudiées jusque-là. Il inclut aussi les hêtres et érables d'une pédoséquence sélectionnée en forêt domaniale de Montiers (55) pour

s'amplifient quand la taille des arbres augmente; ils deviennent particulièrement prégnants quand on rassemble les données d'échantillons indépendants, pas forcément équilibrés en nombre d'arbres ou en amplitude de taille.

Une approche nouvelle

Un travail pionnier réalisé en 2005 sur des clones d'eucalyptus a montré la puissance d'une approche fondée sur l'analyse simultanée de nombreux jeux de données et qui permet, par interprétations et ajustements successifs, d'aboutir à des équations mathématiques ayant une base biologique forte (Saint-André *et al.* 2005 sur l'eucalyptus) : des modèles de biomasse robustes, applicables quels que soient le peuplement, le site, le stade de développement, et n'utilisant que des informations de taille des arbres (hauteur et circonférence à 1,30 m) et d'âge.

C'est cette approche qui sera utilisée dans le cadre d'EMERGE. Les équations utilisées sont de la forme suivante : $B = \alpha + \beta(d^2h)^{\gamma}$ [1]

Le paramètre α donne la biomasse de l'arbre ou du compartiment juste avant qu'il atteigne 1,30 m. Le paramètre β (= la pente) traduit une proportionnalité directe entre la taille des arbres et la biomasse. Il englobe la forme de l'arbre et la densité du bois. Le paramètre γ , coefficient d'allométrie (Huxley, 1924), traduit une proportionnalité entre les accroissements relatifs de biomasse et de volume.

La même forme d'équation est utilisée quel que soit le compartiment de l'arbre ainsi que pour la biomasse totale avec, dans la méthode d'ajustement, une contrainte supplémentaire assurant que les équations individuelles par compartiment sont compatibles avec l'équation de biomasse totale de l'arbre (garantissant ainsi le critère d'additivité).

Quant aux autres problèmes statistiques, ils sont résolus grâce à des procédures adaptées (en particulier la pondération des erreurs par la taille des arbres).



M. Rivoire INRA-LERFoB



J-F Picard INRA-BEF

Fig. 1 : campagne de mesures de biomasse-minéralomasse à Montiers sur Saulx (à gauche) et à Bercé (à droite)
Une campagne de mesures de 100 arbres de taille moyenne (30 cm de diamètre) nécessite environ 15 ETP sur le terrain pendant 3 semaines.

pouvoir tester un éventuel effet de la fertilité, « toutes choses égales par ailleurs ». S'est ajouté enfin un échantillon issu de la collaboration avec le projet SYLVABIOM du même appel à projet ANR, avec d'autres essences et des stades de développement plus jeunes, provenant notamment de taillis ou futaie à courte rotation.

Évolution de la répartition de la biomasse avec l'âge

En première illustration de ces données, la figure 2 montre sur ces mesures les répartitions en fonction de l'âge des biomasses entre compartiments pour le hêtre et le chêne (sessile et pédonculé indifférenciés). La proportion de bois de tronc augmente avec l'âge pour se stabiliser, voire même diminuer au profit des branches dans les peuplements matures de hêtre (figure 2a).

Par comparaison, le chêne présente le même schéma évolutif, et globalement la même proportion de bois (60 à 70 %) dans les peuplements matures (figure 2 b). Quelques différences sont toutefois notables : la proportion de grosses branches est plus grande pour le chêne que pour le hêtre (30 % contre 15 % respectivement) ; la proportion d'écorce est relativement stable chez le chêne tandis qu'elle décroît au cours du temps pour le hêtre ; la proportion de branches intermédiaires (4-7cm de diamètre) diminue fortement chez le chêne et reste assez stable chez le hêtre.

Ces proportions sont toutefois très variables pour une essence donnée à un âge donné, entre individus d'un même peuplement (effet de statut social – avec clairement une courbe en cloche qui s'atténue avec le temps, voir figure 2c) et entre peuplements (différences de sylviculture et de stations – voir ci après).



Fig. 2 : partition de la biomasse mesurée (biomasse aérienne hors feuilles) ; variations avec l'âge du peuplement chez le hêtre (a) et le chêne (b), et en fonction du statut social pour le bois de tronc chez le hêtre (c)

Les données de répartition selon l'âge (a et b) proviennent de deux chronoséquences (séries de peuplements d'âges différents sur un même site) : celle du hêtre à Fougères, celle des chênes sessile et pédonculé à Perche-Trappe – Attention les classes d'âges ne sont pas les mêmes pour hêtre et chêne.

Le statut social (c) est apprécié par le ratio entre la hauteur de l'arbre et la hauteur dominante et selon la classe d'âge.

Élaboration de modèles de biomasse pour le hêtre

Un jeu de données particulièrement riche pour le hêtre

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur le hêtre pour plusieurs raisons. C'est d'abord l'essence pour laquelle nous disposons du plus large jeu de données en France mais aussi en Europe (tableaux 1 et 2) grâce à des collaborations avec la Belgique et l'Allemagne et moyennant un gros travail d'harmonisation préalable, soit au total plus de 400 arbres sur 15 sites et 39 parcelles. Son aire de répartition est large et ouvre la possibilité de travailler sur des zones éco-climatiques contrastées. Il a en outre une relative proximité vis-à-vis de l'eucalyptus, pour lequel un modèle général avait déjà été développé au Congo : proximité en termes de plan ligneux (pores diffus, module d'élasticité de 11 GPa et densité¹ de 550 kg/m³) et d'architecture (fortes réitérations). Enfin les sources de données incluent des expérimentations à comparaisons entre des sites fertilisés et des témoins (en France et en Allemagne).

La démarche de calibration et validation

Les séries de modèles du type [1] ont été calibrées peuplement par peuplement sur le jeu de données français en hêtraies non fertilisées (251 arbres, tableau 2). La série de modèles généraux a ensuite été construite en introduisant l'âge du peuplement pour décrire les variations de paramètres d'un peuplement à l'autre. Elle a alors été validée sur des jeux de données indépendants mais similaires au jeu de calibration : ceux de la pédoséquence de Montiers en France (32 arbres) et ceux des hêtraies non fertilisées d'Allemagne et de Belgique (34 et 12 arbres respectivement); noter cependant que les données belges se distinguent en ce qu'elles proviennent d'un peuplement mélangé avec du chêne. La validation sur la pédoséquence de

Montiers est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de tester des biais éventuels associés à des fertilités naturelles différentes. Enfin la série des modèles est testée sur les peuplements fertilisés (76 arbres supplémentaires), ce qui permet d'identifier si les modifications induites par la fertilisation se retrouvent dans le même sens et dans la même amplitude que sur des peuplements de fertilité naturelle différente.

Analyse des paramètres du modèle et interprétation

Lorsque l'équation [1] est ajustée peuplement par peuplement et qu'on représente les valeurs des paramètres β et γ en fonction de l'âge du peuplement, il apparaît un schéma très similaire à celui qui avait été observé pour l'eucalyptus en 2005 (figure 3) : la pente β diminue avec l'âge pour les compartiments du houppier et augmente au début puis se stabilise pour le bois de tronc et l'écorce. Par contre, l'exposant γ qui était fixe pour l'eucalyptus quel que soit le compartiment, ne l'est pas forcément sur le hêtre (il dépend légèrement de l'âge pour le houppier et l'écorce). Pour le paramètre β , la remarquable similitude entre l'eucalyptus (Congo ou Brésil) et le hêtre suggère que des essences à caractères morphologiques et de plans ligneux similaires donneront des modèles de biomasse équivalents. Ces variations du paramètre β selon l'âge de chaque peuplement permettent d'améliorer le modèle global.

Pour les compartiments total aérien et bois de tronc, il était possible d'injecter le coefficient de forme des arbres dans les équations de façon à dissocier les deux composantes du paramètre β (densité et forme des arbres). Par exemple, pour le bois de tronc, le volume réel des arbres abattus était disponible et le coefficient de forme était obtenu simplement par le ratio $f=v/d^2h$. Le modèle a donc été reformulé et ajusté sous la forme suivante :

$$B = \alpha' + \beta' \cdot f \cdot (d^2h)^{\gamma'} \quad [2]$$

L'apport du coefficient de forme des arbres élimine une grande partie des variations avec l'âge observée pour le paramètre b , notamment dans le jeune âge (figure 4). La valeur moyenne du paramètre b pour le bois de tronc (556) et son unité (kg/m³ par analyse dimensionnelle) sont donc cohérentes avec la forme construite dans l'équation [1], sachant que l'infradensité moyenne pour la ressource hêtre française est de 550 kg/m³. Mais l'incorporation du coefficient de forme n'atténue pas complètement la variabilité. Une variation avec l'âge subsiste et traduirait le fait que les tissus se modifient avec le temps conduisant à une augmentation de la densité au cours du développement des hêtres (Bouriaud et al., 2004).

Les effets des paramètres environnementaux (fertilité, sylviculture) restent aussi importants sur la densité du bois. Par exemple, le jeu de données laisse apparaître une relation entre la variabilité du paramètre β et l'indice de fertilité (estimé à partir des mesures des hauteurs dominantes et du modèle de Bontemps 2006) ou la densité du peuplement. Cette relation est positive dans les deux cas, traduisant une densité du bois de hêtre plus forte sur des sites fertiles et/ou denses. Cependant, le nombre de parcelles pour lesquelles des données de biomasse de hêtre étaient disponibles n'est pas suffisant ici pour permettre de bien séparer les deux effets potentiels.

Validation du modèle général de biomasse élaboré pour le hêtre

Le modèle [1], généralisé en prenant comme variables d'entrée le diamètre à 1,30 m et la hauteur des arbres ainsi que l'âge du peuplement, et ajusté par compartiment sur l'ensemble des données de calibration, a été appliqué sur les jeux de données de validation (tableau 3).

¹ il est fait référence deux fois dans cet article à l'infradensité du hêtre, donnée non publiée fournie par Jean-Luc Dupouey, voir article sur la masse volumique.

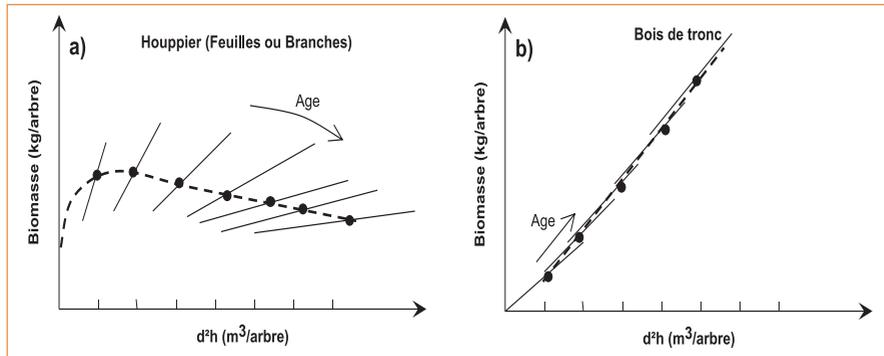


Fig. 3 : schéma général, pour l'eucalyptus et le hêtre, de l'effet de l'âge sur la pente \square des relations du type [1] exprimant la biomasse en fonction de la taille des arbres donnée par d^2h ; effet pour les compartiments du houppier (a) et pour le bois de tronc (b) (d'après Saint-André et al., 2005)

Chaque segment plein représente la relation ajustée pour un peuplement d'âge donné. Le point noir donne la valeur moyenne à ce stade de développement. La courbe en pointillé qui relie les points noirs des différents segments représente alors l'évolution dans le temps de cette valeur moyenne de biomasse par arbre (pour le compartiment considéré). On voit ici que pour le houppier, la pente \square diminue avec l'âge, tandis que pour le tronc cette pente augmente légèrement au début pour se stabiliser ensuite.

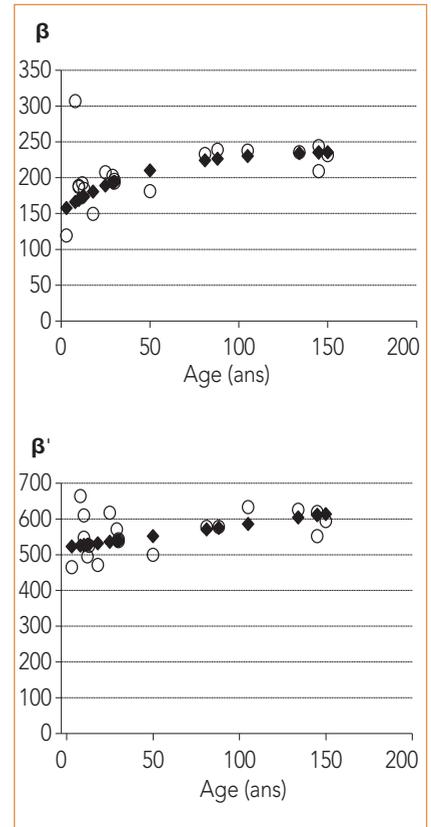


Fig. 4 : variation du paramètre \square (modèle [1]) et \square' (modèle [2]), avec le coefficient de forme pour le bois de tronc, en fonction de l'âge des peuplements

Les points noirs correspondent à l'ajustement global du modèle ([1] ou [2]) après prise en compte de l'âge dans le paramètre \square (ou \square') tandis que les points vides donnent les valeurs du paramètre ajustées localement, peuplement par peuplement

Site	Pays	Nb. de Peuplements	Altitude	Nb. d'arbres	Gamme d'âge	Gamme de Hauteur moyenne	Gamme de C130	Gamme des hauteurs dominantes	Traitements fertilisé (F) et non fertilisé (NF)
			m		ans	m	cm	m	
Aubure	France	1	1115	17	159	22.6	64.3-137	24.4	NF
Baileux	Belgique	1	300	12	73	21.2	28-157		NF
Birkenfeld	Allemagne	3	575-625	23	28 - 131	13.4-30.9	32.4-216.8		NF+F
Breuil	France	1	638	14	28	10.5	8.2-69	12.5	NF
Darney	France	3	455	24	145	29.2-31.1	41.7-205.8	34.6	NF+F
Donnersberg	Allemagne	1	597	5	87	21.7	77-125.7		NF
Fougères	France	11	150-195	143	3 - 145	1.3-28.2	2.5-184	1.9-31.3	NF
Haye	France	1	360	8	105	26.1	49.5-172.5	29	NF
Hesse	France	2	300-315	25	10 - 30	8.7-15.1	11.3-78.5		NF
Hinterweidenthal	Allemagne	1	520	10	95	18.4	28.3-77.3		NF
Johanniskreuz	Allemagne	4	453-537	32	34 - 131	13.5-33.6	25.1-210.5		NF+F
Les Potées	France	3	330	45	10-18	7.6-13.2	7.3-89		NF+F
Lugny	France	1	385	10	134	23	27.5-168.2	26.3	NF
Neuhäusel	Allemagne	2	390	10	115-116	29.7-34.1	113.7-218.3		NF
Montiers	France	4	320	32	45-57	18.8-23.5	36.1-139.5	34.7-40.5	NF

Tab. 2 : bilan des données rassemblées pour modéliser (calibration, validation) la biomasse de hêtre (France, Allemagne, Belgique)

Compartiment	Critère	Modèle hêtre : jeu de données utilisé pour l'évaluation								Transposition à l'érable		
		Belgique Peup mixte non fertilisé	Allemagne Non Fertilisés	Fertilisés	France Fertilisés	France pédoséquence de Montiers sur Saulx Alocrisol Brunisol Rendisol Rendosol				Pédoséquence de Montiers Alocrisol Brunisol Rendisol		
Total Aérien	Biais	4 %	-1 %	2 %	3 %	7 %	4 %	9 %	14 %	-6 %	-1 %	-2 %
	MEF	0,990	0,991	0,992	0,989	0,979	0,988	0,876	0,875	0,946	0,979	0,966
Bois de tronc	Biais	3 %	8 %	9 %	5 %	9 %	6 %	5 %	12 %	-12 %	-2 %	-11 %
	MEF	0,980	0,931	0,983	0,986	0,916	0,975	0,957	0,906	0,978	0,977	0,943
Écorce du tronc	Biais	-9 %	-52 %	-52 %	-11 %	-20 %	-31 %	-10 %	-8 %	2 %	11 %	6 %
	MEF	0,820	0,387	0,380	0,959	0,866	0,762	0,955	0,961	0,984	0,916	0,938
Branches	Biais	25 %	-8 %	3 %	-4 %	-1 %	8 %	19 %	27 %	4 %	1 %	16 %
	MEF	0,81	0,895	0,965	0,913	0,91	0,969	0,087	0,668	0,424	0,601	0,714
Feuilles	Biais				-12 %							
	MEF				0,863							

Tab. 3 : évaluation des modèles de biomasse du hêtre sur des jeux de données indépendants n'ayant pas servi à calibrer les équations

Le critère MEF – Modelling efficiency – mesure la dispersion des erreurs et doit être le plus proche de 1; le biais indique à quel point la relation entre mesures et simulations est biaisée par rapport à l'idéal (relation linéaire; intercept = 0 et pente = 1).

En vert l'écart du modèle (biais et erreur) n'est pas différent de 0 au seuil de confiance 5 %. **En jaune**, l'écart est significatif au seuil de 5 % mais pas au seuil de 10 %. **En brun** l'écart du modèle aux données est significatif au delà d'un seuil de 10 %.

Test sur des hêtraies non fertilisées

Globalement les prédictions s'avèrent plutôt bonnes pour des peuplements comparables au jeu de calibration et non fertilisés. Les biais ne sont significatifs que :

- pour l'écorce du tronc chez les peuplements allemands, mais les protocoles de mesure pour l'écorce sont très différents de ceux de France et de Belgique, ce qui traduit sans doute une harmonisation incomplète sur ces données;
- et pour les branches du peuplement mixte chêne-hêtre en Belgique, dont la biomasse observée est plus forte qu'attendue par le modèle.

Aucun biais n'est statistiquement détecté pour les autres compartiments ni globalement pour la biomasse totale aérienne.

Test sur des hêtraies fertilisées

Le test sur des peuplements fertilisés est particulièrement intéressant puisqu'il va au-delà d'une validation classique et permet d'analyser le sens des biais, quand il y en a. En regardant plus finement les écarts,

on constate que les modèles de biomasse aérienne totale ne sont pas biaisés pour ces peuplements fertilisés, aussi bien en France qu'en Allemagne, et que les modèles de bois de tronc et de branches sont acceptables pour le peuplement fertilisé en France. La fertilisation induit cependant :

- une proportion de bois de tronc légèrement supérieure (biais positif faible, significatif uniquement sur le jeu de donnée Allemagne – Fertilisé);
- une proportion d'écorce inférieure (biais négatif raisonnable de -11 % pour le jeu de données France – Fertilisé et très marqué pour le jeu de données Allemagne – Fertilisé, avec toujours la même limite des différences de protocoles);
- une proportion de feuilles inférieure (biais négatif mais non significatif).

Ces résultats vont dans le sens de peuplements plus efficaces après la fertilisation (plus de bois produit avec moins de feuilles), ce qui avait déjà été constaté par Sicard *et al.* (2006) sur le Douglas et l'Epicéa dans le Morvan.

Cas de la pédoséquence de Montiers

Les résultats sur la pédoséquence de Montiers sont similaires à ceux observés pour les peuplements fertilisés :

- peu de biais et un modèle performant pour la biomasse totale aérienne et le bois de tronc,
- un biais systématique et fortement négatif pour l'écorce avec un gradient du Rendosol vers l'Alocrisol,
- et un biais prononcé pour les branches avec un gradient positif de l'Alocrisol vers le Rendosol.

Le biais négatif pour l'écorce, qui va dans le sens de l'indice de fertilité croissant (du Rendosol vers l'Alocrisol) ou d'une fertilisation, pourrait être corrélé avec la vitesse de croissance et donc être potentiellement corrigeable en intégrant ce facteur dans les paramètres du modèle.

Pendant les résultats sur les branches sont antagonistes entre les peuplements fertilisés (biais légèrement négatif) et sur la pédoséquence de Montiers (biais positif et croissant de l'Alocrisol vers le Rendosol). Les raisons de cette différence ne sont

pas très clairement identifiées car la sylviculture est réputée identique entre les quatre peuplements de Montiers, dont la composition est semblable : le hêtre, très majoritaire, est en mélange avec l'érable sauf sur le Rendosol où il est quasiment pur. Une possibilité serait la pente, plus forte sur le Rendosol et le Rendisol que sur le Brunisol et l'Alocrisol (qui sont globalement sur le plateau de la pédoséquence), et qui favoriserait une proportion supérieure de branches.

Bilan pour le hêtre

En conclusion, la mise en commun des données à l'échelle européenne a permis d'établir pour le hêtre un jeu d'équations robustes qui prend en compte l'âge des peuplements et qui dépasse en performance toutes les équations existantes à ce jour (Genet et al. 2011). Ce jeu d'équations s'accompagne d'une analyse fine des biais sur les jeux de données en validation (Genet et al. 2014 en préparation).

Les équations de biomasse aérienne totale et de bois de tronc peuvent être utilisées pour les bilans de carbone (IFN, ONF, experts forestiers et en environnement) car elles sont peu mises en défaut quel que soit le jeu de données présenté en validation (jeux de données européens, fertilité des sols, fertilisation). Pour les branches et les feuilles, la robustesse est moins facile à obtenir, même si les équations proposées sont les plus performantes à ce jour pour le hêtre, et le domaine de confiance des modèles est restreint au domaine de calibration (peuplements majoritairement sur sols acides). Une utilisation en dehors de ce domaine est possible sous réserve de vérifier sur un petit nombre d'arbres (5 à 10) que le biais reste raisonnable (<10 %), ce qui, vu la logistique à mettre en œuvre, n'est pas une simple formalité. Cependant, sur l'ensemble des peuplements traités dans le projet EMERGE (plus grand jeu de données en Europe),

une correction ne s'avère nécessaire que pour trois peuplements : ceux de la pédoséquence de Montiers sur rendosol et rendisol, ainsi que pour le peuplement mixte de Belgique. Enfin, l'équation pour l'écorce est la moins robuste de la série, ce qui renvoie aux difficultés d'harmonisation des protocoles de mesures.

Généralisation des modèles de biomasse

Des modèles d'inspiration identique au hêtre sont en cours d'élaboration pour d'autres essences forestières, dans le cadre du projet EMERGE : le chêne (sessile et pédonculé, indifférenciés), le douglas (*Pseudotsuga menziesii*), le peuplier (cultivars Beaupré et I214), l'eucalyptus (clones FCBA) et le pin maritime (*Pinus pinaster*). Ces 5 essences et le hêtre appartiennent chacune à des groupes différents de la classification obtenue en début de projet sur la base de critères architecturaux et de propriétés du bois. Elles représentent également plus de 50 % du volume sur pied en France (IGN 2012) et sont celles pour lesquelles les données de biomasse sont les plus importantes.

Les premiers résultats montrent des comportements assez semblables à ceux observés pour le hêtre mais avec toutefois des différences qui vont permettre d'aller plus loin dans la compréhension des variations et la généralité des équations. En arrivant à généraliser les équations pour ces essences, on peut ensuite raisonnablement espérer une calibration rapide, et à moindre coût, des équations pour une autre essence. À titre d'exemple, les équations « hêtre » appliquées à l'érable sycomore sur les peuplements de Montiers sur Saulx donnent des résultats très satisfaisants (tableau 3), même meilleurs que ceux obtenus sur le hêtre du fait d'une densité du bois inférieure pour l'érable compensant les erreurs observées sur le hêtre pour ce site.

Conclusions pour la biomasse

Les travaux réalisés dans le cadre du projet EMERGE ont fait avancer les outils de quantification de la biomasse des grandes essences forestières françaises. Nous disposons actuellement d'un système d'équations validé pour le hêtre et en cours de finalisation pour 5 autres grandes essences, et ce, en remplacement d'une multitude d'équations calibrées pour diverses situations. Les premiers résultats d'utilisation des équations du hêtre sur l'érable laissent espérer aussi une bonne généralité par groupe d'essences, ou en tout cas des formes assez robustes pour adapter rapidement les modèles aux essences dites « orphelines » (avec peu de données).

À ce stade le lien entre modèles de volume et de biomasse n'a été qu'ébauché à travers l'utilisation du coefficient de forme des arbres. Cependant cette voie est aussi à creuser, en combinaison avec les travaux sur la densité et les proportions d'écorce, afin de pouvoir calculer la biomasse du tronc à différentes découpes et en séparant le bois de l'écorce. Les outils statistiques à notre disposition permettent à présent d'envisager ce type de solution et les équations mathématiques sont en cours de construction. Un enjeu important restera de trouver une autre variable que l'âge pour rendre compte du stade de développement, les données d'âge étant difficiles à obtenir ou peu fiables.

Au final, si nos résultats n'ont encore qu'un caractère intermédiaire, nous disposons déjà d'un modèle général de biomasse totale, fonction de la taille des arbres et de l'âge des peuplements, pour le hêtre et l'érable, et bientôt pour le chêne, le douglas, le pin maritime, le peuplier et l'eucalyptus. Nous disposons aussi d'une base solide pour les travaux sur la minéralomasse (ci-après) et, au-delà, pour les évaluations prospectives liées à la problématique du carbone.

Modèles de concentration en éléments minéraux

Estimer la minéralomasse

La biomasse étant modélisée, la seconde étape consiste à établir des modèles de concentration en différents éléments minéraux selon les compartiments de l'arbre, afin de déduire la répartition de minéralomasse dans l'arbre et de calculer par exemple les exportations selon différentes hypothèses de récolte.

Quelles données pour la minéralomasse ?

La base de données pour la minéralomasse (tableau 1) est plus réduite que pour la biomasse et comprend « seulement » 1912 arbres de 24 essences (14 feuillus et 10 résineux), soit plus de 6 000 échantillons. Une fois harmonisés pour pouvoir comparer les essences entre elles, 4 000 échantillons sont utilisables pour étudier les facteurs de variations des concentrations en éléments minéraux pour un compartiment donné ; comme le hêtre représente à lui seul la moitié de l'information disponible, il est systématiquement mis à part dans les graphiques généraux (figure 5).

En première approche, une très forte variabilité

La variabilité est très forte pour tous les éléments (en moyenne, coefficients de variation de 55 %). Le calcium (Ca), le manganèse (Mn) et le phosphore (P) sont les plus variables avec des coefficients de variation dépassant 100 %. Les feuilles et les aiguilles sont les plus concentrées, quels que soient les éléments minéraux, et sont en moyenne 8 fois plus concentrées que le bois de tronc. Là encore, la variabilité est très forte avec un ratio feuille/bois variant de 4 (Ca résineux) à 16 (Mn Feuillus). Il existe également un gradient en fonction de la taille du compartiment : plus le diamètre du tronc ou des branches est petit, plus les concentrations en éléments minéraux sont fortes, aussi bien dans le bois que dans l'écorce. Enfin, l'écorce est plus concentrée

que le bois pour un compartiment donné. Le ratio écorce/bois est de 5,6 en moyenne avec une forte variabilité (1,7 pour le Mg du hêtre et 18,7 pour le Ca des feuillus), et il semble que ce ratio se conserve le long du gradient de taille.

Modèles de concentration en éléments minéraux pour le hêtre et généralisation

Là encore, c'est pour le hêtre que nous disposons du jeu de données le plus important : 7 sites, 11 parcelles, âges de 10 à 159 ans, pour un total de 146 à 212 mesures de concentrations dans le tronc et dans les branches selon l'élément minéral considéré. Cela permettait d'analyser et de modéliser finement les variations des concentrations dans les arbres (une publication est en cours : Wernsdörfer et al. 2014). Les modèles ont été calibrés sur l'ensemble des données disponibles en fonction principalement de la taille du compartiment et du tissu, mais des effets supplémentaires des sites et stades de développement ont été testés dans les modèles.

Les premiers facteurs de variation des concentrations : le tissu puis la taille

Le premier facteur de variation retenu dans les modèles est le tissu (bois ou écorce) et ensuite le diamètre du compartiment. La forme de cette relation varie selon les éléments minéraux (figure 6), mais il a été possible de trouver une formulation mathématique unique pour tous les éléments, continue en fonction du diamètre du compartiment et avec des paramètres ayant une forte signification biologique (avec une distinction explicite du bois et de l'écorce). Cela donne au total 21 équations soit, pour chacun des éléments N, S, P, K, Ca, Mg, Mn, un modèle de concentration dans le bois, un pour l'écorce, et un pour l'ensemble (bois + écorce).

Effet supplémentaire du site

Au-delà de ces deux premiers facteurs, les modèles sont très fortement améliorés en introduisant un paramètre « effet site » (figure 6). Cette prise en compte se traduit par des niveaux différents des valeurs prédites selon les sites. La performance des modèles est relativement bonne pour 8 équations sur 21, mais elle reste faible comparée aux équations de biomasse. Les concentrations totales (bois+écorce) sont plus facilement prédites que les concentrations par tissu. En moyenne l'erreur résiduelle (RMSE) représente 15 à 35 % de la valeur moyenne des concentrations.

La pédoséquence de Montiers a permis d'explorer plus en détail l'effet site pour le hêtre et montre que, pour la plupart des éléments considérés, les concentrations dans l'arbre ne présentent pas de tendance le long du gradient de sol (voir figure 7 (page 55) l'exemple du potassium et du sodium). Seules les concentrations en Ca et Mn sont significativement différentes entre les quatre peuplements et bien organisées le long du gradient de sols : le calcium a tendance à s'accumuler dans l'écorce selon un gradient sol brun acide (Alocrisol) vers rendzine (Rendosol), tandis que le manganèse s'accumule dans le bois et dans l'écorce selon un gradient inverse au calcium.

Quelle interprétation biologique de ces premiers résultats ?

Ces résultats suggèrent que le calcium et le manganèse sont prélevés « passivement » (avec le flux d'eau) par les arbres, ce qui explique en grande partie la forte variabilité observée en ce qui les concerne (figure 7) et permet d'envisager l'élaboration de modèles génériques et robustes pour ces deux éléments en les reliant directement aux analyses du sol.

■ Feuillus ■ Hêtre ■ Résineux

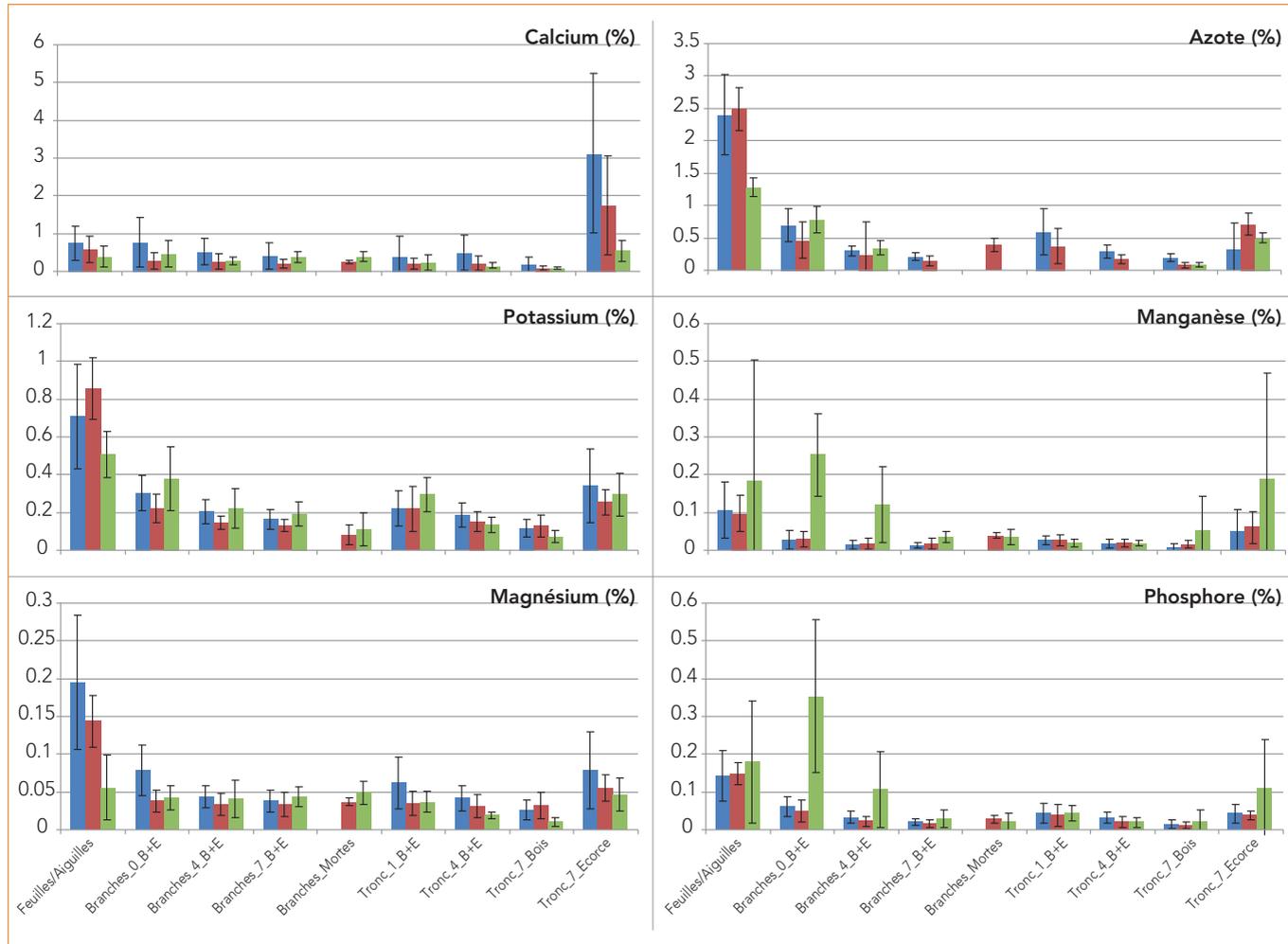
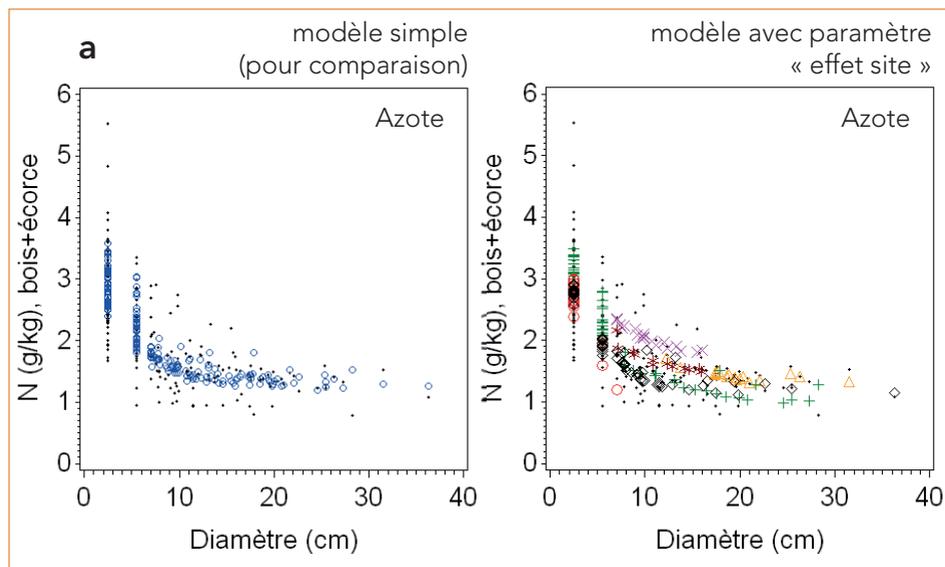


Fig. 5 : concentration moyenne en calcium, azote, potassium, manganèse, magnésium, et phosphore dans les différents compartiments du houppier et du tronc, pour le hêtre, les autres feuillus et les résineux (données INRA BEF – EMERGE – SYLVABIOM) Concentrations exprimées en pourcentage de la masse séchée à 65 °C ; échelles différentes selon les éléments. Feuillus (hors hêtre) = aulne, bouleau, charme, chênes sessile et pédonculé, chêne pubescent, chêne vert, érable, eucalyptus, frêne, robinier, tilleul, tremble. Résineux = cupressocyparis, douglas, épicéa, mélèze, pin d’Ale, sapin pectine, sequoia

Fig. 6 : concentrations totales (bois et écorce) par élément en fonction du diamètre de la section de bois des échantillons de hêtre ; comparaison des valeurs prédites par le modèle aux valeurs mesurées (points noirs) En (a), les prédictions pour l’azote sont illustrées, à gauche, pour le modèle simple (points bleus) et, à droite, pour le modèle plus complet avec paramètre « effet site » qui rend mieux compte de la variabilité des données. En (b), les exemples du potassium, du phosphore et du calcium ne sont présentés qu’avec l’effet site. Dans tous les cas, la concentration en éléments baisse quand la taille du compartiment augmente.



À l'inverse, pour tous les autres éléments minéraux, la prise en compte des effets sites nécessitera l'élaboration de modèles mécanistes d'interaction sol-plante, nettement plus complexes et intégrant des processus comme les translocations, le prélèvement par la plante en fonction de la profondeur du sol et son statut hydrique, les retours par les litières et la minéralisation de la matière organique, la recharge par l'altération des minéraux du sol. Ce type de modèle est en cours de développement; l'usage de plus en plus courant des isotopes (y compris pour les cations – Van der Heijden *et al.* 2013) va permettre de progresser dans la connaissance des mécanismes biologiques et par conséquent dans la prédiction des teneurs en éléments minéraux dans les arbres.

En attendant ces modèles mécanistes plus complexes, les résultats du projet permettent d'avoir des modèles moyens, fonction des tissus et de la taille du compartiment, avec des différences de niveau par site.

Et pour les autres essences ?

Les premiers résultats sur les autres essences montrent que la forme de la relation, trouvée pour le hêtre, avec la taille du compartiment, le tissu et le site en variables explicatives,

est tout à fait générique et permet de décrire les variations de concentrations en fonction du diamètre. La même limite que pour le hêtre apparaît rapidement : en dehors du calcium et du manganèse, il n'est pas possible d'expliquer simplement les différences entre sites.

Ce constat a été fait tout d'abord pour l'érable, présent en mélange avec le hêtre sur la pédoséquence de Montiers, et qui montrait exactement les mêmes tendances que pour le hêtre avec des niveaux d'accumulation semblables (même si des différences peuvent être notées selon le tissu et l'élément considérés). D'autres données, récoltées dans le cadre du projet SYLVABIOM, confirment ces résultats sur d'autres essences : par exemple sur des données de séquoia, le calcium s'accumule dans l'écorce sur sol calcaire (Tarascon), tandis que le manganèse s'accumule dans le bois et dans l'écorce sur un sol plus acide (Bel Air).

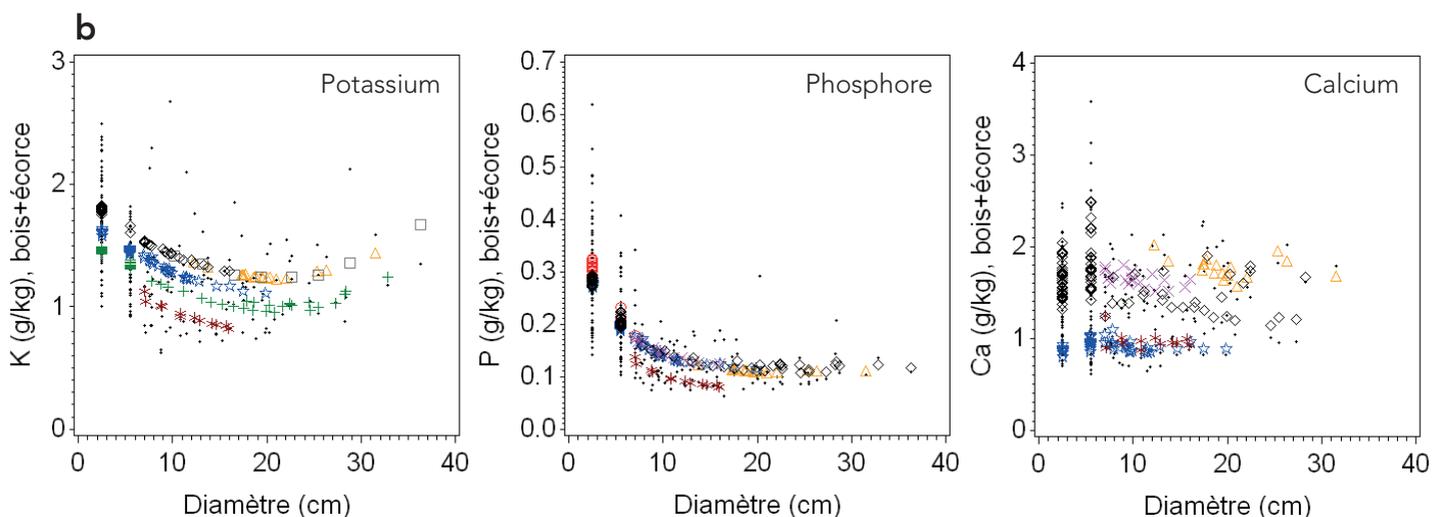
Un premier bilan sur ces modèles de minéralomasse

Les premières interprétations de ces résultats et les tests des modèles sur une plus large gamme d'essences ouvrent des voies importantes pour la recherche : des idées de mécanismes

plus complexes apparaissent pour analyser les variations observées pour les éléments que les arbres prélèvent de manière « active » dans le sol, selon divers processus biologiques ou biochimiques.

En attendant ces outils, il est d'ores et déjà possible d'utiliser les modèles construits pendant le projet EMERGE, dont la formulation très générique en continu permet de jauger l'effet site sur un petit nombre de mesures minérales : mesures à réaliser sur des branches fines (1 à 4 cm), des branches moyennes (>7 cm) et du tronc (rondelle en début de grume et à la base de l'arbre). Ces mesures donnent la translation qui permet d'adapter les équations à chaque site. Les progrès rapides des mesures spectroscopiques infrarouge sur ce type d'échantillons (un autre apport du projet EMERGE) permettront d'obtenir ces informations à moindre coût.

D'ailleurs, même si l'effet site ajoute une certaine variabilité des concentrations, l'effet principal donné par la taille des compartiments et le tissu concerné permet déjà de faire des analyses prospectives intéressantes concernant les niveaux d'exportation selon différentes hypothèses de récolte sur un même site.



Inventaire – Hêtres sur pied								
	Biomasse totale t/ha	Calcium kg/ha	Potassium kg/ha	Manganèse kg/ha	Magnésium kg/ha	Sodium kg/ha	Phosphore kg/ha	Soufre kg/ha
Alocrisol	104,35	200,76	139,40	28,57	13,24	6,86	25,08	18,68
Brunisol	130,95	287,60	171,81	38,77	13,94	8,68	30,10	21,76
Rendisol	152,67	556,58	224,55	58,27	5,84	7,07	37,99	28,16
Rendosol	128,98	534,57	190,13	40,01	3,18	13,27	38,40	24,74
Efficience (kg d'élément/t de biomasse)								
	Ca	K	Mg	Mn	Na	P	S	
Alocrisol	0,52	0,75	3,65	7,88	15,22	4,16	5,58	
Brunisol	0,46	0,76	3,38	9,39	15,09	4,35	6,02	
Rendisol	0,27	0,68	2,62	26,15	21,59	4,02	5,42	
Rendosol	0,24	0,68	3,22	40,62	9,72	3,36	5,21	

Inventaire – Erables sur pied								
	Biomasse totale t/ha	Calcium kg/ha	Potassium kg/ha	Manganèse kg/ha	Magnésium kg/ha	Sodium kg/ha	Phosphore kg/ha	Soufre kg/ha
Alocrisol	25,30	83,38	46,96	9,70	2,31	1,62	8,14	7,29
Brunisol	12,21	47,12	23,52	4,64	0,89	0,80	3,99	3,49
Rendisol	10,37	41,03	16,14	5,16	0,16	0,48	2,43	2,74
Rendosol	11,36							
Efficience (kg d'élément/t de biomasse)								
	Ca	K	Mg	Mn	Na	P	S	
Alocrisol	0,30	0,54	2,61	10,93	15,62	3,11	3,47	
Brunisol	0,26	0,52	2,63	13,72	15,21	3,06	3,49	
Rendisol	0,25	0,64	2,01	65,08	21,70	4,26	3,79	

Eclaircies ONF de 1981 à 2006 – Tronc (Bois + Ecorce) + branches >7 cm								
	Biomasse totale t/ha	Calcium kg/ha	Potassium kg/ha	Manganèse kg/ha	Magnésium kg/ha	Sodium kg/ha	Phosphore kg/ha	Soufre kg/ha
Alocrisol	81,92	172,12	107,53	21,46	10,10	5,58	12,59	13,48
Brunisol	116,48	283,23	141,90	33,95	11,95	7,85	17,06	17,65
Rendisol	116,48	409,39	165,84	44,25	3,94	4,15	20,16	18,91
Rendosol	69,68	306,74	92,27	19,51	1,65	8,33	12,45	12,29

Simulations d'exportations totales – y compris menus bois								
	Biomasse totale t/ha	Calcium kg/ha	Potassium kg/ha	Manganèse kg/ha	Magnésium kg/ha	Sodium kg/ha	Phosphore kg/ha	Soufre kg/ha
Alocrisol	110,15	259,84	164,17	33,90	16,06	7,68	32,90	22,94
Brunisol	154,49	425,31	221,89	49,05	18,99	10,92	40,72	29,10
Rendisol	154,49	647,90	245,96	62,90	6,70	7,54	43,03	31,87
Rendosol	94,34	451,87	152,78	30,90	2,56	10,34	31,95	20,29

Tab. 4 : évaluation de la biomasse, minéralomasse et de l'efficience d'utilisation des minéraux pour le hêtre et l'érable sur la pédoséquence de Montiers (50 ans en 2009) et calcul des exportations en éclaircie

Les données de récolte ONF permettent de calculer l'exportation réelle (bois fort) en éléments minéraux et de simuler une exportation totale, menus bois compris à chaque récolte. Manque l'azote, dont les mesures de calibration locale devaient se faire par spectrométrie infrarouge; les délais de mise au point de la méthode n'ont pas encore permis de l'intégrer à ce bilan.

En guise de conclusion, exemple d'application sur la pédoséquence de Montiers

La pédoséquence de Montiers est un exemple didactique de l'usage de ces modèles pour en déduire des informations sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Les modèles de biomasse et minéralomasse calibrés localement sur les 4 sites de la pédoséquence pour le hêtre et l'érable sont utilisés afin d'éviter tout biais. Pour les estimations à l'échelle des peuplements, ils sont appliqués à des inventaires sur pied réalisés aux mêmes endroits que les arbres échantillons sur des placettes de 2500 m² (3 placettes pour l'alocrisol; 4 placettes pour le brunisol; 3 placettes pour le rendisol et 2 placettes pour le rendosol).

Par ailleurs les données des éclaircies passées (inventaire des arbres prélevés en nombre de tiges par essence et par classe de diamètre) ont été fournies par l'ONF. Les hauteurs des arbres sont évaluées à l'aide d'un modèle hauteur/circonférence vérifié et épuré des biais à l'aide des arbres mesurés en hauteur sur les mêmes parcelles. Les modèles sont alors appliqués aux inventaires et donnent le bilan des éléments tableau 4.

La biomasse totale au moment des inventaires (2009) s'échelonne de 130t/ha (alocrisol) à 163t/ha (rendisol). Les érables représentent environ 6 % (rendisol) à 20 % (alocrisol) de cette biomasse sur pied. On appelle efficacité d'un élément minéral, le rapport entre la biomasse totale produite et la quantité totale de l'élément. L'efficacité du hêtre est supérieure à celle de l'érable pour tous les éléments minéraux sauf pour le manganèse (tous les sols) et le phosphore (rendisol). Pour les deux essences, cette efficacité augmente lorsque la disponibilité de l'élément diminue dans le sol (Ca sur alocrisol ou brunisol, Mn sur rendosol ou rendisol) mais le fait que ces deux éléments sont prélevés de façon passive ne signifie pas forcément



Fig. 7 : concentration moyenne en Ca et K (en haut) et en Mn et Na (en bas) dans le bois de tronc et dans l'écorce le long de la pédoséquence de Montiers, pour le hêtre

Les variations de Ca et Mn montrent une forte tendance avec ce gradient de sol, tandis que celles de K et Na, sans tendance particulière, sont représentatives de ce qu'on constate pour la plupart des éléments.

un mécanisme du type : moins de ressources, plus d'efficacité. En 50 ans (âge approximatif du peuplement), la biomasse exportée (tronc et branches de diamètre > 7 cm) lors des éclaircies est de 70t/ha (rendosol) à 116t/ha (rendisol ou brunisol). Pour tous les éléments minéraux cela représente moins de 50kg/ha, sauf pour le calcium (172kg/ha sur alocrisol à 409kg/ha sur rendisol) et le potassium (107 kg/ha sur rendosol à 165 kg/ha sur rendisol).

Comme illustré ici, ces outils peuvent être utilisés sur des inventaires forestiers pour calculer les immobilisations (ou stockage) en carbone et en éléments minéraux dans les arbres ou des exportations selon différents scénarios de récolte.

Mais un usage plus prospectif consiste à coupler ces modèles à un moteur de croissance (comme, pour le hêtre, Fagacées sur la plate-forme CAPSIS), afin de simuler différents scénarios sylvicoles pour évaluer les quantités exportées au cours de la vie d'un peuplement pour chacun des éléments considérés. Cela aidera au choix des scénarios de sylviculture et de récolte,

pour assurer une gestion durable. Selon les sols, les objectifs, et pour certains éléments limitants, cela peut aussi servir à raisonner des amendements de remédiation. L'enjeu est de développer une analyse systémique de toute la récolte en bois (bois d'œuvre, bois industrie et bois énergie), et non pas seulement des menus bois. Ce travail est en cours dans le cadre d'une thèse sur le hêtre, avec l'objectif d'intégrer ensuite les mêmes outils sur le chêne et le douglas.

Laurent SAINT-ANDRÉ
Astrid GENET
Arnaud LEGOUT
Jacques RANGER
INRA, UMR 1138-BEF
54280 Champenoux
prenom.nom@nancy.inra.fr

Holger WERNSDÖRFER
Mathieu JONARD
Quentin PONETTE
Paul-Igor HOUNZANDJI
Université catholique de Louvain
Belgique

Christine DELEUZE
ONF, département R&D

Remerciements

Les auteurs sont très reconnaissants aux collègues qui ont apportés des données (par exemple avec le projet SYLVABIOM) et qui ont participé aux analyses des modèles de biomasse : L. Franoux, S. Conil, C. Nys, MP. Turpault, C. Calvaruso de l'INRA-BEF ; Longuetaud F., Ph. Santenoise de l'INRA-LERFoB ; A. Bouvet, A. Berthelot, de FCBA ; J.-C. Bastien de l'INRA-Orléans ; P. Vallet d'Irstea Nogent.

Les unités BEF et LERFoB bénéficient d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Bibliographie

Bontemps J.-D. « Evolution de la productivité des 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 ». l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, spécialité Sciences Forestières, 2006. <http://pastel.paristech.org>

Bouriaud O., Breda N., Le Moguedec G., Nepveu G., 2004. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees-Structure and Function* vol. 18, pp. 264-276

Genet A., Wernsdörfer H., Mothe F., Bock J., Ponette Q., M. Jonard, Nys C., Legout A., Ranger J., Vallet P., Saint-André L. 2011. Des modèles robustes et génériques de biomasse en vue d'évaluer les potentialités en bois-énergie des forêts françaises –

Exemple du hêtre et application à une chronoséquence de l'ouest de la France. *Revue Forestière Française*, vol. LXIII, pp. 179-190

Genet A., Jonard M., Wernsdörfer H., Gelhaye L., Ranger J., Longuetaud F., Bonne F., Motz A., Turpault M.-P., Conil S., Saint-André L., 2014. Aboveground biomass and nutrient content partitioning in beech and maple trees along a soil gradient in the North-East of France. In prep (*Annals of Forest Science – Num special EMERGE*)

Genet, A., H. Wernsdörfer, M. Jonard, H. Pretzsch, M. Rauch, Q. Ponette, C. Nys, et al. « Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe ». *Forest Ecology and Management* vol. 261 n° 7, pp. 1188-1202 doi:10.1016/j.foreco.2010.12.034

Henry M., Bombelli A., Trotta C., Alessandrini A., Birigazzi L., Sola G., Vieilledent G., Santenoise P., Longuetaud F., Valentini R., Picard N., Saint-André L., 2013. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest - Biogeosciences and Forestry* vol. 6 n°5 pp. 326-330. doi : 10.3832/ifer0901-006

Huxley J. S. 1924. Constant differential growth-ratios and their significance. *Nature*, vol. 114 pp. 895-896

Lossaint P, Rapp M, 1971. Répartition de la matière organique, productivité et cycle des éléments minéraux dans des écosystèmes de climat méditerranéen. In : productivité des écosystèmes forestiers, actes colloque Bruxelles, 1969 (Ecologie et conservation, 4). Unesco, 1971

Picard N., Saint-André L., Henry M. 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction. FAO et CIRAD, Rome, Montpellier, 222 p.

Saint-André L., M'Bou A.T., Mabiata A., Mouvondy W., Jourdan C., Rousard O., Deleporte P., Hamel O., Nouvellon Y., 2005. Age-Related Equations for above- and below-Ground Biomass of a *Eucalyptus* Hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management* vol. 205, n° 1-3 pp. 199-214. doi:10.1016/j.foreco.2004.10.006

Sicard C., Saint-André L., Gelhaye D., Ranger J., 2006. Effect of initial fertilisation on biomass, nutrient content and nutrient-use efficiency of even-aged Norway spruce and Douglas-fir stands planted in the same ecological conditions. *Trees-Structure and Function* vol. 20 pp. 229-246

van der Heijden G., Legout A., Midwood A.J., Craig C.A., Pollier B., Ranger J., Dambrine E., 2013. Mg and Ca root uptake and vertical transfer in soils assessed by an in situ ecosystem-scale multi-isotopic (Mg-26 & Ca-44) tracing experiment in a beech stand (Breuil-Chenue, France). *Plant and Soil* vol. 369 n° 1-2 pp. 33-45

Wernsdörfer H., Genet A., Jonard M., Legout A., Nys C., Saint-André L., Ponette Q., 2014. An integrated approach to the modelling of nutrient concentrations in roundwood based on roundwood diameter and tissue proportion. Evidence for an additional site-age effect in the case of *Fagus sylvatica*. *Forest Ecology and Management* (en cours de révision pour *Forest Ecology and Management*)

Un scanner tomographique à rayons X pour l'analyse de la structure interne des arbres

Que vient faire un honnête scanner tomographique médical dans ce dossier sur la dendrométrie ? Médical ou pas, c'est un outil très performant pour analyser la structure interne des arbres, et dont les applications sont nombreuses. Dans le cadre d'EMERGE, il a permis de « cartographier » les variations de densité et d'humidité dans l'arbre, ce qui sera très utile pour affiner les modèles de biomasse.

Le premier enjeu du projet ANR EMERGE était d'élaborer des modèles génériques et cohérents pour l'estimation des volumes et biomasses des essences forestières. Mais, parallèlement, il s'agissait aussi d'explorer les avancées métrologiques apportées par le laser terrestre d'une part et le scanner tomographique à rayons X d'autre part.

Le laser (ou lidar) terrestre permet d'appréhender, de façon non destructive, les grandeurs 3D des arbres sur pied (voir RDVT n° 39-40, pp 68-78). Ici, nous nous intéressons à la tomographie à rayons X, un outil prometteur pour analyser (mesures destructives) la structure interne de troncs d'arbres. Nous présentons les principaux travaux entrepris dans ce domaine et leurs résultats.

En ce qui concerne plus spécialement les travaux conduits au titre du projet EMERGE, les mesures du scanner permettent d'accéder à la variabilité de la structure interne des arbres et d'établir en particulier des « cartes » de densité et d'humidité. Ces travaux ont également donné l'occasion d'explorer plus avant les questions relatives à la masse volumique et à ses variations : cet aspect fait l'objet d'un article distinct dans ce même dossier.

L'outil scanner X

Le scanner à rayons X que nous avons utilisé est un tomographe médical de type GE BrightSpeed Excel, tout à fait identique à ceux qu'on trouve dans les hôpitaux (figure 1). C'est le seul scanner en France à être dédié à l'analyse du bois. L'appareil a été acquis par le LERFoB en 2007 à l'initiative de Jean-Michel Leban grâce à

un financement de l'INRA, de la région Lorraine, du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) et du ministère de l'Agriculture.

À l'étranger, quelques scanners sont également utilisés pour des études portant sur la croissance des arbres et la qualité du bois produit. Ce sont soit des scanners médicaux comme celui de l'Institut National de



Fig. 1 : le scanner à rayons X du LERFoB

la Recherche Scientifique (INRS) à Québec (Duchateau *et al.* 2013), soit des prototypes conçus plus spécialement pour l'analyse de billons de bois comme le scanner développé par Microtec¹ et utilisé au FVA de Freiburg en Allemagne.

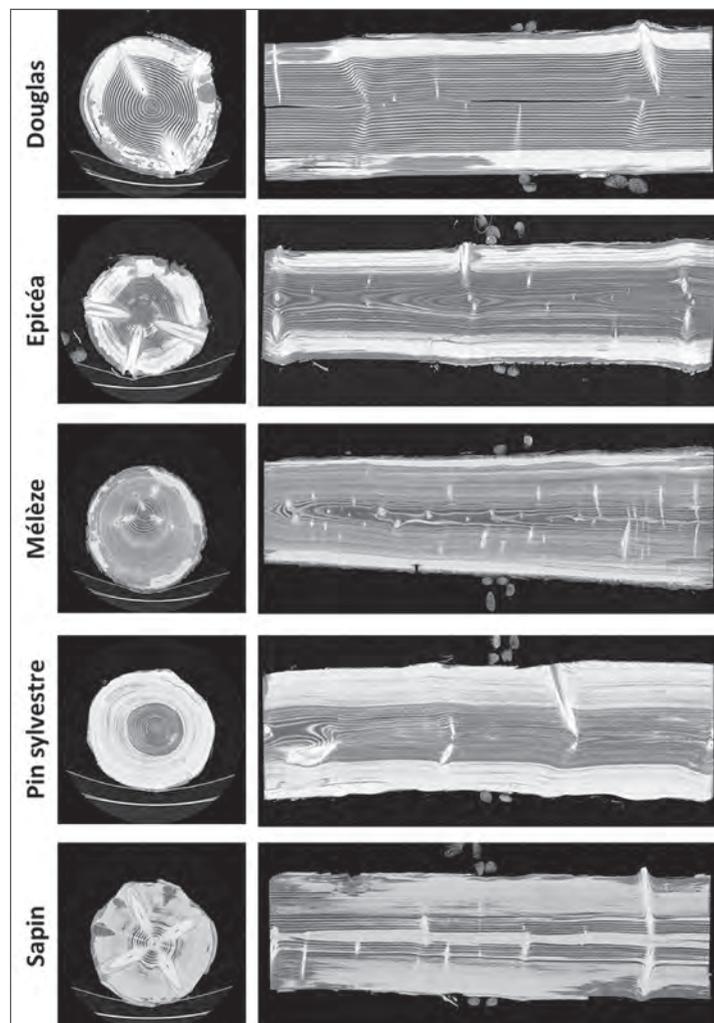
Par ailleurs, certaines scieries sont déjà équipées avec des scanners industriels à rayons X. En France, la scierie Siat Braun² à Urmatt s'est équipée récemment d'un tel scanner. Plusieurs études ont en effet démontré que le fait de connaître la structure interne d'un billon, notamment la localisation des plus gros défauts, avant son sciage permet d'améliorer significativement la production (de l'ordre de 15 à 18 %), à la fois en valeur et en volume, en choisissant une orientation particulière pour la découpe (Bhandarkar *et al.* 1999).

Le scanner permet d'analyser des objets tels que des disques, planches ou billons (1,50 m de long, 45 cm de diamètre, 180 kg au maximum) à l'état frais ou sec et d'obtenir en quelques minutes une image volumique de l'objet sous forme d'une série de coupes transversales de 512 x 512 pixels. La distance entre les coupes peut varier entre 0,6 et 10 mm et la taille d'un pixel entre 0,2 et 1 mm suivant la dimension de l'objet. La vitesse d'acquisition est de l'ordre de 1 à 2 cm/s. Les images obtenues sont en niveaux de gris (figure 2). Une calibration (Freyburger *et al.* 2009) permet de convertir les niveaux de gris en valeurs des masses volumiques en kg.m⁻³. Les zones les plus denses (nœuds et aubier frais chez les résineux par exemple) apparaissent en clair, les zones plus tendres ou plus sèches apparaissent en sombre.

Cet outil, maintenant intégré au plateau technique Xyloscience, est accessible à tous travaux de recherche (excepté sur des êtres vivants) pour un coût très modéré (http://www.nancy.inra.fr/foret_bois_lerfob/plateforme_xylosciences).

Méthodologies développées pour l'analyse du bois

En vue d'utiliser le scanner médical pour l'analyse du bois, plusieurs outils logiciels ont dû être développés, notamment dans le cadre du projet EMERGE. La plupart ont été conçus sous forme de plugins pour le logiciel libre d'analyse d'image ImageJ (Schneider *et al.* 2012) et sont accessibles sur le site du LERFoB³. Ces outils permettent en particulier de : cartographier la densité et l'humidité du bois, repérer les nœuds et analyser leurs ramifications, détecter



Définitions

$$\text{Taux d'humidité } H = m_{\text{eau}}/m_0$$

$$\text{avec } m_{\text{eau}} = m_H - m_0$$

où m_{eau} est la masse d'eau dans un échantillon de masse m_H au taux d'humidité H et m_0 est la masse de matière ligneuse de l'échantillon.

À l'état frais H est variable et est souvent supérieur à 100 %, à l'état anhydre $H = 0$ %, à l'état sec à l'air H est généralement proche de 12 %.

$$\text{Masse volumique} = m_H/V_H$$

où V_H est le volume de l'échantillon au taux d'humidité H .

$$\text{Infra-densité} = m_0/V_{\text{sat}}$$

où V_{sat} est le volume saturé de l'échantillon.

Taux de remplissage en eau : $m_{\text{eau}}/m_{\text{eau max}}$

$$\text{avec } m_{\text{eau max}} = (V_{\text{sat}} - V_{\text{bois}}) \cdot \rho_{\text{eau}} = (V_{\text{sat}} - m_0/\rho_{\text{bois}}) \cdot \rho_{\text{eau}}$$

où $\rho_{\text{bois}} = 1530 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ sont les masses volumiques de la matière ligneuse (parois) et de l'eau respectivement.

Fig. 2 : exemples pour cinq essences résineuses de coupes transversales (à gauche) et de planches virtuelles reconstituées à partir des séries de coupes transversales (à droite)

¹ <http://www.microtec.eu/>

² <http://www.siatbraun.fr/>

³ <http://www.nancy.inra.fr/foret-bois-lerfob/Zoom-sur/Outils-pour-le-traitement-d-images/Tomographie-X>

la moelle et analyser la croissance primaire (en hauteur), détecter les cernes annuels et analyser la croissance secondaire (en grosseur). La cartographie des densités et de l'humidité est au cœur de la contribution du scanner tomographique au projet EMERGE ; cependant, avant d'en présenter les résultats, il est utile d'évoquer aussi les autres aspects pour illustrer plus largement les potentialités du scanner dans l'exploration de la structure interne des arbres. Exploration qui, jusqu'ici, nécessite des manipulations extrêmement laborieuses alors qu'elle est indispensable à la compréhension de la dynamique de branchaison, de la mise en place du bois, et du défilement (voir RDVT n° 39-40 p.21).

Cartographier la densité et l'humidité du bois

Les coupes tomographiques peuvent être considérées comme des cartes de variation de la densité de la matière (bois + eau). Lorsque le bois est sec (0 % d'humidité), la masse volumique du bois se lit directement à partir des valeurs de niveaux de gris (après calibration). Pour séparer l'eau du bois, mesurer l'infra-densité⁴ ou analyser les changements entre deux états (ex : sec/humide, sain/biodégradé, avant/après traitement thermique), il est nécessaire de comparer deux images du même échantillon malgré les déformations et endommagements qu'il a pu subir (figure 3). Pour y parvenir la solution que nous avons adoptée consiste à diviser la pièce en un maillage d'éléments (rectangulaires pour une planche, trapézoïdaux pour un disque ou un billon) répété à l'identique sur les deux images puis de comparer les images élément par élément. Un détournage manuel préalable de l'objet à sectoriser est nécessaire (ex : surface d'une rondelle de bois scannée ; figure 3). C'est principalement cet outil de sectorisation qui a été utilisé dans le cadre du projet EMERGE pour analyser la répartition de la biomasse dans l'arbre.

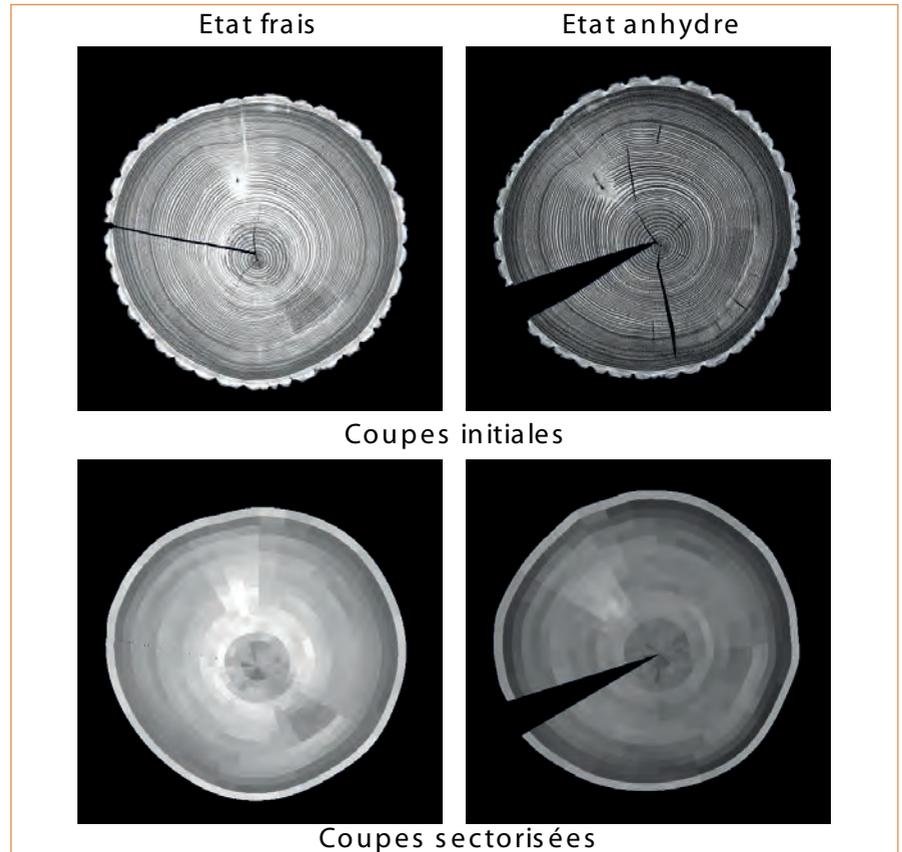


Fig. 3 : comparaison de deux images d'une même coupe aux états frais (à gauche) et anhydre (à droite) et sectorisations correspondantes

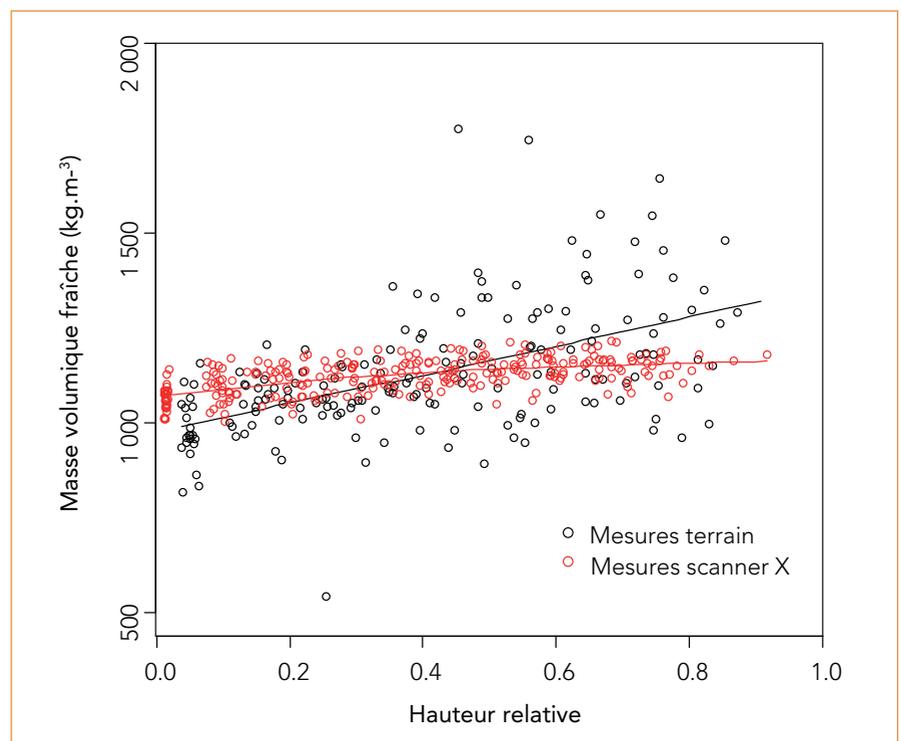


Fig. 4 : comparaison entre des mesures « terrain » et des mesures « scanner X » pour le calcul de la masse volumique fraîche sur les hêtres de Bure (Montiers Sur Saulx)
Six masses volumiques issues des mesures « terrain » sont au-delà de 2000 kg.m⁻³ et ne sont pas représentées.

⁴ L'infra-densité (voir encadré Définitions) permet de passer d'un volume vert (celui de l'arbre sur pied par exemple) à une biomasse sèche.

Les mesures de densité réalisées au scanner à rayons X sont fiables et précises. Elles permettent de vérifier et, le cas échéant, de corriger des mesures réalisées sur le terrain. La figure 4 compare les masses volumiques fraîches calculées sur le terrain, à partir de mesures de masses et de volumes de billons, avec celles mesurées au scanner. Sur le terrain, les imprécisions sur l'estimation du volume ne permettent pas d'estimer correctement des masses volumiques. Certaines valeurs obtenues sont au-delà de $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ce qui n'est physiquement pas possible. Dans le bas de l'arbre, les masses volumiques sont sous-estimées alors qu'elles sont surestimées dans le haut.

Dans les deux cas, il s'agit probablement d'un problème lié aux formes particulières des billons qui ne peuvent être assimilées à des troncs de cône : surestimation du volume des billons en bas liée à l'empiètement et sous-estimation du volume des billons en haut en raison d'une forte sinuosité (figure 5).

Isoler les nœuds et analyser leurs ramifications

Pour analyser la nodosité, un premier outil permet d'enregistrer manuellement la trajectoire, les dimensions et l'organisation des éléments de ramification (moelle, traces de bourgeons, nœuds séquentiels et épicorniques, etc.). La figure 6 montre un exemple de visualisation des mesures obtenues avec cette méthode sur des résineux (voir Colin et al. (2011) pour des exemples portant sur des essences feuillues). Cet outil a également été utilisé dans une étude canadienne portant sur les relations entre caractéristiques externes des branches et morphologie des nœuds (Duchateau et al. 2013).

Parallèlement, des travaux ont été engagés en collaboration avec le LORIA⁵ (équipe ADAGlo) sur la détection automatique des nœuds, plutôt orientés vers les bois de résineux.

À l'état frais, la détection des nœuds est particulièrement difficile dans l'aubier en raison de valeurs de densités très proches. Une thèse de doctorat a été engagée sur ce thème en 2011 par Adrien Krähenbühl sous la direction du LORIA et en collaboration étroite avec le LERFoB.

Détecter la moelle et analyser la croissance primaire

L'intérêt d'utiliser la moelle du tronc comme marqueur de la croissance primaire a été démontré dans une étude de Longuetaud et Caraglio (2009). En effet, pour certaines essences, une densification ainsi qu'un rétrécissement de la moelle se produisent aux endroits des limites de pousses annuelles. La localisation de la moelle est aussi une étape essentielle pour caractériser la nodosité, l'axe principal des branches passant généralement par la moelle dont elles sont issues. Nous avons mis au point un algorithme robuste et efficace pour détecter automatiquement la trajectoire de la moelle (et ses resserrlements) dans des billons de bois scannés. Celui-ci a été testé sur un grand nombre d'essences (Longuetaud et al. 2004; Boukadida et al. 2012). Avec le travail sur les nœuds, cela ouvre des perspectives considérables pour la reconstitution rétrospective de la mise en place des branches.

Détecter les cernes annuels et analyser la croissance secondaire

Le dernier élément de reconstitution de la croissance passée est la détection des empilements de cernes.

Des travaux ont d'abord été engagés, au sein de l'UMR AMAP⁶ et en collaboration avec le LERFoB, sur la délimitation automatique des cernes dans des images tomographiques de bois à partir d'hypothèses de forme restrictives (Borianne et al. 2011). La vitesse de traitement s'étant avérée décevante avec cette méthode, un nouvel algorithme beaucoup plus performant est en développement (figure 7).

Quelques résultats expérimentaux sur la densité, dans le cadre du projet ANR EMERGE

À l'occasion du projet EMERGE, 76 arbres ont été analysés au scanner : 23 érables, 32 hêtres, 5 frênes et 16 chênes. Au total, près de 700 rondelles prélevées dans les tiges et 400 dans des branches de bois fort ont été scannées à l'état frais et/ou anhydre.

Précisons que les 23 érables et les 32 hêtres étaient ceux de l'échantillon EMERGE choisis sur le site d'étude de Bure à Montiers sur Saulx (55) le long d'un gradient de sol (rendosol, rendisol/calcisol, brunisol, aloccisol), pour étudier un éventuel effet de ce gradient sur les caractéristiques des arbres.

Variations de densité et d'humidité dans le tronc

Nous avons étudié les variations dans l'arbre, entre arbres et entre espèces des grandeurs suivantes : masses volumiques fraîche et anhydre, infradensité, humidité et taux de remplissage en eau. Ce travail porte sur environ 500 rondelles de hêtre, érable, frêne et chêne scannées aux états frais puis anhydre. On constate que, même sur une essence à bois réputé plutôt homogène comme le hêtre, la masse volumique à l'état anhydre est loin d'être constante (figure 8) : on observe en général une forte décroissance entre la base de l'arbre et la base du houppier, puis une augmentation dans le houppier.

Ce schéma général semble assez logiquement se retrouver pour l'infradensité sur le hêtre et l'érable, alors que le chêne et le frêne ne semblent pas présenter de phase décroissante en bas de l'arbre (figure 9 b). Ce résultat est à relativiser cependant car la première rondelle du bas de l'arbre (située à 0,3 m de hauteur) est absente pour 4 frênes sur les 5 représentés et pour 6 chênes sur les 13 représentés. À noter aussi que le frêne semble montrer une très

⁵ Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications (UMR CNRS-Université de Lorraine-INRIA); <http://www.loria.fr>

⁶ botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes (UMR CIRAD-CNRS-INRA-IRD-Université Montpellier II); <http://amap.cirad.fr>



Fig. 5 : photos de billons dans le bas de la tige (à gauche) et dans le haut de la tige (à droite)

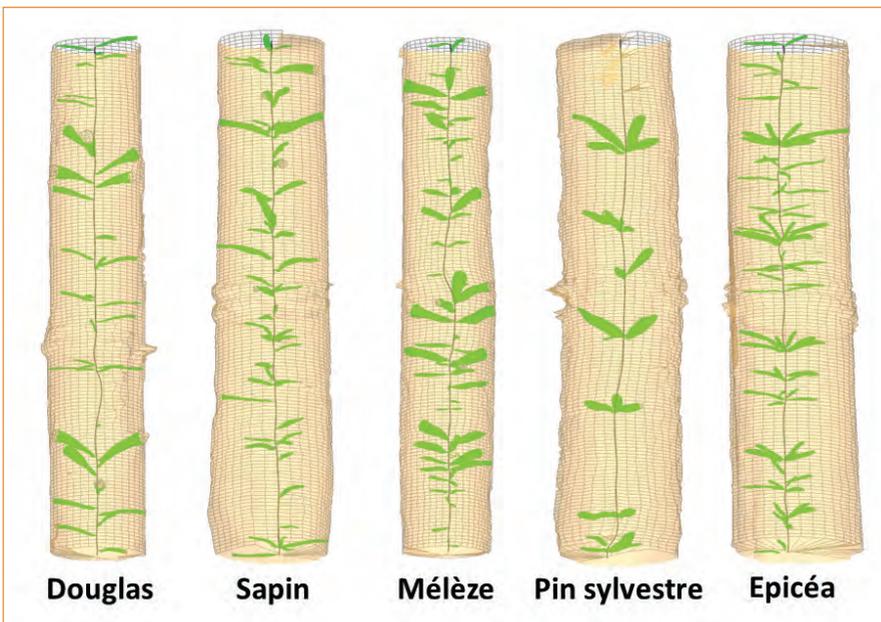


Fig. 6 : visualisation des nœuds mesurés manuellement sur cinq billons de résineux.

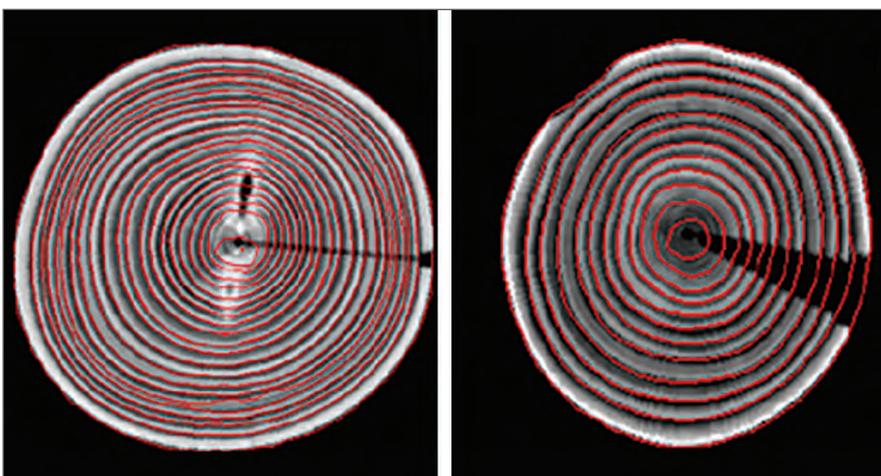


Fig. 7 : exemples de détection automatique des cernes annuels sur une image de frêne frais (à gauche) et d'épicéa anhydre (à droite)

grande variabilité de son infra-densité le long de la tige, bien plus importante que chez les autres essences.

Les frênes de l'étude ont une teneur en eau et un taux de remplissage très faible au regard des autres essences (figure 9c et d). Ce travail permet également de nuancer l'hypothèse parfois admise pour des raisons pratiques d'une masse volumique fraîche proche de $1\ 000\text{ kg.m}^{-3}$, quelle que soit l'essence (figure 9a). À partir des résultats, il est possible de tracer des graphiques de répartition en volume, de matière ligneuse, eau et air, comme celui présenté figure 10 pour une rondelle de chêne à l'état frais. Pour cette rondelle, on voit que le volume de matière ligneuse, donc directement la densité anhydre du bois, décroît assez fortement de la moelle vers l'écorce; c'est plus visible sur la courbe en densité anhydre que sur la courbe en volume de bois pour des raisons d'échelle. Le volume d'eau dans la rondelle reste pour ainsi dire constant radialement (très légère diminution ici).

La méthodologie développée se prête aussi aux mesures de masse volumique sur le compartiment « écorce ». La figure 11 illustre les variations de masse volumique anhydre observées pour le hêtre et l'érable en fonction du type de sol. Les résultats sont concordants pour les deux essences. L'écorce est significativement moins dense sur l'alocri-sol. Ces résultats sont également concordants avec d'autres observations réalisées par le laboratoire BEF quant à la teneur en éléments minéraux de ce compartiment.

Comparaison des densités dans le tronc et dans les branches

Les données acquises grâce au scanner ont permis la comparaison de densités anhydres du tronc et des branches de bois fort (> 7 cm de diamètre). Les premiers résultats de cette étude montrent l'existence d'une forte corrélation ($R = 0,91$) entre les masses volumiques moyennes de branches et

de troncs sur quatre essences feuillues (figure 12 page 64). Ce résultat est intéressant pour les estimations de biomasse forestière mais devra être affiné notamment en distinguant les compartiments bois et écorce sur les images. En effet, la densité anhydre des branches apparaît légèrement plus élevée que celle du tronc sur la figure 12 mais à ce stade il n'est pas possible de dire si cela est dû à une plus forte proportion d'écorce, plus dense que le bois, dans les rondelles de branches.

Conclusion et perspectives

Même si de nouveaux développements sont toujours possibles, le scanner à rayons X dédié au bois acquis par le LERFoB est déjà un outil extrêmement précis et performant. Dans le cadre du projet EMERGE, il a permis d'établir des cartes de répartition de la biomasse dans les arbres. Les résultats obtenus sur la variabilité de la masse volumique seront utilisés pour les estimations, à partir des volumes, de biomasses forestières à larges échelles. En comparaison aux mesures de terrain, le scanner fournit des données plus fiables (des erreurs de mesures de masses et volumes ont ainsi pu être détectées et corrigées) et surtout plus détaillées puisqu'il est déjà possible d'obtenir des cartes tridimensionnelles de propriétés (masses volumique, infra-densité, humidité, taux de remplissage, etc.) sur ou sous écorce.

À terme, les développements réalisés en lien avec le scanner dans le cadre du projet EMERGE devraient permettre d'affiner encore en distinguant des compartiments tels que bois du tronc, bois des branches, écorce, voire pousse annuelle ou cerne de croissance.

La banque d'images tomographiques et de données sur la nodosité de nombreuses essences qui se met progressivement en place au LERFoB est aussi pour partie un des acquis du projet EMERGE.

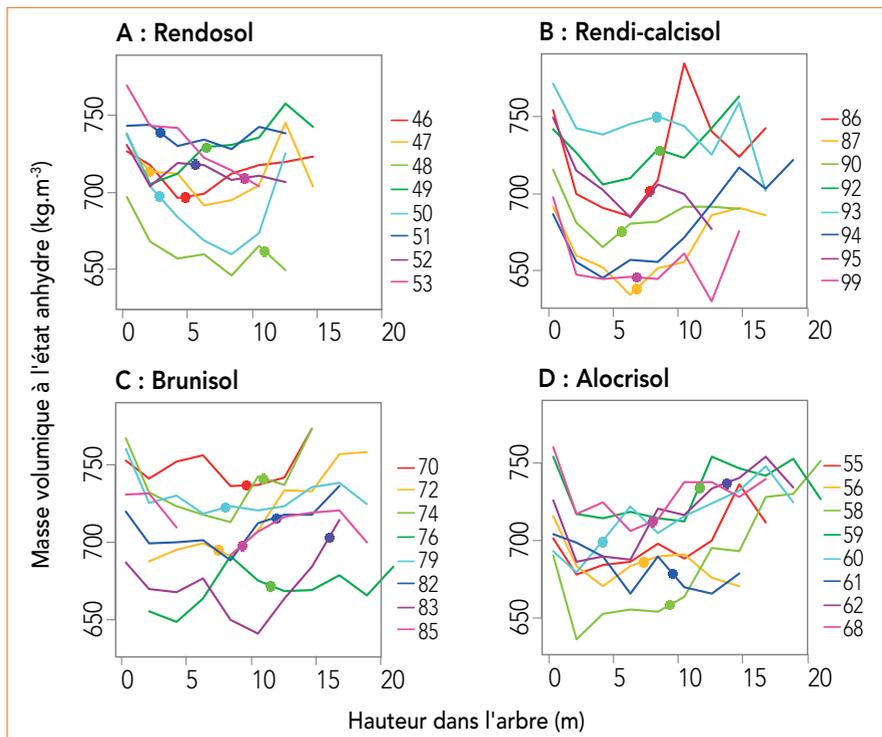


Fig. 8 : évolution de la masse volumique à l'état anhydre (en kg.m^{-3}) avec la hauteur dans l'arbre (en m) sur 32 hêtres localisés le long du gradient de sol. Chaque courbe représente un arbre (8 arbres/type de sol). Les points indiquent la base du houppier. Les courbes ont été obtenues à partir de masses volumiques moyennes calculées pour chaque rondelle échantillonnée le long du tronc.

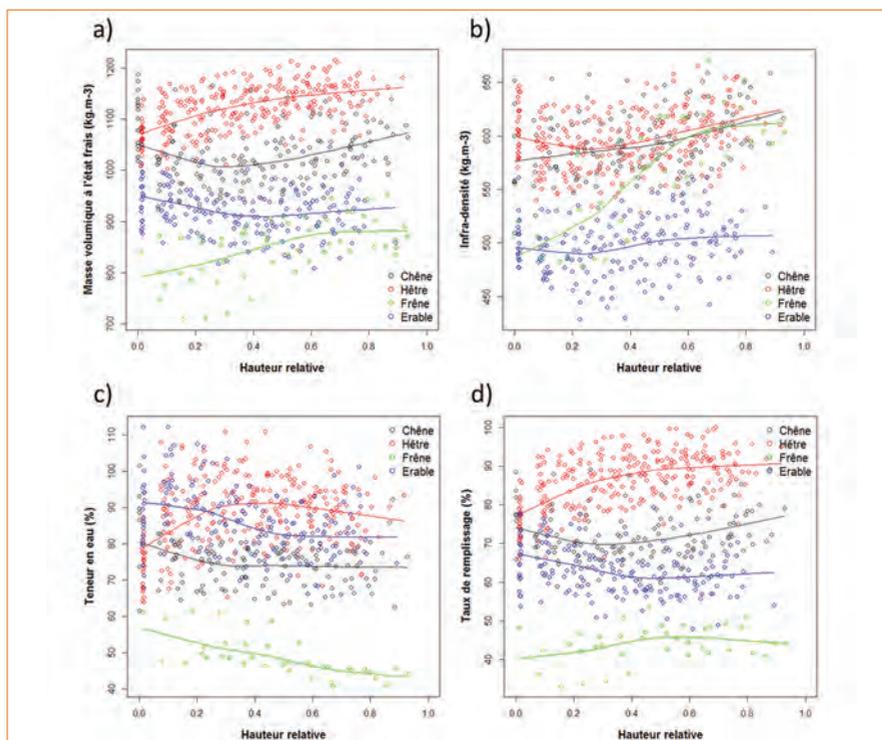


Fig. 9 : évolution avec la hauteur dans l'arbre de la masse volumique à l'état frais (a), de l'infra-densité (b), de la teneur en eau (c) et du taux de remplissage (d) sur quatre essences. Chaque point représente une rondelle (écorce non comprise).

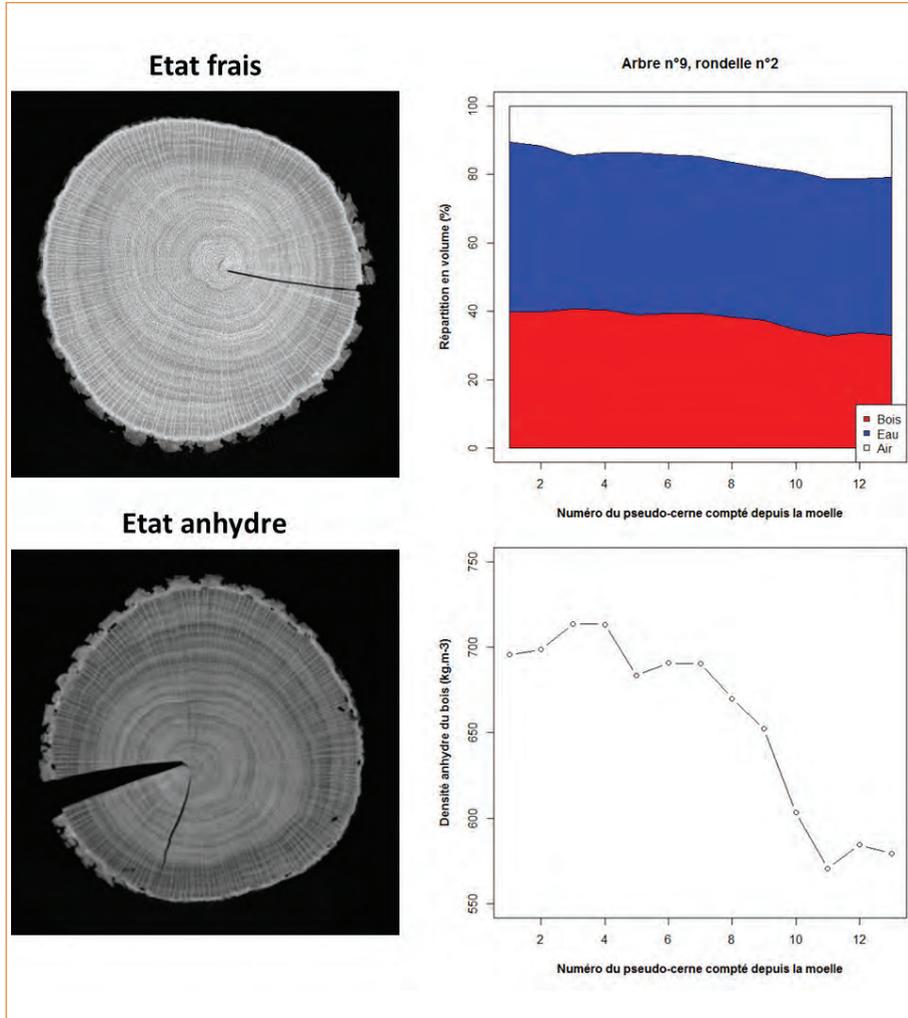


Fig. 10 : répartition moyenne en volumes de matière ligneuse, d'eau et d'air dans une rondelle de chêne à l'état frais en fonction de la distance à la moelle. Sur l'axe des abscisses, la moelle est à gauche et l'écorce est à droite; un pseudo-cerne est un pseudo-anneau qui fait en moyenne 1 cm de large sur toute la circonférence de la rondelle.

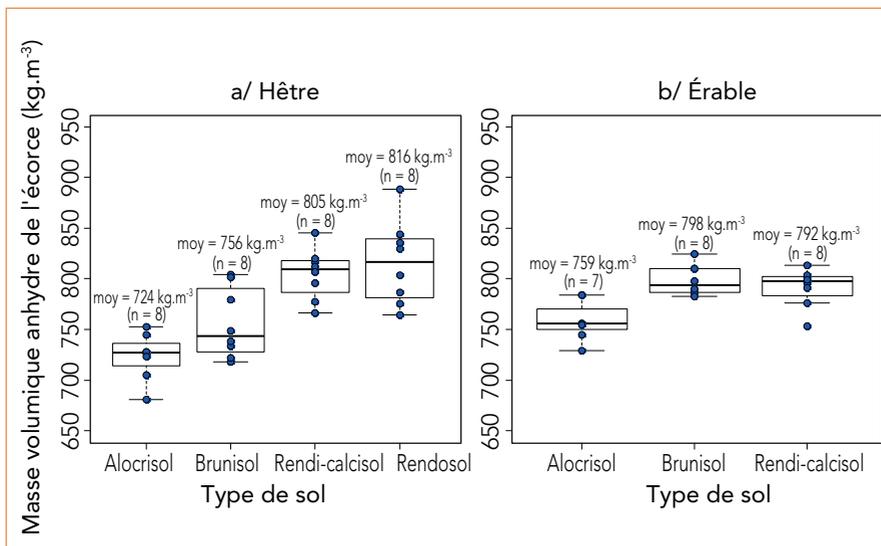


Fig. 11 : mesures de densité anhydre de l'écorce pour deux essences, a) Hêtre et b) Érable, en fonction du type de sol (gradient de sol de Bure)

Fleur LONGUETAUD
Frédéric MOTHE
Philippe SANTENOISE
Francis COLIN
Charline FREYBURGER
 INRA, UMR 1092-LERFoB⁷
 54280 Champenoux
 prenom.nom@nancy.inra.fr

Philippe BORIANNE
 CIRAD, UMR AMAP, Montpellier

Christine DELEUZE
 ONF, département R&D

Bibliographie

Bhandarkar S. M., Faust T. D., Tang M., 1999. CATALOG: a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography. Machine Vision and Applications vol. 11 n° 4 pp. 171-190

Borianne P., Pernaudat R., Subsol G., 2011. Automated delineation of tree-rings in x-ray computed tomography images of wood. 18th IEEE International Conference on Image Processing. ICIP 2011, pp. 445-448

Boukadida H., Longuetaud F., Colin F., Freyburger C., Constant T., Leban J.-M., Mothe F. 2012. PithExtract: a robust algorithm for pith detection in computer tomography images of wood - Application to 125 logs from 17 tree species. Computers and Electronics in Agriculture n° 85 pp. 90-98

Colin F., Mothe F., Morisset J.-B., Freyburger C., Lamiche F., Fund C., Debret L., Garnier B., Bordat F., Canta R. 2011. Branches, gourmands et épiscopiques. Petit atlas de vues en 3D obtenues par tomographie à rayons X. Forêt-Wallonne n° 115 pp. 44-53

Duchateau E., Longuetaud F., Mothe F., Ung C., Auty D., Achim A., 2013. Modelling knot morphology as a function of external tree and branch attributes. Canadian Journal of Forest Research vol. 43 n° 3 pp. 266-277

⁷ Le LERFoB bénéficie d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J. M., 2009. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Annals of forest science*, vol. 66 n° 8, article 804

Longuetaud F., Caraglio Y., 2009. Pith: a marker of primary growth in *Picea abies* (L.) Karst. *Trees-Structure and Function* vol. 23 pp. 325-334

Longuetaud F., Leban J., Mothe F., Kerrien E., Berger M., 2004. Automatic detection of pith on CT images of spruce logs. *Computers and Electronics in Agriculture* vol. 44 pp.107-119

Longuetaud F., Mothe F., Kerautret B., Krähenbühl A., Hory L., Leban J.-M., Debled-Rennesson I., 2012. Automatic knot detection and measurements from X-ray CT images of wood: A review and validation of an improved algorithm on softwood samples. *Computers and Electronics in Agriculture* vol.85 pp. 77-89

Schneider C., Rasband W., Eliceiri K., 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* vol.9 pp. 671-675

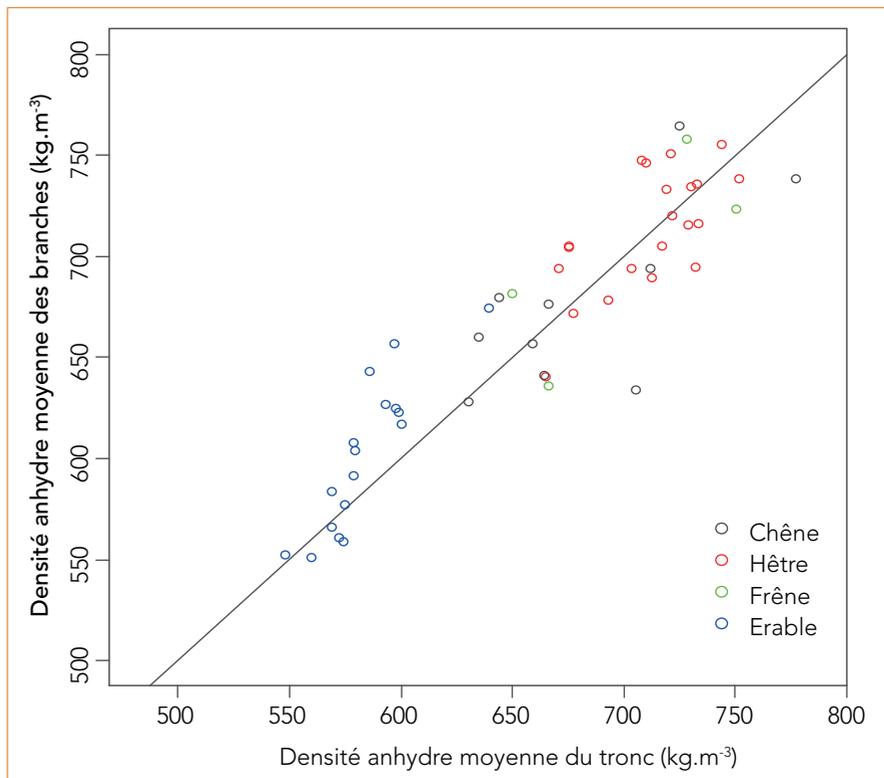


Fig. 12 : comparaison des densités anhydres moyennes (sur écorce) du tronc et des branches sur 52 arbres de quatre essences

Chaque point correspond à la moyenne de toutes les rondelles de branches échantillonnées (en ordonnée) et à la moyenne de toutes les rondelles de tronc (en abscisse) mesurées sur un arbre.



Manutention (par Charline Fryburger) de rondelles fraîches avant analyses en laboratoire

P. Gellhaye, INRA

Étude exploratoire de la masse volumique - Influence du « taux de remplissage » en eau du bois frais

Masse volumique, densité... on sait que ça varie selon l'état d'humidité, ou entre bois « durs » et bois « tendres », et que c'est un vrai casse-tête pour les logisticiens. En marge de l'analyse des données de biomasse, le projet EMERGE a soulevé la question d'une relation éventuelle entre la densité du bois sec et celle du bois frais, via le « taux de remplissage ». Il a exploré quelques pistes : il n'y aurait pas de loi générale pour toutes les essences mais une tendance majoritaire et des cas plus contrastés. Une façon inédite d'aborder le sujet.

Initialement, le projet EMERGE ne prévoyait pas de s'intéresser spécialement à la masse volumique fraîche, entre autres parce que, si larges soient-elles, les données anciennes rassemblées ne le permettaient pas. Cependant les données complémentaires acquises lors des campagnes de terrain pour ce projet (pesée fraîches sur arbres entiers, mesures de taux d'humidité...), a fourni la matière (et l'opportunité) d'une analyse de la masse volumique.

Pourquoi étudier la masse volumique ? Les forestiers savent que la masse volumique (ou la densité) du bois varie d'une essence à l'autre, notamment entre essences à bois « tendre » et à bois « dur », et qu'elle décroît après l'abattage avec le ressuyage puis séchage, mais peut aussi re-augmenter si les bois coupés prennent la pluie. Toutes ces sources de variations étant difficiles à intégrer dans la pratique professionnelle de la logistique (où très souvent essences et échelle de temps sont multiples, mais aussi les unités de mesures, avec la notion de sous/sur écorce), les forestiers utilisent des coefficients de conversion très simplificateurs... le plus simplificateur étant de considérer qu'un mètre cube de bois (frais

ou juste ressuyé, feuillu ou résineux) pèse une tonne. Or, puisqu'à l'état sec la densité des bois tendres est inférieure à celle des bois durs, cela revient à dire que, au moment de l'abattage, les bois tendres seraient plus chargés d'eau que les bois durs ? Pour un projet dédié à l'estimation du bois énergie, cela valait la peine d'approfondir la question...

Nous présentons ici les résultats de cette exploration de la masse volumique. Pour commencer, un schéma théorique permet d'exposer comment s'articulent les relations attendues entre la part sèche et la part humide du bois ; il introduit notamment les notions d'infradensité, masse volumique (ou densité) fraîche et taux de remplissage, qui sont au cœur de ce travail. Nous avons pu examiner sur les données disponibles comment varient l'infradensité et la densité fraîche au sein de l'arbre (tige, branches), et confronter les résultats aux résultats exploratoires du scanner (Longuetaud *et al.*, ce dossier) et aux indications de la littérature. Enfin nous analysons de plus près la question du lien éventuel entre la densité sèche (ou plus exactement l'infradensité) et le remplissage en eau. Les résultats bousculent un peu le postulat de départ.

Masse volumique ou densité ?

La densité est une mesure relative de masse volumique, rapportée à la masse volumique d'un corps pris comme référence. Pour les solides et les liquides, ce corps de référence est l'eau pure à 4 °C. La densité est donc exprimée sans unité. Mais comme la masse volumique de l'eau pure vaut par définition 1 kg/dm³, la densité d'un corps solide ou liquide indique aussi sa masse volumique exprimée en g/cm³. D'où en pratique une sorte d'équivalence entre les deux notions.

Schématisation du bois pour analyser les variations de masse volumique

Un schéma conceptuel simplifié : une part solide et du vide plus ou moins rempli d'eau

On peut dire en caricaturant que le bois est constitué de parois solides pleines et de vides. Ces parois sont organisées de manière différente selon les essences, mais la densité du matériau qui les constitue semble, d'après la littérature assez stable, de l'ordre de 1,5 : les variations de densité du bois sec (on dira densité sèche) sont donc plutôt attribuées aux proportions différentes de vide et de parois (Kellog, 1969 ; Passialis, 1998).

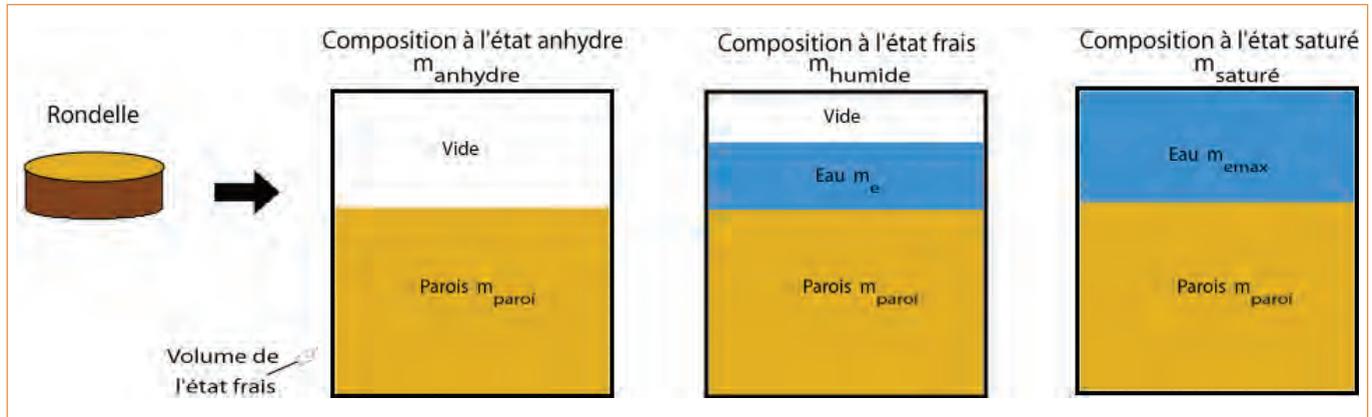


Fig. 1 : représentation schématique de la composition d'un volume de bois, mesuré à l'état frais.

Ce volume est représenté ici par un carré :

- quand le bois est sec (anhydre), à gauche, ce volume n'est constitué que de vide et de parois; la masse correspondante, la masse sèche notée $m_{anhydre}$ est celle des parois m_{parois} ;
- pour du bois frais, au milieu, ce volume est constitué de parois, de vide mais aussi d'eau qui remplit une partie du vide disponible; la masse humide (ou fraîche) m_{humide} est composée de m_{parois} et de la masse d'eau m_e ;
- si le bois était saturé, à droite, le vide serait complètement rempli d'eau, ce qui donne la masse d'eau maximale m_{emax} . On appellera taux de remplissage le rapport entre la masse d'eau observée et la masse potentielle maximale : m_e/m_{emax} (NB : ce taux est différent du taux d'humidité du bois donné par le rapport $m_e/m_{anhydre}$).

Partant de ce principe, la figure 1 propose une représentation schématique du bois, selon son état d'humidité, comme une combinaison de matière fixe, les parois, et de vide, plus ou moins rempli d'eau. Ce schéma conceptuel considère que le volume est constant et correspond au volume « vert », c'est-à-dire le volume du bois humide. En réalité le volume diminue quand le bois sèche : le bois se rétracte en dessous de 30 % d'humidité (d'où les fentes de séchage). Cependant les forestiers ramènent l'ensemble des mesures de densité du bois au volume humide. Ainsi l'infradensité, définie comme le poids anhydre rapporté au volume humide, ne correspond pas exactement à la densité sèche (qui serait le poids sec rapporté au volume sec); elle n'a pas de réalité physique directe.

Cette grandeur est cependant d'un usage courant quand on a besoin de classer les bois secs par densité, et elle est d'une grande importance pour les estimations de biomasse : quand on connaît sa valeur pour l'essence considérée, elle permet de déterminer directement la masse sèche disponible dans un échantillon de bois humide.

Application pratique : l'infradensité indique la part de vide du bois

La première indication qui découle de notre représentation schématique est tout simplement que le bois complètement saturé d'eau a une densité de plus de 1. En effet, les parois de densité 1,5 occupent une partie de son volume et tout le reste est rempli d'eau, de densité 1 par définition, la résultante est donc une densité plus forte que celle de l'eau : le bois saturé coule de même que certains bois durs (denses) très humides à l'état frais, ce qui est bien connu dans le cas du hêtre.

Mais il résulte aussi de cette schématisation que l'infradensité permet directement de calculer le volume occupé par les parois. Le volume total étant connu, la différence indique alors le volume de vide potentiellement accessible pour l'eau, cette part restante étant appelée porosité; les calculs sont représentés figure 2.

D'après la littérature (Chave et al., 2009; Zanne et al., 2009), l'infradensité oscille en général entre 0,3 et 0,8 kg/dm³ pour nos essences tempérées : les parois représentent donc

entre 20 et 50 % du volume de bois, le reste étant disponible pour de l'eau.

Vide disponible pour l'eau et « taux de remplissage »

La figure 2 représente également les conséquences de cette schématisation sur la masse volumique fraîche à diverses hypothèses de « remplissage » du « vide » disponible; inversement on peut déduire de la mesure de masse volumique fraîche, et selon l'infradensité, la part de vide réellement occupé par de l'eau : on parlera dans la suite de cet article de « taux de remplissage ». Comme on pouvait s'y attendre, l'influence du taux de remplissage sur la densité est plus grande chez les bois tendres que les bois durs. On constate ainsi « graphiquement » que la variabilité de masse volumique est plus importante chez les bois tendres que chez les bois durs, et qu'un bois tendre (infradensité de 0,4 par exemple) peut finalement être aussi dense qu'un bois dur (infradensité de 0,8 par exemple), pour peu que le taux de remplissage du premier soit de 75 %, contre 25 % pour le second.

Cette sorte d'effet tampon du taux de remplissage, lequel pourrait être nettement plus élevé quand

le vide est plus important, c'est-à-dire quand l'infradensité est plus faible, existe-t-il dans la réalité ? À l'état frais, les bois tendres (à infradensité faible) sont-ils proportionnellement plus remplis que les bois plus denses ? L'idée du travail prospectif que nous allons présenter maintenant est de tester plus avant cette hypothèse.

Les données disponibles pour étudier la masse volumique restent limitées

Le principe du projet EMERGE, pour élaborer des tarifs cohérents de volumes et biomasses, est de s'appuyer sur les données anciennes des organismes partenaires, complétées par celles de l'échantillon EMERGE, spécifiquement recueillies pour le projet au cours de deux campagnes de terrain hivernales (voir RDVT n° 39-40 pp. 37-47). Il s'agit de rassembler, pour chacune de ces grandeurs, le maximum des données existantes et de les compléter au mieux, afin d'avoir les jeux de données les plus larges possible pour asseoir nos modèles généraux, fonction de différents facteurs.

Pour ce qui concerne la masse volumique, l'information complète n'est pas disponible dans les jeux de données anciens de l'INRA. L'INRA-LERFoB dispose de données d'infradensité pour pas mal d'essences, mais sans information sur la masse volumique fraîche ; quant à son protocole de volumes, il n'incluait pas jusqu'ici de pesées. De son côté, l'INRA-BEF utilise un protocole de biomasse avec pesées fraîches en regard de mesures de taux d'humidité (séchage sur échantillons), mais sans information de volume.

Sur les arbres de l'échantillon EMERGE, les deux protocoles ont été appliqués simultanément : on a ainsi des données complètes de masse volumique fraîche, d'infradensité, de volume, de quantité d'eau et donc finalement de taux de remplissage

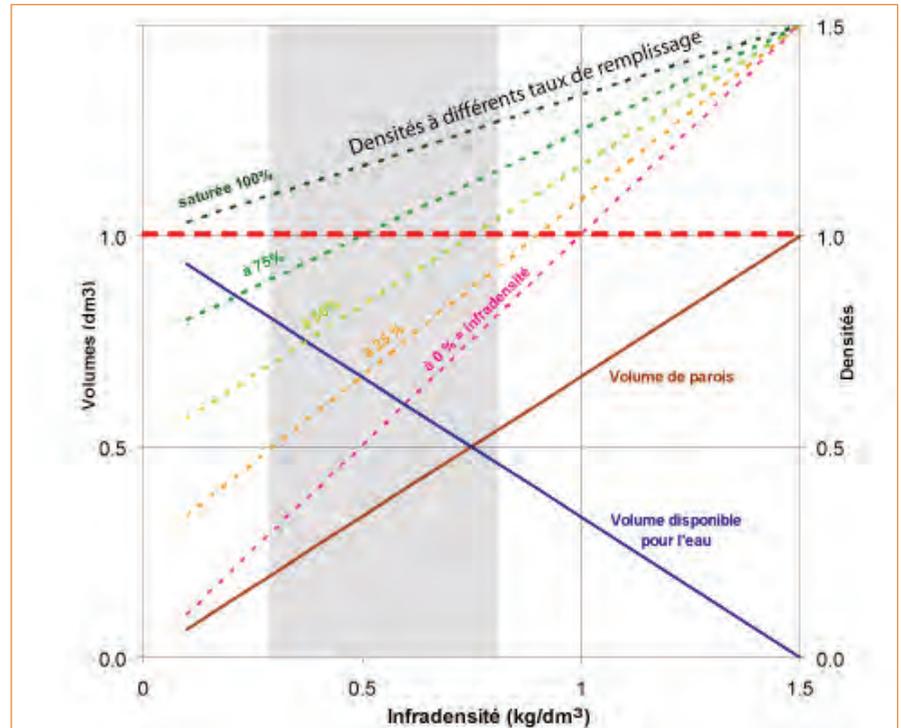


Fig. 2 : application de la représentation schématique du bois (figure 1) au calcul théorique des volumes de vide et de parois (lignes continues) et des densités (lignes pointillées) pour un échantillon de bois unitaire de 1 dm³, en fonction de l'infradensité

La densité des parois est 1,5 ; l'infradensité se définit comme la masse anhydre (masse des parois = $1,5 \times V_{\text{parois}}$) rapportée au volume humide, fixé ici à 1 dm³ ; le volume de parois est donc $V_{\text{parois}} = \text{Infradensité} / 1,5$; et son complémentaire, le volume vide disponible pour l'eau :

$$V_{\text{vide}} = 1 - V_{\text{parois}}$$

Selon le schéma initial, la masse volumique (ou densité) du bois dépend à la fois de l'infradensité et du taux de remplissage : cette relation est représentée pour différents taux de remplissage du vide entre 0 % (c'est exactement l'infradensité) et 100 % (densité saturée). En toute rigueur il conviendrait de parler de pseudo-densité pour les cas où le volume de bois diminue par retrait (en deçà du point de saturation des fibres). Comme pour l'infradensité, nous continuons à rapporter ici le poids au volume vert. La ligne rouge horizontale rappelle la densité de l'eau : en dessous le bois flotte, au-dessus il coule. La plage grisée indique la zone de variation des infradensités des bois de notre forêt tempérée, entre 0,3 et 0,8 kg/dm³.

pour l'ensemble de ces arbres. Reste que cet échantillon est limité (226 arbres) et qu'il n'a pas été raisonné pour étudier la masse volumique.

À lui seul, l'échantillon EMERGE ne permet donc pas de tirer de conclusions générales sur les densités. Mais, en vérifiant d'abord la cohérence des observations avec les informations de la littérature et avec les résultats obtenus au scanner sur une partie de ces mêmes arbres (Longuetaud et al., ce dossier), il offre l'opportunité d'une analyse inédite pour creuser un peu l'articulation qui existe entre les vides du bois et le taux de remplissage réel.

Confronter les densités observées aux informations recueillies par ailleurs

À partir des mesures de terrain, nous avons calculé pour chaque arbre la masse volumique fraîche, l'infradensité et le taux de remplissage pour la tige, d'une part, et pour les branches jusqu'à la découpe 7 cm, d'autre part (les données des rondelles prélevées le long de la tige et des branches sont moyennées en tenant compte du poids respectif de ces compartiments dans l'arbre). Les parts d'écorces sont prises en compte et nous ne considérons que le bois dans ces résultats.

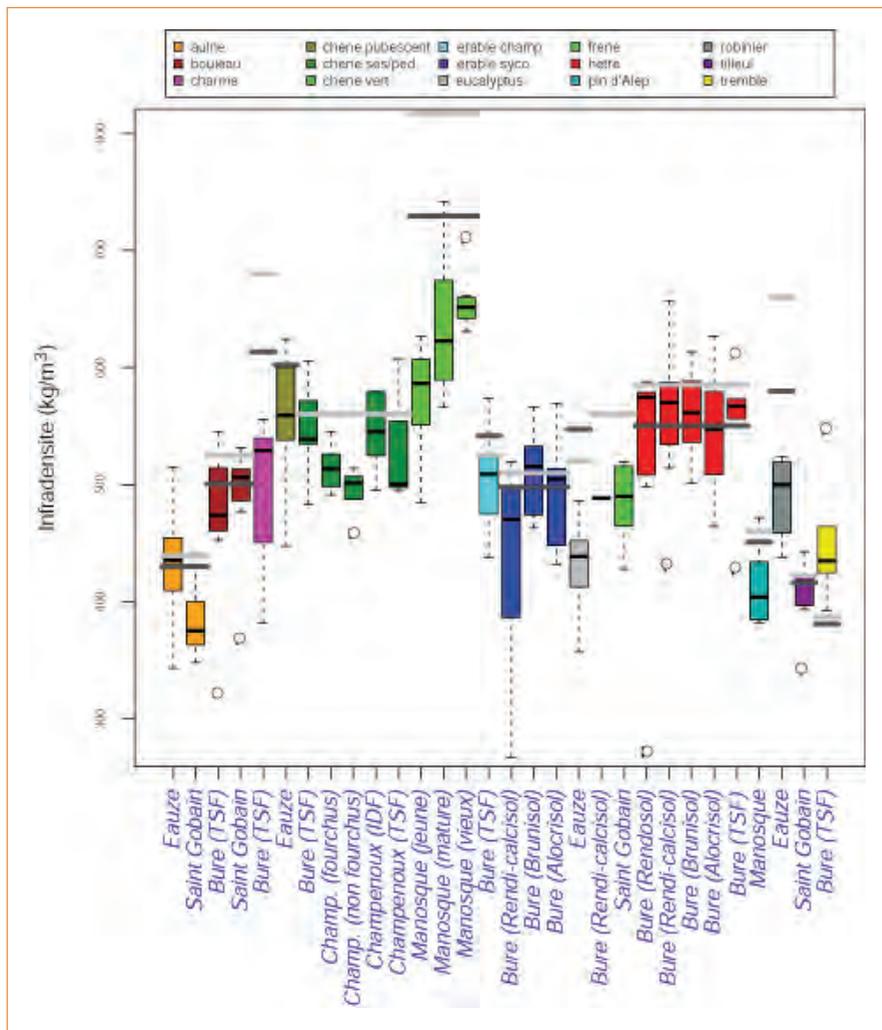


Fig. 3 : variations de l'infradensité des troncs des arbres de l'échantillon EMERGE, et comparaison avec des références à l'échelle mondiale (barre gris clair) et française (gris foncé)

Les données de la littérature sont issues de mesures sur petits échantillons prélevés à la base d'arbres matures, contrairement aux mesures plus complète sur l'ensemble du tronc dans EMERGE. Chaque essence est représentée par une couleur et les sites sont renseignés en abscisse; pour chacun des lots d'arbres correspondants, une « boîte à moustache » donne une idée de la dispersion des valeurs : en gras, la valeur médiane; rectangle coloré du premier au troisième quartile, prolongé par des barres en pointillés et, au-delà, quelques points extrêmes.

La barre horizontale gris clair indique pour chaque essence la valeur moyenne donnée par la littérature (Zanne et al., 2009; Chave et al., 2009). La barre plus foncée indique la valeur issue des travaux du projet Carbofor (Dupouey, communication personnelle). Pour le chêne sessile ou pédonculé et pour le frêne, on ne voit qu'une barre claire car les valeurs françaises et celles données par Chave et al. sont plus fortes, voire beaucoup plus fortes (chêne vert, charme et robinier) que pour la France.

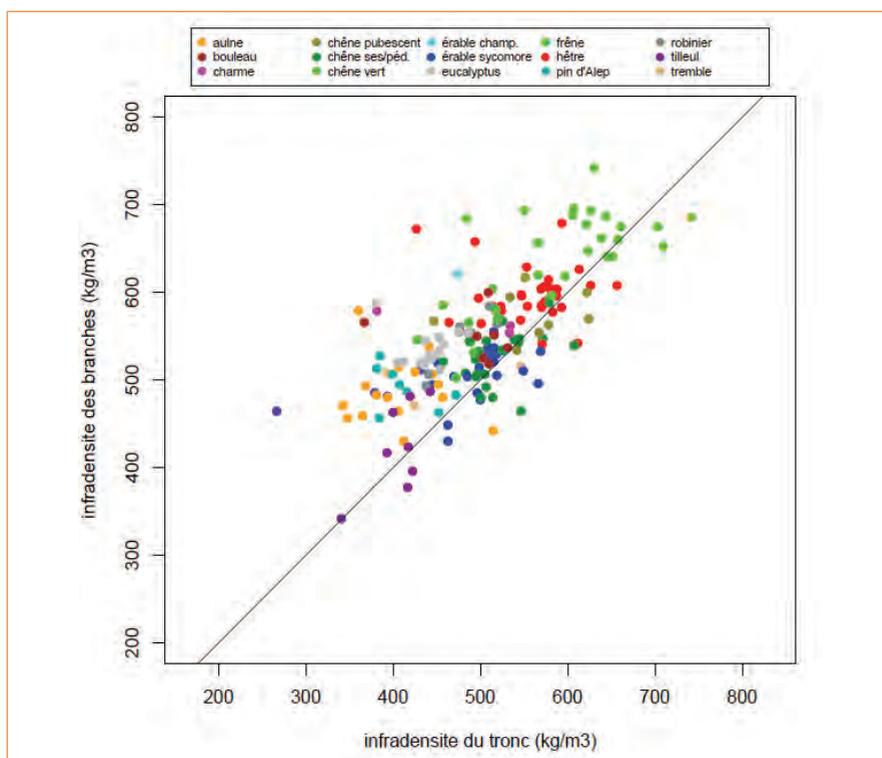


Fig. 4 : comparaison des infradensités mesurées d'une part sur les troncs (jusqu'à la découpe 7 cm) et d'autre part sur les branches (y compris menus bois en deçà de la découpe 7) Chaque point correspond à un arbre.

L'infradensité selon l'essence

Globalement, l'infradensité des tiges (figure 3) est assez variable, y compris entre arbres de même essence sur un site donné, mais la variabilité n'est pas plus forte entre sites pour une même essence. On observe donc une certaine cohérence pour une même essence quel que soit le site, mais les valeurs sont plutôt plus faibles que ce qu'annonce la littérature disponible (Chave *et al.*, 2009; Zanne *et al.*, 2009), d'après des compilations mondiales extrêmement larges. Cependant la compilation de données d'infradensité au niveau français conduit à des valeurs plus proches de nos observations (Dupouey, communication personnelle). Nos résultats sont donc bien cohérents avec ceux d'autres études, en particulier à l'échelle française.

Densité de la tige et densité des branches

Longuetaud *et al.* (ce dossier) ont établi, d'après les analyses réalisées au scanner pour une partie de l'échantillon EMERGE, une forte similitude entre l'infradensité du tronc et celle des branches (voir la figure 12 de la page 64). Nous avons fait la même comparaison à partir des mesures classiques et pour l'ensemble de l'échantillon, et nous obtenons le même résultat (figure 4) bien que ces mesures aient une variabilité plus forte que celles faites au scanner. Pour les masses volumiques aussi, on retrouve cette similitude entre tiges et branches.

Analyser en détail : est ce que les bois tendres se remplissent plus d'eau ?

Les travaux conduits jusqu'ici sur la masse volumique fraîche se sont surtout intéressés à l'infradensité comme variable explicative principale. Mais la décomposition proposée par le schéma initial, entre quantité de parois et vide plus ou moins rempli d'eau, nous a incités à nous pencher aussi sur le taux de

remplissage, comme facteur explicatif d'une possible compensation entre infradensité et masse volumique fraîche.

Analyse du « taux de remplissage » des bois frais (à l'abattage)

Première remarque : le taux de remplissage des bois frais est très variable au sein de l'échantillon : de 40 à 100 %. On observe bien (figure 5a) qu'il est directement relié à la masse volumique fraîche avec, autour de ce lien, un reste de variabilité qui s'explique, entre autres, par l'infradensité de chaque essence et par un remplissage plus important pour des parties de l'arbre de diamètre extérieur plus faible. En revanche le taux de remplissage ne dépend pas du tout de l'infradensité (figure 5b) : eu égard à l'importance du vide disponible, un taux de remplissage donné correspondra à une plus grande quantité d'eau pour une essence à bois tendre (infradensité faible), que pour une essence à bois dur (très dense), mais le taux reste indépendant.

Ces premiers constats conduisent à chercher d'autres variables explicatives éventuelles de la masse volumique fraîche, et surtout à voir comment s'organisent les essences selon ces deux grands facteurs : l'infradensité et le taux de remplissage.

Infradensité et taux de remplissage dessinent une « carte » des essences inattendue

C'est pourquoi nous avons entrepris une analyse multidimensionnelle (analyse en composantes principales – ACP), portant sur l'ensemble des données des troncs de tous les arbres de l'échantillon EMERGE : masse volumique fraîche (= densité humide), humidité, infradensité, taux de remplissage, ainsi que des variables de taille, à savoir circonférence à 1,30 m et hauteur. Cela permet de déterminer statistiquement les principales sources de variabilité dans un « nuage » de

points en 6 dimensions (chaque point représentant un arbre) et d'en visualiser les effets (figure 6) sur un « plan factoriel » défini par les deux premiers axes ressortis de l'analyse (axes statistiques permettant d'exprimer le maximum de la variabilité).

La première de ces représentations (figure 6a) montre le rôle des variables, à la façon dont elles s'organisent les unes par rapport aux autres. On y retrouve l'indépendance entre l'infradensité et le taux de remplissage tandis que la masse volumique fraîche, en position intermédiaire, dépend à la fois de l'une et de l'autre. On voit aussi que la taille de l'arbre influence négativement l'infradensité mais aussi le taux de remplissage : un arbre plus gros gardera du bois plus sec au cœur. La projection des points, identifiés par essence, sur ce même plan (figure 6b) permet de voir que la plupart des essences se répartissent le long du gradient d'infradensité, avec des taux de remplissage sensiblement dans les mêmes gammes. Mais quelques unes sortent du lot : le frêne et le robinier présentent un taux de remplissage particulièrement faible tandis qu'à l'opposé l'eucalyptus a un taux de remplissage très élevé, il semble gorgé d'eau.

Quelle est la fiabilité de ces exceptions ? Les frênes ont été récoltés essentiellement à St Gobain, or ce chantier est un peu atypique car il n'a pu avoir lieu qu'au tout début d'avril 2010, en limite de reprise de végétation. Cependant le frêne récolté à Bure ne se distingue pas du lot et les robiniers, qui manifestent une disposition similaire, ont été récoltés dans le Sud-Ouest. Par ailleurs, le taux de remplissage étant assez lié à la taille de l'arbre, on pouvait aussi penser à un biais de notre échantillon (choisi pour un autre objectif, rappelons le) : en effet les eucalyptus étaient de tout petits arbres de deuxième rotation de TCR, tandis que les frênes et robiniers étaient déjà gros. Mais on peut se référer au cas du chêne sessile/pédonculé pour lequel notre

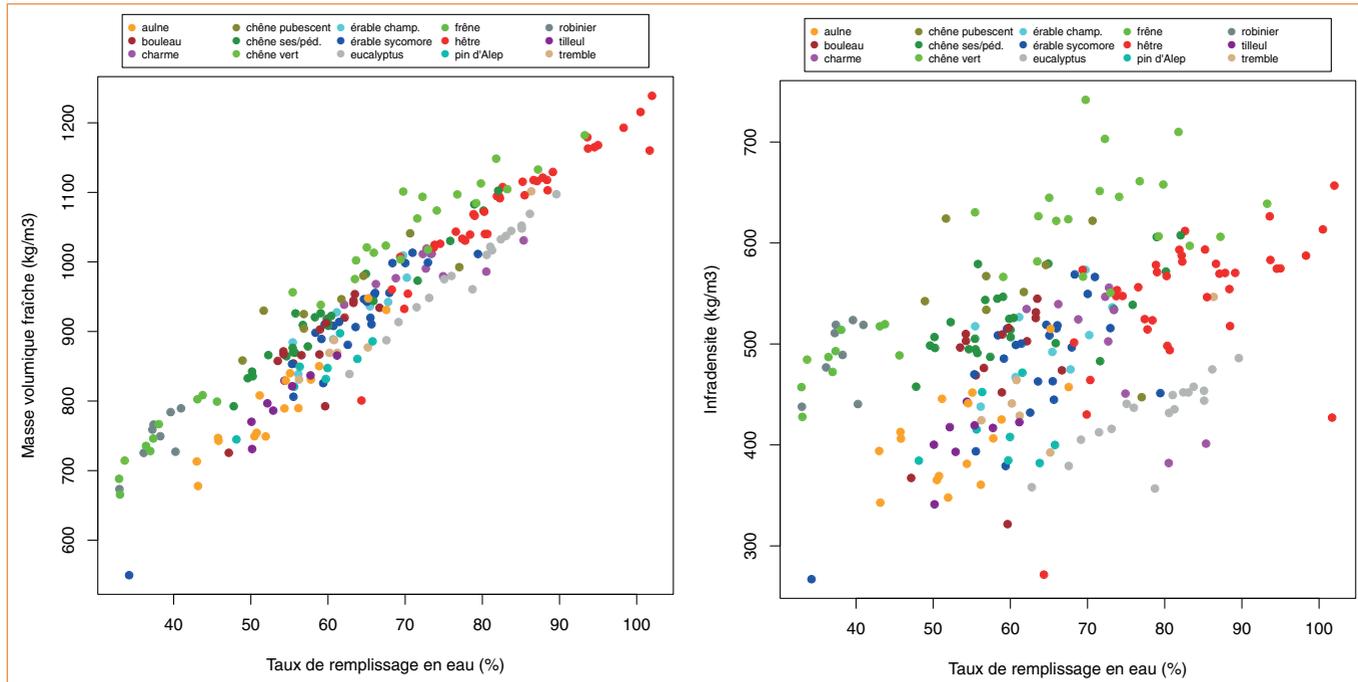


Fig. 5 : analyse, pour le tronc, des variations de la masse volumique fraîche (a) et de l'infradensité (b) en fonction du taux de remplissage

Le taux de remplissage est fortement lié à la masse volumique fraîche (a), mais n'a pas de lien avec l'infradensité (b). Remarquer l'agencement des points par couleur donc par essence, notamment en figure 5a, ce qui invite à rechercher plus finement par analyse multidimensionnelle comment s'organisent les essences selon les différentes composantes de la masse volumique.

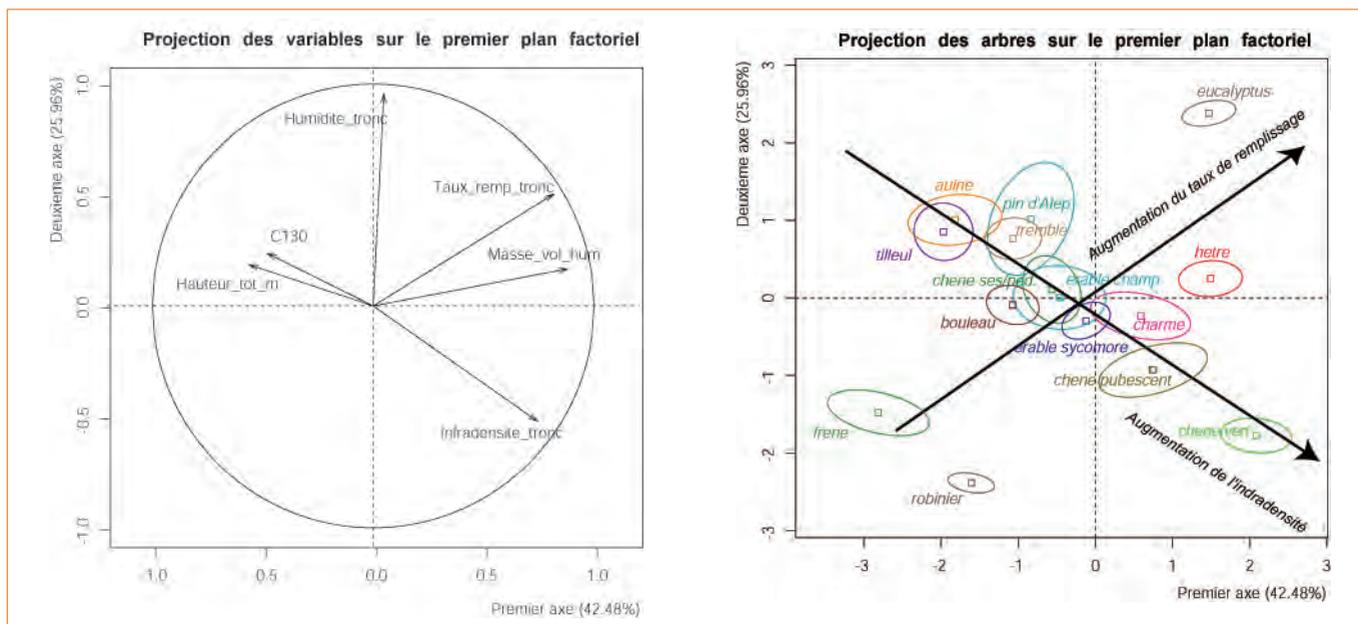


Fig. 6 : principaux résultats de l'analyse multidimensionnelle de la masse volumique, sur l'ensemble des données des troncs de l'échantillon EMERGE

L'analyse en composantes principales permet de représenter le maximum de variabilité de l'ensemble de nos données en 2D; le plan déterminé statistiquement représente 68,44 % de la variabilité totale (42,48 % sur le premier axe, et 25,96 % sur le second). La figure 6a donne une représentation vectorielle des variables, qui indique leur contribution à l'explication donnée par les axes principaux. Le premier axe est principalement expliqué par l'infradensité, la densité humide et le taux de remplissage, ainsi que, dans une moindre mesure et négativement, par la taille des arbres. Le second axe est expliqué principalement par le taux global d'humidité du tronc et, plus légèrement, par l'infradensité (négativement) et le taux de remplissage. Remarquer les directions « perpendiculaires » de l'infradensité et du taux de remplissage qui indiquent l'indépendance de ces deux variables. La figure 6 b indique comment se projette l'ensemble des arbres analysés, représentés par essence en ellipse de confiance (carré au centre de gravité du nuage de point et ellipse pour représenter la position du nuage). Ces essences s'organisent autour des variations de l'infradensité (de l'aulne et tilleul jusqu'au chêne vert) et du taux de remplissage (frêne et robinier particulièrement peu « remplis », à l'opposé de l'eucalyptus complètement gorgé d'eau).

échantillon couvre un large gradient de taille (depuis les jeunes perches jusqu'aux très vieilles réserves de TSF en passant par le stade de futaie mature) : la dimension de l'ellipse qui, sur la figure 6 b, indique sa gamme de variations n'est pas supérieure à celle des autres espèces. Or la distance entre l'ellipse de l'eucalyptus et celles du frêne et du robinier est bien plus grande que cette dimension : les différences de taille entre eucalyptus et frêne ou robinier ne suffisent pas à expliquer leurs positions extrêmes.

Il semble donc qu'il y ait bien des comportements assez contrastés entre les essences pour le remplissage en eau. D'un côté, la plupart des essences analysées ont des taux de remplissage assez voisins qui conduisent, eu égard au vide disponible, à un pourcentage global d'humidité plus fort pour les bois tendres que pour les bois denses. Inversement, quelques essences d'infradensité assez semblable ont des taux de remplissage très différents, à l'exemple de l'eucalyptus qui atteint la saturation tandis que robinier et frêne se remplissent très peu. Remarquons aussi la position singulière du pin d'Alep (bois tendre) et du hêtre (assez dense) qui se démarquent un peu du cas majoritaire en se décalant vers l'eucalyptus : le hêtre tend à être particulièrement lourd à la récolte (ce qui rejoint les observations de terrain).

Conséquences pratiques pour la masse volumique fraîche

Tout cela confirme que sur le terrain, les masses volumiques fraîches sont très variables. Sur notre échantillon, elles sont assez stables par essence entre différents sites, la variabilité intra-site étant du même ordre que celle entre sites (figure 7). La gamme des valeurs est finalement aussi étendue que pour l'infradensité (figure 3). Dans la fourchette « traditionnelle » autour de 1 000 kg/m³ (de 900 à 1 150 kg/m³), on retrouve bien les principales essences feuillues françaises (hêtre, charme, chêne, par

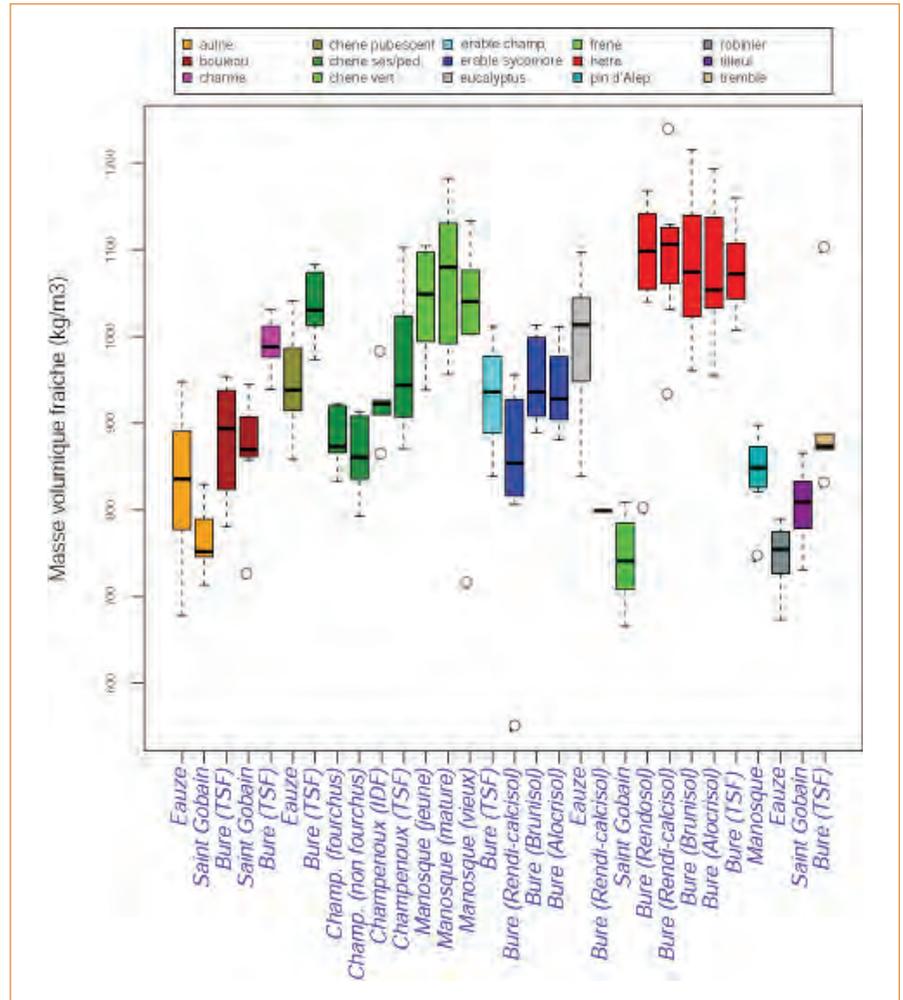


Fig. 7 : variation des masses volumiques fraîches des troncs (jusqu'à la découpe 7) par essence et par site

Voir l'explication des boîtes à moustache en clé de lecture de la figure 3.

taux de remplissage décroissant). En dessous (entre 750 et 800 kg/m³), on trouve les bois de faible infradensité comme le tilleul, l'aulne, le tremble et pin d'Alep, qui ont des taux de remplissage similaires à ceux de bois plus durs. Robinier et frêne se distinguent, malgré une infradensité autour de 500 kg/m³, par une très faible masse volumique fraîche du fait de leur taux de remplissage particulièrement bas.

Conclusions provisoires et perspectives

Rappelons tout d'abord que nos résultats sur la masse volumique fraîche ne sont que prospectifs, qu'ils ont été obtenus sur un échantillon d'arbres sélectionné pour d'autres propos, et

qu'ils restent donc à valider sur des données plus larges. Cependant il est déjà possible de faire ressortir quelques points intéressants.

Le premier concerne l'infradensité des essences. Les mesures par essence sont assez stables, avec une variabilité du même ordre entre arbres et entre sites. Cela confirme l'intérêt des valeurs d'infradensité par essence, mais aussi l'importance de produire ces valeurs pour la France, les références mondiales (en l'occurrence européennes) publiées par Chave (2009) étant un peu décalées de celles trouvées dans ce travail.

En outre, la similitude entre tronc et branches constatée sur les données scanner se confirme, aussi bien

pour l'infradensité que pour la densité humide. Il est donc raisonnable d'utiliser des valeurs de tronc pour les branches, quand on ne dispose pas de mesures plus précises, au moins pour les feuillus (trop peu de données sur les résineux ici).

Le second résultat concerne la densité humide, ou masse volumique fraîche, des essences. Il résulte d'une approche théorique qui permet de décomposer la densité humide en une part solide (sèche), l'infradensité, et une part humide, le taux de remplissage, ces deux parts étant indépendantes l'une de l'autre. Le taux de remplissage représente le volume d'eau dans le bois rapporté au volume disponible pour cette eau (et non pas au volume total); il varie entre 40 et 100 % pour les arbres mesurés dans le projet, en période hivernale.

L'organisation générale des essences les unes par rapport aux autres en fonction de la décomposition infradensité/taux de remplissage répond pour une majorité à des taux de remplissage assez semblables entre feuillus durs et tendres, ce qui produit une sorte de compensation : moins la densité sèche est importante, plus il y a d'espace disponible pour l'eau et, à taux de remplissage équivalent, il y a donc plus d'eau dans les bois tendres. Cette compensation conduit à des masses volumiques plus stables entre ces essences que ne le sont leurs infradensités. Mais ce n'est pas une règle générale : certaines essences ont un comportement différent et présentent un taux de remplissage particulièrement fort, comme l'eucalyptus ou même le hêtre, ou au contraire particulièrement faible comme le robinier et le frêne. Ce type de résultat, s'il était confirmé serait d'un grand intérêt pratique : à infradensité équivalente, ces essences à faible taux de remplissage ont une humidité globale plus faible à l'abattage, ce qui représente *a priori* un gain sur la phase de séchage qui suivra.

Reste à tester plus largement ces hypothèses, en particulier pour confirmer les résultats pour les essences comme robinier et frêne, et pour les résineux qui se limitaient ici au pin d'Alep. En recherchant dans les bases de données anciennes de quoi compléter notre échantillon, nous avons réalisé que la combinaison des mesures nécessaires au calcul du taux de remplissage est extrêmement rare. Les travaux sur les apports du scanner tomographique à rayons X (Longuetaud *et al.*, ce dossier) redoublent donc d'intérêt puisque cet outil permettra de mesurer plus rapidement les variables infradensité et taux de remplissage pour différentes essences et au sein de l'arbre. Il sera alors possible de reproduire nos analyses sur un plus large panel d'essences et de conditions de croissance.

Fleur Longuetaud

Frédéric Mothe

Philippe Santenoise

Michaël Rivoire

Mériem Fournier

INRA, UMR 1092-LERFoB
54280 Champenoux
prenom.nom@nancy.inra.fr

Laurent Saint-André

INRA, UMR 1138-BEF
54280 Champenoux

Christine Deleuze

ONF, département R&D

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants
- à Jean-Luc Dupouey qui a partagé sa compilation de données d'infradensités pour différentes essences de la ressource française.
- à Nancy Mendow et Emmanuel Cornu pour les mesures d'infradensité des branches, et à F. Ghougali et A. Lam qui ont réalisé leur stage de Master 1 sur ce sujet.

Les unités BEF et LERFoB bénéficient d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Bibliographie

Chave J., Coomes D., Jansen S., Lewis S., Swenson N., Zanne A.E., 2009. Towards a Worldwide Wood Economics Spectrum. *Ecology Letters* vol. 12 n° 4 pp. 351-366

Ghougali F., 2010. Répartition de la densité du bois dans les troncs et les branches d'arbres forestiers de plusieurs essences en France. Mémoire de M1 FAGE, LERFoB – Université de Nancy 1, 25p.

Kellogg RM, Wangaard FF, 1969. Variation in the cell-wall density of wood. *Wood Fiber* vol. 1 n° 3 pp. 180-204

Lam A., 2010. Variations de la densité du bois et de la teneur en eau dans des tiges de Hêtre – Etude de l'effet du facteur sol le long d'une toposéquence. Mémoire de M1 FAGE, LERFoB – Université de Nancy 1, 31p.

Passialis, C. N. 1998. A Comparison of Two Methods for Determining the Basic Density of Small Irregular Samples of Old Waterlogged Wood. *Holz Als Roh- und Werkstoff*, vol. 56 n°1 pp. 91-92

Santenoise P., 2011. Etude de la variabilité intra-arbre, inter-arbre et inter-essence de la masse volumique fraîche du bois et des variables associées. Mémoire de stage de Master 2 IMOI, 31 p.

Zanne A.E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D.A., Ilic J., Jansen S., Lewis S., Miller R., Swenson N., Wiemann M., Chave J., 2009. Data from : Towards a worldwide wood economics spectrum, 20 février 2009. <http://hdl.handle.net/10255/dryad.234>

Qualification du bois énergie : peut-on aller jusqu'au pouvoir calorifique ?

Dernier aspect à estimer dans l'optique bois énergie : le pouvoir calorifique « supérieur » (PCS), qui traduit le potentiel énergétique de la biomasse, sachant que l'énergie réellement dispensée dépendra fortement de l'humidité, du conditionnement et des conditions de combustion. L'idée est de modéliser le PCS à partir de la biomasse et de la composition minérale car, selon la littérature, le PCS est lié au taux de cendres, donc aux minéraux. Une démarche plus complexe que prévu pour un résultat assez simple, encore provisoire mais très prometteur.

L'ensemble du projet EMERGE a permis de rassembler des outils pour « quantifier » le bois énergie, ou plus généralement l'ensemble du bois, indépendamment de ses utilisations : volume total ou volume de tige à différentes découpes, biomasses correspondantes et minéralomasses associées. Mais il convient, pour aller au bout de la logique du projet, de se pencher aussi sur la qualification énergétique de ce matériau : même si l'on peut faire feu de tout bois, tous les bois ne sont pas équivalents.

La qualité des biocombustibles solides, dont le bois, est régie par la série des normes NF EN 14961 (AFNOR, 2010). L'appréciation repose sur des critères de masse volumique, taux d'humidité, pouvoir calorifique, taux de cendres, teneurs en éléments majeurs et granulométrie. Le premier déterminant de la qualité énergétique est cependant le pouvoir calorifique et c'est ce que nous avons voulu explorer plus avant. La teneur en cendres y étant étroitement associée, nous l'avons étudiée en même temps. En revanche d'autres aspects importants ne sont pas abordés ici, soit parce qu'ils ont fait l'objet d'une étude à part entière dans le cadre du projet, comme la masse volumique, soit parce qu'ils

dépendent en grande partie de la méthode d'exploitation, comme l'humidité et la granulométrie. Il nous importait prioritairement de comprendre les différences inter et intra arbre, indépendamment des conditions d'exploitation et d'utilisation.

Dans une approche prospective visant à estimer la qualité énergétique d'une ressource bois, nous avons cherché à modéliser le pouvoir calorifique à partir de la biomasse et de la composition minérale, étudiées par ailleurs dans le projet. Une analyse bibliographique dans le domaine des énergéticiens sert de base à la construction d'un modèle en fonction de la composition minérale du bois.

Cependant les données dont nous disposons sont les compositions minérales établies par les biogéochimistes, selon des méthodes et pour des objectifs différents de ceux des énergéticiens : le rapprochement des deux domaines a donc exigé un travail préalable de transposition des méthodologies de mesures et de quantification de variables manquantes, comme le taux de cendres.

Nous présentons ici l'ensemble de cette démarche ; elle aboutit à un modèle encore très exploratoire,

et qu'il faut donc confirmer sur un échantillon plus large, mais qui permet d'étudier plus finement comment varie le pouvoir calorifique et le taux de cendres entre différentes essences et, pour une même essence, entre les différentes parties de l'arbre. L'exercice est illustré sur le cas du hêtre, dont les compositions minérales par compartiment sont bien documentées par les biogéochimistes de l'INRA-BEF.

Mesures de la qualité du combustible : pouvoir calorifique et taux de cendres

Le pouvoir calorifique dit supérieur (PCS) indique le potentiel énergétique de la biomasse. L'énergie réellement exploitée à partir de la combustion, traduite par le pouvoir calorifique inférieur (PCI), dépendra ensuite des conditions de combustion : humidité, conditionnement (et granulométrie pour des plaquettes), température et alimentation en oxygène de la chaudière (voir encadré).

La mesure standardisée du pouvoir calorifique supérieur permet de comparer les combustibles solides entre eux (toutes choses égales par ailleurs) et, pour la biomasse, d'étudier les différences entre essences et types de biomasse.

Le pouvoir calorifique : définitions et mesure

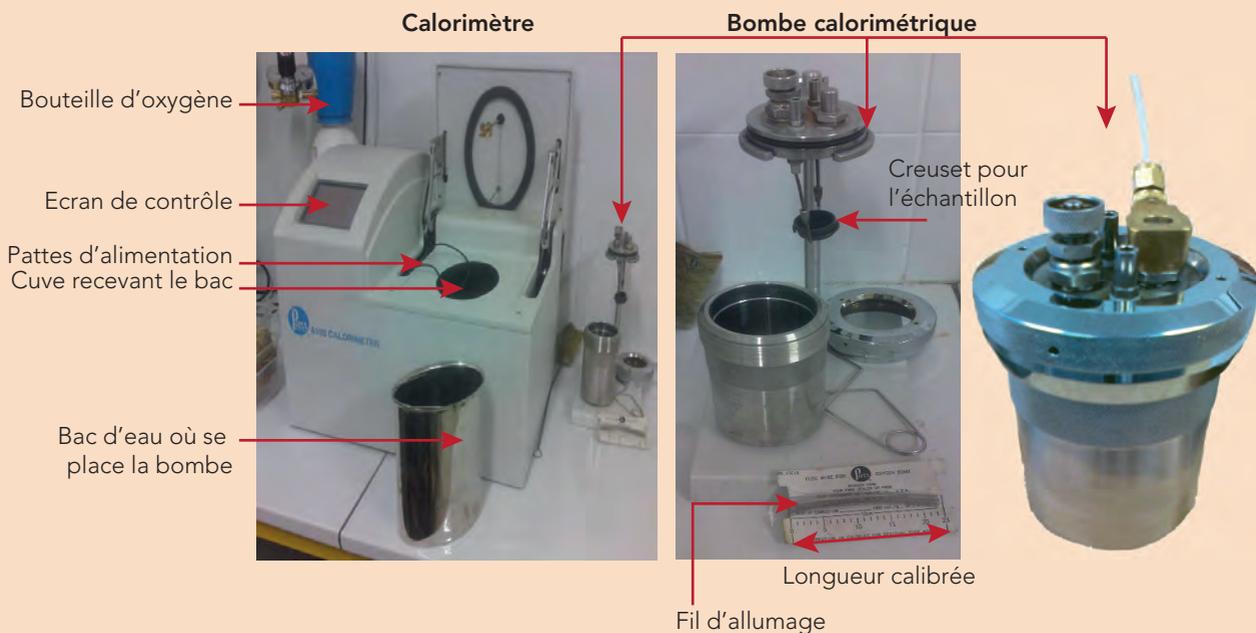
Le pouvoir calorifique représente la quantité de chaleur « contenue » dans une unité de masse du combustible ; c'est la chaleur que dégage sa combustion. L'unité utilisée dans les normes est le kJ/kg, mais on trouve dans la littérature des kCal/kg et pour du bois énergie les forestiers et les industriels utilisent plus souvent des kWh/tonne (pour mémoire, 1 kJ/kg = 0,24 kCal/kg = 0,278 kWh/Tonne).

Le pouvoir calorifique dit « supérieur » (PCS) est une valeur expérimentale qui quantifie en kJ/kg l'énergie dégagée par la combustion complète (en excès d'oxygène) d'une masse de combustible parfaitement sec, après condensation de toute la vapeur d'eau produite par l'oxydation de l'hydrogène du combustible. C'est le maximum de l'énergie de combustion.

Le pouvoir calorifique dit « inférieur » (PCI) représente la chaleur dégagée par la combustion, sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau (chaleur nécessaire à la vaporisation de l'humidité du combustible et de l'eau correspondant à l'oxydation de l'hydrogène). On le déduit du PCS à partir de l'eau récupérée à la fin de la combustion. En condition standardisée décrite ci-dessus, l'écart entre les deux dépend uniquement de la quantité d'hydrogène contenue dans la biomasse. Pour du charbon par exemple cet écart est compris entre 2 et 4 % tandis qu'il est plutôt de l'ordre de 7-9 % pour du bois (5 à 7 % d'hydrogène dans la matière sèche).

La qualification des combustibles commerciaux se réfère généralement au PCI car il est représentatif de l'énergie théoriquement récupérable (combustion parfaite) dans la plupart des chaudières. Cependant les chaudières à condensation permettent de récupérer une partie de l'énergie perdue par vaporisation de l'eau et donc de mieux valoriser le combustible. Les rendements des appareils étant calculés sur PCI en condition standardisée, certaines peuvent même revendiquer des rendements « supérieurs à 100 % ».

La mesure du PCS se fait selon la norme EN 14918 (AFNOR, 2010) pour des biomasses solides, au moyen d'une bombe calorifique de Mahler au sein d'un calorimètre (voir figure) : une masse précisément pesée de combustible séché à 103 °C pendant 24 heures est placée dans cette bombe, en présence d'une atmosphère concentrée à 20 bars de dioxygène, afin d'assurer la combustion complète de l'échantillon (on a même explosion). La bombe calorifique est placée dans une masse d'eau précisément pesée, et le tout est placé dans une enceinte adiabatique (parfaitement isolée). L'eau est brassée et sa température est mesurée tout au long de la manipulation, la variation observée de la température de la masse d'eau permet de déduire la quantité d'énergie libérée (en kJ) par la combustion de la masse de combustible (kg) : le PCS en kJ/kg.



Matériel de mesure du pouvoir calorifique

À droite, la bombe calorimétrique dans laquelle est placé un échantillon standardisé de poudre de bois séché à 103 °C ; à gauche : un calorimètre dans lequel est placée la bombe afin de mesurer la différence de température de l'eau, et donc l'énergie libérée par la combustion totale de l'échantillon.

Le taux de cendres, c'est-à-dire la matière sèche solide résiduelle après combustion, est la deuxième information importante pour le combustible bois. Selon le procédé de combustion, en effet, les cendres peuvent devenir fusibles et poser des problèmes d'encrassement des chaudières; et c'est dans tous les cas un résidu que l'on cherche à réduire au maximum. La mesure du taux de cendres est elle aussi standardisée, sur échantillon séché à 103 °C (norme EN 14775, AFNOR 2010).

Les sources de variation du pouvoir calorifique du bois, d'après la littérature

L'humidité du bois

D'après les différentes études sur le sujet, le pouvoir calorifique du bois dépend essentiellement de son degré d'humidité (à l'entrée de la chaudière). En effet la mesure standardisée du pouvoir calorifique se fait sur des échantillons séchés à 103 °C mais, en présence d'humidité, une partie de l'énergie est perdue dans la production de vapeur d'eau. Il existe une relation linéaire entre le PCI et le pourcentage d'humidité (voir ADEME, 2002; figure 1) : on gagne près de 20 % de PCI en passant de 40 à 30 % d'humidité, et encore 17 % de PCI si l'humidité baisse jusqu'à 20 %. Sachant que le séchage du bois en bord de route est assez rapide juste après la coupe et qu'il ralentit ensuite (la courbe du taux d'humidité en fonction du temps a une forme exponentielle décroissante : Deleuze et al., 2001), les premières semaines de séchage ont un effet particulièrement spectaculaire sur le pouvoir calorifique.

Par ailleurs une forte humidité empêche souvent la combustion complète du bois dans la chaudière; outre la baisse du PCI, elle réduit de ce fait le rendement thermique et peut également conduire à un encrassement et à des rejets accrus dans l'atmosphère.

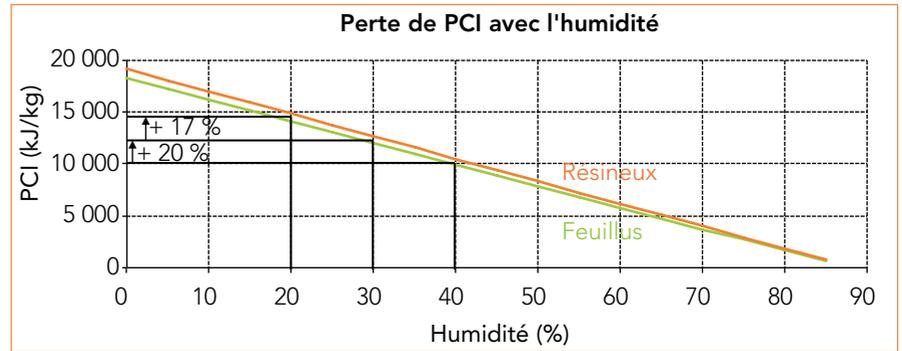


Fig. 1 : variations du pouvoir calorifique inférieur en fonction de l'humidité du bois, en moyenne pour des résineux ou pour des feuillus (figure tirée du rapport ADEME 2002)

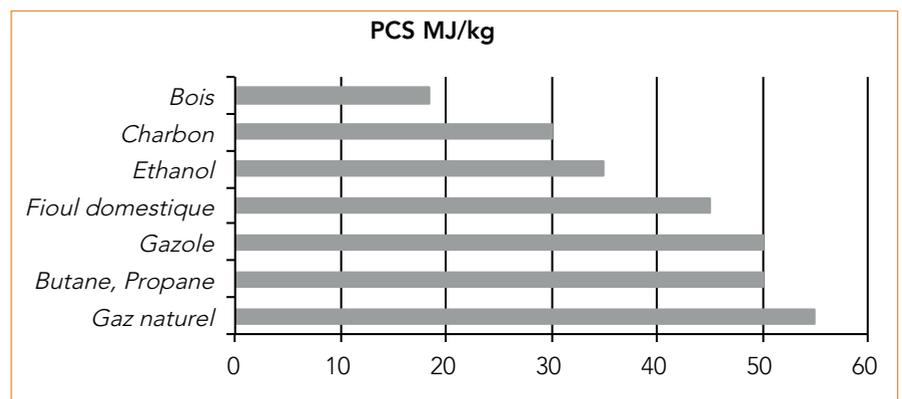


Fig. 2 : ordres de grandeurs de pouvoirs calorifiques supérieurs de différents combustibles

L'essence et les compartiments de l'arbre

Le deuxième facteur de variation du pouvoir calorifique auquel on s'intéresse est souvent l'essence, mais le type de compartiment dans l'arbre a également une influence (bois vs écorce, tronc vs menus bois...).

La différence entre essences est du second ordre : c'est d'abord une différence entre feuillus et résineux, de 5 à 10 %. Toutes choses égales par ailleurs (en particulier l'humidité), les résineux ont un meilleur pouvoir calorifique que les feuillus, notamment du fait des résines, qui améliorent le PCS. Cependant la valorisation de ce combustible, plus riche en énergie, dans des chaudières non adaptées peut là encore être source d'encrassement et de rejets indésirables dans l'atmosphère : la combustion, accélérée notamment par le fort PCS (et la densité moindre

du bois résineux), n'est alors pas assez alimentée en oxygène et les imbrûlés forment les suies qui partent dans les fumées.

Il y a peu d'information disponible sur des variations plus fines entre essences au sein des feuillus ou des résineux, mais elles semblent faibles entre résineux (de l'ordre de 1 % : ADEME 2001) tandis qu'entre feuillus, la différence s'observe surtout entre bois durs et bois tendres (ADEME 2008).

Enfin la littérature disponible ne dit rien sur les différences de pouvoir calorifique entre compartiments mais il y a eu des travaux sur la quantité de cendres produites : pour la combustion de bois « nu », par exemple, les cendres représentent environ 0,2 à 2 % de la masse sèche initiale, tandis que pour des écorces c'est plutôt de l'ordre de 5 % (voir RDVT n° 35).

L'approche des énergéticiens : pouvoir calorifique et composition minérale

Quand on s'intéresse au bois énergie, à son pouvoir calorifique, on se réfère nécessairement aux travaux des énergéticiens qui, depuis longtemps, ont cherché à expliquer, et à modéliser, les différences de pouvoir calorifique supérieures observées entre divers combustibles (figure 2). Dans la suite du travail, on ne parlera que du pouvoir calorifique intrinsèque, indépendamment de l'humidité du bois, c'est-à-dire du PCS.

Des modèles de pouvoir calorifique fondés sur la composition minérale du combustible

La plupart des modèles historiques concernent les combustibles fossiles. Les études focalisées sur la biomasse, et le bois en particulier, sont relativement récentes (la toute première à la fin des années 70).

La démarche des énergéticiens est de construire des modèles de pouvoir calorifique basés sur la composition dans les principaux éléments qui interagissent pendant la combustion. Les premiers sont évidemment le carbone, principal combustible (pour le bois, c'est 46 à 51 % de la masse sèche), l'hydrogène (5 à 7 %) et l'oxygène (42 à 46 %), mais aussi l'azote et le soufre (moins de 1 % chacun); souvent c'est le taux de cendres (0,2 à 5 %) qui rend compte indirectement de l'influence des autres éléments minéraux. En conséquence leurs modèles reposent principalement, voire uniquement (surtout pour les carburants fossiles), sur le taux de carbone et font intervenir ensuite l'hydrogène, puis l'oxygène et enfin parfois le soufre. Les modèles qui concernent le bois ou charbon de bois introduisent le taux d'azote et parfois le taux résiduel de cendres (en effets négatifs).

Appliquer cette démarche aux variations du pouvoir calorifique du bois ?

Nous avons vu, (Saint André *et al.*, dans ce dossier) que la composition minérale du bois varie non seulement selon l'essence de l'arbre et son environnement, mais aussi dans l'arbre, entre les différents compartiments (bois vs. écorce, taille du compartiment ou diamètre extérieur). L'approche des énergéticiens nous a incités à rechercher, de manière analogue, dans quelle mesure ces variations de composition pourraient influencer le pouvoir calorifique. L'enjeu est de pouvoir confronter, pour divers scénarios imaginables d'exploitation de bois énergie, le gain de pouvoir calorifique à la perte en éléments minéraux pour le milieu forestier.

Problème : la composition minérale du bois est affaire de point de vue et méthode

Les données dont nous disposons pour cette recherche viennent des biogéochimistes, qui s'intéressent essentiellement aux cycles des éléments minéraux dans l'écosystème. Ils analysent en priorité des macro-éléments comme le carbone et l'azote, mais aussi des micro-éléments : calcium, potassium, manganèse, magnésium, phosphore, soufre, aluminium ou sodium. Il n'est pas d'usage de mesurer les taux d'oxygène ou d'hydrogène, qui sont volatilisés pendant ces cycles et interagissent peu. À l'inverse les énergéticiens s'intéressent particulièrement à l'oxygène et l'hydrogène, en plus du carbone et du taux de cendres.

Autrement dit, les éléments analysés ne sont pas les mêmes entre les deux domaines. De plus, les normes de mesure ne sont pas non plus les mêmes. Pour les énergéticiens, les échantillons de combustibles sont, sauf exception, séchés à 103 °C alors que les biogéochimistes veillent à ne pas dépasser 65 °C, température au-delà de laquelle l'azote commence à se volatiliser. Il y a évidemment, entre le séchage à 65 °C et le séchage à

103 °C, une perte d'eau résiduelle, ainsi que des pertes de carbone en plus de l'azote. Il en résulte une perte globale de poids qui fait mathématiquement augmenter la concentration des autres éléments (par diminution du dénominateur « masse totale »).

Adapter l'approche des énergéticiens aux données bois : notre méthode

L'objectif est de prédire le pouvoir calorifique d'après la composition en minéraux du bois. Il s'agit de construire des modèles (plus ou moins détaillés) de pouvoir calorifique en fonction des compositions minérales telles qu'elles sont analysées par les biogéochimistes. Le cheminement est synthétisé en figure 3.

La démarche de modélisation

Plutôt que de partir sur des modèles empiriques liant statistiquement le pouvoir calorifique mesuré aux compositions minérales, nous nous sommes inspirés de l'approche des énergéticiens et de leurs types de modèles. Il nous a donc fallu trouver des variables cohérentes avec ces types de modèles, en intégrant à nos données de composition minérale les éléments nécessaires qui n'y figuraient pas, mais aussi en analysant les différences de concentrations entre les normes de séchage à 65 °C et à 103 °C. Cette exigence de compatibilité entre l'approche des énergéticiens et les variables mesurées par les biogéochimistes a nécessité une série de mesures, directes ou indirectes. Alors seulement des relations statistiques ont été cherchées entre le pouvoir calorifique et les concentrations disponibles, issues de la xylothèque INRA-BEF et des échantillons spécifiquement analysés dans le cadre du projet EMERGE.

Les échantillons choisis : un jeu de calibration, deux jeux de validation

La xylothèque INRA-BEF, riche de quelques 6 000 échantillons (plus de 1 300 arbres) dont on connaît la com-

position minérale (au sens des biogéochimistes), représente potentiellement une gamme énorme d'information pour l'établissement d'un modèle de pouvoir calorifique : distinction feuillus/résineux, distinctions plus fines pour un assez grand nombre d'essences, influence des conditions de croissance des arbres (sylviculture, station), de la taille des arbres, du compartiment dans l'arbre, etc.

Cependant le supplément de mesures (longues et laborieuses) dont nous avons besoin ne pouvait se faire, dans le cadre contraint de notre étude prospective, que sur un nombre restreint d'échantillons.

Nous avons donc réalisé une analyse statistique de l'ensemble des données disponibles (analyse en composantes principales) pour en tirer une sélection d'échantillons aussi pertinente que possible du point de vue des facteurs susceptibles d'influencer le pouvoir calorifique. Nous avons ainsi sélectionné 37 échantillons, explorant la plus grande variabilité de composition minérale et qui constituent notre jeu de calibration.

Par ailleurs une collaboration avec le CEA a permis de tester les modèles obtenus, et de les confronter aux modèles existants d'énergéticiens, sur des données indépendantes : 85 échantillons de bois, feuillus et résineux, mesurés avec le protocole classique des énergéticiens. Enfin une compilation bibliographique a permis de rassembler environ 70 séries supplémentaires de valeurs moyennes (concentrations d'éléments, taux de cendres et PCS) établies par des énergéticiens pour des échantillons de bois du monde entier.

Les mesures particulières pour faire un pont entre énergéticiens et biogéochimistes

Nous avons tout d'abord mesuré le pouvoir calorifique (PCS) des 37 échantillons de notre jeu de calibration selon le protocole normalisé (cf. encadré).

Nous avons alors fait un pont avec l'approche des énergéticiens en mesurant sur ces échantillons les variables manquantes : l'hydrogène, l'oxygène (qui n'est jamais mesuré directement mais se déduit de la composition en tous les autres éléments) ainsi que le taux de cendres. Cela consistait aussi à mesurer leur masse ainsi que leur composition en N et C, à 65 °C et à 103 °C pour évaluer les pertes entre les deux standards de séchage : perte de masse totale et perte en N et C par volatilisation.

L'ensemble de ces mesures a permis de construire des équations de passage pour les concentrations des différents éléments entre 65 °C et 103 °C. Pour le carbone et l'azote les équations tiennent compte de la volatilisation ; pour l'oxygène et l'hydrogène, elles tiennent compte

de la perte de masse attribuée à l'eau, et répartissent ces pertes au prorata de leur masse atomique. Pour les autres éléments, il s'agit d'une simple augmentation de concentration due à la perte de masse totale.

Exprimer le taux de cendres à partir de la somme des micro-éléments

Restait à faire un deuxième pont concernant l'expression du taux de cendres. C'est une variable importante de l'approche des énergéticiens, mais qui en soi ne concerne pas les biogéochimistes et dont la mesure n'est pas facilement accessible. Or on sait que les cendres sont fortement liées à la concentration minérale en éléments non utilisés directement dans la combustion, ni volatilisés aux températures correspondantes. Pour que notre modèle de pouvoir calorifique du bois puisse

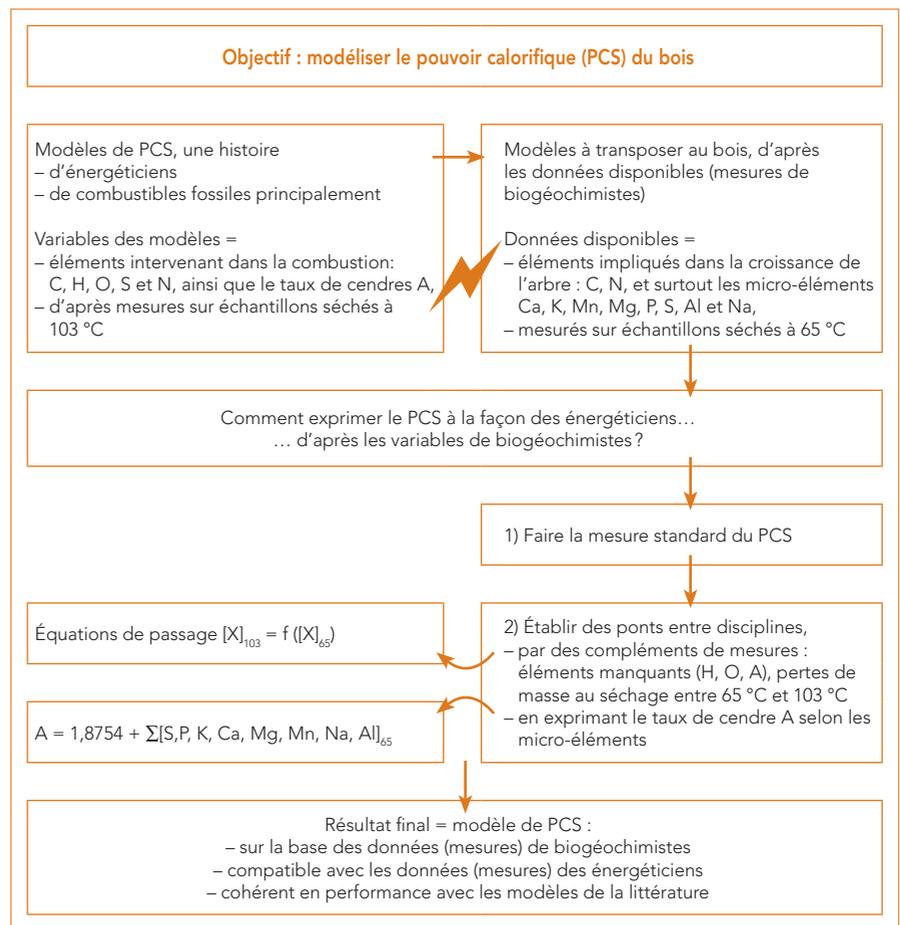


Fig. 3 : synthèse du cheminement suivi pour la modélisation du pouvoir calorifique du bois

être largement utilisé, nous avons donc cherché une formule liant le taux de cendres à l'information disponible pour ces éléments dans les données des biogéochimistes, à savoir la somme des concentrations en S, P, K, Ca, Mg, Mn, Na et Al (déterminées sur une matière séchée à 65 °C). Cette démarche est cohérente avec le fait que la répartition de ces minéraux dans l'arbre correspond aux constatations faites sur le taux de cendres : plus fort dans l'écorce,

dans les feuilles et les plus petites branches. La relation obtenue ($R^2 = 0,98$) est fort simple, le taux de cendres étant noté A (pour *ashes*, cendres en anglais) :

$$A = 1.8754 * \sum ([S]_{65}, [P]_{65}, [K]_{65}, [Ca]_{65}, [Mg]_{65}, [Mn]_{65}, [Na]_{65}, [Al]_{65})$$

Le facteur multiplicatif de près de 2 indique bien qu'il n'y a pas que ces seuls éléments dans les cendres. Il y a aussi des minéraux que les

biogéochimistes n'ont pas mesurés, notamment la silice (Si). D'autre part, les éléments se trouvent dans les cendres sous forme oxydée (par exemple : CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SO₃, P₂O₅, MnO₂) et le degré d'oxydation dépend des conditions de combustion. Cette relation directe entre concentration initiale et taux de cendres est donc complètement dépendante des conditions de combustion, ici données par la norme de mesure du taux de cendres.

Modèles EMERGE selon les concentrations mesurées à 65 °C ou convertis pour les concentrations à 103 °C		Données	R ²	Erreur (%)	Biais
C $PCS = 41.01 * [C]_{65} + 299.39$ ou $PCS = 41.01 * [C]_{103} + 299.39$	Calibration	0.93	1.21	2	
	CEA	0.32	4.74	-767	
	Biblio	0.65	4.19	-618	
CNA $PCS = 22.45 * [C]_{65} - 743.32 * [N]_{65} - 86.85 * A + 1.58 * [C]_{65} * [N]_{65} + 0.16 * [C]_{65} * A + 8969.69$ ou $PCS = 26.34 * [C]_{103} - 872.08 * [N]_{103} - 86.85 * A + 1.82 * [C]_{103} * [N]_{103} + 0.19 * [C]_{103} * A + 692214$ <small>termes d'effet direct termes d'interaction</small>	Calibration	0.97	0.79	10	
	CEA	0.32	3.02	-360	
	Biblio	0.57	3.18	-333	
Modèles de la littérature selon des concentrations mesurées avec la norme de séchage à 103 °C		Données	R ²	Erreur (%)	Biais
Boucher a $PCS = 32.76 * [C] + 60 * ([H] - \frac{[O]}{8}) + 9.25 * [S]$	Calibration	0.79	14.78	2908	
	CEA	0.31	16.16	3171	
	Biblio	0.69	16.52	3236	
Boucher b $PCS = 38.88 * [C]$	Calibration	0.93	5.57	1072	
	CEA	0.32	3.34	437	
	Biblio	0.65	3.7	542	
Boucher c $PCS = 37.98 * [C] - 230.4$	Calibration	0.93	8.85	1740	
	CEA	0.32	6.15	1117	
	Biblio	0.65	6.63	1218	
Channiwala $PCS = 39.91 * [C] + 117.83 * [H] + 10.05 * [S] - 10.34 * [O] - 1.81 * [N] - 2.11 * A$	Calibration	0.67	7.36	-1121	
	CEA	0.28	3.01	-52	
	Biblio	0.7	2.83	-4	
Friedl $PCS = 0.0355 * [C] - 23.2 * [C] - 223 * [H] + 0.512 * [C] * [H] + 13.1 * [N] + 20600$	Calibration	0.92	1.88	220	
	CEA	0.3	2.71	42	
	Biblio	0.68	2.57	112	
Sheng $PCS = 1367.5 + 31.37 * [C] + 70.09 * [H] + 3.18 * [O]$	Calibration	0.7	3.73	-543	
	CEA	0.28	2.58	102	
	Biblio	0.68	2.4	106	
Tillman a $PCS = 41.01 * [C] - 306$	Calibration	0.93	5.06	-978	
	CEA	0.32	8.87	-1683	
	Biblio	0.65	8.28	-1555	
Tillman b $PCS = 35.33 * [C]$	Calibration	0.93	14.11	2797	
	CEA	0.32	11.4	2213	
	Biblio	0.65	11.87	2301	
Yin $PCS = 29.49 * [C] + 82.50 * [H]$	Calibration	0.66	3.85	-507	
	CEA	0.28	2.97	301	
	Biblio	0.69	2.76	301	

Tab. 1 : comparaison des modèles de pouvoir calorifique (« C » et « CNA ») élaborés dans le cadre de l'étude EMERGE avec ceux de la littérature, sur les 3 jeux de données de l'étude

Le jeu « calibration » correspond aux 37 échantillons utilisés pour calibrer les modèles EMERGE, puis utilisées en tests sur les modèles de la littérature; les données « CEA » sont celles d'une étude sur des échantillons de bois mise à disposition par Capucine Dupont pour EMERGE (85 échantillons); les données « Biblio » sont des données issues de différentes publications et concernant des biomasses forestières (71 échantillons). Les couleurs vert, jaune et brun correspondent classiquement à un résultat satisfaisant, mitigé ou insuffisant.

Le modèle de pouvoir calorifique

Construction du modèle sur les données de calibration

Différents modèles de la littérature énergétique ont été testés sur les concentrations considérées à 103 °C de notre jeu de calibration (tableau 1). Cela donne une idée de leur validité et des éléments qui semblent les plus informatifs. Nous avons alors construit des modèles directement sur les concentrations à 65 °C des biogéochimistes, en choisissant d'après ces premiers tests les variables pertinentes pour le pouvoir calorifique.

La première de ces variables est le carbone (C), que l'on retrouve dans tous les modèles de la littérature et qui explique à lui seul la plus grande part de variabilité ($R^2 = 0,93$ sur les données de calibration); vient ensuite l'hydrogène (H) avec, selon les cas, l'oxygène (O) ou l'azote (N). L'oxygène est un élément important dans la combustion mais dont on détermine la concentration à partir de tous les autres, par soustraction. Le bois étant composé en grande partie de C, H, O et N, l'information simultanée de C, H et N permet d'en déduire grossièrement O. Enfin quelques modèles font intervenir le soufre (S) et le taux de cendres.

Les concentrations de H et O n'étant habituellement pas disponibles dans les données des biogéochimistes, nous avons cherché à construire des modèles basés plutôt sur C, N et le taux de cendres A. La prise en compte de N et A apporte une nette amélioration par rapport au modèle ne reposant que sur C (on obtient $R^2 = 0,97$ sur les données de calibration). N et A interviennent de manière négative sur le pouvoir calorifique : des taux importants de cendres ou d'azote ont pour premier effet de diminuer le pouvoir calorifique. Cependant une interaction significative avec le carbone (que reflètent respectivement les termes

[N] * [C] et A * [C] du modèle) balance un peu cet effet négatif.

Tests des différents modèles sur les 3 jeux de données

À l'issue de ce travail de construction, nous avons retenu deux modèles : le modèle « C » qui ne dépend que du carbone et le modèle « CNA », plus complexe, en fonction de C, N et le taux de cendres prédit comme combinaison des micro-éléments. Nous les avons testés sur les deux jeux de données indépendantes, « CEA » et « biblio », et confrontés aux résultats des 9 modèles de la littérature énergétique (tableau 1).

Le modèle « C » est le mieux classé, sur les 3 jeux de données, des 5 modèles simples; mais ces modèles simples (basés seulement sur [C]) sont globalement moins précis que les modèles plus complexes.

Il faut surtout retenir que les deux modèles que nous avons construits donnent des résultats voisins de ceux de la littérature des énergéticiens. C'est en soi un résultat remarquable car ils permettent de prédire un pouvoir calorifique directement sur des données provenant des travaux de physiologie, malgré les manques et les biais par rapport aux données habituelles des sciences de l'énergie.

Finalement, comment varie le pouvoir calorifique ?

Quel que soit le modèle, le carbone est l'élément explicatif principal du pouvoir calorifique. Ce qui n'est pas surprenant puisqu'il représente grosso modo la moitié de la composition du bois, proportion relativement stable d'une essence à l'autre (légèrement supérieure pour les résineux). Les seuls autres éléments qui soient apparus significatifs sont l'azote et le taux de cendres, donné par les micro-éléments comme indiqué précédemment.

À titre exploratoire nous avons appliqué notre modèle de pouvoir calorifique « CNA » aux données de

minéralomasse par compartiment disponibles pour le hêtre (et décrites par Saint André et al., ce dossier). Ce travail prédit en fait deux grandeurs : le pouvoir calorifique et le taux de cendres, lequel, outre son statut de variable intermédiaire du PCS, est aussi en soi un critère de qualité du combustible. Les estimations moyennes obtenues par tissu et compartiment (tableau 2) sont très cohérentes avec la littérature en ce qui concerne le taux de cendres : beaucoup plus fort dans les écorces que dans le bois, intermédiaire dans les feuilles.

Pour le pouvoir calorifique, les variations obtenues sont un peu plus difficiles à analyser, du fait des interactions prises en compte dans le modèle. D'après les termes d'effet direct (pour [C], [IN] et A, voir tableau 1), on s'attend à voir diminuer le pouvoir calorifique quand la teneur en éléments minéraux ([N] et A) augmente, soit *a priori* plutôt dans les plus petites branches, les feuilles et les écorces. Cependant ceci ne se vérifie grossièrement qu'au sein d'un même tissu : pour l'écorce en particulier (figure 4), une augmentation du taux de cendres entraîne bien une diminution du PCS. En revanche, la comparaison entre les tissus et parties de l'arbre montre que le PCS est maximal pour les feuilles, malgré un taux de cendres de près de 4 %. Selon notre modèle, leur concentration légèrement plus forte en azote et carbone « booste » le PCS car le terme d'interaction positif entre [C] et [N] est assez fort pour compenser les effets directs négatifs de [IN] et A.

L'idée préconçue que le pouvoir calorifique serait négativement lié au taux de cendres est donc ici infirmée : le pouvoir calorifique et le taux de cendres sont deux mesures complémentaires de la qualité du combustible.

Les petites branches et menus bois (avec leur écorce) sont intermédiaires entre les deux extrêmes que repré-

sentent les feuilles et les écorces : ils ont un pouvoir calorifique assez proche de celui du bois (sans écorce) de la tige, de l'ordre de 19 500 kJ/kg, malgré des taux de cendres supérieurs. Notons enfin que l'écorce seule des plus grosses branches et de la tige a les plus forts taux de cendres et les plus faibles pouvoirs calorifiques.

Les relations entre éléments minéraux et pouvoir calorifique ne sont pas directes du fait de leur agencement moléculaire différent selon les essences, compartiments (tronc, branches, diamètres) et tissus (bois, écorce, feuilles) dans l'arbre. Notre modèle basé sur la chimie minérale parvient à saisir des variations qui s'expliquent par la chimie moléculaire de la biomasse, en particulier par l'interaction entre C et N.

Conclusion, limites et perspectives

La prédiction du pouvoir calorifique en fonction de grandeurs disponibles dans le projet Emerge, notamment les concentrations en éléments minéraux aura été une aventure bien plus mouvementée que nous ne l'avions imaginé pour une analyse prospective. Il ne suffisait pas de réaliser une mesure supplémentaire (le PCS) sur quelques échantillons afin d'en tirer un modèle prédictif. Il a fallu saisir les différences fondamentales entre l'approche des énergéticiens et celle des biogéochimistes, détecter les écarts de normes et de calculs, et élucider le tout pour construire des ponts entre les deux domaines et leurs variables de prédilection.

Finalement nous obtenons un modèle de pouvoir calorifique relativement simple, cohérent avec ceux des énergéticiens mais utilisable sur les données de biogéochimistes. Cela permettra donc *in fine* de traduire en terme énergétique, différentes hypothèses de récoltes, que les gestionnaires pourront analyser de leur côté en terme d'exportation minérale.

Tissu	Compartiment	Nombre d'échantillons	PCS (kJ/kg)	Taux de cendres (%)
Bois	Branches 0 à 4 cm	47	19 350	0.82
	Branches 4 à 7 cm	33	19 435	0.71
	Branches >7 cm	35	19 265	0.88
	Tronc >7 cm	144	19 417	0.82
Ecorce	Branches 0 à 4 cm	47	20 294	2.15
	Branches 4 à 7 cm	33	20 066	2.34
	Branches >7 cm	42	18 041	5.53
	Tronc >7 cm	100	18 941	4.93
B+E	Branches 0 à 4 cm	293	19 503	1.25
	Branches 4 à 7 cm	263	19 438	1.19
	Branches >7 cm	46	19 585	1.00
	Tronc >7 cm	219	19 714	1.40
Feuilles		78	20 479	3.82

Tab. 2 : simulation de taux de cendres et de pouvoir calorifique supérieur à partir de données de minéralomasse INRA-BEF pour le hêtre; valeurs moyennes. (B+E = Bois et écorce)

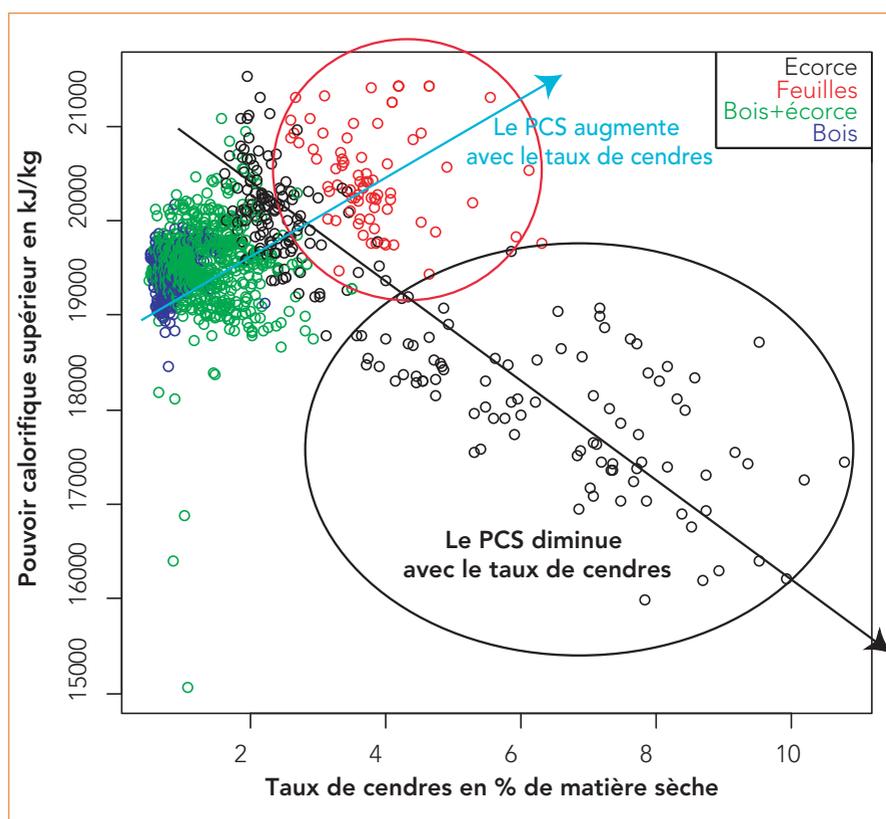


Fig. 4 : variations du pouvoir calorifique supérieur en fonction du taux de cendres, pour le hêtre (données minéralomasse de la base INRA-BEF)

Le PCS est calculé avec le modèle « CNA », le taux de cendres avec la formule combinant les éléments minéraux (S, P, K, Ca, Mg, Mn, Na). Le cercle noir présente la tendance générale connue d'une diminution du pouvoir calorifique quand le taux de cendres augmente. Le cercle rouge signale cependant le fort pouvoir calorifique des échantillons de feuilles malgré leur taux de cendres important. La flèche turquoise souligne que, dans la comparaison entre tissus, le PCS peut augmenter avec le taux de cendres du fait des interactions liées à des compositions différentes.

Le taux de cendres n'a été étudié ici que comme une variable intermédiaire pour prédire le pouvoir calorifique, mais la formulation trouvée en fonction de la somme des micro-éléments est en soi un résultat digne d'intérêt. Cela permet d'affiner, d'après la distribution des minéraux dans l'arbre, des constats déjà connus : on sait par exemple que les écorces ont un taux de cendres plus fort que le bois, mais on peut maintenant prédire que ce taux augmente quand la taille du compartiment ou de la branche diminue (diamètre extérieur).

En outre il se confirme que le taux de cendres est bien une information complémentaire du pouvoir calorifique pour la qualification énergétique la biomasse. L'application de notre modèle au cas du hêtre l'a bien montré, le taux de cendres (donc la teneur en minéraux) n'a pas toujours de lien négatif direct avec le pouvoir calorifique : on peut observer des pouvoirs calorifiques élevés malgré des taux de cendres importants, comme dans les feuilles et les menus bois ! Cela vient de ce que des interactions entre certains éléments, bien prises en compte dans notre modèle « CNA », peuvent compenser les effets négatifs.

Cependant la portée de ces premiers résultats reste limitée du fait de la taille de l'échantillon. La méthode ayant été bien décrite, les protocoles de mesure discutés et adaptés, une nouvelle série de mesures permettra de les valider et de confirmer notamment les effets d'interaction observés.

Les modèles de concentrations en éléments minéraux, qui sont en cours de publication pour le hêtre et de finalisation pour les autres essences, permettront une prédiction plus directe du taux de cendres et

du pouvoir calorifique en fonction de l'essence, du compartiment de l'arbre et de sa taille. Cela nécessitera d'ajouter le carbone dans les éléments considérés, puisque c'est l'élément central du modèle de pouvoir calorifique. L'étape suivante sera de combiner ces différents modèles dans les outils de simulation de la croissance, afin d'analyser les gains en pouvoir calorifique par rapport aux pertes en éléments minéraux selon différents itinéraires sylvicoles et différentes hypothèses d'exploitation. Ce travail fait précisément l'objet de la thèse de Nicolas Bilot en cours à l'INRA.

Nicolas BILOT
Laurent SAINT-ANDRÉ
INRA, UMR 1138-BEF
54280 Champenoux
prenom.nom@nancy.inra.fr

Yann ROGAUME
ENSTIB, LERMAB
Épinal

Christine DELEUZE
ONF, département R&D

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants à Jean-Michel Leban, pour le démarrage du sujet avec Yann Rogaume et Laurent Saint-André, à Capucine Dupont et Yves-Marie Gardette pour les données utilisées en validation, à Claude Brechet pour les mesures de H, à Laurent Augusto et Guillaume Bodineau pour les échantillons supplémentaires.

Le BEF bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Bibliographie

Un article scientifique est en cours de soumission :

Bilot N., Saint André L., Rogaume Y., Brechet C., Augusto L., Dupont C., Bodineau G., Deleuze C., Predicting wood higher heating value from forest biomass nutrient content.

ADEME (anonyme), 2001. Mesure des caractéristiques des combustibles bois. Critt Bois – Fibois – CTBA, 34 p.

ADEME (Boucher B., Lourdais F., Willmann B.), 2002. Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés. Critt Bois – Fibois, 62 p.

ADEME (Le Net E., coord.), 2008. Référentiels combustibles bois énergie – définition et exigences. FCBA, 124 p.

Deleuze C., Laurier J.P., Fauchon T., 2001. Apport de la modélisation pour suivre et gérer l'évolution de la masse volumique de billons de bois d'industrie. Fiche Informations Forêt, n° 636, 6 p.

Représentations de la forêt et de la gestion forestière en milieu rural

Les RenDez-Vous techniques se sont déjà fait l'écho d'analyses issues des enquêtes nationales "Forêt et société" de 2004 et 2010. Situation démographique oblige, cela concernait surtout les urbains. Or plus de la moitié des forêts publiques sont situées en milieu rural; on s'intéresse donc ici à la spécificité (ou non) des relations que les ruraux ont avec la forêt, sous l'éclairage d'entretiens réalisés en 2012 dans deux territoires contrastés.

Gestionnaire des forêts publiques françaises, l'Office national des forêts (ONF) a un réel besoin de connaissance et de compréhension des pratiques et représentations de la forêt dans la société française. Au-delà de la mise en oeuvre de la politique d'accueil du public, il s'agit surtout de comprendre la perception que le public a de la forêt pour mieux répondre à des attentes complexes, parfois ambiguës, et pérenniser une gestion et une production de ressources renouvelables de fort intérêt pour la société.

C'est dans ce cadre que l'ONF a progressivement mis en place depuis 2003 des outils d'observation et de suivi de la demande sociale vis-à-vis de la forêt. Deux enquêtes nationales « Forêt et société » réalisées en 2004 et 2010 ont permis de broser un tableau actualisé de la fréquentation et des représentations de la forêt en France et de leurs évolutions. Mais, avec une population française urbaine à 80 %, ces enquêtes reflètent surtout les pratiques et représentations des citoyens.

Pour autant, les forêts publiques situées dans des communes rurales restent majoritaires en France. Or aucune des études menées depuis 2003 ne s'était intéressée spécifiquement à cette population. Il a donc semblé pertinent de s'interroger sur

la spécificité – ou non – des pratiques et représentations des ruraux, et des agriculteurs en particulier, vis-à-vis de la forêt.

Les analyses présentées s'appuient sur les enquêtes nationales 2004 et 2010, revisitées sous l'angle des pratiques et représentations des ruraux et surtout sur les apports d'une recherche qualitative effectuée en 2012 sur deux sites d'études, Saint-Sever dans le Calvados, et Colombey-les-Deux-Églises en Haute-Marne.

Cet article cible principalement les perceptions et représentations de la gestion et de l'exploitation forestières. La chasse, qui tient une large place dans les discours spontanés des interviewés tant à Saint-Sever qu'à Colombey-les-Deux-Églises, est un sujet à part entière qui a été volontairement mis de côté.

Méthodologie

Le baromètre « Forêt et société »

Les deux enquêtes nationales 2004 et 2010, pilotées au plan scientifique par l'université de Caen, constituent la première étape d'un baromètre « Forêt et société ». Réalisées en face-à-face sur un échantillon de 1000 personnes représentatif de la population française âgée de 15 ans et plus, établi selon la méthode des quotas, elles offrent un portrait actualisé

des Français dans leurs relations à la forêt. De plus, au-delà de la description instantanée, le fait de disposer de deux enquêtes menées dans les mêmes conditions à six ans d'écart permet d'analyser l'évolution des pratiques et représentations. C'est tout l'intérêt d'un « baromètre » régulièrement reproduit à l'identique (au moins pour un noyau dur de questions) selon le même protocole.

Ces enquêtes permettent de caractériser les pratiques et représentations de la forêt chez les ruraux, définis dans ce contexte comme les habitants des communes de moins de 2000 habitants (246 personnes dans l'échantillon de 2010). Parmi eux, les agriculteurs nous intéressaient particulièrement : en effet en 2008, les maires agriculteurs, bien que leur proportion ait fortement diminué, restent surreprésentés et 26 % des conseillers municipaux des communes de moins de 500 habitants sont agriculteurs (Koebel, 2012). Or les élus communaux figurent parmi nos interlocuteurs privilégiés. Toutefois, un constat s'impose : avec seulement 12 agriculteurs au sein de l'échantillon, cette catégorie ne peut faire l'objet d'aucune analyse statistique.

L'enquête qualitative de 2012

En complément de cette approche quantitative, une enquête qualitative a été réalisée en 2012 auprès d'un

structure du guide d'entretien

(Source : Étude qualitative sur les représentations et les pratiques de la forêt en milieu rural, 2013)

Le guide d'entretien élaboré pour l'enquête qualitative 2012 à Saint-Sever et Colombey-les-Deux-Églises est structuré en trois parties :

- dans une première partie, peu directive, le sociologue demande à l'interviewé de raconter sa dernière sortie en forêt;
- la deuxième partie, semi-directive, comporte une succession de questions sur les pratiques de la personne interrogée, l'évolution de la forêt et sa gestion; elle se conclut par une question sur la forêt idéale et la narration d'un moment agréable et d'un moment désagréable en forêt;
- la troisième phase confrontait les personnes interrogées à cinq photos neutres mais caractéristiques de thèmes liés à la forêt et à sa gestion, sur lesquels on souhaitait recueillir leurs réactions.



Forêt « propre », forêt « sale »
(termes non employés par le sociologue au cours de l'entretien)



Panneau « chasse en cours »



Exploitation forestière



Équipements d'accueil du public

échantillon de 22 résidents de deux localités rurales, 12 à Saint-Sever dans le Calvados à l'Ouest, et 10 à Colombey-les-Deux-Églises en Haute-Marne à l'Est.

Ces localités rurales se rapprochent par leurs caractéristiques démographiques, toutes deux communes de moins de 1500 habitants, et par la présence d'une forêt domaniale de taille similaire (1 788 ha à Colombey-les-Deux-Églises, 1 555 ha à Saint-Sever), feuillue en majorité et giboyeuse dans les deux cas. Elles se distinguent en revanche par le taux de boisement, beaucoup plus faible aux environs de Saint-Sever (8 % pour le département du Calvados contre 39 % en Haute-Marne), mais surtout par le fait que la forêt domaniale est isolée dans le bocage normand (à l'exception de quelques massifs privés) à Saint-Sever, alors qu'elle s'intègre dans un maillage dense de forêts communales à Colombey-les-Deux-Églises.

Des entretiens semi-directifs ont été conduits sur la base d'un guide d'entretien préétabli (encadré), laissant toutefois une grande liberté d'expression aux personnes interrogées.

Le choix des interviewés s'est porté sur des personnes vivant et travaillant sur le territoire concerné, en mettant particulièrement l'accent sur les agriculteurs, en activité (5) ou retraités (3) vivant à proximité de la forêt et les personnes ayant un mandat d'élu local (9).

Une enquête qualitative n'a pas de valeur statistique. Elle décrit des types idéaux qui ne sont pas totaux mais dominants. Toutefois, le choix des interviewés sur la base de profils prédéterminés et l'application rigoureuse du guide d'entretien, ainsi que la transcription exhaustive des entretiens enregistrés permettent de recueillir un matériau homogène, condition nécessaire à la qualité des interprétations qui en seront issues.

L'approche qualitative permet notamment de comprendre le sens que les interviewés donnent à leurs pratiques et d'affiner les résultats des enquêtes nationales. C'est l'intérêt des extraits d'entretien retenus comme illustration des propos.

Une forêt devant être entretenue et exploitée, sur le modèle de l'agriculture raisonnée

Une forêt propre mais sans trop

Intéressons nous tout d'abord aux réactions des ruraux face à la photo de « forêt sale » en opposition à l'image représentant la « forêt propre » (encadré). Le terme « sale » est spontanément employé par les interviewés et fait clairement référence à un manque d'entretien ou d'exploitation. « C'est une forêt qui ne doit pas être exploitée ou c'est un endroit qui est sale... » dit Alain, de Saint-Sever.

Dans la plupart des interviews, l'intervention humaine en forêt est ainsi valorisée, considérée comme nécessaire, en référence au modèle de l'agriculture « raisonnée ». Ce terme fait partie du vocabulaire des ruraux interrogés, contrairement à celui de durable qui n'a jamais été utilisé.

- « Ils [les écologistes] ne comprennent pas qu'une forêt, qu'un arbre, ça naît, ça grandit, ça meurt si l'exploitation ne l'entretient pas... Mais il faut le faire d'une façon raisonnée. » – Rodolphe, Colombey-les-Deux-Églises

C'est notamment la nécessité d'entretien et de valorisation de l'espace qui est clairement affirmée, avec pour une majorité d'interviewés le souhait d'une gestion plutôt interventionniste.

- « Oui mais pour tout dire, le « sale », il faut mettre des plantations. Si vous ne mettez pas de plantations, cela ne va pas aller » – Alain, Saint-Sever

Pour autant, la frontière est tenue avec une forêt trop propre, trop ordonnée qui ne répond pas non plus à ce qu'on attend d'une forêt bien gérée.

- « Quand c'est trop propre, je trouve que quand c'est trop carré, je trouve qu'il y a trop d'interventions de l'Homme et que ce n'est plus la forêt » – Sandrine, Colombey-les-Deux-Églises

Et les résineux, souvent désignés sous le terme générique de « sapins » sont volontiers mis sur la sellette comme symboles d'une gestion guidée par la seule rentabilité et mise à mal par les tempêtes. Cette critique concerne d'ailleurs davantage la forêt privée que la forêt publique dont la reconstitution a été l'occasion de « repenser la forêt autrement », affirme par exemple Jean, de Saint-Sever.

Les principes et impératifs de l'exploitation forestière reconnus

De fait, les ruraux interrogés, surtout les hommes, sans s'affirmer spécialistes, ont globalement une vision assez claire du cycle de la forêt gérée et de sa longue durée.

- « Par exemple, il y avait des arbres qu'on laissait vieillir, vieillir, vieillir et qui, au bout d'un moment, dépérissaient, parce qu'un arbre, lorsqu'il grandit, il faut aussi qu'il ait la place pour pouvoir se développer, respirer, faire sa photosynthèse et il y a un moment où il faut faire des coupes. C'est simple : dans les coupes, on abat les arbres qui sont plus faibles, plus fragiles, pour que les autres puissent continuer à se développer. Voilà, à peu près, ce que je dirais. » – Didier, Saint-Sever

- « Donc, aujourd'hui, ils laissent la pousse naturelle. [...] L'agent ONF pourrait mieux expliquer que moi, mais aujourd'hui vous avez des gros hêtres, par exemple dans une forêt, et vous avez des petits, plein de petits : on enlève tous les petits et on laisse les gros parce que ce sont eux qui font les semences [il fait un schéma]. [...] Et quand les semis, eux appellent ça des semis de hêtres, sont repoussés au bout d'une dizaine ou d'une quinzaine

d'années, ils vont en enlever deux. Ils vont laisser ces deux-là faire encore de l'ombre et puis, un moment donné, quand tout aura poussé, on va les couper... » – Kristian, Colombey-les-Deux-Églises

Mais une même réprobation face au manque d'entretien ou à une exploitation « brutale »

La force des propos

Les interviewés associent des formules similaires à la forêt « sale », laissée sans entretien et à une forêt exploitée sans soin ou de façon trop intensive à leur goût. Ce sont tout particulièrement l'impact des gros engins, avec la création d'ornières souvent dénoncée, et les phases de régénération où un terrain « nu » succède à la futaie mûre qui heurtent les sensibilités. Ces réactions paraissent fortes, mais elles sont ensuite souvent relativisées si l'exploitation est suivie de remise en état et/ou de reconstitution.

- (Photo de la « forêt sale ») « Il y a eu quoi là-dedans ? Ça, ça a été massacré, non ? » – Olivier, Colombey-les-Deux-Églises

- (Sur les engins d'exploitation) « Mais, sur le coup, quand il y a eu le passage [des engins d'exploitation], c'est un peu la guerre » – Michel, Colombey-les-Deux-Églises.

À votre avis, qu'est-ce qui menace la forêt française aujourd'hui... en 1 ^{er}	Ruraux 2010	Ensemble de la population 2010	Ruraux 2004	Ensemble de la population 2004
1 Les incendies	25,7	27,8	36	39,6
2 Les dangers naturels (tempêtes, inondations, avalanches)	17,4	14,6	18	12
3 Les pollutions de l'environnement	16,3	23,8	19,6	21,2
4 Le manque d'entretien	11,3	6,9	3,5	4,2
5 L'exploitation des arbres pour la production de bois	9,9	7,1	3,4	3,8
6 Le développement des villes et des routes	7,2	5,6	5,6	6,4
7 La fréquentation par le public	4,2	5,3	3,6	4,1
8 Le changement climatique	1,6	2,9	1,2	1,2
9 Les parasites (insectes, champignons, virus)	3,8	2,7	6,8	4,9
10 Le développement de l'agriculture	0,9	1,2	1,1	0,9
11 Autres	0,9	0,6		
[NSP]	0,7	1,6	1,2	1,7

Tab. 1 : la perception des menaces pesant sur la forêt
(Source : Enquête ONF/Université de Caen "Forêt et société", 2010 et 2004)

- (Sur les régénérations) « Si tu as une parcelle de 4 ha, que tu as des arbres gros comme ça et que, pas du jour au lendemain mais en l'espace de deux mois tout est arrivé à nu, ça fait comme s'il y avait eu une tempête ou je ne sais pas quoi... » – Hervé, Saint Sever

Le manque d'entretien vu comme une menace

Il est intéressant de rapprocher ces résultats de la perception des menaces pesant sur la forêt dans les enquêtes nationales 2004 et 2010 (tableau 1).

Les menaces les plus importantes pour l'ensemble de la population, incendies, pollutions et dangers naturels, le sont aussi chez les ruraux.

En revanche, la réponse « le manque d'entretien » est surreprésentée pour les ruraux chez qui elle arrive en 4^e position (5^e dans l'ensemble de la population), avec une forte augmentation entre 2004 et 2010. Il s'agit ici de ce qui menace la forêt en premier, obligeant les enquêtés à hiérarchiser leurs réponses. En 2004, les images de l'été caniculaire 2003, avec leur lot d'incendies, étaient très présentes, diminuant de fait la part des autres réponses. L'évolution

entre 2004 et 2010 doit donc être relativisée, mais la différence entre les ruraux et le reste de la population en 2010 mérite néanmoins d'être soulignée.

Avec l'importance donnée au manque d'entretien comme première menace chez 11 % des ruraux en 2010, se retrouve le besoin d'une forêt humanisée dans laquelle l'homme intervient pour reconstituer, pour ne pas laisser de l'espace à l'abandon, ne pas laisser perdre un matériau disponible. C'est aussi sans doute ce que traduit, dans une autre question, l'insatisfaction vis-à-vis de « la présence d'arbres morts », en légère diminution de 50 à 47 % dans l'ensemble de la population depuis 2004, mais surreprésentée et en légère augmentation chez les ruraux où elle passe de 59 à 62 %. Nous reviendrons plus loin sur l'évolution des pratiques de gestion à objectif environnemental.

Davantage d'opinions négatives vis-à-vis de l'exploitation en 2010

Une autre réponse attire l'attention, « l'exploitation des arbres pour la production de bois » considérée comme première menace sur la forêt par 10 % des ruraux en 2010 (tableau 1).

Cette réponse interpelle surtout le gestionnaire par son évolution depuis 2004.

Dans l'enquête, une autre question se focalisait sur les coupes (tableau 2). Leur perception reste majoritairement associée à des aspects positifs, mais son évolution de 2004 à 2010, notamment chez les ruraux, est inquiétante.

Si la population rurale privilégie davantage les réponses positives, 67 % d'opinions favorables, dont 38 % pour la réponse « on entretient la forêt » par rapport à 30 % dans l'ensemble de la population, les ruraux sont désormais au même niveau (30 %) que la population générale pour l'item « on détruit la forêt ». Et surtout, en 2004 ils n'étaient que 19 % à choisir cet item pour 27 % en général. Si cette tendance se confirmait lors d'une prochaine enquête, cela dénoterait une méconnaissance ou une incompréhension croissante des activités liées à l'exploitation de la forêt et au bois y compris en milieu rural.

Ces tendances reflètent sans doute les évolutions sociologiques des campagnes françaises, mais elles montrent aussi que les ruraux ne restent pas à l'écart des tendances générales observées dans la population.

Entre Saint-Sever et Colombey-les-Deux-Églises, des relations différentes à la forêt

Dans les deux terrains de l'enquête qualitative 2012, proches de forêts domaniales, les ruraux interrogés connaissent l'ONF, reconnaissent le professionnalisme des forestiers et globalement leur font confiance pour la gestion pratiquée.

- « Je pense que l'ONF fait quand même bien son travail, ce sont des professionnels avertis, je ne dis pas que tout est rose mais quand même : il y a un travail de qualité d'effectué. » – Didier, Saint-Sever

À quoi pensez-vous quand on coupe des arbres ?	Ensemble de la population 2010	Ruraux 2010	Ensemble de la population 2004	Ruraux 2004	
Cela crée de l'emploi	3,0	1,8	3,1	4,2	
Place aux jeunes arbres !	9,8	7,5	14,1	18,3	
C'est bien d'utiliser le bois, c'est un matériau écologique	16,4	19,3	14,3	15,3	Opinions positives
On entretient la forêt	32,8	38,1	36,4	39,6	
C'est inutile, la forêt n'a pas besoin de l'homme	5,3	2,5	2,9	1,4	Opinions négatives
On détruit la forêt	30,5	29,8	26,7	19,1	
[NSP]	2,4	0,9	2,6	2,1	

Tableau 2 : les représentations des coupes (Source : Enquête ONF/ Université de Caen "Forêt et société", 2010 et 2004)

À Colombey-les-Deux-Églises, l'attachement aux pratiques forestières traditionnelles

Pourtant, cette confiance d'ensemble n'exclut pas certaines réticences. Nous avons déjà évoqué la brutalité perçue de certaines interventions ou les dégradations causées par les engins forestiers, notamment en l'absence de remise en état rapide. Mais ces critiques concernent aussi largement des évolutions de gestion, à argumentaire environnemental dont l'intérêt n'est pas toujours compris. L'enquête nationale mettait en avant la perception plutôt négative du bois mort, particulièrement chez les ruraux. Les entretiens qualitatifs font référence à d'autres changements mal acceptés car assimilés à l'abandon de la culture forestière et des savoirs traditionnels, au profit de la rapidité et de la rentabilité des interventions.

- « C'est comme pour le lierre qu'il n'y a plus le droit de couper, j'ai dit [à l'agent de l'ONF] que jamais je ne lui dirai comment faire. Parce qu'on a plus le droit de les couper, c'est interdit. [Mais] Je le fais à ma manière ! Il sait que je le fais, mais je ne lui dirai jamais comment... [...] tous les anciens du secteur vous diront que "quand on laisse un lierre, le lierre fait crever l'arbre". Ça c'est sûr ! » – Lucien, Colombey-les-Deux-Églises

- « L'idée, c'est de faire produire un maximum la forêt donc tous les 10 mètres on fait un chemin pour pouvoir couper un arbre et le sortir sans abîmer les autres : la forêt se transforme en champs. » – Rodolphe, Colombey-les-Deux-Églises

- « Par contre, ce qui a changé, je me souviens, dans le temps, on faisait du feu parce qu'il fallait tout brûler, toutes les petites branches, tout ça, il fallait tout brûler, il fallait que le terrain soit propre, et on mangeait tous autour du feu le midi, alors que maintenant, on a plus le droit de brûler : c'est interdit. Pourquoi ? Je ne sais pas trop. » – Kristian, Colombey-les-Deux-Églises

Derrière ces affirmations, transparait un manque d'appropriation de ce qui est ressenti comme une simple « mode » sans réelle justification.

- « Parce qu'on avait l'habitude, quand on était gamin, d'aller ramasser les branches et quand on sortait d'un chantier, on avait un chantier propre. Alors qu'aujourd'hui, c'est le bazar partout : il y a des branches dans tous les sens, ce n'est pas joli quoi ! Enfin, c'est une autre mode... » – Kristian, Colombey-les-Deux-Églises

Ces réticences face aux évolutions de la gestion, décrites avec précision, souvent étayées par une connaissance et une expérience concrètes de la forêt, généralement depuis l'enfance, sont surtout le fait des habitants de Colombey-les-Deux-Églises. Elles dénotent une réelle proximité à la forêt, par ailleurs régulièrement fréquentée pour des activités diverses, et une familiarité importante avec la gestion forestière. De fait, les haut-marnais interrogés (sauf une jeune femme qui, plus jeune, a vécu dans la ville voisine) connaissent l'affouage et plusieurs font leur bois dans les forêts communales ou le faisaient. Entre chasse et affouage, nombreux sont ceux qui participent à des activités de « gestion » dans ces forêts.

À Saint-Sever, un espace susceptible de mise en valeur touristique

La forêt domaniale de Saint-Sever est en revanche surtout connue de ceux qui y pratiquent des activités de loisirs, c'est-à-dire les représentants d'une large classe moyenne. Leur description et leur perception de la forêt est essentiellement liée à ces activités et aux sites qu'ils fréquentent dans ce cadre. En termes de gestion (chasse, possibilité de faire du bois), l'impression qui domine est celle d'une forêt réglementée, aux pratiques contractualisées de façon stricte, mais que l'on ne connaît pas bien parce qu'on ne le fait pas soi-même.

- « C'est vrai que... on sent que l'ONF est en train de régler l'accès à la forêt. On sent bien qu'il y a une différence par rapport au moment où je suis arrivée là... » – Géraldine, Saint-Sever

Par ailleurs, l'investissement de la collectivité autour de la forêt de Saint-Sever se concentre sur un projet d'aménagement touristique avec pour objectif de dynamiser le territoire. Ces projets ambitieux de cabanes dans les arbres, et d'équipements pour le public, en lisière de la domaniale, laissent d'ailleurs sceptique une partie de la population, agriculteurs et ouvriers, ce que traduit par exemple Alain :

- « Il faudrait mieux qu'ils gardent le site comme il y avait dans le temps, comme dix ans en arrière, comme le parc animalier, c'était un bon coin pour aller se retrouver là-bas avec des amis... Vous mangiez là-bas, vous jouiez aux boules dehors, vous faisiez le tour du parc et du si peu d'animaux qu'il y avait et c'était un coin qui était très agréable. Et puis, il y avait du monde à ce moment-là... Tandis que là : est-ce que vous croyez qu'une personne de 70 et quelques va monter dans la maison ? Non. » – Alain, Saint-Sever

D'ailleurs, les agriculteurs de Saint-Sever ne se sentent pas vraiment proches de la forêt, qu'ils fréquentent peu et considèrent comme un milieu pour lequel ils n'éprouvent pas d'attirance particulière :

- Madame : « Parce que nous, quand on est quitte le dimanche, on est... Bah non... La forêt, on la voit tout le temps, on n'éprouve pas le besoin de... Mais je suis sûre qu'il n'y a pas que nous » [rires]

- Monsieur : « Il y en a qui vont jamais en forêt, c'est sûr... » – Monsieur et Madame Firmin, Saint-Sever

Conclusion

La complémentarité des deux enquêtes quantitatives nationales et des entretiens qualitatifs contextualisés s'avère tout à fait intéressante dans cette investigation sur les ruraux et la forêt.

Ce que les personnes interrogées expriment sur la forêt concerne aussi parfois plus largement leur perception des territoires ruraux et de leur évolution. Pour autant, les entretiens étaient centrés sur la forêt et il serait hasardeux de les utiliser pour aller au-delà de quelques « échappées » sur un monde rural en recomposition. Les ruraux sont aussi diversifiés que les urbains.

Des ruraux désireux de préserver une forêt humanisée

Tout d'abord, les perceptions et représentations de la forêt ont une part d'ambiguïté chez les ruraux comme dans le reste de la population.

Mais globalement, le qualitatif permet de confirmer que les ruraux des deux terrains d'enquête conservent en 2012 une certaine spécificité dans leur perception de la forêt et de sa gestion même si celle-ci semble se réduire : la description d'une forêt humanisée dans laquelle l'homme doit intervenir pour entretenir le milieu, le cultiver et y prélever des ressources sur le modèle de l'agriculture raisonnée paraît à première vue différente de « la mise en scène de nature sauvage » rendue accessible par une main invisible vue par la population urbaine (Granet, Dobré, 2009). Pour autant la physionomie de la forêt idéale correspondante, propre mais sans trop, n'est pas très différente.

Par ailleurs, la comparaison des enquêtes entre 2004 et 2010 montre une augmentation sensible de la vision négative de l'exploitation chez les ruraux. Et les entretiens pointent notamment une désapprobation vis-à-vis d'une exploitation

trop intensive, trop mécanisée ou de chantiers peu soignés avec un manque d'appropriation vis-à-vis de l'évolution de certaines pratiques de gestion en faveur de la biodiversité. Sur ce dernier aspect, les ruraux semblent même plus critiques que la population générale du fait de leur attachement à un entretien plus visible de la forêt.

Le rôle déterminant de l'environnement forestier de la forêt domaniale

La comparaison entre les deux sites d'études offre une perspective d'analyse complémentaire. Le lien à la forêt apparaît en effet d'importance et de nature différentes à Saint-Sever et Colombey-les-Deux-Églises.

Dans les deux cas, c'est surtout pour la promenade et le sport, pratiques plutôt urbaines qui se seraient étendues aux ruraux, que les forêts domaniales, avec leurs sites touristiques, leurs sentiers et leurs équipements d'accueil, sont évoquées. En dehors de ces pratiques de loisir, les interviewés ont peu de lien à la forêt domaniale et peu de connaissances concrètes sur la gestion pratiquée par l'ONF, au-delà des grands principes du fonctionnement de la forêt gérée.

À Saint-Sever, où la forêt domaniale est isolée dans le bocage, à l'exception d'un massif privé clos, les agriculteurs interrogés, faibles pratiquants d'activités de loisirs en forêt, affichent même leur volonté de mettre la forêt à distance et ne se sentent pas vraiment concernés par sa mise en valeur touristique.

En Haute-Marne, en revanche, la plupart des communes sont propriétaires de forêt. Dans les entretiens, ces forêts communales apparaissent spontanément, qu'il s'agisse d'affouage, de chasse, de reconnaissance du territoire pour préparer ces activités ou de l'exploitation. Et la familiarité de la plupart des interviewés avec la gestion et l'exploitation de ces forêts est évidente.

En effet, qu'ils soient agriculteurs, élus locaux, chasseurs ou affouagistes, nombreux sont ceux qui à Colombey-les-Deux-Églises pratiquent des activités de gestion, ou en lien avec la gestion. Les autres tirent leur connaissance de leurs proches. La culture forestière imprègne encore largement l'ensemble de la population. Derrière l'augmentation des critiques de la gestion transparait plutôt le regret de certaines de ses évolutions, elles-mêmes en partie reflet de l'affaiblissement des liens entre les personnes au sein de la communauté.

En l'absence de forêts communales¹ ou lorsque les seules pratiques liées à la forêt sont les activités de loisirs, le lien à la forêt n'a donc plus à voir avec la production de ressources, et la connaissance de la gestion n'existe quasiment plus. La forêt vue par les ruraux de Saint-Sever est finalement assez semblable à la vision des urbains même si l'intervention humaine y est mieux admise.

Des enseignements pour le gestionnaire

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ce travail.

■ Tout d'abord, la forêt domaniale reste un milieu globalement méconnu sauf en termes d'activités de loisirs, même en milieu rural. Lorsqu'elle est seule ou seulement accompagnée de grands domaines forestiers privés, c'est la gestion forestière dans son ensemble qui est ignorée. Si la confiance vis-à-vis de l'organisme gestionnaire est de mise, cette bienveillance paraît fragile face à tout ce qui peut être ressenti comme une agression vis-à-vis du milieu forestier. D'autant que les agriculteurs, *a priori* plus conscients des difficultés et contraintes de l'exploitation, et encore bien présents parmi les élus locaux des petites communes, sont parmi ceux qui ont le plus perdu le contact avec une forêt qu'ils ne fréquentent que rarement.

¹ L'analyse mériterait d'être reproduite dans un territoire où la forêt domaniale serait complétée par de la petite forêt privée paysanne.

■ Alors même que la fonction environnementale de la forêt est reconnue comme la priorité du public dans les enquêtes « Forêt et société » de 2004 et 2010, paradoxalement certaines évolutions de gestion, liées à une meilleure prise en compte de la biodiversité peinent à être comprises. Ce manque d'acceptation des nouvelles pratiques peut même être plus marqué en milieu rural lorsqu'il est assimilé à la perte des traditions et des liens communautaires. Davantage de pédagogie dans ce domaine serait sans aucun doute utile.

■ En présence d'un maillage important de forêts communales, la population rurale dans son ensemble reste imprégnée d'une culture forestière dans laquelle la production de ressources conserve une place importante. Ceux qui connaissent et qui « font » en forêt (Lewis et Deuffic, 2008), au sens où ils participent à la gestion (affouage, chasse), servent

d'initiateurs ou de médiateurs pour les autres. Les réticences visent davantage certaines modalités de gestion que l'exploitation dont l'utilité ne paraît pas contestée. La création d'instances de concertation n'est pas en soi une réponse suffisante.

Pour conclure, la tentation de l'isolement mérite d'être combattue. C'est plutôt en recréant de la proximité et du lien avec la forêt domaniale espace géré, en l'insérant dans le tissu local, y compris en milieu rural, qu'on pourra espérer davantage partager les enjeux du territoire comme les enjeux de la gestion.

Anne-Marie GRANET

ONF, Direction forêts et risques naturels

Rudy AMAND

Sociologue

Université de Caen Basse-Normandie

Centre d'Étude et de

Recherche sur les Risques et

les Vulnérabilités (CERReV)

Bibliographie

Amand R., Dobré M., 2013. Étude qualitative sur les représentations et les pratiques de la forêt en milieu rural. ONF/Université de Caen Basse-Normandie, 84p.

Dobré M., Lewis Nathalie, Granet Anne-Marie.—Comment les Français voient la forêt et sa gestion. Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 11, 2006, pp. 55-63.

Dobré Michelle, Cordellier M., 2011. Usages et images de la forêt en France : enquête « forêt et société. ONF/Université de Caen Basse-Normandie, 232p.

Granet A.-M., Dobré M., 2009. Les citadins et la forêt en France, Revue forestière française, vol. 61 n° 5 pp. 521-534

Koebel M., 2012. Les élus municipaux représentent-ils le peuple ? Portrait sociologique.

Métropolitiques, 3 octobre 2012. URL : <http://www.metropolitiques.eu/Les-elus-municipauxrepresentent.html>. Consulté 03/2014

Lewis N., Deuffic P., 2008. Du quantitatif au qualitatif : vers une compréhension globale des dynamiques sociales à la forêt. Enquêtes qualitatives réalisées à Tours (région Centre), dans les Ardennes (vallées de la Semoy et de la Meuse) et à Orcines (Puy-de-Dôme). ONF-CEMAGREF – UQAR, 54 p.

Salvador Juan, 1999. Méthodes de recherche en sciences sociohumaines : exploration critique des techniques, Paris : PUF, 296 p.



Affouage dans la région de Colombey-les-Deux-Églises

Avec ses piles de bois soigneusement triées, la coupe est perçue comme participant à l'entretien de la forêt.

à suivre

n° 45 - été 2014

Prochain numéro :

Le prochain numéro sera dédié à la restitution du colloque ONF « Quels investissements pour quelles forêts publiques demains ? » des 11-12 juin 2014.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* en ligne

Sur intraforêt : pour les personnels ONF, tous les articles sont accessibles au format pdf dans le portail de la direction technique et commerciale bois (Recherche et développement / La documentation technique) ; pour un article particulier, utiliser le moteur de recherche de la base documentaire.

Sur internet : [http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques))

La revue **RenDez-Vous techniques** est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à d'autres lecteurs (étudiants, établissements de recherche forestière, etc.). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires que sont les guides et autres instructions de gestion. Son esprit est celui de la gestion durable et multifonctionnelle qui, face aux défis des changements globaux, a abouti à l'accord conclu en 2007 avec France nature environnement : « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique.

Sous l'autorité du directeur de publication assisté d'un comité directeur ad hoc, la rédaction commande des articles, suscite des projets, collecte les propositions, organise la sélection des textes et assure la relation avec les auteurs. N.B. : certaines propositions, parfaitement légitimes en soi, ne se justifient pas forcément dans RDV techniques et méritent d'être orientées vers d'autres revues forestières. Enfin le comité éditorial, siégeant une fois par an, est informé de cette activité et émet ses avis, critiques ou suggestions.

Si vous désirez nous soumettre des articles

prenez contact avec :

ONF - Département recherche

Christine Micheneau

Tél. : 01 60 74 92 25

Courriel : rdvt@onf.fr

