



HAL
open science

Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes

Christine Deleuze, François Morneau, Jean-Pierre Renaud, Yannick Vivien,
Michaël Rivoire, Philippe Santenoise, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe,
Jean-Christophe Hervé

► To cite this version:

Christine Deleuze, François Morneau, Jean-Pierre Renaud, Yannick Vivien, Michaël Rivoire, et al.. Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2014, 44, pp.33-42. <hal-03016051>

HAL Id: hal-03016051

<https://hal.science/hal-03016051v1>

Submitted on 11 Jul 2024

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

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



HAL Authorization

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.

L 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, parabolöide ou néloïde). Cette relation est notamment utilisée pour estimer le volume d'une tige avec un relascope 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.

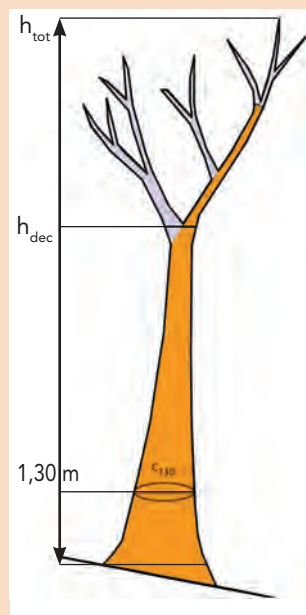


Figure : schéma du protocole de l'Inventaire forestier national pour la mesure de la hauteur de décrochement h_{dec}.

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.

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.

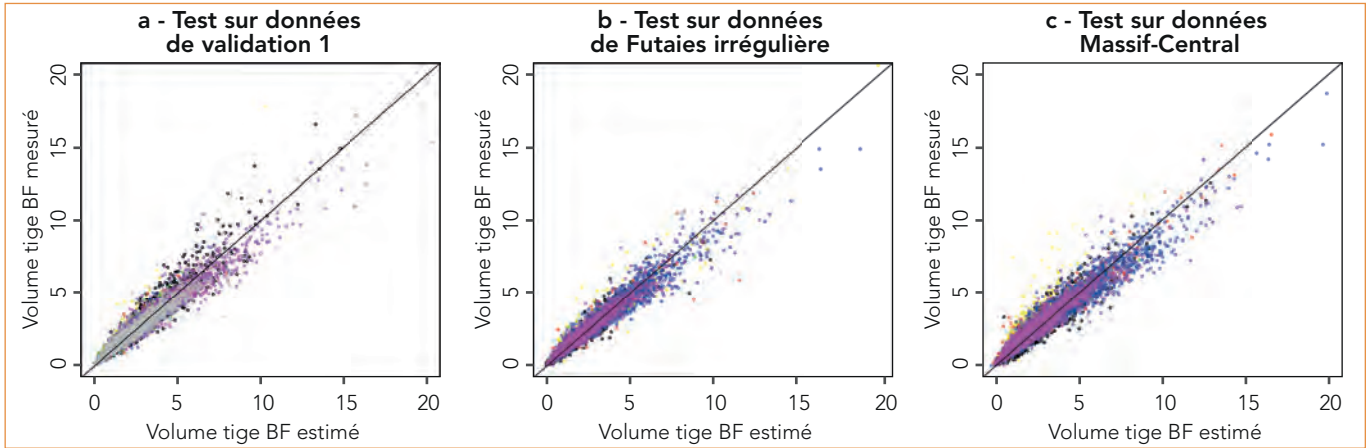


Fig. 1 : résultat des tests du modèle de volume bois-fort tige sur les données de validation, exclues préalablement du jeu de calibration

- 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.

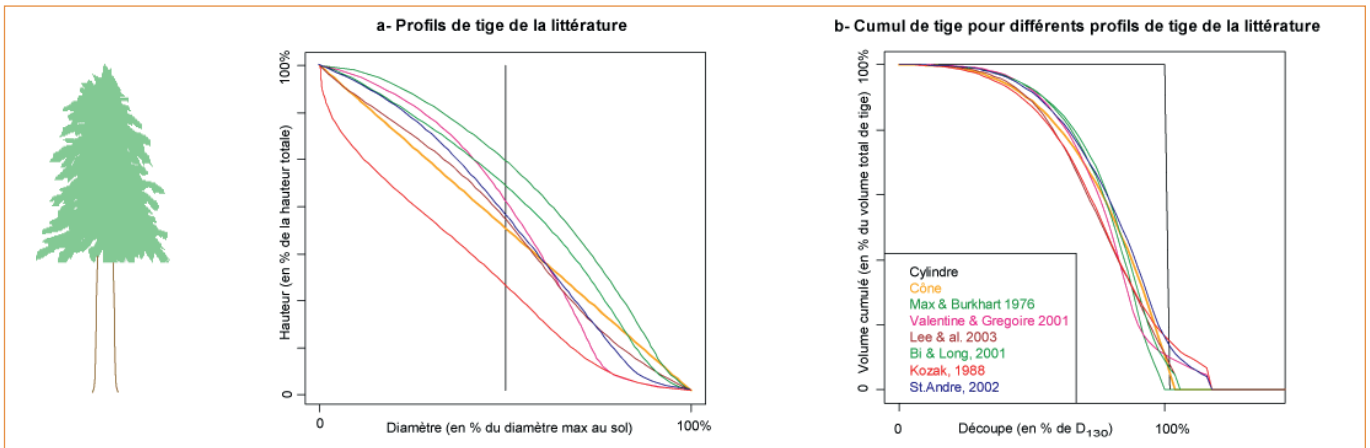


Fig. 2 : représentation de 8 modèles de profils de tige (a) et du volume de tige calculé pour le diamètre (découpe) correspondant (b), selon la hauteur dans l'arbre

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).

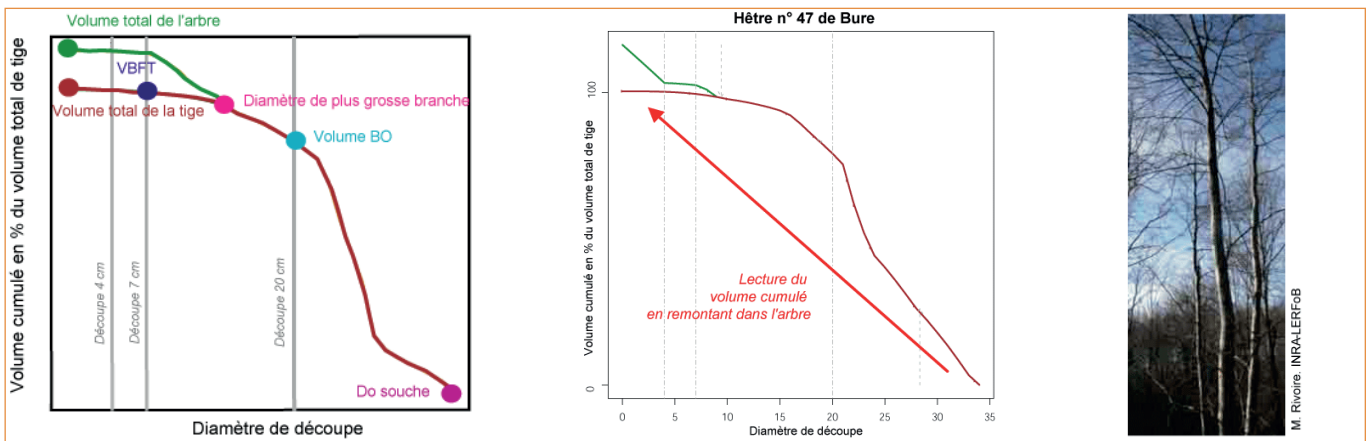


Fig. 3 : représentation théorique du volume cumulé d'un arbre en fonction de la découpe et visualisation pour un hêtre de la campagne de mesure EMERGE 2009

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 c₁₃₀ 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

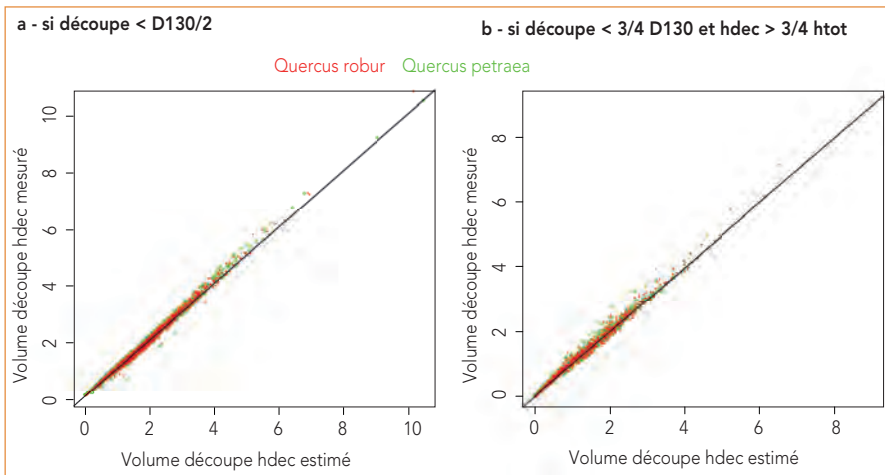


Fig. 4 : test du modèle de volume de tige, en fonction de la découpe, pour des chênes de la base de données de l'Inventaire forestier national. La découpe choisie ici est variable et correspond à la section mesurée à la hauteur de décrochement. On voit que le modèle fonctionne bien quand cette découpe est plus petite que la moitié du D₁₃₀ (fig 4a, 44 050 arbres); le test est également satisfaisant si on pousse cette découpe jusqu'aux 3/4 du D₁₃₀ à condition que la hauteur de décrochement soit au dessus des 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'approxi-

mation 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

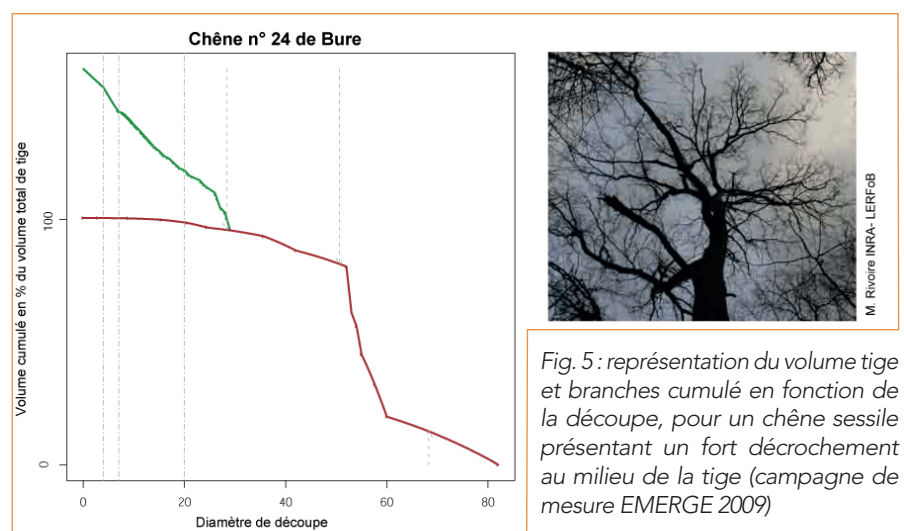


Fig. 5 : représentation du volume tige et branches cumulé en fonction de la découpe, pour un chêne sessile présentant un fort décrochement au milieu de la tige (campagne de mesure EMERGE 2009)

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

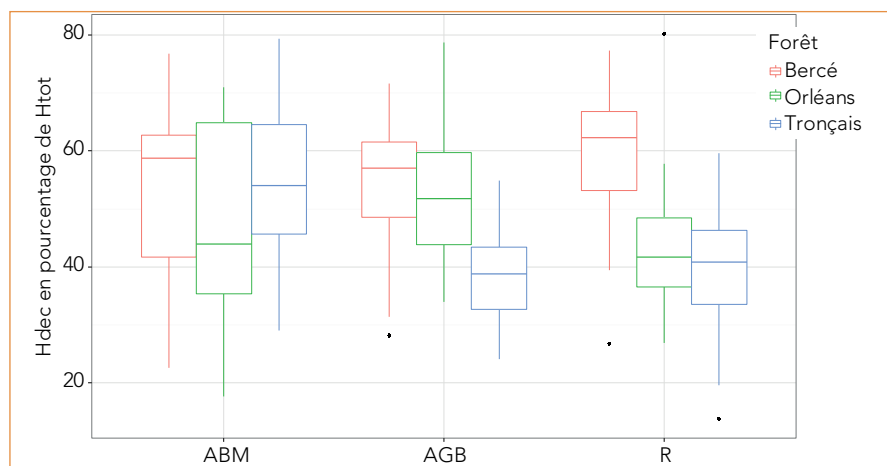


Fig. 6 : test en chênaie : distribution de la hauteur de décrochement (en pourcentage de la hauteur totale) par forêt et type de coupe (ou stade de développement)

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.

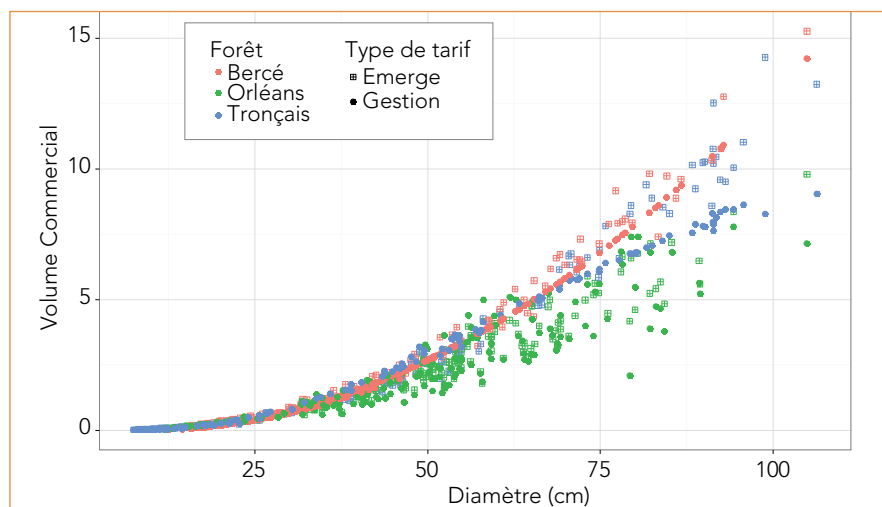


Fig. 7 : comparaison des estimations « gestion » et EMERGE du volume commercial tige en fonction du diamètre pour les trois forêts et les 4 stades de développement testés en chênaie.

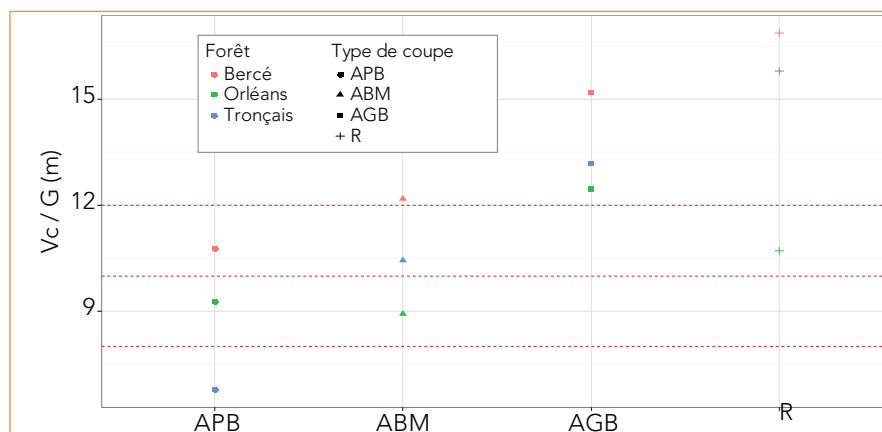


Fig. 7 : comparaison des estimations « gestion » et EMERGE du volume commercial tige en fonction du diamètre pour les trois forêts et les 4 stades de développement testés en chênaie.

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).