



HAL
open science

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

C. Deleuze, F. Morneau, J.P. Renaud, Y. Vivien, M. Rivoire, P. Santenoise,
Fleur Longuetaud, F. Mothe, J.C. Hervé, P. Vallet

► **To cite this version:**

C. Deleuze, F. Morneau, J.P. Renaud, Y. Vivien, M. Rivoire, et al.. Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2014, 44, pp.22-32. hal-01143797

HAL Id: hal-01143797

<https://hal.science/hal-01143797>

Submitted on 20 Apr 2015

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.

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 artéfact 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'artéfact 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'artéfact 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'artéfact, 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.

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

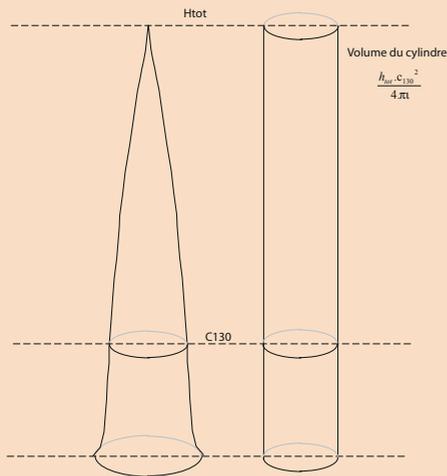


Fig. a : illustration schématique du coefficient de forme, rapport du volume total au volume d'un cylindre de même hauteur que l'arbre et dont la section est la surface terrière (soit par définition la section du tronc mesurée à 1,30 m).

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

$$formTotNew = formTot \times correction$$

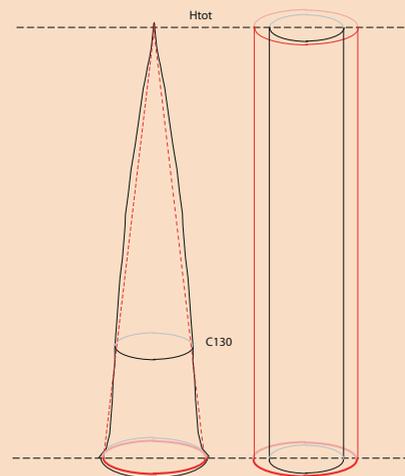


Fig. c : illustration schématique de la correction du coefficient de forme, en prenant comme référence un cylindre (en rouge) de même hauteur que l'arbre et ayant pour base la surface au sol extrapolée par un cône passant par la circonférence à 1,30 m.

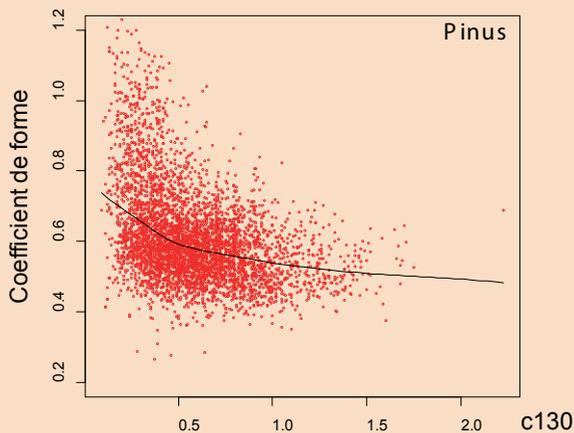


Fig. b : représentation du coefficient de forme *formTot* (tige et branches), calculé pour les pins, en fonction de la taille des arbres (circonférence à 1,30 m)

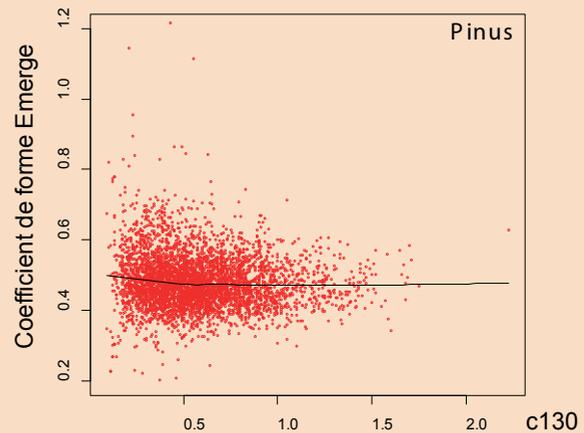


Fig. d : représentation du coefficient corrigé *formTotNew*, calculé pour les pins, en fonction de la taille des arbres (circonférence à 1,30 m).

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

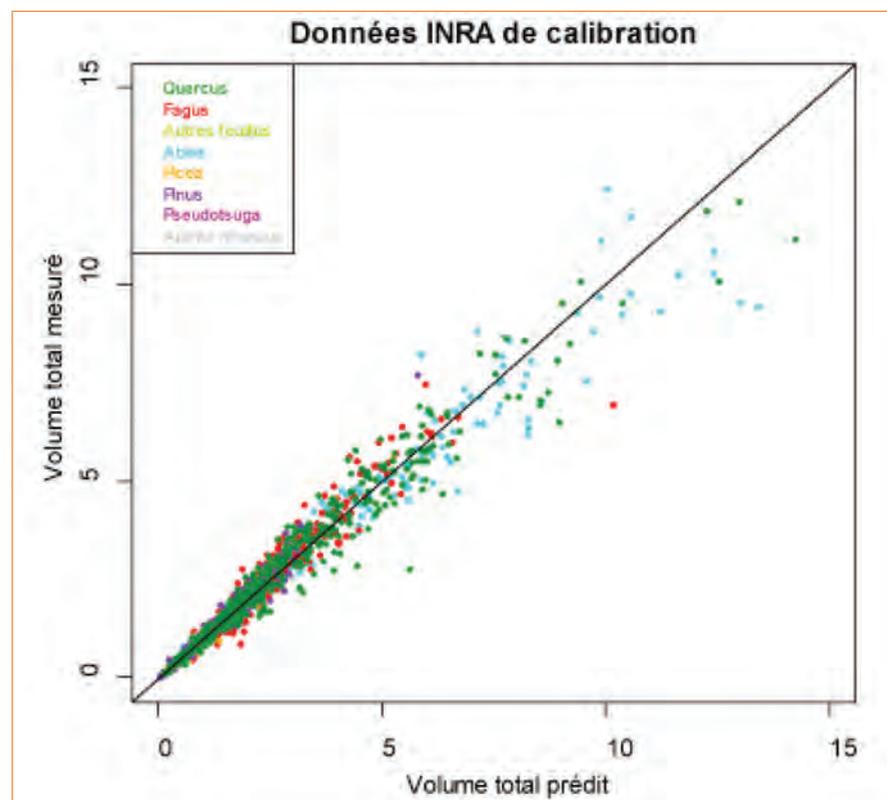


Fig. 1 : résultats de l'ajustement du modèle de volume total sur les données INRA pour 28 essences

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.

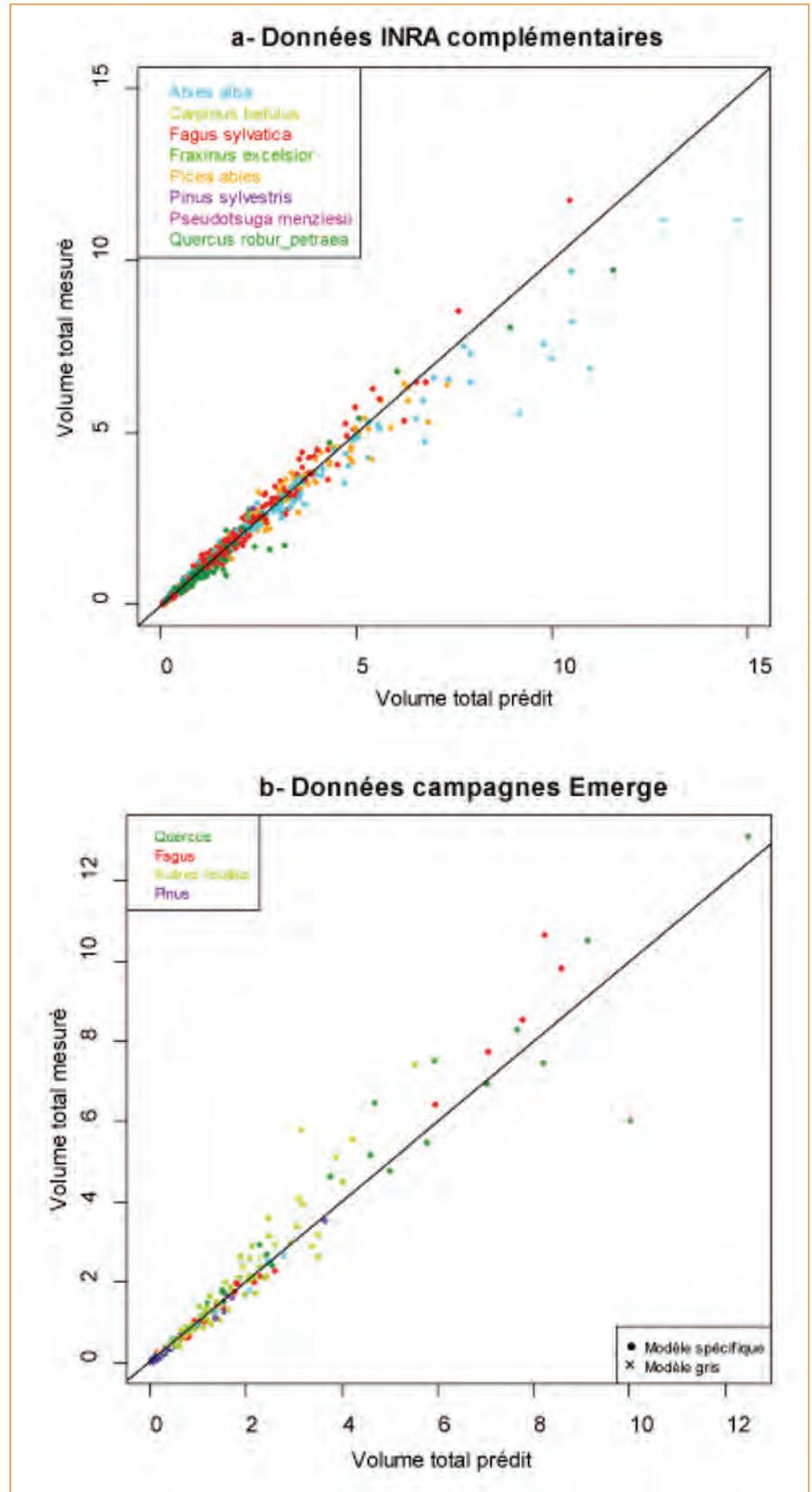


Fig. 2 : tests du modèle de volume total sur deux jeux de données indépendantes : en haut, des données INRA n'ayant pas servi à la phase de calibration; en bas, celles des 226 arbres mesurés pendant le projet. Les prédictions, en abscisses, sont comparées aux volumes mesurés, en ordonnées. La droite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

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

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

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.

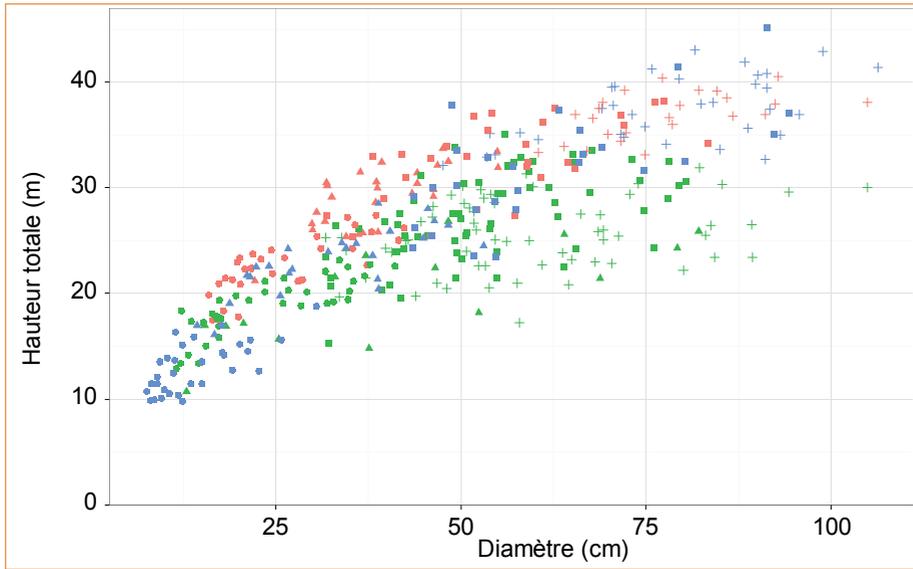


Fig. 3 : répartition, selon le diamètre et la hauteur totale, des arbres mesurés dans les trois forêts de Bercé, Orléans et Tronçais
 Les symboles distinguent les différents stades : amélioration petits bois (APB), bois moyens (ABM) ou gros bois (AGB), et régénération (R).

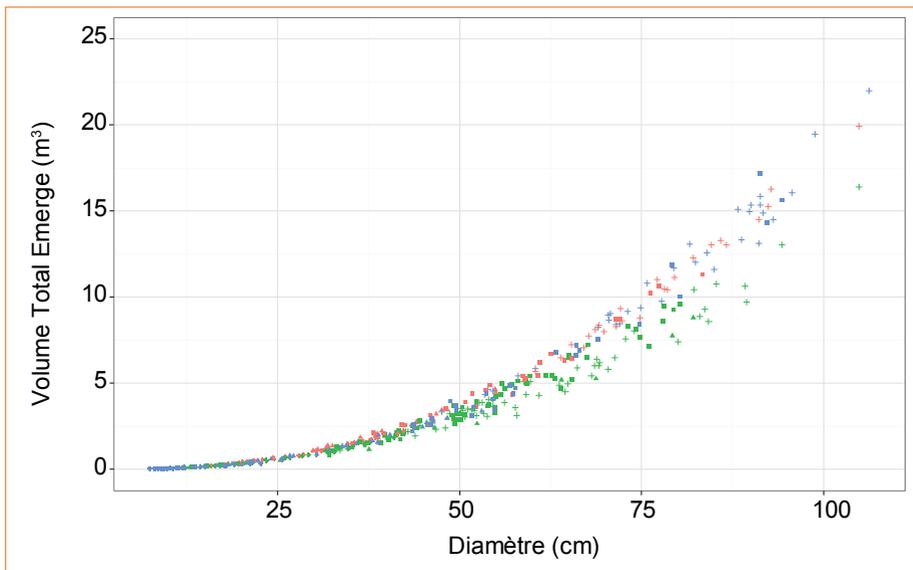


Fig. 4 : illustration de l'application du tarif EMERGE de volume total sur les parcelles de chêne inventoriées à Bercé, Orléans et Tronçais par type de coupe

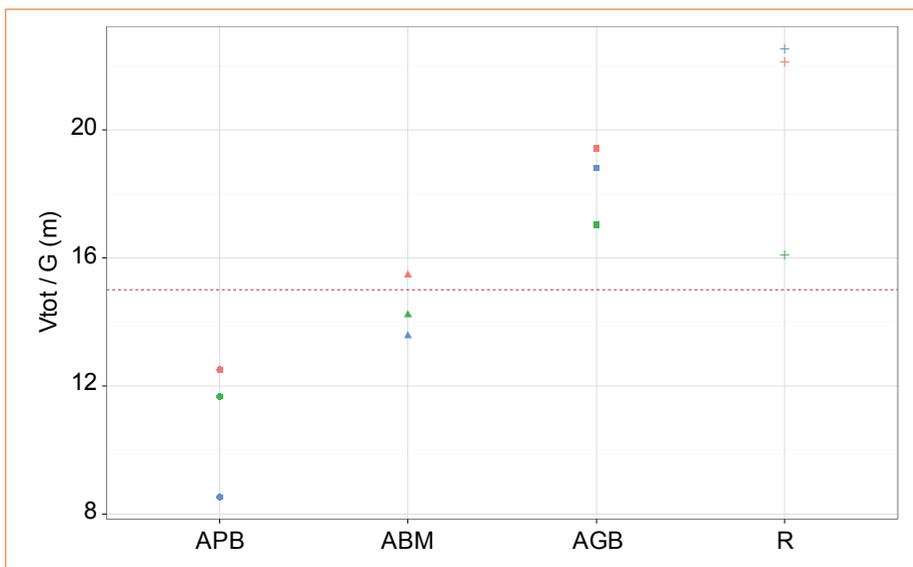


Fig. 5 : évolution du rapport V/G calculé avec le tarif de volume total EMERGE, pour nos échantillons d'arbres martelés dans les 3 forêts de Bercé, Orléans et Tronçais
 La ligne rouge à 15 identifie la référence fournie par le Guide des sylvicultures de la chênaie atlantique (Jarret 2004), avec une définition 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)

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).