



Étude exploratoire de la masse volumique. Influence du “ taux de remplissage ” en eau du bois frais

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Santenoise, Mickaël M. Rivoire, Mériem Fournier, Jean-Luc Dupouey, Laurent Saint-André, Christine Deleuze

► To cite this version:

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Santenoise, Mickaël M. Rivoire, Mériem Fournier, et al..
Étude exploratoire de la masse volumique. Influence du “ taux de remplissage ” en eau du bois frais.
Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2014, 44, pp.65-72. hal-02629454

HAL Id: hal-02629454

<https://hal.inrae.fr/hal-02629454>

Submitted on 27 May 2020

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.

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).

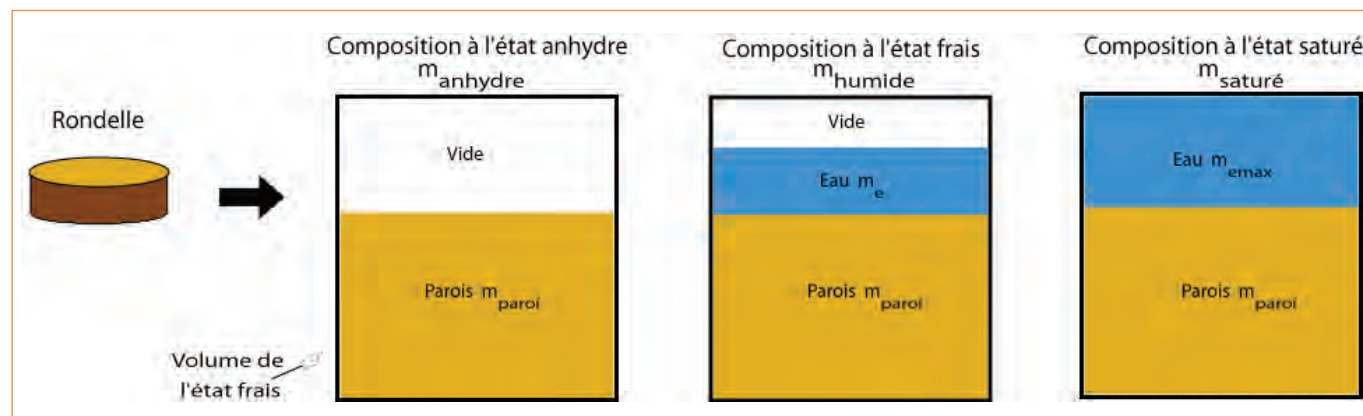


Fig. 1 : représentation schématique de la composition d'un volume de bois, mesuré à l'état frais.

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

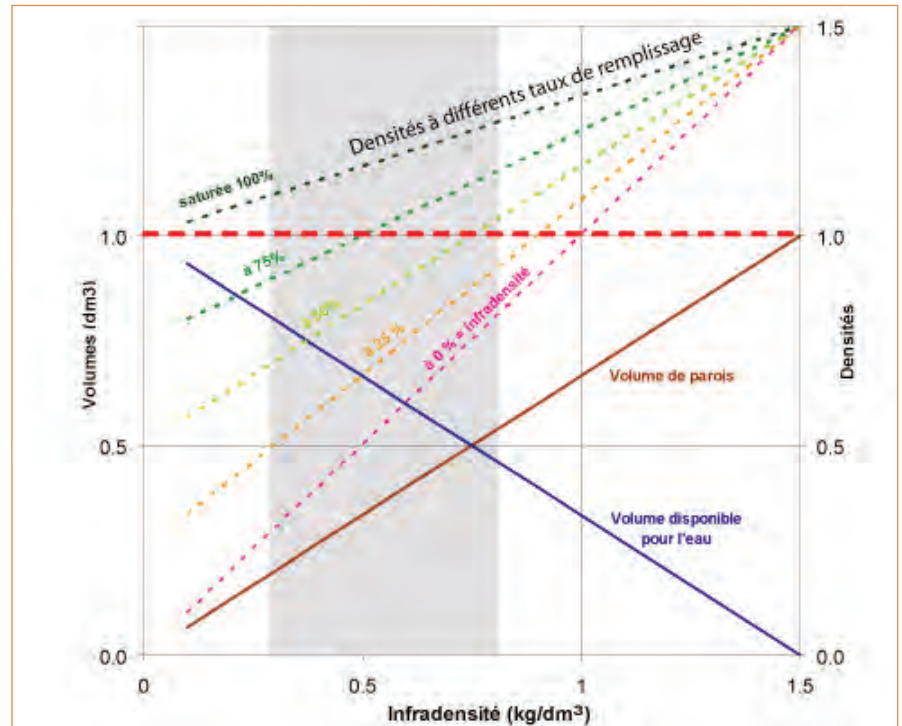


Fig. 2 : application de la représentation schématisée du bois (figure 1) au calcul théorique des volumes de vide et de parois (lignes continues) et des densités (lignes pointillées) pour un échantillon de bois unitaire de 1 dm³, en fonction de l'infradensité

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.

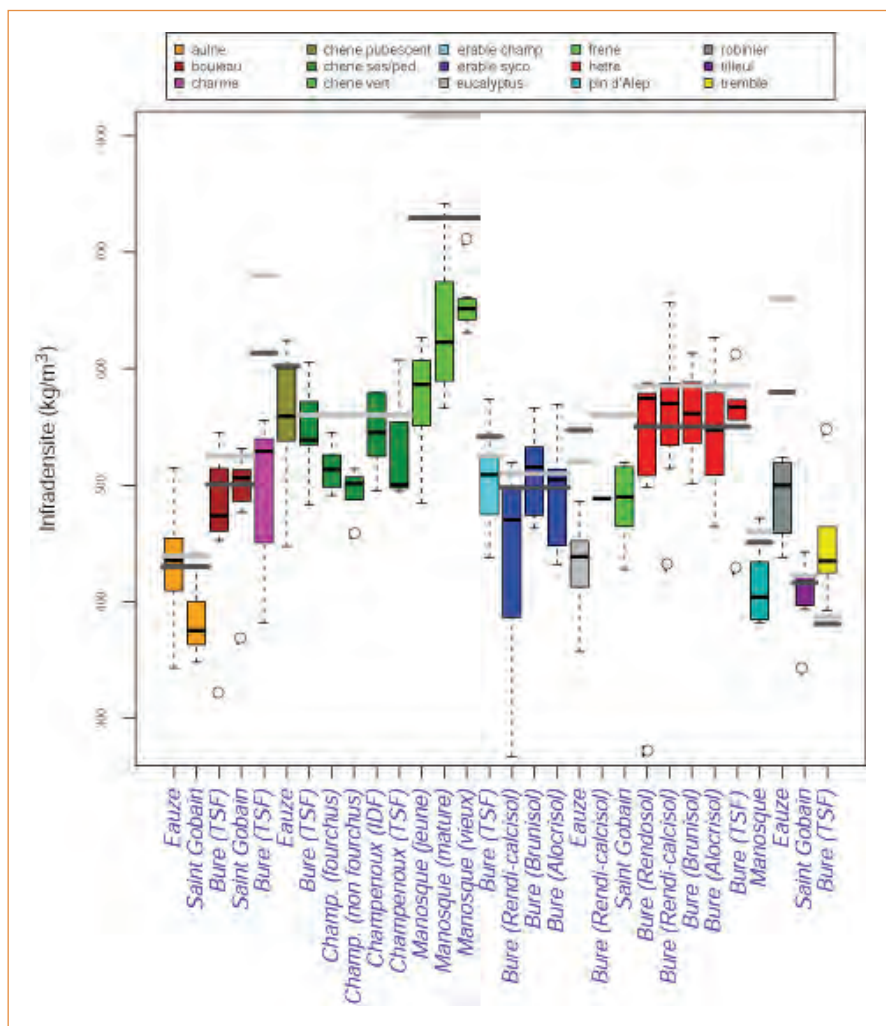


Fig. 3 : variations de l'infradensité des troncs des arbres de l'échantillon EMERGE, et comparaison avec des références à l'échelle mondiale (barre gris clair) et française (gris foncé)

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. (en l'occurrence pour l'Europe) coïncident. Mais pour la plupart des autres essences les valeurs de Chave et al. sont plus fortes, voire beaucoup plus fortes (chêne vert, charme et robinier) que pour la France.

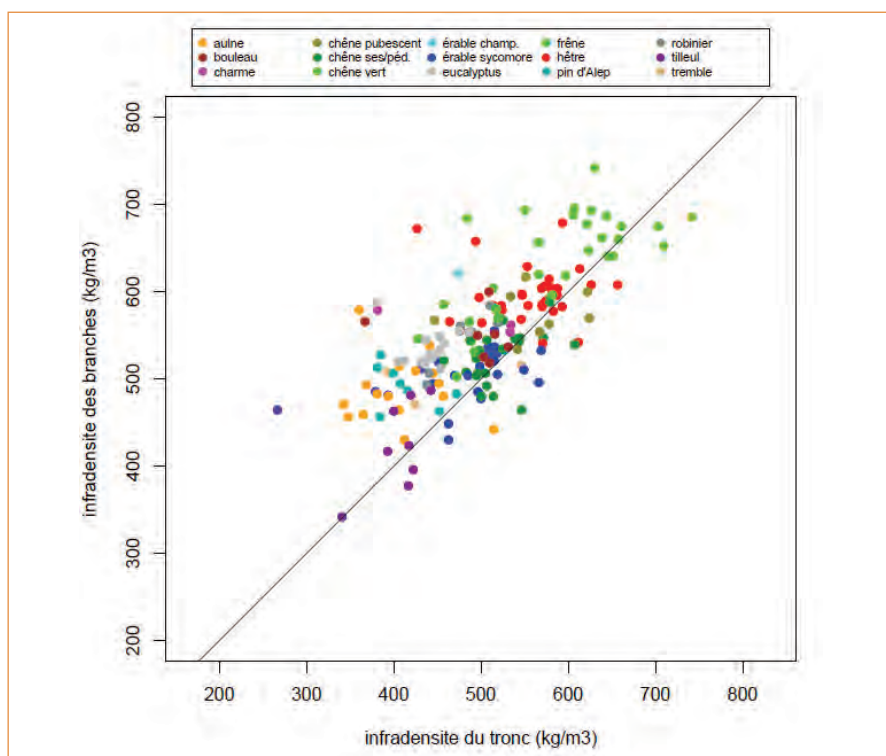


Fig. 4 : comparaison des infradensités mesurées d'une part sur les troncs (jusqu'à la découpe 7 cm) et d'autre part sur les branches (y compris menus bois en deçà de la découpe 7). Chaque point correspond à un arbre.

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

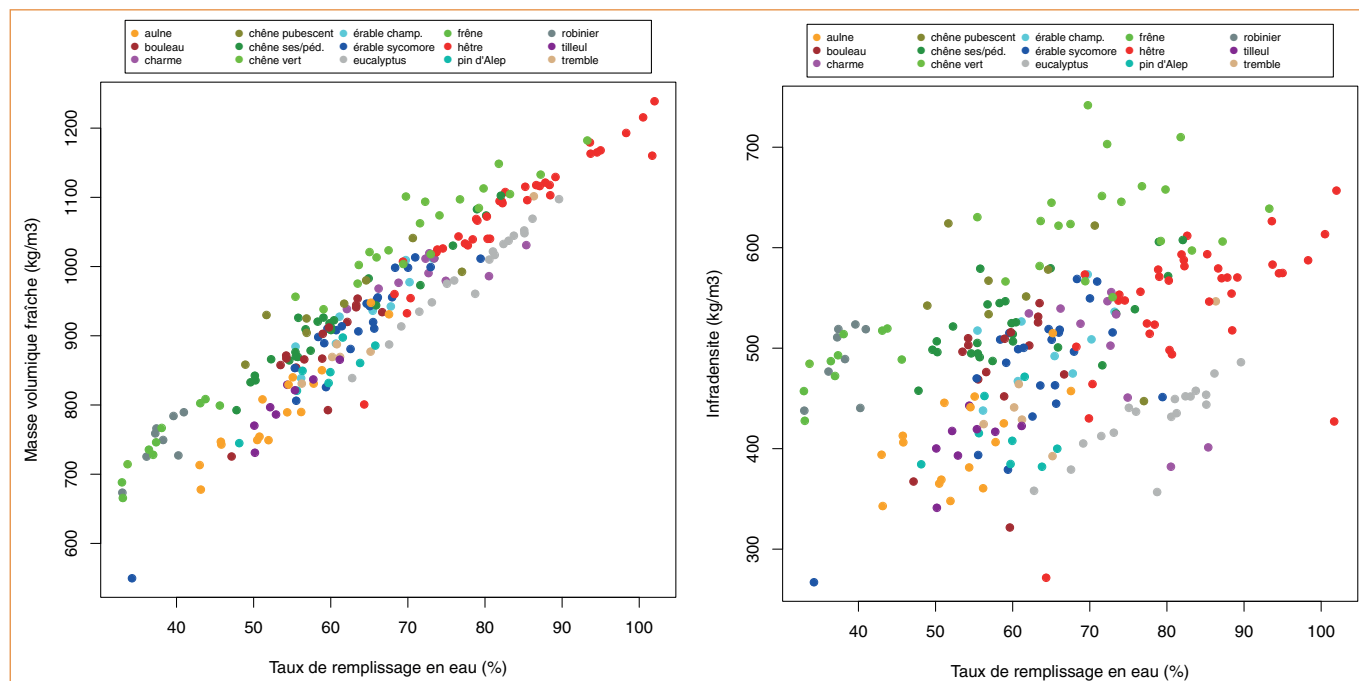


Fig. 5 : analyse, pour le tronc, des variations de la masse volumique fraîche (a) et de l'infradensité (b) en fonction du taux de remplissage

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.

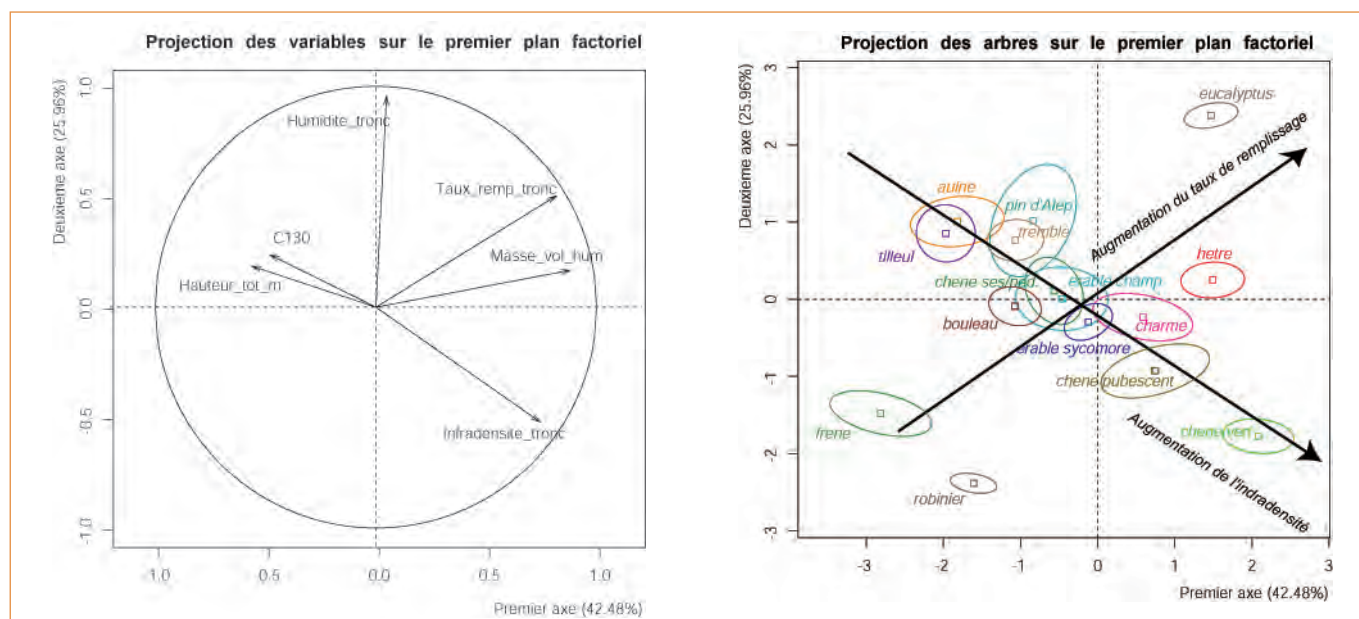


Fig. 6 : principaux résultats de l'analyse multidimensionnelle de la masse volumique, sur l'ensemble des données des troncs de l'échantillon EMERGE

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

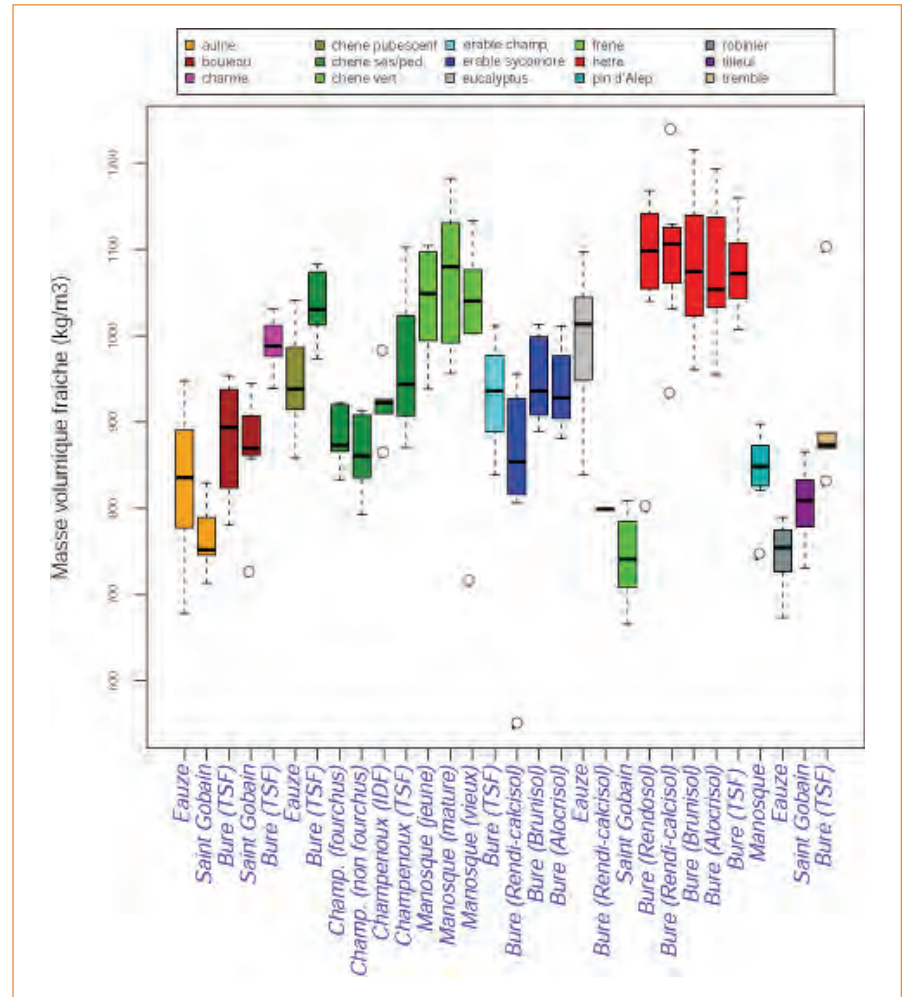


Fig. 7 : variation des masses volumiques fraîches des troncs (jusqu'à la découpe 7) par essence et par site

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>