



HAL
open science

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

Laurent Saint-André, Astrid Genet, Arnaud A. Legout, Jacques J. Ranger, Holger H. Wernsdorfer, Mathieu Jonard, Quentin Ponette, Ablo Paul-Igor Hounzandji, Christine Deleuze

► To cite this version:

Laurent Saint-André, Astrid Genet, Arnaud A. Legout, Jacques J. Ranger, Holger H. Wernsdorfer, et al.. Modèles de biomasse et de minéralomasse : quelles avancées de la recherche ? Pour quels usages à terme en gestion ?. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2014, 44, pp.43-56. hal-02630414

HAL Id: hal-02630414

<https://hal.inrae.fr/hal-02630414>

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Quelques éléments théoriques

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

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

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

Tarifs, modèles : état des lieux avant EMERGE

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

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

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

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

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

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

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

**Les données de biomasse
disponibles**

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

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

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

Une approche nouvelle

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

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

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

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

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



M. Rivoire INRA-LERFoB



J-F Picard INRA-BEF

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

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

Évolution de la répartition de la biomasse avec l'âge

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

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

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



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

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

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

Élaboration de modèles de biomasse pour le hêtre

Un jeu de données particulièrement riche pour le hêtre

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

La démarche de calibration et validation

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

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

Analyse des paramètres du modèle et interprétation

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

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

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

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

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

Validation du modèle général de biomasse élaboré pour le hêtre

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

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

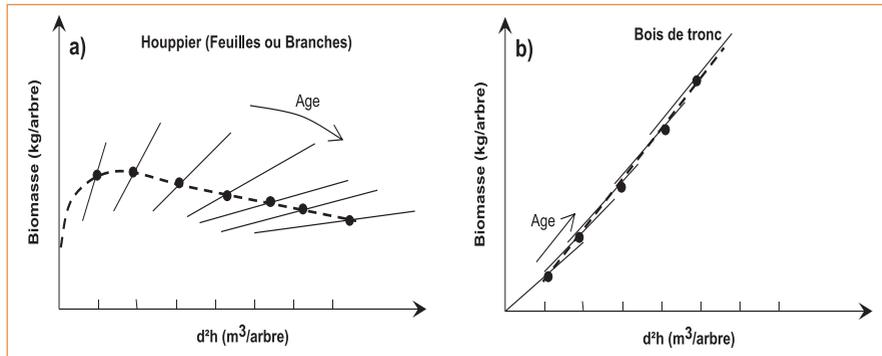
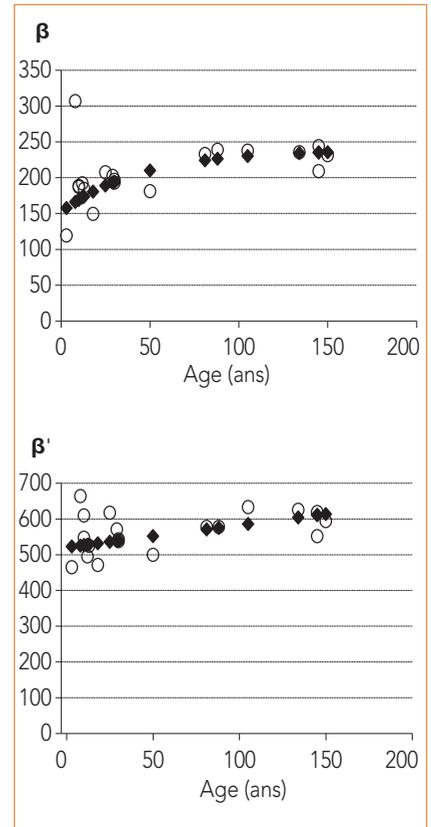


Fig. 3 : schéma général, pour l'eucalyptus et le hêtre, de l'effet de l'âge sur la pente \square des relations du type [1] exprimant la biomasse en fonction de la taille des arbres donnée par d^2h ; effet pour les compartiments du houppier (a) et pour le bois de tronc (b) (d'après Saint-André et al.,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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

Test sur des hêtraies non fertilisées

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

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

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

Test sur des hêtraies fertilisées

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

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

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

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

Cas de la pédoséquence de Montiers

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

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

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

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

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

Bilan pour le hêtre

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

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

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

Généralisation des modèles de biomasse

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

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

Conclusions pour la biomasse

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

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

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

Modèles de concentration en éléments minéraux Estimer la minéralomasse

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

Quelles données pour la minéralomasse ?

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

En première approche, une très forte variabilité

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

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

Modèles de concentration en éléments minéraux pour le hêtre et généralisation

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

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

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

Effet supplémentaire du site

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

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

Quelle interprétation biologique de ces premiers résultats ?

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

■ Feuillus ■ Hêtre ■ Résineux

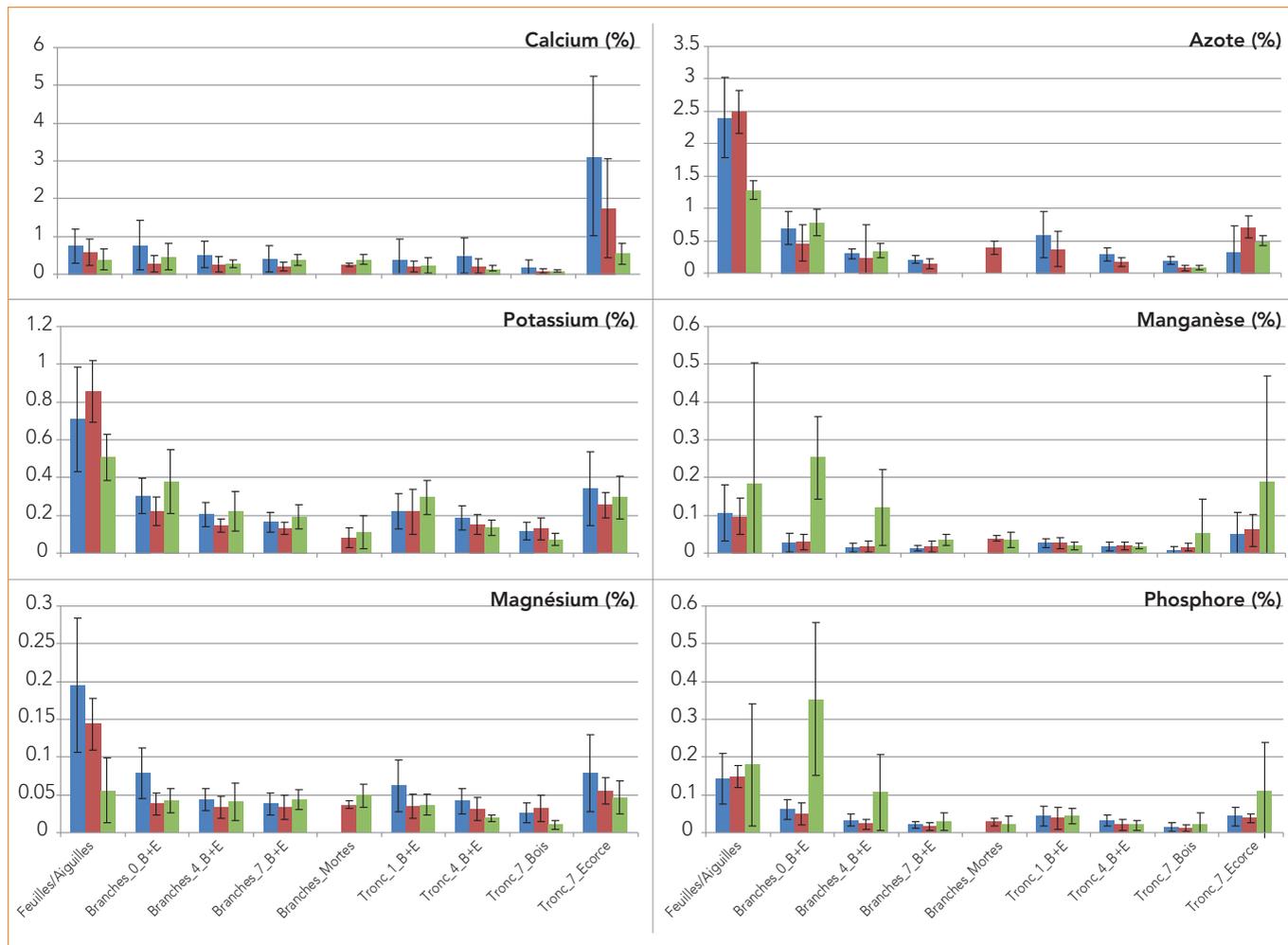
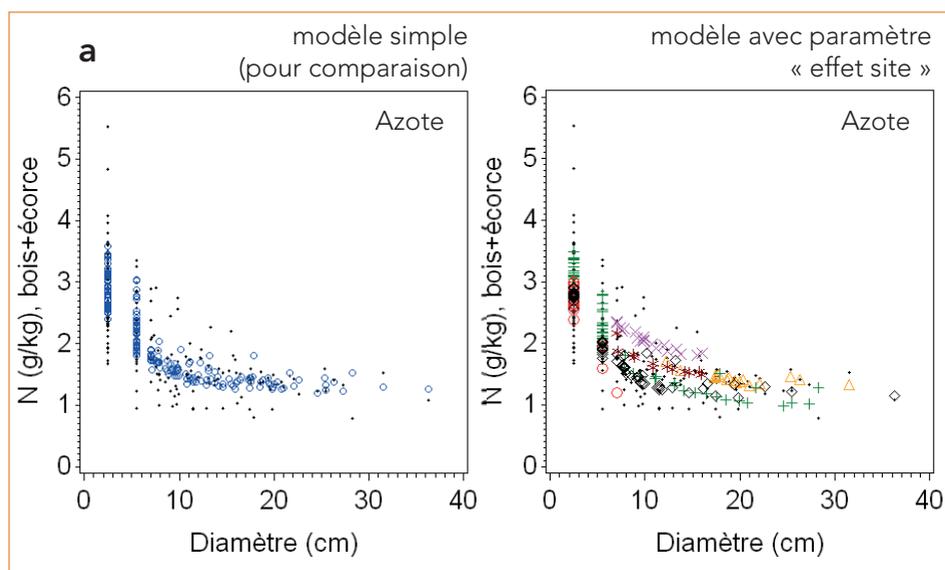


Fig. 5 : concentration moyenne en calcium, azote, potassium, manganèse, magnésium, et phosphore dans les différents compartiments du houppier et du tronc, pour le hêtre, les autres feuillus et les résineux (données INRA BEF – EMERGE – SYLVABIOM)
Concentrations exprimées en pourcentage de la masse séchée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

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



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

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

Et pour les autres essences ?

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

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

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

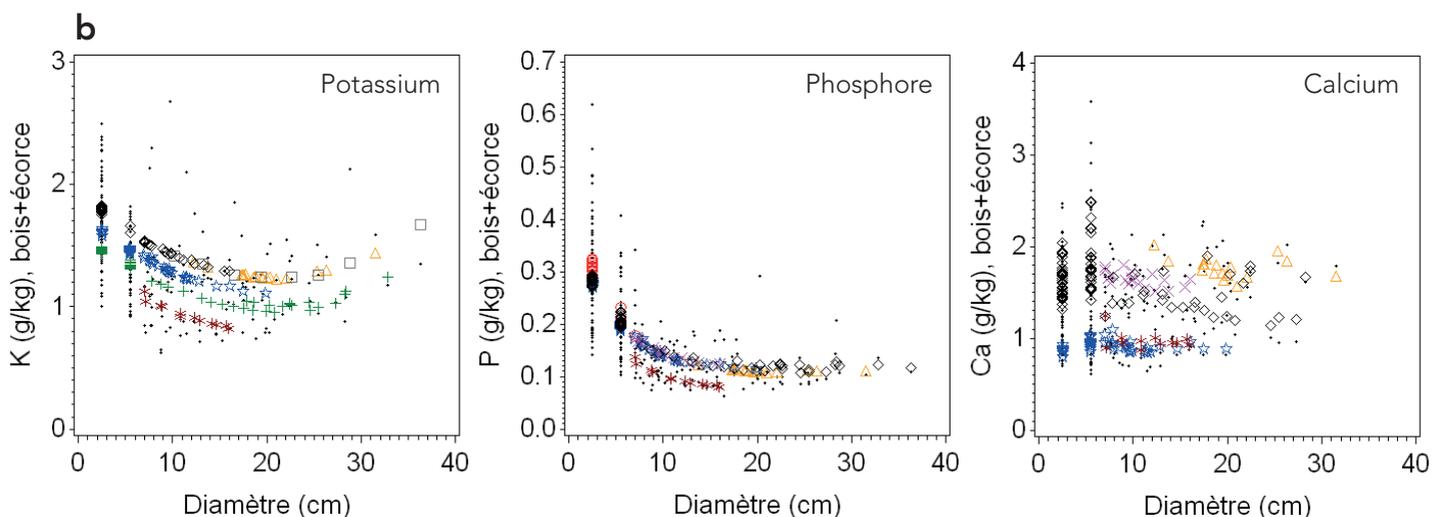
Un premier bilan sur ces modèles de minéralomasse

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

Christine DELEUZE
ONF, département R&D

Remerciements

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

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

Bibliographie

Bontemps J.-D. « Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle ». l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, spécialité Sciences Forestières, 2006. <http://pastel.paristech.org>

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

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

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

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

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

Henry M., Bombelli A., Trotta C., Alessandrini A., Birigazzi L., Sola G., Vieilledent G., Santenoise P., Longuetaud F., Valentini R., Picard N., Saint-André L., 2013. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest - Biogeosciences and Forestry* vol. 6 n°5 pp. 326-330. doi : 10.3832/ifor0901-006

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

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

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

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

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

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

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