



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

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

Programme Bioénergies Edition 2008
Durée : 48 + 6 mois

Biomasse forestière pour l'énergie : atouts et risques courus

Objectif 2020 : 23% de renouvelable dans le mixte énergétique



- La forêt française en 3^{ème} position européenne
- Le BE levier pour les forestiers :
 - Rentabiliser des opérations sylvicoles
 - Produit supplémentaire



- Des estimations peu fiables
 - Volumes : déf. commerciales
 - Biomasses : Foisonnement houppiers
 - Minéralo : menus-bois ?
- Des impacts :
 - Pour l'estimation de BE
 - Pour le bilan carbone
 - Pour les estimations de pertes de ferti



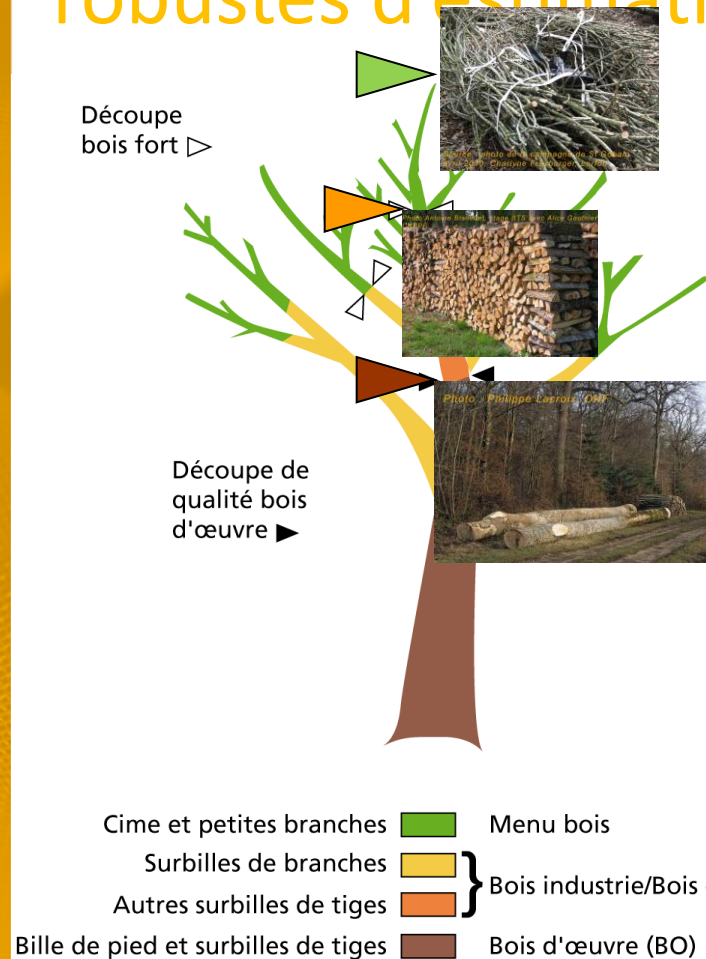
Verrous à lever : Avoir des outils **partagés** et **contradictaires** d'estimation de ce BE





Source : Michaël Rivoire, campagne de terrain Champenoux, février 2010, Lerfob

Objectifs du projet EMERGE : des outils plus robustes d'estimation



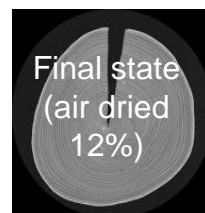
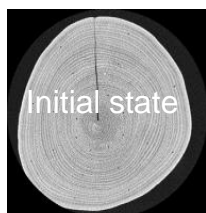
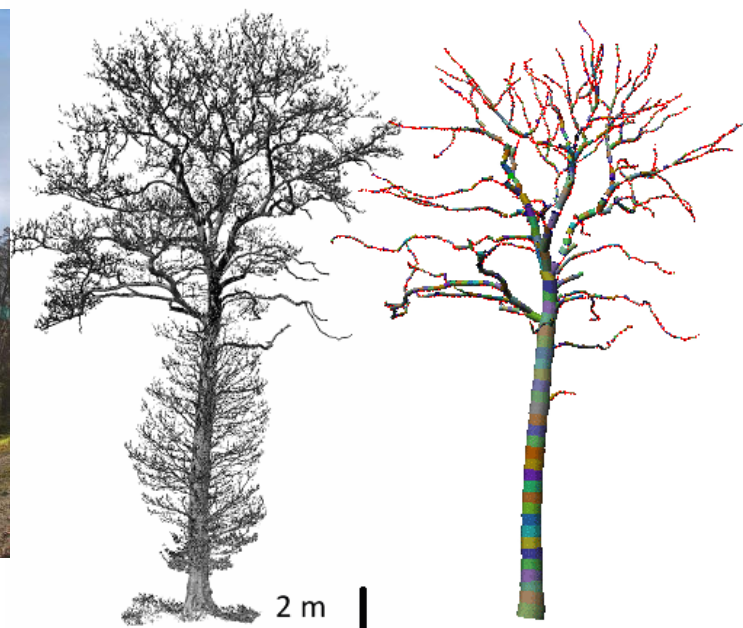
• Attente de modèles

- **Compatibles** entre grandeurs utilisées (vol, biom, minéralo et PCI)
- **Génériques** (différentes essences)
- **Robustes** (origine des peuplements, structure, fertilité, taille)
- **Cohérents** (découpe, définition commerciale)

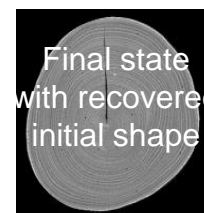


Objectifs du projet EMERGE : renouveler la dendrométrie

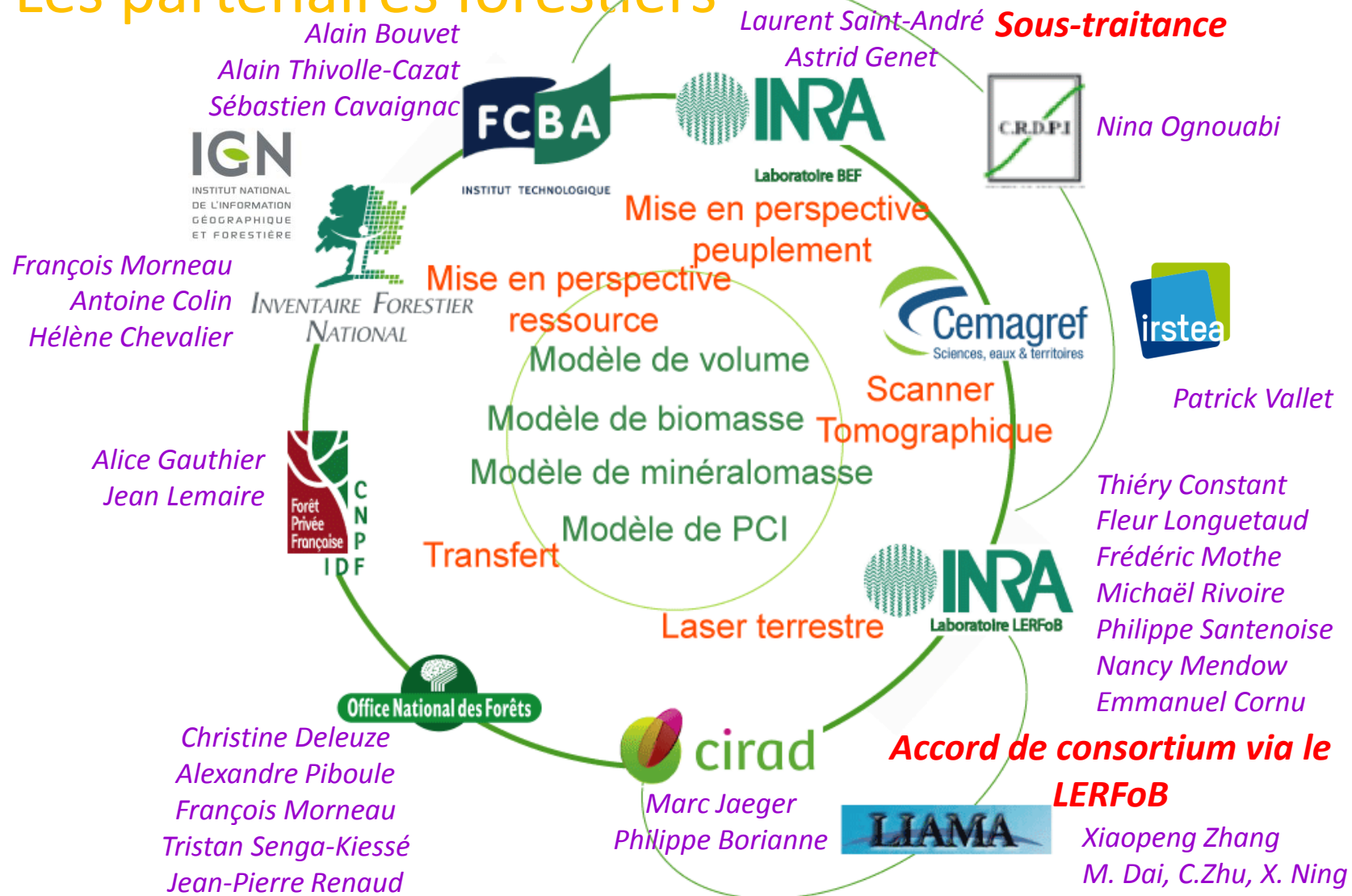
- Laser 3D et scanner tomographique à rayon X



Algorithm for
initial shape
recovering



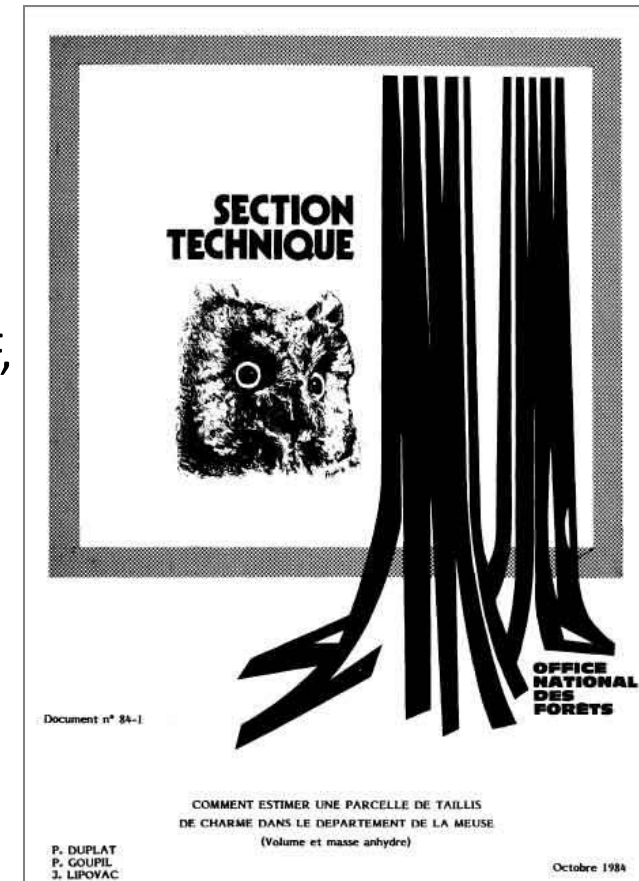
Les partenaires forestiers





Historique des modèles de volumes : les tarifs de cubage

- Une base de tarifs « **gestion** » ONF
 - 624 tarifs (régionaux / essence)
- Une base des tarifs français de la **littérature grise**
 - Près de 180 références (105 INRA/ENGREF, 36 ONF, 15 ARMEF/AFOCEL/CTBA, 8 IFN, 3 Cemagref, 3 Forêt Privée)
 - Restent encore les saisies INRA à terminer mais déjà **142 équations de volume** et 64 de biomasse en tout
- Une valorisation possible en mettant en ligne cette Bdd (voir le site web du CIRAD pour CarboAfrica)



L'entrepôt de données du consortium

1 106 099 arbres IFN (mesures arbres sur pied)

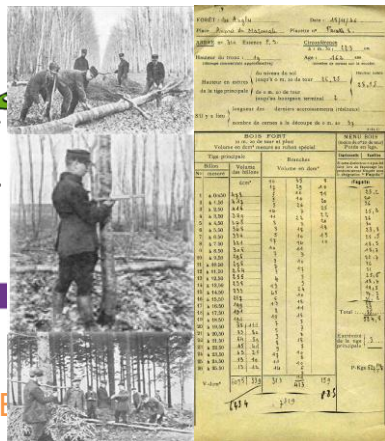
118 505 tiges R&D

20 983 menus-bois et 31 439 profils UR2PI

6 037 arbres pour la biomasse

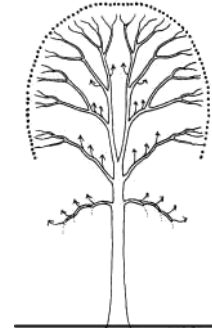
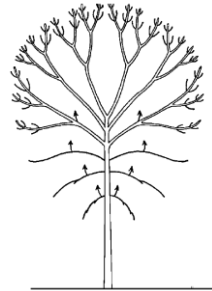
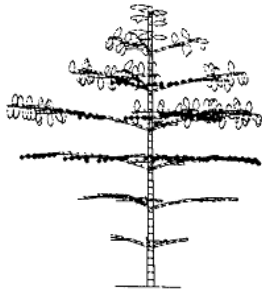
1 797 arbres pour la minéralomasse

220 arbres échantillonnés
en 2009 et 2010

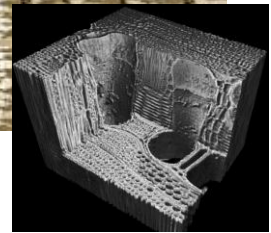
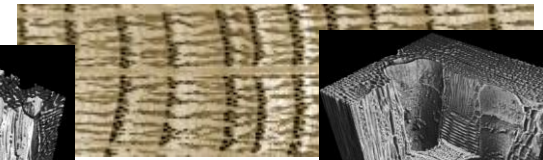
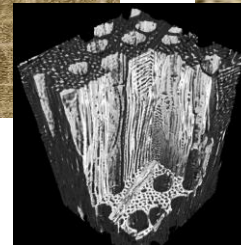
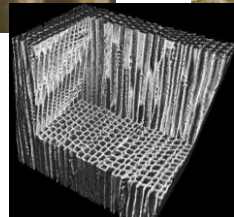
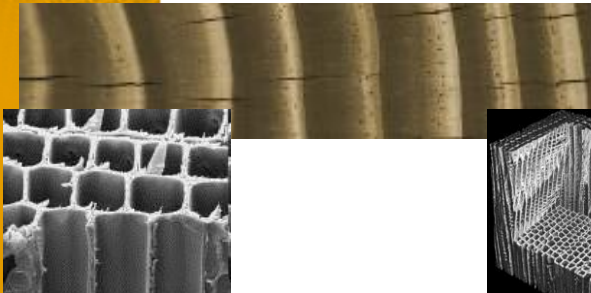


Structuration des données : organisation des espèces

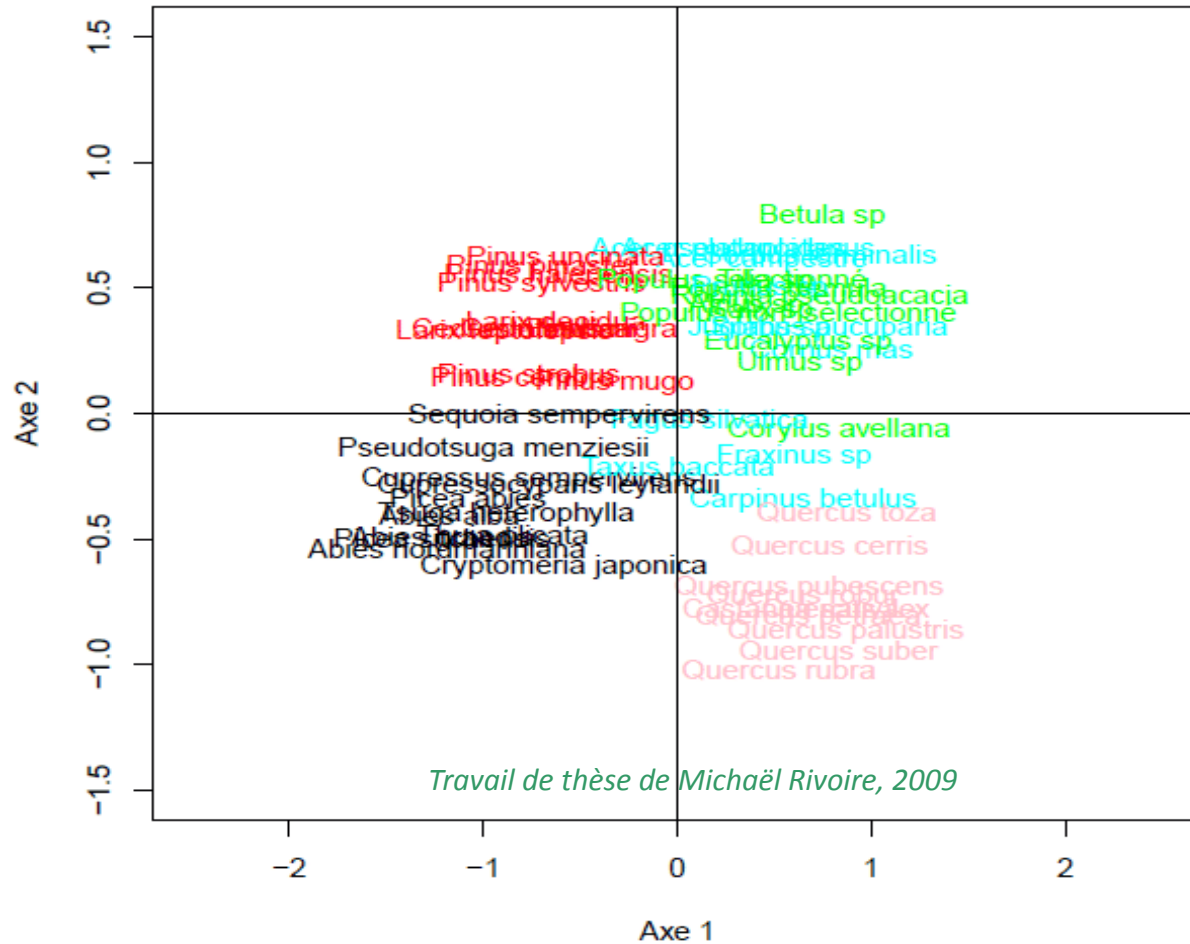
- Un **gradient architectural** : hiérarchie tige \ branches



- Un **gradient de plans ligneux** : des stratégies soutien \ conduction



Structuration des données : organisation des espèces

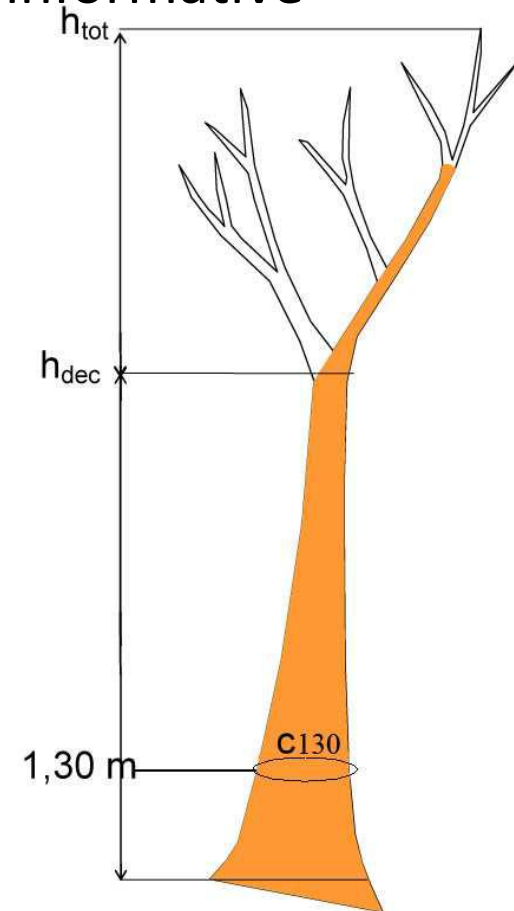
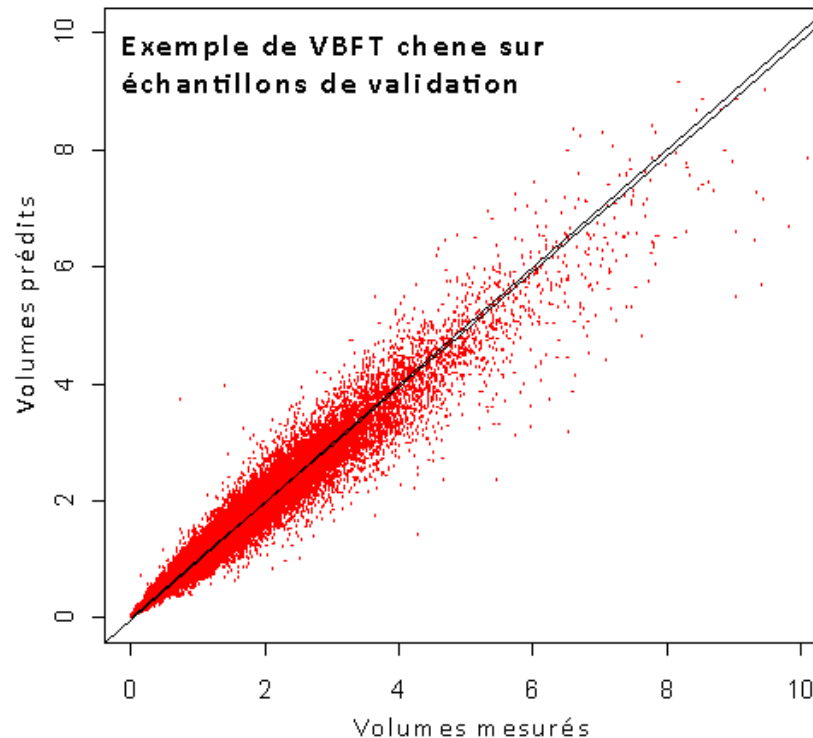




Modélisation des volumes de tige

- Hauteur de découpe : une variable très informative

$$Form = \frac{V_{tot}}{\pi R_{130}^2 H_{tot}} = C_{130} + \frac{\sqrt{C_{130}}}{H_{tot}} + \frac{1}{C_{130}} + \log\left(1 + \frac{H_{dec}}{H_{tot}}\right)$$



Rapport de stage
d'Isabelle Meurillon
encadrée par François
Morneau, IFN, 2009

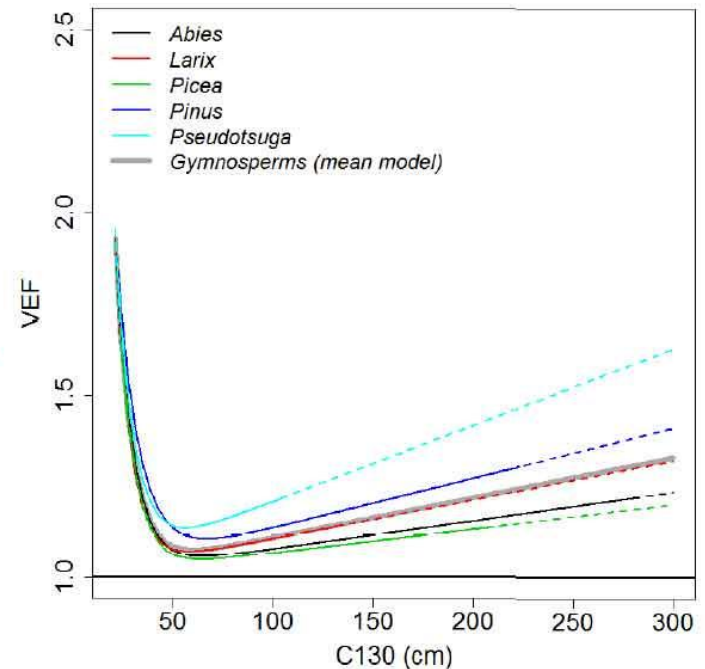
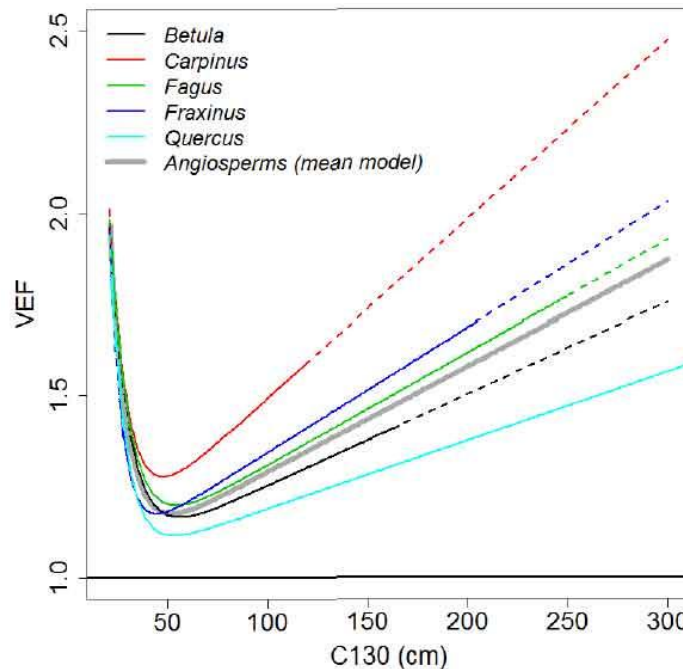
Rapport interne
Emerge, Christine
Deleuze, avril 2012



Modélisation des coefficients d'expansion

- VEF : fonction de H et C130 par genre

$$VEF = \frac{V_{tot}}{VBFT} = 1 + \exp(\beta_1 - C_{130})^{\beta_2 + b_{2essence}} + \exp(\beta_3(res/flus) + \beta_{4essence}) \frac{C_{130}}{H_{tot}^2}$$



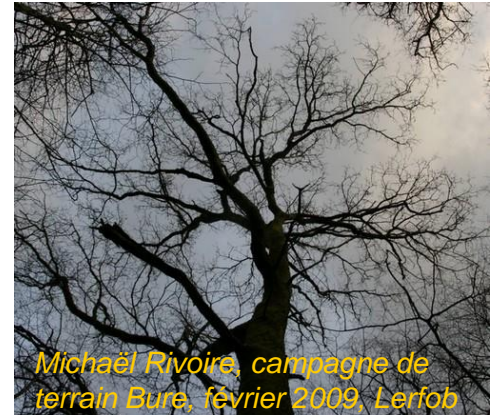
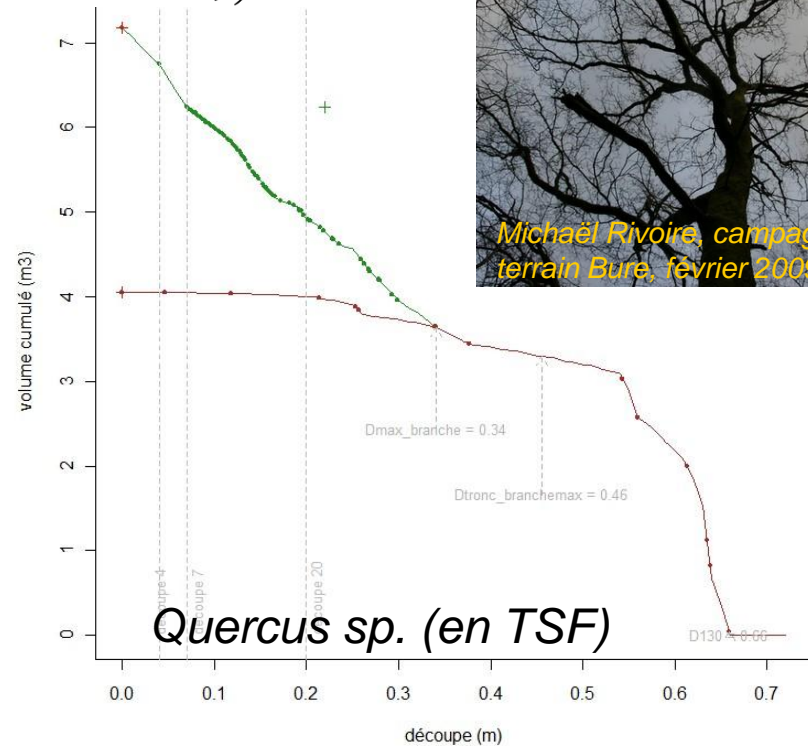
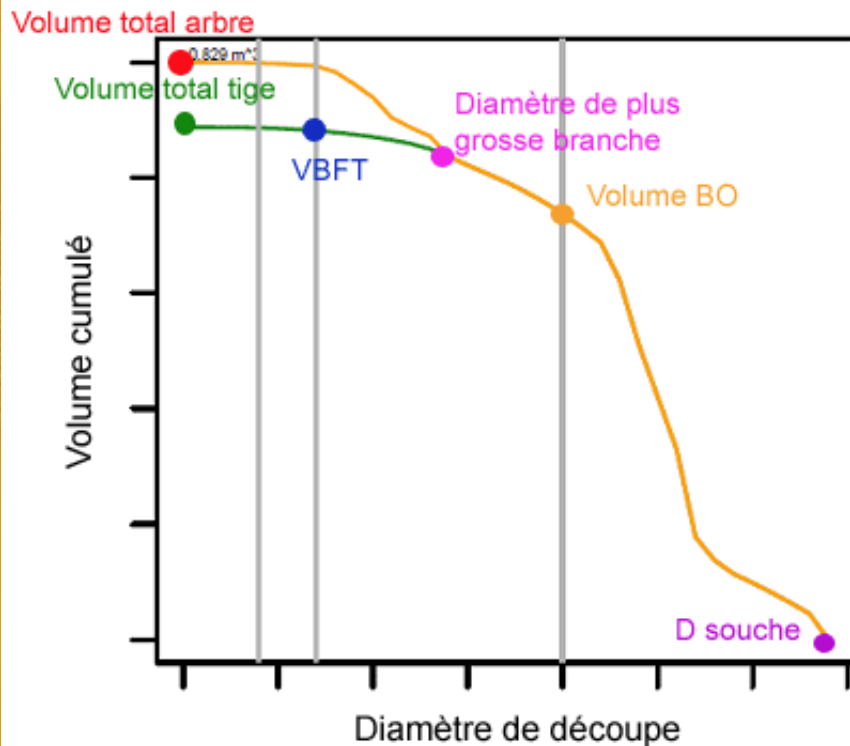
Longuetaud, Santenoise, Mothe, Senga-Kiessé, Rivoire, Saint-André, Ognouabi, Deleuze, Modeling expansion factors for European tree species in France. (révisions en cours pour **Forest Ecology and Management**)



Les volumes cumulés en continu

- La distribution du volume dans la tige et dans les branches par découpe

$$\frac{v(d)}{V_{tot}} = \exp\left(-\frac{d}{D} \exp\left(b_1 * \left(1 - b_2 \frac{d}{D}\right)\right)\right)^{1 - b_3 * \exp\left(1 - \exp\left(b_4 \frac{d}{D}\right)^{2 * 10^6}\right)}$$



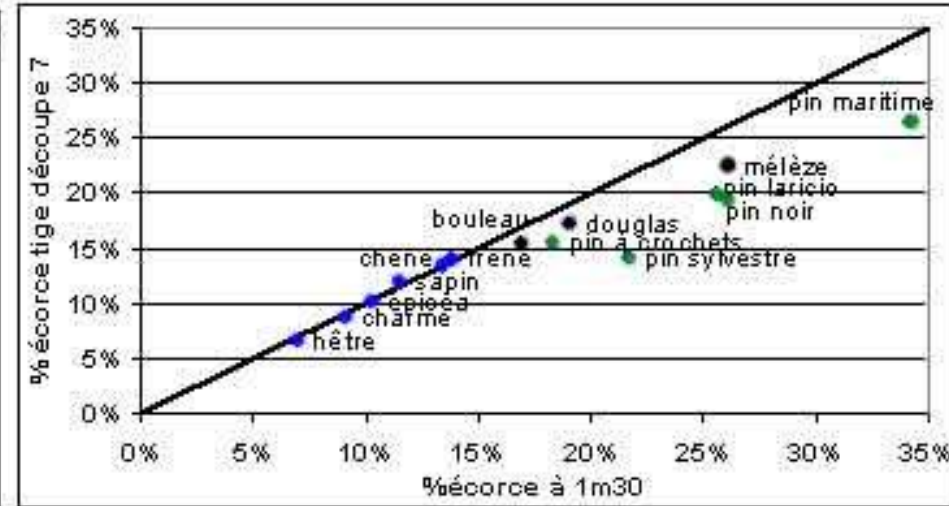
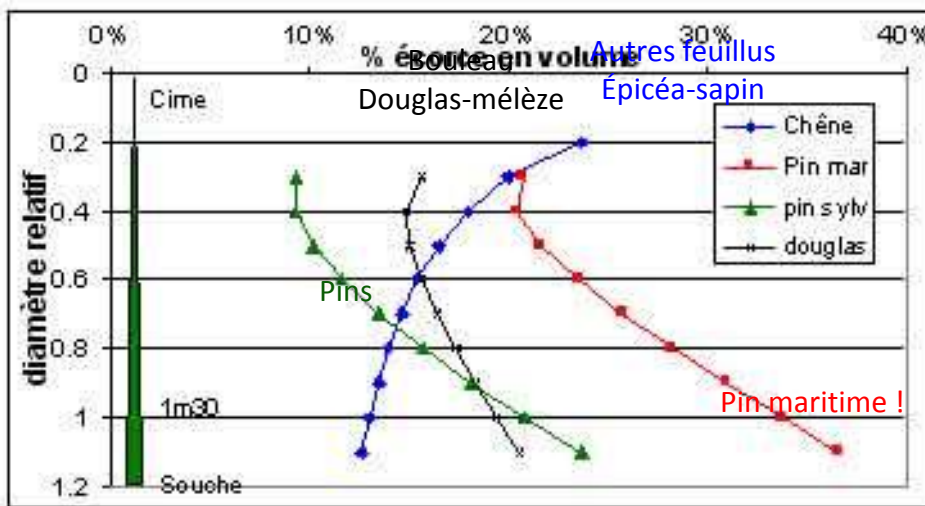
Michaël Rivoire, campagne de terrain Bure, février 2009, Lertob

Travail de thèse de Michaël Rivoire 2011, repris par Philippe Santenoise 2012



Modélisation des taux d'écorce

- Des modèles par essence le long de la tige, variables selon la région et la génétique
 - d'où des relations différentes 1m30 vs. tige entière



Rapport interne Emerge, Alain Bouvet, FCBA, 2012



Modélisation biomasse et minéralomasse

- Un lien avec le projet **SYLVABIOM**
 - Protocoles
 - Mise en commun des données
 - Modélisation biomasse
 - Modélisation minéralomasse
- -> partie présentée par Laurent Saint-André



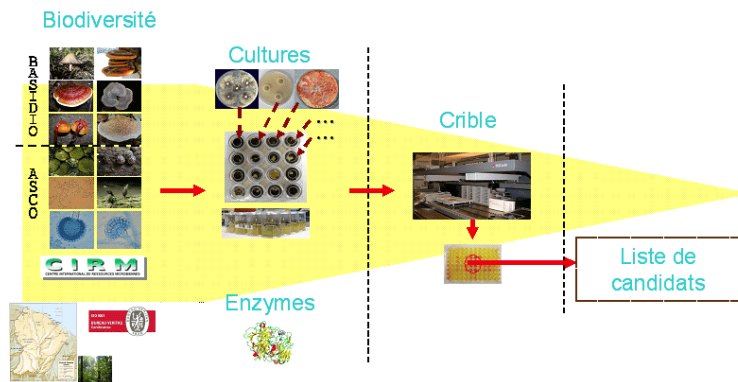
Deux analyses prospectives :

- Modélisation du **pouvoir calorifique** à partir de la minéralomasse

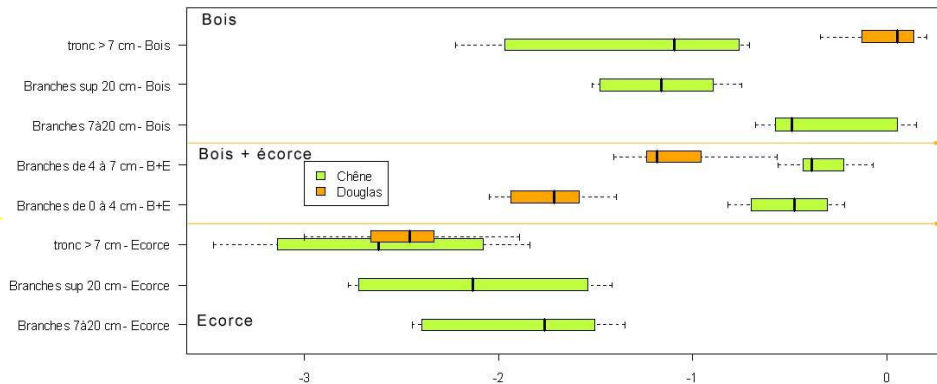
Fonction de C, N et cendres (RMSE 3%)

Bilot, Saint-André, Rogeume, Dupont, Deleuze, article en cours

- **Digestibilité de la cellulose** par des champignons filamenteux



Evolution du taux de glucose (log) en fonction de l'essence et du compartiment



Rapport interne Emerge, Christine Deleuze, avril 2012

Le partenariat tissé en modélisation



Modèles biomasse
et minéralomasse

B i o G e C o



Biodiversité, gènes & communautés



Post-Doc de
Holger Wernsdörfer



Projet Européen
S-FACE



Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt



Thèse d'Astrid Genet

Technische Universität München



INSTITUT TECHNOLOGIQUE



Laboratoire BEF



INVENTAIRE FORESTIER
NATIONAL



CNPFP
IDF

Modèle de volume
Modèle de biomasse
Modèle de minéralomasse
Modèle de PCI



Cemagref
Sciences, eaux & territoires



Office National des Forêts



énergie atomique • énergies alternatives



Thèse de Nicolas Bilot



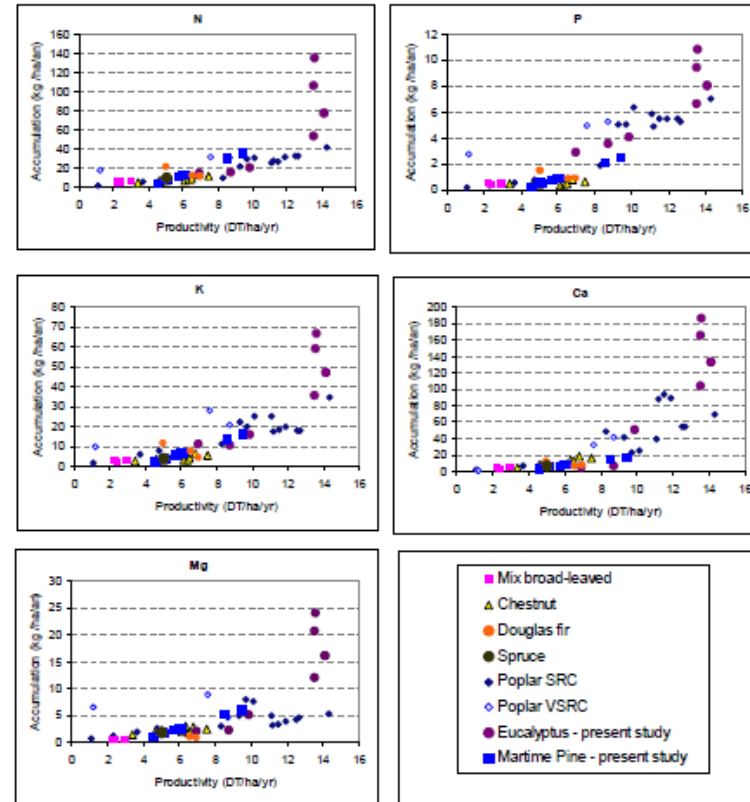
Picard, Saint-André,
Henry **FAO 2012**, 218 pp.
Longuetaud, Santenoise,
Mothe, Senga-Kiessé,
Rivoire, Saint-André,
Ognouabi, Deleuze,
(révisions en cours pour
**Forest Ecology and
Management**)
Bilot, Saint-André,
Rogaume, Dupont,
Deleuze en cours.

Genet, Wernsdörfer, Mothe,
Bock, Ponette, Jonard, Nys,
Legout, Ranger, Vallet, Saint-
André, **REGEFOR 2009**
Genet, Wernsdörfer, Pretzsch,
Rauch, Ponette, Jonard, Nys,
Legout, Ranger, Vallet, Saint-
André, **Forest Ecology and
Management 2010**.
Genet et al., en cours
Wernsdörfer et al., en cours



Les perspectives en modélisation

- À terminer pendant le projet
 - Les modèles connectés pour toutes essences (et lien écologique)
 - Lien arbre \ peuplement
 - Les mises en perspectives
 - Le transfert (publications techniques)
- après Emerge :
 - Utilisation des informations localisées (modèles régionaux)
 - Transfert des outils vers les gestionnaires
 - Poursuite des travaux sur la minéralomasse en lien avec les sols



Source : FCBA, publication en cours



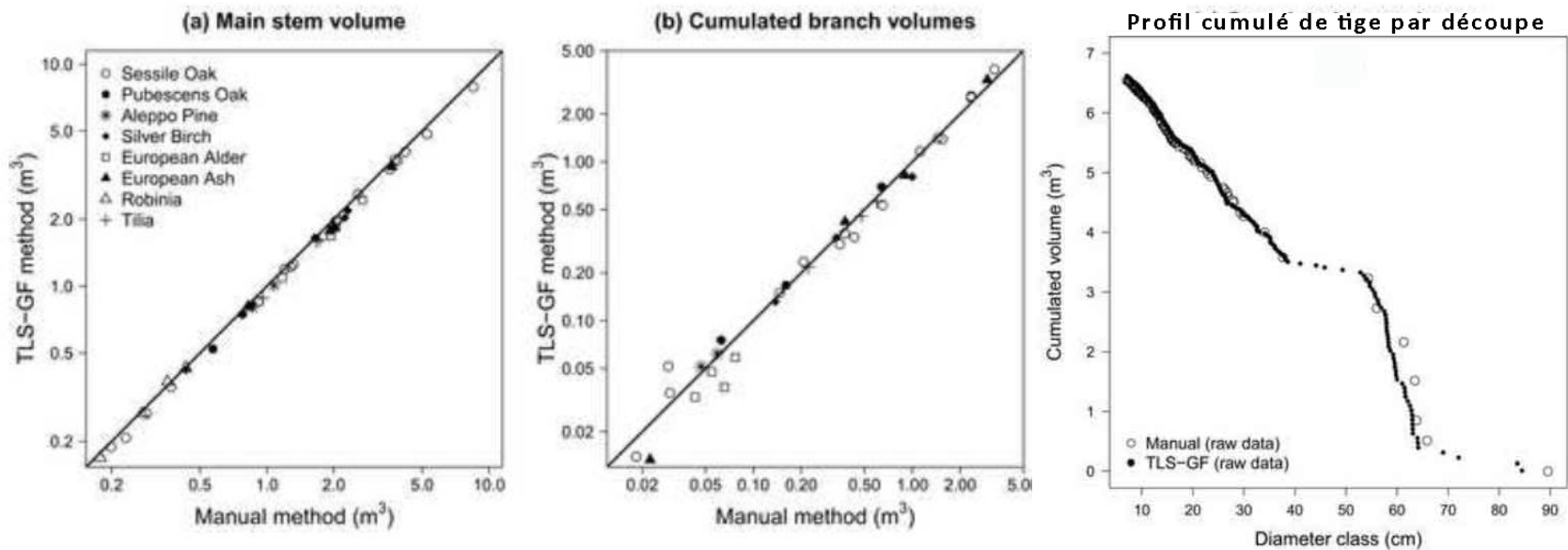
Source : Mathieu Dassot, campagne de terrain Manosque, mars 2010, Lerfob



Dendrométrie moderne : le LIDAR pour mesurer les branches

Dassot, Constant, Fournier. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. Annals of Forest Science, 2011.

- Des reconstitutions fiables des volumes de tiges et de branches pour les découpes > 7cm

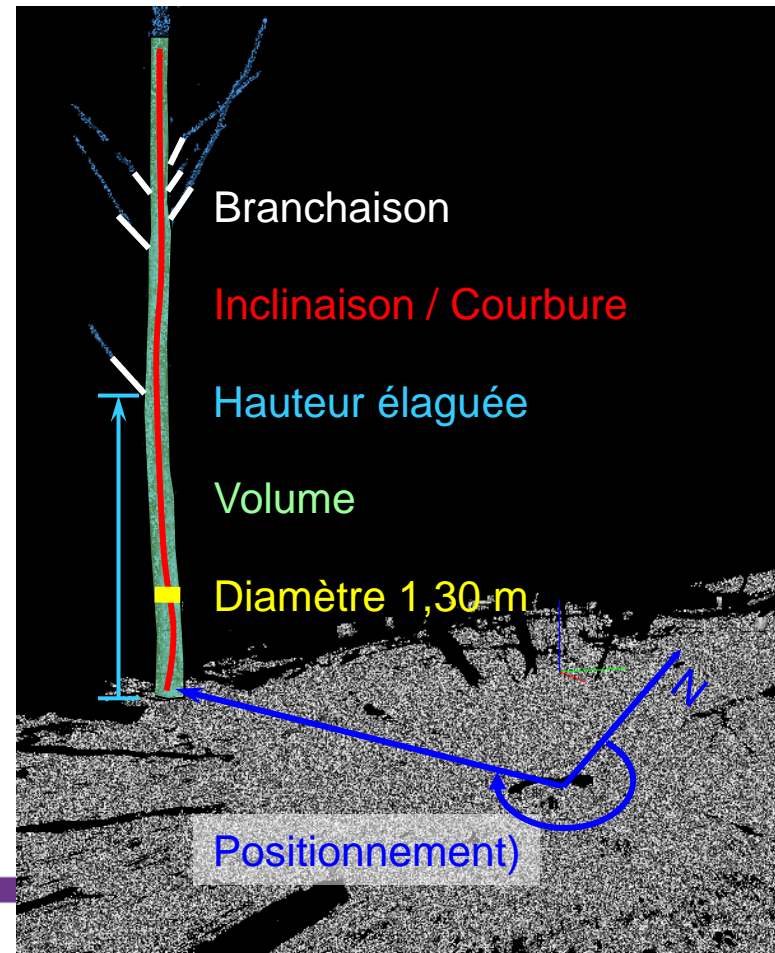
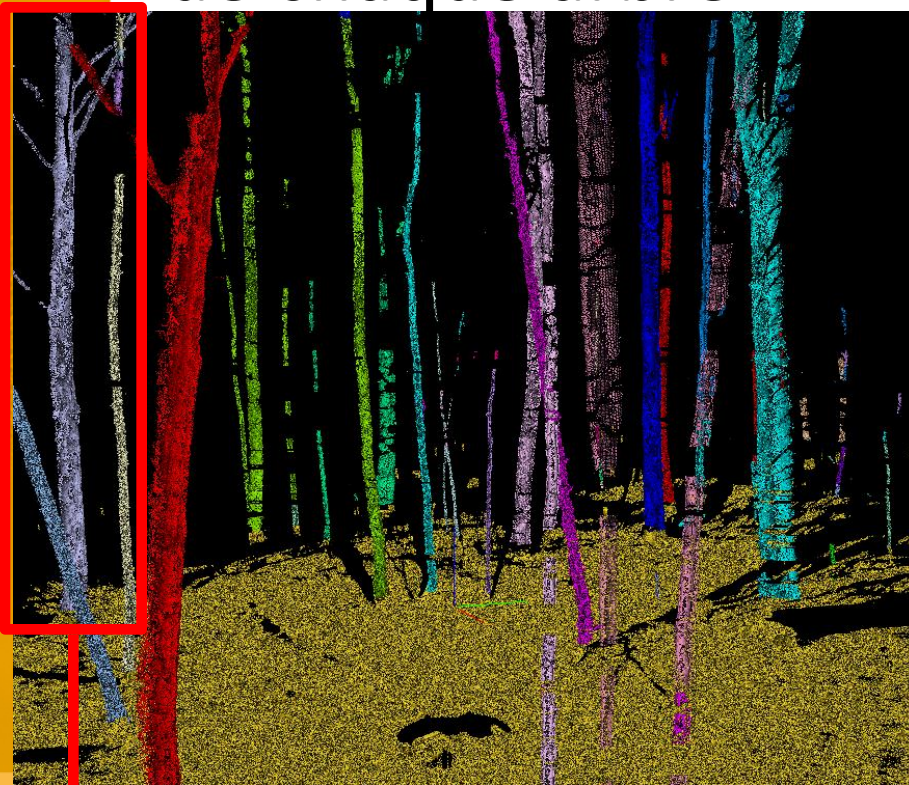


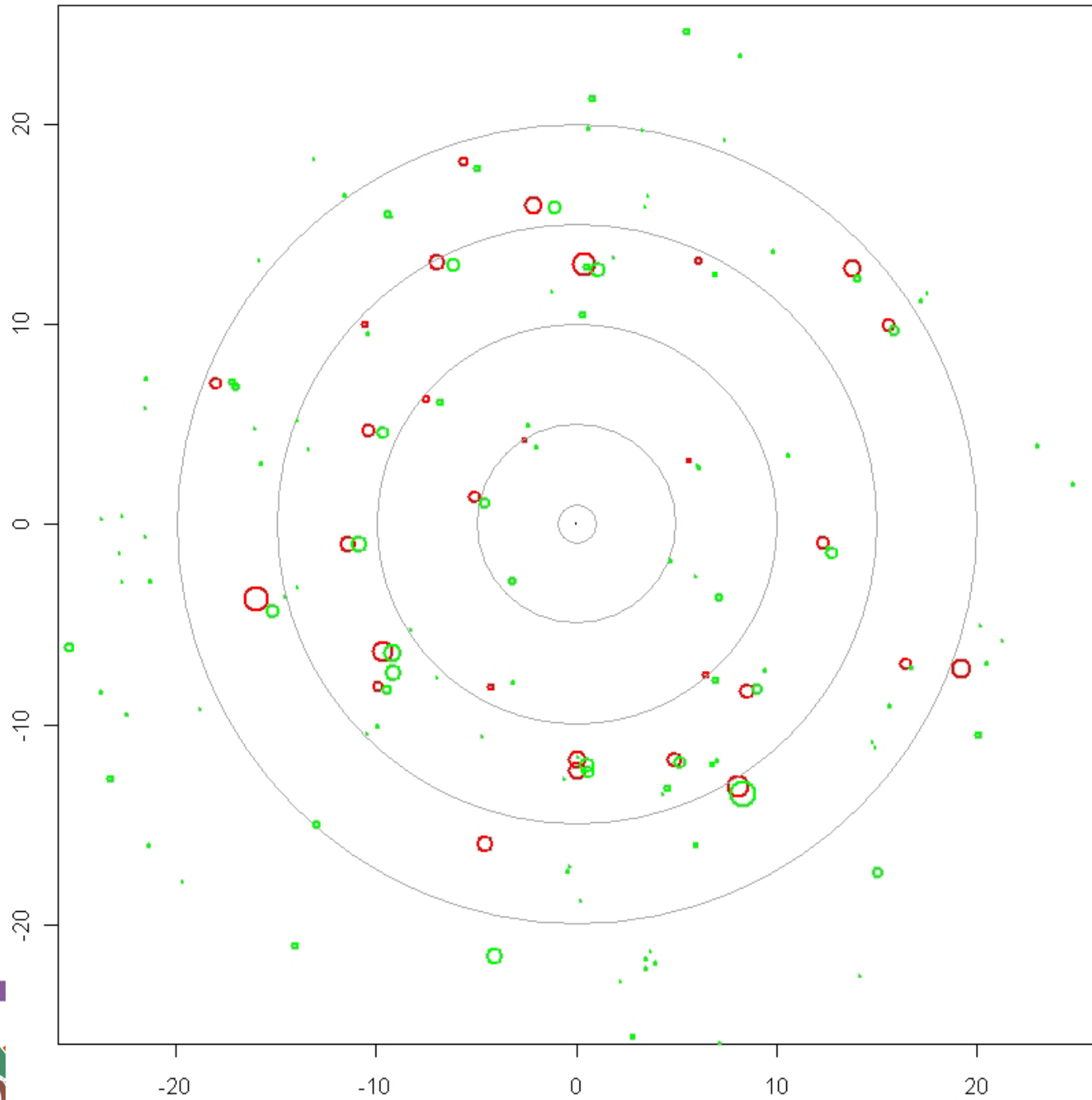
Dassot M, Colin A, Santenoise P, Fournier M, Constant T 2012. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment (in press Computers and Electronics in Agriculture)

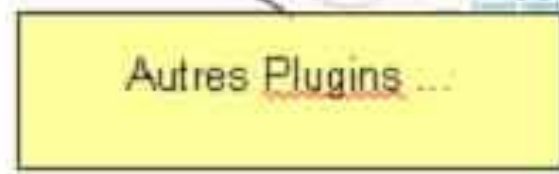
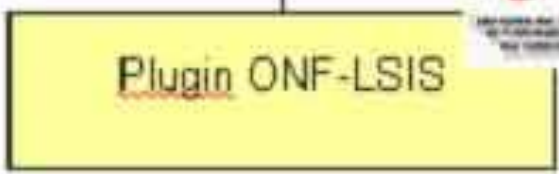
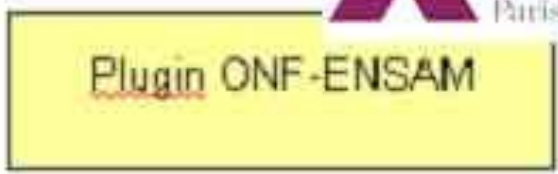
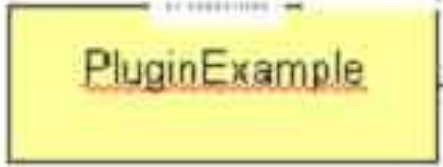
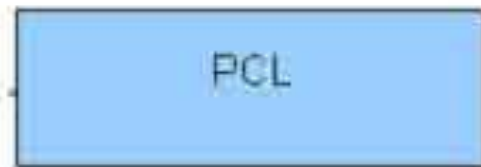
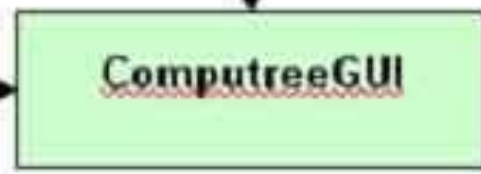


Dendrométrie moderne : le LIDAR en inventaire forestier

- Récupération plus **automatique** des mesures de chaque arbre







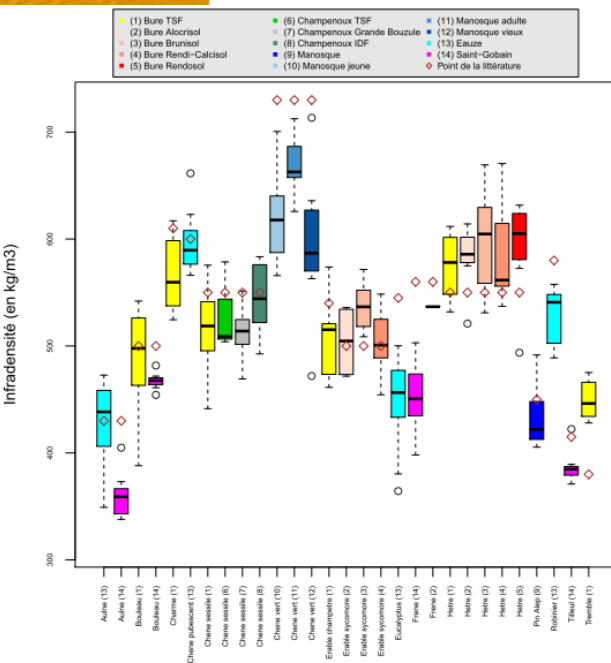


Dendrométrie moderne : le scanner tomographique à rayon X pour la densité

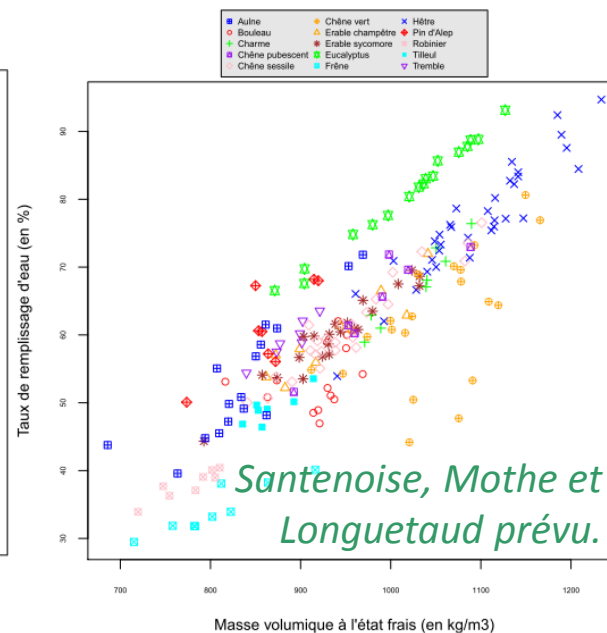
82 arbres passés au scanner : variabilité intra-inter

« Plus il y a de bois, moins il y a d'eau mais s'il y a moins de bois, tout n'est pas rempli »

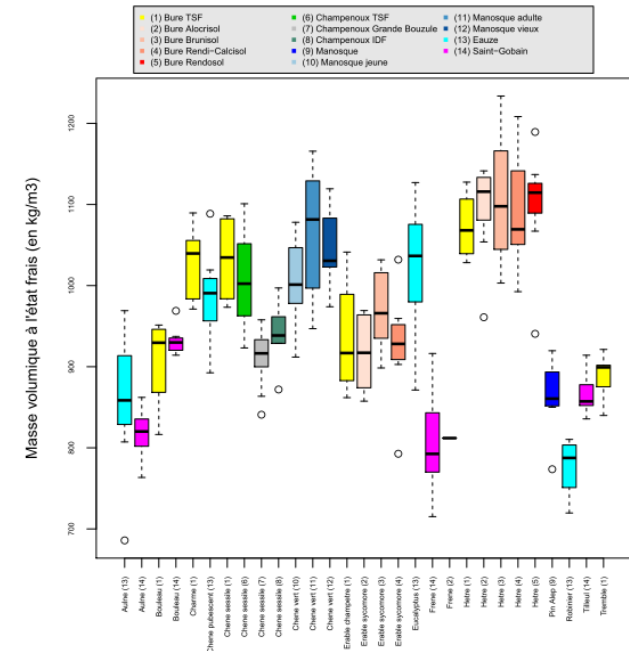
Infradensité par essence



Taux de remplissage vs Masse volumique fraîche



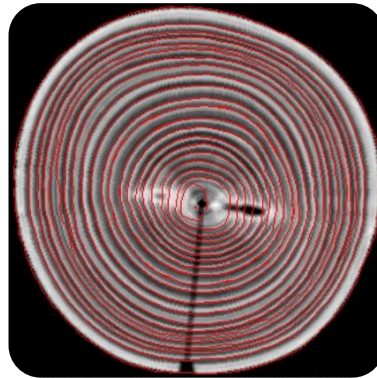
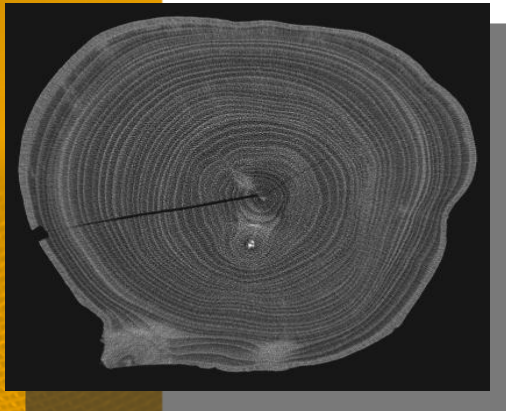
Masse volumique fraîche par essence



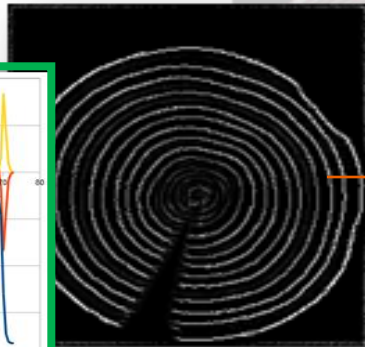


Dendrométrie moderne : le scanner tomographique à rayon X pour la densité

Détection automatique des cernes



- Par la méthode des marquages de cernes et des **contours actifs** :
- problème des doubles moelles, des cernes non circulaires
 - temps de calcul très long



Amélioration avec les **profils de densité** pour détecter des transitions de cernes

Borianne, Pernaudat, Subsol, "Automated Delineation of Tree-Rings in X-Ray Computer Tomography Images of Wood". IEEE International Conference on Image Processing, 2011.

Le partenariat tissé autour des scanners



Borianne, Pernaumat, Subsol, IEEE International Conference on Image Processing, Brussels (Belgium), 2011.

Othmani, Piboule, Krebs, Stolz, Lew Yan Voon, SilviLaser, Australasia, 2011

Triangulation des nuages
Amélioration des MNT



Identification automatisée des essences



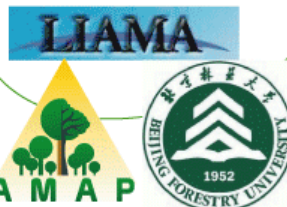
Plateforme Computree
Extraction des tiges automatisée

Office National des Forêts

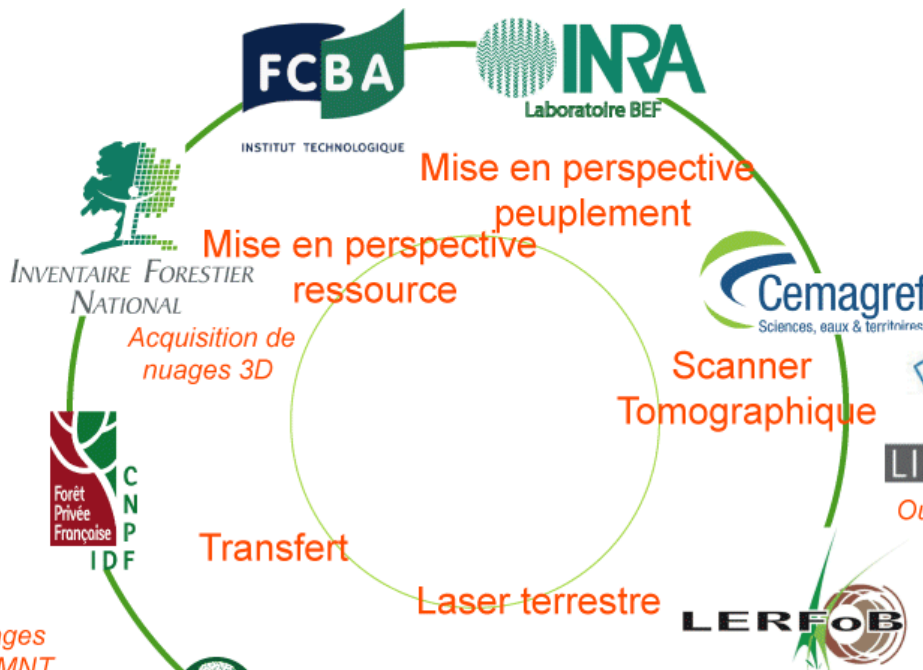


Amélioration de la reconstruction des tiges

cirad



Extraction détaillée de l'architecture des houppiers



Barbacci, Constant, Dai, Zhang; Piboule, Deleuze, REGEFOR 2009.

Dai, Zhang, Zhang, Jaeger, Workshop on 3D content and applications with ACCV, China, 2009.

Ning, Zhang, Wang, Jaeger, Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in industry, Japan, 2009.

Outils d'analyse des images

Zhu, Zhang, Jaeger, Wang, Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications, China, 2010.

Dai, Li, Zhang, Adv. in Neural Network Research & Appl., 2010.

Li, Zhang, Jaeger, Constant, 9th ACM SIGGRAPH

Achat scanner FARO, Acquisition de nuages 3D

Analyse manuelle des nuages 3D, Estimation du volume des tiges

Analyse de la qualité des tiges, Lien avec les tarifs

Zhu, Zhang, Jaeger, Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09), China, 2010.



Les perspectives sur le laser et le scanner



Avant la fin du projet

- Test sur une approche voxel pour la « densité » biomasse
- Fin de transfert d'outils LIAMA vers Computree

• Pour la recherche

- Mesures d'évolution des tiges, de la qualité des tiges, de la branchaison, du LAI, lien biomécanique de l'arbre
- Lien LIDAR avec le scanner X, avec le LIDAR aérien
- Poursuites des échanges internationaux

• Pour la gestion

- Des suites déjà entamée : thèse ONF sur la reconnaissance d'espèce
- Inventaires automatisés pour les placettes permanentes
- Des mesures de qualité des tiges pour la commercialisation

Les publications scientifiques

| 41 publiés + 18 en cours | Revue à comité de lecture | Colloques | Autres publications |
|--------------------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| Données | 1 | 4 | 1+2 |
| Modélisation | 3+4 | 1 | 5+5 |
| Laser | 4 | 14+1 | 4+2 |
| Scanner | | 2 | 1 |
| Mises en perspectives | | | 1+4 |

Zhu C., Zhang X., Jaeger M., Wang Y. 2009. Cluster-based Construction of Tree Crown from Scanned Data. In: Li, B. And Jaeger, M. and Guo, Y. (Eds). 2010. Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09), Beijiing, China, November 9-13, 2009, **IEEE CPS**, pp. 352-359.

Deleuze C., Piboule A., Tricot E., Constant T., Longuetaud F., Mendow N., Rivoire M., Dassot M., Saint-André L., Genet A., Wernsdörfer H., Vallet P., Morneau F., Colin A., Bouvet A., Thivolle-Cazat A. Gauthier A., Jaeger M., Borianne Ph. 2010. Reliable estimation of biomass in our forests ? **18th European Biomass Conference and Exhibition**, Lyon, France, 3-7 mai, 2010, pp. 61-66.

Rivoire, M., Deleuze, C., Longuetaud, F., Saint-André, Morneau, F., Vallet, P., Bouvet, A. and Gauthier, A. 2010, Exploring the variability of biomass distribution in individual forest trees. Poster in: **XXIII IUFRO World Congress**, Seoul, South-Korea, august 23-28, 2010, **The International Forestry Review** Vol.12(5), 343.

Zhu C., Zhang X., Jaeger M. 2010. New Method for Construction of Tree Crown from Scanned Data. In: Li, B. And Jaeger, M. and Guo, Y. (Eds). 2010. Proceedings of Plant growth Modeling, and their Applications (PMA09), Beijiing, China, November 9-13, 2009, **IEEE CPS**, pp. 352-359.

Genet A., Wernsdörfer H, Jonard M., Pretzsch H., Rauch M., Ponette Q., Nys C., Legout A., Ranger J., Vallet P., Saint-André L. 2011. Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe. **Forest Ecology and Management**, Volume 261, Issue 7, 1 April 2011, Pages 1188-1202.

Senga-Kiesse, T. Rivoire M. 2011. Discrete semiparametric regression models with associated kernel and applications, **Journal of Nonparametric Statistics**, 1-15.

Dassot M., Constant T., Fournier M., 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. **Annals of Forest Science**, Volume 68, Number 5, Pages 959-974.

Borianne P., Pernaudat R., Subsol G., 2011 "Automated Delineation of Tree-Rings in X-Ray Computer Tomography Images of Wood". **IEEE International Conference on Image Processing**, Brussels (Belgium), p. 445-448, September 2011.

Dassot M, Colin A, Santenoise P, Fournier M, Constant T 2012. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment (in press **Computers and Electronics in Agriculture**)

Dassot M., Fournier M. , Ningre F., Constant T. 2012. Effect of tree size and competition on tension wood production over time in beech plantations and assessing relative gravitropic response with a biomechanical model **Am. J. Bot.** September 99:1427-1435

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. **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**, et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 218 pp.

Longuetaud F., Santenoise P., Mothe F., Senga-Kiessé T., Rivoire M., Saint-André L., Ognouabi N., Deleuze C., Modeling expansion factors for European tree species in France (révisions en cours pour **Forest Ecology and Management**)



Merci à tous...

David Benazech

Dominique Hergibo

Gérald Hoart

Bruno Simon

Arnaud Brunet

Rémi Gaignierre

Pierre Gelhaye

Bénédicte Rochet

Jean-Yves Fraysse

Vincent Seigner

Gwénaëlle Gibaud

Aurélien Narbonne

Bénédicte Rollin

Gérard Perez

Vincent Rousselet

Nancy Mendow

Benoît Berjini

Baptiste Ollier

Jérôme Desviaux

Aurélien Brochet

Jean Gauvin

Thierry Fauconnier

Karine Javard

Pascal George

Jean-Matthieu De Boissesson

Abderhaman Laidani

Heino Passau

Vicliphe Mouyengo

Charline Freyburger

Jérôme Piat

Emmanuel Cornu

Jérôme Bock

Frédéric Bordat

Philippe Desplanches

Jérôme Spriet

Pascal Pretot

Thomas Torres

Thibaud Lombart

Adeline Motz

Frédéric Mothe

Sandrine Perret

Bernard Duval

Francis Melun

Jean Ladier

Fabrice Bonne

Christophe Périnot

Jean-Pierre Rousseau

Guillaume Ladeuil

Frédéric Kaminski

Alain Bubéla

Florence Vinit-Dunand

Merci de votre attention