



INSTITUT
TECHNOLOGIQUE

Élaboration d'un modèle de croissance pour l'Eucalyptus gundal

Les données de croissance collectées au cours des 30 dernières années par l'AFOCEL puis FCBA ont permis de calibrer un modèle de croissance pour l'hybride Eucalyptus gundal. La démarche adoptée est similaire à celle utilisée par L. Saint-André pour l'hybride E. urophylla x E. grandis : un modèle arbre indépendant des distances fonctionnant sur le principe du modèle Fagacée de J. F. Dhôte. Si ce modèle est satisfaisant pour une première rotation à une densité initiale standard (autour de 1250 t/ha), il nécessite néanmoins des approfondissements pour les rotations suivantes ainsi que pour d'autres motifs de plantation.

Pour contacter les auteurs :

Sébastien Cavaignac

sebastien.cavaignac@fcba.fr

FCBA

Pôle Biotechnologie Sylviculture avancée

Station Sud-Ouest

71 route d'Arcachon

33610 Cestas

Tél. : 05.56.79.95.07

Francis Melun

francis.melun@fcba.fr

FCBA

Pôle Biotechnologie Sylviculture avancée

Station Sud-Ouest

71 route d'Arcachon

33610 Cestas

Tél. : 05.56.79.95.06

Alain Bouvet

alain.bouvet@fcba.fr

FCBA

Direction Innovation Recherche

10 avenue de Saint-Mandé

75012 Paris

Tél. : 01.40.19.49.36

Les eucalyptus occupent une place très importante dans la ligniculture à l'échelle mondiale en raison de leur rapidité de croissance et de la qualité de leur fibre (*Melun et Nguyen The, 2012*).

Ces propriétés ont dans un premier temps intéressé les papetiers français qui ont soutenu dans les années 70 un programme de recherche pour identifier les clones et modes de sylviculture de l'eucalyptus adapté au contexte pédo-climatique français. Parmi les différentes espèces testées, c'est l'hybride *E. dalrympleana* x *E. gunnii* (communément appelé *Eucalyptus gundal*) qui présente aujourd'hui le meilleur compromis entre adaptation et production et qui est utilisé dans le programme de développement papetier soutenu par le groupe Fibre Excellence (*Melun et Nguyen The, 2006*).

Le développement actuel de la demande en biomasse ligneuse afin d'alimenter les différents projets énergétiques relance l'intérêt pour cette essence fortement productive. Afin de pouvoir évaluer les ressources disponibles à moyen terme issues des plantations d'eucalyptus françaises, il est nécessaire de disposer de tables de production de cette essence. Par ailleurs, dans un contexte d'évaluation environnementale de ces cultures de biomasse, il est également nécessaire de connaître la croissance annuelle de l'eucalyptus afin de pouvoir calculer les différents bilans de consommation d'eau, de carbone et de minéraux.

C'est pourquoi, dans le cadre du projet de recherche OPTIMAL financé par la fondation Tuck¹, un modèle de croissance pour *E. gundal* a été mis au point. Nous présenterons dans un premier temps les données issues des essais suivis au cours des dernières années qui nous ont servi pour l'estimation des paramètres du modèle. Nous verrons ensuite la méthodologie générale et la structuration du modèle de croissance. Nous analyserons enfin les sorties du modèle avant de conclure sur les évolutions possibles.

Données disponibles

Depuis la création de l'AFOCEL en 1962, plus de 2500 dispositifs expérimentaux ont été installés, mettant l'accent sur les essences intéressantes économiquement (épicéa commun, douglas, pin maritime, peuplier) ou à fort potentiel (eucalyptus) (*Gastine et al., 2003*).

Pour ce dernier, plus de 400 parcelles d'essais sur l'ensemble du territoire national ont été installées représentant une surface d'environ 350 ha. Les essais permettent d'étudier l'amélioration génétique ou la sylviculture de l'eucalyptus. Parmi eux, 39 essais de sylviculture d'*E. gundal* ou placettes de productions installées dans des parcelles commerciales ont été exploités pour réaliser ce modèle de croissance. La modélisation porte sur les clones 208 et 121 qui ont été les plus développés jusqu'à présent. Le clone 208 est aujourd'hui le principal clone utilisé en plantation.

¹ Cette fondation a pour mission principale de développer la coopération internationale en matière d'enseignement et de recherche dans les domaines des hydrocarbures, de la pétrochimie, des moteurs, des activités qui leur sont liées, ainsi que de leurs effets sur l'environnement.

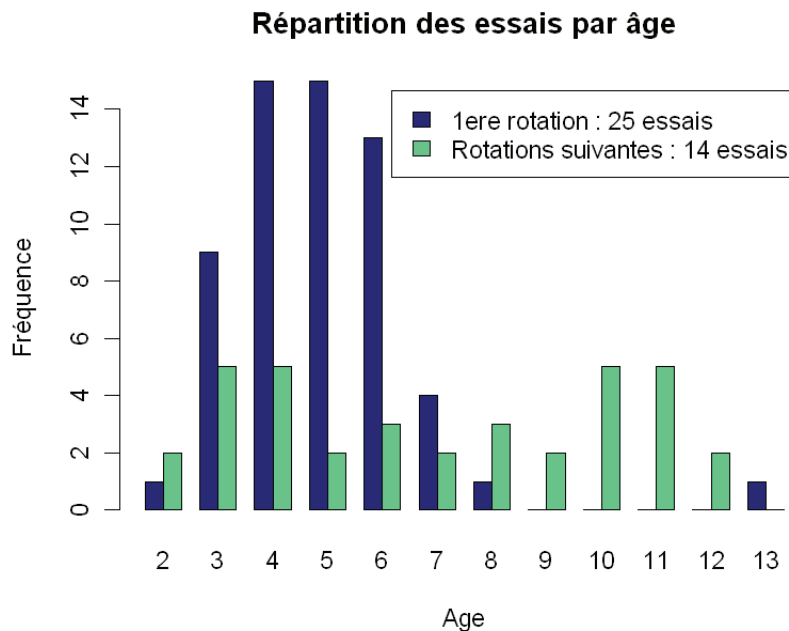


Figure 1 : Répartition des données disponibles pour l'élaboration du modèle

La **Figure 1** montre qu'en ce qui concerne les essais en première rotation, la répartition en classes d'âges n'est pas très équilibrée : les informations sont satisfaisantes pour les arbres de 3 à 6 ans, mais les essais sont beaucoup moins nombreux par la suite. En ce qui concerne les essais suivis en deuxième puis troisième rotation, les effectifs sont plus équilibrés, à savoir entre 2 et 4 essais mesurés par classe d'âge. Signalons toutefois que ces effectifs restent tout de même assez faibles pour pouvoir estimer de façon précise certains effets comme l'influence de la fertilité du site. A noter également que les données de 1ère, 2ème et 3ème rotation sont issues de parcelles différentes. Nous ne disposons pas aujourd'hui d'une continuité de mesures sur plusieurs rotations à partir des mêmes parcelles. En ce qui concerne l'itinéraire sylvicole, il s'agit uniquement de plantations réalisées à

1250 tiges/ha. Les surfaces terrières en fonction de l'âge et de la rotation sont présentées sur la **Figure 2**.

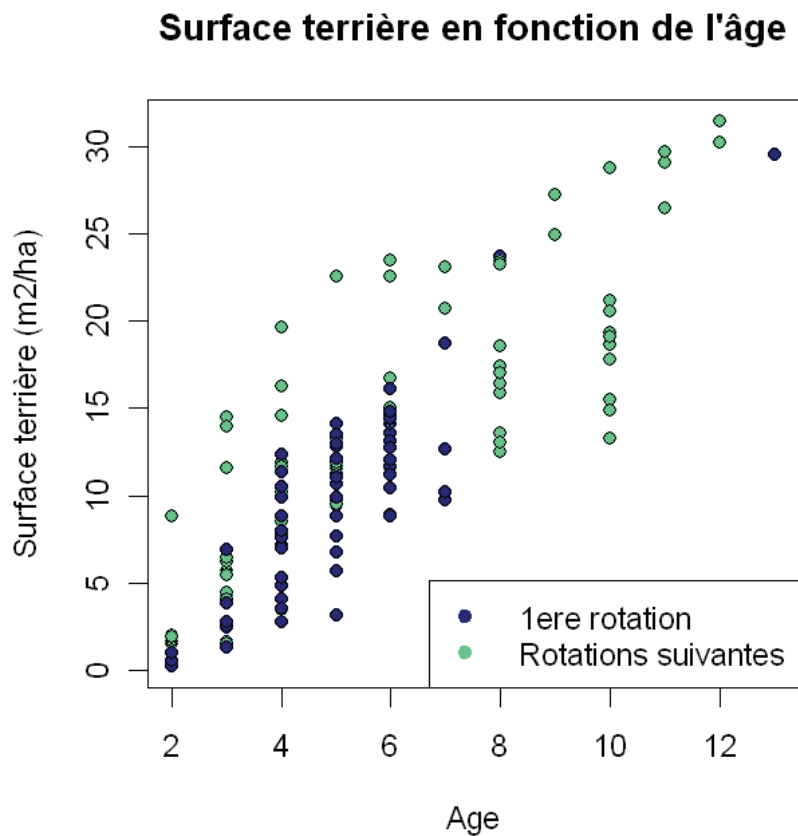


Figure 2 : Répartition des données disponibles pour l'élaboration du modèle

Cette figure met en avant une forte variabilité de la surface terrière, puisqu'à âge et densité équivalents, cette dernière peut varier dans un rapport de 1 à 3. Nous constatons également que les premières rotations sont généralement en dessous des rotations suivantes.

Méthodologie générale

Le modèle de croissance estimée présente une structure similaire à celui de Saint-André (Saint-André et al., 2002, Saint-André, 2004), lui-même inspiré du modèle Fagacée de Dhôte (Dhôte, 1996). Ce modèle de croissance est de type arbre indépendant des distances, c'est-à-dire que la croissance de chaque arbre est simulée pour ensuite calculer les caractéristiques dendrométriques à l'échelle de la parcelle. La position relative des arbres les uns par rapport aux autres n'est pas prise en considération, c'est leur dimension relative qui détermine leur statut social. Le moteur essentiel du modèle est la croissance en hauteur dominante qui dépend principalement de la fertilité du site. Cette croissance en hauteur dominante permet de calculer une croissance en surface terrière du peuplement. La croissance en surface terrière est par la suite répartie entre les différentes tiges en fonction de leur circonférence : ce sont les arbres dominants qui vont bénéficier le plus de cet accroissement. Par construction, le modèle assure donc la compatibilité entre l'échelle peuplement et l'échelle arbre (c'est-à-dire que la surface terrière du peuplement est bien la somme des différentes sections individuelles). Les modèles définis par L. de Saint-André ou J.-F Dhôte proposent également de calculer la hauteur individuelle de chaque arbre à l'aide d'une relation circonférence/hauteur. Ils respectent également la compatibilité entre les échelles arbre et peuplement. Cette quatrième relation n'a pas pu être établie, car il n'existe pas dans la base de données de mesure systématique des hauteurs, mais seulement un sous-échantillon capable de fournir des informations au niveau peuplement.

Par ailleurs, ne disposant dans les données de base que de hauteurs moyennes, c'est cette grandeur et non la hauteur dominante qui a été utilisée ici. Du fait qu'il s'agit de plantations clonales, l'effet de dominance

des arbres est moins exacerbé que dans des peuplements naturels et l'utilisation de la hauteur moyenne semble donc envisageable.

Estimation des différentes relations

► **Modèle de croissance en hauteur**

Le modèle de croissance en hauteur calibré est un modèle classique de type Chapman-Richard :

$$H = A \times (1 - e^{-k \times \text{Age}})$$

Avec H la hauteur en m, Age l'âge en année, (A, k, m) les paramètres du modèle à estimer.

Ce modèle a été estimé pour la première rotation et les rotations suivantes. La **Figure 3** illustre le résultat de cette estimation.

Tableau 1 : Estimation des paramètres du modèle de croissance en hauteur
(Degrés de significativité : 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.')

Paramètre	Estimation 1ère rotation	Estimation rotations suivantes
A	26,91***	23,68***
k	0,11**	0,16***

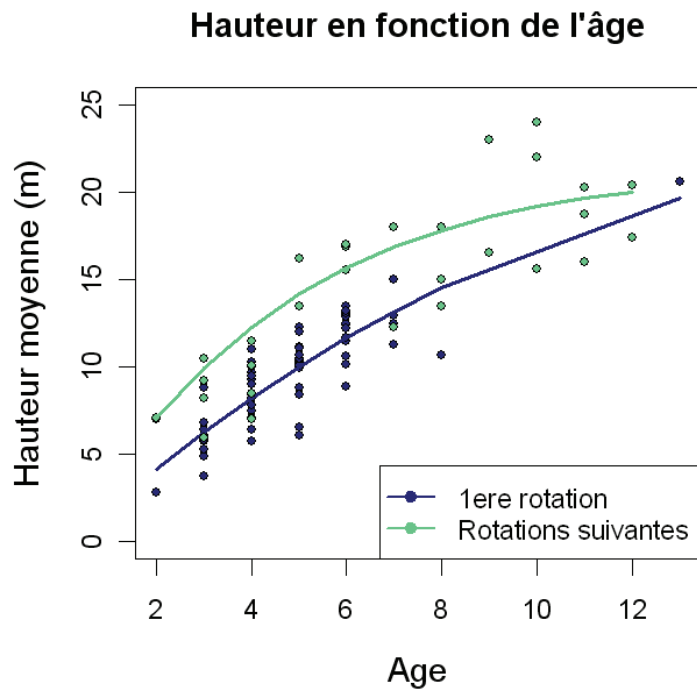


Figure 3 : Modèle de croissance en hauteur

► **Modèle de croissance en surface terrière (peuplement)**

Le modèle de croissance en surface terrière du peuplement a été estimé comme une fonction de la croissance en hauteur. La forme générale de l'équation pour les deux phases du peuplement (première rotation et suivantes) est celle-ci :

$$G = a \times H^b$$

Avec G la surface terrière (m²), H la hauteur moyenne (mètre), (a,b) les paramètres à estimer.

Tableau 2 : Estimation des paramètres du modèle de croissance en surface terrière (peuplement)

(Degrés de significativité : 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.')

Paramètre	Estimation 1ère rotation	Estimation rotations suivantes
a	0,28**	1.38*
b	1,53***	0,98***

Croissance en surface terrière en fonction de la croissance en hauteur

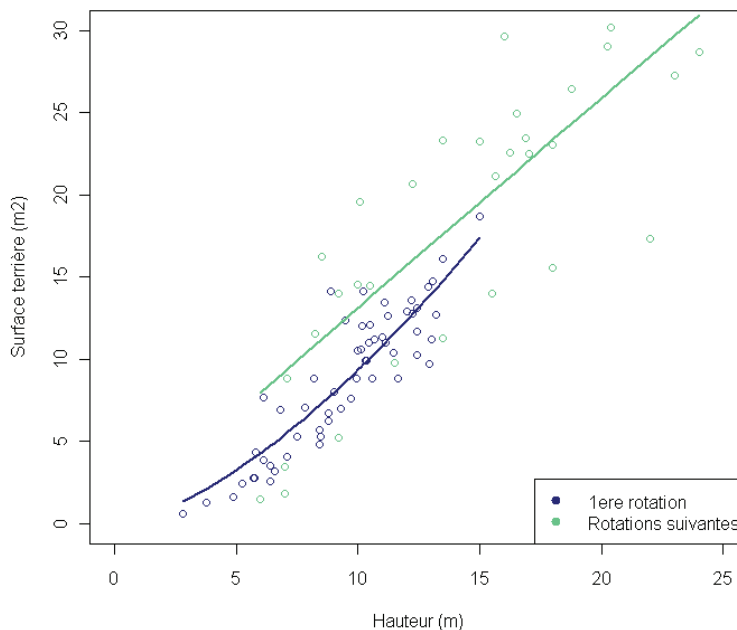


Figure 4 : Relation entre accroissement en surface terrière et accroissement en hauteur

► **Modèle de croissance circonférence (arbre)**

Le modèle de croissance individuelle reprend le modèle de Dhôte (Dhôte, 1996). Il répartit la croissance en surface terrière du peuplement entre les différentes tiges en fonction de leur statut social : la croissance des arbres dominants est plus importante que celle des dominés. Un seuil de

circonférence σ est également calculé en dessous duquel les arbres ne connaissent aucune croissance.

La croissance est calculée comme une croissance potentielle ($d\Gamma/dt$) qui est corrigée de deux facteurs : le premier ($\alpha_{\Sigma\sigma}$) est un réducteur qui dépend de la densité du peuplement et le second ($c-\beta_{\Sigma\sigma}\times c_{\sigma}$) dépend du statut de l'arbre.

$$\text{Si } c_i < \sigma \text{ alors } \frac{dg}{dt} = 0$$

$$\text{sinon } \frac{dg}{dt} = \frac{d\Gamma}{dt} \times \alpha_{\Sigma\sigma} \times (c_i - \beta_{\Sigma\sigma} \times \bar{c}_{\sigma})$$

Avec g la surface terrière individuelle (m^2), dt l'intervalle de temps (années), Γ la croissance potentielle (m^2), c_i la circonférence de l'arbre (m), c_{σ} la circonférence moyenne des arbres profitant de l'accroissement (m), ($\alpha_{\Sigma\sigma}$ et $\beta_{\Sigma\sigma}$) des facteurs à estimer.

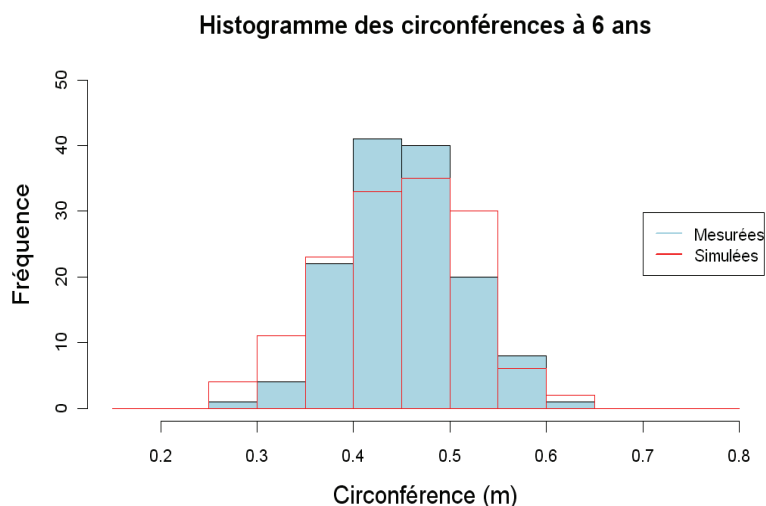


Figure 5 : Distribution des circonférences à 6 ans : comparaison entre valeurs mesurées et valeurs simulées par le modèle

A partir d'un inventaire à 3 ans, nous avons simulé la croissance du peuplement, puis comparé les circonférences individuelles obtenues aux circonférences mesurées à 6 ans (**Figure 5**). Il est possible de constater sur cette figure une bonne corrélation entre l'histogramme des circonférences mesurées et celui des circonférences simulées. La distribution des circonférences simulées est toutefois un peu plus étalée, ce qui montre que le modèle a tendance à donner de l'importance au statut social de l'arbre en favorisant les plus gros et défavorisant les plus petits.

Présentation des résultats

En appliquant le modèle, il est possible de calculer des volumes prévisibles à 10 ans en 1ère rotation à partir d'un inventaire à 3 ou 5 ans.

Cette table de résultats correspond à une densité initiale de plantation de 1250 t/ha avec une hypothèse de reprise à 95%, donc 1190 tiges vivantes.

Les calculs ont été réalisés pour 3 niveaux de hauteur (respectivement 5, 6, et 7 m à 3 ans) et 3 niveaux de surface terrière (correspondant à un diamètre moyen de 6, 7, et 9 cm à 3 ans) et en utilisant le tarif de cubage spécifique développé par Bouvet et al., 2012 dans le cadre du projet OPTIMAL.

Tableau 3 : Production en tonnes de matière fraîche découpe fin bout de 7 cm pour des hauteurs de 5-9-17 m à 3-5-10 ans

Age	H moy	Diam 1	Diam 2	Diam 3
		3 ans 6 cm 5 ans 10 cm 10 ans 15 cm	3 ans 7 cm 5 ans 11 cm 10 ans 16cm	3 ans 9 cm 5 ans 12 cm 10 ans 17 cm
3 ans	5 m	3	9	20
5 ans	9 m	35	45	61
10 ans	17 m	156	175	202

Tableau 4 : Production en tonnes de matière fraîche découpe fin bout de 7 cm pour des hauteurs de 6-10-18 m à 3-5-10 ans

Age	H moy	Diam 1	Diam 2	Diam 3
		3 ans 6 cm 5 ans 10 cm 10 ans 15 cm	3 ans 7 cm 5 ans 11 cm 10 ans 16cm	3 ans 9 cm 5 ans 12 cm 10 ans 17 cm
3 ans	6 m	3	9	21
5 ans	10 m	35	45	61
10 ans	18 m	153	170	198

Tableau 5 : Production en tonnes de matière fraîche découpe fin bout de 7 cm pour des hauteurs de 7-11-19 m à 3-5-10 ans

Age	H moy	Diam 1	Diam 2	Diam 3
		3 ans 6 cm 5 ans 10 cm 10 ans 15 cm	3 ans 7 cm 5 ans 11 cm 10 ans 16 cm	3 ans 9 cm 5 ans 12 cm 10 ans 17 cm
3 ans	7 m	3	9	22
5 ans	11 m	35	45	61
10 ans	19 m	149	167	191

Il ressort de ces tableaux que le facteur discriminant le mieux la production est le diamètre moyen, ce qui s'explique aisément par le fait que dans le calcul du volume le diamètre est élevé au carré. La hauteur influe assez peu dans le volume final. Paradoxalement, les résultats de ce modèle montrent une légère diminution de la production pour les arbres les plus grands. Il s'agit ici d'un artéfact du modèle : la croissance en diamètre étant fonction de la croissance en hauteur, plus la croissance entre deux dates est importante, plus l'arbre va prendre du volume. Or comme le modèle de croissance en hauteur est le même (donc une même asymptote), les arbres

les plus hauts sont ceux qui auront la plus faible croissance entre deux dates (car ils se rapprochent le plus de l'asymptote). Il s'agit là d'un point d'amélioration futur du modèle qui est précisé plus loin.

Les résultats du modèle sont cohérents avec les publications déjà réalisées concernant *E. gundal*, à savoir, pour une bonne installation, des niveaux de production avoisinant les 20 tonnes de matière fraîche par hectare et par an pour une découpe 7 cm (*Melun et Nguyen The, 2011*).

Les résultats pour les rotations suivantes ne sont pas encore disponibles, car il faut pouvoir :

- soit modéliser la répartition de la surface terrière non plus entre les souches mais bien entre les différents brins,
- soit avoir un tarif de cubage qui soit fonction de la surface terrière et non plus des dimensions de chaque brin. Les améliorations nécessaires au modèle sont discutées ci-après.

Perspectives d'amélioration

L'amélioration prioritaire du modèle concerne l'**estimation de la croissance en hauteur**. En effet, les mesures existantes sont des hauteurs moyennes calculées à partir d'un échantillon assez faible et au niveau peuplement (une dizaine d'arbres pris aléatoirement sur la parcelle). L'estimation traditionnelle du modèle supposerait cependant de travailler avec les hauteurs dominantes. Le protocole de mesure des essais sera donc complété, afin de pouvoir calibrer un modèle circonférence/hauteur à l'échelle arbre et également travailler avec la hauteur dominante. Cette modification devrait notamment permettre de limiter la variabilité observée sur la Figure 4.

Une deuxième amélioration est d'**intégrer des effets fertilité de la station**. Dans le modèle actuel cet effet est pris en compte par une croissance plus importante en circonférence à un âge donné, ce qui est valable dans la mesure où la densité reste constante. Mais pour tester différentes sylvicultures, il faudrait une prise en compte de la fertilité par la croissance en hauteur dominante, comme il est fait traditionnellement dans les modèles de croissance. Cette amélioration permettrait en outre de supprimer l'artéfact mis en évidence précédemment.

Ce dernier point soulève également la nécessité d'une troisième amélioration : **tenir compte de l'influence de la densité et de la sylviculture**. Les essais de calibration disponibles à l'heure actuelle sont tous à la même densité (autour de 1250 t/ha). Des essais à plus forte densité (2500 et 5000 t/ha) ont été installés ces dernières années dans des perspectives d'évaluation de la production de biomasse. Les informations récoltées sur ces essais permettront à terme de pouvoir étendre le modèle à des densités plus importantes.

Une quatrième amélioration concerne la **prise en compte de la mortalité**. Aujourd'hui un taux moyen de reprise à l'installation et un taux de mortalité moyen entre chaque rotation (% de reprise des souches) sont utilisés, en considérant qu'entre temps il n'y a pas de mortalité. Ceci mériterait d'être approfondi, en se posant notamment la question de la viabilité des arbres fortement dominés, c'est-à-dire ceux qui d'après le modèle ont une croissance annuelle nulle.

Enfin, le dernier point d'amélioration concerne la **modélisation des rotations suivantes**. Dans le modèle actuel, la surface terrière est calculée par souche. Il est très trivial dans le cas de la première rotation de retrouver le diamètre de la tige. Mais, pour les rotations suivantes, en raison de la répartition de cette surface terrière entre plusieurs rejets, une

modélisation spécifique du nombre de rejets par souche, ainsi que de la distribution des diamètres de ces différents rejets, doivent être réalisées pour pouvoir estimer plus efficacement la production au cours des rotations suivantes. Le suivi à moyen ou long terme des essais est ici également primordial, pour connaître à partir de quelle rotation apparaît un épuisement de la souche et un ralentissement de la production.

Conclusion

La méthodologie de calibration d'un modèle de croissance développée par J. F. Dhôte pour le hêtre et le chêne, puis appliquée par L. Saint-André à l'eucalyptus du Congo a pu être mise en œuvre sur une nouvelle essence française, l'hybride *E. dalrympleana* x *E. gunnii* (communément appelé *Eucalyptus gundal*). Les données de croissance des essais FCBA ont été ainsi mobilisées pour établir un premier modèle fonctionnel pour des situations habituelles (plantation à 1250 tiges/ha sur des terrains de fertilité comparable). Ce modèle donne des résultats acceptables pour estimer la production de la première rotation.

Des modifications de protocole de mesure des essais sont envisagées afin de pouvoir disposer d'informations suffisantes pour calibrer un modèle plus précis et plus généraliste.

Du fait de la rapidité des rotations (entre 3 et 10 ans suivant la densité de plantation et la fertilité des sols), ces nouvelles données seront très prochainement disponibles et ces travaux d'évolutions des modèles pourront donc avoir lieu dans un avenir très proche.

Sébastien Cavaignac
Nicolas Nguyen The
Francis Melun
Alain Bouvet



INSTITUT
TECHNOLOGIQUE

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien de la fondation Tuck dans le cadre du projet OPTIMAL. Les auteurs remercient la société Fibre Excellence et plus particulièrement D. Lambrecq pour son soutien aux travaux sur l'eucalyptus.

Références

Dhôte J.F.

A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations
Annales des Sciences Forestières, 1996, Vol. 53, n°1, p. 1-20

Gastine F., Bouvet A., Deleuze C., Monchaux P.

Le réseau des essais AFOCEL fête ses 40 ans !
Revue Forestière Française, 2003, Vol. LV, n°1-2003, p. 47-56

Melun F. et Nguyen The N.

Eucalyptus gundal
Fiches clonales Eucalyptus, Fiche synthétique AFOCEL, 2006, 4 p.

Melun F., Nguyen The N.

L'eucalyptus en France : une espèce remarquable pour la production de biomasse
Revue Forestière Française (soumis), 2012, 20 p.

Nguyen The N., Trichet P., Cavaignac S., Bouvet A.

Biomass and nutrient accumulation of different scenarios of dedicated silviculture for energy with eucalyptus and maritime pine in south-western France
A soumettre, 2012, 11 p.

Saint-André L., Laclau J.-P., Bouillet J.-P., Deleporte P., Miabala A., Ognouabi N., Baillères H., Nouvellon Y., Moukinis R.

Integrative modelling approach to assess the sustainability of the Eucalyptus plantations in Congo
Fourth Workshop IUFRO S5.01.04, Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada, September 8-15, 2002, 11 p.

Saint-André L.

Note technique sur le modèle Eucalypt-Dendro - Bilan et perspective
2004, 42 p.