



**HAL**  
open science

**Modélisation et intégration logicielle: croissance, branchaison, qualité des bois Aide à la décision pour la sylviculture et l'utilisation du bois des essences forestières françaises (5ème tranche)**

François Courbet

► **To cite this version:**

François Courbet. Modélisation et intégration logicielle: croissance, branchaison, qualité des bois Aide à la décision pour la sylviculture et l'utilisation du bois des essences forestières françaises (5ème tranche): Convention MAPA-DERF / INRA n° 61.45.47/01 Code INRA B/03816. [Rapport de recherche] INRAE URFM. 2002. hal-03654591

**HAL Id: hal-03654591**

**<https://hal.science/hal-03654591>**

Submitted on 28 Apr 2022

**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.

# Convention MAPA-DERF / INRA n° 61.45.47/01 Code INRA B/03816

## **Modélisation et intégration logicielle : croissance, branchaison, qualité des bois** Aide à la décision pour la sylviculture et l'utilisation du bois des essences forestières françaises (5<sup>ème</sup> tranche)

### ***Rapport final (novembre 2002)***

#### **1 Contexte et objectifs généraux du projet à 5 ans (1997-2002)**

Voir annexe technique à la convention n° 61.45.47/01.

#### **2 Programme 2001 : objectifs et résultats de la 5<sup>ème</sup> tranche<sup>1</sup>**

##### **2.2 Modélisation de la croissance et de la qualité du Cèdre : intégration des modèles dans *Capsis* (responsable : F. Courbet)**

###### 2.2.1 Contexte et objectifs

Après l'achèvement des modèles (statiques) de branchaison et de prédiction des profils de tige, de cerne, d'écorce et d'aubier, cette action a pour objectif la finalisation d'un modèle de croissance et l'intégration de l'ensemble des résultats obtenus sur le Cèdre dans *Capsis*. L'interface *Capsis* permettra une utilisation conviviale du modèle pour tester la chaîne de relations et procéder ainsi à des tests de sensibilité et de cohérence de l'ensemble.

###### 2.2.2 Travaux à réaliser

Ils comportent 2 volets :

1. la modélisation de la croissance et de la mortalité du Cèdre sur la base des données existantes (bien que celles-ci fassent défaut pour certaines combinaisons du domaine fertilité x âge x densité). Le modèle sera du type "arbre indépendant des distances";
2. l'intégration de l'ensemble des équations (croissance, branches, cernes, écorce) dans *Capsis*.

**Résultats attendus** : un module Cèdre complet dans *Capsis*; des simulations intégrées de scénarios sylvicoles alternatifs incluant des sorties diversifiées : volume, qualité des bois (branches, aubier).

---

<sup>1</sup> Pour chaque action, on rappelle les paragraphes « Contexte et objectifs » et « Travaux à réaliser » de l'annexe technique. On les complète par les « Travaux réalisés » depuis Novembre 2001.

### 2.2.3 Travaux réalisés depuis novembre 2001 et résultats

#### ◆ *Acquisition de données complémentaires :*

Les trois dispositifs expérimentaux de Sault (84), Valliguières (30) et de Serre Guilhem (11) ont été inventoriés. Dans le dernier cité, les arbres échantillons ont été mesurés en hauteur.

Sept placettes semi-permanentes, dont trois au Mont Ventoux et quatre en forêt communale de Belvezet (30) ont été inventoriées. Les hauteurs des arbres échantillons ont été mesurées dans les trois placettes du Mont Ventoux.

#### ◆ *Saisie, mise en forme de l'ensemble des données disponibles :*

L'ensemble des données nécessaires à la construction du modèle de croissance ont été saisies, rassemblées, vérifiées et mises à jour. Les données concernent 16 peuplements d'âge et de fertilité différents. Dans certains peuplements ont été installées plusieurs placettes qui diffèrent par la sylviculture pratiquée. Les données sont issues des inventaires successifs de 20 placettes semi-permanentes, parfois réalisés par classes de circonférence ou issus de mesure d'arbres pas toujours individualisés, et de 19 placettes de 3 dispositifs récents avec une gamme de sylvicultures expérimentées très variables sur le plan de la densité. Dans ce dernier cas, les mesures sont plus fréquentes mais ne s'échelonnent que sur une dizaine d'années. On a utilisé 233 périodes de croissance dont la durée varie de 1 à 10 ans. La surface des placettes varie de 4 à 66 ares. Les mesures les plus anciennes datent de 1923.

#### ◆ *Mise au point des relations de croissance en surface terrière :*

Le modèle choisi est un modèle arbre indépendant des distances mis au point par J.-F. Dhôte pour le Hêtre (Dhôte, 1991 et 1995). Ce modèle a deux composantes : (i) une relation de croissance en surface terrière  $(\frac{\Delta G}{\Delta t})$  pour l'ensemble du peuplement et (ii) une relation de croissance en surface terrière  $(\frac{\Delta g}{\Delta t})$  au niveau arbre. La compatibilité entre les deux niveaux étant assurée en écrivant que la croissance en surface terrière du peuplement est égale à la somme des accroissements individuels des arbres qui le composent :  $\frac{\Delta G}{\Delta t} = \sum \frac{\Delta g}{\Delta t}$ . Cette contrainte fournit un garde-fou intéressant contre d'éventuelles dérives du modèle.

Le Cèdre comme le Hêtre supporte l'ombre ce qui favorise la constitution d'un sous-étage qui survit mais dont la croissance est pratiquement nulle. L'autre avantage du modèle est de bien rendre compte de ce phénomène par l'introduction d'un seuil de circonférence  $\sigma$  en dessous duquel les arbres ne poussent plus :

$$\frac{\Delta g}{\Delta t} = \gamma(c - \sigma) \text{ si } c > \sigma$$
$$\frac{\Delta g}{\Delta t} = 0 \text{ si } c \leq \sigma$$

où  $c$  est la circonférence de l'arbre à  $t$ ,  $\frac{\Delta g}{\Delta t}$  est l'accroissement en surface terrière de l'arbre entre  $t$  et  $t + \Delta t$ ,  $\gamma$  et  $\sigma$  des paramètres.

Ce modèle s'ajuste bien sur toutes les données considérées ( exemple en figure 1).

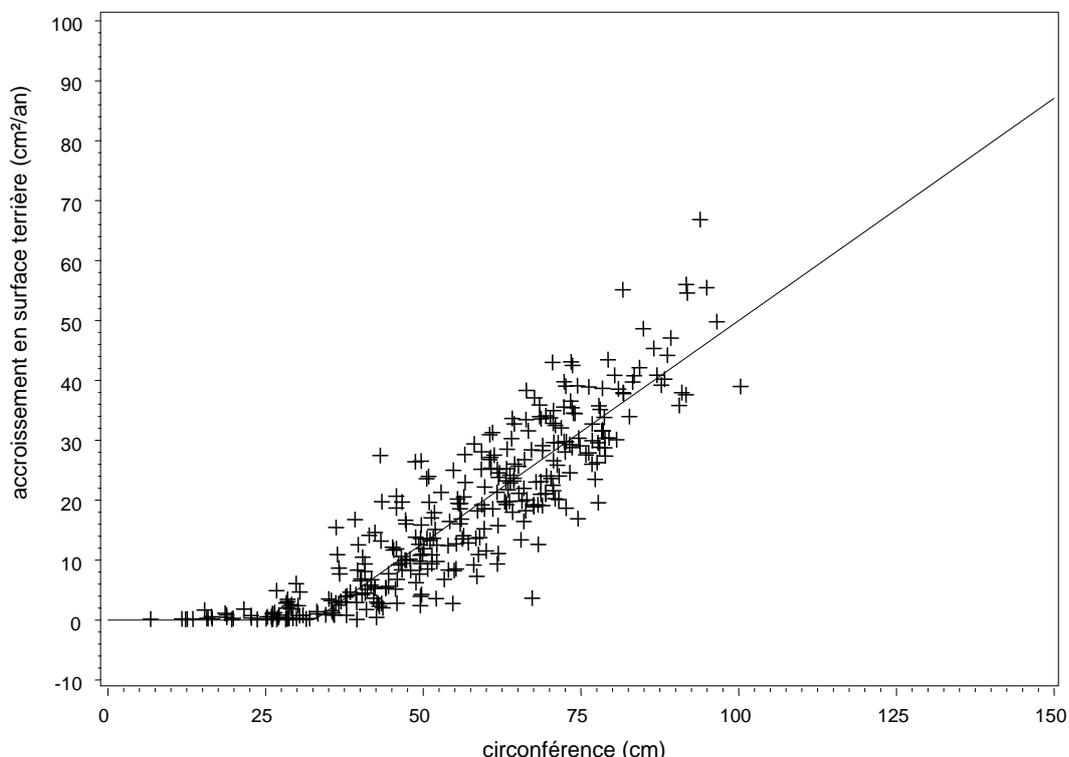


Figure 1. Accroissement individuel en surface terrière en fonction de la circonférence initiale. Ajustement du modèle à seuil. (Placette Serre Longue - période 1990-1994)

- relation de croissance du peuplement en surface terrière

On constate une relative indépendance entre l'accroissement en surface terrière du peuplement et sa densité pour des peuplements suffisamment pleins ( $RDI > 0.4$  environ). Celui-ci décroît ensuite pour les peuplements moins denses. On ajuste alors la relation (potentiel x réducteur) suivante :

$$\frac{\Delta G}{\Delta t} = \frac{\Delta \Gamma}{\Delta t} (1 - e^{-\lambda S_\sigma}) \text{ avec } \frac{\Delta \Gamma}{\Delta t} = \alpha + \beta \frac{\Delta H0}{\Delta t}$$

où  $\frac{\Delta \Gamma}{\Delta t}$  représente la croissance potentielle en surface terrière d'un peuplement plein entre  $t$  et  $t + \Delta t$ ,  $\frac{\Delta H0}{\Delta t}$  est l'accroissement en hauteur dominante du peuplement pendant la même période,  $S_\sigma$  la somme des circonférences des arbres supérieures au seuil  $\sigma$  (= indice de densité);  $\lambda$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres.

Cette relation a été ajustée sur 163 observations, certaines périodes d'un an ayant été regroupées (Figure 2). On obtient :  $\alpha = 0.8037 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{an}$ ;  $\beta = 2.8709 \text{ m}/\text{ha}$ ;  $\lambda = 4.29714 \times 10^{-4} \text{ cm}$ . L'écart-type résiduel est de  $0.46 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{an}$ .

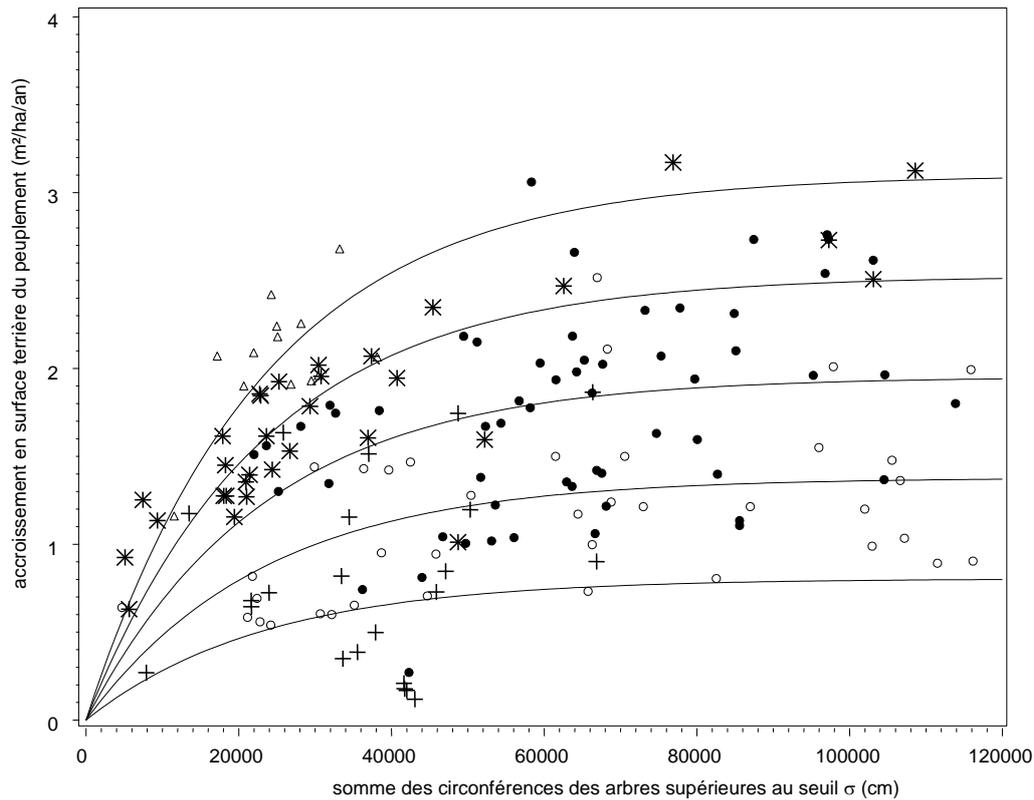


Figure 2. Relation entre l'accroissement en surface terrière du peuplement et la densité (= somme des circonférences des arbres supérieures au seuil  $\sigma$ ). Observations et ajustement par classe de 0.2 m d'accroissement en hauteur dominante de 0 m/an (+ et courbe inférieure) à 0.8 m/an ( $\Delta$  et courbe supérieure).

- relation de croissance individuelle en surface terrière

Le modèle est ajusté pour tous les couples placette x période (exemple en figure 1) dont on déduit pour chaque ajustement  $S_\sigma$ ,  $\sigma$  et  $\gamma$ . On constate que  $\gamma$  est fonction de la densité (Figure 3) ainsi que le seuil  $\sigma$ : l'ouverture du peuplement réactive la croissance des petits arbres.

Pour tenir compte de ce phénomène (on fait tendre  $\sigma$  vers 0 quand  $S_\sigma$  tend vers 0) et de la contrainte de compatibilité entre les niveaux arbre et peuplement, on ajuste :

$$\gamma = \frac{\Delta\Gamma}{\Delta t} (\lambda e^{-\mu S_\sigma})$$

en intégrant les valeurs des paramètres trouvés dans le modèle peuplement ci-dessus. On obtient  $\mu = 9.52169 \times 10^{-6}$  cm. Relation ajustée sur 233 observations (Figure 3). L'écart-type résiduel est de 0.23 cm/an.

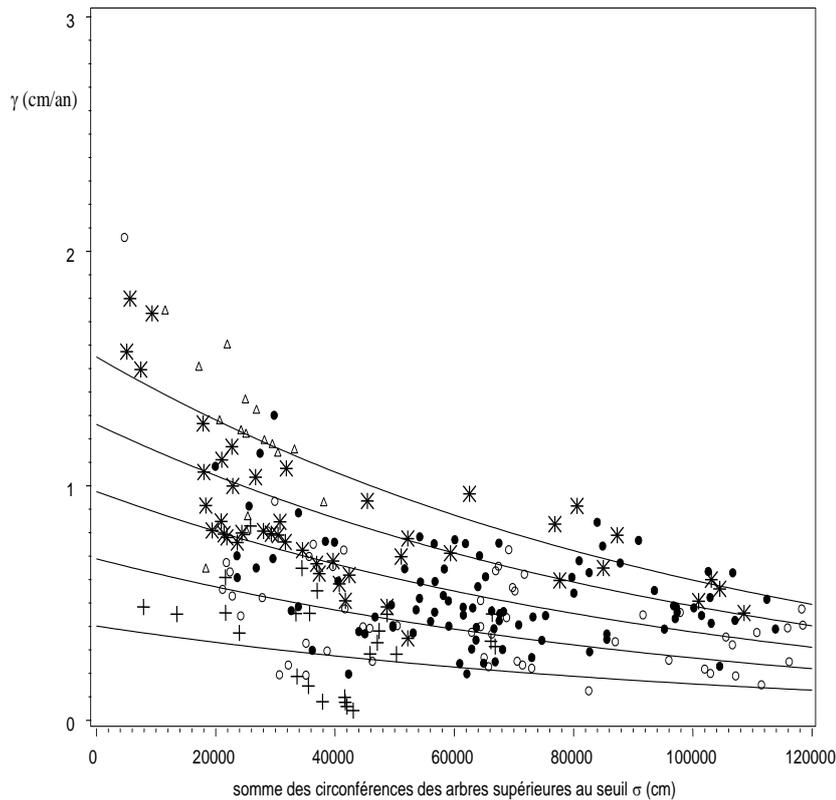


Figure 3. Relation entre  $\gamma$  et la densité (= somme des circonférences des arbres supérieures au seuil  $\sigma$ ). Observations et ajustement par classe de 0.2 m/an d'accroissement en hauteur dominante de 0 m/an (+ et courbe inférieure) à 0.8 m/an ( $\Delta$  et courbe supérieure).

Le seuil ne peut pas être calculé de façon explicite mais par itérations successives à l'aide la formule :

$$\sigma = \bar{c}_\sigma \left( 1 - \frac{\frac{\Delta\Gamma}{\Delta t} (1 - e^{-\lambda S_\sigma})}{\gamma S_\sigma} \right)$$

où  $\bar{c}_\sigma$  est la circonférence arithmétique moyenne des arbres plus gros que le seuil.

Ce modèle comprend un paramètre de moins que le modèle mis au point sur le hêtre par J.-F. Dhôte. En sortie de ce modèle se greffe facilement la relation de profil de surface transversale de cerne obtenue en 1998.

◆ *Mise au point des relations hauteur-circonférence :*

Les données fiables de croissance individuelle en hauteur sont insuffisantes pour établir un modèle de croissance en hauteur. Les données font défaut surtout pour les placettes les plus âgées (50 ans et plus). Comme souvent dans pareil cas, nous avons ajusté un modèle de courbes hauteur-circonférence. 145 jeux de données (peuplement x année de mesure)

regroupant 7059 mesures ( de 25 à 100 tiges par inventaire en général) ont été utilisées. Nous avons retenu la fonction monomoléculaire. On obtient :

$$H = 1.3 + b_1(1 - e^{-b_2 C})$$

avec  $b_1 = \frac{H_0 - 1.3}{1 - e^{-b_2 C_0}}$  et  $b_2 = 1.73 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ . Le modèle passe ainsi par les points de coordonnées (0,1.3) et (C0,H0). L'écart-type résiduel est de 1.10 m.

◆ *Relation de mortalité :*

Nous avons sélectionné 13 inventaires répartis sur 7 placettes dans lesquelles suffisamment d'arbres étaient morts pour que l'on puisse attribuer cette mortalité à la surdensité. Nous avons donc ajusté la loi d'autoéclaircie suivante :

$$N_{\max} = \alpha_1 Cg^{\alpha_2}$$

où Cg est la circonférence quadratique moyenne et Nmax le nombre maximum de tiges vivantes pour Cg et  $\alpha_1 = 9.457391 \times 10^2 \text{ m}^{-\alpha_2}$  et  $\alpha_2 = -1.692$ . L'écart-type résiduel est de 172.49.

Lorsque la densité dépasse cette courbe limite, on s'y ramène en faisant mourir les arbres les plus petits.

◆ *Intégration du modèle Cèdre dans CAPSIS :*

F. Courbet a suivi la formation sur Java et CAPSIS, destinée aux modélisateurs et assurée par F. de Coligny du 26 au 28 février 2002.

Un certain nombre de relations ont été intégrées dans CAPSIS : croissance en hauteur dominante, tarif de cubage, profil de surface transversale de cerne. Les autres relations sont en cours d'incorporation ou en voie de l'être à court terme (quelques semaines).

Participants : François Courbet (Unité de Recherches forestières méditerranéennes, INRA Avignon), Morgan Jacquinet (stagiaire URFM du 15/05 au 15/07/2002. INRA Avignon), Philippe Dreyfus (Unité de Recherches forestières méditerranéennes, INRA Avignon) et François de Coligny (UMR Amap CIRAD-INRA Montpellier).

#### 2.2.4 Bilan global sur l'ensemble du projet

L'ensemble des 5 tranches du projet a permis d'achever la construction d'un modèle complet de croissance et de qualité du bois (forme et structure interne de la tige, branchaison) pour le Cèdre de l'Atlas. Les relations établies dans le cadre de ce projet ont complété celles établies auparavant (tarif de cubage à deux entrées en 1991, faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante en 1996) ou conjointement (profil de surface transversale de cerne en 1998).

En 1997, l'effort a porté sur l'acquisition de données complémentaires : analyse des résultats de deux dispositifs sylvicoles expérimentaux récents d'éclaircie et d'élagage, et mise en place avec l'aide de l'ONF d'un 3<sup>ème</sup> dispositif composés de 9 traitements et 10 placettes dans l'Aude.

En 1999 ont été construits les modèles de profil de tige et de structure interne du tronc (profils d'écorce et d'aubier). Sur le plan méthodologique, on a comparé sur un échantillon indépendant la distribution des largeurs de cernes observée à celle modélisée soit par l'empilement des profils de tiges successifs, soit par la superposition des profils de surface de cernes. Un article original a été tiré de ce travail.

En 2000, ont été établies les relations portant sur la branchaison (nombre et localisation des branches, diamètre et mortalité). Ces relations ont été améliorées (modèles à effets mixtes) en 2001.

En 2001, les relations du modèle de croissance ont été établies (croissance en circonférence, courbes hauteur-circonférence, mortalité).

Ajoutons que dans le cadre de ce projet, des relations permettant de relier la densité et le module d'élasticité à la largeur de cerne ont été établies en 1997 et 1998 pour le Cèdre par Jean-Michel Leban (UMR Lerfob, INRA Nancy). Elles viendront utilement se greffer sur les distributions de largeur de cerne issues des modèles établis.

#### 2.2.5 Perspectives

L'incorporation du modèle complet dans CAPSIS permettra d'identifier ses lacunes et d'étudier son comportement en dehors de son domaine de construction par le test de scénarios sylvicoles diversifiés.

On peut d'ores et déjà penser que le modèle de croissance en hauteur dominante est mal adapté aux peuplements récents dont la croissance est plus rapide, au même âge, que les vieux peuplements qui ont servi à construire cette partie du modèle. Cette dérive de la croissance constatée aussi sur d'autres espèces (Dhôte et Hervé, 2000 ont déjà mis en évidence un effet date allant dans le sens d'une augmentation récente de la croissance en hauteur dominante dans quelques cas sur chêne sessile) pourrait avoir deux causes. Une augmentation générale de la productivité ou un effet de l'amélioration des techniques de reboisement (plantation après sous-solage, maîtrise de la végétation concurrente alors que les vieux peuplements sont issus de régénération naturelle sans préparation du sol) peuvent être à l'origine de cette constatation. Dans le second cas, l'effet est temporaire et on peut craindre que l'estimation de la fertilité de ces jeunes peuplements soit faussée et que les prédictions à long terme de la croissance des jeunes peuplements actuels soient surestimées.

Il sera sûrement nécessaire d'améliorer les modèles par l'adjonction de données supplémentaires issues des trois dispositifs expérimentaux récents, en particulier des placettes conduites à faible densité. Ainsi, on pourrait construire un modèle de croissance en hauteur lorsqu'on pourra disposer de suffisamment d'accroissements fiables d'arbres suivis dans le temps.

Il serait souhaitable, maintenant que les outils d'analyse existent, de déboucher sur des modèles de croissance à effet mixte. Au delà du souci de modéliser au mieux la croissance et

sa variabilité, cela est indispensable pour générer des produits dont la distribution des largeurs de cerne et donc la répartition par classe de qualité soit réaliste.

En attendant, le modèle actuel et son utilisation pratique via la plateforme logicielle CAPSIS va permettre de dialoguer avec les gestionnaires, de voir s'il peut répondre à leurs demandes de déboucher sur des scénarios sylvicoles pour l'aide aux aménagements.

Courbet F., Houllier F. 2002. Modelling the profile and internal structure of tree stem. Application to *Cedrus atlantica* Manetti. *Annals of Forest Science*, 59 63-80.

Dhôte, J.-F. 1991. Modélisation de la croissance des peuplements réguliers de hêtre : dynamique des hiérarchies sociales et facteurs de production. *Annales des Sciences forestières*. 48. 389-416.

Dhôte, J.-F. 1995. Définition de scénarios d'éclaircie pour le Hêtre et le Chêne. *Revue forestière française*. XLVII. N° spécial 1995. 106-110.

Dhôte, J.-F et Hervé, J.-C. 2000. Changement de productivité de quatre peuplements de Chêne sessile depuis 1930 : une approche à l'échelle du peuplement . *Annals of Forest Science*. 57. 651-680.

Montpellier, novembre 2002

François Courbet