



**HAL**  
open science

## Recherches sur les forêts hétérogènes : observation, expérimentation et modélisation

Thomas Cordonnier, Christian Ginisty, François Ningre, Thomas Perot,  
Alexandre Piboule, Isabelle Vinkler

► **To cite this version:**

Thomas Cordonnier, Christian Ginisty, François Ningre, Thomas Perot, Alexandre Piboule, et al..  
Recherches sur les forêts hétérogènes : observation, expérimentation et modélisation. Rendez-vous  
Techniques de l'ONF, 2007, 18, pp.18-25. hal-02591068

**HAL Id: hal-02591068**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02591068>**

Submitted on 11 Jul 2024

**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.

# Recherches sur les forêts hétérogènes : observation, expérimentation et modélisation

Le précédent dossier sur les forêts hétérogènes (Rendez-Vous Techniques n° 10) s'est principalement focalisé sur les enjeux des forêts hétérogènes et les grands principes de leur gestion. Quelques exemples exposés de manière succincte illustrent les recherches scientifiques en cours au niveau national, les différentes approches de gestion et les orientations prises au sein de l'ONF, en dégagant les traits saillants d'une problématique complexe. Une suite logique consiste à développer maintenant de manière plus détaillée un certain nombre de travaux pour alimenter les réflexions et permettre aux lecteurs avertis de mieux s'approprier les concepts. Dans cet article, nous examinerons trois exemples correspondant à autant d'approches différentes (non exhaustives) :

- une approche basée sur des **observations** avec la présentation d'une étude ONF/INRA sur la morphologie de perches de hêtre en système irrégulier ;
- une approche basée sur l'**expérimentation** avec la présentation d'un projet de recherche INRA sur le mélange érable sycomore/hêtre en Lorraine ;
- une approche par **modélisation** avec la présentation des recherches du Cemagref sur les mélanges chêne sessile/pin sylvestre dans la région Centre.

Ces travaux étant en cours, il ne sera pas question ici de présenter des résultats définitifs mais bien de préciser l'intérêt des différentes approches et les méthodes asso-

ciées. Un objectif commun à toutes ces études vise à améliorer notre capacité à prédire la dynamique et la stabilité des mélanges ou des structures irrégulières en fonction de la sylviculture appliquée.

## Une étude sur la morphologie des perches de hêtre en futaie irrégulière

### Un objectif à long terme : définir des indicateurs de bonne réactivité des perches

La recherche d'éléments de diagnostic des perches ( $7,5 \leq$  diamètre  $< 17,5$  cm) permettant de prédire leur dynamique de croissance et leur évolution qualitative sous l'effet d'une éclaircie est depuis quelque temps une préoccupation forte des gestionnaires en forêt hétérogène. Elle est d'ailleurs commune à toutes les sylvicultures d'arbres qui supposent de repérer les tiges de qualité, parfois même très précocement, afin de travailler à leur profit. En système irrégulier cette question est le plus souvent formulée en termes de durée pendant laquelle une espèce peut rester en phase d'attente ou de compression sans que son avenir soit remis en cause. Le forestier ne peut raisonnablement accéder à l'historique de croissance d'une perche ou d'un petit bois. Il est en revanche capable d'appréhender sur le terrain un certain nombre de variables morphologiques simples : proportion de houppier vivant, caractéristiques de la branchaison, fourchaison, présence de gourmands, déséquilibre du houppier, état sanitaire. L'objectif de

cette étude est d'améliorer la prédiction à court terme (5-8 ans) de la réactivité de perches, en croissance et qualité, au sein de peuplements feuillus après réduction de la compétition locale. La première étape consiste à définir des morphotypes sur lesquels une expérimentation de libération pourra être envisagée par la suite. Cette première étape descriptive est pilotée par l'ONF, réalisée en partenariat avec l'INRA (LERFoB, Unité Mixte de Recherche INRA/ENGREF, Champenoux), et financée dans le cadre du projet ECOGER<sup>1</sup>. À noter qu'il existe, pour les feuillus et contrairement aux résineux, un réel manque de connaissance sur les relations entre itinéraires sylvicoles (historique) et architecture aérienne des tiges et sur leurs conséquences en termes de réactivité (croissance et qualité) après éclaircie.

### Une méthodologie ambitieuse pour aboutir à des morphotypes

Plus de 800 perches de hêtre réparties dans 12 parcelles (dont 2 en forêt privée) de 11 forêts du Nord de la France (futaies irrégulières, anciens taillis-sous-futaie en conversion) ont été décrites suivant un protocole de description assez complet (figure 1) : hauteur totale, circonférence, hauteurs d'insertion et nature des quatre premières branches séquentielles vivantes, hauteur de base du houppier, écart à la verticalité sur quatre mètres, nombre de gourmands sur 4 m etc. Une journée d'inter-calibration entre les différentes équipes de l'INRA et de

1 ECOlogie pour la Gestion des Ecosystèmes et de leurs Ressources

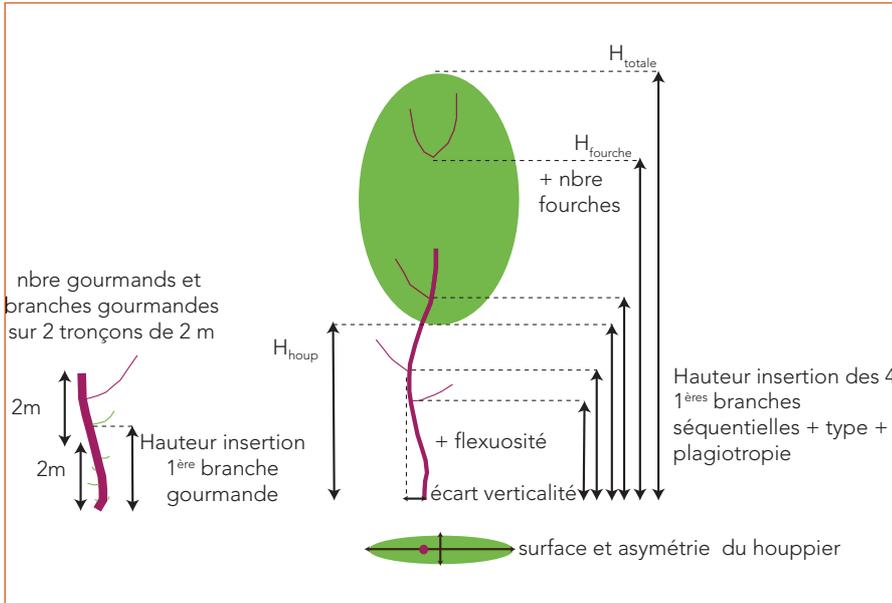


Fig. 1 : variables mesurées sur chaque perche échantillonnée dans le cadre du projet sur la réactivité des perches en système irrégulier

Les données ont été traitées par des méthodes d'analyses descriptives multivariées (Analyse des Composantes Principales, Analyse Hiérarchique Ascendante) pour aboutir aux différents types morphologiques. Un apport intéressant de cette étude a été l'élaboration d'une nouvelle méthode robuste de mesure de hauteur de base de houppier et la mise en place d'une étude parallèle visant à améliorer la distinction entre branches séquentielles et branches gourmandes.

**Exemple de résultat**

La figure 2 représente la clé typologique obtenue après analyse des données. Un élément frappant de cette clé est le nombre réduit de variables nécessaires à la détermination des types : la proportion de houppier vivant (indice de vigueur), la proportion de la tige présentant des branches isolées sous le houppier (indice d'élagage), la présence d'une fourche sur les 3 premiers quarts de la tige

L'ONF (5 directions territoriales concernées : Centre-Ouest, Ile-de-France Nord-Ouest, Lorraine, Franche-Comté, Bourgogne Champagne-Ardenne) a permis de garantir une bonne homogénéité

des prises de mesures. Les perches ont été sélectionnées de manière aléatoire après inventaire et stratification suivant la typologie Franche-Comté : perches d'avenir, récupérables, douteuses, nulles.

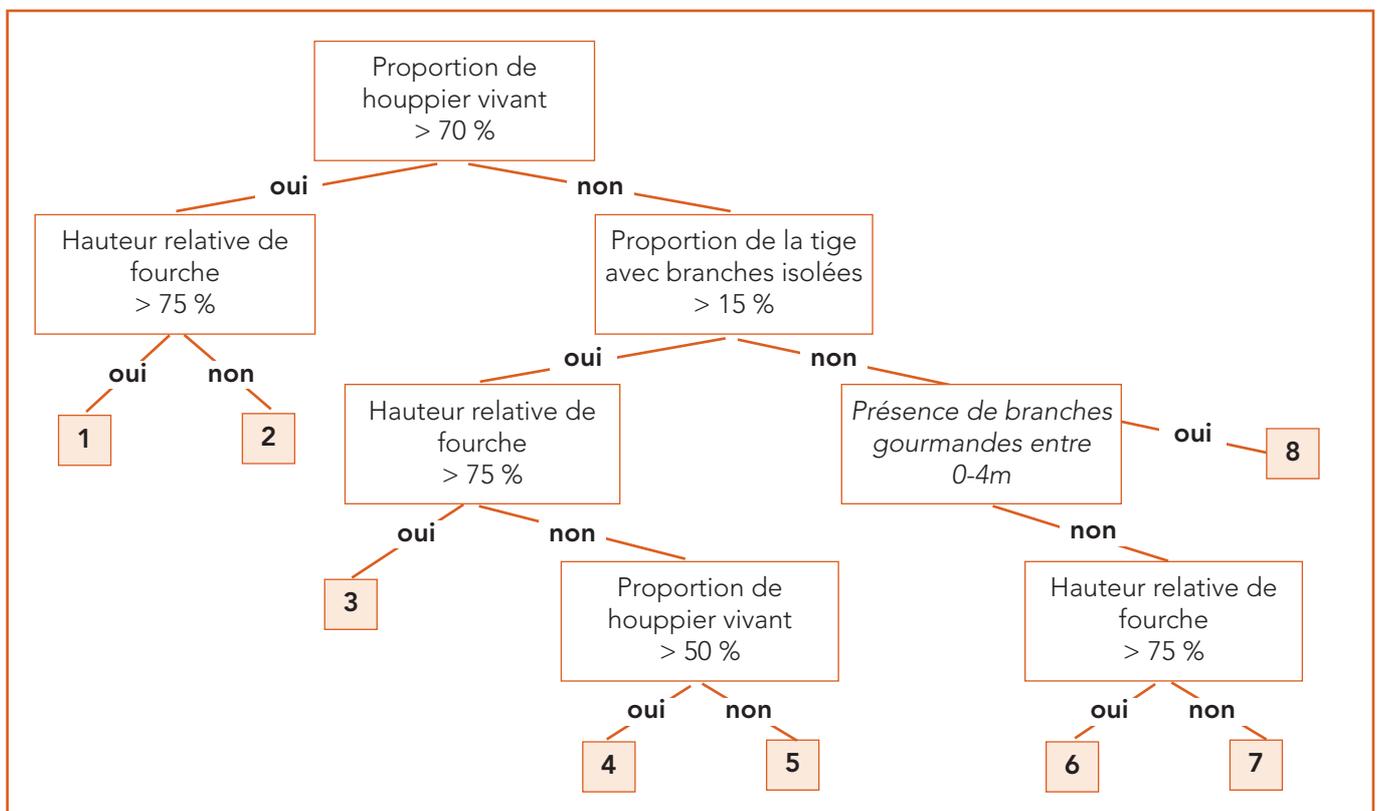


Fig. 2 : résultat de la typologie (morphotypes) issue de l'analyse des données mesurées sur les perches de hêtre

(indice de vigueur), et la présence de branches gourmandes sur les 4 premiers mètres (critère de qualité). Il est également intéressant de noter que ces variables ne nécessitent pas de mesures compliquées sur le terrain, donnant ainsi un caractère pratique à cette clé. Reste à évaluer la manière dont les 8 types ainsi déterminés réagissent à une éclaircie en leur faveur ce qui correspond à la deuxième phase de l'étude qui sera réalisée ultérieurement.

## Une recherche expérimentale sur le mélange hêtre/érable sycomore en Lorraine

### Un dispositif expérimental original...

Avec le soutien du programme « forêts hétérogènes » du GIP-ECOFOR<sup>2</sup>, l'ONF a mis en place en 1997 une expérimentation sur le mélange hêtre – érable sycomore en forêt domaniale de Haye (Lorraine). Cette expérimentation représente ce qu'on appelle un « double clinal aléatoire » : il s'agit d'une placette rectangulaire d'environ un hectare au sein de laquelle la densité des plants varie dans le sens de la longueur et le taux de mélange dans le sens de la largeur (figure 3). Ce type de dispositif, assez original, permet de réaliser, sur une petite surface, une grande diversité de situations de compétition entre individus d'une même espèce (compétition intraspécifique) et entre individus d'espèces différentes (compétition interspécifique). Sa motivation initiale consistait à mieux comprendre l'influence du voisinage sur la croissance et la forme des individus. La placette est constituée d'une zone centrale de mesure où la position de tous les individus est connue et d'une zone tampon permettant d'éviter d'éventuels effets de bordure. Les arbres de la zone centrale font l'objet de mesures régulières

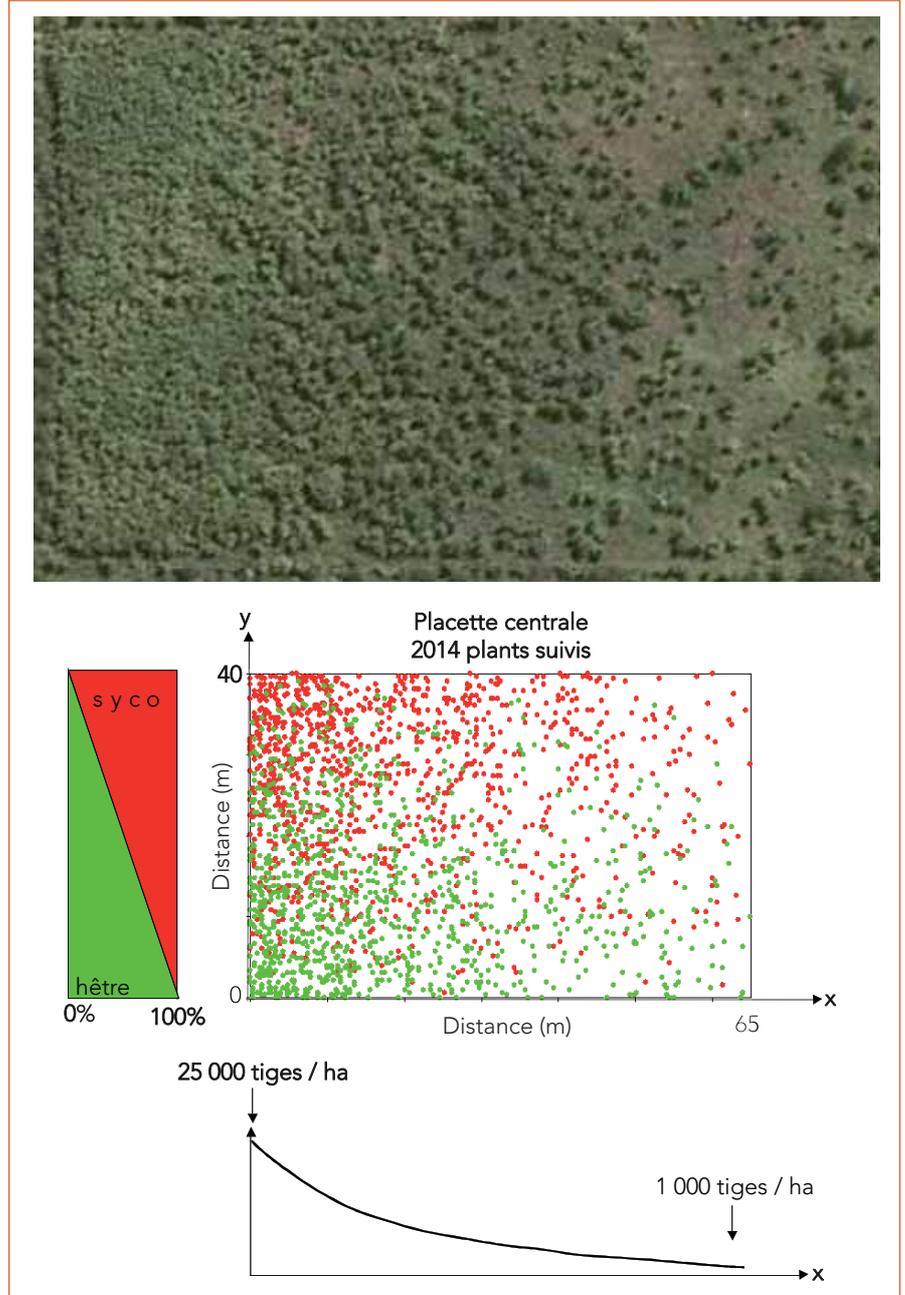


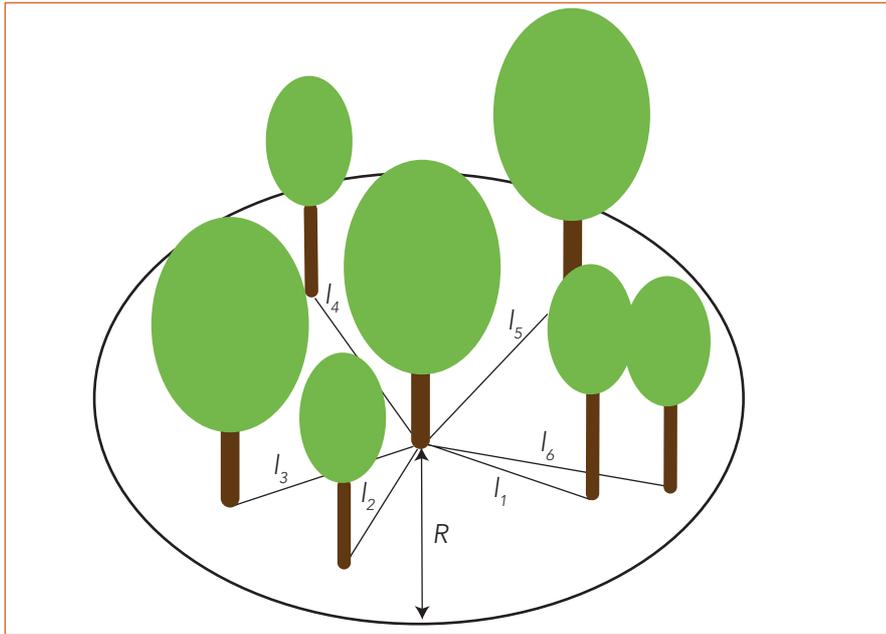
Fig. 3 : plan du dispositif double clinal aléatoire en forêt de Haye (Lorraine) avec une variation linéaire du mélange en ordonnée et une variation hyperbolique de la densité en abscisse.

de hauteur et de circonférence et des mesures plus ambitieuses sur la branchaison sont prévues dans le cadre d'une thèse menée à l'INRA (LERFoB).

### ... qui répondra à diverses questions scientifiques et de gestion

Une question scientifique importante à laquelle le dispositif du

double clinal peut répondre est celle de la quantification de l'influence de la compétition (densité, espèce) sur le développement des houppiers des semis de hêtre et d'érable (élagage naturel, croissance latérale des branches) et, en corollaire, le degré de détail nécessaire pour évaluer la croissance des tiges en situation de



$$IC_{12} = \frac{1}{D} \left( \frac{D_1}{l_1} + \frac{D_2}{l_2} + \frac{D_3}{l_3} + \frac{D_4}{l_4} + \frac{D_5}{l_5} + \frac{D_6}{l_6} \right)$$

Fig. 4 : exemple d'indice de compétition (indice d'Hegyi, 1974).

Cet indice se calcule sur une placette de rayon R (en général 8 à 12 m) centrée sur la tige cible. On a  $IC_R = 1/D \sum_{i=1}^n D_i/l_i$  avec D le diamètre de la tige cible,  $D_i$  le diamètre du voisin i et  $l_i$  la distance entre ce voisin et la tige cible. Cet indice de compétition, qui possède de nombreuses variantes, est utilisé pour prédire la croissance de tiges en peuplement régulier.

compétition. Les indices de compétition (voir exemple figure 4) sont couramment employés, avec plus ou moins de succès, pour prédire la croissance radiale des individus. L'efficacité de ces indices pourra être évaluée en situation de mélange et on pourra proposer la construction de nouveaux indices plus performants. Les apports pour la gestion portent essentiellement sur une meilleure connaissance des relations de compétition entre deux espèces supposées cohabiter à l'état climacique (Peters 1997). Cela devrait permettre de déterminer les stades de développement, les densités et les types de mélanges (intime ou par bouquets) nécessitant des interventions (dépressage en plein, dépressage ciblé, détouillage) au profit de l'une ou l'autre des espèces. Les études envisagées sur le dispositif visent également à alimenter des modèles de croissance qui pourront simuler

des interventions sylvicoles (ex. élagages) aidant ainsi à la mise en place de futurs itinéraires de travaux techniques et sylvicoles dans les peuplements mélangés.

### Exemple de résultat

La figure 5 illustre un premier résultat obtenu en divisant la placette du double clinal en 25 secteurs, ce qui permet de calculer la moyenne et l'écart type des diamètres des tiges pour cinq densités et cinq types de mélanges différents. Outre le résultat classique de la diminution du diamètre moyen en fonction de la densité, on observe clairement une augmentation de ce diamètre, lorsque la proportion de plants d'érable augmente. S'il est encore trop tôt pour en tirer des conclusions, en particulier pour identifier les mécanismes mis en cause, cela indique en tout cas une différenciation de la croissance des espèces en fonction de la composition de leur voisinage.

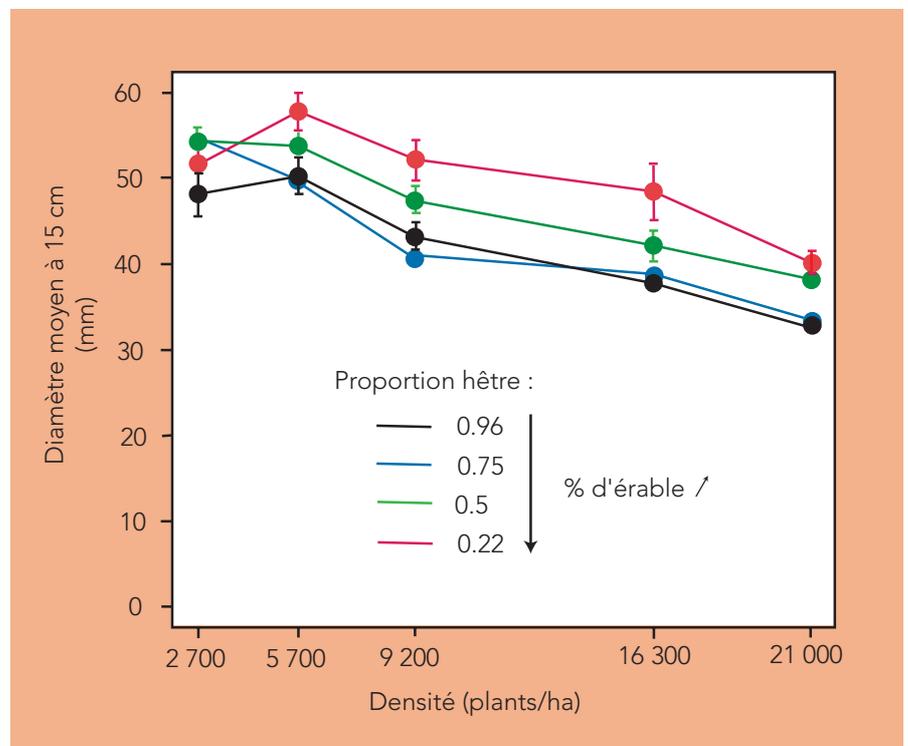


Fig. 5 : relation entre la densité de plants et le diamètre moyen à 15 cm de hauteur des plants de hêtre selon la proportion d'érable dans le voisinage

## Intérêt de l'approche expérimentale comparée à la simple observation de mélanges naturels existants

Dans le domaine de la recherche, il est classique d'opposer, pour faire simple, trois approches quantitatives : une approche par observation ou descriptive, une approche par observations structurées et une approche par expérimentation. L'approche par simple observation consiste à déterminer ou estimer une grandeur (ex. surface terrière) en un lieu donné à un moment donné sans en attendre de généralisation. On citera, par exemple, le cas d'une estimation de la densité de régénération d'une parcelle par la mise en place de placettes. Cette estimation de la densité ne saurait, sans autre information, donner une quelconque idée de la densité de semis de parcelles en régénération voisines. L'approche par observations structurées consiste à réaliser des estimations de grandeurs en vue de comparer des objets, par exemple comparer le taux de mélange de peuplements de même âge d'une même région soumis dans le passé à des types de gestion contrastés. L'avantage des observations structurées est qu'elles permettent une meilleure généralisation des résultats sans toutefois pouvoir mettre en évidence de réels liens de cause à effet entre facteurs. Dans notre exemple on ne pourrait ainsi affirmer qu'une différence significative observée entre les deux ensembles de peuplements serait due aux différences constatées entre les sylvicultures pratiquées. L'apport fondamental de l'approche expérimentale, méthode scientifique consistant à tester par des expériences répétées la validité d'une hypothèse, est qu'elle permet justement de mettre en évidence des relations causales. Dans le cas du double cli-



Yann Dumas, Cemagref Nogent

nal, les effets de la densité et du mélange sur l'élagage naturel des tiges de hêtre et d'érable pourront ainsi être distingués et quantifiés.

### La modélisation des mélanges chêne sessile - pin sylvestre dans la région Centre

#### Deux projets pour comprendre la dynamique de peuplements à structure complexe

En France, les formations mélangées chêne sessile — pin sylvestre (au sens de l'IFN : aucune des essences ne forme plus de 75 % du couvert relatif) occupent un peu plus de 50 000 ha, principalement dans la région Centre. Les structures, héritées d'anciens taillis-sous-futaie enrichis en pin sylvestre, se révèlent aujourd'hui très diversifiées, tant au niveau des dimensions des arbres (diamètres, hauteurs) qu'à celui du mélange. Les connaissances sur la dynamique de ces mélanges sont fragmentaires, posant de grandes difficultés pour leur gestion. Quelle est la pérennité de

ces mélanges ? Quels sont les traitements adaptés ? Quels itinéraires doivent être appliqués ? Ces questions ont été traduites dans un projet scientifique de recherche par l'équipe « Sylviculture et modélisation » du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson. Le massif de Lorris de la forêt domaniale d'Orléans représente leur principal support d'étude. Le dernier aménagement du massif prévoit la création d'une série expérimentale ayant pour objectif l'amélioration des connaissances sur la dynamique des peuplements hétérogènes en fonction des sylvicultures appliquées. Par ailleurs, l'aménagement a individualisé un groupe d'amélioration A3 de 1 300 ha constitué des peuplements mélangés chêne sessile — pin sylvestre avec l'objectif de maintenir autant que faire se peut ce mélange. La voie d'étude privilégiée par cette équipe est celle de la modélisation avec l'émergence en particulier de deux projets de thèse plus ou moins avancés : (i) la construction d'un modèle de structure per-

mettant de simuler de manière réaliste des peuplements complexes à partir de données simples de peuplements, (ii) l'élaboration d'une famille de modèles à différentes échelles adaptés aux peuplements mélangés chêne-pin de la région Centre. Outre ces thèses, l'équipe a installé et suit un réseau de dispositifs et a engagé des études de la régénération sous couvert selon les niveaux de lumière et de concurrence des arbres et de la végétation.

Le premier projet de thèse sur la typologie de structure et le modèle de structure consiste à élaborer un ensemble de règles sur la structure en taille, le mélange et la structure spatiale, qui permettent le passage de données agrégées d'un peuplement réel (par ex. surface terrière, nombre de tiges par essence et type spatial) à un peuplement virtuel qui lui est proche. Ce peuplement virtuel pourra ensuite servir d'état initial dans le cadre d'une simulation informatique d'évolution du peuplement. L'objectif du deuxième projet est de déterminer l'échelle de modélisation la plus pertinente pour simuler la croissance des peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre. La question de

l'échelle est importante mais se révèle délicate à traiter (voir encadré), sachant que l'objectif est de fournir au gestionnaire un outil simple, offrant un bon support pour l'élaboration d'un guide de sylviculture ou pour la prédiction de production. La calibration des modèles est effectuée à partir de l'analyse de carottes de sondage prélevées sur des arbres choisis en fonction de leur stade de développement et leur situation de compétition.

### Quelques résultats sur les mélanges chêne sessile – pin sylvestre

Les données de croissance obtenues par sondage ont servi à construire un premier modèle "arbre dépendant des distances" (voir encadré). Ce modèle a permis de préciser les interactions intra et interspécifiques dans ce mélange. Ainsi, les premiers résultats montrent que les pins entourés de pins ont eu une croissance plus faible que les pins entourés de chênes. La figure 6 donne un exemple de résultat obtenu sur un dispositif d'un hectare. On peut notamment remarquer que, pour une même circonférence, le chêne et le pin ont pratiquement les mêmes accroissements en surface terrière.

Le modèle de croissance a été intégré dans la plateforme ou logiciel CAPSIS et des simulations sont désormais envisageables. Par exemple, il est possible d'estimer pour les 10 ans à venir la production totale en surface terrière des dispositifs étudiés et de répartir cette production entre le chêne et le pin. Il est également possible dans certains cas d'estimer le temps au bout duquel le pin aura atteint un diamètre exploitable. Cependant, le domaine d'utilisation de cet outil est encore limité en particulier parce qu'il a été construit dans une gamme de fertilité restreinte. Des données récoltées en 2007 dans 5 nouveaux dispositifs devraient permettre de mieux prendre en compte ce facteur.

### Pourquoi des modèles ?

Selon Coquillard et Hill (1997), un modèle est tout simplement « une abstraction qui simplifie le système réel étudié ». Les modèles présentent l'avantage de rassembler les connaissances réunies autour d'un système (ex. un peuplement) en une structure organisée, raisonnée, simplifiée. Cette structuration est nécessaire pour appréhender les systèmes complexes (le cas de la forêt) où les objets et leurs interactions sont multiples, les dynamiques

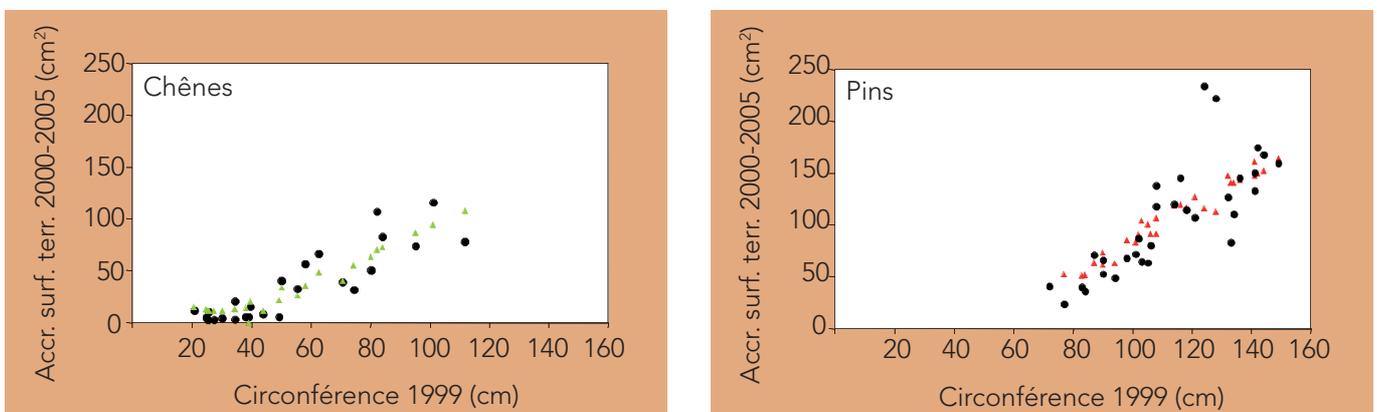
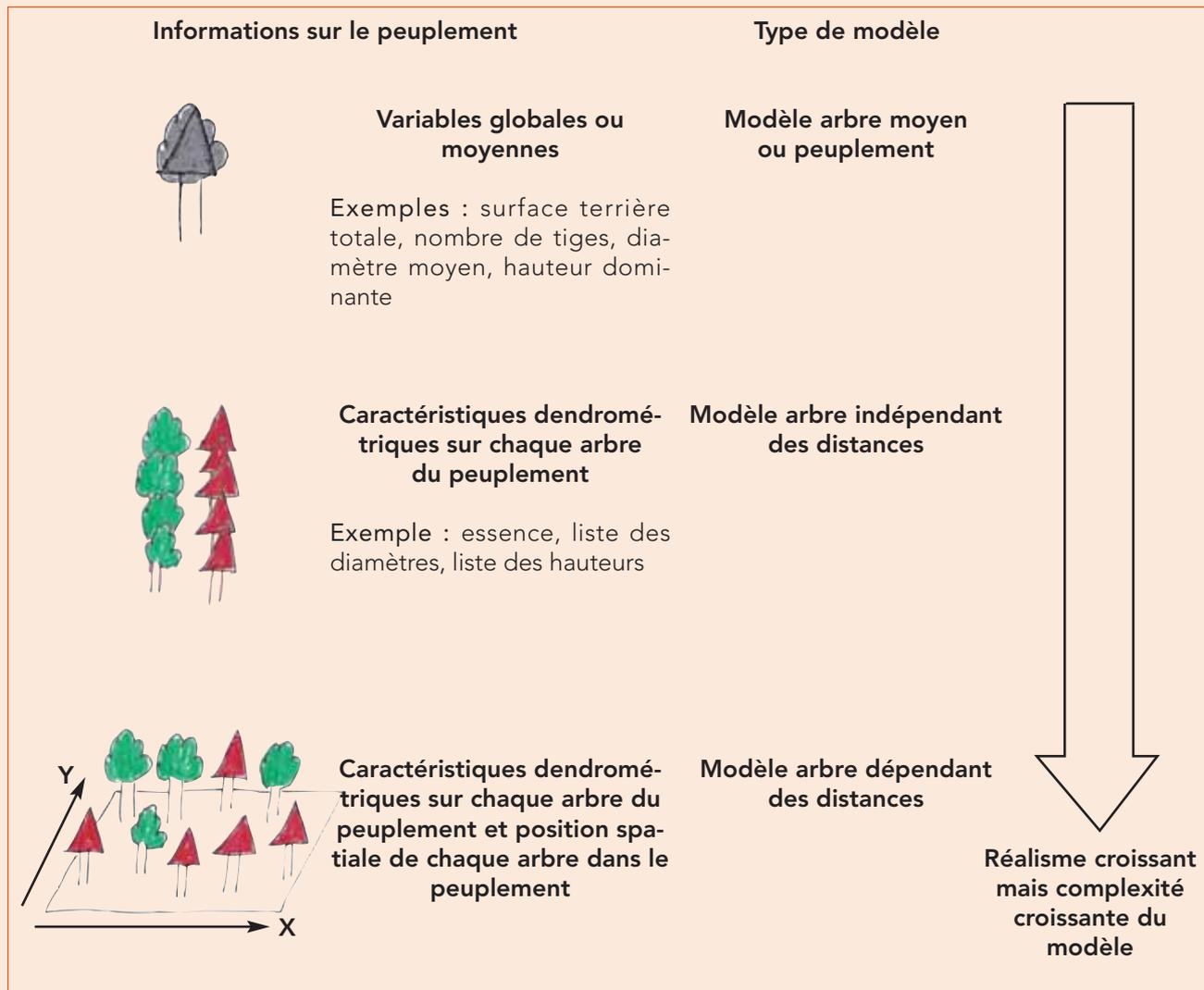


Fig. 6 : données observées et données prédites par le modèle « arbre dépendant des distances » sur un dispositif. Les points noirs sont les données observées et les points en couleur sont les données prédites

Niveaux de détail des modèles de croissance forestiers



Présentation de trois grands types de modèles forestiers d'après Houllier et al. (1991) ayant des niveaux de détail différents

Comme le montre la figure, les modèles de croissance forestiers peuvent être plus ou moins détaillés. Chaque type de modèle offre des avantages et des inconvénients. Par exemple, les modèles de type « peuplement » utilisent des données facilement accessibles aux gestionnaires pour prédire la croissance et la production mais ne permettent pas de tester des sylvicultures d'arbre. Les modèles de type « arbre dépendant des distances », quant à eux, permettent de prendre en compte de façon fine les interactions intra et interspécifiques mais utilisent des informations sur le peuplement très contraignantes pour une utilisation dans un cadre de gestion. Le choix du niveau de détail d'un modèle dont l'objectif est l'aide à la gestion résulte donc d'un compromis entre sa possibilité d'utilisation par le gestionnaire et sa capacité à rendre compte des phénomènes de croissance et de dynamique de façon réaliste.

Dans l'objectif de rechercher ce compromis, l'équipe du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson a commencé la construction d'une série de modèles simplifiés ayant différents niveaux de détail. Ces modèles seront comparés à la fois sur des critères de précision des prédictions et sur des critères d'utilisation des modèles qui seront définis en collaboration avec les gestionnaires.

lentes, rendant l'expérimentation parfois délicate. Les modèles permettent de mettre en évidence des propriétés émergentes - le tout n'est pas la somme des parties -, de révéler des carences dans nos connaissances et de proposer de nouvelles hypothèses. Ils sont donc particulièrement utiles dans le domaine scientifique. Dans le domaine de la gestion forestière, les modèles de croissance sont intégrés dans des simulateurs de croissance réunis pour la plupart au sein de la plateforme logicielle CAPSIS (de Coligny *et al.* 2003). Dans le cas de peuplements réguliers monospécifiques, ils permettent de tester l'effet d'interventions sylvicoles sur la production, la qualité et la croissance des peuplements (Goreaud *et al.* 2005). Un certain nombre d'entre eux permettent de simuler la dynamique de peuplements mélangés (SimCAP, SAMSARA, VENTOUX). Les modèles permettent également de réaliser des expérimentations virtuelles (ex. application de détournages dans des simulations) pour peu que les interventions simulées soient cohérentes avec les domaines de validité des modèles construits.

## Conclusions

À partir de trois études différentes menées en forêts mélangées et/ou irrégulières, nous venons d'illustrer trois approches différentes. Ces approches, qui ne sont pas forcément spécifiques aux forêts hétérogènes, sont complémentaires, les unes favorisant la mise en évidence de relations causales, la mise en évidence de différences ou de relations spécifiques entre objets, d'autres permettant de réaliser une synthèse des connaissances pour dégager des propriétés et réaliser des expérimentations virtuelles. Pour être pleinement effi-

cace, la modélisation, qui se révèle particulièrement intéressante pour appréhender la complexité des forêts hétérogènes, doit s'adosser aux approches expérimentales et descriptives. Notre capacité à élaborer des interventions pertinentes pour la gestion des mélanges ou la gestion des futaies irrégulières dépendra en grande partie de notre volonté de mettre en place un réseau cohérent d'essais et d'études en vue de la construction de futures générations de modèles de croissance et de dynamique de forêts hétérogènes.

**Thomas CORDONNIER**

ONF, DTech-Recherche

**Christian GINISTY**

Cemagref, UR Écosystèmes forestiers  
Nogent-sur-Vernisson

**François NINGRE**

LERFoB, Équipe Croissance —  
Production  
INRA Champenoux

**Thomas PÉROT**

Cemagref, UR Écosystèmes forestiers  
Nogent-sur-Vernisson

**Alexandre PIBOULE**

ONF, DT Lorraine  
Service patrimonial

**Isabelle VINKLER**

LERFoB, Équipe Croissance —  
Production  
INRA Champenoux

## Bibliographie

COQUILLARD P., HILL D.R.C., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Paris : Masson. 273 p.

PETERS R., 1997. Beech forests. Coll. « Geobotany », n° 24. Londres : Kluwer Academic Publishers. 169 p.

HEGYI F., 1974. A simulation model for managing Jack-pine stands. In Growth Models for Tree and Stand Simulation (J. Fries, ed.) Stockholm : Royal College of Forestry, Research note, n° 30, pp. 74-90

HOULLIER F., BOUCHON J., BIROT Y., 1991. Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. Revue Forestière Française, vol. 43, n° 2, pp. 91-102

DE COLIGNY F., ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-FLEURY S., MEREDIEU C., SAINT-ANDRÉ L., 2003. CAPSIS : Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture : advantages of a shared forest-modelling platform. In Modelling forest systems (Amaro A., Reed D. and Soares P., eds). Wallingford : CABI Publishing, pp. 319-323. Relativity, models and parameters estimation — the forestry scenario, 2-5/06/2002, Sesimbra, Portugal.

GOREAUD F., DE COLIGNY F., COURBAUD B., DHOTE J.F., DREYFUS P., PÉROT T., 2005. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. Vertigo, vol. 6, n° 2, 12 p.