



**HAL**  
open science

# Quels dispositifs pour comparer la croissance des peuplements purs et mélangés ? Exemple du mélange sapin-épicéa avec les données de l'Inventaire forestier national

P. Vallet, Thomas Perot, M. Toïgo

## ► To cite this version:

P. Vallet, Thomas Perot, M. Toïgo. Quels dispositifs pour comparer la croissance des peuplements purs et mélangés ? Exemple du mélange sapin-épicéa avec les données de l'Inventaire forestier national. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2015, 47, pp.54-59. hal-01281078

**HAL Id: hal-01281078**

**<https://hal.science/hal-01281078>**

Submitted on 1 Mar 2016

**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.

# Quels dispositifs pour comparer la croissance des peuplements purs et mélangés ?

## Exemple du mélange sapin-épicéa avec les données de l'Inventaire forestier national

Malgré l'importance et l'intérêt des peuplements mélangés, leur fonctionnement reste largement méconnu car la tâche est immense, ne serait-ce qu'en raison de la multiplicité des assemblages d'espèces. Ici les auteurs s'intéressent à la croissance : ils récapitulent les types de dispositifs qui permettent l'étude des peuplements mélangés et montrent l'intérêt des données de l'inventaire national pour caractériser, grâce à une méthode originale de modélisation, l'effet du mélange sur la croissance des espèces concernées. De là naissent des hypothèses de mécanismes, que l'expérimentation permet d'approfondir.

**D**'après les résultats de l'inventaire forestier de l'IGN portant sur les campagnes d'inventaire de 2008 à 2012, les peuplements forestiers mélangés représentent 53 % des forêts françaises de production. Le mélange d'essences est intéressant à différents égards : aspects sanitaires, support de biodiversité ou encore production de bois.

La résistance accrue des peuplements mélangés aux attaques d'insectes ravageurs par rapport aux peuplements purs est désormais avérée (Jactel et Brockerhoff 2007) en particulier face à des attaques d'insectes oligophages. Lors de ces attaques, des mécanismes de compensation de croissance peuvent exister entre l'espèce attaquée et celle qui ne l'est pas (Perot *et al.* 2013). Ensuite, les peuplements mélangés peuvent *a priori* supporter une plus grande diversité de microhabitats, et sont donc susceptibles d'accueillir une diversité plus importante d'espèces végétales ou animales. Enfin, dans certaines conditions, le mélange d'essences peut également s'avérer plus productif que les peuplements purs.

Cependant les résultats de recherche sur la croissance et la productivité des peuplements mélangés sont encore très lacunaires. Il est donc nécessaire d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement et la modélisation des écosystèmes forestiers mélangés, pour les différents types d'assemblages d'espèces. Or, dans le domaine forestier, les expérimentations sur la croissance

sont difficiles à mener car les interactions sont complexes et il faut de nombreuses années pour obtenir des résultats. L'utilisation des données de l'inventaire forestier de l'IGN offre une alternative pour combler certaines lacunes concernant les interactions entre espèces forestières et leurs impacts sur la productivité.

Après avoir donné une vue d'ensemble des grands types de dispositifs permettant d'étudier les peuplements mélangés, cet article présente une méthodologie développée spécifiquement pour les données de l'inventaire forestier de l'IGN. Adaptée aux mélanges à deux espèces, cette méthodologie s'appuie sur la comparaison de la croissance en surface terrière des essences dans les peuplements purs et mélangés.

### Quels dispositifs pour étudier la croissance des peuplements mélangés ?

Les dispositifs existants pour étudier le fonctionnement des forêts mélangées, ou plus spécifiquement leur croissance, peuvent se classer en plusieurs types en fonction du niveau de contrôle des facteurs étudiés. D'un côté figurent les expérimentations, avec d'une part les dispositifs *ex situ* en milieux contrôlés, et d'autre part les suivis de réseaux de placettes permanentes *in situ*; de l'autre côté figurent les réseaux de placettes d'observation de l'existant, comme les données de l'inventaire forestier de l'IGN. Leurs intérêts sont différents et complémentaires.

### Les dispositifs expérimentaux *ex situ*

Dans les dispositifs expérimentaux *ex situ*, les facteurs influençant la croissance sont fortement contrôlés. Idéalement, les conditions de croissance sont identiques d'une modalité à une autre, à l'exception des facteurs dont l'influence est étudiée. Par exemple, pour l'étude des effets du mélange, des semis peuvent être plantés sur des terrains nus et homogénéisés, selon des modalités de mélange différentes : pur d'une espèce, pur de l'autre espèce, et diverses proportions de mélange. C'est notamment le but du dispositif ORPHEE installé par l'INRA de Bordeaux, dont l'objectif principal est l'analyse à long terme de la relation entre biodiversité et fonctionnement des forêts dans un environnement changeant. Ce type d'expérimentation permet d'aborder des problématiques complexes, comme le rôle de la diversité des essences forestières dans le maintien des fonctions écologiques des forêts soumises au changement climatique. Une autre démarche pourrait consister à découpler sous serre l'effet du climat et l'effet du mélange sur la croissance des végétaux grâce au contrôle total des précipitations, des températures, du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique, etc. Cependant, s'il est aisé de mener de telles expérimentations sur des semis forestiers, il est nettement plus délicat d'en piloter sur des arbres adultes. Or la question de l'effet du changement climatique sur les peuplements adultes est au moins aussi importante qu'au stade des semis.

### Les suivis de réseaux de placettes permanentes *in situ*

Une autre source de données sur la croissance des peuplements forestiers provient du suivi de réseaux *in situ*. Il s'agit dans ce cas de dispositifs expérimentaux installés dans des peuplements forestiers afin de suivre l'effet d'un facteur donné, comme l'effet de l'intensité de la sylviculture ou l'effet du mélange

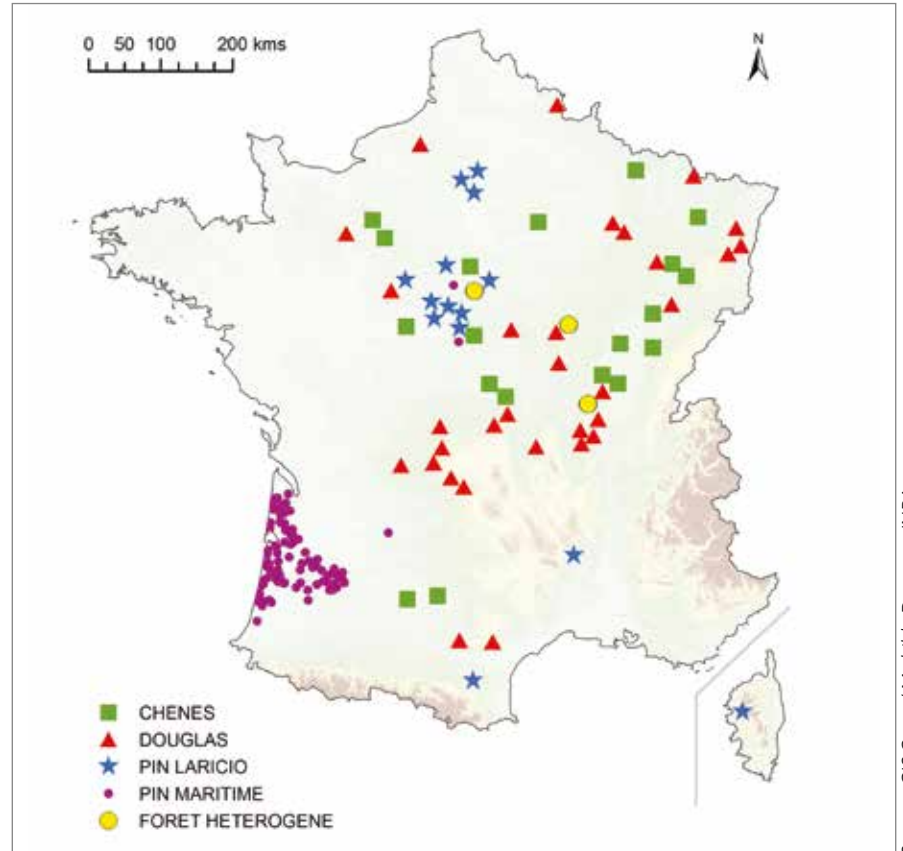


Fig. 1 : le réseau de placettes permanentes *in situ* du GIS « coopératives de données sur la croissance des peuplements forestiers ». Le groupe consacré aux forêts hétérogènes ne compte encore que 3 sites installés

sur la croissance, sur tout ou partie du cycle forestier. Un des meilleurs exemples en France pour l'étude des effets de la sylviculture sur la croissance est le Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « Coopérative de Données », qui rassemble aussi bien des gestionnaires que des instituts de recherche. Ce GIS a pour but de suivre sur le long terme la croissance de peuplements soumis à différents niveaux de densité. Quatre essences majeures de production sont étudiées en peuplements purs : le chêne sessile, le pin laricio, le pin maritime et le douglas. Un cinquième groupe d'étude est consacré aux forêts hétérogènes, mais ne dispose que de 3 sites installés en 2012-2013 (figure 1) : deux en plantation sur la comparaison des modalités pures et mélangées de douglas vert et mélèze hybride, le troisième concernant des peuplements constitués de chêne

sessile et pin sylvestre, dans le cadre du dispositif OPTMix (Korboulewski *et al.*, ce numéro). C'est la mutualisation des efforts entre les différents acteurs forestiers qui a rendu possible l'existence de ce réseau qui compte aujourd'hui 178 sites pour 1 154 placettes de mesure, mais qui ne donnera des résultats que sur le long terme.

Pour l'installation de ces réseaux de placettes, une des difficultés principales est de s'assurer que les différentes modalités sylvicoles sont sur des stations comparables. Cette difficulté est particulièrement forte dans le cas des peuplements mélangés adultes. Il n'y a que deux méthodes possibles d'y installer un réseau de placettes permanentes dans le cadre de l'étude des peuplements mélangés. La première consiste à générer les modalités

expérimentales par éclaircie d'un peuplement mélangé existant. Par exemple, à partir d'un peuplement à deux essences, on supprimera une essence sur un tiers du peuplement, on supprimera l'autre sur le deuxième tiers, et on conservera un mélange équilibré des deux essences sur le troisième tiers. Cette méthode présente l'avantage d'avoir des conditions environnementales homogènes entre les modalités. Cependant elle compte plusieurs inconvénients : tout d'abord, plusieurs éclaircies sont en général nécessaires pour atteindre les niveaux de mélange ou de pureté souhaités, ce qui impose une installation longue, sur plusieurs années. Ensuite, l'historique du peuplement peut induire des arrière-effets, en particulier au niveau du sol, qui pourraient fausser les résultats concernant l'effet de la composition. Enfin, il est difficile de trouver les grandes surfaces homogènes de peuplements mélangés qui sont requises. La deuxième méthode consiste à choisir des parcelles forestières différentes selon les modalités. Par exemple, toujours dans le cas d'un mélange à deux espèces, le dispositif s'étend sur trois parcelles : une en peuplement pur d'une espèce, une en peuplement pur de la deuxième espèce, et la troisième en peuplement mélangé des deux espèces. Les avantages et inconvénients de cette deuxième méthode sont opposés à ceux de la première. L'étude de l'effet du mélange peut se faire dès l'installation, et il n'y a pas d'arrière-effets liés à un changement de composition du peuplement. En revanche, il est difficile de contrôler l'ensemble des facteurs environnementaux ou sylvicoles qui influent sur la croissance : le type de sol, l'âge des peuplements, la densité, et l'historique de gestion.

La première méthode est plus adaptée au contexte montagnard, où l'altitude est un facteur supplémentaire à contrôler et rend quasiment impossible la deuxième méthode, qui est plus adaptée aux situations de plaine où des situations compa-

rables peuvent être trouvées dans les grands massifs forestiers. Le dispositif OPTMix (Oak Pine Tree Mixture), qui vient d'être installé en forêt domaniale d'Orléans par le centre Irstea de Nogent-sur-Vernisson, permettra d'étudier le mélange chêne sessile – pin sylvestre au stade adulte, et relève de cette deuxième méthode. Contrairement aux données de certains dispositifs *ex situ*, le suivi de réseau de placettes permanentes *in situ* ne permet généralement pas de contrôler les facteurs climatiques, mais peut s'appuyer sur les variations annuelles du climat pour tenter d'en appréhender les effets. Il peut y avoir des exceptions, comme le site expérimental de Puechabon, où sur une partie d'une yeuseraie, 33 % des eaux de pluies sont exclues grâce à la mise en place de gouttières sous la canopée.

La lourdeur de mise en place et de gestion des suivis des placettes permanentes ne permet malheureusement pas de dupliquer ce type d'expérimentation pour de nombreuses espèces et pour de nombreux facteurs, ce qui serait nécessaire pour répondre aux interrogations pratiques sur le changement climatique.

### Les réseaux de placettes d'observation

Pour élargir la palette des mélanges étudiés, il est possible d'utiliser des données dites d'observation. Il s'agit de données provenant de mesures effectuées sur des peuplements forestiers sans objectif de suivi à moyen ou long terme des peuplements d'où elles proviennent. Les données de l'inventaire forestier de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), qui mesure l'accroissement radial des arbres échantillonnés par micro-carottage, en font partie. L'intérêt majeur de ce type de réseau est le grand nombre de données disponibles, dans des conditions environnementales et sylvicoles variées. En effet, lors des campagnes 2005 à 2012 (données nouvelle méthode

de l'inventaire forestier), 555 450 arbres ont été mesurés par l'IGN, sur 53 583 placettes réparties de manière systématique sur tout le territoire métropolitain. À l'échelle nationale, l'étendue des observations disponibles pour l'étude des peuplements mélangés est sans équivalent, mais nécessite des méthodologies rigoureuses de sous-sélection de données et de modélisation pour compenser l'absence du contrôle des conditions environnementales qu'apportent les autres types de données. La suite de cet article présente, en s'appuyant sur le mélange sapin – épicéa, une méthodologie spécifiquement développée pour l'étude de la croissance des peuplements mélangés à deux espèces à partir des données de l'inventaire forestier de l'IGN.

### Modélisation de la croissance du mélange sapin-épicéa avec les données de l'inventaire forestier de l'IGN

Les résultats sur le mélange sapin – épicéa présentés ci-dessous proviennent de travaux menés dans le cadre d'une convention entre l'Office National des Forêts et le centre Irstea de Nogent-sur-Vernisson. La méthodologie a été publiée en détails dans un article de *Journal of Vegetation Science* (Vallet et Perot 2011). Les résultats présentés dans cet article ont été complétés dans le cadre d'une thèse démarrée à l'automne 2011, également soutenue par l'ONF, et portent sur les campagnes 2006 à 2010 de l'IGN.

### Une étape importante, la sélection des données

La base de données IGN concerne l'ensemble de la ressource forestière française. Les données par placette incluent les mesures dendrométriques individuelles (essence, circonférence à 1,30 m, accroissement radial sur les 5 dernières années, hauteur totale) mais aussi des descripteurs du peuplement environnant (notamment la structure), et du contexte écologique (flore, pente, caractéristiques du sol...).



Pour l'étude d'un cas particulier, une sous-sélection de placettes est nécessaire. Pour l'étude de la croissance du mélange sapin – épicéa, trois critères principaux de sélection ont été définis pour contrôler la composition, la distribution géographique et la structure des peuplements.

■ **Critères de composition** – Pour comparer la croissance des espèces en peuplement mélangé et en peuplements purs, trois sous-ensembles de données sont nécessaires : une base correspondant aux peuplements purs de sapins, une autre aux peuplements purs d'épicéas, et une troisième correspondant au mélange de ces deux espèces. Les placettes retenues pour les peuplements purs sont celles pour lesquelles 100 % de la surface terrière des arbres échantillonnés par l'IGN sont de l'essence considérée. Les placettes mélangées sont celles pour lesquelles la somme des surfaces terrières du sapin et de l'épicéa représente au minimum 80 % de la surface terrière de la placette. De plus la surface terrière des autres essences ne dépasse pas celle du sapin ou de l'épicéa. Ces contraintes pour les peuplements mélangés permettent d'obtenir un nombre de placettes suffisant pour analyser la croissance, tout en s'assurant d'avoir principalement les effets des essences étudiées.

■ **Critères géographiques** – Les placettes retenues pour l'étude sont choisies dans des zones géographiques identiques pour les trois compositions (sapin pur, épicéa pur ou mélange des deux essences). Par exemple, nous excluons les Pyrénées dans lesquelles le sapin est présent, mais l'épicéa assez peu, surtout en peuplements purs. Cette précaution permet d'éviter de trop grands écarts dans les conditions de croissance des peuplements purs ou mélangés et donc d'éviter de confondre un effet de la composition des peuplements avec l'effet d'autres facteurs. Cette sélection géographique se base sur le découpage du territoire en « grandes

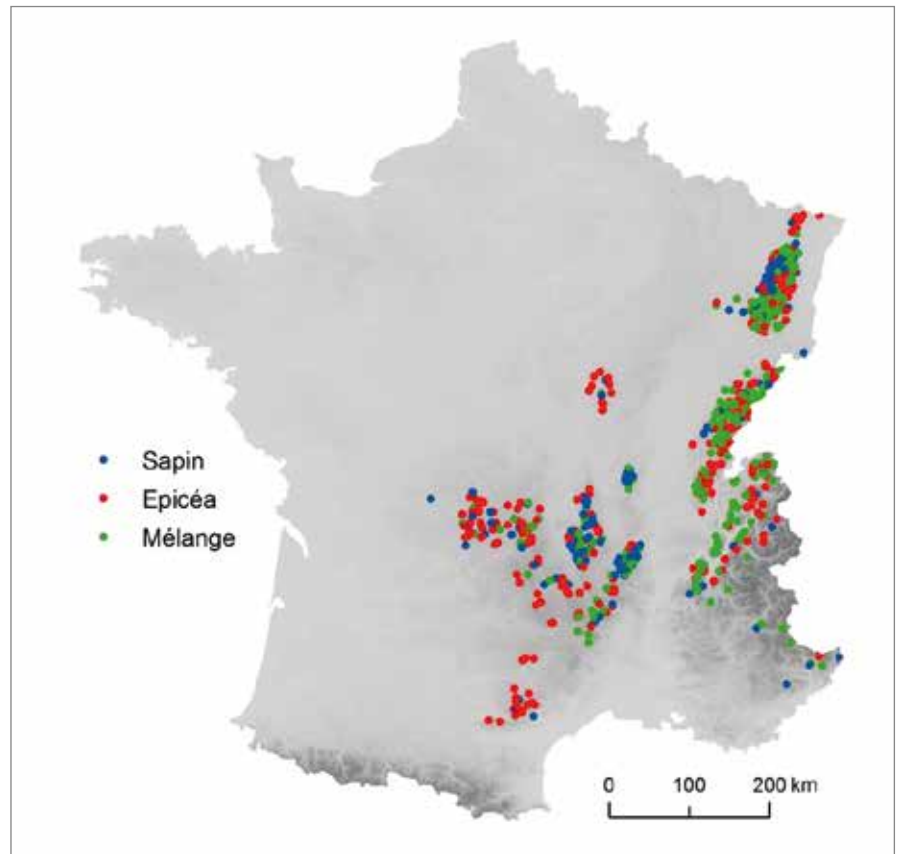


Fig. 2 : répartition des 727 points de l'étude sur les quatre massifs montagneux

régions écologiques » (GRECO) produit par l'IGN (IFN 2011). Pour le couple sapin – épicéa, nous avons retenu les GRECO correspondants aux Vosges, au Jura, aux Alpes, et au Massif Central.

■ **Critères de structure du peuplement** – Enfin, pour éviter les erreurs liées à une structure verticale des peuplements qui pourrait être différente en moyenne entre les peuplements purs et les peuplements mélangés, seules les placettes classées dans la catégorie « futaie régulière » de l'IGN sont retenues. Par ailleurs, nous avons également exclu les placettes ayant subi des coupes dans les 5 dernières années, ce qui fausserait la mesure de l'accroissement en surface terrière. En effet, la contribution sur 5 ans à la croissance en surface terrière des arbres éclaircis en cours de période n'est alors pas comptabilisée.

Au final, l'application de l'ensemble de ces critères conduit à une sélection de 727 placettes parmi les campagnes 2006 à 2010 de l'IGN : 172 placettes de sapin pur, 263 d'épicéa pur, et 292 en mélange (figure 2).

#### **La modélisation pour comparer peuplements purs et peuplements mélangés « toutes choses étant égales par ailleurs »**

Malgré le soin apporté à la sélection des placettes, l'ensemble des facteurs influençant la croissance des peuplements n'est pas encore pris en compte. En effet, la croissance en surface terrière est dépendante des conditions du milieu, de la sylviculture, ou bien du stade de développement. Les trois bases construites à partir des données de l'IGN, reflétant l'état de la ressource, ne sont pas homogènes par rapport à ces facteurs. La modélisation permet de pallier cette difficulté, et de décorréler

l'effet du mélange des effets de ces facteurs, c'est-à-dire de comparer la croissance en peuplement pur et en peuplement mélangé toutes choses étant égales par ailleurs.

## Le principe de la démarche

Il s'agit dans un premier temps de modéliser la croissance en surface terrière au niveau peuplement pour le sapin et l'épicéa en peuplement pur, avec pour chacune des deux essences un modèle de type potentiel – réducteurs (cf. équation 1 en encadré). Le potentiel est une fonction des variables écologiques pertinentes pour l'essence considérée, complétées par les données climatiques issues du modèle Aurélhy de Météofrance. Les réducteurs permettent de prendre en compte les effets de la sylviculture (fonction d'un indice de densité) et du stade de développement (fonction du diamètre quadratique moyen). Les paramètres de ce modèle sont ajustés sur les données de la base de peuplements purs de l'essence correspondante. Ainsi construit, le modèle prédit la croissance des peuplements purs sur les 5 dernières années.

Pour appréhender l'effet du mélange, on compare ensuite la croissance observée de l'espèce en mélange à la croissance qu'elle aurait si elle

poussait en peuplement pur dans les mêmes conditions environnementales et sylvicoles. Pour ce faire, on procède en deux étapes : (1) on utilise le modèle développé précédemment pour prédire ce que serait cette croissance en peuplement pur, rapportée à la proportion de l'espèce dans le peuplement ; (2) on compare cette croissance estimée à la croissance observée (réelle) dans le peuplement mélangé. Elle diffère alors d'une petite variation qui traduit l'effet du mélange recherché.

$$[\text{éq. 2}] \quad \frac{\Delta G_{\text{observé}}}{\Delta G_{\text{estimé}}} = (1 + u)$$

où  $\Delta G_{\text{observé}}$  est l'accroissement en surface terrière réel mesuré sur la placette,  $\Delta G_{\text{estimé}}$  est l'accroissement en surface terrière prédit par le modèle en peuplement pur, et  $u$  la variation liée à l'effet du mélange. Lorsqu'il n'y a pas d'effet du mélange,  $u = 0$ , et  $\Delta G_{\text{observé}} = \Delta G_{\text{estimé}}$ . Cette variation  $u$  est relative, c'est-à-dire qu'elle correspond à un pourcentage d'augmentation ou de diminution de la croissance en peuplement mélangé par rapport aux peuplements purs. Cet effet du mélange dépend lui-même de la proportion de l'espèce, et peut varier suivant les conditions environnementales. Plus de détails sont fournis

dans l'article de Vallet et Perot (2011). Cette démarche de modélisation permet d'isoler l'effet du mélange des autres facteurs influençant la croissance.

## Résultats sur l'effet du mélange dans le couple sapin – épicéa

L'analyse de la croissance du mélange sapin – épicéa pour les quatre massifs montagneux Vosges, Jura, Alpes et Massif Central a révélé un effet en moyenne positif du mélange sur la croissance en surface terrière du sapin de l'ordre de +15 % pour un peuplement équilibré entre les deux essences (proportion de 50 % en surface terrière). En revanche, il n'y a pas d'effet significatif sur la croissance de l'épicéa.

Cet effet est en réalité modulé par les conditions du milieu. Les premiers résultats indiquent que moins la station est productive, plus l'effet du mélange est élevé. Ainsi, l'effet peut en moyenne se différencier pour les quatre massifs montagneux, avec en particulier un effet mélange sur le sapin moindre dans le Jura, où les stations sont globalement plus productives (tableau 1).

Différentes hypothèses, comme la complémentarité des deux espèces pour l'acquisition des ressources du sol ou pour la lumière, pourraient expliquer l'effet globalement positif du mélange sur la croissance en surface terrière.

## Intérêt de la méthode et perspectives

La modélisation conduite à partir des données d'observation comme celles de l'IGN permet de dresser un constat, et d'identifier les situations dans lesquelles la croissance d'une essence est supérieure ou inférieure en mélange par rapport aux peuplements purs dans des conditions environnementales et sylvicoles équivalentes. Cette approche permet de soulever des hypothèses concernant les mécanismes qui sont responsables

$$[\text{éq. 1}] \quad \Delta G_{\text{estimé}} = \underbrace{f_1(\text{station})}_{\text{Potentiel}} \times \underbrace{f_2(\text{sylviculture}) \times f_3(\text{stade de développement})}_{\text{Réducteurs}}$$

Massifs	Sapin	Épicéa
Vosges	+21 %	+4 %
Jura	+3 %	+3 %
Alpes	+14 %	-1 %
Massif Central	+30 %	+7 %

Tab. 1 : effet moyen du mélange sur la croissance en surface terrière du sapin et de l'épicéa pour les quatre massifs montagneux de l'étude, pour une proportion de 50 % de chaque espèce en surface terrière

d'un effet du mélange sur la croissance, mais ne permet pas de les étudier finement. Cela peut se faire dans les suivis de réseaux expérimentaux plus instrumentés, où l'acquisition de données peut être guidée explicitement par ces hypothèses. Ces types d'approches et d'analyse sont donc très complémentaires.

Cette méthodologie est applicable à d'autres essences et constitue un point de départ menant à une caractérisation générale de l'effet du mélange dans les peuplements à deux espèces. L'analyse de la variation de l'effet du mélange en fonction des conditions environnementales, ou en fonction du type d'assemblage entre espèces pourrait apporter des éléments de description et de compréhension supplémentaires : existe-t-il des situations où l'effet du mélange est toujours positif, ou bien toujours négatif ? Cela dépend-il des conditions stationnelles ou bien du type d'assemblage entre espèces ? Cette généralisation est a été abordée dans la thèse de Maude Toigo et fera l'objet d'un prochain article, concernant les mélanges de montagne sapin – hêtre, épicéa – hêtre, sapin – épicéa, et les mélanges de plaine hêtre – chêne sessile, et chêne sessile – pin sylvestre.

**Patrick Vallet**

**Thomas Pérot**

**Maude Toigo**

Irstea, Centre de  
Nogent-sur-Vernisson

UR Ecosystèmes forestiers (EFNO)

## Bibliographie

IFN, 2011. Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain : les sylvoécorégions (SER)

Jactel H, Brockerhoff E.G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* vol. 10, pp. 835-848

Perot T, Vallet P, Archaux F., 2013. Growth compensation in an oak-pine mixed forest following an outbreak of pine sawfly (*Diprion pini*). *Forest Ecology and Management* vol. 295 pp.155-161

Vallet P, Perot T., 2011. Silver fir stand productivity is enhanced when mixed with Norway spruce: evidence based on large-scale inventory data and a generic modelling approach. *Journal of Vegetation Science* vol. 22(5) pp. 932-942



Thierry Sardin, ONF

Exemple de sapinière-pessière en FD de Bois Sauvage (88)