

OPTMix – Dispositif expérimental de suivi à long terme du fonctionnement de la forêt mélangée

Cette présentation d'un dispositif expérimental sur le fonctionnement du mélange chêne sessile/pin sylvestre fait écho à l'article précédent. Elle illustre l'ampleur des enjeux, la complexité inhérente à l'étude des peuplements mélangés, la façon de concevoir les modalités, l'instrumentation et les protocoles de mesure pour recueillir des données pertinentes au regard des grandes questions posées et des hypothèses à tester...

Face aux changements climatiques, les forestiers imaginent plusieurs stratégies d'adaptation pour tenter d'atténuer leurs effets sur les services rendus par la forêt. Rappelons, sans revenir en détail sur les projections, que les prévisions sont unanimes concernant l'augmentation des températures tandis que celles concernant les précipitations sont plus incertaines. À l'horizon 2071-2100, la France subirait une hausse des précipitations hivernales ainsi qu'une augmentation des épisodes de sécheresse concernant une large partie sud du pays mais pouvant s'étendre à l'ensemble du pays (Ouzeau *et al.* 2014). Indépendamment du travail sur les possibilités de migration des espèces, deux stratégies sylvicoles sont envisagées pour la gestion des peuplements forestiers : (1) diminuer la densité pour limiter le stress hydrique (facteur majeur de dépérissement), et (2) privilégier le mélange d'essences pour maintenir la productivité tout en améliorant la résistance et la résilience face aux perturbations (voir encadré).

Les peuplements mélangés constituent actuellement près de la moitié des 14,5 millions d'hectares de forêt de production (au sens de l'Inventaire forestier national); les mélanges à deux essences (4,8 Mha) représentent un tiers des peuplements, tandis que ceux à plus de deux essences

en représentent 16 % (IGN 2014). Or, le fonctionnement des forêts mélangées tempérées et surtout les interactions des différents types de pression qu'elles subissent restent mal connus, et de nombreuses questions se posent quant à leur vulnérabilité face aux perturbations et au changement climatique. Aux pressions des phénomènes climatiques s'ajoute celle des trois principales espèces d'ongulés sauvages (cerf élaphe, chevreuil et sanglier), en augmentation depuis une trentaine d'années et qui pose parfois de graves problèmes de régénération. Un autre défi de la gestion durable est la préservation de la biodiversité.

Dans ce contexte, l'Unité de Recherche « Écosystèmes Forestiers » d'Irstea à Nogent-sur-Vernisson vient d'installer en forêt domaniale d'Orléans un réseau de placettes expérimentales dédié à l'étude comparée de peuplements adultes mélangés et purs de chêne sessile (*Quercus petraea*) et pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) : le dispositif OPTMix (de l'anglais Oak Pine Tree Mixture). Le choix des essences s'est porté sur le chêne sessile, car il est la première essence métropolitaine (en volume), et sur le pin sylvestre qui lui est principalement associé dans les forêts mixtes de plaine. Ce dispositif a été construit pour tester les effets des

stratégies sylvicoles envisagées dans le cadre du changement climatique en termes de densité du peuplement et de composition (chêne, pin, mélange des deux essences). Une originalité : pouvoir étudier l'action combinée de ces stratégies, associée à la présence ou non d'ongulés sauvages (sangliers, cerfs, chevreuils). L'objectif est de comprendre comment les différents facteurs (densité, composition, ongulés) agissent sur le fonctionnement, la croissance et la productivité des peuplements, la régénération, la dynamique forestière ainsi que sur la biodiversité.

Il s'agit d'un dispositif de long terme, qui s'intègre aussi en partie au réseau « Forêt hétérogène » du GIS Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers (Bédéneau *et al.* 2001). Depuis 1994, ce groupement d'intérêt scientifique (GIS Coop) se consacre au recueil et à la mise en commun de données sur la croissance des peuplements forestiers pour l'élaboration de modèles de croissance et d'outils d'aide à la gestion; ce qui suppose d'installer et suivre des réseaux de placettes permanentes multi-sites et multi-organismes mesurés périodiquement selon des protocoles standardisés (plus d'informations sur <http://agriculture.gouv.fr>; voir aussi Vallet *et al.*, ce numéro).

Deux stratégies sylvicoles face aux changements climatiques :

- La première idée est de diminuer la densité des peuplements et, par conséquent, le volume de bois sur pied afin de réduire la compétition entre les arbres pour les ressources en eau (moins de surface foliaire par hectare c'est moins de pertes d'eau par transpiration) et, dans une moindre mesure, en nutriments comme cela a pu être observé dans certains cas (Balandier 2014). Cependant, cela entraîne des modifications de l'écosystème dont les conséquences sur son fonctionnement (croissance, renouvellement, biodiversité) s'avèrent difficiles à prédire à cause de multiples interactions. Notamment, l'ouverture du peuplement favorise le développement d'un sous-bois riche et abondant en plantes vasculaires qui constitue une ressource alimentaire importante pour les cervidés. Mais des espèces monopolistes, particulièrement compétitrices pour les ressources, peuvent se développer et atténuer les effets positifs sur le bilan hydrique (Gobin 2014). L'évaluation, sur la base bibliographique, de cette stratégie sylvicole sur la biodiversité s'avère difficile du fait des résultats contrastés entre différents taxons tels que les carabes, les bryophytes épiphytes, les champignons lignicoles, ou la faune du sol (Balandier 2014).
- La deuxième stratégie consiste à privilégier les peuplements mélangés. Elle vise à la fois à maintenir ou augmenter la productivité des forêts et à obtenir des peuplements plus résistants et résilients face aux perturbations. L'hypothèse générale sous-jacente à cette amélioration est basée sur le principe dit de complémentarité en écologie : chaque

espèce valorise un ensemble de traits que n'a pas sa voisine. Le mélange d'essences a bien un effet sur la productivité des peuplements (Pretzsch *et al.* 2010, Vallet et Perot 2011), mais il n'est pas systématique. Il dépend du contexte pédo-climatique et des assemblages d'essences et, pour les principales essences forestières françaises de production, il se révèle favorable dans les situations plutôt peu productives (Thèse M. Toïgo, 2011-2014, Toïgo *et al.* 2015 b). Le mélange peut minimiser les pertes de production suite à l'attaque d'un insecte phytophage (Jactel et Brockerhoff 2007), l'essence non-hôte permettant de compenser les pertes de croissance subies par l'essence hôte (Perot *et al.* 2013). En revanche, dans le cas de sécheresses, les essences en mélange ne semblent pas toujours plus résistantes ou résilients (Merlin *et al.* 2015) et certaines essences peuvent même être plus stressées en peuplement mélangé qu'en peuplement pur (Toïgo *et al.* 2015a). Quant aux effets du mélange d'essences sur la biodiversité, tous les cas de figure sont possibles selon les taxons étudiés et les essences concernées : des peuplements mélangés plus favorables que les peuplements purs en termes de richesse spécifique, mais pas en abondance ; ou bien en abondance uniquement ; ou encore sans effet (Gosselin 2004, Barsoum *et al.* 2014, Barbier *et al.* 2008). Ces résultats contrastés semblent provenir du type d'essence en mélange, par exemple les mélanges feuillus-conifères ou les peuplements purs de feuillus auraient tendance à abriter des communautés plus diversifiées que les peuplements purs de résineux (Gosselin 2004).

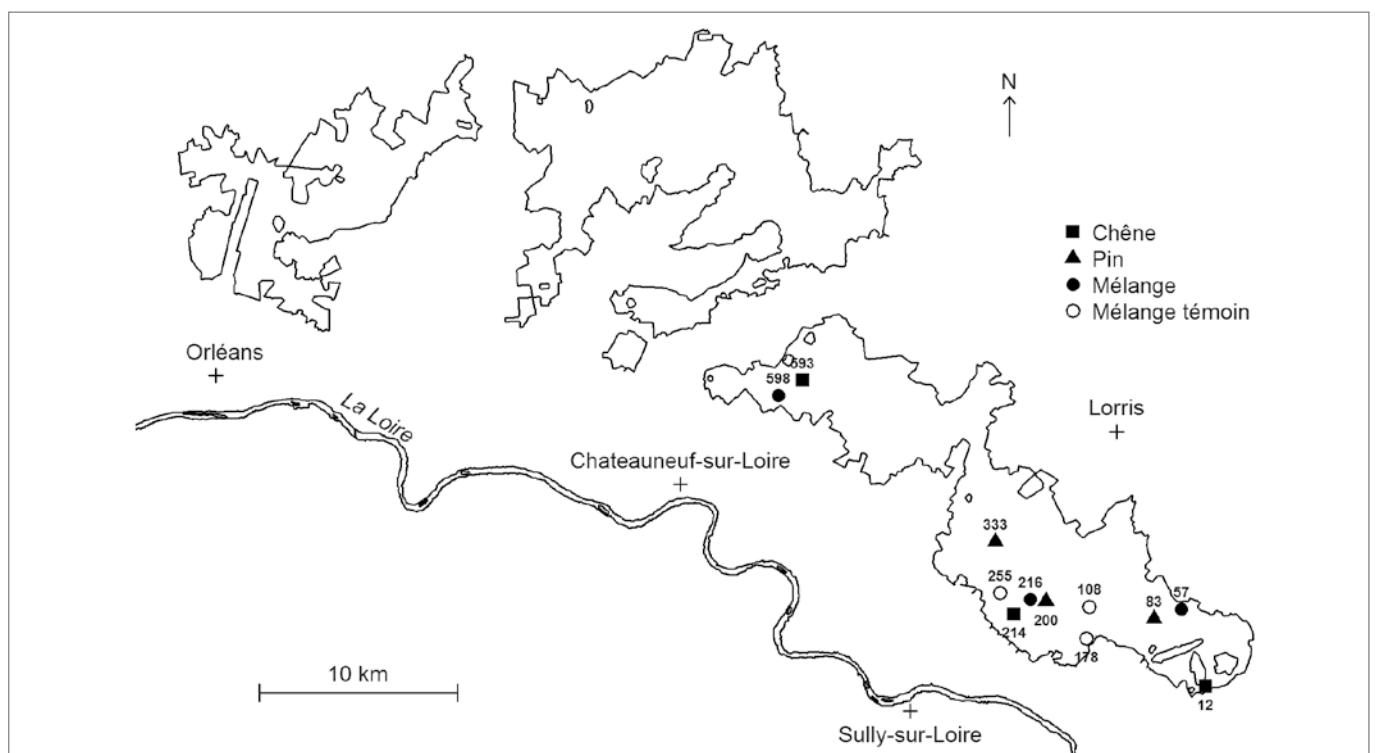


Fig. 1 : localisation des différentes placettes d'étude du dispositif OPTMix

Les 33 placettes en peuplement pur de pin, de chêne ou en mélange sont réparties dans 12 parcelles forestières de la forêt domaniale d'Orléans (numéro de la parcelle indiqué sur la carte)

Cet article se propose de présenter le dispositif expérimental OPTMix puis de montrer en 4 grandes questions comment sa conception permet d'aborder les diverses problématiques, avec une instrumentation et des mesures appropriées.

Le dispositif OPTMix

Le dispositif est installé en forêt de plaine, dans des peuplements de chêne sessile et pin sylvestre du massif de Lorris en forêt domaniale d'Orléans (figure 1). Ces deux essences ont été sélectionnées car, d'une part, le mélange chêne-pin représente une des associations les plus répandues en France et, d'autre part, les différences contrastées de traits entre un feuillu et un résineux présentent de multiples intérêts scientifiques. Les placettes sélectionnées sont situées sur des planosols, d'assez faible fertilité, présentant un horizon superficiel sableux et un plancher argileux, induisant la présence d'une nappe d'eau perchée temporaire, souvent en hiver et au printemps. Le sous-bois est majoritairement constitué de fougère aigle (*Pteridium aquilinum*), de molinie (*Molinia caerulea*), ou de callune (*Calluna vulgaris*), en association avec d'autres espèces acidiphiles (présentes sur des humus de type eumoder, dysmoder et mor). Tout le dispositif connaît une fréquentation régulière des ongulés (cerf, chevreuil et sanglier) dont les populations sur le massif de Lorris sont considérées, depuis une dizaine d'années, stabilisées à un niveau compatible avec les objectifs sylvicoles définis par l'ONF.

Le dispositif comporte 33 placettes expérimentales réparties dans 12 parcelles forestières adultes de futaies régulières âgées de 60 à 80 ans environ. Les peuplements correspondent, soit à un mélange chêne sessile – pin sylvestre, soit à l'une de ces deux essences en peuplement pur. Une présélection de parcelles a été réali-

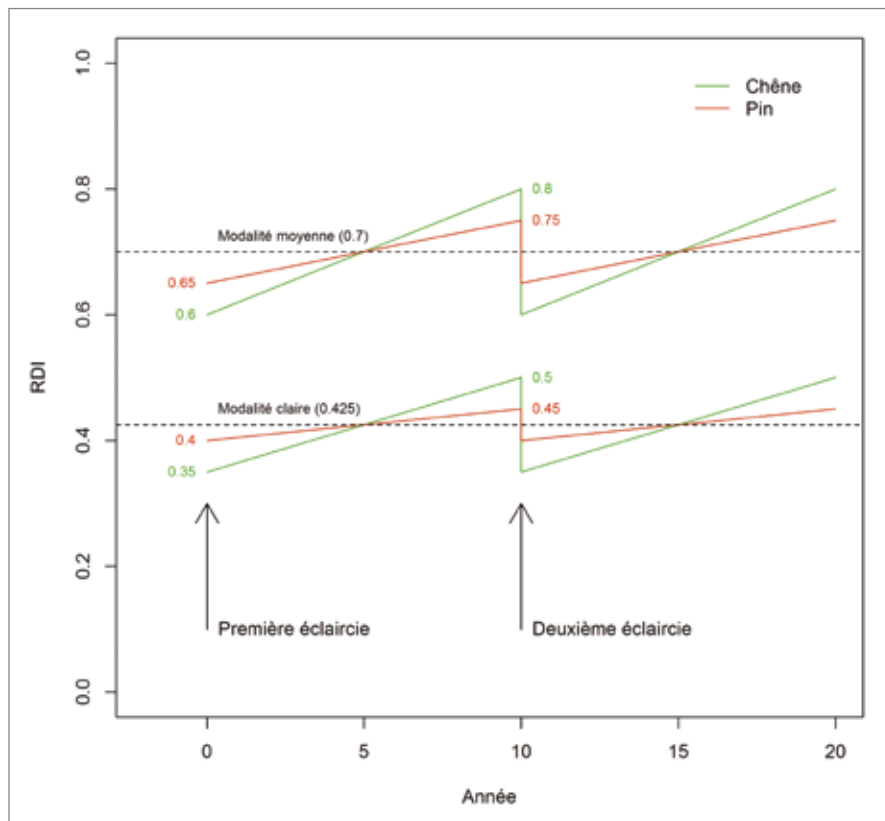


Fig. 2 : évolution de l'indice de densité relative (RDI) par rapport au RDI objectif (ligne en pointillée) pour les deux modalités de densité étudiées : « sylviculture dynamique » (RDI = 0,425) et « conservatrice » (RDI = 0,7) La périodicité des éclaircies est donnée à titre indicatif.

sée en croisant les informations provenant de photographies aériennes et des cartes d'aménagement de l'ONF. Pour garantir la plus grande homogénéité stationnelle possible entre les parcelles retenues, nous nous sommes basés sur les caractéristiques du sol et notamment la présence d'un plancher argileux en dessous de 40 cm de profondeur, la composition floristique, l'absence de molinie en touradon ou d'importantes cépées de charme en sous-bois.

Pour chaque composition de peuplement (chêne pur, pin pur, mélange), deux niveaux de densités sont appliqués notamment pour tester l'hypothèse d'un intérêt sur le bilan hydrique : une densité faible correspondant à une sylviculture dite « dynamique » (RDI objectif de l'ordre de 0,4) et une densité

moyenne correspondant à une sylviculture dite « conservatrice » (RDI objectif de 0,7) (voir encadré RDI et figure 2). Les placettes ne correspondant pas à la plage de densités ciblée ont fait l'objet d'un martelage suivi d'une coupe entre fin 2012 et fin 2014. Par ailleurs, les quelques arbres du sous-étage et les éventuelles cépées de charme ont été coupés afin d'établir un état initial homogène entre placettes et de limiter le peuplement aux essences étudiées. Pour chaque composition et densité, nous avons installé trois répétitions (figure 4). Dans la modalité sylviculture dynamique, on s'attend à ce que l'ouverture du couvert favorise le développement de la flore du sous-bois, dont les jeunes arbres en régénération ; c'est pourquoi deux types de pression d'herbivorie par les ongulés y sont

étudiés (figure 3) : avec herbivorie (accès libre des animaux) et sans herbivorie (mise en défens à l'aide de clôtures). S'y ajoutent, pour les peuplements mélangés, une modalité dynamique avec clôture sélective (qui laisse pénétrer les sangliers, mais pas les cervidés, voir figure 3) et une modalité témoin sans intervention sylvicole ni clôture. La modalité avec clôture sélective, comparée aux modalités fermée et ouverte, permet de découpler l'effet des cervidés et du sanglier dont les activités peuvent avoir des conséquences différentes sur le cycle des éléments et la régénération du pin ou du chêne, ce qui questionne sur le renouvellement du mélange. On pense par exemple à la prédation exercée sur les glands (sanglier) ou les jeunes plants¹ (cervidés) de chêne qui est une entrave au maintien d'un peuplement mélangé. La modalité témoin répond au protocole expérimental « Forêt hétérogène » du GIS Coop et vise à étudier la mortalité dans les peuplements mélangés dans un contexte de densité maximale (au bout d'un certain temps sans coupe), pour valider les calculs de RDI en mélange. L'ensemble représente un total de 33 placettes (figure 4).

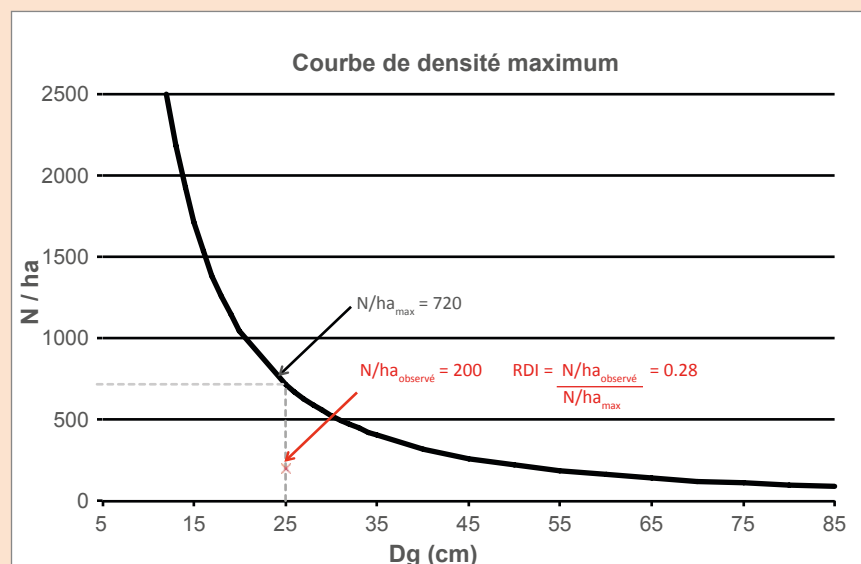
Chacune des placettes de mesure couvre une surface de 0,5 ha où tous les arbres ont été cartographiés. Les placettes de mesure sont entourées d'une zone tampon de 20 mètres de large soumise aux mêmes modalités (Fig. 5). La plupart des placettes est équipée d'appareils de mesure du microclimat, en particulier du bilan hydrique. Des dendromètres ont été installés sur un échantillon d'arbres afin de suivre leur croissance en continu et en particulier à l'échelle intra-annuelle. En parallèle, des suivis de populations d'herbivores (ongulés sauvages et micromammifères), de diversité, de dynamique de la végétation et de la régénération forestière ainsi que de l'utilisation des ressources par les arbres (eau, lumière, nutriments) sont réalisés.

L'indice de densité relative (RDI)

La densité d'un peuplement peut être exprimée par différents indices, les uns se rapportant à une mesure quantitative absolue, telle que le nombre de tiges par hectare ou la surface terrière, les autres se rapportant à une mesure relative exprimée en pourcentage d'une valeur moyenne ou maximale. Pour exprimer le niveau de compétition au sein d'un peuplement, la notion de densité n'a de sens que si elle est rapportée à la taille des arbres (1 000 tiges de 5 cm de diamètre ne représentent pas le même niveau de compétition que 1 000 tiges de 10 cm). D'où l'intérêt des valeurs relatives, dont l'indice de densité relative de Reineke, appelé RDI (Relative Density Index; Reineke 1933, Dhôte 1997).

Cet indice est basé sur la notion d'auto-éclaircie. Pour une essence donnée, le nombre maximal de tiges vivantes qu'un peuplement peut compter est corrélé négativement au diamètre moyen, selon une relation exponentielle inverse (qui correspond à une droite sur une double échelle logarithmique : d'où la « droite d'auto-éclaircie » souvent évoquée). Le RDI rapporte la densité observée d'un peuplement ($N/ha_{\text{observé}}$) à la densité théorique maximale pour le diamètre quadratique moyen du peuplement considéré (N/ha_{max}). Cette densité maximale correspond au cas d'un peuplement sans intervention où la diminution du nombre de tiges au cours du vieillissement ne résulte que de la mortalité naturelle des arbres par compétition; par définition, l'indice RDI est alors maximal et vaut 1. En peuplement géré, le RDI est donc compris entre 0 et 1; la limite inférieure théorique ($RDI = 0$) correspondrait à un peuplement sans arbres (densité nulle).

Le RDI est indépendant de l'âge des arbres et pertinent en futaie régulière équienne. Pour définir les scénarios sylvicoles dans OPTMix, le RDI a été étendu aux peuplements réguliers mélangés, en calculant un RDI par espèce à partir de leurs diamètres quadratiques moyens respectifs, puis en les additionnant pour obtenir le RDI total. Il s'agit d'une construction théorique qu'il sera nécessaire de valider à partir de données d'observation : les modalités témoin sans intervention constituent un premier pas dans ce sens.



Principe d'utilisation de la courbe d'auto-éclaircie d'une essence donnée pour le calcul du RDI : $RDI = N/ha_{\text{observé}} / N/ha_{\text{max}}$ soit, pour l'exemple indiqué (point rouge) $RDI = 200/720 = 0.28$. N/ha = nombre de tiges vivantes par hectare; Dg = diamètre quadratique moyen

¹ NDLR : la distinction entre semis (< 50 cm) et plants est ici une question de hauteur et non d'origine (rien à voir avec une quelconque plantation)

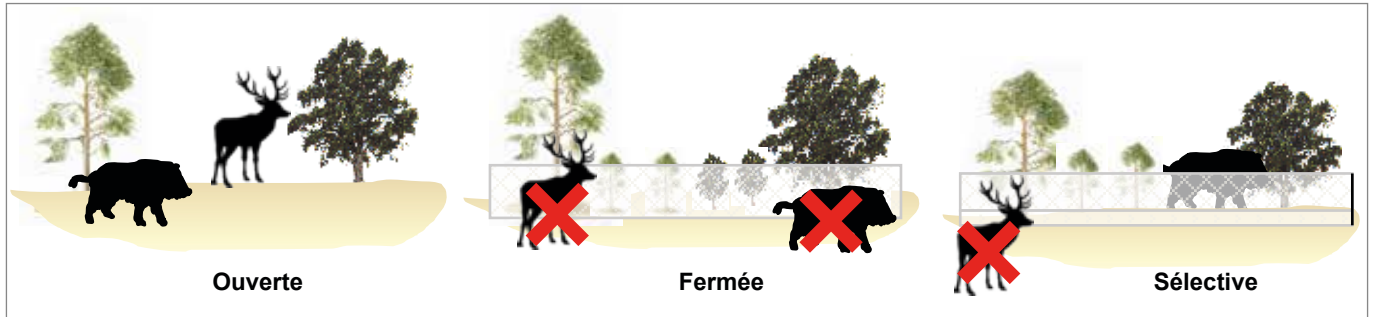


Fig. 3 : représentation schématique des modalités liées à l'herbivorie par les grands mammifères

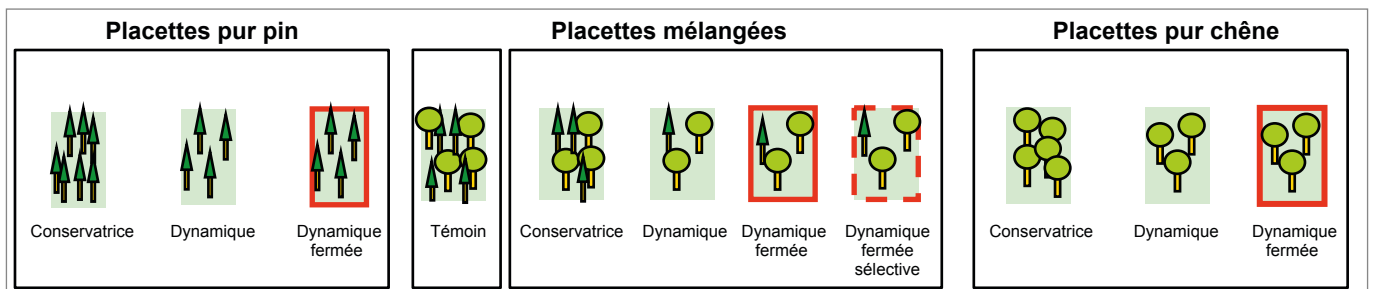


Fig. 4 : représentation schématique des différentes modalités pour une répétition, soit 11 placettes installées dans quatre parcelles forestières

Les cadres noirs représentent les parcelles forestières pour une répétition soit une pour chaque peuplement pur et deux pour le mélange.

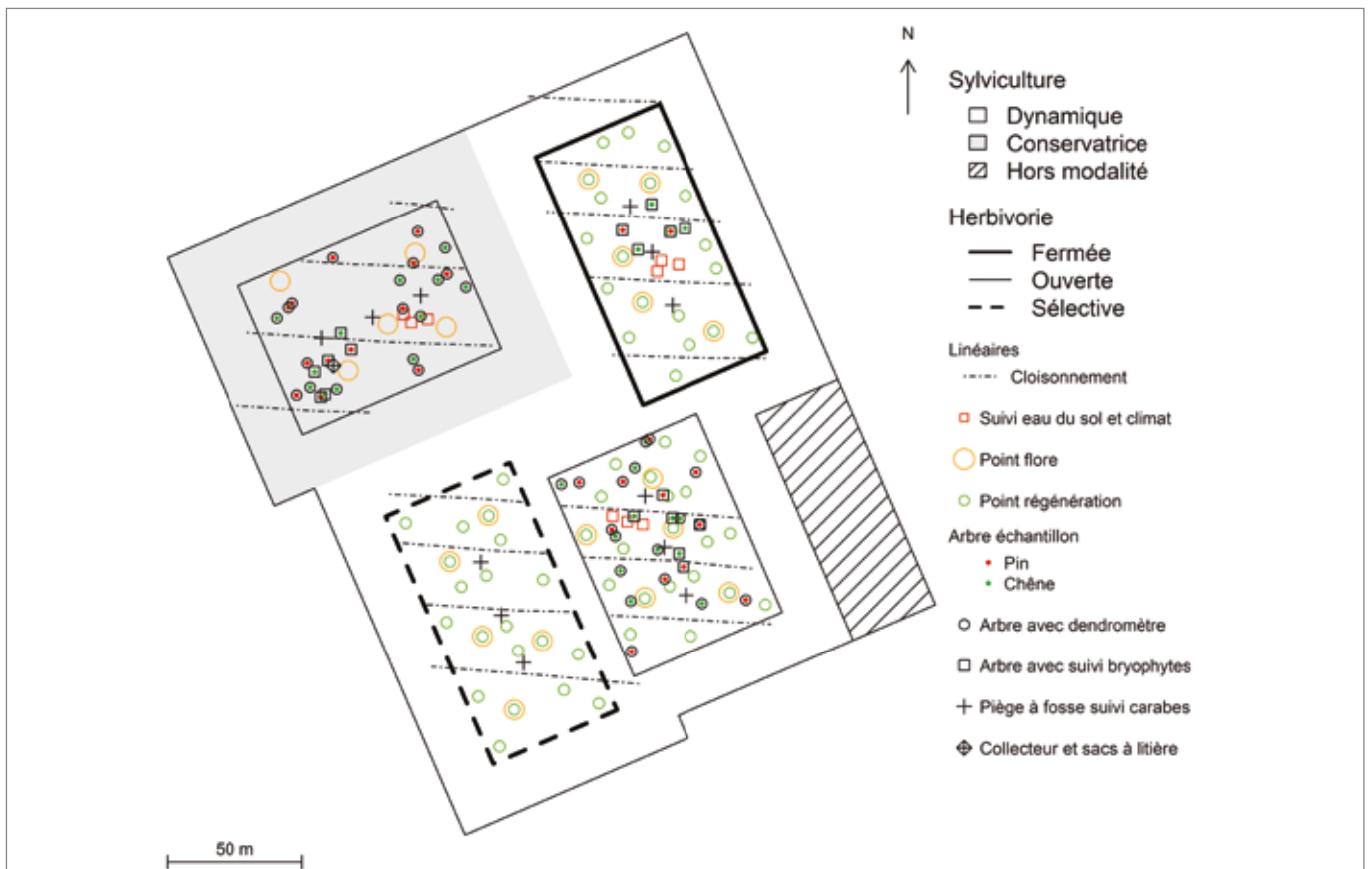


Fig. 5 : exemple d'organisation des placettes expérimentales dans un peuplement mélangé (parcelle 216)

Quatre modalités sont suivies : sylviculture conservatrice sans exclusion des herbivores (ouverte), sylviculture dynamique ouverte aux herbivores, sylviculture dynamique avec exclusion des herbivores par clôture (fermée) et sylviculture dynamique ne laissant passer que les sangliers (clôture sélective)

OPTMix, une forêt laboratoire !

La dimension expérimentale de ce dispositif, les différentes thématiques scientifiques abordées ainsi que l'équipement qui y est investi font d'OPTMix un véritable laboratoire. Les principaux axes de recherche abordés dans ce projet sont détaillés ci-dessous.

Quels sont les effets du mélange d'essences sur la productivité, la résistance et la résilience des peuplements ?

L'effet positif du mélange sur la productivité a été constaté dans diverses situations mais il pourrait être contrebalancé par une consommation des ressources, et notamment de la ressource en eau, plus grande qu'en peuplements purs. En période de sécheresse (perturbation abiotique) le mélange pourrait donc aggraver le stress subi par les arbres (Richards et al. 2010, Grossiord et al. 2014) et avoir un effet négatif sur la productivité des peuplements ou sur leur capacité de résistance et de résilience.

Les premiers résultats obtenus sur le dispositif, à partir de données rétrospectives sur arbres abattus, ne montrent ni effet négatif ni effet positif du mélange sur la résistance ou la résilience du chêne et du pin en période de sécheresse (Merlin et al. 2015). Pour approfondir ce questionnement la croissance radiale d'un échantillon d'arbres est étudiée en lien avec le régime hydrique à l'échelle intra-annuelle. La croissance radiale intra-annuelle est mesurée sur 216 arbres à l'aide de dendromètres (photo 1) répartis sur l'ensemble des modalités ouvertes (sans clôture). Les 3 placettes témoins seront équipées ultérieurement.

Ce suivi permettra (1) d'étudier la réponse individuelle des arbres aux conditions climatiques et à leur environnement (densité et composition) et (2) d'étudier si les différences de bilan hydrique entre types de peuplement se traduisent au niveau de la croissance individuelle.

Quels sont les avantages et les limites des stratégies sylvicoles vis-à-vis de l'utilisation des ressources en eau et en nutriments ?

Les peuplements mélangés offrent des dispositions supposées bénéfiques pour la productivité : la complémentarité temporelle des essences (décalage de début et/ou de fin de saison de végétation), leur complémentarité spatiale dans l'utilisation des ressources, notamment en lumière, en eau et en nutriments (Forrester 2014), ainsi que la diversité des types de litière, susceptible de favoriser leur décomposition et la libération de nutriments (Chapman et al. 1988). Mais si les ressources sont limitées, comme l'eau en période de sécheresse, cette complémentarité pourrait devenir problématique en augmentant la consommation totale et en exacerbant la compétition.

La stratégie de réduction de la densité du peuplement (en peuplement mélangé ou non) vise à limiter cette compétition mais l'ouverture du couvert qui en résulte favorise le développement de la végétation du sous-bois, dont la consommation en eau et en nutriments est à préciser.

Le dispositif OPTMix permettra de tester ces hypothèses dans le cadre du mélange chêne – pin et de caractériser le partage et l'utilisation des ressources (absorption, efficacité d'utilisation, etc.). Ainsi, nous étudions :

- la disponibilité en lumière dans le sous-bois ;
- le bilan hydrique et notamment la teneur en eau des sols, le niveau de la nappe d'eau temporaire et la pluviométrie grâce à un appareillage (photos 2 et 3) constitué de piézomètres, de capteurs de teneur en eau du sol, de pluviomètres et, pour caractériser la demande climatique, de capteurs de rayonnement, de température et d'humidité de l'air. Une centrale d'acquisition de données relie ces différents capteurs et enregistre les données en continu.



1 – Dendromètre installé sur un pin sylvestre



2 – Insertion d'un capteur d'humidité du sol à 20 cm de profondeur (type Campbell CS616)



3 – Ensemble des capteurs pour les mesures du microclimat installés sur un mât

- le cycle des nutriments, l'efficience d'utilisation des nutriments par les arbres et la mise en place d'expérimentation de décomposition de litière (photo 4).

Enfin, une station météorologique de référence installée en plein découvert au sein du massif complètera prochainement le dispositif. Par ailleurs, une caractérisation physico-chimique et une description pédologique ont été réalisées sur chacune des placettes. Nombre de ces données environnementales serviront également à d'autres travaux.

Quel est le rôle des herbivores dans le processus d'installation de la régénération sous couvert des peuplements mélangés et dans la dynamique du sous-bois ?

La régénération naturelle des arbres sous couvert est principalement soumise aux contraintes d'éclaircissement. Une sylviculture dynamique peut apporter une ouverture du peuplement suffisante pour qu'une régénération basse (semis et plants < 2 m) puisse s'installer. Outre l'effet de la disponibilité en lumière, nous étudierons l'influence de deux facteurs biotiques sur la phase d'installation et de croissance de la régénération basse : les

dommages causés par les herbivores et la compétition avec les espèces interférentes. Le premier comprend les dégâts causés par les micromammifères (Carouille et Baubet 2006) et par les ongulés (cerf élaphe, chevreuil et sanglier) (Van Lerberghe et Balleux 1999). Il s'agit en particulier d'étudier les effets cumulés de ces deux facteurs sur la régénération basse des essences principales et dans un contexte de peuplements mélangés, et en interaction avec le changement climatique. Ces phénomènes sont d'autant plus complexes que l'ampleur des dégâts semble varier en fonction de la végétation accompagnante, que ce soit en tant que refuge pour les micromammifères ou en tant que ressource alimentaire alternative pour les cervidés. Cette végétation et son développement sont le résultat à la fois des conditions stationnelles, de l'ouverture du peuplement et de la pression exercée par les grands herbivores.

Afin de déterminer et de quantifier la part relative et les effets cumulés des herbivores dans la dynamique du sous-bois des peuplements purs et mélangés à sylviculture dynamique, les groupes d'animaux sont étudiés ensemble ou séparément à l'aide de

systèmes d'exclusion sélectifs : des grillages adaptés pour les grands herbivores (cervidés, sangliers) (photos 5 et 6), des zones plus restreintes encagées pour les rongeurs. Par ailleurs, le suivi des populations et de la fréquentation des placettes est réalisé par des piégeages photographiques pour les ongulés et des systèmes de captures-recaptures pour les micromammifères.

Les suivis de la régénération basse des essences sont réalisés sur un réseau de 20 placeaux circulaires de 12,6 m² (rayon de 2 m) dans les placettes à sylviculture dynamique. Sur ces placeaux, le développement des espèces interférentes (callune, molinie, fougère) est également étudié et complété avec le réseau des placeaux de suivi de la flore (figure 5). En parallèle, une expérimentation complémentaire est installée sur le domaine des Barres (Nogent-sur-Vernisson, Loiret), en conditions semi-contrôlées de pépinière (photo 7). Elle a pour objectif de clarifier les interactions entre semis de chêne et une espèce interférente du sous-bois, la ronce (*Rubus sect. Fruticosi*), sous différents niveaux de ressources (2 niveaux d'éclaircissement et 2 modalités d'irrigation) et de pression d'herbivorie (2 modalités d'herbivorie simulée manuellement).

Quels sont les effets du mélange d'essences, de la densité du peuplement et de la pression d'herbivorie des ongulés sauvage sur la biodiversité ?

Un des avantages des peuplements mélangés serait qu'ils renfermeraient une plus grande diversité spécifique. Il a été montré qu'une plus grande diversité d'arbres favorise l'apparition de différents microhabitats qui peuvent abriter différentes espèces végétales de sous-bois (Scherer-Lorenzen et al. 2005, Barbier et al. 2008, Cavard et al. 2011). Quels sont les effets du mélange, de l'ouverture du couvert (apport de lumière) et de la pression des grands ongulés sauvages (abroutissement sélectif,



© Istrea

4 – Dispositif d'étude du recyclage de la matière organique et des nutriments avec un collecteur de chute de litière au premier plan et une expérimentation de décomposition de litière au sol (encadrée par 4 fanions)

piétinement, etc.) sur la diversité spécifique et fonctionnelle? C'est une question clef pour la conservation de la biodiversité, mais encore sans réponse (ou partielle) pour de nombreux taxons du sous-bois et du sol. Plusieurs hypothèses peuvent être émises dont deux sont souvent évoquées dans la littérature scientifique : les peuplements mélangés chêne-pin hébergent une biodiversité (1) maximale car ils hébergent à la fois les espèces associées aux peuplements feuillus et celles associées aux peuplements résineux, ou (2) de niveau intermédiaire entre les peuplements purs de résineux (diversité attendue minimale pour la plupart des taxons) et de feuillus (diversité attendue maximale).

Nous nous intéressons simultanément à plusieurs groupes et taxons dans les différentes placettes du dispositif à l'aide de relevés (observations, collectes ou piégeages selon les taxons), identifications et dénombrements (comptage d'individus ou recouvrement) :

■ **la flore du sous-bois**, à la base de la chaîne trophique. Un peuplement d'arbres moins dense devrait permettre un accroissement des ressources disponibles pour cette strate et en cascade pour les herbivores. Mais, d'une part, le développement d'une strate interférente (ex. fougères, molinie) pourrait bloquer cette dynamique (Balandier 2014) et, d'autre part, cet effet positif bénéficierait-il à toutes les composantes de la flore? L'essence et la présence des ongulés en tant que perturbateurs auront-ils un rôle dans la dynamique? Quels seront par exemple leurs effets sur les plantes rudérales ou exotiques invasives, ou sur les espèces à plus forte valeur patrimoniale telles que les espèces de forêts anciennes?

■ **les bryophytes**, terricoles (au sol) ou épiphytes (qui se développent sur le tronc). Elles sont une partie méconnue de la biodiversité forestière alors qu'elles participent au



5 – Dispositif d'exclusion des ongulés : clôture faite d'un grillage soudé à mailles progressives de type Rempart® Lourd (hauteur 2 m + rabat de 50 cm ancré au sol)



6 – Ouverture autorisant le passage des sangliers dans les enclos sélectifs



7 – Dispositif en conditions contrôlées

Mesures/observations	Équipements	Nombre total sur le dispositif
DONNEES CLIMATIQUES DE REFERENCEES		
Station météorologiques de référence complète	<ul style="list-style-type: none"> Centrale d'acquisition CR1000 – Campbell Scientific Limited Boîtier étanche ENC 12/14 – Campbell Scientific Limited Mâts de montage Batterie 12V Capteur de température et d'humidité relative CS215 - Campbell Scientific Limited avec abris ventilés MET20 - Campbell Scientific Limited Pyranomètre SP1110 – Skye instruments Ltd et Embase et plateau de fixation pour capteur de lumière SKE211 & CM225E MET20 – Campbell Scientific Limited Capteurs de rayonnement PAR SKP215 – Skye instruments Ltd et Embase et plateau de fixation pour capteur de lumière SKE211 & CM225E MET20 – Campbell Scientific Limited Capteur de rayonnement global rayonnement diffus BF3 – Delta-t Devices 	1
SOL		
Suivi de l'humidité du sol et du niveau de la nappe d'eau	<ul style="list-style-type: none"> Capteur de teneur en eau CS616 – Campbell Scientific Limited Capteur de pression submersible + double tubes CS450 – Campbell Scientific Limited Point de mesure de température avec des thermocouples 	189 63 (dont 21 automatiques)
Mesures des caractéristiques physico-chimiques	3 fosses pédologiques décrites sur 24 placettes 10 points/placettes + 72 fosses	
Description pédologique	72 relevés au niveau des fosses	
Caractérisation des humus	Toutes les placettes, soit 33	
Etude de la décomposition des litières	<ul style="list-style-type: none"> 120 litter-bag/placette 	12 placettes, suivi sur 24 mois (2013-2015)
ACQUISITION DES DONNEES EN CONTINU		
Acquisition de données	<ul style="list-style-type: none"> Centrale d'acquisition CR1000 ou CR800 – Campbell Scientific Limited Multiplexeur AM 16/32 – Campbell Scientific Limited 	21
Montage, alimentation électrique et protection du matériel	<ul style="list-style-type: none"> Boîtier étanche ENC 12/14 – Campbell Scientific Limited Mats de montage Batterie 12V 	21
SUIVI DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX		
Humidité relative de l'air	<ul style="list-style-type: none"> Capteur de température et d'humidité relative de l'air CS215 - Campbell Scientific Limited avec Abris ventilés MET20 - Campbell Scientific Limited 	42
Précipitation	<ul style="list-style-type: none"> Pluviomètre à augets AGR100 – Campbell Scientific Limited 	42
Lumière	<ul style="list-style-type: none"> Pyranomètre SP1110 – Skye instruments Ltd et Embase et plateau de fixation pour capteur de lumière SKE211 & CM225E MET20 – Campbell Scientific Limited 	63
SUIVI AU NIVEAU DES ARBRES		
Croissance pluriannuelle : <ul style="list-style-type: none"> Mesures de circonférence Mesure de hauteur 		33 placettes (tous les arbres) 21 placettes (15 arbres par espèce soit 450 arbres)
Croissance intra-annuelle	<ul style="list-style-type: none"> Dendromètres à ruban à lecture manuelle Dendromètres automatiques DR26 – EMS BRNO 	21 placettes, 270 arbres 5 placettes, 6 arbres
Suivi du débourrement , date de débourrement		21 placettes, 270 arbres
Suivi de la régénération : Évaluation quantitative et qualitative sur placeaux de rayon 2 m (comptages et mesures de hauteur) – Comparaison entre 9 placettes ouvertes, 9 placettes fermées et 3 placettes sélectives		420 placeaux à raison de 20 placeaux par placette observés sur 21 placettes
Quantification des retours au sol et pluie de graines Détermination quantitative et qualitative (analyses chimiques) des retours au sol (litière). Quantification des graines et pouvoir germinatif	<ul style="list-style-type: none"> Collecteurs de 0,5 m² 	5/placette, soit 165 collecteurs au total
SUIVI DES MAMMIFERES RAVAGEURS		
Fréquentation et activités par les grands ongulés sauvages 3 périodes (fév./mar., mai/juin, nov./déc.), mode hybride (automatique 4 hrs matin/4 hrs soir + détection la nuit), 6 jours par période dans chacune des coins des placettes, suivi en continu en mode détection entre les 3 périodes pour les placettes sélectives	<ul style="list-style-type: none"> Pièges photographiques, Moultrie Game Spy M-80XT 	11 placettes, 792 jours par an (dont 24 jours de suivi par placette et par période)
Taux d'abrouissement par les cervidés : Estimation du taux d'abrouissement par les cervidés sur la régénération forestière		9 placettes ouvertes et 3 placettes sélectives, 240 placeaux
Pourcentage du sol retourné par le sanglier : Estimation du pourcentage du sol retourné par le sanglier		9 placettes ouvertes et 3 placettes sélectives, 240 placeaux
Abondance des populations de micromammifères Capture non destructive des micromammifères par des pièges type INRA avec dortoir, 1 campagne par an (automne), 48 h de capture, 204 pièges/ha		9 placettes, 102 pièges par placettes (disposés en rangées en totalisant 300 m)
SUIVI DE LA BIODIVERSITE		
Plantes vasculaires : Relevé floristique sur 5 placeaux de 40 m ² par placette tous les 5 ans		33 placettes, 165 placeaux
Bryophytes : <ul style="list-style-type: none"> Relevé floristique sur 5 placeaux de 40 m² par placette tous les 5 ans Relevé au pied et sur le tronc de 3 arbres de chaque essence par placettes sur 30 placettes 		33 placettes, 165 placeaux + 90 arbres
Insectes (carabes, faune du sol) : <ul style="list-style-type: none"> Prélèvement des carabidés par pièges à fosse, 3 pièges par placettes, tous les 5 ans Prélèvement du faune du sol (mesofaune) : 1 campagne en 2013 		30 placettes

Tableau récapitulatif des suivis récurrents, mesures, et équipements installés sur le dispositif OPTMix

maintien d'un microclimat favorable à la régénération ou constituent un habitat pour d'autres taxons (insectes par ex.). Des approches à différentes échelles sont entreprises : échelle arbre (effet de l'essence et du voisinage), échelle placette (effet du mélange et de la densité).

■ **les microarthropodes du sol**, en particulier les collemboles. Ils jouent un rôle déterminant dans le recyclage des nutriments et participent à la formation d'habitats pour d'autres microorganismes (Lavelle *et al.* 2006). Élément central du réseau trophique du sol, ils ont été récemment reconnus comme un bioindicateur de la qualité des sols très performant par l'ADEME (programme Bioindicateur).

■ **les insectes carabidés** (carabes). Principalement prédateurs, notamment d'organismes décomposeurs de la litière, ces insectes utilisent les premiers horizons du sol pour s'y nourrir et, chez certaines espèces, pour hiverner ou y déposer leurs œufs. Ils sont donc potentiellement sensibles au mélange d'essences, aux espèces du sous-bois et par effet de cascade aux modifications de la faune du sol (dont les microarthropodes du sol).

Conclusion

OPTMix est un dispositif de suivi à long terme pour l'acquisition de données robustes, avec pour finalité d'évaluer les avantages attribués aux peuplements mélangés, souvent avancés mais rarement démontrés. Il contribue au réseau national du GIS « Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » (volet forêt hétérogène) et il est aussi complémentaire à d'autres dispositifs s'intéressant au fonctionnement des écosystèmes forestiers (réseau RENECOFOR, sites atelier du SOERE F-ORE-T), en élargissant au cas des peuplements mélangés. Avec deux originalités : l'étude combinée des effets de densité et de mélange, en présence ou pas d'ongulés sauvages. Ce dispositif, lourdement instrumenté,

a été construit spécifiquement pour tester deux stratégies de gestion sylvicole envisagées dans le cadre des changements climatiques : l'ouverture du couvert et le mélange d'essence. Il permet d'aborder des questions capitales pour la gestion forestière future :

- Les stratégies sylvicoles testées sont-elles bénéfiques à la résistance du peuplement lors de sécheresses ?
- Quels sont les effets du mélange et de l'ouverture du peuplement sur la consommation en eau et la croissance du peuplement ?
- Quels sont les facteurs clefs pour permettre la régénération dans les peuplements mélangés ?
- Quelle est la diversité et quel est le rôle de la végétation du sous-bois dans les différents peuplements (appétence pour les herbivores, diversité floristique et faunistique, etc.) ?

Des éléments de réponse pourront être obtenus assez rapidement (e.g. : effet du mélange sur la diversité de certains taxons), d'autres demanderont plus de temps comme les effets sur le fonctionnement et la dynamique des peuplements forestiers. Au final, les acteurs de la filière bénéficieront des acquis du dispositif OPTMix pour faire évoluer les stratégies de gestion forestière.

Ce dispositif cherche également à fédérer des chercheurs sur la thématique du fonctionnement des forêts mélangées en zone tempérée dans le contexte des changements de climat et de pratiques.

Korboulewsky Nathalie
Pérot Thomas
Balandier Philippe
Ballon Philippe
Barrier Rachel
Boscardin Yves
Dauffy-Richard Emmanuelle
Dumas Yann
Ginisty Christian
Gosselin Marion

Hamard Jean-Pierre
Laurent Lisa
Mârell Anders
NDiaye Aminata
Perret Sandrine
Rocquencourt Agnès
Seigner Vincent
Vallet Patrick

Irstea, Centre de
 Nogent-sur-Vernisson
 UR Ecosystèmes forestiers (EFNO)
 nathalie.korboulewsky@irstea.fr

Remerciements

Nous remercions vivement la Région Centre et Irstea pour leur soutien financier et l'Office National des Forêts pour la mise à disposition des parcelles forestières. Nous remercions également Sébastien Macé, Élodie Novarra et Camille Couteau pour leur aide précieuse lors de l'installation du dispositif.

Bibliographie

Balandier P., 2014. Impact de l'intensité des prélèvements forestiers sur la biodiversité (IMPRESBIO) – Rapport final – programme Biodiversité, Gestion Forestière et Politiques Publiques du MEDDE/MAAF. Nogent sur Vernisson, Irstea : 147 p.

Barbier S., Gosselin F., Balandier P., 2008. Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved - A critical review for temperate and boreal forests. *Forest Ecology and Management* vol. 254(1) pp. 1-15

Barsoum N., Fuller L., Ashwood F., Reed K., Bonnet-Lebrun A. S., Leung F., 2014. Ground-dwelling spider (Araneae) and carabid beetle (Coleoptera: Carabidae) community assemblages in mixed and monoculture stands of oak (*Quercus robur* L./*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forest Ecology and Management* vol. 321 pp. 29-41.

Bédéneau M., Sindou C., Ruchaud F., Bailly A., Crémière L., 2001. Un partenariat scientifique original : la coopérative de données sur la croissance des arbres et des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française* vol. LIII (2) pp. 171-177

Carouille F., Baubet O., 2006. Dégâts de rongeurs en forêt : comment y remédier. *Revue Forestière Française* vol. LVIII (5), pp. 449-462

Cavard X., Macdonald S. E., Bergeron Y., Chen H. Y. H., 2011. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: Evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests. *Environmental Reviews* vol. 19, pp. 142-161

Chapman K., Whittaker J. B., W. Heal O., 1988. Metabolic and Faunal Activity in Litters of Tree Mixtures Compared with Pure Stands. *Agriculture Ecosystems & Environment* vol. 24(1-3), pp. 33-40

Dhôte J. F., 1997. Effets des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulières de hêtre ou de chêne sessile. *Revue Forestière Française* vol. XLIX (6) pp. 557-578

Forrester D. I., 2014. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. *Forest Ecology and Management* vol. 312, pp. 282-292

Gobin R., 2014. Contribution relative de la végétation du sous-bois dans la consommation en eau des placettes forestières soumises aux changements de climat et de pratiques. Thèse de doctorat, Université d'Orléans. 140p.

Gosselin F., 2004. Influence de la composition et de la richesse spécifique du peuplement arboré sur la biodiversité. *Biodiversité et gestion forestière : connaître pour préserver*. M. Gosselin and O. Laroussinie. Antony,

Coédition GIP Ecofor - CEMAGREF Editions : pp. 127-148

Grossiord C., Gessler A., Granier A., Pollastrini M., Bussotti F., Bonal D., 2014. Interspecific competition influences the response of oak transpiration to increasing drought stress in a mixed Mediterranean forest. *Forest Ecology and Management* vol. 318, pp. 54-61

IGN, 2014. Résultats d'inventaire forestier. Résultats standards. La France administrative. Les résultats des campagnes d'inventaire 2009 à 2013, Institut National de l'Information Géographique et Forestière : 176 p.

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

Lavelle P., Decaens T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie P., Mora P., Rossi J. P., 2006. « Soil invertebrates and ecosystem services. » *European Journal of Soil Biology* 42 : S3-S15.

Merlin M., Perot T., Perret S., Korboulewsky N., Vallet P., 2015. Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine. *Forest Ecology and Management* vol. 339(0), pp. 22-33

Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Jouzel J., 2014. Le climat de la France au XXIème siècle, volume 4, scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer, Direction générale de l'Énergie et du Climat : 62 p.

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(1), pp. 155-161

Pretzsch H., Block J., Dieler J., Hoang Dong P., Kohnle U., Nagel J., Spellmann H., Zingg A., 2010.

Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Annals of Forest Science* vol. 67(7), pp. 712.

Reineke L. H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* vol. 46(7) pp. 627-638

Richards A. E., Forrester D. I., Bauhus J., Scherer-Lorenzen M., 2010. The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiology* vol. 30(9) pp. 1192-1208

Scherer-Lorenzen M., Körner C., Schulze E.-D. (in press). *Forest Diversity and Function. Temperate and Boreal Systems*. Berlin, Springer Verlag.

Toïgo M., Vallet P., Tuilleras V., Lebourgeois F., Rozenberg P., Perret S., Courbaud B., Perot T., 2015a. Species mixture increases the effect of drought on tree ring density, but not on ring width, in *Quercus petraea*-*Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management* vol. 345, pp. 73-82

Toïgo M., Vallet P., Perot T., Bontemps J.-D., Piedallu C., Courbaud B., 2015 b. Over-yielding in mixed forests decreases with site productivity. *Journal of Ecology* vol. 103, pp.502-512

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

Van Lerberghe P., Balleux P., 1999. Lutter contre les dégâts du gibier dans les plantations forestières. *Forêt Wallonne Cahier Technique n° 6*, pp. 9-13