



Les recherches forestières à l'INRA : acquis, évolutions et défis pour le futur

Jean-Marc Guehl, Yves Birot, Thierry Caquet

► To cite this version:

Jean-Marc Guehl, Yves Birot, Thierry Caquet. Les recherches forestières à l'INRA : acquis, évolutions et défis pour le futur. Archorales : chercheurs en forêts, 16, Editions INRA, 196 p., 2015, Archorales, 9782738013712. hal-02793110

HAL Id: hal-02793110

<https://hal.inrae.fr/hal-02793110>

Submitted on 5 Jun 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

LES RECHERCHES FORESTIÈRES À L'INRA : ACQUIS, ÉVOLUTIONS ET DÉFIS POUR LE FUTUR



JEAN-MARC GUEHL YVES BIROT THIERRY CAQUET

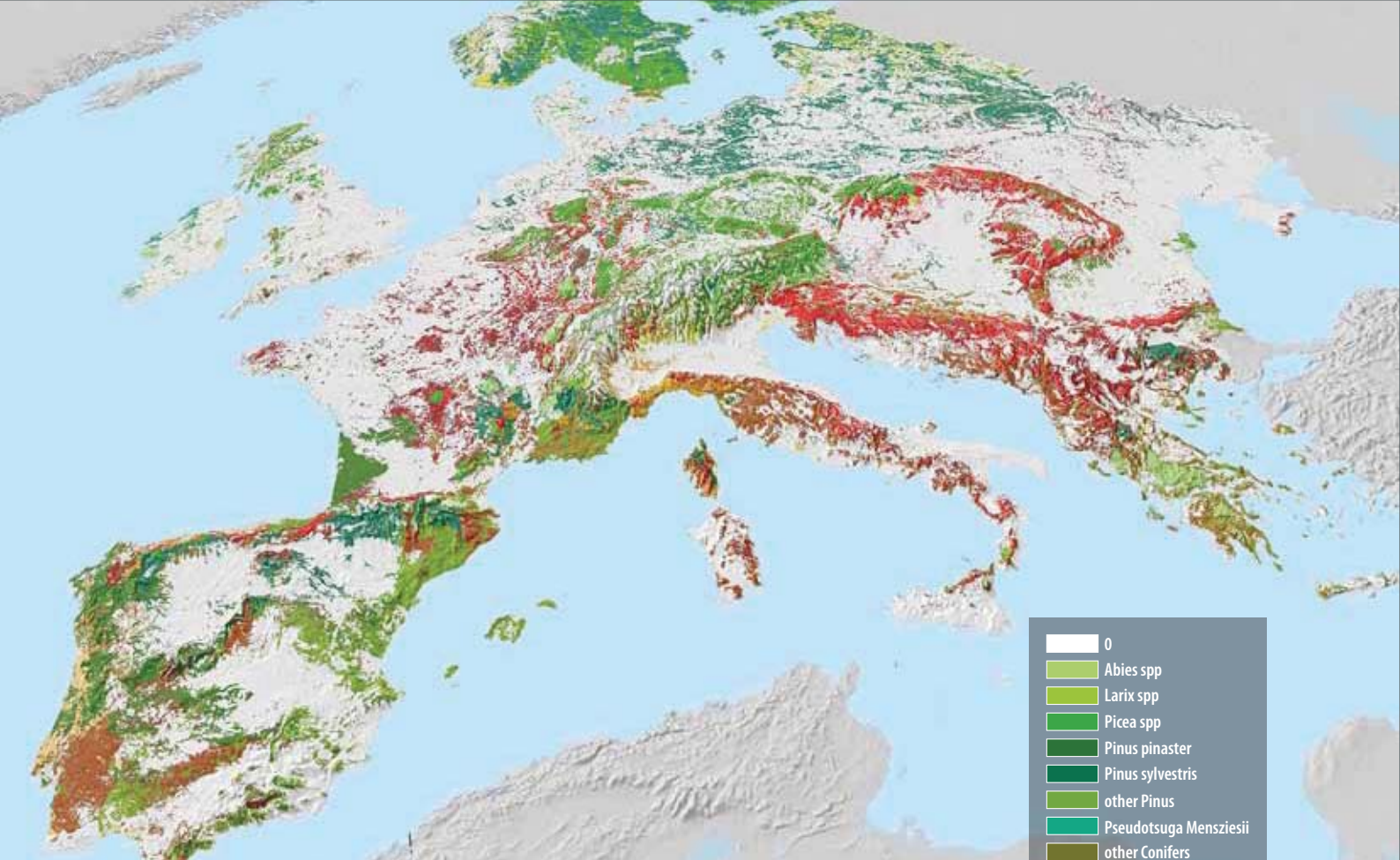
14

Depuis leur intégration à l'Inra en 1964, les recherches forestières relèvent de la biologie, de l'écologie et de l'économie tout en privilégiant toujours une dimension finalisée tournée vers les applications (gestion durable des ressources et des milieux, conservation des espèces, restauration des milieux...). En ce début des années 1960, le déficit structurel de la France en bois, notamment en bois résineux, était patent. Les objectifs des recherches visaient donc exclusivement l'amélioration quantitative et qualitative de la ressource. En 1966, Pierre Bouvarel et Jean Pardé écrivaient : « Produire plus de bois en enrichissant des forêts existantes ou en créant de nouvelles forêts : la recherche forestière doit jouer, et joue son rôle dans cette opération de grand style ».

JEAN-MARC GUEHL, directeur de l'UMR1137 Écologie et écophysiologie forestière Inra - université de Lorraine à Nancy, ancien chef du département EFPA (2005-2013), membre correspondant national de l'Académie d'agriculture de France

YVES BIROT, chef de département honoraire Recherches forestières (1989-1998), membre titulaire de l'Académie d'agriculture de France

THIERRY CAQUET, chef du département EFPA



Carte de répartition des espèces arborées forestières dominantes à l'échelle de l'Europe.

[Source : EFI-ALTERRA (Brus, Hengeveld, Walvoort, Goedhart, Heidema, Nabuurs & Gunia, 2012, Statistical mapping of tree species over Europe, European Journal of Forest Research 131:1 145-157)]

L'ouverture sur les problématiques environnementales durant les années 1980, puis sur les autres attentes de la société (biodiversité, services écosystémiques, adaptation au changement climatique, développement de la bioéconomie, loisirs en forêt...) depuis la fin des années 1990, a été un moteur important de l'évolution des questionnements et thématiques de la recherche.

Les disciplines forestières traditionnelles (sylviculture, dendrométrie, qualité du bois, amélioration génétique, pathologie, entomologie) ont été progressivement complétées par d'autres disciplines plus génériques et intégratives (écologie, génétique moléculaire et génomique, science des matériaux, modélisation...). Les arbres, les forêts et le matériau bois sont devenus de « véritables » objets de recherche. Enfin, l'époque a été également marquée par plusieurs événements climatiques extrêmes (sécheresse de 1976 puis sécheresse-canicule de 2003, dépérissements forestiers des années 1980, froid de 1985, grands incendies de 1985, tempêtes de 1999 puis de 2009) qui ont sensibilisé les chercheurs et les pouvoirs publics à la durabilité des forêts.

Les évolutions des programmes de recherche traduisent en conséquence : la transition d'une gestion de l'arbre et du peuplement vers une gestion intégrée de l'écosystème forestier ; l'approche des questions forestières à l'échelle du paysage et de territoires plus vastes ; l'élargissement des fonctions d'intérêt assignées aux forêts, de la production ligneuse aux services environnementaux et sociétaux ; la prise en compte des principes de la gestion forestière durable ; l'émergence des enjeux forestiers dans les discussions internationales liées à la biodiversité et au changement climatique.

Programmes et organisation de la recherche forestière

Les évolutions scientifiques de la recherche forestière au cours des cinquante dernières années peuvent être décrites, globalement, en trois étapes, avec des recouvrements temporels (Biro et Houllier, 2010). La première étape est fondée sur une approche descriptive visant à observer et quantifier les phénomènes par des analyses empiriques recourant parfois à des méthodes statistiques évoluées. La deuxième étape met l'accent sur les mécanismes et processus à l'échelle des arbres et des écosystèmes (en notant que le terme « écosystème » est absent des textes d'orientation du département jusqu'en 1990). Il s'agit alors d'une approche déterministe visant la compréhension du fonctionnement de systèmes complexes. La troisième étape - qui reste largement à construire - cherche à utiliser les connaissances disponibles avec des outils et des méthodes permettant de prédire la réponse des écosystèmes aux contraintes et de favoriser leur adaptation.

Au cours des années 1960 et 70, les équipes de recherche s'étoffent considérablement [cf. dans "REPÈRES", point ⑤ page 26] mais l'organisation des recherches reste structurée, comme au temps de l'ancienne station de recherche et expériences forestières, autour de cinq grands domaines : écologie (climat, sol, végétation), sylviculture, amélioration génétique, protection de la forêt (pathologie, zoologie, lutte contre les incendies) et qualité des bois (Bouvarel, 1986).

En 1985, en conformité avec les orientations nationales insufflées par Guy Paillotin (directeur général adjoint de l'Inra en charge des affaires scientifiques), le chef du département Recherches forestières, Jean-François Lacaze, instaure les programmes disciplinaires comme outils d'animation et de pilotage de la recherche. Cette initiative affiche clairement l'exigence d'une dimension scientifique renforcée et se traduit, notamment, par le recrutement de chercheurs sur des profils plus académiques. La dimension appliquée des recherches n'est pourtant pas abandonnée ; c'est plutôt un modèle hybride de recherche finalisée qui est alors instauré. Le système se révèle bénéfique aux équipes de petite taille qui peuvent, à travers des liens de réseau, compenser leur isolement. Il sera progressivement abandonné à partir de 1998, avec la montée en puissance des unités mixtes de recherche.

Entre-temps, en 1993, est créé le groupement d'intérêt public (Gip) Ecofor (Écosystèmes forestiers) traduisant l'effort français de renforcement et de structuration des recherches dédiées aux écosystèmes forestiers en réponse aux engagements pris lors de la mise en place des conférences ministérielles pour la protection des forêts en Europe (<http://www.foresteurope.org/fr/FOREST-EUROPE-detail>). Le programme Deforpa (Dépérissement des forêts attribué aux pollutions atmosphériques) initié en 1984, est le premier jalon anticipant ce mouvement. Géré de façon très ouverte, sans privilégier aucune hypothèse, il permet de lancer des études intégrées sur les cycles des éléments minéraux, la dendro-écologie...

À travers ces évolutions, les recherches forestières contribuent au développement du pilier « environnement » de l'Inra concrétisé également par la création ultérieure (en 2003) des Ore (Observatoires de recherche en environnement) puis (en 2011) des Soere (Systèmes d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement). Ces structures nouvelles (Soere Forêt pour la recherche forestière) favorisent la mise en réseau des différents sites et unités et leur insertion dans les réseaux internationaux. Elles contribuent en outre à la reconnaissance des travaux de l'Inra par un public élargi et vont se révéler pertinentes pour aborder les problématiques du changement climatique.

Le rapport « Birot-Franc », présenté en décembre 2000 au conseil scientifique de l'Inra, en préalable au renforcement de la recherche forestière (RFMNAL, 2002), contribue à la création en 2004 du département « Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques » (EFPA)¹. Ce rapport positionne les recherches forestières de l'Inra dans les grands domaines de l'écologie et vise à renforcer l'économie forestière, alors très faible. Trente postes de chercheurs et d'ingénieurs sont ainsi créés au sein du département FMN (puis EFPA) et d'autres départements, en privilégiant les recherches utiles à la filière « forêt-bois » et aux finalités écologiques des milieux forestiers. Quatre postes originaux d'interface « recherche et développement » sont ouverts pour accueillir pendant trois ans des ingénieurs de la filière forêt-bois, ainsi immergés dans la recherche avant de repartir dans leur structure professionnelle d'origine. Ce montage, unique à l'Inra, se révèle être un succès en permettant un transfert efficace des connaissances scientifiques vers le monde économique et professionnel ; il est encore en œuvre aujourd'hui.

Au début des années 1980 et jusqu'à aujourd'hui, la recherche forestière Inra s'ouvre très largement et avec succès à la coopération scientifique européenne à travers les différents instruments : projets de recherche du programme-cadre de l'UE, ERA-Nets, système Cost, Institut européen de la forêt (EFI : Andrieu *et al.*, 2013) créé en 1993... Les chercheurs Inra coordonnent un nombre important de projets et s'investissent dans la responsabilité du management des structures de coopération. L'Inra a ainsi largement œuvré à l'avènement d'un Espace européen de la recherche dans le domaine forestier.

Des acquis majeurs en sciences forestières et en écologie

► Croissance et production des forêts

Historiquement, la science forestière s'est d'abord attachée à quantifier les variations observables dans les écosystèmes forestiers (composition et dynamique, conditions de milieu) et leurs conséquences sur la production ligneuse et la qualité du bois. La mise en œuvre pratique de ces travaux a conditionné la typologie des stations forestières² et permis l'évaluation des relations station-production ligneuse. Les chercheurs ont essayé ensuite de quantifier la dynamique et la productivité des peuplements forestiers, en fonction de leur

¹ Les réflexions visant à définir le périmètre et les contenus thématiques du département EFPA ont été menées dans le cadre de la mission confiée en décembre 2002 par la DG de l'Inra à Jean-Baptiste Bergé, directeur scientifique adjoint Econat (Environnement, écosystèmes cultivés et naturels).

² Une station forestière est une « étendue de forêt de superficie variable (quelques m² à plusieurs dizaines d'hectares), homogène dans ses conditions physiques et biologiques : mésoclimat, topographie, géomorphologie, sol, composition floristique et structure de la végétation spontanée ».

© Inra - B. Nicolas



La sixième cérémonie des Lauriers de l'Inra en 2011 récompense Antoine Kremer. En 2006, il avait reçu le prestigieux prix Wallenberg. De gauche à droite : François Houllier, Marc Bonnet-Masimbert, Jean-Marc Guehl, Antoine Kremer (Laurier d'excellence), Yves Birot, Francis Cailliez.

densité, de leur structure et des traitements sylvicoles. Les premières approches, fondées sur le suivi à long terme de parcelles expérimentales, ont conduit à l'élaboration de tables de production basées sur des relations empiriques. Des travaux ultérieurs ont fait émerger les notions de densité de peuplement et de compétition inter-arbres et ont ouvert la voie au développement de véritables modèles dynamiques capables d'opérer au niveau du peuplement et ultérieurement de l'arbre. Aujourd'hui, des modèles simples de croissance et production sont disponibles pour les espèces forestières les plus importantes. La plateforme de simulation logicielle Capsis, créée en 1994, permet de faire des projections à partir de modèles de dynamique forestière et d'évaluer les impacts de différentes stratégies sylvicoles (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012).

Si Nancy est le berceau de la dendrométrie et des recherches en sylviculture et croissance - et reste très actif dans ces domaines - ces recherches ont également été développées à Bordeaux (pour la forêt cultivée) et à Avignon. La plateforme logicielle Capsis, maintenant utilisée internationalement, est installée à Montpellier.

› Caractérisation des propriétés du bois en relation avec sa transformation et son utilisation

Sur le site de Nancy, la technologie des rayons X, en ouvrant la voie aux tests non destructifs, a été déterminante dans le développement des recherches sur les variations de densité du bois liées aux modes de croissance des arbres, et sur les relations entre densité et autres propriétés mécaniques (Polge, 1978). Plus tard, le couplage de modèles de croissance d'arbres et de qualité du bois avec la simulation sur ordinateurs, a permis, à partir de simples mesures en forêt, de prédire les conséquences de la sylviculture sur la qualité des produits transformés, sans faire appel à des méthodes destructives, ni même à des carottes de sondage (Houllier *et al.*, 1995).

› Architecture et diversité génétique des espèces forestières

La génétique et l'amélioration des espèces forestières, réservées surtout au site d'Orléans lors de la création de ce centre, ont été également développées à Bordeaux pour l'amélioration du pin maritime, puis pour les aspects d'écologie génétique et de conservation des ressources génétiques. Les unités d'Avignon et de Kourou, en Guyane, ont également pris en charge cette dernière approche.

Dans les premières années du XX^e siècle, l'IUFRO (International Union of Forest Research Organizations) avait mis en place, pour différentes espèces, des réseaux européens d'essais comparatifs de provenances (écotypes). En confrontant ainsi les génotypes à différents milieux, les chercheurs pouvaient caractériser la variabilité géographique intra-spécifique et en appliquer les résultats à la sélection des meilleures sources de graines pour les plantations. Ultérieurement, le développement de la génétique dite « quantitative » a permis, malgré l'aspect « boîte noire » de cette démarche, l'émergence de programmes efficaces de sélection individuelle conduisant à des gains génétiques substantiels.



Coupe transversale d'un tronc de chêne.

Le développement de la biologie moléculaire et de la bioinformatique au cours des 30 dernières années a débouché sur de nombreuses applications. Le premier séquençage d'un génome d'arbre, celui du peuplier, a été réalisé par un consortium américain, canadien et européen, incluant des équipes de l'Inra (Tuskan *et al.*, 2006). Cette première étape de la compréhension de l'expression et de la fonction des gènes est maintenant étendue au séquençage d'espèces de Fagacées et de Pinacées.

La possibilité d'appréhender la diversité de « gènes neutres »³ a ouvert la voie à de puissantes analyses de génétique des populations et d'évolution de la diversité génétique, depuis l'échelle

de l'arbre jusqu'à celle de l'aire entière de l'espèce. Kremer et ses partenaires européens (2002) sont ainsi parvenus à une bonne compréhension de l'évolution passée et présente des chênes européens, grâce à une étude portant sur 2 600 populations, la plus vaste jamais menée à cette date sur un organisme vivant. De tels résultats ont débouché sur des outils de gestion intégrée des ressources génétiques forestières, maintenant organisée à l'échelle européenne (Lefèvre *et al.*, 2013).

› Arbres et forêts en interaction avec leur environnement physique

La réalisation de bilans hydriques à vaste échelle a permis de mieux comprendre les interactions entre le cycle hydrologique et les couverts forestiers (Aussenac et Granier, 1979), notamment quant à la répartition entre eau « verte » (fraction évapotranspirée vers l'atmosphère qui est forte dans le cas des forêts) et eau « bleue » (écoulée dans le sol et en surface). Ces recherches sur les cycles hydrologiques et minéraux, ainsi que sur la fertilité, ont d'abord été développées à Nancy, avant d'essaimer à Bordeaux pour ce qui concerne les forêts cultivées.

Dans les années 1980, les inquiétudes croissantes au sujet des dépérissements forestiers attribués à la pollution atmosphérique et aux pluies acides ont catalysé nombre de recherches sur le fonctionnement (et le dysfonctionnement) des écosystèmes forestiers. En France, le programme Deforpa (Landmann et Bonneau, 1995) a ainsi permis, outre l'élucidation des causes principales de ces perturbations, des avancées importantes de nos connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.

La quantification des échanges forêt-atmosphère, liés aux stocks et aux flux d'énergie et de matière, est devenue une composante majeure de la recherche grâce à des avancées technologiques décisives⁴. Suite au progrès dans les connaissances sur les cycles biogéochimiques des nutriments majeurs (Ranger et Turpault, 1999), la nécessité de disposer d'un continuum dans les systèmes de suivi à long terme, allant de simples réseaux d'observation à des dispositifs de type observatoires de recherche, coordonnés et fortement instrumentés, a été clairement identifiée. Notre investissement dans le réseau Soere Forêt a été réalisé dans ce cadre, avec une intégration particulièrement intéressante dans les larges réseaux européens et en forêt tropicale humide (collaboration avec le Cirad).

Une priorité a été donnée également aux recherches en physiologie de l'arbre et en écophysiologie, avec des approches de biologie intégrative. La compréhension du comportement de l'arbre en réponse aux contraintes environnementales a porté notamment sur la régulation des échanges gazeux foliaires et l'efficacité d'utilisation de l'eau, ainsi que sur les phénomènes de cavitation et d'embolie des vaisseaux du bois induits par la sécheresse (Cochard et Tyree, 1990). Les isotopes stables de différents éléments (H, C, O et N) se sont révélés être des traceurs très utiles, instantanés ou intégrés dans le temps (*e.g.* dendro-isotopie) du fonctionnement des arbres et des écosystèmes. Ces méthodes ont notamment été utilisées pour localiser le niveau de prélèvement des éléments minéraux et de l'eau dans le sol, pour évaluer l'influence de l'utilisation passée des terres sur les forêts d'aujourd'hui (Dupouey *et al.*, 2002) et pour analyser la diversité fonctionnelle des espèces arborées dans des couverts tropicaux complexes (Guehl *et al.*, 1998).

› Santé des arbres et des forêts en relation avec leur environnement biotique

Pendant plusieurs décennies, les recherches se sont focalisées sur la description et la compréhension des cycles biologiques des insectes et microorganismes pathogènes des arbres forestiers, connaissances pré-requises au développement des méthodes de lutte. Elles s'intéressent aussi maintenant à des questions d'écologie des populations et à la problématique des invasions biologiques.

Des recherches sur les microorganismes symbiotiques de la rhizosphère (en particulier les ecto-mycorhizes), leur écologie et leurs interactions avec les arbres hôtes et les cortèges bactériens du sol, ont débouché sur des applications aux plantations forestières (Le Tacon *et al.*, 1987).

³ Grâce aux études iso-enzymatiques, puis par celles des marqueurs de l'ADN.

⁴ Par exemple, la mesure des flux par la méthode des corrélations turbulentes à l'aide de « tours à flux ».



Tour de capteurs dans la forêt guyanaise pour l'étude du microclimat et des flux et bilans d'échanges de gaz (CO_2 et H_2O) entre l'écosystème forestier et l'atmosphère (projet Guyaflux).

© Inra - J. Bonal

Les programmes de séquençage et les recherches en cours sur la génomique comparée des grands types fonctionnels de champignons (pathogènes, symbiotiques, saprophytiques) permettent des avancées décisives dans la compréhension des interactions entre ces organismes et les arbres (ou le sol) (Martin *et al.*, 2008).

La recherche en entomologie forestière a été développée à Orléans et Avignon, puis à Bordeaux, tandis que les recherches sur les champignons pathogènes et les mycorhizes étaient initialement menées à Nancy. Ultérieurement, la pathologie forestière a également été développée à Bordeaux.

› Biologie et dynamique des populations et des communautés

Ces disciplines ont fortement progressé au cours des dernières décennies dans la mesure où la possibilité de mesurer les flux de gènes et de simuler la dynamique des populations ouvrait des perspectives nouvelles, à différents niveaux d'échelle spatiale, y compris celle du paysage. Ceci permet en particulier d'étudier les mécanismes qui affectent la biodiversité dans sa structure et son évolution. Un bon exemple en est donné par Jactel et Brockerhoff (2007) qui ont montré que la plantation d'îlots d'arbres feuillus à l'intérieur de vastes monocultures de pin, réduit l'impact de certains insectes ravageurs, grâce à l'hébergement, au sein de ces îlots, d'ennemis naturels de ces insectes (parasitoïdes, oiseaux, arthropodes prédateurs).

Les nouveaux enjeux scientifiques et sociétaux

› Le milieu n'est pas invariant

Des résultats, obtenus parfois dès les années 1980, ont mis à mal certains principes majeurs affirmant l'invariance tendancielle de la nature (*e.g.* à l'échelle des cycles forestiers). Cela concerne la notion de climax, l'indice de fertilité de stations, les interactions génotype x environnement, la conservation des espèces et des habitats... Se rajoutant aux impacts durables des changements d'usage des terres, les changements environnementaux



Procession de chenilles processionnaires dans un pin, une menace mortelle pour les forêts.

rapides d'origine anthropique intervenus au cours des dernières décennies (accroissement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, hausse des températures, dépôts azotés ou soufrés atmosphériques) ont entraîné des évolutions notables : augmentation de la productivité des forêts en Europe (Becker, 1989), acidification ou eutrophisation des sols, migration altitudinale des plantes, ainsi que des changements dans la répartition de certaines espèces d'insectes (Robinet *et al.*, 2014) de champignons (Marçais et Desprez-Loustau, 2014) ou organismes divers. Des résultats obtenus par nos équipes et l'ensemble de ceux compilés dans le rapport récent du Giec montrent très clairement qu'au cours de la dernière décennie, le changement climatique d'origine anthropique est passé du statut de prévisible à celui d'avéré. Cette nouvelle donne requiert la définition de stratégies d'atténuation et d'adaptation, la question restant celle de l'incertitude sur l'amplitude des changements à venir, en relation avec l'intensité d'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

› Répondre à des enjeux plus diversifiés

Les enjeux et les objectifs des recherches ont considérablement évolué au cours des deux dernières décennies, en relation avec la diversification des attentes de la société par rapport aux forêts (Biro *et al.*, 2013). Les enjeux liés à la compétitivité du secteur forestier restent clairement au centre de nos préoccupations à travers les travaux concernant : l'approche des aspects techniques, environnementaux et économiques de la sylviculture ; les mécanismes de formation du bois, les déterminants de sa qualité, les processus technologiques de transformation et les produits à base de bois. La conception des arbres du futur, fondée sur les méthodologies modernes de génomique et de sélection génétique moléculaire (Muranty *et al.*, 2014 ; Plomion *et al.*, 2014), est un enjeu important pour les plantations forestières. Les objectifs visés concernent à la fois une diversité de caractères relatifs au bois (propriétés du matériau, son utilisation pour la production d'énergie ou de biomolécules), mais également l'adaptation des arbres aux contraintes du milieu (sécheresse, excès d'eau...) et la résistance aux maladies (rouilles du peuplier...).

La mise en œuvre du concept de gestion durable des forêts implique la prise en compte des contraintes évoquées plus haut (dépôts soufrés et azotés atmosphériques, événements climatiques extrêmes tels que sécheresses ou tempêtes, bio-agressions). Elle nécessite aussi de considérer les aspects de conservation et de restauration des milieux. Les recherches sur le fonctionnement des écosystèmes sont orientées vers ces questions et cherchent à intégrer les dimensions économiques et sociétales.

Le concept de gestion multifonctionnelle des forêts met en avant la diversité des services écologiques potentiellement rendus par les écosystèmes forestiers : maintien de la biodiversité des espèces, séquestration de carbone, préservation ou restauration de la qualité de l'eau. L'évaluation exacte de ces services est un préalable nécessaire à leur valorisation économique qui devient l'objet d'enjeux largement internationalisés (*e.g.* conférences sur le climat, sommet de Rio) et socialement sensibles. Face à ces orientations nouvelles, il convient néanmoins de

rappeler que la rentabilité forestière a diminué en Europe au cours des dernières décennies, en particulier pour des petits propriétaires peu motivés par la valorisation de la production, ce qui pose aujourd'hui la question d'un « désert vert » par rapport à une forêt « vivante » (Leonard, 2004).

► Faire face aux défis du changement climatique

Les scénarios issus des modèles climatiques prédisent, à l'horizon 2050 ou 2100, un réchauffement de plusieurs degrés, avec une accentuation des déficits hydriques estivaux sur une grande partie de l'Europe. La modélisation de l'aire de répartition potentielle des grandes essences forestières sur la base de scénarios climatiques régionalisés fait apparaître des modifications profondes. À l'échelle de la France, les simulations montrent une spectaculaire extension vers le nord des espèces méditerranéennes (e.g. chêne vert), avec un risque de disparition de certaines d'entre elles à basse altitude et sur les sols peu profonds. En contrepartie, les espèces atlantiques plus septentrionales et continentales (hêtre, pin sylvestre, érable plane et sycamore) deviendraient marginales dans la partie nord. De nombreuses incertitudes sur le comportement des essences subsistent cependant. Quelles seront leurs capacités à migrer pour coloniser les nouvelles niches climatiques à un pas de temps de quelques dizaines d'années ? Seront-elles capables de s'adapter, génétiquement ou à travers leurs plasticité phénotypique ? Quels seront les impacts sur les communautés microbiennes des sols ? Quels seront les équilibres avec les nouveaux cortèges de pathogènes et de champignons symbiotes, ou d'insectes ravageurs ?

Les recherches en cours concernent le rôle des forêts dans l'atténuation du changement climatique, la prévision des réponses physiologiques et génétiques à ce changement, ou encore l'élaboration de modes de gestion anticipatifs (choix du matériel végétal, assistance à la migration des espèces, sylviculture ; Lefèvre *et al.*, 2014). Ces approches sont très largement transversales par rapport aux différentes disciplines scientifiques.

Conclusion

Au cours des dernières décennies les recherches forestières de l'Inra ont évolué vers des approches interdisciplinaires plus intégrées, à travers un ancrage plus fort dans les différents domaines de l'écologie. Le développement de recherches prédictives permettant de répondre aux enjeux des changements climatiques et globaux reste un défi important. La mise en place de visions transverses articulant les dimensions biophysiques et socio-économiques (Fiquepron *et al.*, 2013) est nécessaire afin de mieux prendre en compte les problématiques de gestion durable et multifonctionnelle des forêts. L'approfondissement de nos liens partenariaux avec les différents acteurs de la recherche et développement en France, en Europe et à l'international est indispensable pour atteindre ces objectifs.

BIBLIOGRAPHIE SCIENTIFIQUE

- Aussenac G., Granier A., 1979. Étude bioclimatique d'une futaie feuillue de l'est de la France. II. Étude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Annales des Sciences Forestières* 36(4): 265-280.
- Becker M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1110-1117.
- Brus D.J., Hengeveld G.M., Walvoort D.J.J., Goedhart P.W., Heidema A.H., Nabuurs G.J., Gunia K., 2011. Statistical mapping of tree species over Europe. *European Journal of Forest Research* 131 (1): 145-157.
- Cochard H., Tyree M.T., 1990. Xylem dysfunction in *Quercus*: Vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology* 6(4): 393-407.
- Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., de Coligny F., 2012. Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science* 69(2): 221-233.
- Dupouey J.L., Dambrine E., Lafitte J.D., Moares C., 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* 83(11): 2978-2984.
- Fiquepron J., Garcia S., Stenger A., 2013. Land use impact on water quality: valuing forest services in terms of the water supply sector. *Journal of Environmental Management* 126: 113-121.
- Guehl J.M., Domenach A.M., Bereau M., Barigah T.S., Casabianca F.A., Garbaye J., 1998. Functional diversity in an Amazonian rainforest of French Guyana: A dual isotope approach ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$). *Oecologia* 116: 316-330.
- Houllier F., Leban J.M., and Colin F., 1995. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 74(1): 91-102.
- Jactel H., Bockerhoff E.G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* 10(9): 835-848.
- Kremer A., Kleinschmit J., Cottrell J., Cundall E.P., Deans J.D., Ducouso A., Konig A.O., Lowe A.J., Munro R.C., Petit R.J., and Stephan B.R., 2002. Is there a correlation between chloroplast and nuclear divergence, or what are the roles of history and selection on genetic diversity in European oaks? *Forest Ecology and Management* 156(1-3): 75-87.
- Landmann G., Bonneau M., 1995. *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains*. Springer Verlag.
- Lefèvre F. *et al.*, 2013. Dynamic conservation of forest genetic resources in 33 European countries. *Conservation Biology* 27(2): 373-384.
- Lefèvre F., Boivin T., Bontemps A., Courbet F., Davi H., Durand-Gillmann M., Fady B., Gauzeur J., Gidoïn C., Karam M.J., Lalague H., Oddou-Muratorio S., Pichot C., 2014. Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Sciences* 71(7): 723-739.
- Le Tacon F., Garbaye J., Carr G., 1987. The use of mycorrhizas in temperate and tropical forests. *Symbiosis* 3(2): 179-205.
- Marçais B., Desprez-Loustau M.L., 2014. European oak powdery mildew: impact on trees, effects of environmental factors, and potential effects of climate change. *Annals of Forest Science* 71(6): 633-642.
- Martin F. *et al.*, 2008. The genome of *Laccaria bicolor* provides insights into mycorrhizal symbiosis. *Nature* 452: 88-92.
- Muranty H., Jorge V., Bastien C., Lepoittevin C., Bouffier L., Sanchez L., 2014. Potential for marker-assisted selection for forest tree breeding: lessons from 20 years of MAS in crops. *Tree Genetics and Genomes* 10: 1491-1510.
- Plomion C., Chancerel E., Endelman J., *et al.*, 2014. Genome-wide distribution of genetic diversity and linkage disequilibrium in a mass-selected population of maritime pine. *BMC Genomics* 15, 171.
- Polge H., 1978. Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Science and Technology* 12(3): 187-96.
- Ranger J., Turpault M.P., 1999. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* 122: 139-154.
- Robinet C., Rousselet J., Roques A., 2014. Potential spread of the pine processionary moth in France: preliminary results from a simulation model and future challenges. *Annals of Forest Science* 71:149-160.
- Tuskan G.A. *et al.*, 2006. The genome of black cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. 1 Gra). *Science* 313: 1596-1604.

DOCUMENTS

- Andrieu J., Guehl J.M., Peyron J.L., 2013. L'Institut européen de la forêt et la politique forestière française. *Revue Forestière Française* LXV: 141-144.
- Birot Y., Houllier F., 2010. Science et Forêt: acquis, évolutions et défis. In *Gérer la forêt des deux côtés de l'Atlantique. Divergence et convergence de la foresterie européenne et américaine*, AgroParisTech ENGREF, pp. 65-78.
- Birot Y., Déglise X., Peyron J.L., Thibaud B., Roman-Amat B., 2013. Les forêts, leurs produits et services dans un contexte changeant: apports potentiels de la science. In *Potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement*, Académie d'Agriculture de France, 24 pp.
- Bouvarel P., 1986. 1946 - 1986. 40 ans de recherche agronomique. La recherche forestière, Inra, 79 - 85.
- Bouvarel P., Pardé J., 1966. Fascicule 20^e anniversaire de l'Inra. Contribution de la recherche à une politique forestière, Inra, 185-198.
- Inra Mensuel, Les dossiers. La forêt et le bois. Recherches, 1991, n°5, 52 pp.
- Inra Mensuel, Les dossiers. La gestion durable des forêts: contribution de la recherche, automne 1996, n°12, 91 pp.
- Leonard J.P., 2004. *Forêt vivante ou désert boisé; la forêt française à la croisée des chemins*. L'Harmattan.
- Les Dossiers de l'Environnement de l'Inra. Écosystèmes et changements globaux, n° 8, mai 1994, 296 pp.
- Les Dossiers de l'Environnement de l'Inra. Forêts, n° 15, septembre 1997, 194 pp.
- Les Dossiers de l'Environnement de l'Inra. Forêts et tempête, n° 20, décembre 2000, 336 pp.
- Renforcement des recherches sur les forêts, les milieux naturels et les activités qui leur sont liées. Juin 2002.
- Tree species maps for European Forests (http://www.efi.int/portal/virtual_library/information_services/mapping_services/tree_species_maps_for_european_forests). EFI-ALTERRA.
- Vallauri D., Grel A., Granier E., Dupouey J.L., 2012. Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. *Rapport WWF/Inra*, Marseille, 64 pages + CD.