

La forêt française face au changement climatique

Il est maintenant établi que les forêts connaîtront une nette évolution du climat d'ici cent, voire cinquante ans. Vont-elles s'adapter, se modifier radicalement ou dépérir ? Pour répondre à ces questions, les chercheurs de l'Inra travaillent à décrypter le fonctionnement de ces écosystèmes complexes ainsi que le dialogue intime qu'ils entretiennent avec le climat. Car si les forêts vont subir les assauts du changement climatique, elles sont aussi capables de l'atténuer. Les recherches de l'Inra ont également l'objectif finalisé de donner des solutions à la filière forêt-bois pour une gestion durable de la ressource. Pour un sylviculteur, cent ans, c'est aussi l'âge moyen d'exploitation d'un arbre. Il faut donc agir dès maintenant.



INRA



© Inra / Michel Meuret

1 Changement climatique : à quoi peut-on s'attendre ?

Le changement climatique modifie le fonctionnement de l'arbre et de l'écosystème forestier en général. Certains effets peuvent être bénéfiques, la plupart sont néfastes en l'absence d'adaptation. Les extrêmes climatiques pourraient aussi jouer un rôle décisif. Malgré des incertitudes, les nombreuses recherches de l'Inra permettent d'entrevoir les impacts à venir, les peuplements les plus vulnérables ainsi que des pistes d'adaptation.

2 011 a été déclarée « année internationale des forêts » par l'assemblée générale de l'ONU. Si les forêts sont ainsi mises à l'honneur, c'est en raison des nombreux services qu'elles rendent à la société. Stockage du CO₂, production d'eau de qualité, action sur le microclimat, protection des sols contre l'érosion ou tout simplement accueil du public, leur apport est loin de se cantonner à la production de bois. L'usage du bois lui-même va se diversifier avec de nouvelles utilisations énergétiques de la biomasse ligneuse (chaufferies bois, biocarburant). Au niveau national, l'importance de cette multifonctionnalité a été rappelée en 2007 par les conclu-

sions du Grenelle de l'environnement et des Assises de la forêt.

La forêt est également un réservoir de biodiversité, car elle reste un écosystème protégé où l'homme intervient peu en comparaison avec les zones cultivées. La diversité de la forêt française métropolitaine est d'ailleurs unique en Europe. La France étant située au carrefour de quatre zones bioclimatiques, on y compte autant d'écosystèmes forestiers différents : la forêt de plaine atlantique, dont la forêt de pin maritime en Aquitaine, la forêt de plaine semi-continentale, la forêt de montagne et la forêt méditerranéenne. A l'Inra, plusieurs centres (Nancy, Bordeaux, Orléans et Avignon) s'emploient à élucider les impacts du chan-

gement climatique sur chacun de ces écosystèmes, en tenant compte de leurs spécificités (sol, essences, climat local, pratiques sylvicoles).

Changements multiples, effets contrastés

L'intensité des changements à venir fait encore débat, en raison d'incertitudes inhérentes aux prévisions des émissions de gaz à effet de serre (GES). En revanche, la nature de ces évolutions est maintenant bien connue : augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, hausse des températures, modifications du régime pluviométrique. A ces tendances moyennes s'ajoutent des épisodes extrêmes (sécheresses, canicules, tem-

pêtes) potentiellement plus fréquents et la progression des stress biotiques (ravageurs, maladies).

Quelles sont les conséquences de ces évolutions sur la production de la forêt et donc sur sa capacité à stocker du carbone ? En réalité, les effets des différentes composantes du changement climatique sont contrastés. Deux facteurs agissent dans le sens d'une amélioration de la productivité : d'une part, l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère (+ 40% depuis le milieu du XX^e siècle) qui stimule l'activité photosynthétique des arbres. D'autre part, une hausse mesurée des températures allonge la saison de végétation des arbres, en avançant les stades de développement au printemps et en retardant l'arrêt physiologique à l'automne. Par contre, la hausse des températures augmente les besoins en eau des végétaux, demande qui pourrait être plus difficile à satisfaire à l'avenir en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration et de la diminution des précipitations. Les modèles climatiques prévoient en effet des précipitations parfois plus importantes en hiver, mais globalement plus rares en été au moment où la végétation en a le plus besoin.

Quel sera le bilan au final ? Cette question pose un véritable défi à la recherche. En effet, l'analyse dendrométrique (1), qui a longtemps servi à prévoir la productivité des forêts, ne s'applique plus sur les bases classiques qui supposent un environnement constant. Il faut donc aller plus loin et approfondir les connaissances sur le fonctionnement primaire de la forêt : les flux et les stocks de carbone, d'eau, de minéraux. Mesurer ces cycles couplés sur le long terme, depuis le sol jusqu'à l'atmosphère, constitue

Des chenilles qui ne perdent pas le nord

Le changement climatique favorise aussi la propagation de certains bioagresseurs des espèces forestières. L'expansion de la processionnaire du pin vers le nord et en altitude est emblématique de ce phénomène. A tel point que l'Onerc* considère cette progression comme un bio-indicateur du changement climatique. Les chenilles de cet insecte se régalent des aiguilles de différents pins comme de celles des cèdres et peuvent considérablement freiner le développement de ces essences. De plus, hérissées de poils urticants, elles posent également un problème sanitaire pour l'homme et les animaux en provoquant des allergies.



© Inra / Christelle Robinet

CORTÈGE de chenilles processionnaires dans un pin.

Les chenilles de la processionnaire du pin meurent en dessous de -16°C. D'autre part, pour se nourrir, elles ont besoin à la fois d'une température dans le nid supérieure à 9 °C pendant la journée et d'une température ambiante supérieure à 0°C pendant la nuit. Le réchauffement climatique augmente donc le nombre de jours au cours desquels elles peuvent se nourrir et progresser entre octobre et mars. L'augmentation des températures a rendu l'ensemble de la région parisienne propice à leur développement dès 2004. La question est donc de savoir à quelle vitesse l'espèce va avancer dans cet espace devenu accueillant. L'unité de zoologie forestière du centre Inra d'Orléans a modélisé le front d'expansion de la processionnaire du pin en fonction des possibilités d'évolution du climat. Le scénario le plus optimiste indique une colonisation atteignant Paris dès 2025. Leur apparition en zone urbaine est d'autant plus inquiétante que les populations ne sont pas habituées à s'en méfier. La prévision des futures zones à risques constitue donc un enjeu majeur pour cibler les mesures de prévention.

* Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

justement l'un des objectifs de l'observatoire de recherche et d'expérimentation en environnement « F-ORE-T » mis en place en 2002 par l'Inra et ses partenaires (2). La dynamique des communautés d'organismes associés (champignons, bactéries, microfaune du sol, pathogènes...) y est

également analysée. Cet observatoire comprend un réseau dense de placettes d'observation et une quinzaine de sites-ateliers équipés de nombreux instruments de mesure. *In fine*, il permettra de comprendre l'influence du climat sur la production forestière et de développer des modèles d'évolution des écosystèmes forestiers qui en tiennent compte, tout en intégrant également l'effet des pratiques sylvicoles et des changements d'usage des terres.

Histoire d'eau

Profitant de cet outil puissant, les chercheurs de l'Inra ont développé un modèle de fonctionnement primaire des forêts centré sur les cycles couplés de l'eau et du carbone (3). A partir des premiers scénarios climatiques et des nombreux relevés réalisés par l'inventaire forestier national (IFN), celui-ci a permis de calculer le potentiel climatique de production à l'horizon 2100. Il prévoyait alors une baisse de productivité sur la moitié sud de la France et la façade ouest de la France



© Fred Fokkelman

en raison du cycle saisonnier des précipitations. En revanche, pour la partie centre et nord-est, l'effet apparaissait neutre voire même positif. Depuis, cette prévision a été affinée au niveau régional, grâce aux progrès de la communauté des climatologues et aux scénarios climatiques les plus récents du GIEC (4). Les résultats sont encore moins optimistes et prédisent des impacts négatifs pour les forêts de feuillus et de conifères quel que soit le site en France (5). Néanmoins, les arbres à feuilles caduques résisteraient mieux car ils préservent mieux les réserves d'eau du sol, notamment en hiver. En effet, la perte de leurs feuilles a deux conséquences : d'une part, il n'y a plus d'évapotranspiration, donc moins d'eau pompée dans la terre, d'autre part, l'eau de pluie n'est pas arrêtée et nourrit les réserves du sol. Les contraintes principales sont en effet les sécheresses du sol et de l'air. Au final, une sylviculture économe en eau et ajustée en fonction des réservoirs aquifères des sols serait la voie d'adaptation à privilégier.

Le visage de la forêt en 2100

Les chercheurs ont aussi tenté d'estimer les aires de répartition potentielles des espèces en 2100 (6). A partir de la situation actuelle, ils ont établi des modèles de probabilité de présence des essences forestières en fonction de certains paramètres climatiques (rayonnement, précipitation, température, évapotranspiration, jours de gels...). En injectant dans ces modèles les prévisions climatiques pour le siècle prochain, ils ont obtenu une visualisation de la future répartition des essences. Deux cas sont emblématiques. Le chêne vert, essence méditerranéenne, connaîtrait une grande expansion et pourrait même remonter jusqu'à la Loire. A l'opposé, le hêtre, qui est actuellement présent sur presque tout le territoire, pourrait fortement régresser en raison de sa sensibilité au manque d'eau. Plus généralement, les chercheurs ont classé les espèces par grands groupes biogéographiques et ont constaté la progression des groupes méditerranéens et du sud-ouest, accompagnée d'une régression des groupes montagnards. Là aussi, si les tendances sont cohérentes entre toutes les modélisations d'impacts évaluées, les modèles climatiques introduisent des incertitudes sur les limites géographiques. En outre, d'autres paramètres restent à étudier pour obtenir une vision plus précise



© Fritz Geller-Grimm

du visage de la forêt en 2100. Quelle sera la capacité des espèces à se déplacer et coloniser de nouvelles niches face à des changements si rapides, quand on sait que les chênes ont mis près de 2 000 ans à traverser la France à l'ère post-glaciaire ? Va-t-on assister à des vagues de dépérissement pour les espèces qui ne peuvent plus survivre dans leur niche actuelle ou bien une mortalité plus diffuse touchera-t-elle les arbres les moins bien adaptés ?

Sécheresse et canicule

Cette année encore la France manque d'eau, mais le cas des forêts reste peu médiatisé. Or, les forêts sont encore sous le choc des sécheresses de 2003 et 2006, comme l'attestent certains symptômes réversibles (perte de croissance, dégradation de l'état de santé, vulnérabilité accrue aux bio-agresseurs...) mais aussi des taux de mortalité anormaux. Il devient donc urgent de comprendre la vulnérabilité des forêts au manque d'eau. Le programme ANR (7) Dryade coordonné entre 2007 et 2010 par Nathalie Bréda (8) a permis d'apporter de nombreuses réponses débouchant sur un guide de gestion des forêts en crise (9). Un résultat majeur a démontré que c'est la récurrence des sécheresses, plus que leur intensité, qui semble avoir provoqué le plus de dégâts. Les chercheurs ont aussi constaté que pour un peuplement, l'adéquation du sol à l'enracinement et sa capacité à stocker l'eau sont primordiaux, tout comme les effets d'une sylviculture peu dynamique (forte densité, éclaircie tardive et faible). Au niveau de l'arbre lui-même, les facteurs décisifs sont

l'espèce, le lieu d'origine, mais aussi une forte croissance au jeune âge ou juste avant l'aléa. Ainsi, les arbres les plus performants en termes de croissance seraient les plus fragiles en cas de sécheresse. Ce qui obligerait à revoir les critères de sélections sylvicoles basés aujourd'hui sur des objectifs de productivité, avec de nouveaux compromis entre la performance de croissance et la résistance aux contraintes. Quid de la canicule ? « Si les températures extrêmes de l'été 2003 ont aggravé les effets de la sécheresse, elles ont surtout été le révélateur de l'état de stress hydrique des forêts aux yeux du grand public » explique Nathalie Bréda. « Le déficit en eau des sols en 2003 a commencé dès les mois de mai-juin, entraînant une régulation de l'évapotranspiration par fermeture des stomates. Quand la canicule est intervenue au mois d'août, les stomates de certaines espèces étaient quasi-fermés. Résultat : sans possibilité de refroidissement pour affronter de telles températures, les tissus foliaires ont brûlé et pris des couleurs anormales ». Contrairement à leur habitude, les forêts ne souffraient plus en silence...

- (1) Hauteur, diamètre, volume et âge des arbres.
- (2) Cirad, CNRS, ONF, Andra, GIP Ecofor.
- (3) Projet Carbofor, coordonné par Denis Loustau, directeur de l'unité Ephyse du centre Inra de Bordeaux.
- (4) Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- (5) Projet ANR Climator (2007-2010) coordonné par Nadine Brisson, directrice de recherche au sein de l'unité Agroclim, centre Inra d'Avignon.
- (6) Projet Climator et projet ANR « Quantification des effets des changements globaux sur la diversité végétale ».
- (7) Agence nationale de la recherche.
- (8) Directrice de recherche au sein de l'unité Ecologie et écophysologie forestière du centre Inra de Nancy.
- (9) Guide de gestion des forêts en crise sanitaire, 2011, Xavier Gauquelin, coord., ONF / IDF.



© Clarita

2 Comprendre pour faire face

Afin d'offrir des solutions pour adapter les forêts au changement climatique, les scientifiques de l'Inra doivent comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes complexes. Depuis le rôle de la diversité génétique jusqu'aux mouvements du vent lors d'une tempête, leurs recherches se font sur tous les fronts et à de nombreuses échelles. En voici quelques exemples.

Nous avons tous fait de la dendrochronologie en comptant les cernes d'un arbre coupé pour connaître son âge. Les chercheurs se livrent au même exercice en prélevant des petites carottes de bois dans le tronc, mais ils en retirent quelques informations supplémentaires... En mesurant très précisément la largeur des cernes, ils peuvent évaluer la productivité des forêts année après année. Grâce, entre autres, aux chercheurs de Nancy, cette approche a fourni un des résultats les plus importants en recherche forestière de ces dernières années : les forêts poussent

de plus en plus rapidement depuis environ un siècle et notamment en Europe depuis quelques décennies. Dans quelle mesure le phénomène est-il dû aux effets du changement climatique, à l'augmentation des dépôts atmosphériques d'azote ou aux pratiques sylvicoles ? Pour élucider la question, les chercheurs analysent de plus en plus finement la composition chimique des cernes de bois. Les progrès dans ce domaine permettent non seulement de déterminer l'impact de l'évolution des conditions environnementales mais ils autorisent aussi une plongée au cœur du fonctionnement de l'arbre.

Quand les arbres font la fine bouche

De nombreuses recherches reposent actuellement sur l'étrange propriété qu'ont les plantes de « choisir » le type de carbone qu'elles assimilent. Comme tous les éléments, celui-ci existe sous plusieurs formes plus ou moins répandues : les isotopes. L'atmosphère renferme par exemple environ 99 % de carbone 12 (^{12}C) et 1% de carbone 13 (^{13}C). Or, pendant la photosynthèse le ^{12}C , plus léger, est plus facilement assimilé. Il existe donc une différence de composition entre le carbone présent dans l'atmosphère et celui de la biomasse qui présente un

moindre taux de carbone lourd ^{13}C . Le phénomène devient encore plus intéressant quand on sait que cette discrimination varie en fonction de l'environnement. Ainsi, en période de stress hydrique, les arbres ne se permettent plus de choisir et on retrouve un plus fort taux de carbone lourd dans le bois. En dosant précisément ces isotopes dans la cellulose du bois, les chercheurs obtiennent donc un véritable enregistreur en continu du fonctionnement passé de l'arbre en lien avec son environnement. Ils découpent même les cernes en tranches très fines pour accéder à l'information semaine après semaine pendant une saison de végétation. D'autres éléments comme l'oxygène ou l'azote sont étudiés de près. La signature isotopique de l'oxygène dans la plante et dans le sol permet, entre autres, de savoir quelle source d'eau elle utilise, pluies récentes, eau des couches profondes du sol ou bien remontée des nappes phréatiques. *In fine*, grâce à ces études, les chercheurs espèrent comprendre le comportement physiologique des essences sous contraintes hydriques ou nutritionnelles. Il s'agit de répondre à des questions essentielles. Comment réagit chaque essence face au manque d'eau par exemple ? Met-elle le carbone en réserve pour mieux résister aux ravageurs et repartir de plus belle la saison suivante ou bien l'utilise-t-elle pour construire des racines qui vont aller



© Inra / Christophe Maître

SITE DU BRAY. Tour de mesures dans une forêt de pins maritimes, vers Bordeaux, pour l'étude des mécanismes physiques régissant les transferts entre le couvert végétal et l'atmosphère.

puiser plus profond ? Quelles stratégies d'acquisition de l'eau et de l'azote sont les mieux adaptées aux contraintes futures ? De quoi éclairer les choix à faire pour l'avenir.

La diversité comme moyen d'adaptation et de résistance

Les arbres forestiers renferment une diversité génétique hors norme. Certaines données permettent même d'affirmer qu'elle serait environ trois fois supérieure à celle des êtres humains. Pour des espèces amenées à vivre aussi longtemps, ce trésor constitue la meilleure assurance pour

s'adapter aux changements environnementaux. Les scientifiques cherchent à comprendre comment et dans quelle mesure la diversité génétique permettra une adaptation à des évolutions aussi rapides. Là aussi, le but est de fournir des réponses aux sylviculteurs en leur indiquant éventuellement quelles espèces et quelles provenances introduire, mais aussi quelles pratiques permettent à la fois de préserver et d'utiliser au mieux cette diversité. La tâche semble déjà ardue mais elle ne s'arrête pas là. L'arbre ne vit pas isolé mais en étroite interaction avec d'autres organismes vivants comme les insectes ravageurs ou les champignons symbiotiques. Afin de déterminer l'évolution possible d'un écosystème forestier, il faudra déterminer pour chaque espèce quels gènes sont susceptibles de procurer un avantage adaptatif et estimer leur diversité dans les populations actuelles. Devant ce travail de titan, 25 laboratoires provenant de 15 pays européens se sont mobilisés entre 2006 et 2010, dans le cadre d'un réseau d'excellence baptisé *EvoTree*. Coordonné par l'Inra de Bordeaux, celui-ci a permis de jeter les bases d'une nouvelle science à la frontière de la génétique, la génomique, de l'écologie et de l'évolution : la génomique des populations. Pour ce faire, sept sites d'études intensives, dont trois en France métropolitaine (1) ont été mis en place afin d'étudier la dynamique de la diversité en fonction des processus locaux et des flux de gènes à longue distance. Les bases de données émanant de ces divers sites seront mises

Forêt en zone de turbulence

Depuis les tempêtes de 1999 et 2009, les chercheurs s'intéressent à la force destructrice du vent pour proposer des solutions d'aménagement qui permettent de limiter les dégâts. Ces derniers présentent un fort effet de seuil. Qu'il s'agisse de la forêt des Landes ou de Lorraine, les vents ne provoquent que peu de dégâts en dessous de 110 km/h mais ils sont catastrophiques au-dessus de 140 km/h. Sans révolutionner le paysage, on peut imaginer que relever ce seuil de quelques km/h aurait déjà un impact économique énorme. D'ores et déjà, des études sur des peuplements homogènes ont mis en lumière l'importance de paramètres comme la hauteur des arbres, leur densité ou la répartition du feuillage. A présent, les chercheurs s'attaquent à un problème encore plus complexe : modéliser les turbulences qui se créent quand le vent s'engouffre dans une parcelle forestière. « *Bien plus que la vitesse moyenne du vent, ce sont ces rafales brutales qui provoquent les pires dommages*, commente Yves Brunet, spécialiste de la mécanique environnementale au sein de l'unité Ephyse. *Longtemps elles ont été considérées comme aléatoires mais maintenant, des modèles complexes nous permettent de les simuler très finement, à l'échelle du mètre* ». Il s'agit notamment d'estimer comment les rafales se forment dans le peuplement et comment les arbres y réagissent. En parallèle, les chercheurs examinent aussi l'écoulement du vent en sortie de lisière. Ces résultats évaluent l'impact des clairières, des éclaircies ou des pare-feux. C'est leur intégration à grande échelle qui permettra de prendre en compte la fragmentation du paysage et de passer de recommandations purement sylvicoles à des notions d'aménagements.

en réseaux à l'intérieur d'un « laboratoire sans mur ». Enfin, les ADN d'arbres provenant de toute l'Europe sont conservés à Vienne dans un centre de ressources génétiques unique au monde.

Si la diversité génétique à l'intérieur d'une espèce est très importante pour l'adaptation, le rôle fonctionnel de la diversité des espèces dans l'écosystème l'est tout autant. Les chercheurs de l'Inra l'ont illustré en étudiant les effets de l'introduction d'îlots de feuillus au milieu d'un peuplement pur de pin maritime. La présence de feuillus permet de faire chuter le niveau d'infestation des pins par leurs pires ennemis : la pyrale du tronc et la processionnaire du pin. Plusieurs phénomènes essentiels entrent en jeu. Tout d'abord, les insectes utilisent souvent un système olfactif pour reconnaître leur arbre préféré. Ce signal peut être brouillé ou masqué par les essences introduites, ce qui réduit le nombre d'arbres-hôtes potentiellement détectés. Ensuite, les feuillus sont de vrais havres de paix pour les prédateurs de la pyrale et de la processionnaire. En leur offrant des proies alternatives, d'autres ressources alimentaires, des abris ou des sites de pontes, ces arbres les rendent encore plus redoutables pour les ravageurs. Ces résultats plaident pour la pro-



© Office National des Forêts / Jean-Paul Grandjean

LARVE DE PYRALE DU TRONC. L'introduction d'îlots de feuillus limite l'infestation des forêts de pins maritimes par ce ravageur.

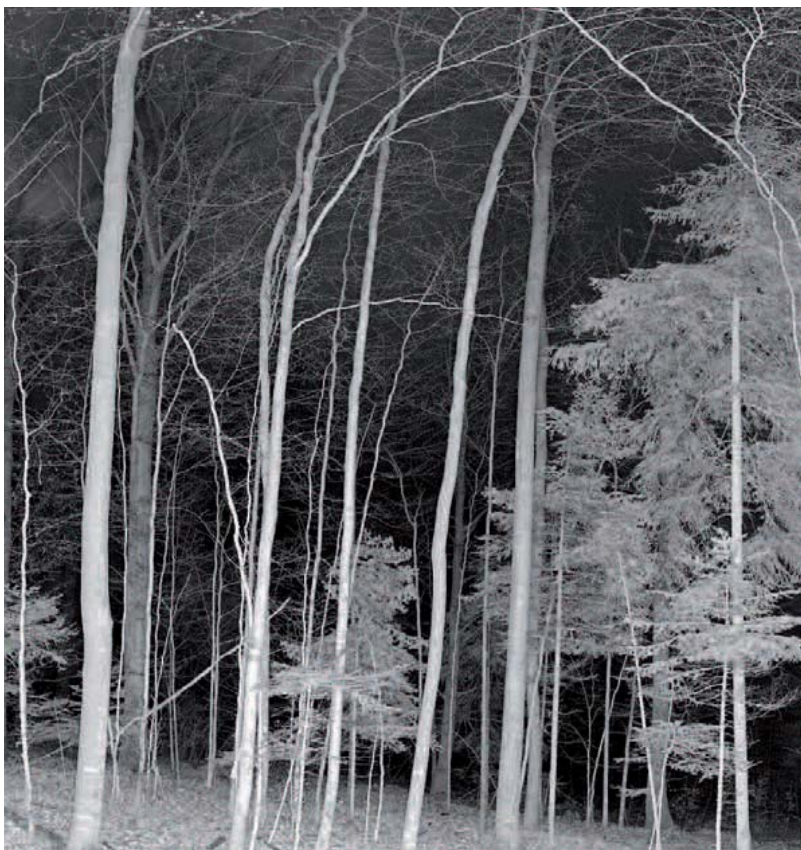
motion de la biodiversité des forêts mélangées. Encore faut-il en évaluer la productivité, ce qui appelle d'autres recherches. Il faut par exemple explo-

rer les relations de compétition entre les différents types d'arbres pour l'accès à l'eau, aux minéraux ou à la lumière. De nombreux travaux s'y attachent actuellement. Ils pourraient prendre une autre dimension grâce au Lidar, une technologie de pointe récemment acquise par l'Inra de Nancy (2).

La 3D arrive en forêt

Le Lidar est un outil d'analyse de l'espace en trois dimensions, composé d'un système de télédétection qui émet un faisceau laser et enregistre la direction et la distance du point ayant réfléchi la lumière. Balayant automatiquement l'espace dans un rayon de 120 m autour de lui, l'appareil délivre un nuage de points en trois dimensions correspondant aux premiers obstacles rencontrés par le faisceau. Les applications aéroportées de ce type d'outil sont déjà connues pour les mesures à grande échelle des hauteurs de canopées et du relief. Le Lidar terrestre, lui, est fixe, même si son embarquement dans un véhicule terrestre est envisageable.

IMAGE DE FORÊT
reconstituée d'après les mesures enregistrées par le Lidar.



© DR



© Inra / Catherine Bastien

PEUPLIERS HYBRIDES À ORLÉANS. Les scientifiques améliorent leur productivité, leur résistance aux pathogènes et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Ils adaptent aussi leur période de croissance à différentes situations climatiques.

Son but est de décrire précisément (à un grain de 3 mm) une placette forestière. Auparavant, pour obtenir une information comparable, les chercheurs procédaient point par point avec un appareil semblable à celui des géomètres et abattaient ensuite l'arbre pour finir leurs mesures. Le Lidar permet d'avoir des données beaucoup plus précises en quelques minutes, y compris sur l'enchevêtrement complexe des branches et feuilles du houpier. Néanmoins, un lourd traitement informatique est ensuite nécessaire pour « transformer le nuage de points » en branches, troncs ou feuilles mais aussi pour combler de manière plausible les espaces masqués par la végétation au premier plan. L'automatisation du traitement est donc un enjeu du développement de la technique, et ouvre de nombreux champs de recherche comme la reconnaissance automatique de l'essence à partir de la texture de l'écorce.

Cette méthode performante trouve une application évidente pour l'évaluation de la biomasse et l'inventaire forestier. Les chercheurs de l'Inra s'intéressent en particulier aux contraintes mécaniques liées à la forme de l'arbre et qui influent sur la qualité du bois. De plus, le Lidar étant non destructif, il permet de suivre l'évolution de la placette dans le temps. Comment le couvert se referme-t-il ? Quels arbres

prennent le pas sur les autres ? Des questions essentielles pour comprendre et modéliser le fonctionnement des forêts mélangées.

Amélioration génétique et arbres plastiques

Améliorer, dans un contexte de changement climatique, des espèces qui vivent pendant 80 voire 120 ans, n'est pas chose aisée. Gilles Pilate, directeur de l'unité de recherche AGPF (3) précise « *Nous devons fournir des variétés qui répondent à la diversification des usages tout en permettant une gestion durable des forêts. Au-delà de ces aspects, il s'agit aussi de se tenir prêt à affronter les changements à venir* ». Pour les chercheurs, ces nouvelles exigences impliquent de trouver des stratégies d'amélioration innovantes.

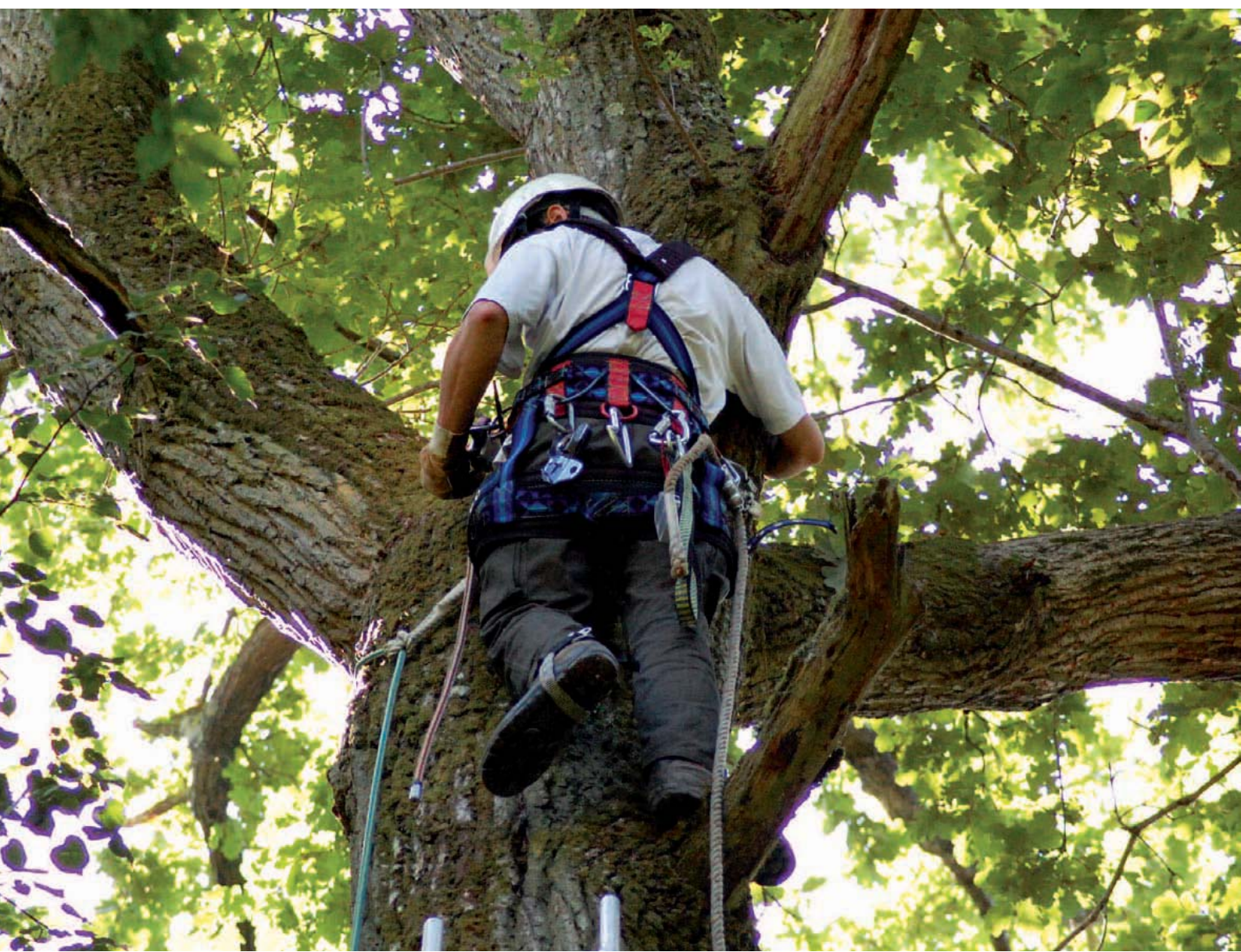
C'est le but du programme européen NovelTree, coordonné par Catherine Bastien de l'unité AGPF, qui se focalisera sur le pin sylvestre, le pin maritime, l'épicéa et le peuplier. Les caractères ciblés sont maintenant bien connus : efficacité de l'utilisation de l'eau, qualité du bois, résistances multiples aux pathogènes et une phénologie qui permet une longue période de végétation, évite le gel des bourgeons et les périodes de sécheresse. Le défi réside dorénavant dans la connaissance des gènes impliqués dans chaque caractère et dans la

recherche d'une forte plasticité phénotypique. C'est-à-dire la capacité d'un génotype donné à adopter différents comportements en fonction de son environnement, une aptitude importante pour la capacité d'adaptation. Afin de l'évaluer, les espèces améliorées seront placées dans des environnements contrastés. Des études de génétique d'association seront menées en combinant deux approches. D'un côté, des relations statistiques seront établies entre les variations du phénotype et la variation des génotypes des populations naturelles. De l'autre, les chercheurs exploreront quelles parties du génome sont impliquées dans chaque caractère et développeront des marqueurs moléculaires permettant de pister ces régions dans les programmes de sélection. Une approche particulièrement utile pour les espèces forestières dont certains caractères phénotypiques ne sont visibles qu'au bout de plusieurs dizaines d'années.

(1) Situés sur le Mont Ventoux, les Landes et les peupleraies naturelles des bords de Loire.

(2) Laboratoire d'études des ressources forêt-bois de l'Inra, en partenariat avec l'Ifn et l'Onf, dans le cadre du programme ANR Emerge dédié à l'estimation de la biomasse.

(3) Amélioration, génétique et physiologie forestières, Inra d'Orléans.



© Inra / René Canta

3 Vers une gestion durable de la forêt

Les recherches de l'Inra donnent un éclairage pour concevoir des forêts à la fois productives et adaptées au changement climatique. Mais aussi pour développer des filières valorisant la biomasse et donc le carbone renouvelable, comme par exemple la production de biocarburant de deuxième génération à partir de bois.

La forêt peut apporter deux grands types de « services » dans la problématique de l'atténuation du changement climatique. D'abord, en stockant du carbone dans le bois, par le processus de la photosynthèse et dans le sol sous forme de matière organique. Ensuite, en fournissant des bioproduits en substitution à d'autres matériaux, ainsi que de l'énergie (chaleur, biocarburant (1)) avec un bilan net d'émissions de GES plus favorable

que l'énergie fossile : le bioéthanol issu de la biomasse par exemple permettrait de réduire les émissions de GES (CO₂ surtout) de 60 à 80 % par rapport aux émissions à partir de carburants d'origine fossile. Les objectifs de la Commission européenne en la matière sont ambitieux, avec la règle des « trois vingt » : 20% de diminution du rejet de GES en 2020, avec 20% de la consommation énergétique de l'UE sous forme d'énergies renouvelables (et 10% de biocarburants

dans la consommation totale des véhicules). Une forêt durable doit aussi être pensée pour s'adapter aux conditions climatiques qui prévaudront dans le futur, avec une résilience accrue à la sécheresse, voire aux tempêtes.

Ce questionnement trouve une illustration dans le cas du massif forestier des Landes de Gascogne qu'il s'agit de reconstruire de façon durable après les dégâts des deux tempêtes de 1999 et 2009.

La forêt landaise à la croisée des chemins

Occupant près d'un million d'ha en France, la forêt landaise a perdu la moitié de son stock de bois à la suite de deux tempêtes survenues à dix ans d'intervalle, alors que des épisodes aussi extrêmes ne se produisent en moyenne que tous les cent ans. Ces dégâts fragilisent fortement la filière forêt-bois régionale (34 000 emplois directs hors sylviculteurs) confrontée à moyen terme à des problèmes d'approvisionnement. Une urgence donc : reboiser, après avoir nettoyé les arbres tombés à terre, qui ont favorisé une explosion alarmante d'insectes ravageurs comme les scolytes. Avec ses montagnes de bois stockés en attente d'évacuation, visibles depuis l'autoroute Bordeaux-Espagne, le massif landais est devenu le plus gros chantier de nettoyage-reboisement d'Europe. Pour Jean-Michel Carnus (2) « le sentiment que l'écosystème est fragile est partagé entre les acteurs : propriétaires, forestiers, industriels, usagers, chercheurs. Le contexte est différent de celui des années 40, où la moitié de la forêt avait aussi disparu lors des grands incendies, et où le massif avait été reconstitué pour la production à l'époque de résine et de bois. Cette fois, il s'agit de penser une forêt plus résiliente aux risques climatiques, tout en assurant les besoins en bois de la filière et en tenant compte de la très forte demande en biomasse-

énergie. La recherche se mobilise avec tous les acteurs pour explorer des pistes d'avenir ».

Choisir les bonnes essences

La première question qui se pose est le choix des espèces à replanter. La résistance à la sécheresse sera une qualité déterminante dans le contexte de changement climatique. Des programmes se mettent en place à l'Inra de Bordeaux (3) pour sélectionner ce caractère chez le pin maritime, qui reste à ce jour l'essence de prédilection pour la production de bois dans les Landes.

Les regards se portent néanmoins simultanément sur d'autres espèces de pins, voire sur d'autres conifères. Dans les réseaux expérimentaux, les chercheurs répertorient les essences résistantes à la sécheresse déjà présentes en Aquitaine. Parallèlement, des plantations sont en cours sur plusieurs sites (Dordogne, Landes, Adour-Pyrénées) pour tester l'adaptation d'essences méditerranéennes (cèdre du Liban, croisement entre pins des Landes et pins du Maroc ou de Corse...).

Enfin, des mélanges interspécifiques innovants sont à l'étude. Au domaine expérimental de l'Hermitage, à l'Inra de Pierroton, vers Bordeaux, les chercheurs de l'Inra testent des associations de pins et d'autres espèces (eucalyptus, robiniers, ajoncs...). Des

recherches sur plusieurs années ont également démontré que l'installation de feuillus en îlots et en lisières était bénéfique pour la santé des pins, car la faune abritée par les feuillus protège les pins contre leurs ravageurs (voir ci-avant en partie 2).

Quelques chiffres

Stock de bois dans le massif landais :

Avant les tempêtes

150 millions de m³

Après la tempête Martin de 1999

120 millions de m³

Après la tempête Klaus de 2009

75 millions de m³

Diversifier la production

En plus de tester les essences, les recherches de l'Inra s'intéressent aux systèmes de culture. La forêt landaise est une forêt à des fins industrielles consacrée à la production de bois, mais quelle production développer ? Jusqu'ici, la production de bois d'œuvre voisinait avec la production de papier, qui utilise les déchets du bois. Le premier secteur (parquets, lambris) tend à perdre du terrain et les papetiers s'orientent vers l'utilisation de biomasse pour produire de la chaleur et de l'électricité dans des centrales de cogénération. De nouveaux systèmes sylvicoles doivent donc être étudiés pour anticiper ces évolutions, en particulier, ceux qui favorisent la production de biomasse, avec des plantations plus denses, sans éclaircies, récoltées au bout de 15-20 ans. Ces itinéraires présentent moins de risques face aux tempêtes que les itinéraires classiques utilisés pour la production de bois d'œuvre dans lesquels les arbres restent sur pied plus longtemps (35-40 ans), avec des éclaircies qui peuvent fragiliser les peuplements. Du point de vue écologique, les chercheurs de l'Inra vont étudier les conséquences de chacun de ces itinéraires ainsi que d'itinéraires intermédiaires, établis en concertation avec des partenaires professionnels (4). Afin de surveiller et préserver la fragile fertilité des sols landais, ils mesureront la teneur en éléments minéraux du sol et des arbres. Ils étudieront également les cycles du carbone et de l'eau dans ces différents systèmes culturels.

In fine, le choix du type d'exploitation

PLAQUETTES DE BOIS utilisées pour le chauffage.



© Inra / Pascal Thiebeau

Une étude prospective sur le territoire des Landes de Gascogne

Une prospective menée conjointement par le Conseil régional d'Aquitaine et l'Inra examine les futurs possibles des Landes de Gascogne et rendra ses conclusions en octobre 2011. « *En réunissant toute la gamme des acteurs (propriétaires, coopératives, collectivités territoriales, industriels, habitants), explique Olivier Mora*, cette prospective considère le massif des Landes de Gascogne non pas seulement du point de vue de la filière-bois, mais comme un territoire avec toutes ses composantes (enjeux démographiques, résidentiels, touristiques, énergétiques, climatiques). L'élaboration de scénarios pour 2050 montre qu'il faut faire des choix clairs qui engagent sur le long terme. L'introduction d'îlots ou de lisières de feuillus par exemple, étudiée depuis longtemps mais jamais mise en œuvre dans les Landes, est symbolique des tensions, mais aussi des complémentarités possibles, entre intensification et biodiversité. Sa mise en place suppose une forte coordination entre les acteurs* ».

* Délégation à l'expertise scientifique collective, à la prospective et aux études, Inra Paris.

revient aux propriétaires privés, qui possèdent environ 90% de la forêt landaise, et qui ont à estimer des retours sur investissement sur 50 ans. Des économistes de l'Inra, Stéphane Couture et Marielle Brunette (5) se sont intéressés à cette prise de décision difficile et ont réalisé des simulations où plusieurs propriétaires ont été placés dans différentes situations de choix. « *Les composantes individuelles d'aversion au risque semblent déterminantes*, indique Stéphane Couture. *Très peu de propriétaires sont assurés contre les risques tels que les*

tempêtes. Une aide de l'Etat contingente à une prise d'assurance serait sans doute plus efficace en ce sens qu'une aide forfaitaire après sinistre ». Actuellement, environ 1 000 ha (une soixantaine de propriétés) ont été plantés à des fins de culture énergétique, principalement pour la production de plaquettes à destination des chaudières collectives et de l'industrie (6).

Un équilibre se dessine en Aquitaine entre les cultures pour le bois d'œuvre, qui favorisent le stockage de carbone, et les cultures énergé-

tiques qui permettront la substitution de carbone renouvelable au carbone fossile. Les outils fournis par la recherche pour quantifier les stocks de carbone et la capacité de séquestration des forêts sont utilisés pour les politiques régionales. Ainsi, la région Aquitaine met en place un « fonds volontaire pour le carbone », grâce auquel des collectivités ou des opérateurs peuvent compenser leurs émissions de carbone en achetant des crédits carbone, les fonds recueillis pouvant servir à financer la reconstitution forestière.

Essence pas ordinaire

La biomasse forestière représente la moitié des énergies renouvelables en France, loin devant l'hydraulique, les déchets, la géothermie, l'éolien et le solaire. Si les essences du sud (pin, eucalyptus) sont adaptées à la production de chaleur, l'espèce de prédilection pour la production de biocarburant (bioéthanol) est plutôt une essence du nord : le peuplier, qui pousse sur des terrains souvent peu valorisables pour l'agriculture et se caractérise par une croissance rapide.

Le peuplier, essence de choix

L'Inra coordonne un projet d'envergure consacré au peuplier à vocation énergétique, Energy Poplar (7). Pour Francis Martin, de l'Inra de Nancy, qui coordonne le projet « *en 2012, nous aurons rempli notre contrat avec l'UE, qui était de fournir à la filière cinq nouveaux cultivars de peupliers présentant la plupart des caractéristiques requises pour une production optimale de bioéthanol, à savoir : une production rapide de biomasse aérienne, un système racinaire abondant et efficace et un ratio cellulose/lignine favorable à la production de bioéthanol. Nous sommes en phase finale de l'évaluation*



© Inra / Luc Paques

ÉCLAIRCIE SYSTÉMATIQUE dans une futaie de mélèzes.

d'une trentaine de cultivars « élites » dont nous mesurons actuellement les taux de transformation de la lignocellulose en glucose, puis en bioéthanol

ainsi que leur capacité de croissance et d'enracinement. Nous avons également vérifié que ces cultivars à caractéristiques de croissance améliorées n'avaient

pas d'effets négatifs sur la diversité microbienne du sol des plantations ». Ces cultivars ont été repérés parmi des milliers de génotypes précédemment obtenus par création variétale au sein du GIS Peuplier (8). Pour effectuer cette sélection, les chercheurs ont identifié plusieurs marqueurs génétiques associés à la croissance des systèmes aériens et racinaires. Ils ont également optimisé de nouveaux outils à haut débit, tels que la spectrométrie infrarouge, afin de mesurer les teneurs en lignocellulose à partir de poudre de bois. Les rendements de transformation de la cellulose du bois en éthanol sont très variables entre les cultivars testés, confirmant tout l'intérêt d'une sélection génétique individuelle.

Limitier la concurrence avec les cultures alimentaires

Un des enjeux majeurs de la production de biocarburant est d'éviter la compétition avec les cultures alimentaires. Il est donc crucial de produire un maximum de biomasse sur des territoires réduits ou impropres à l'agriculture.

Dans cet objectif, les chercheurs de l'Inra d'Orléans et de Nancy testent deux méthodes de production : les Taillis à Courte Rotation et les Futaies à Courte Révolution (respectivement TCR et FCR). La première correspond à des arbres capables de faire des rejets après une coupe, tels que le peuplier, le robinier et le saule. Touffus, ces arbres fournissent une biomasse abondante rapidement et peuvent être récoltés après deux à sept ans, alors qu'il faut attendre une vingtaine d'années pour les futaies. Dans ce système de TCR, les chercheurs s'attachent à optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments pour réduire la fertilisation et l'irrigation. Ils expérimentent pour cela l'effet de la densité de plantation, du choix des espèces et de la diversité génétique à l'intérieur d'une espèce, dans un réseau de sites ateliers écologiquement contrastés (Bourgogne, Centre, Bretagne (9)). Pour optimiser la phase de production d'éthanol, l'Inra est associé au développement d'un pilote à Pomacle-Bazincourt, près de Reims, capable de traiter quotidiennement une à trois tonnes de biomasse pour produire environ 500 litres de bioéthanol. Au pilote succédera un prototype (échelle x 50) avant le passage à l'échelle de l'usine (échelle x 2 500) (10). Les recherches de l'Inra explorent les



© Inra / Bénédicte Rollin

EXPLOITATION D'UN TAILLIS à très courte rotation de saules de deux ans.

nouvelles filières d'exploitation du bois, de l'arbre au produit final, en intégrant les aspects physiologiques, génétiques et écologiques pour chaque système de culture. Le volet économique n'est pas oublié. Le projet Energy Poplar a inclus une évaluation du coût monétaire de la production d'éthanol à partir de cultures de peupliers. Les résultats montrent que cette production est rentable car moins chère que le pétrole au cours actuel. Francis Martin relève cependant deux facteurs qui lui semblent limitants pour une production à grande échelle selon les objectifs de la Commission européenne : l'espace et les capacités d'investissement. Trouver suffisamment d'espace nécessiterait une politique d'aménagement du territoire au niveau européen, certains pays (Bénélux, Royaume-Uni) étant limités sur ce point. Quant à l'attraction des investisseurs, elle dépendra du « coût de l'argent », c'est-à-dire des taux d'intérêt des banques centrales. Le laboratoire d'économie forestière de l'Inra de Nancy, qui a établi le premier modèle du secteur forêt-bois français, donne d'autres éléments de réflexion. D'abord, le coût économique d'une augmentation massive et rapide de la production de biomasse énergie

d'origine forestière apparaît élevé. Ensuite, en termes de bilan GES, et sur la période 2010-2020, il est plus efficace de stocker du bois *in situ* que de produire du bois énergie, mais ce résultat devrait s'inverser sur des pas de temps plus longs, du fait que le stockage de bois est limité à terme, alors que les émissions de GES évitées à travers la valorisation énergétique de la biomasse sont cumulables d'année en année. ●

- (1) Après avoir éliminé la lignine, on produit de l'éthanol à partir de la cellulose du bois, sous l'action de champignons et de levures.
- (2) Inra de Bordeaux. Coordinateur de Xyloforest, projet sélectionné en 2011 dans le cadre des « Investissements d'avenir », qui permettra l'acquisition d'équipements pour favoriser l'innovation depuis l'adaptation des forêts cultivées au changement climatique, jusqu'à l'ingénierie du bois et la production de biomasse.
- (3) Xyloomic, un des plateaux techniques de Xyloforest.
- (4) Plateforme Ecosylve de Xyloforest sur 40 ha au domaine de l'Hermitage.
- (5) Respectivement unité de recherche biométrie et intelligence artificielle de l'Inra de Toulouse et laboratoire d'économie forestière de l'Inra de Nancy.
- (6) Dans le cadre du projet Climaq, avec le soutien de la Coopérative agricole et forestière sud-atlantique.
- (7) Energy poplar, projet européen (2008-2012), partenaires : Suède, Allemagne, Belgique, Royaume-Uni, Italie. Objectif : obtenir des peupliers optimisés pour la production de bioéthanol.
- (8) Le GIS Peuplier associe les compétences de l'Inra, du FCBA et du Cemagref pour conduire en France les travaux de R&D en matière de génétique, sélection et protection phytosanitaire du peuplier.
- (9) Projets ANR Sylvabiom (2009-2012) et Intens&Fix (2011-2014).
- (10) Projet Futuro, 11 actionnaires financiers et de recherche-développement, 50 équivalents temps plein, plus de 60 actions de recherche dont 30 thèses, onze unités Inra impliquées.

Dossier rédigé par **Géraud Chabriet** et **Pascale Mollier**

Responsable scientifique : **Jean-Marc Guehl** chef du département Ecologie des forêts, prairies et milieux aquatiques (Inra, Nancy)

+d'infos

web : www.inra.fr/la_sciences_et_vous/le_point_sur/les_forets