

# IMAGINER LES FORÊTS DE DEMAIN



PRESSE **Dossier**





ÉDITO.....	5
<b>UNE PANOPLIE DE SERVICES FORESTIERS</b> .....	<b>6/12</b>
● LES FORÊTS, SOURCES OU PUIITS DE CARBONE ?.....	6
● LES POUVOIRS DES SOLS.....	8
● LES FORÊTS, TRÉSORS DE BIODIVERSITÉ.....	9
● BOIS, CHASSE, RÉCRÉATION : LES AUTRES SERVICES DE LA FORÊT .....	11
<b>LES RISQUES POUR LA FORÊT</b> .....	<b>13/19</b>
● DES FORÊTS AGRESSÉES.....	13
● L'ARBRE FACE À LA SÉCHERESSE .....	15
● TEMPÊTES ET FEUX : LES ALÉAS EXTRÊMES.....	17
<b>QUELLES FORÊTS POUR LE FUTUR ?</b> .....	<b>20/26</b>
● LA SYLVICULTURE DE DEMAIN .....	21
● S'ADAPTER À LA RARETÉ DES RESSOURCES EN EAU .....	23
● DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES POUR LES FORÊTS .....	24
● ADAPTER SA FORÊT EST-IL ÉCONOMIQUEMENT RÉALISTE ? .....	26
CONTACTS SCIENTIFIQUES.....	27



# IMAGINER LES FORÊTS DE DEMAIN

« *Maintenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en-dessous des 2°C par rapport aux niveaux préindustriels* ». Voilà à quoi se sont engagées les 196 délégations participant à la COP21, en décembre 2015. Si l'accord de Paris est historique et ambitieux, il ne doit pas masquer une réalité alarmante : même limitée à seulement 2°C, cette hausse va nécessiter de profondes modifications de la gestion sylvicole.

Le changement climatique bouleverse le fonctionnement de l'arbre et de la forêt. Si certains de ses effets se révèlent parfois bénéfiques, il risque de causer des dommages importants. A quoi ressembleront les forêts en 2050 ? Quelles sont les essences les mieux adaptées à un environnement donné ? Dans ce contexte climatique, comment se prémunir des risques qu'il s'agisse des bio-agresseurs ou des sécheresses à venir ? Quelles sont les options pour les sylviculteurs ? Quelles ressources génétiques pour les forêts de demain ? Mais aussi : comment la sylviculture peut-elle participer à l'atténuation du changement climatique ?

Les chercheurs de l'Inra développent des outils novateurs et performants pour comprendre la dynamique des forêts, mesurer et analyser les impacts du changement climatique sur cet écosystème complexe : concentrations en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, précipitations, micro-organismes du sol, vents... Améliorer la qualité du bois et optimiser la production de biomasse pour la filière bois-énergie sont également au cœur des travaux de l'Inra.

Connaître les services rendus par les forêts pour mieux les exploiter, comprendre les risques qu'elles encourrent, proposer des stratégies à plus ou moins long terme pour une sylviculture durable et agro-écologique... Ce dossier vous propose une promenade dans les bois de l'Inra ; là où les chercheurs bûchent sur l'avenir des forêts !



© Inra - Hervé Cochard

# UNE PANOPLIE DE SERVICES FORESTIERS

## 1 LES FORÊTS, SOURCES OU PUIITS DE CARBONE ?

### Les forêts et le changement climatique

Un hectare d'une belle forêt de hêtres telle qu'on en trouve en Lorraine absorbe environ chaque année le carbone qu'émet une voiture qui roule pendant 40 000 kilomètres. C'est dire si les forêts sont des alliées précieuses dans la lutte contre le changement climatique. A elles seules en effet, elles stockent à moyen terme plus de la moitié du carbone des terres émergées. Voilà pourquoi les chercheurs de l'Inra s'attachent à comprendre la dynamique de ces éléments clés pour le bon fonctionnement de la planète. Ils tentent notamment d'identifier les facteurs qui peuvent augmenter ou diminuer la capacité des arbres à séquestrer le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ce gaz à effet de serre si connu. Et de savoir si le changement climatique rend les arbres plus vulnérables.

### Une tour pour mesurer les flux de carbone

La forêt de Hesse, en Moselle, est une magnifique hêtraie de plus de 50 ans. Une tour dépasse la canopée : c'est là que les scientifiques de l'Inra ont disposé leurs instruments pour mesurer les flux de carbone entre la forêt et l'atmosphère. Depuis 1996, ils mesurent ces échanges en continu afin de mieux appréhender les variables qui déterminent la capacité de la forêt à absorber le CO<sub>2</sub> et donc, à limiter l'impact de nos émissions. Pour cela, les chercheurs enregistrent de nombreuses données climatiques, comme l'humidité de l'air et du sol, ou l'état du feuillage des arbres. Cette installation fait partie du réseau européen *Integrated Carbon Observation System* (ICOS) qui vise à comprendre, à de grandes échelles, le cycle des gaz à effet de serre, tant au niveau des océans que des terres émergées.



Tour de mesures des échanges entre l'atmosphère et la forêt.  
© Inra - Pascal Courtois

### La forêt de Font-Blanche à la loupe

Composée de pins d'Alep et de chênes verts, la forêt de Font-Blanche dans les Bouches-du-Rhône, est un excellent exemple de forêt mélangée méditerranéenne. Et les chercheurs de l'Inra y ont installé leurs instruments. Ils mesurent, entre autres, les échanges de CO<sub>2</sub> et d'eau entre la forêt et l'atmosphère, les flux de sève, la transpiration des feuilles, ou bien encore la respiration des sols. Les scientifiques ont ainsi mesuré l'impact du stress hydrique exceptionnellement intense au cours de l'été 2015.

## Quand la forêt émet du carbone

Et voilà qu'une sécheresse s'abat sur la forêt. Pour éviter de se déshydrater, les feuilles ferment leurs stomates, ces pores par lesquels elles transpirent. Mais ce faisant, elles cessent d'absorber du CO<sub>2</sub>. Elles n'en continuent pas moins de respirer et donc de produire du CO<sub>2</sub>. Ainsi, lorsque les pluies font durablement défaut, la fonction de puits de carbone de la forêt est gravement perturbée. Au point que certaines forêts, notamment celles du Nord de l'Europe ou les forêts tropicales, peuvent devenir temporairement des émettrices nettes de CO<sub>2</sub> lors d'une sécheresse prolongée. D'autres causes peuvent faire de la forêt une source de gaz à effet de serre. Les assauts d'insectes (surtout les herbivores qui s'attaquent au feuillage) réduisent considérablement les capacités d'absorption d'une forêt. Quant aux incendies, ils peuvent envoyer dans l'atmosphère en quelques heures, tout le CO<sub>2</sub> qu'une forêt a patiemment accumulé au fil des décennies.



Capteurs mesurant les rayonnements reçus et émis par la forêt.  
© Inra - Patrick Gross

## Grossir et prendre du poids chez les arbres

Grossir et prendre du poids, ce n'est pas la même chose chez les arbres. Paradoxalement, ces deux processus ne se déroulent pas tout à fait en même temps. Tout d'abord, le tronc grossit en taille grâce à la production et à l'expansion de nouvelles cellules. Ce n'est qu'ensuite que l'arbre s'alourdit : la paroi des cellules accumule de la cellulose et de la lignine qui leur donnent leur densité et leur résistance mécanique. Entre les deux phénomènes, il peut s'écouler jusqu'à un mois. Ces résultats, obtenus par une équipe internationale impliquant l'Inra, montrent que sur de courtes périodes, on ne peut pas déduire la productivité des forêts en mesurant la variation du diamètre des troncs. Ils suggèrent aussi que le changement climatique pourrait modifier le décalage entre la croissance en taille et l'augmentation de la biomasse, ce qui pourrait affecter la fixation du carbone par les forêts.

### Taillis à courte rotation : une source de biomasse à optimiser

Première source d'énergie renouvelable en France, le bois a encore de beaux jours devant lui. En effet, la même quantité de CO<sub>2</sub> capturée par les arbres est émise dans l'atmosphère lors de sa combustion. Résultat : un bilan carbone bien plus favorable que celui des énergies fossiles. Et les accords de la COP21 devraient contribuer à dynamiser encore plus la filière. L'une des sources de bois-énergie qui semble promise à un bel avenir est celle issue des taillis à courte rotation (TCR). Entre sylviculture et agriculture, les TCR consistent à planter des arbres à croissance rapide qui seront récoltés tous les 7 ou 8 ans, voire 2 ou 3 ans pour les très courtes rotations. Cette production ultrarapide de bois permet de valoriser des terrains peu aptes à l'agriculture.

### Des TCR sans épuiser les sols ni la ressource en eau

Deux problèmes jouent encore contre les taillis à courte rotation : ils consomment beaucoup d'eau et ils peuvent appauvrir les sols. Les chercheurs de l'Inra planchent sur des solutions. L'une des pistes est d'identifier et de sélectionner les variétés d'arbres les plus efficaces dans l'utilisation de l'eau et des nutriments. Autre voie à l'étude : associer les TCR à la culture de légumineuses fourragères comme le trèfle ou la luzerne. Ces dernières, grâce à une symbiose avec des bactéries, ont la propriété de fixer l'azote de l'air, et donc, d'enrichir les sols en ce nutriment.

### Les services écosystémiques rendus par les forêts ?

Apparue dans les années 1970 et placée sur le devant de la scène internationale lors de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (*Millenium Ecosystem Assessment*) dans les années 2000, la notion « service écosystémique » - bénéfiques fournis par les écosystèmes à l'humanité - interroge le rôle et la place de l'homme dans les écosystèmes, ainsi que sur les relations réciproques entre société et écosystèmes ou socio-écosystèmes. Ces services sont souvent divisés en quatre catégories : services d'approvisionnement (aliments, eau douce, bois matériau, bois de feu, fibres, produits biochimiques, ressources génétiques...); services de régulation (régulation du climat, purification de l'eau, pollinisation); services culturels (loisirs et écotourisme...) ou encore services de soutien aux conditions favorables à la vie sur Terre (cycle des éléments nutritifs, cycle du carbone) qui sont par ailleurs nécessaires à la production de tous les autres services. La biodiversité a des effets directs ou indirects sur de nombreux services écosystémiques.

### Les plus grands stockeurs de carbone d'Amazonie

En Amazonie, la contribution à l'atténuation du changement climatique de chacune des 16 000 espèces d'arbres différentes qui y vivent, est très inégale. Seules 200 d'entre elles contribuent à la moitié de l'augmentation de la biomasse et du stockage du carbone de la forêt. C'est l'un des résultats publiés par Rainfor, un réseau scientifique européen et sud-américain auquel participe l'Inra qui tente notamment de mieux évaluer les flux de carbone entre l'atmosphère et la forêt amazonienne. Ces travaux pourront aider les scientifiques à prédire le comportement des forêts humides tropicales dans le contexte du réchauffement global.

## LES POUVOIRS DES SOLS

### Le sol, puits de carbone

Cette bonne odeur d'humus qui stimule vos narines lorsque vous vous promenez en forêt, qu'est-ce donc ? Il s'agit de la matière végétale qui se décompose lentement ou, si vous préférez, du CO<sub>2</sub> qui a été transformé en molécules végétales. Le sol des forêts accumule d'incroyables quantités de carbone qui se trouvaient auparavant dans l'atmosphère et participe donc à l'équilibre climatique. Il y a plus de carbone accumulé dans le sol d'une forêt que dans le tronc et les branches des arbres. Deux phénomènes ont lieu dans le sol : d'une part, les feuilles, les branches et les racines des arbres meurent et retournent au sol périodiquement, créant

une litière organique aérienne et souterraine. D'autre part, d'innombrables organismes (vers, champignons, insectes, bactéries)

dégradent cette litière. Une partie des débris végétaux est modifiée et incorporée plus en profondeur avec

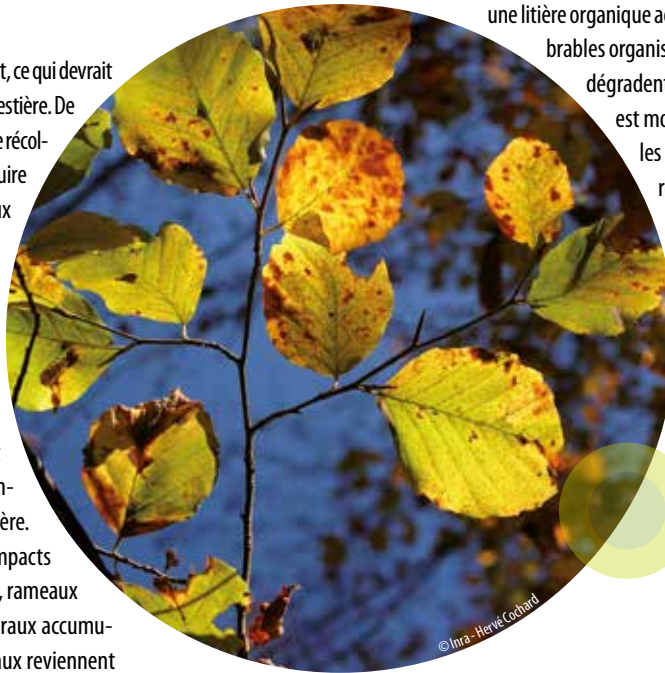
les particules minérales du sol. Une autre partie redevient du CO<sub>2</sub> et retourne vers l'atmosphère.

Généralement, dans une forêt exploitée de façon extensive, la matière organique se dégrade plus lentement qu'elle ne s'accumule.

Dans ce cas, même une forêt mature continue à séquestrer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

### Le triple impact d'une intensification de la récolte

Les besoins en énergies renouvelables augmentent, ce qui devrait conduire à une intensification de l'exploitation forestière. De nombreux propriétaires forestiers - qui jusque-là ne récoltaient que les troncs - voudraient désormais produire de l'énergie à partir des petites branches, rameaux et feuilles qui représentent tout de même 20 % de la biomasse d'un arbre. Ceci pourrait avoir un impact non négligeable sur le carbone stocké dans le sol. En effet, avec la récolte des menus bois, la matière végétale au sol perdrait un apport important de carbone. Dans certains cas, cette exploitation, en perturbant les sols, pourrait accélérer le travail des décomposeurs et le retour du carbone vers l'atmosphère. Mais les chercheurs ont identifié deux autres impacts tout aussi importants. D'une part, les branches, rameaux et feuilles contiennent jusqu'à 50 % des minéraux accumulés par un arbre. En temps normal, ces minéraux reviennent au sol grâce à la décomposition. Prélever ces parties conduit donc à un appauvrissement du sol en nutriments nécessaires à la génération suivante d'arbres. D'autre part, la matière organique du sol participe aussi à la fertilité des sols. Perturber son renouvellement peut donc contribuer au dysfonctionnement des écosystèmes forestiers. Ainsi, lorsque les branches et les feuilles sont récoltées, la rotation suivante perd 3 à 7 % en productivité en moyenne. D'autres fonctions de l'écosystème (maintien de la qualité de l'eau, biodiversité...) sont souvent également impactées.



### Les cendres de la fertilité

Les pays scandinaves, l'Allemagne et l'Amérique du Nord ont trouvé une solution possible à l'appauvrissement du sol issu de l'intensification de la récolte forestière : l'épandage des cendres produites par les chaudières ou les centrales thermiques. Ces cendres, que l'on peut enrichir en minéraux et matière organique, reviennent donc à la forêt et permettent de maintenir son niveau de fertilité. Toutefois, si le principe n'est pas remis en cause, certains points font encore débat. Ainsi, les impacts de ces épandages sont complexes. Ils peuvent aboutir à une élévation parfois importante du pH du sol. De plus, si les cendres sont mal choisies ou mal contrôlées, elles peuvent enrichir le sol en éléments indésirables comme le plomb. Les cendres ont également un impact écologique sur les organismes du sol et plus généralement sur la biodiversité de l'écosystème. En France, l'épandage de cendres est aujourd'hui interdit en forêt, mais ceci est en débat et pourrait évoluer. En effet, cette méthode, si elle est raisonnée et bien adaptée à chaque situation forestière, a un intérêt écologique et économique indéniable. C'est pourquoi les chercheurs de l'Inra s'efforcent actuellement de comprendre les effets des cendres sur les écosystèmes forestiers.

### Un réseau pour tester l'impact des cendres

Depuis 2013, le réseau Manipulation de la matière Organique du Sol (MOS) a pour objectif d'étudier l'impact d'un prélèvement accru de biomasse de la forêt sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Au sein de ce réseau, les chercheurs étudient notamment le maintien de la fertilité du sol et le rôle de sa faune dans la dégradation de la matière organique du sol. En serre et sur 18 sites dans différents types de forêts, ils testent l'effet sur la croissance des arbres et sur les organismes du sol de différents types de cendres : cendres brutes ou sous forme de granulés, enrichies avec de la dolomie (une roche calcaire) ou des résidus organiques... Ils s'intéressent aussi à l'accueil que pourraient réserver les exploitants des forêts et les citoyens à cette technique d'enrichissement du sol. Parmi leurs objectifs : éclairer les réglementations futures sur l'épandage des cendres en forêt.



## L'histoire des champignons symbiotiques décryptée

Un consortium international piloté par l'Inra a décrypté le génome de 13 espèces de champignons forestiers parmi lesquels le bolet et l'amanite tue-mouche. Cette étude de paléogénomique a permis aux chercheurs de retracer l'histoire évolutive des champignons établissant des symbioses avec les racines des arbres. En échange d'eau et de nutriments, les champignons obtiennent des sucres de leur plante-hôte. Cette symbiose leur a fait perdre les enzymes de dégradation du bois caractéristiques de leurs cousins xylophages. Ils ont également développé une véritable communication chimique avec les arbres afin de s'installer dans la racine. Ces études de génomique fournissent des éléments utilisables pour évaluer l'impact des changements globaux sur les services écosystémiques assurés par ces champignons.



Bolets et amanite.  
© Inra - Frédéric Suffert

## 3 LES FORÊTS, TRÉSOR DE BIODIVERSITÉ

### L'effet « Mac Donald » guette la forêt

De Lisbonne à Pékin, d'Abidjan à Lima, dans les rues marchandes et les centres commerciaux, vous trouvez les mêmes restaurants, les mêmes marques de prêt-à-porter, chaussures, cigarettes ou appareils électroniques. Pour les paysages, c'est un peu la même chose : ceux-ci connaissent une homogénéisation croissante au profit d'un nombre limité d'espèces végétales ou animales. C'est ce que les experts ont appelé l'effet « Mac Donald ». Ainsi, dans le monde, les forêts naturelles perdent du terrain tandis que l'introduction et l'expansion d'un nombre limité d'espèces d'arbres contribue à cette uniformisation.

Près de la moitié des forêts françaises sont des peuplements dominés par une seule espèce d'arbre. Or, dans un paysage ne contenant que très peu d'espèces végétales, on trouve une variété moindre d'oiseaux, mammifères, insectes ou champignons. Les bénéfiques, ou services écosystémiques, que l'homme retire du fonctionnement d'un peuplement constitué d'une seule essence sont ainsi moins nombreux. De plus, dans certains cas, la vulnérabilité de ces peuplements face aux menaces peut augmenter. Mais l'écologie est une science de la complexité : les conclusions hâtives peuvent mener à de graves erreurs. Voilà pourquoi les chercheurs de l'Inra mesurent la biodiversité des forêts françaises et évaluent leur capacité à fournir différents services écosystémiques.

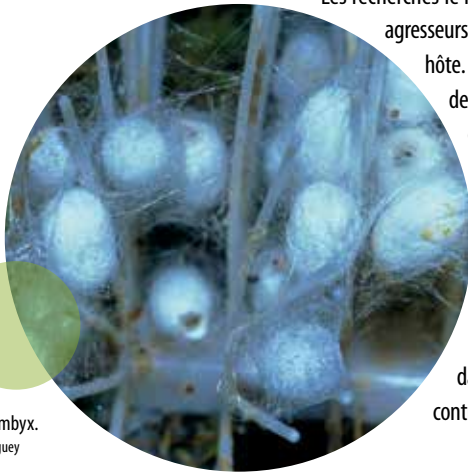


© Inra - Michel Meuret

### L'Europe des services forestiers

Quel est l'impact de l'effet « Mac Donald » sur la capacité des forêts à offrir des services écosystémiques ? C'est la question posée dans le cadre d'un vaste projet de recherche, appelé FunDivEUROPE, associant 29 équipes européennes dont certaines de l'Inra. Les chercheurs ont combiné des données provenant de six pays, puis ils ont développé des simulations informatiques pour tester les conséquences de l'homogénéisation biotique et du déclin de la diversité des arbres sur la capacité des écosystèmes forestiers à assurer seize fonctions essentielles telles que la production de bois d'œuvre, le stockage de carbone, la résistance aux bioagresseurs ou le maintien de la diversité des oiseaux. Le résultat est sans appel : dans presque tous les cas, l'uniformisation diminue la capacité des forêts à fournir des services multiples. Ce résultat plaide pour une revalorisation des paysages riches en espèces différentes, à même de remplir le plus grand nombre de fonctions environnementales, économiques ou sociales.

## Les agresseurs en danger dans les forêts mélangées



Cocons de Bombyx.  
© Inra - Alain Beguey

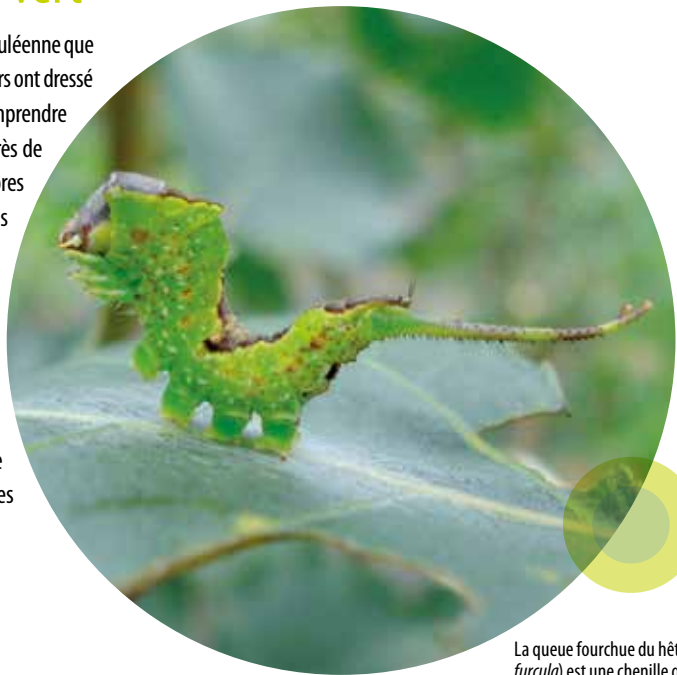
Les recherches le montrent bien : une plus grande diversité d'arbres favorise la résistance de la forêt face aux agresseurs. Prenons par exemple un ravageur bien connu, le scolyte. Pour survivre, il doit trouver son arbre hôte. Pour cela, il s'aide de l'odeur de l'arbre et de sa silhouette, ou encore, des phéromones attractives de ses congénères. Dans une forêt monospécifique de pins, le scolyte est sauvé : tous les arbres lui conviennent. Mais dans une forêt mélangée, l'affaire se corse. Les pins sont en quantité moindre et les autres arbres constituent des barrières visuelles et odorantes. De plus, la diversité des plantes tend à favoriser la diversité des ennemis des agresseurs, qu'il s'agisse d'oiseaux prédateurs ou d'insectes parasitoïdes. Dans ces conditions, il est moins probable qu'un insecte voie sa population exploser et mettre en danger la croissance et la survie des arbres. Cependant, il peut y avoir des exceptions : d'une part, il existe des insectes herbivores, tels que le bombyx disparate, dont la chenille peut se nourrir de plusieurs espèces d'arbres feuillus, voire de conifères. D'autre part, dans certains cas, les prédateurs peuvent aussi se dévorer entre eux et diminuer leur capacité à contrôler un agresseur des forêts.

## L'incroyable biodiversité de l'enfer vert

Prendre la mesure de la biodiversité des arbres d'Amazonie : voilà la tâche herculéenne que s'est donnée une équipe internationale à laquelle participe l'Inra. Les chercheurs ont dressé le premier inventaire à large échelle des arbres du bassin amazonien. Pour comprendre l'ampleur de la tâche, quelques chiffres suffisent : l'Amazonie s'étend sur près de 6 millions de km<sup>2</sup> et sur 9 pays. Cette forêt humide compte 390 milliards d'arbres appartenant à environ 16 000 espèces. On y trouve entre 210 et 300 espèces différentes par hectare. Au cours de leurs travaux, les chercheurs sont parvenus à une conclusion étonnante : la moitié des arbres amazoniens appartiennent à seulement 227 espèces. Ils voudraient à présent comprendre les causes de cette hyperdominance. Par ailleurs, ils ont recensé 11 000 espèces rares qui ne représentent en tout que 0,12 % des individus. Celles-ci sont menacées par la déforestation et risquent de disparaître avant même d'avoir été décrites convenablement.



Altise commune (*Altica oleracea*).  
© Inra - Bastien Castagneyrol



La queue fourchée du hêtre (*Furcula furcula*) est une chenille qui se nourrit sur le hêtre, les saules, les bouleaux et les chênes. Lorsqu'elle est dérangée, elle prend une posture défensive en projetant vers l'avant les deux expansions de sa « queue fourchée ».  
© Inra - Bastien Castagneyrol

## Honneur aux petites forêts fragmentées

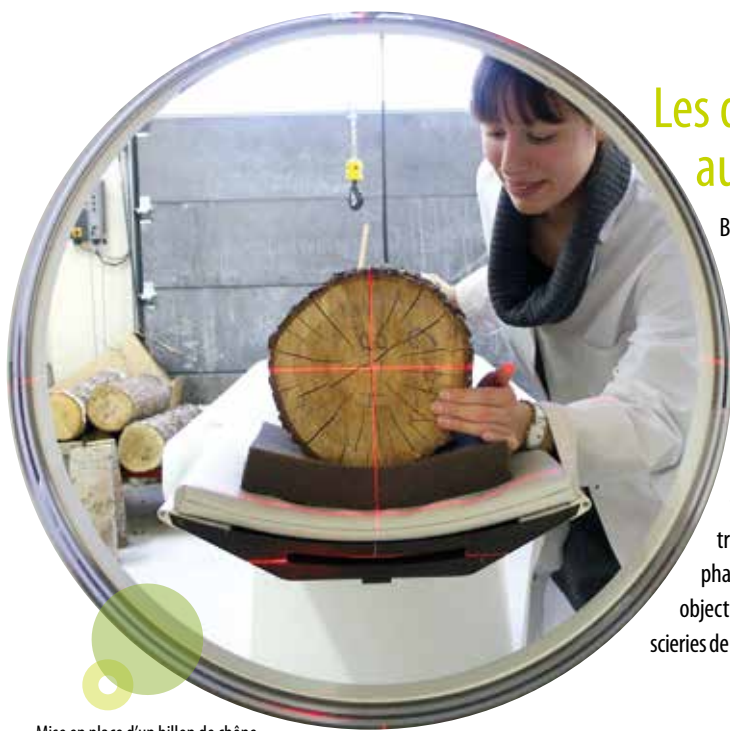
Les petites forêts, bois et bosquets sont très fréquents dans beaucoup de paysages en France. Leurs caractéristiques leur confèrent des rôles environnementaux, mais aussi économiques et culturels qui méritent d'être mieux connus, reconnus et valorisés. Ces petites forêts sont bien souvent le principal réservoir de biodiversité dans les paysages agricoles. Les espèces qu'elles abritent sont en général relativement communes, mais bon nombre d'entre elles rendent des services écosystémiques aux agriculteurs et à d'autres bénéficiaires, par exemple en abritant des pollinisateurs et en régulant les populations d'espèces considérées comme nuisibles aux activités humaines. Leur dispersion sur le territoire est en outre un atout pour une production de biomasse (bois énergie notamment) au plus près des utilisateurs. Les recherches visent aujourd'hui à mieux tirer profit de leurs spécificités dans la perspective d'une agroécologie des paysages.

# 4

## BOIS, CHASSE, RÉCRÉATION : LES AUTRES SERVICES DE LA FORÊT

### Améliorer la qualité du bois

Bois de construction, bois de chauffage, bois pour la production de bioéthanol : chacun a sa spécificité. Par exemple, pour obtenir du bioéthanol, il faut que la cellulose qui constitue les parois des cellules du bois, soit facile à séparer de la lignine. Pour la construction, ce sont plutôt les critères de robustesse et de durabilité (liés aux concentrations en phénols du bois) qui sont privilégiés. Les chercheurs de l'Inra tentent d'obtenir les meilleures variétés pour chaque usage. Pour cela, ils recherchent dans la variabilité génétique des espèces les plus utilisées les traits qui définissent la plus haute qualité du bois. Puis, par sélection, ils obtiennent les meilleures variétés. Jusqu'ici, c'étaient plutôt des caractères comme la vitesse de croissance ou la robustesse face aux maladies qui étaient privilégiés par les sélectionneurs. Désormais, ces derniers pourront aussi s'intéresser à la qualité du bois.



### Les défauts du bois au laser et aux rayons X

Bosses, creux, fentes : sous la rugosité de l'écorce, le relief des troncs révèle la présence de défauts, comme par exemple des nœuds qui diminuent la qualité du bois. Les scientifiques élaborent des techniques afin de détecter ces éléments cachés. L'utilisation d'un scanner à rayons X et le traitement par des algorithmes dédiés permettent de quantifier ces défauts internes sur des portions de troncs coupés. Ils cherchent aussi à révéler la présence de défauts sur des troncs d'arbres coupés ou sur pied en utilisant la technologie Lidar. Celle-ci permet de cartographier en 3D et de façon très précise la surface de l'écorce. Ces nouvelles méthodes encore en phase de développement, pourraient conduire à une évaluation plus objective de la qualité d'un tronc. Elles pourraient aussi permettre aux scieries de débiter les produits en tenant compte de la localisation des défauts.

Mise en place d'un billon de chêne pour tomographie à rayons X.  
© Inra - Yves Bernardi

### Observer le bois à la lumière infrarouge

Autre outil en développement pour évaluer la qualité du bois : la spectroscopie dans le proche et moyen infrarouge. Celui-ci permet d'analyser la composition chimique du bois. Les chercheurs élaborent actuellement des indicateurs pour connaître, à partir de cette composition, certaines propriétés du bois comme sa durabilité ou sa densité. L'idée, à terme, est de pouvoir analyser à haut débit les arbres sur pied ou des troncs déjà abattus afin de leur donner le destin le plus adéquat en fonction de leur qualité.

## Natura 2000 : havres de paix pour les espèces en danger

Natura 2000 est un réseau européen de sites naturels pour préserver des habitats en danger et des espèces rares ou en voie d'extinction. Il recouvre 18 % du territoire européen. Pour faire partie du réseau, les particuliers, associations ou collectivités locales doivent passer un contrat avec l'État. Ces contrats Natura 2000 peuvent être assimilés à des paiements pour services environnementaux. L'État rembourse l'investissement et les frais des actions engagées visant à protéger la biodiversité. Ce système, qui combine conservation et activités humaines, a permis à de très beaux projets de voir le jour, notamment en forêt. Cependant, les contrats signés en France pourraient être plus nombreux, notamment dans le secteur forestier, si l'on compare avec ce qui se passe chez nos voisins européens, surtout au Danemark. Des chercheurs de l'Inra se sont penchés sur le problème et ont montré qu'une réflexion mériterait d'être engagée sur les paiements actuellement mis en œuvre auprès des propriétaires forestiers, les encourageant davantage dans la participation à la conservation de la biodiversité. Les pertes en revenus liés au bois qu'imposent certaines actions de conservation ne sont pas suffisamment prises en compte. En ciblant mieux les propriétaires forestiers privés et les zones à fort potentiel en biodiversité, les contrats Natura 2000 pourraient améliorer le rapport coût-efficacité du système d'incitation actuel.

### La forêt des pique-niques et des poètes

Randonnées, balades en vélo, pique-niques, observation d'oiseaux... la forêt, c'est aussi un lieu pour se détendre, respirer et oublier le stress de la vie quotidienne. Ces bienfaits que Dame Nature prodigue généreusement ont une valeur économique qu'on ne peut négliger. Les chercheurs de l'Inra appréhendent et quantifient ces services récréatifs de la forêt. En 2010, ils ont réalisé une grande enquête en ligne pour connaître les habitudes des visiteurs des forêts, leurs goûts, leurs besoins et les distances qu'ils sont prêts à parcourir pour profiter d'une journée dans les bois. Ils ont montré que les visiteurs préfèrent les forêts mixtes, riches en espèces de feuillus et conifères. Les aires de parking ou de pique-nique sont aussi très importantes pour faire venir les familles. Un peu de relief, quelques points de vue et des rivières sont des éléments au fort pouvoir d'attraction. Grâce aux données recueillies, les chercheurs ont développé des cartes et des modèles qui permettent de faire des prévisions sur l'affluence de visiteurs dans chaque forêt, notamment en fonction de la population d'une région.



Prélèvement de rondelles de chêne.  
 © Inra - René Canta

### Chasseurs et forêt : c'est gagnant-gagnant

Il existe des zones forestières où les grands mammifères herbivores, trop nombreux, posent problème aux gestionnaires. Par exemple, lorsqu'ils sont en surpopulation, cerfs, chevreuils et sangliers mettent en péril la régénération naturelle de la forêt. L'une des réponses à ce trop-plein d'animaux peut être la chasse. Contrairement à une idée reçue, les chasseurs sont les premiers à vouloir la conservation du gibier, afin de pratiquer leur loisir et pouvoir remplir leur besace. Or, d'après les travaux d'une équipe de l'Inra, les réglementations qui encadrent la chasse sont quelque peu surannées : elles datent essentiellement des années 1960-70, lorsqu'effectivement, les populations animales étaient à des niveaux assez bas. Les chercheurs pensent qu'une régulation adaptée à la réalité des forêts d'aujourd'hui pourrait permettre à la chasse de devenir une alliée de la bonne gestion des forêts et de leur biodiversité.





© Inra - Michel Meuret

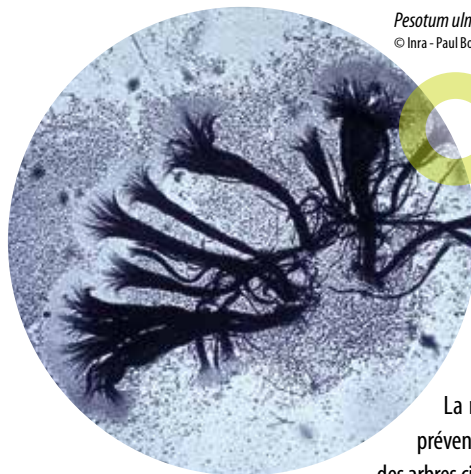
# LES RISQUES POUR LA FORÊT

## 1 LES FORÊTS AGRESSÉES

COMME TOUS LES ORGANISMES VIVANTS, LES ARBRES ONT DE DANGEREUX ENNEMIS. UNE FORÊT BIEN VERTE, DENSE, PROMETTEUSE, PEUT SOUDAIN VIRER AU BRUN DU FAIT DE MINUSCULES ET TENACES AGRESSEURS. LES PLUS REDOUTÉS PARMIS LES INSECTES SONT LES SCOLYTES ET LES CHENILLES PROCESSIONNAIRES. PARMIS LES CHAMPIGNONS, CITONS LA MALADIE DES BANDES ROUGES QUI TOUCHE LE PIN LARICIO, LE CHANCRE COLORÉ DU PLATANE OU BIEN ENCORE LA CHALAROSE DU FRÊNE.

### Le changement climatique, allié des bioagresseurs

Avec le changement climatique, les aires d'influence des bioagresseurs se modifient. Prenons par exemple, la maladie des bandes rouges. Causée par une famille de champignons appelée *Dothistroma*, elle empêche les pins de grandir. Présente depuis les années 1960 en France, elle n'a émergé véritablement que dans les années 1990 à la faveur d'un climat plus favorable. Aujourd'hui, elle remet en cause la viabilité du pin laricio en France que les sylviculteurs ont d'ailleurs cessé de planter. Autre exemple : le champignon *Diplodia pinea*, responsable du dépérissement des pousses du pin. Les chercheurs ont observé que ce sont les arbres ayant subi une forte sécheresse qui sont les plus sensibles. Avec l'augmentation de leur fréquence, l'impact de cette maladie devrait augmenter sérieusement.



*Pesotum ulmi*, graphiose de l'orme.  
© Inra - Paul Bondoux

### Combattre les champignons pathogènes

La meilleure arme contre les bioagresseurs des forêts reste la prévention. Parmi les règles de bon sens à respecter : ne pas planter des arbres cibles des maladies ou des insectes dans des zones propices à ces agresseurs. Les chercheurs ont montré qu'augmenter le nombre d'espèces dans une forêt peut, dans bien des cas, constituer un frein efficace aux insectes et champignons. Autre méthode de prévention : mettre à profit la variabilité génétique au sein des arbres. Déjà, les chercheurs de l'Inra ont mis au point un clone de platane, appelé Platanor, qui résiste au chancre coloré. Ils tentent de créer à présent une variété de frênes résistante à la chalarose. Mais que faire une fois l'agresseur présent dans une forêt ? Les moyens de lutte sont réduits puisque les traitements chimiques sont généralement interdits en forêt. Néanmoins, les scientifiques tentent d'ouvrir de nouvelles voies dans le domaine du biocontrôle. Par exemple, utiliser les virus qui s'attaquent aux champignons. L'Inra a obtenu d'excellents résultats pour le chancre du châtaignier. Reste à voir si ce succès peut être reproduit chez d'autres essences.

## Les Landes et les champignons

*Armillaria ostoyae*, champignon qui parasite les racines et le collet des résineux, cause d'importantes pertes économiques notamment dans le sud-ouest de la France sur les pins maritimes. Une équipe de l'Inra a montré que cette espèce d'armillaire a commencé son expansion dans les Landes à partir des plus anciennes zones boisées les plus anciennes, celles qui pré-existaient avant les grandes plantations de pins maritimes du XIX<sup>e</sup> siècle. Aujourd'hui, le champignon progresse encore dans le massif à partir de ces endroits et des nouveaux foyers de maladie, profitant de la continuité des plantations de pins sur près d'un million d'hectares. Ces résultats illustrent les risques phytosanitaires accrus liés aux forêts plantées d'une seule espèce d'arbre sur de vastes superficies.



### L'Inexorable invasion de la chenille de la processionnaire du pin

La chenille processionnaire du pin est un réel sujet d'inquiétude sanitaire : ses soies urticantes en forme de harpon peuvent entraîner des problèmes respiratoires, oculaires ou cutanés chez les humains. Elles peuvent aussi affecter, voire tuer, les animaux domestiques et le bétail. Enfin, sa présence peut faire chuter de moitié la productivité des forêts de résineux. Autrefois cantonné à la moitié sud de la France, le réchauffement climatique a permis à cet insecte d'étendre ses domaines en raison d'une meilleure survie hivernale. Telle une armée d'envahisseurs, elle progresse vers le Nord de 5 kilomètres par an. Le front naturel se trouve actuellement à la hauteur de Paris, mais le transport accidentel par l'homme a permis à des colonies de s'établir dans le Nord et l'Est de la France. Pour lutter contre la processionnaire, les chercheurs adaptent et améliorent des méthodes classiques comme l'épandage de *Bacillus thuringiensis*, le bacille tueur de chenilles. Mais ils testent aussi plusieurs alternatives originales :

#### • Tirs de paintball contre la chenille

A quoi jouent ces chercheurs qui tirent au fusil à paintball sur les troncs des pins ? Ils testent une technique innovante de confusion sexuelle. Leurs balles, développées par une société privée, ne contiennent pas de l'encre mais des phéromones femelles du papillon de la processionnaire du pin. En saturant une forêt de ces odeurs attractives, ils espèrent dérouter les mâles et limiter ainsi la fécondation. Cette invention, souple et pratique, a reçu le prix de l'innovation du ministère de l'écologie et pourrait être commercialisée dès 2017.

#### • Faire ripaille de la processionnaire

Et si l'un des moyens de réguler les populations de cet insecte était, tout simplement, la prédation ? Deux expériences menées par les chercheurs de l'Inra voudraient mettre à profit les services écologiques apportés par nos amis ailés. La première consiste à poser des nichoirs à mésanges en ville ou en forêt. Ces oiseaux peuvent dévorer en une seule journée jusqu'à 40 chenilles en moyenne, et jusqu'à 900 en période de nidification. De leur côté, les chauves-souris sont de redoutables prédateurs pour le papillon de la processionnaire. C'est ce qu'a montré une autre équipe de l'Inra dans la forêt des Landes. La présence des chauves-souris se traduit par une diminution des infestations au cours de l'année suivante. Une conclusion commune de ces deux travaux : la biodiversité est une valeur sûre à utiliser contre les espèces invasives.



Procession de chenilles processionnaire dans un pin.  
© Inra - Christelle Robinet

## Comment la cochenille a découvert la Corse

Depuis 1994, la cochenille du pin maritime fait des ravages en Corse. Cinquante mille hectares de forêt y sont menacés. Les larves de cet insecte se nourrissent de la sève des pins, et peuvent finir par tuer leur arbre hôte. Une équipe de l'Inra s'est demandée comment la cochenille avait réussi à atteindre et coloniser l'île de Beauté. Grâce aux outils de la génétique des populations, les chercheurs ont identifié les trois étapes de l'invasion. Peu après la Seconde Guerre mondiale, le ravageur est arrivé dans le sud-est de la France, probablement dans des grumes en provenance des Landes. Puis, l'insecte s'est naturellement étendu vers l'Italie. Enfin, c'est probablement le mistral qui a permis à la cochenille de faire le grand saut vers la Corse.

2

## L'ARBRE FACE À LA SÉCHERESSE

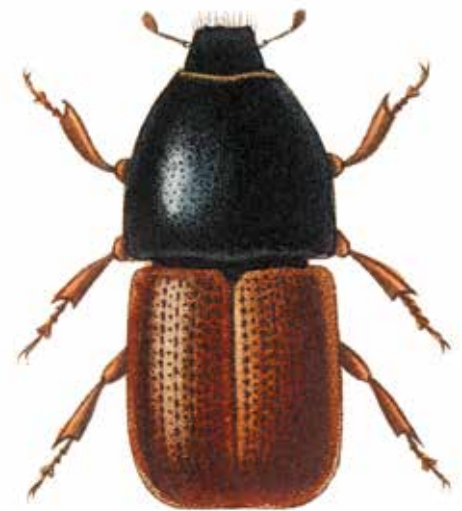
1920, 1976, 1989 OU 2003, CES ANNÉES ONT CONNU LES PLUS GRAVES SÉCHERESSES EN FORÊT EN FRANCE. CELLES-CI ONT DUREMENT AFFECTÉ LA SANTÉ DES ARBRES ET SÉVÈREMENT RÉDUIT LEUR PRODUCTION. MAIS IL NE FAUT PAS OUBLIER L'IMPACT SUR LE LONG TERME DE CES ÉPISODES SECS. LES ARBRES QUI SURVIVENT PEUVENT METTRE DES ANNÉES À RETROUVER LA FORME. OR, LE CHANGEMENT CLIMATIQUE NOUS PROMET DES SÉCHERESSES PLUS FRÉQUENTES ET PLUS AIGUËS. VOILÀ POURQUOI LES CHERCHEURS TENTENT DE COMPRENDRE LES EFFETS DU MANQUE D'EAU SUR LES ARBRES ET DE DÉCOUVRIR LEURS MÉCANISMES DE RÉSILIENCE. L'INRA CHERCHE AUSSI À AIDER LES SYLVICULTEURS À S'ADAPTER AUX SÉCHERESSES QUI NE MANQUERONT PAS DE REVENIR SANS CESSE.

### Des arbres affamés et affaiblis

Soumis à la sécheresse, les arbres doivent prendre des mesures drastiques pour ne pas se dessécher. L'une d'entre elles consiste à conserver leur eau en fermant leurs stomates, les pores par lesquels ils transpirent. Mais ceci a pour effet de stopper aussi la photosynthèse, et donc, la production de molécules carbonées qui leur apportent de l'énergie. Or, à l'instar des ours et des marmottes, les arbres doivent faire leurs réserves pour l'hiver, surtout ceux qui perdent leurs feuilles. Suite à de fortes sécheresses, les réserves de sucre et d'amidon des arbres peuvent se retrouver au-dessous des niveaux critiques. S'ils survivent à l'hiver, les arbres n'en seront pas moins affaiblis, affamés et auront des difficultés à développer leurs feuilles au printemps. Ils peuvent mettre des années à récupérer forces et réserves, et retrouver de bons niveaux de croissance.

### Les agresseurs opportunistes

Des arbres affaiblis sont des proies faciles pour les insectes et les champignons pathogènes. Ainsi, les pins éprouvés sont souvent la cible des scolytes, ces petits coléoptères xylophages. De même, des champignons qui s'attaquent aux racines, tels que l'armillaire, profitent de ce que les défenses de l'arbre sont au plus bas suite à une sécheresse. Des maladies contre lesquelles les arbres sains peuvent se défendre risquent de devenir mortelles pour des individus sortant d'une forte crise hydrique. Certains agresseurs sont capables de donner le coup de grâce à des arbres affamés par les sécheresses. Par exemple, les chenilles processionnaires ou les autres insectes qui s'attaquent aux feuilles peuvent, au retour de la belle saison, empêcher l'arbre de reconstituer ses réserves d'énergie déjà au plus bas. Le cycle infernal du dépérissement s'enclenche alors, parfois jusqu'à la mort de l'arbre.



Scolyte destructeur.  
*Le règne animal*, Georges Cuvier.  
Atlas 2. Paris, Éd. Fortin,  
Masson & Cie 1829 à 1843.

### Quels sont les arbres résilients ?

Les chercheurs de l'Inra ont remarqué qu'au sein d'un même peuplement d'arbres, certains individus sont plus résilients que d'autres. Désormais, ils identifient les caractéristiques de ces arbres résilients. Les travaux sont en cours, mais ils tiennent déjà une piste : les arbres qui présentent les plus fortes croissances résisteraient plutôt moins bien aux sécheresses extrêmes et pourraient mourir en premier. Ce serait plutôt les individus à croissance moyenne qui se révèlent des champions de la soif. Or, les exploitants des forêts ont naturellement tendance à privilégier les plus fortes productivités. Ils devront sans doute accepter un compromis entre performance de croissance et résistance aux aléas climatiques dans un futur proche.

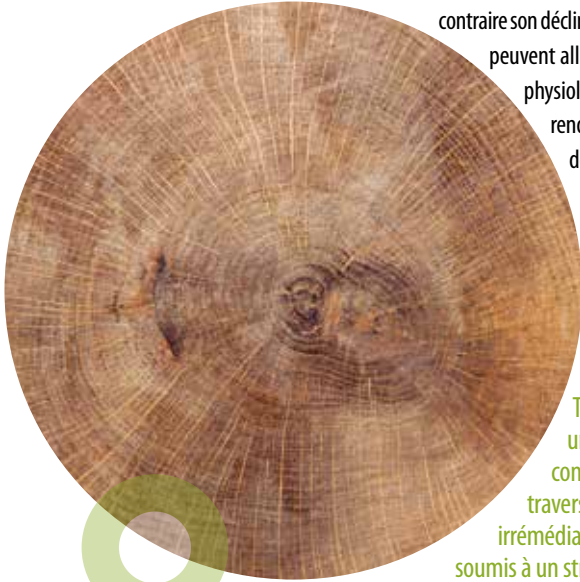


### Des collégiens chercheurs

Des collégiens qui arrachent une à une les feuilles des hêtres d'une pépinière de l'Inra, cela mérite-t-il une sanction ? Tout le contraire ! Ces jeunes gens font partie d'un projet scientifique et pédagogique plusieurs fois primé. Le projet Survivors est une alliance entre des chercheurs de l'Inra de Nancy-Lorraine, le Centre Permanent d'Initiative pour l'Environnement (CPIE) et le collège d'Einville-au-Jard. Il a pour but de comprendre comment les arbres meurent. Est-ce le manque d'eau qui provoque une embolie mortelle de leur système hydraulique ? Ou bien, est-ce parce qu'ils ne peuvent plus obtenir d'énergie de la photosynthèse qu'ils agonisent ? Pour répondre à cette véritable question scientifique, les chercheurs ont mis au point une expérience à laquelle les collégiens contribuent depuis trois ans. Ainsi, chaque année ils arrachent les trois quarts des feuilles d'un groupe d'arbres, tandis qu'ils opèrent une série de mesures sur des arbres privés d'eau et sur les arbres témoins. Ce projet est un lieu d'échange privilégié avec des chercheurs. Les collégiens apprennent que la science ne peut répondre aux questions qu'elle se pose qu'au prix de longs et patients efforts.

## Dendrochronologie : le temps long des arbres

Chaque année, les arbres ajoutent à leur tronc un anneau de croissance appelé cerne plus ou moins large. Pour les chercheurs, cette habitude est une aubaine. Ces anneaux concentriques enregistrent, pour qui sait les lire, la chronologie de chaque arbre et de son environnement. Ainsi, les années de sécheresse laissent un cerne très fin. La résilience de l'arbre aux perturbations, ou au contraire son déclin et sa mort, processus qui peuvent durer des années, s'inscrivent aussi dans le tronc. Mais les chercheurs peuvent aller plus loin grâce à l'étude de la composition isotopique des cernes qui révèle des caractéristiques physiologiques passées de l'arbre. Par exemple, ils ont montré qu'au cours du dernier siècle, les arbres ont rendu plus efficace leur utilisation de l'eau pour produire du bois. Principale explication : l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Pour absorber la même quantité de CO<sub>2</sub>, les arbres sont capables de diminuer l'ouverture de leurs stomates et ainsi réduire leur transpiration.



Coupe transversale d'un tronc de chêne.  
© Inra - Michel Pitsch

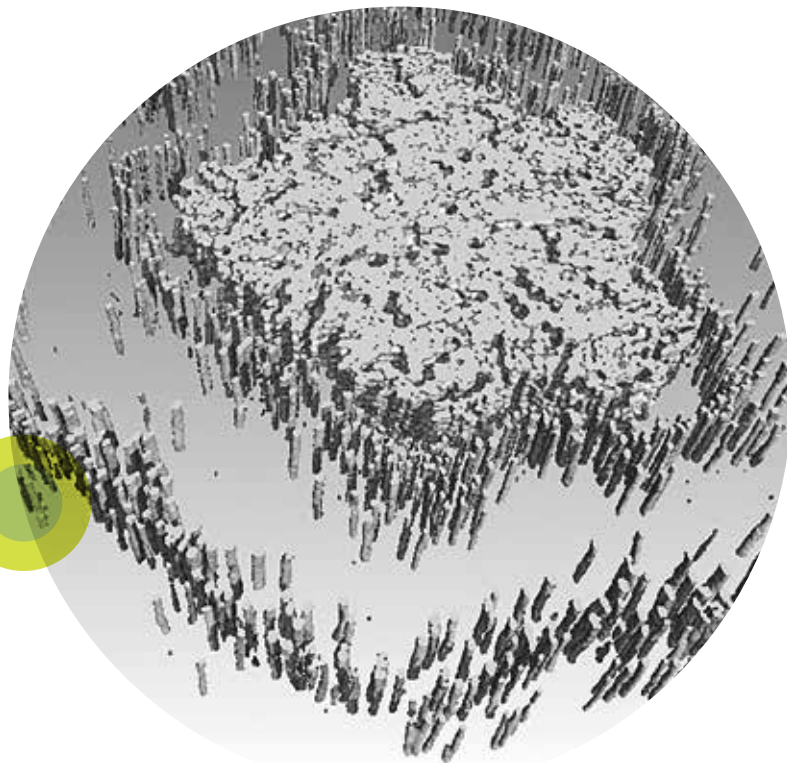


### La cavitation, quèsaco ?

Tous les personnels de santé du monde ont le réflexe d'ôter l'air de la seringue avant de faire une piqûre. En effet, une bulle d'air dans nos artères pourrait provoquer une embolie aux conséquences fatales. Les arbres connaissent un problème semblable. Leur sève circule à travers des vaisseaux situés sous l'écorce. Si une bulle d'air pénètre dans un vaisseau, celui-ci est irrémédiablement perdu. Cette embolie, appelée cavitation chez les arbres, survient lorsqu'ils sont soumis à un stress hydrique. Si la cavitation s'étend à trop de vaisseaux, l'arbre meurt.

### Un recordman de la soif

Et le grand prix de la résistance à la sécheresse dans la catégorie « arbres » est attribué à... *Callitris tuberculata*. Ce conifère s'est adapté aux régions les plus arides de l'Australie. D'après l'équipe internationale impliquant l'Inra qui a étudié ce champion, son système vasculaire permet le transport de la sève même sous des tensions d'eau extrêmement basses. Pourtant, avec le changement climatique, l'espèce n'est pas tirée d'affaire. Elle a en effet atteint les limites physiques de la stabilité de l'eau et ne pourra donc plus améliorer sa résistance à la sécheresse.



Imagerie 3D par microtomographie à rayons X du système vasculaire du bois de peuplier.  
© Inra - Éric Badel





3

# TEMPÊTES ET FEUX : DES ALÉAS EXTRÊMES

LES INCENDIES ET LES TEMPÊTES : VOICI DEUX DES GRANDES MENACES QUI PÈSENT SUR LA FORÊT. SI ON CONSIDÈRE TOUTES LES PERTES DE BOIS SURVENUES DEPUIS 1950 EN EUROPE, LES VENTS VIOLENTS SONT RESPONSABLES DE 51 % D'ENTRE ELLES, CONTRE 16 % POUR LES FLAMMES. LES CHERCHEURS DE L'INRA TENTENT DE MIEUX COMPRENDRE CES ALÉAS AFIN DE LIMITER LES PERTES. UNE MEILLEURE GESTION, DES PRATIQUES SYLVICOLES ADAPTÉES OU ENCORE LA PRISE EN COMPTE DES ASPECTS PHYTOSANITAIRES RÉDUIRONT NON SEULEMENT LA FACTURE POUR LES PROPRIÉTAIRES MAIS AUSSI LES CONSÉQUENCES POUR LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS.

## Dégâts sur le long terme

Pour le citoyen lambda, une fois la tempête passée, la vie peut redevenir normale assez vite, il suffit que les routes soient déblayées et les réseaux électriques et téléphoniques réparés. C'est tout le contraire pour les exploitants de la forêt, au lendemain de la tempête, les travaux sont faramineux et dangereux. Il faut récolter les dizaines de milliers de troncs aussi vite que possible sous peine de les voir pourrir et que les arbres restés debout soient dégradés par des insectes et des champignons. Il faut ensuite stocker pour conserver ce bois récolté pour un temps long. Pas question en effet de brader du bon bois en saturant le marché. Or, grave dilemme pour la filière sur lequel planchent les chercheurs de l'Inra : les moyens investis pour récupérer une partie du bois à terre sont autant de moyens non consacrés à une bonne gestion des forêts qui ont tenu le coup.



Feu expérimental.  
© Inra - Christian Slagmulder

## Peut-on se prémunir des dégâts de tempêtes ?

Dès qu'un arbre atteint 10 ou 12 mètres de hauteur, il subit la contrainte du vent. Il est donc susceptible d'être renversé ou cassé. Certes, mais si on ne peut pas arrêter une tempête, on peut en limiter les dégâts. La première recommandation des scientifiques : favoriser les essences les mieux adaptées au climat et au type de sol. Autre conseil : opérer des coupes et des éclaircies quand les arbres ont une croissance dynamique de façon à ce qu'ils soient plus robustes, plus trapus. Enfin, il ne faut pas laisser vieillir la forêt sans la récolter, car alors, c'est laisser le soin à la tempête de détruire le bois. En d'autres termes : des forêts d'âges variés, en bonne santé et pas trop hautes ont plus de chances de s'en tirer à bon compte en cas de coup dur.



Dégâts dus à la tempête « Klaus » (janvier 2009) sur la forêt de pins des Landes.  
© Inra - Frédéric Bernier

## Acclimater les arbres au gros temps

Les arbres sont en interaction permanente avec leur environnement et adaptent leur croissance aux différentes contraintes environnementales qu'ils subissent. Des chercheurs de l'Inra ont voulu savoir quelle était la réaction des hêtres face au vent dans un peuplement forestier. Pour imiter l'effet du vent, ils les ont fléchis à l'aide de treuils et de cordes plusieurs fois au cours d'une année. Les résultats sont très nets : les arbres ayant reçu les plus fortes flexions épaississent leur tronc. Leur croissance en circonférence, au cours d'une année, a atteint jusqu'à 150 % de plus que celle de leurs congénères épargnés. Ces résultats donnent un sens nouveau à certaines pratiques sylvicoles. En effet, les éclaircies permettent au vent de mieux pénétrer sous la canopée, conduisant les arbres à renforcer leur tronc en augmentant leur diamètre, et donc, à mieux se préparer pour résister aux tempêtes.



Mesure du rayonnement solaire en forêt.  
© Inra

## Des tempêtes virtuelles

Des chercheurs de l'Inra ont développé un modèle numérique qui simule l'interaction entre le vent et les arbres à l'échelle d'une forêt. Ceci, en fonction de la flexibilité et du point de rupture des arbres, mais aussi des modifications locales de la force du vent lorsque les arbres commencent à tomber. Ils ont ainsi montré que les dégâts se propagent en deux temps. Tout d'abord, les rafales descendantes brisent certains arbres, créant des trouées. Lorsque ces dernières atteignent une certaine taille, le vent s'accélère dans celles-ci et casse les arbres en bordure. Les dégâts augmentent alors dramatiquement et des « couloirs de vent » peuvent se former. Ces résultats montrent que la durée de la tempête, le mouvement des arbres, la turbulence du vent et son caractère aléatoire, sont à prendre en compte dans la prédiction des dégâts.



Arbre poussant à flanc de montagne dans les Alpes. Sous l'effet des contraintes extrêmes du milieu montagnard (vent, neige, pente) les arbres adoptent des ports torturés.  
© Inra - Hervé Cochard

## Combattre le feu par le feu

Les brûlages dirigés d'hiver ou les contre-feux sont des moyens de prévenir et de combattre les incendies en réduisant la biomasse disponible. Entre 2006 et 2010, le projet européen *Fire Paradox* a permis de sensibiliser les autorités à ces méthodes efficaces, qui sont aujourd'hui utilisées dans tout le grand sud de la France. Nouvelle étape : les recherches de l'Inra contribuent à réhabiliter l'utilisation traditionnelle du feu par les bergers, notamment dans les Pyrénées.

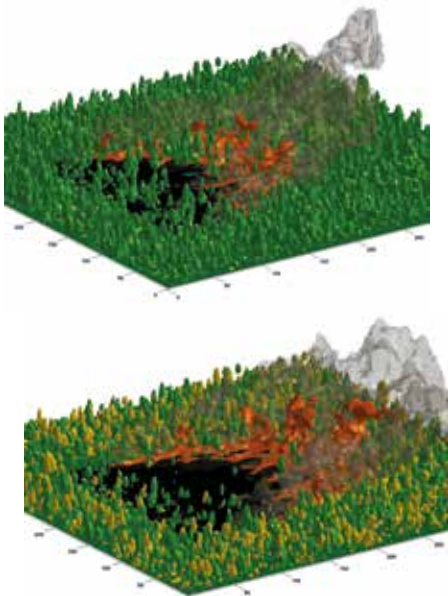


## Du feu dans les puces

Depuis une quinzaine d'années à l'Inra, les chercheurs développent et utilisent un simulateur du comportement du feu, en collaboration avec le *Los Alamos National Laboratory*. Appelé FIRETEC, cet outil permet de modéliser en 3D l'interaction entre le feu, le vent, le relief et la végétation. Parmi les points forts de ce modèle : la végétation y est intégrée avec une résolution spatiale de 2 mètres. Ainsi, les scientifiques étudient la propagation des flammes dans des zones très hétérogènes. Ils peuvent notamment évaluer l'impact de modifications naturelles ou artificielles de cette végétation : éclaircies, débroussaillage, attaques de scolytes ou sécheresses prolongées. Grâce à FIRETEC, les chercheurs ont pu, parmi d'autres projets, vérifier l'efficacité des brûlages dirigés, effectuer des recommandations sur les ouvrages de prévention pour la sécurité des pompiers, ou bien encore, tester les normes de débroussaillage appliquées dans les habitations des zones à risque.



Formation sur le brûlage dirigé dans le massif des Maures (Var).  
© Inra - Christophe Maitre

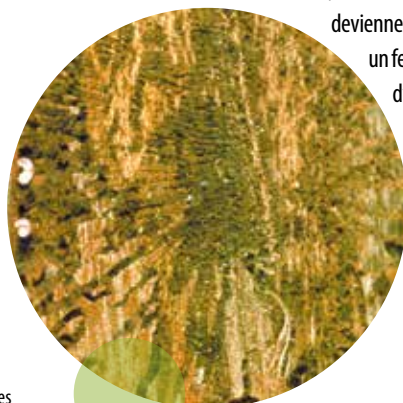


Images issues du modèle FIRETEC : en haut, on voit le comportement du feu dans un peuplement sain et en bas, le même peuplement lorsqu'une partie des arbres a été tuée par les scolytes (arbres roussis en jaune). On constate que le feu se propage plus vite et de manière plus intense dans le peuplement atteint (hauteur de flamme notamment).

© Inra - François Pimont

## Scolytes et incendies : alliés de circonstance

Les scolytes, ces petits coléoptères qui s'attaquent aux conifères, peuvent aggraver la vulnérabilité des forêts face aux incendies. C'est le résultat de travaux menés par une équipe franco-américaine grâce au modèle FIRETEC. Lorsque les pins infestés de scolytes meurent, leurs aiguilles roussissent et leurs branches se dessèchent. C'est là que le risque est maximum : ce combustible sec présent dans le haut de la canopée favorise les feux de cime, de loin les plus puissants et difficiles à combattre. Ces arbres roussis deviennent en outre un danger pour leurs voisins ayant survécu. Ainsi, un feu qui aurait eu un faible impact sur des arbres sains, peut faire d'importants dégâts en présence d'arbres tués par les scolytes. En France, scolytes et feux de forêt se conjuguent rarement car leurs zones d'influence ne sont pas les mêmes. Mais avec le changement climatique, les incendies pourraient remonter vers le Nord, alors que les scolytes pourraient profiter de l'affaiblissement des peuplements pour s'étendre. Mieux vaut être prévenus.



Galleries et larves de scolytes vecteurs de la graphiose de l'orme.  
© Inra - Jean Pinon



Forêt d'Ageville. Image d'un scanner laser terrestre. © Inra - Adelin Baïbacci

# QUELLES FORÊTS POUR LE FUTUR ?

JUSQU'À RÉCEMMENT, LES ARBRES TIRAIENT PLUTÔT PROFIT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE. ET POUR CAUSE, L'AUGMENTATION DES CONCENTRATIONS DE CO<sub>2</sub> DANS L'ATMOSPHÈRE STIMULE LA PHOTOSYNTHÈSE ET FAVORISE LEUR CROISSANCE. LE PROBLÈME, C'EST QUE CETTE HAUSSE DE TEMPÉRATURE AUGMENTE LEURS BESOINS EN EAU. OR, CELLE-CI COMMENCE À MANQUER, EN RAISON DE LA DIMINUTION DES PRÉCIPITATIONS, MAIS SURTOUT DE LA HAUSSE DE L'ÉVAPORATION CONSÉCUTIVE À CELLE DES TEMPÉRATURES. DÉJÀ, CERTAINES ESPÈCES SONT AFFECTÉES PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE. L'ÉPICÉA ET LE SAPIN COMMENCENT AUSSI À SOUFFRIR DES EFFETS COMBINÉS DE L'ÉLÉVATION DES TEMPÉRATURES ET DU MANQUE D'EAU ET PRÉSENTENT DES SIGNES DE DÉPÉRISSEMENT. PLUS GÉNÉRALEMENT, LA PLUPART DES ESPÈCES LIGNEUSES SERONT IMPACTÉES.

Grimpage dendrométrique sur un chêne dans la forêt d'Amance.  
© Inra - René Canta



Depuis toujours, la forêt s'est adaptée aux changements climatiques. Lentement, mais sûrement. Ainsi, au terme de la dernière glaciation, les chênes ont recolonisé la France en 2 000 ans environ. Mais cette fois, tout va trop vite. Comme le démontrent les chercheurs de l'Inra, certaines espèces peinent à se remettre des sécheresses successives, comme celles qui ont frappé la France en 2003 et 2006. Or, ces épisodes climatiques extrêmes vont se multiplier et pourraient devenir la norme à partir de 2050. Va-t-on assister à un dépérissement, voire à une disparition de forêts entières dans les prochaines années ? Cela dépendra en grande partie de notre capacité à limiter le réchauffement climatique. Mais même s'il n'excède pas 2°C, le sylviculteur va devoir adapter sa gestion pour préparer les peuplements à faire face aux changements à venir.

Pour accompagner le secteur forestier dans cette tâche immense, l'Inra est en première ligne : quelles sont les essences les mieux adaptées à un environnement donné ? Quelles ressources génétiques pour les forêts de demain ? Est-ce que les populations sont capables d'évoluer génétiquement sur un temps si court ? Les chercheurs étudient les différents écosystèmes et la façon dont les espèces, les populations, les individus, réagissent à l'évolution du climat. Le but étant bien sûr d'aider les forestiers à choisir les espèces et les arbres les plus adaptés. Avec cependant de grandes incertitudes quant au risque climatique. En effet, si l'accord de Paris prévoit de limiter la hausse des températures à moins de 2°C, rien n'indique aujourd'hui que nous y parviendrons. Des préconisations valables pour une augmentation des températures de 2°C peuvent se révéler inadaptées si la hausse se révèle plus importante. Une sacrée responsabilité, car les choix de plantation engagent les forestiers pour des périodes très longues, allant de 50 ans à plusieurs siècles.

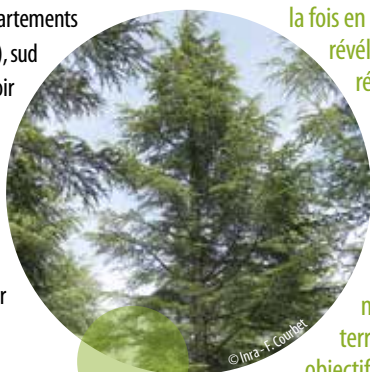
# 1 LA SYLVICULTURE DE DEMAIN

## Forêts mélangées et forêts pures face au changement climatique

Est-il préférable de privilégier les monocultures d'essences adaptées aux fortes chaleurs et au manque d'eau, ou de favoriser plusieurs espèces au comportement différent vis-à-vis des épisodes climatiques extrêmes ? Une grande étude européenne impliquant l'Inra, apporte certaines réponses. Entre 2010 et 2014, les chercheurs ont étudié six types forestiers d'Europe représentant les différents climats, depuis la Méditerranée jusqu'en Finlande, pour mesurer l'impact de la sécheresse sur les peuplements variés ou les monocultures. Les résultats sont contrastés, et parfois surprenants. Ainsi, les forêts mélangées boréales se révèlent moins résistantes à une sécheresse extrême que les monocultures, en raison de la forte compétition entre les espèces pour l'accès à l'eau, lorsqu'elle se raréfie. La présence du bouleau, par exemple, se révèle dommageable pour les autres espèces en mélange. Arbre à croissance rapide, il consomme énormément d'eau via ses racines peu profondes, au détriment des autres espèces. A l'inverse, les forêts mélangées des climats tempérés ou du Sud, régulièrement confrontées à des épisodes de sécheresse, sont moins impactées que les monocultures. Il semble qu'il se produise des interactions positives entre les espèces, notamment pour l'accès aux ressources hydriques, pour l'acquisition des éléments nutritifs contenus dans le sol, le partage du domaine aérien et l'accès à la lumière. Mais prudence, si la forêt mélangée semble constituer une solution intéressante dans les régions qui connaissent déjà des épisodes de sécheresse réguliers, les chercheurs le reconnaissent : ils doivent encore affiner leurs connaissances avant de soumettre des recommandations précises aux sylviculteurs... d'ici quelques années.

### Le retour du cèdre

En 2100, l'actuel climat méditerranéen s'étendra jusqu'au sud de la Loire et certaines espèces, le hêtre par exemple, peineront à s'adapter à cette évolution. D'autres au contraire, pourraient prospérer. C'est le cas du cèdre de l'Atlas, introduit avec succès en France au XIX<sup>e</sup> siècle. Produisant un bois de qualité, durable, imputrescible, cet arbre à croissance relativement rapide séduit les sylviculteurs. Mais évidemment, tout n'est pas aussi simple. Oui, le cèdre résiste bien à la sécheresse mais à condition que ses racines puissent puiser l'eau en profondeur. Elles parviennent à s'immiscer sans mal le long des fissures des roches les plus dures, mais les horizons hydro-morphes ou compacts (marneux, argileux...) constituent des barrières infranchissables. Autre souci, l'arbre est sensible aux gelées tardives. Difficile de prévoir comment il s'adaptera à la période de transition qui conduira à terme au climat méditerranéen. En outre, l'arbre va être confronté à des parasites ou des champignons qui ne l'affectent pas dans son aire actuelle de répartition. Malgré ces incertitudes, les chercheurs de l'Inra estiment que l'arbre pourrait d'ores et déjà prospérer dans l'aire naturelle du chêne pubescent qui a les mêmes exigences climatiques : Aquitaine et Poitou-Charentes (en évitant les départements côtiers sous influence trop océanique), sud des Alpes et du Massif Central, couloir rhodanien jusqu'en Bourgogne. Un juste retour des choses quand on y pense puisque le cèdre était présent au nord de la Méditerranée avant la dernière glaciation. S'il n'a pu revenir de lui-même, c'est parce que la mer lui barrait la route.



Arboretum écologique d'élimination du Caneiret, massif de l'Estérel (Var).  
© Inra - C. Ducatillon

### Une mine d'or vert

Au cours des années 1960-1970, en complément de ses arboretums historiques de collections comme Amanche (Nancy) et la Villa Thuret (Antibes), l'Inra a mis en place un réseau d'arboretums dits « écologiques ». Objectif : tester des espèces à même de répondre aux problèmes qui se posaient à l'époque, qu'il s'agisse de la reforestation rapide après incendie, de la tolérance à la pollution atmosphérique ou du remplacement d'arbres assaillis par un ravageur. Désormais en partie gérés par l'Office National des Forêts (ONF), ces arboretums font depuis peu l'objet de toutes les attentions. Et pour cause, les travaux d'inventaire en cours révèlent que parmi les centaines d'espèces d'arbres qui y ont été installés, certaines ont fait preuve d'une résistance stupéfiante. Plantées dans des milieux parfois difficiles (le but étant d'en éliminer la plupart pour ne retenir que les mieux adaptés) et confrontées à des conditions climatiques parfois très éloignées de leur aire d'origine, elles ont malgré tout survécu. Mieux, certaines espèces, installées à la fois en Normandie, en zone de montagne et en zone méditerranéenne se sont révélées capables de résister aussi bien aux gelées tardives qu'aux sécheresses récurrentes. Ces championnes de l'adaptation peupleront-elles demain les forêts françaises ? Il est évidemment trop tôt pour le dire. Pour les chercheurs, le travail consiste maintenant à analyser ces résultats et à explorer plus avant ces ressources biologiques méconnues afin d'en extraire des ressources génétiques adaptées aux besoins des forestiers : production de bois d'œuvre ou de biomasse, revégétalisation de sols nus... Et l'avenir ? Eh bien l'Inra réfléchit avec ses partenaires à la création d'un réseau de nouveaux dispositifs répartis de façon plus homogène sur l'ensemble du territoire national et peuplés cette fois-ci d'espèces choisies en fonction des objectifs actuels, à savoir la sélection d'espèces adaptées au climat du futur.

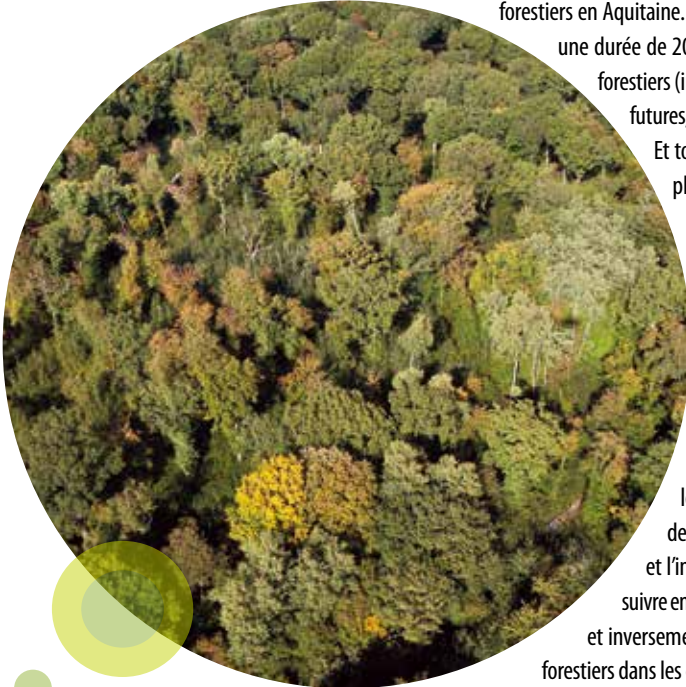


## 50 hectares de parcelles pour imaginer la forêt de demain

Un laboratoire d'écologie terrestre à ciel ouvert ! Voilà le formidable outil dont disposent, depuis 2013, scientifiques et sylviculteurs. Xylosylve-Ecosylve est une plate-forme conçue pour observer et analyser le comportement d'écosystèmes forestiers en Aquitaine. Le principal intérêt de ce dispositif, c'est qu'il va permettre de tester, sur une durée de 20 ans minimum, huit scénarios sylvicoles innovants. Objectif : aider les forestiers (impliqués dès l'origine dans le projet) à adapter leur activité aux évolutions futures, qu'il s'agisse du changement climatique ou des exigences de production.

Et tout cela en veillant au respect de l'environnement. Le choix des essences plantées dans les différentes parcelles ainsi que les méthodes de culture reflètent ces préoccupations. Ici, on cherche à maximiser la production de biomasse. Là, on vise l'amélioration du rendement de bois de production, en mêlant l'eucalyptus au traditionnel pin maritime. Plus loin, on plante des légumineuses (ajonc, genêt) dans les parcelles pour favoriser la nutrition minérale des arbres, en remplacement des intrants chimiques...

Les parcelles sont scrutées par une batterie de capteurs et appareils de mesure qui analysent en temps réel les cycles biochimiques et les échanges entre l'atmosphère, le couvert végétal et le sol. Ces enregistrements sur le long terme vont permettre d'affiner la compréhension du fonctionnement des écosystèmes, mais également de mesurer les bénéfices pour l'utilisateur et l'impact environnemental des différents scénarios. Ils permettront aussi de suivre en temps réel les effets du changement climatique sur l'évolution des parcelles, et inversement, de préciser et quantifier le rôle potentiel des différents écosystèmes forestiers dans les cycles des gaz à effet de serre. La plateforme Xylosylve-Ecosylve fait partie du réseau européen *Integrated Carbon Observation System (ICOS)*.



Vue aérienne de la canopée d'une forêt proche de Chalon-sur-Saône, Bourgogne.  
 © Inra - Christian Slagmulder

## Modéliser le futur de la forêt

Quel avenir pour ma forêt ? Cette question, les forestiers se la posent en permanence. Cette interrogation est de taille car les usages de la ressource bois évoluent sans cesse. Prenez le pin maritime par exemple. Il y a une trentaine d'années, il devait fournir du bois massif destiné notamment à la menuiserie traditionnelle ou aux charpentes. Il fallait donc des arbres de grande taille. Aujourd'hui, les industriels privilégient les arbres de petit diamètre, qu'ils vont utiliser pour la création de palettes, pour la chimie de la cellulose, la construction (ossatures bois, poutres en bois lamellé-collé, composites) ou pour la biomasse. Pour répondre à ces nouveaux besoins, le sylviculteur doit s'adapter. Et c'est justement pour l'aider à prendre les bonnes décisions qu'a été créé le Groupement d'Intérêt Scientifique « Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » (GIS Coop). Constitué d'un réseau de placettes disséminées dans des forêts des principales essences de production à travers tout le territoire, le GIS Coop a pour objectif la collecte des données sur la croissance des peuplements forestiers en fonction du climat, de la nature du sol et surtout des pratiques sylvicoles. Grâce à ces informations, les chercheurs élaborent des modèles de prévision de croissance à destination des gestionnaires, par exemple pour prédire comment évoluera un peuplement, et quelles ressources ils pourront en tirer dans 5, 10 ou 15 ans, en fonction des choix d'exploitation. Mais plus généralement, ils constituent une aide à la décision collective, puisqu'ils permettent de modéliser l'évolution des ressources d'un massif forestier tout entier.



Relevés floristiques sur placette.  
 © Inra - Patrick Behr

## 2 S'ADAPTER À LA RARETÉ DES RESSOURCES EN EAU

### Projet Pilote

Limiter au maximum les échecs de plantation, voilà un des objectifs du projet Pilote. Et le temps presse car les sécheresses successives commencent à peser lourdement sur le renouvellement des forêts. Pour preuve, 8 millions de jeunes arbres n'ont pas résisté à celle de l'été 2015. Pour survivre aux premières années, les jeunes arbres doivent développer le plus rapidement possible leur système racinaire. Mais ils se retrouvent fréquemment en compétition avec d'autres végétaux, comme la fougère, les ronces ou certaines graminées, qui luttent avec plus d'efficacité pour l'accès à l'eau. Pour donner les meilleures chances de survie aux plantations, les chercheurs testent, dans différentes forêts, de nouvelles méthodes de travail préparatoire, basées sur l'utilisation d'outils mécaniques capables d'intervenir localement, en minimisant l'impact sur l'environnement. Par exemple, en décompactant le sol jusqu'à 60 centimètres de profondeur, de manière à permettre aux plants d'installer plus facilement leur système racinaire. Ou en arrachant en profondeur les racines d'espèces concurrentes, pour retarder leur réapparition, comme alternative à l'utilisation d'herbicides. L'efficacité et l'impact des outils sont mesurés, et des propositions d'amélioration sont soumises aux constructeurs, qui les intègrent dans les versions suivantes. A la mise en œuvre, ces outils sont plus onéreux que les machines classiques. Mais leur plus grande efficacité les rend plus rentables sur le long terme, notamment dans certaines conditions fortement contraignantes pour les jeunes plants.

Système racinaire de pin maritime.  
© Inra - Guy Roussel



### Biljou©, un joyau pour les forestiers

Quelles conséquences vont avoir les sécheresses futures sur ma forêt, et que puis-je faire pour limiter les impacts ? Ces questions préoccupent au plus haut point les gestionnaires et propriétaires forestiers. Bonne nouvelle, grâce au modèle Biljou© développé par l'Inra en partenariat avec les forestiers et divers financeurs : ils peuvent désormais calculer l'intensité des sécheresses qui ont affecté leurs peuplements au cours des années précédentes, afin de déterminer précisément leur impact sur la productivité ou la santé des forêts. Mais surtout, l'outil de calcul mis à disposition est capable, en se basant sur différents scénarios climatiques, de quantifier l'intensité, la précocité et la sévérité des sécheresses futures, pour une région, un type de forêt (résineux, feuillus décidus (à feuillage caducs), couvert dense ou clair...) et une nature de sol précis. A ce titre, Biljou© représente un outil précieux d'aide à la réflexion puisqu'il permet au forestier d'appréhender la marge de manœuvre dont il dispose pour adapter sa production à l'évolution du climat.

### Optimiser l'utilisation de l'eau ? Il y a des gènes pour ça

Le chêne sessile et le chêne pédonculé représentent près d'un quart de la superficie forestière française et 11 % du bois récolté. Or, certaines populations montrent des signes inquiétants de dépérissement après chaque épisode de sécheresse extrême. Mais, ce qui interpelle, c'est qu'au sein d'une même population, les arbres ne réagissent pas tous de la même manière au stress hydrique. Certains dépérissent quand d'autres parviennent à optimiser l'utilisation de l'eau dont ils disposent, en limitant l'évaporation, sans stopper leur développement. Dans le cadre du projet H2Oak, les scientifiques cherchent à identifier les traits génétiques impliqués chez les chênes sessile et pédonculé dans l'efficacité d'utilisation de l'eau (*Water Use Efficiency* ou WUE), c'est-à-dire le rapport entre la croissance en biomasse et les pertes d'eau par transpiration. Deux objectifs sont poursuivis. D'une part, caractériser la diversité de la réponse à une sécheresse édaphique au sein des deux espèces, et d'autre part observer, sur le long terme, l'impact de la sylviculture sur cette diversité. Et notamment mesurer à quel point les choix d'exploitation compromettent ou améliorent la résistance des populations à la sécheresse.



Glands de chêne sessile.  
© Inra - Jeannine Goacolou

3

## DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES POUR LES FORÊTS



© Fotolia

LES ARBRES RENFERMENT UNE FORMIDABLE DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE. ON ESTIME QU'ELLE EST QUATRE FOIS PLUS IMPORTANTE QUE CELLE DES POPULATIONS HUMAINES. POURQUOI ? EH BIEN PARCE QUE LEUR HISTOIRE ÉVOLUTIVE EST BIEN PLUS LONGUE QUE LA NÔTRE ! MAIS CE QUI FASCINE LES GÉNÉTICIENS, C'EST L'INCROYABLE FACULTÉ D'ADAPTATION DONT ILS SONT CAPABLES. EN CAS DE BOULEVERSEMENT CLIMATIQUE, COMME CELUI RENCONTRÉ DURANT LA DERNIÈRE PÉRIODE DE RÉCHAUFFEMENT POST-GLACIAIRE, LA SÉLECTION NATURELLE FONCTIONNE À PLEIN RÉGIME ET FAVORISE L'ADAPTATION LOCALE AUX NOUVELLES PRESSIONS ENVIRONNEMENTALES. LORS DE LA REPRODUCTION EN EFFET, LES POPULATIONS D'ARBRES S'ÉCHANGENT D'ÉNORMES QUANTITÉS DE GÈNES, DONT CERTAINES COMBINAISONS RENFERMENT LA CLÉ DE L'ADAPTATION. C'EST CE QUI PERMET AUX INDIVIDUS DES GÉNÉRATIONS SUIVANTES DE S'ADAPTER. ET C'EST ASSEZ RAPIDE (À L'ÉCHELLE DE L'ARBRE, BIEN ENTENDU). LA PREUVE, C'EST QU'AU COURS DE L'Holocène, IL N'A FALLU QUE 6 000 ANS AUX CHÊNES, CONFINÉS DANS LE SUD DE L'EUROPE, POUR RECONQUÉRIR TOUT LE CONTINENT JUSQU'AU SUD DE LA SUÈDE. UNE DÉCOUVERTE PLUTÔT ENCOURAGEANTE POUR L'AVENIR, PUISQUE LES ARBRES VONT ÊTRE RAPIDEMENT CONFRONTÉS À UN CHANGEMENT CLIMATIQUE INTENSE. SI RAPIDEMENT QUE CETTE FOIS IL VA FALLOIR LEUR DONNER UN PETIT COUP DE POUCE. ET ÇA, C'EST LE TRAVAIL DES GÉNÉTICIENS. LEUR MISSION ? IDENTIFIER LES GÈNES IMPLIQUÉS DANS L'ADAPTATION AUX CONDITIONS CLIMATIQUES FUTURES, DÉTECTER LES INDIVIDUS QUI PRÉSENTENT LES BONNES COMBINAISONS ET FAVORISER LEUR INTER-CROISEMENT AVEC LES RESSOURCES ACTUELLES POUR PRÉPARER LES GÉNÉRATIONS SUIVANTES.

### Le génome du chêne séquencé... pour quoi faire ?

Trois ans ! C'est le temps qu'il aura fallu aux chercheurs de l'Inra et du CEA pour séquencer le génome du chêne pédonculé, l'une des espèces les plus présentes dans notre pays. Mais pour les généticiens, c'est maintenant que le vrai travail commence. Il s'agit désormais de décrire la variabilité de ce code génétique dans les populations naturelles qui existent au sein de l'espèce et découvrir notamment ceux qui sont impliqués dans l'adaptation aux contraintes climatiques. Mais c'est loin d'être évident. En effet, un processus aussi complexe met en œuvre un grand nombre de gènes qui travaillent en réseau. Lorsqu'ils y seront parvenus, les généticiens pourront sélectionner les individus qui présentent les bonnes combinaisons de gènes et orienter les croisements de manière à préparer les générations futures, à affronter les nouvelles conditions environnementales.



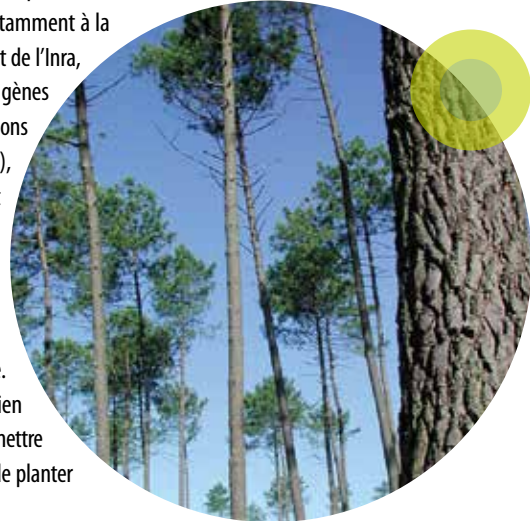
Chêne pédonculé.  
© Inra - A. Kremer



## La bonne température du pin

Ça va chauffer, dans le Sud-Ouest ! Et c'est une sacrée guigne pour le pin maritime, qui fait l'objet d'une sylviculture intensive en Aquitaine. Pour préserver cette importante filière, il est primordial de prédire la façon dont l'essence s'adaptera aux changements climatiques, et notamment à la baisse des précipitations. Grâce aux travaux de chercheurs européens, et notamment de l'Inra, on en a aujourd'hui une idée plus précise. Les scientifiques, après avoir sélectionné les gènes potentiellement impliqués dans l'adaptation au climat, ont identifié, dans 36 populations de pin maritime originaires de différents pays (Maroc, Portugal, Espagne et France), 18 mutations dont la fréquence présente une corrélation significative avec leur climat d'origine. Pour confirmer cette hypothèse, ils ont planté 19 de ces populations dans un même lieu, au Nord-Est de l'Espagne et mesuré leur taux de survie 5 ans plus tard. Bingo ! Les arbres qui portaient les mutations les plus en adéquation avec le climat du site d'expérimentation avaient largement supporté les conditions extrêmes. Et plus la fréquence des mutations s'éloignait de l'optimum, plus la mortalité était importante. Autant dire que le pin maritime provenant de Gascogne, où la pluviométrie est bien supérieure, n'était guère à la fête ! Mais le sacrifice était nécessaire : ces travaux vont permettre aux chercheurs d'accompagner les forestiers dans le choix des arbres qu'il convient de planter dans un lieu donné, en tenant compte de l'évolution future du climat.

Pin maritime (France).  
© Inra - Didier Bert



Forêt d'Ageville.  
Image d'un scanner laser terrestre.  
© Inra - Adelin Barbacci

## Ensemble, c'est mieux

Adopter une vision d'ensemble. C'est désormais le crédo des généticiens de l'Inra. Il y a 15 ou 20 ans, les chercheurs avaient tendance à cibler et étudier des caractéristiques bien précises, tels que la réponse de l'arbre à une sécheresse, la précocité du débourrement végétatif au printemps, le rythme de croissance ou encore la résistance à un agent pathogène. Aujourd'hui, non seulement ils étudient simultanément toutes les réponses des arbres à ces facteurs environnementaux, mais ils partagent et confrontent aussi leurs recherches aux travaux de scientifiques intervenant dans d'autres disciplines, notamment celles qui concernent l'adaptation au changement climatique. Ces interactions permettent de mieux appréhender la diversité des populations, et facilitent la caractérisation des ressources génétiques. Ainsi, les généticiens, en collaboration avec les spécialistes en dendrochronologie (l'étude de l'histoire d'un arbre par analyse d'échantillons de bois), étudient la réponse passée de l'arbre aux aléas climatiques. Ils s'intéressent notamment à la plasticité de certains individus. Autrement dit leur capacité à s'adapter aux perturbations de l'environnement, en modifiant très rapidement leur phénotype, alors que d'autres arbres de la même espèce en sont incapables. Ces champions de l'adaptation, font bien entendu l'objet de la plus grande attention !

4

# ADAPTER SA FORÊT EST-IL ÉCONOMIQUEMENT RÉALISTE

## Adapter la sylviculture : serait-il urgent d'attendre ?



Les choix de plantation engagent les forestiers sur des dizaines d'années et les décisions sont souvent irréversibles. A ce titre, la moindre erreur peut se révéler dramatique d'un point de vue économique.

Or, avec les incertitudes liées au changement climatique, les forestiers sont confrontés à des choix délicats. La Montagne Noire française (dans le Tarn) constitue un bon exemple car, depuis quelques années, l'épicéa y montre d'inquiétants signes de dépérissement. Mais que faire ? Le remplacer par une essence moins sensible au stress hydrique comme le Douglas peut être envisagé. Mais se pose alors la question du timing : quand substituer l'essence ? Dès la prochaine plantation ? À la suivante ? Le forestier ne devrait-il pas attendre d'avoir davantage d'informations pour se décider ? Ces différentes options sont associées à des coûts et des bénéfices bien différents pour le forestier. Pour aider les gestionnaires à prendre la bonne décision, l'Inra développe des outils de calcul économique qui tiennent compte des incertitudes liées aux impacts du changement climatique. En effet, à l'heure actuelle, ils sont encore largement incertains, au moins localement. Dans la Montagne Noire, par exemple, une étude de l'Inra montre ainsi qu'il peut être pertinent d'un point de vue économique de remplacer immédiatement l'épicéa par le Douglas si le changement climatique génère d'importantes mortalités au sein de la population d'épicéa. Sinon, il vaut mieux attendre... quelques années, voire plus, afin de minimiser les coûts de l'adaptation pour le forestier.

 Pins Douglas issues de populations ouest-américaines.  
© Inra - Olivier Bertel



### L'union fait l'AFORCE

Renforcer les relations entre organismes de recherche et de gestion, voilà l'enjeu du Réseau mixte technologique (RMT) AFORCE, mis en place en 2008.

Rassemblant 16 partenaires du milieu forestier - organismes de recherche, de développement, de gestion, d'enseignement et de formation - il a pour objectif d'accompagner les forestiers dans la préparation des forêts au changement climatique. C'est d'ailleurs sous leur impulsion qu'a été créé le réseau AFORCE, les gestionnaires manquant de recommandations précises pour adapter leur activité face à un futur incertain.

Le réseau s'organise autour de 5 thèmes de travail et s'efforce de répondre à trois problématiques principales soulevées par les forestiers : la forêt peut-elle continuer à produire de la même manière ? Sa survie est-elle en jeu ?

Pourra-t-elle encore atténuer les émissions de gaz à effet de serre si elle est elle-même affectée par le climat ? Déjà, les acquis de projets de recherche font l'objet d'applications sur le terrain et des outils d'aide à la décision commencent à être proposés aux forestiers, pour les aider notamment à prévoir l'évolution du climat et ses conséquences pour leur forêt.

## CONTACTS SCIENTIFIQUES

### UNE PANOPLIE DE SERVICES FORESTIERS

#### UNITÉ ÉCOLOGIE ET ÉCOPHYSIOLOGIE FORESTIÈRES (INRA, UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

##### **Bernard Longdoz**

(les forêts, sources ou puits de carbone ?)  
longdoz@nancy.inra.fr - 03 83 39 73 03

##### **Damien Bonal**

(les plus grands stockeurs de carbone d'Amazonie, biodiversité) - bonal@nancy.inra.fr - 03 83 39 73 43

##### **Nicolas Marron** (taillis à courte rotation)

marron@nancy.inra.fr - 03 83 39 73 30

#### UNITÉ ÉCOLOGIE DES FORÊTS MÉDITERRANÉENNES

##### **Guillaume Simioni** (forêt de Font-Blanche)

guillaume.simioni@avignon.inra.fr - 04 32 72 29 03

#### LABORATOIRE D'ÉTUDES DES RESSOURCES FORÊT-BOIS (INRA, ENGREF)

**Cyrille Rathgeber** (grossir et prendre du poids chez les arbres) - rathgebe@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 64

##### **Thierry Constant** (les défauts du bois au laser et rayons X)

constant@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 66

#### INTERACTION SOL PLANTE ATMOSPHÈRE (INRA, BORDEAUX SCIENCE AGRO)

##### **Laurent Augusto** (le sol, puits de carbone)

laurent.augusto@bordeaux.inra.fr - 05 57 12 25 23

#### UNITÉ BIOGÉOCHIMIE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

##### **Laurent Saint-André** (les cendres de la fertilité ; le sol, puits de carbone)

st-andre@nancy.inra.fr - 03 83 39 73 36

#### UNITÉ INTERACTIONS ARBRES/MICRO-ORGANISMES (INRA, UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

##### **Francis Martin** (champignons symbiotiques)

francis.martin@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 80

#### UNITÉ BIODIVERSITÉ, GÈNES ET COMMUNAUTÉS (INRA, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX)

##### **Bastien Castagneyrol** (les forêts, trésor de biodiversité)

bastien.castagneyrol@pierroton.inra.fr - 05 57 12 27 30

#### DYNAMIQUES ET ÉCOLOGIE DES PAYSAGES AGRIFORESTIERS

##### **Marc Deconchat** (honneur aux petites forêts fragmentées)

marc.deconchat@toulouse.inra.fr - 05 61 28 54 92

#### UNITÉ AMÉLIORATION, GÉNÉTIQUE ET PHYSIOLOGIE FORESTIÈRES

##### **Vincent Segura** (améliorer la qualité du bois)

vincent.segura@orleans.inra.fr - 02 38 41 78 11

#### LABORATOIRE D'ÉCONOMIE FORESTIÈRE (INRA, AGROPARISTECH)

##### **Anne Stenger** (Natura 2000)

anne.stenger@nancy.inra.fr - 03 83 39 68 63

##### **Jens Abildtrup** (les forêts des pique-niques et des poètes ; chasseurs et forêts)

jens.abildtrup@nancy.inra.fr - 03 83 39 68 64

### LES RISQUES POUR LA FORÊT

#### UNITÉ INTERACTIONS ARBRES/MICRO-ORGANISMES (INRA, UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

##### **Benoit Marçais** (bio-agresseurs des forêts)

benoit.marcais@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 53

#### UNITÉ BIODIVERSITÉ, GÈNES ET COMMUNAUTÉS (INRA, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX)

##### **Cyril Dutech** (les Landes et les champignons)

cyril.dutech@pierroton.inra.fr - 05 57 12 27 25

##### **Sylvain Delzon** (cavitation)

sylvain.delzon@ecologie.u-bordeaux1.fr - 05 40 00 38 91

##### **Céline Meredieu** (tempêtes)

celine.meredieu@pierroton.inra.fr - 05 57 12 28 61

#### UNITÉ DE RECHERCHE ZOOLOGIE FORESTIÈRE

##### **Alain Roques** (invasion de la chenille processionnaire du pin)

alain.roques@orleans.inra.fr - 02 38 41 78 58

#### UNITÉ ENTOMOLOGIE ET FORÊT MÉDITERRANÉENNE

##### **Jean Claude Martin**

(tirs de paintball contre la processionnaire du pin)

jean-claude.martin@avignon.inra.fr - 04 32 72 29 11

#### CENTRE DE BIOLOGIE POUR LA GESTION DES POPULATIONS

##### **Carole Kerdelhue**

(la cochenille du pin maritime en Corse)

carole.kerdelhue@supagro.inra.fr - 04 30 63 04 35

#### UNITÉ ÉCOLOGIE ET ÉCOPHYSIOLOGIE FORESTIÈRES (INRA, UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

##### **Nathalie Breda**

(l'arbre face à la sécheresse ; des collégiens chercheurs)

nbreda@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 48

##### **Stéphane Ponton** (dendrochronologie)

ponton@nancy.inra.fr - 03 83 39 73 25

#### LABORATOIRE D'ÉTUDES DES RESSOURCES FORÊT-BOIS (INRA, ENGREF)

##### **Thierry Constant** (acclimater les arbres au gros temps)

constant@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 66

#### INTERACTION SOL PLANTE ATMOSPHÈRE (INRA, BORDEAUX SCIENCE AGRO)

##### **Sylvain Dupont** (tempêtes virtuelles)

sylvain.dupont@bordeaux.inra.fr - 05 57 12 24 33

#### UNITÉ ÉCOLOGIE DES FORÊTS MÉDITERRANÉENNES

##### **François Pimont**

(combattre le feu par le feu, scolytes et incendies)

francois.pimont@avignon.inra.fr - 04 32 72 29 47

### QUELLES FORÊTS POUR LE FUTUR ?

#### UNITÉ ÉCOLOGIE DES FORÊTS MÉDITERRANÉENNES

##### **Hendrik Davi** (la sylviculture de demain)

hendrik.davi@avignon.inra.fr - 04 32 72 29 99

##### **François Courbet** (le retour du cèdre)

francois.courbet@avignon.inra.fr - 04 32 72 29 69

#### UNITÉ ÉCOLOGIE ET ÉCOPHYSIOLOGIE FORESTIÈRES (INRA, UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

##### **Damien Bonal** (forêts mélangées et forêts pures face au changement climatique)

bonal@nancy.inra.fr - 03 83 39 73 43

#### VILLA THURET

##### **Catherine Ducatillon**

(une mine d'or vert, réseau d'arboretums)

catherine.ducatillon@sophia.inra.fr - 04 97 21 25 02

#### UNITÉ EXPÉRIMENTALE FORÊT PIERROTON

##### **Patrick Pastuszka** (50 parcelles pour imaginer la forêt de demain ; modéliser le futur de la forêt)

patrick.pastuszka@pierroton.inra.fr - 05 57 12 28 16

#### LABORATOIRE D'ÉTUDES DES RESSOURCES FORÊT-BOIS (INRA, ENGREF)

##### **Catherine Collet** (projet Pilote)

collet@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 43

#### UNITÉ ÉCOLOGIE ET ÉCOPHYSIOLOGIE FORESTIÈRES (INRA, UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

##### **Nathalie Breda** (Biljou©)

nbreda@nancy.inra.fr - 03 83 39 40 48

##### **Olivier Brendel** (optimiser l'utilisation de l'eau)

brendel@nancy.inra.fr - 03 83 39 41 00

#### UNITÉ BIODIVERSITÉ, GÈNES ET COMMUNAUTÉS (INRA, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX)

##### **Christophe Plomion**

(ressources génétiques pour les forêts)

christophe.plomion@pierroton.inra.fr - 05 57 12 27 65

#### UNITÉ DE RECHERCHE AMÉLIORATION, GÉNÉTIQUE ET PHYSIOLOGIE FORESTIÈRES

##### **Catherine Bastien** (ressources génétiques pour les forêts)

catherine.bastien@orleans.inra.fr - 02 38 41 78 29

#### LABORATOIRE D'ÉCONOMIE FORESTIÈRE

##### **Marielle Brunette** (adapter la sylviculture est-il économiquement réaliste ?)

marielle.brunette@nancy.inra.fr - 03 83 39 68 54



147 rue de l'Université  
75338 Paris - Cedex 07  
France

Tél. : +33(0)1 42 75 91 86  
[inra.fr](http://inra.fr)



Juin 2016

